



**YÜKSEK SICAKLIKLARDAKİ MİKRO SENTETİK
LİFLİ GEOPOLİMER BETONLARIN ADERANS
DAYANIMININ İNCELENMESİ**

Kaan KOÇ

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

**YÜKSEK SICAKLIKLARDAKİ MİKRO SENTETİK LİFLİ GEOPOLİMER
BETONLARIN ADERANS DAYANIMININ İNCELENMESİ**

(Investigation of Adherence Strength of Micro-Synthetic Fiber Geopolymer Concretes under
High Temperature)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kaan KOÇ

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

Erzurum
Temmuz, 2024

KABUL ve ONAY TUTANAĞI

Kaan KOÇ tarafından hazırlanan “Yüksek Sıcaklıklardaki Mikro Sentetik Lifli Geopolimer Betonların Aderans Dayanımının İncelenmesi” başlıklı çalışması 26/07/2024 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. Gökhan KAPLAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mahmut KILIÇ <i>Atatürk 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

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2024-14083

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 “Yüksek Sıcaklıklardaki Mikro Sentetik Lifli Geopolimer Betonların Aderans Dayanımının İncelenmesi” 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	1	30
Kuramsal Temeller	1	30
Materyal ve Yöntem	5	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuç ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	5	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
Kaan KOÇ	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
26.7.2024	26.7.2024
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

Hoşgörüsüyle kendimi geliştirmem için rehberlik eden ve engin bilgi birikimiyle beni eğiten kıymetli saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN' a teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışması boyunca yardımını esirgemeyen ortak danışmanın Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK' a 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.

Kaan KOÇ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK SICAKLIKLARDAKİ MİKRO SENTETİK LİFLİ GEOPOLİMER BETONLARIN ADERANS DAYANIMININ İNCELENMESİ

Kaan KOÇ

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

Amaç: Sunulan tez çalışmasının amacı yüksek fırın cürufu esaslı ve farklı oranlarda mikro sentetik lif kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda farklı parametrelerin beton ile donatı arasındaki aderans dayanımına etkisinin deneysel olarak incelenmesidir.

Yöntem: Deneysel çalışma kapsamında her numuneden üç adet olmak üzere toplam 432 adet 100x200 mm boyutlarında silindir numune üzerinde pull-out testi uygulanmıştır. Çalışma kapsamında tüm numuneler yüksek fırın cürufu esaslı üretilmiştir. Geopolimer betonda alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Deney parametreleri, mikro sentetik lif hacmi (%0, %0,5 ve %1), aderans boyu (4d ve 8d), kür koşulları (oda sıcaklığı, 4 saat 80 °C ve 8 saat 80 °C), etriye varlığı ve yüksek sıcaklık etkisi (150 °C, 300 °C ve 600 °C) olarak belirlenmiştir.

Bulgular: Geopolimer beton karışımında lif kullanılması aderans dayanımını arttırmıştır. Fakat bu artış yüksek sıcaklık etkisi ve etriye kullanımı durumuna göre değişmektedir. Oda sıcaklığında bekletilen numunelerde lif hacminin arttırılması aderans dayanımını 3,37 kata kadar arttırmıştır. Aderans boyunun arttırılmasının aderans dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğu elde edilmiştir. Aderans boyunun arttırılması aderans dayanımını 6 kata kadar önemli ölçüde azaltmıştır. Etriye kullanılması, özellikle yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde aderans dayanımını arttırıcı yönde etki etmiştir. Ortam kürüne kıyasla sıcaklık kürünün uygulanmasının ve sıcaklık kür süresinin arttırılmasının aderans dayanımı üzerinde arttırıcı yönde etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Maruz kalınan sıcaklık değerinin artması da aderans dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımları oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre 8 kata kadar azalmıştır.

Sonuç: Geopolimer betonda lif takviyesinin aderans dayanımı üzerindeki etkisi %0,5' den %1'e arttırılması durumuna göre %0' dan %0,5'e arttırılması daha fazla etkili olmuştur. Aderans dayanımı üzerinde en önemli etkiyi yapan parametreler aderans boyu ve maruz kalınan yüksek sıcaklık değeridir. Özellikle 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımları önemli ölçüde azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aderans, kür süresi, aderans boyu, geopolimer beton, pull-out testi, yüksek sıcaklık

Temmuz 2024, 129 sayfa

ABSTRACT

MASTER DEGREE THESIS

INVESTIGATION OF ADHERENCE STRENGTH OF MICRO-SYNTHETIC FIBER GEOPOLYMER CONCRETES UNDER HIGH TEMPERATURE

Kaan KOÇ

Supervisor: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Co-Supervisor: Assist Prof. Dr. Barış BAYRAK

Objective: The aim of study is to experimentally examine the effect of different parameters on the bond strength between concrete and reinforcement in geopolymer concretes based on blast furnace slag and produced using micro synthetic fibers in different proportions.

Method: Within the scope of the experimental study, a pull-out test was performed on a total of 432 100x200 mm cylindrical samples, three from each sample. The samples were produced based on blast furnace slag. Sodium silicate and sodium hydroxide were used as alkaline activators in geopolymer mixture. Experimental parameters were micro synthetic fiber volume (0%, 0.5% and 1%), bond length (4d and 8d), curing conditions (room temperature, 4 hours 80 °C and 8 hours 80 °C), stirrup usage and the high temperature effect (150 °C, 300 °C and 600 °C).

Findings: Using fiber in the geopolymer concrete mixture increased the bond strength. However, this increase varies depending on the effect of high temperature and the stirrup usage. Increasing the fiber volume in samples kept at room temperature increased the adherence strength by up to 3.37 times. It has been found that increasing the bond length has a significant effect on the bond strength. Increasing the bond length significantly reduced the bond strength by up to 6 times. The stirrup usage had an effect on increasing the bond strength, especially in samples exposed to high temperatures. It has been determined that applying heat cure and increasing the temperature cure time has an increasing effect on bond strength compared to ambient cure. Increasing the exposed temperature, also significantly reduced the adherence strength. The adherence strength of samples exposed to 600 °C decreased up to 8 times compared to samples kept at room temperature.

Conclusion: The effect of fiber reinforcement on bond strength was more effective when increased from 0% to 0,5% than when increased from 0,5% to 1%. The parameters that have the most important impact on bond strength are bond length and high temperature effect. In particular, the bond strength of samples exposed to 600 °C decreased significantly.

Keywords: Bond strength, curing time, bond length, geopolymer concrete, pull-out test, high temperature

July 2024, 129 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
Aderans Kavramı	5
Geopolimer Beton Kavramı	8
MATERYAL VE YÖNTEM	18
Materyal	18
Yöntem.....	30
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	33
Geopolimer Betonun Basınç Dayanımı	33
Aderans dayanımı-sıyrılma ilişkisi	35
Deney Parametrelerinin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi	58
Yüksek sıcaklığın aderans dayanımı üzerindeki etkisi	58
Kür sıcaklığı ve kür süresinin aderans dayanımı üzerine etkisi.....	64
Aderans boyunun aderans dayanımı üzerindeki etkisi.....	72
Etriye varlığının aderans dayanımı üzerindeki etkisi.....	80
Mikro sentetik lif kullanılmasının aderans dayanımı üzerindeki etkisi	88
Göçme Modları	99
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR.....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	116

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. 1 m ³ için Beton Karışım Miktarları (kg)	19
Tablo 2. Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri	20
Tablo 3. Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri (%)	20
Tablo 4. Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri.....	22
Tablo 5. Kuvars Tozunun Kimyasal Özellikleri	23
Tablo 6. Mikro Sentetik Liflerin Teknik Özellikleri	25
Tablo 7. Sodyum Hidroksitin Kimyasal Özellikleri (%)	25
Tablo 8. Sodyum Silikatın Kimyasal Özellikleri (%).....	25
Tablo 9. 8 mm ve 14 mm Çaplı Donatıların Özellikler	26
Tablo 10. Deney Parametreleri	30
Tablo 11. 7 Günlük Basınç Dayanımı Sonuçları	34
Tablo 12. Lifsiz Numunelerin Aderans Testi Sonuçları	46
Tablo 13. %0,5 Lifli Numunelerin Aderans Testi Sonuçları.....	50
Tablo 14. %1 Lifli Numunelerin Aderans Testi Sonuçları	54
Tablo 15. Yüksek Sıcaklığın Lifsiz Numunelerin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi	59
Tablo 16. Yüksek Sıcaklığın %0,5 Lifli Numunelerin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	60
Tablo 17. Yüksek Sıcaklığın %1 Lifli Numunelerin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi...	61
Tablo 18. Kür Sıcaklığı ve Kür Süresinin Lifsiz Numunelerde Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi	66
Tablo 19. Kür Sıcaklığı ve Kür Süresinin %0,5 Lifli Numunelerde Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi	67
Tablo 20. Kür Sıcaklığı ve Kür Süresinin %1 Lifli Numunelerde Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi	68
Tablo 21. Lifsiz Numunelerde Aderans Boyunun Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	74
Tablo 22. %0,5 Lifli Numunelerde Aderans Boyunun Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi	75
Tablo 23. %1 Lifli Numunelerde Aderans Boyunun Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi...	76
Tablo 24. Lifsiz. Numunelerde Etriye Varlığının Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	82
Tablo 25. %0,5 Lifli Numunelerde Etriye Varlığının Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi..	83
Tablo 26. %1 Lifli Numunelerde Etriye Varlığının Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Aderans mekanizması	5
Şekil 2. Aderansı oluşturan kuvvetler	6
Şekil 3. Donatı etrafında oluşan çatlakların gösterimi	7
Şekil 4. Beton matrisi içerisinde ve donatı etrafında oluşan hava boşlukları	7
Şekil 5. Farklı yüzeyli donatı şekilleri	8
Şekil 6. Geopolimer beton benzeri yapı malzemelerinin kullanıldığı Pantheon (Anonim a, 2023) ve Kolezyum (Anonim b, 2023) yapıları	10
Şekil 7. Dünya genelinde 2021 ve 2022 yıllarında üretilen çimento ve klinkerin dağılımı.....	14
Şekil 8. Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği' ne kayıtlı çimento fabrikaları.....	15
Şekil 9. Geopolimer karışımında kullanılan malzemeler (a) yüksek fırın cürufu (b) silis dumanı (c) ince agrega (d) kuvars agregası.....	19
Şekil 10. Yüksek fırın cürufunun XRD deseni	21
Şekil 11. Yüksek fırın cürufu elek analizi.....	21
Şekil 12. Silis dumanının XRD deseni	22
Şekil 13. Silis dumanı elek analizi	22
Şekil 14. Kuvars tozu XRD deseni.....	23
Şekil 15. Kuvars tozu elek analizi	24
Şekil 16. Dere kumu elek analizi.....	24
Şekil 17. 8 mm ve 14 mm çaplı donatıların geometrik özellikleri	26
Şekil 18. 14 mm çapındaki donatıların gerilme-şekil değiştirme grafiği	27
Şekil 19. 8 mm çapındaki donatıların gerilme şekil değiştirme grafiği	27
Şekil 20. Beton dökümü	28
Şekil 21. Numunelerin üretiminden deney anına kadarki işlemlerin şematik gösterimi.....	29
Şekil 22. Deney numunelerinin geometrik özellikleri.....	31
Şekil 23. Deney düzeneği	32
Şekil 24. Basınç dayanımı karşılaştırması.....	34
Şekil 25. Klasik aderans dayanımı sıyrılma grafiği	36
Şekil 26. 20 °C bekletilen, etriyeli ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	37
Şekil 27. 20 °C bekletilen, etriyesiz ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	37
Şekil 28. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	37

Şekil 29. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	38
Şekil 30. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	38
Şekil 31. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	38
Şekil 32. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	39
Şekil 33. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	39
Şekil 34. 20 °C bekletilen, etriyeli ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	39
Şekil 35. 20 °C bekletilen, etriyesiz ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	40
Şekil 36. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	40
Şekil 37. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	40
Şekil 38. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	41
Şekil 39. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	41
Şekil 40. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	41
Şekil 41. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	42
Şekil 42. 20 °C bekletilen, etriyeli ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	42
Şekil 43. 20 °C bekletilen, etriyesiz ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	42
Şekil 44. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	43
Şekil 45. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri	43

Şekil 46. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri	43
Şekil 47. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri	44
Şekil 48. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri	44
Şekil 49. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri	44
Şekil 50. Enerji sönümlleme kapasitesinin şematik gösterimi	45
Şekil 51. Lifsiz numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması	62
Şekil 52. %0,5 Lifli numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması	62
Şekil 53. %1 Lifli numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması	62
Şekil 54. Lifsiz numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması (a) aderans dayanım sonuçları (b) aderans dayanım karşılaştırması.....	69
Şekil 55. %0,5 lifli numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması (a) aderans dayanım sonuçları (b) aderans dayanım karşılaştırması.....	70
Şekil 56. %1 lifli numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması (a) aderans dayanım sonuçları (b) aderans dayanım karşılaştırması.....	71
Şekil 57. Lifsiz numunelerde aderans boyunun aderans dayanımına etkisi.....	77
Şekil 58. %0,5 lifli numunelerde aderans boyunun aderans dayanımına etkisi.....	77
Şekil 59. %1 Lifli numunelerde aderans boyunun aderans dayanımına etkisi.....	78
Şekil 60. Aderans bölgesindeki gerilmelerin şematik gösterimi	79
Şekil 61. Lifsiz numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisi	85
Şekil 62. %0,5 lifli numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisi.....	85
Şekil 63. %1 lifli numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisi.....	86
Şekil 64. Lifsiz numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması.....	86
Şekil 65. %0,5 lifli numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması.....	87
Şekil 66. %1 lifli numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması.....	87
Şekil 67. Lif Takviyesinin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	91
Şekil 68. 20 °C' de bekletilen numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisi	95
Şekil 69. 150 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisi	95

Şekil 70. 300 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisi	96
Şekil 71. 600 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisi	96
Şekil 72. 20 °C' de bekletilen numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisinin karşılaştırması.....	97
Şekil 73. 150 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması.....	97
Şekil 74. 300 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması.....	98
Şekil 75. 600 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması.....	98
Şekil 76. Aderans deneylerinden sonra numunelerin görüntüsü.....	106

GİRİŞ

Sunulan bu yüksek lisans tez çalışmasının çıkış noktasını iki ana unsur oluşturmaktadır. Bunlardan birincisi yenilikçi ve sürdürülebilir bir beton türü olan ve aynı zamanda araştırmacıların son zamanlarda ilgi odağı olan geopolimer betondur. İkincisi ise betonarme elemanlarda beton ile donatı arasındaki uyumu sağlayan ve yapı elemanından beklenen performansı etkileyen en önemli unsurlardan bir tanesi olan aderans dayanımıdır. Sunulan tez çalışmasında bu iki kavram ele alınmış olup farklı parametreler ışığında değerlendirilmiştir. Aderans dayanımının tespiti için literatürde yaygın bir şekilde kullanılan *pull-out* testi uygulanarak deneysel bir çalışma yürütülmüştür deneysel çalışmanın parametreleri belirlenirken geopolimer ve aderans dayanımını etkileyen faktörler tercih edilmiştir.

Geopolimer beton, son yıllarda araştırmacıların ilgi odağı olan bir beton türüdür. Geopolimer beton, çevre dostu ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Geopolimer beton günümüzde yaygın olarak kullanılan ve hatta dünya çapında en çok tercih edilen geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak geliştirilmiştir. Esasen geopolimer betonun tarihçesi 20. yüzyılın ortalarına kadar geri gitmektedir. Bu açıdan bakıldığında geopolimer beton literatür açısından yeni bir beton türü diyebiliriz. Geopolimer kavramı ise tarihte ilk kez 1950' li yıllarda Sovyetler Birliği tarafından araştırılmaya başlanmış olup 1970' li yıllarda Fransız kimyager Joseph Davidovits tarafından kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve geliştirilmiştir. Davidovits geopolimer kavramı üzerinde dururken özellikle alüminyum ve silisyum içeren malzemelerin uygun alkali aktivatörlerle reaksiyona girdiğini ve bu reaksiyon zinciri sonucunda geleneksel betonda olduğu gibi priz alan ve sonunda da dayanıklı bir matrisin oluştuğunu belirtmiştir. Hatta bu açıdan bakıldığında geopolimer beton kavramı eski uygarlıkların kullanım olabileceği inşaat teknikleri ile de benzerlik içermektedir. Bu benzerlik Davidovits tarafından da ele alınmış olup geopolimer beton kavramı ile Mısır ve Roma uygarlıklarının inşaat tekniklerini irdeleyen akademik çalışmalarda yürütmüştür. Örneğin, Mısır piramitlerinde kullanılan bazı taş blokların kireç, kil ve silt gibi malzemeler içerdiği Davidovits tarafından öne sürülmüştür. Benzer bir durum Roma uygarlığında da karşımıza çıkmaktadır. Romalılar beton üretiminde puzolan malzemeler ve volkanik kül kullanılmışlardır. Görüldüğü üzere eski uygarlıklar geopolimer beton benzeri bir yapı malzemesi kullanarak hem sürdürülebilirlik (kendilerine yakın doğal kaynakları kullanmaları) hem de uzun ömürlü ve dayanıklılık açısından önemli bir atılım yapmışlardır. 1970' lerden

sonra 1980 ve 1990' larda geopolimer betonun önemli araştırmacılar tarafından daha kapsamlı şekilde ele alınmış olup çeşitli uygulama alanlarında kullanılmıştır. Özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Son yıllarda küresel ısınma tehdidine karşı inşaat sektöründe çevreci ve atık malzemelerin değerlendirilebildiği bir beton türü olması açısından geopolimer beton kavramı oldukça önemlidir. 2000' li yıllarda ise artık geopolimer betonun önemi araştırmacılar tarafından iyice fark edilmiş olup bu alandaki çalışmalar çeşitlilik kazanmıştır. Son yıllarda da karbon ayak izini azaltma potansiyelinden dolayı geopolimer beton çeşitli şekillerde ele alınmıştır. Özellikle inşaat sektöründe çevreci ve düşük karbon ayak izli yapı malzemelerine duyulan ihtiyaçtan dolayı geopolimer betona talebin artacağı yazar tarafından düşünülmektedir. Bu açıdan geopolimer betonun geleceğin inşaat malzemeleri arasında olacağı kanaati oluşmaktadır. Bahsedilen bu sebeplerden dolayı geopolimer beton bu çalışmanın ana unsurlarından bir tanesi olarak tercih edilmiştir.

Kolon, kiriş, perde duvar gibi betonarme yapı elemanlarının genel olarak beton fazı ve donatıdan oluştuğu bilinmektedir. Zaten betonarme kavramından bahsedebilmemiz için donatı ve betonun bir uyum içerisinde olması gerekmektedir. Aksi takdirde yapı elemanındaki beton ayrı donatı ayrı bir davranış sergiler ve betonarme kavramından bahsedilemez. Bu yapı elemanlarının kendilerinden beklenen yapısal performansı sergileyebilmeleri için betonun ve donatının bir uyum içerisinde olması gerekmektedir. Bu uyumun da sağlanabilmesi için donatı ile beton matrisinin bir birine oldukça güçlü bir şekilde yapışması gerekmektedir. Burada da karşımıza aderans kavramı çıkmaktadır. Aderans, beton ile donatı arasındaki yapışma kuvveti olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla beton ile donatı arasındaki aderans, betonarme yapı elemanının performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Yapı elemanının yük taşıma kapasitesi üzerinde aderansın doğrudan etkisi vardır. Yeterli ve güçlü bir aderans, yapı elemanının daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını yani servis ömrü boyunca kendinden beklenen performansı sağlamasına neden olurken zayıf bir aderans, yapı elemanında çatlak, donatılarda yer değiştirme ve yapısal hasarlara neden olmaktadır. Beton ile donatı arasındaki aderans etkileyen birkaç parametre mevcuttur. Betonun çekme dayanımı, donatı çapı, donatı yüzeyi (nervürlü donatı), donatının akma dayanımı, kenetlenme boyu ve pas payı gibi parametreler beton ile donatı arasındaki aderans dayanımını etkilemektedir. Aderans kavramının yapı elemanları açısından yukarıda bahsedilen öneminden dolayı çalışmanın bir diğer ana parametresi olarak da aderans kavramı 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 kavramının birlikte değerlendirilmesi oluşturmaktadır. Çalışmanın parametreleri belirlenirken geopolimer betonun performansını ve aderansı etkileyen parametrelerden tercih edilmiştir. Geopolimer beton açısından kür süresi, yüksek sıcaklık etkisi ve lif takviyesi parametre olarak belirlenirken aderans açısından etriye varlığı ve aderans boyu parametre olarak tercih edilmiştir. Özetle bu tez çalışmasının amacı, geopolimer betonda mikro sentetik lif takviyesinin, etriye varlığının, kür süresinin, aderans boyunun ve maruz kalınan sıcaklığın aderans dayanımı ve performansı üzerindeki etkinin deneysel olarak incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda da üç tip geopolimer beton üretilmiştir. Referans olması açısından lifsiz, hacimce %0,5 ve hacimce %1 oranında mikro sentetik lif takviyeli geopolimer beton karışımları dizayn edilmiştir. Bununla birlikte etriye kullanımının aderans performansı üzerindeki etkinin değerlendirilebilmesi için de etriyeli ve etriyesiz numuneler tasarlanmıştır. Deneysel çalışmada d, donatı çapını göstermek üzere 4d ve 8d olmak üzere iki farklı aderans boyu tercih edilmiştir. Geopolimer beton fazının öneminin değerlendirilebilmesi için de üç farklı kür süresi belirlenmiştir. Bir grup referans olması açısından oda sıcaklığında kür edilmiş olup diğer iki grup 80 °C’ de 4 saat ve 8 saat kür edilmiştir. Çalışmanın bir diğer hedefi ise farklı sıcaklık değerlerinin (20°C, 150 °C, 300 °C ve 600 °C), lifli geopolimer beton ile donatı çubuğu arasındaki aderans üzerindeki etkinin araştırılmasıdır. Bu çalışmanın özgün değeri ise aderans performansının mikro sentetik lif takviyesi ile ilişkisinin ele alınmış olmasıdır. Bu lif türünün hem kür sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklardaki performansının aderans dayanımına etkisinin deneysel olarak incelenmesi de çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır. Deneysel çalışmadan elde edilen veriler ışığında saha uygulamalarına yönelik tavsiyeler verilmesi de ayrıca hedeflenmektedir.

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 geometrik özellikleri üzerinde durulmuştur. Deney numunelerinin imalatı, ölçüm ile yükleme prosedürü açıklanmıştır. Ayrıca deney sonucunda ulaşılabilecek hedefler doğrultusunda çizilen grafik ve tablo değerlerinin hesaplanması açıklanmıştır.

Üçüncü 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 aderans boyu, lif takviyesi, kür süresi, etriye varlığı ve yüksek sıcaklık parametrelerinin aderans performansı üzerindeki etkisi karşılaştırılmalı olarak açıklanmıştır.

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

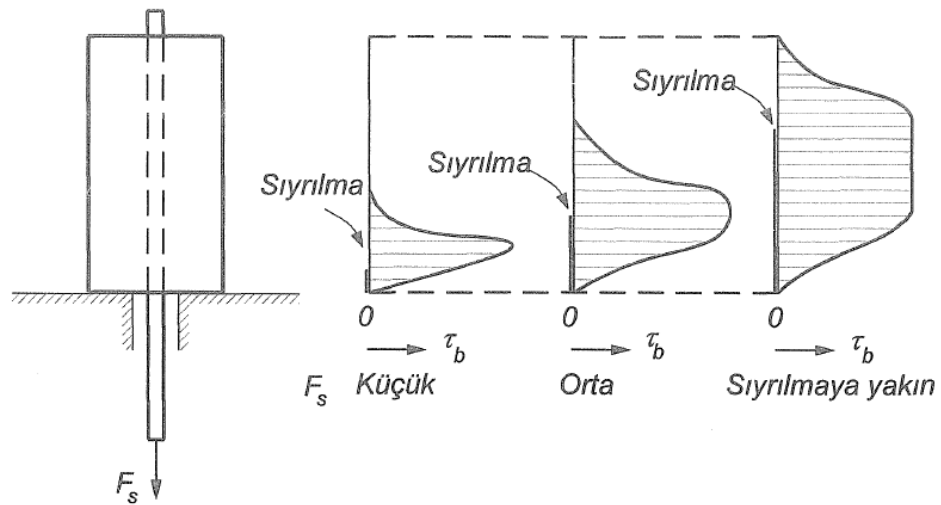


KURAMSAL TEMELLER

Kuramsal temeller bölümünde tez konusunu oluşturan aderans ve geopolimer beton kavramları üzerinde durulmuştur. Öncelikle aderans kavramı açıklanmış olup aderansı etkileyen parametreler ve bu parametrelerin tezle ilişkisi kurularak açıklanmıştır. Daha sonra geopolimer betonun tarihçesi, tanımı ve inşaat mühendisliğinde özellikle aderans konusundaki kullanım alanları üzerinde durulmuştur. Ayrıca aderans kavramı ve geopolimer beton uygulamaları ile ulaşılan literatürdeki çalışmalar sunulmuş olup literatürdeki boşluğa vurgu yapılarak tezin amaç, hedef ve özgünlüğü açıklanmıştır.

Aderans Kavramı

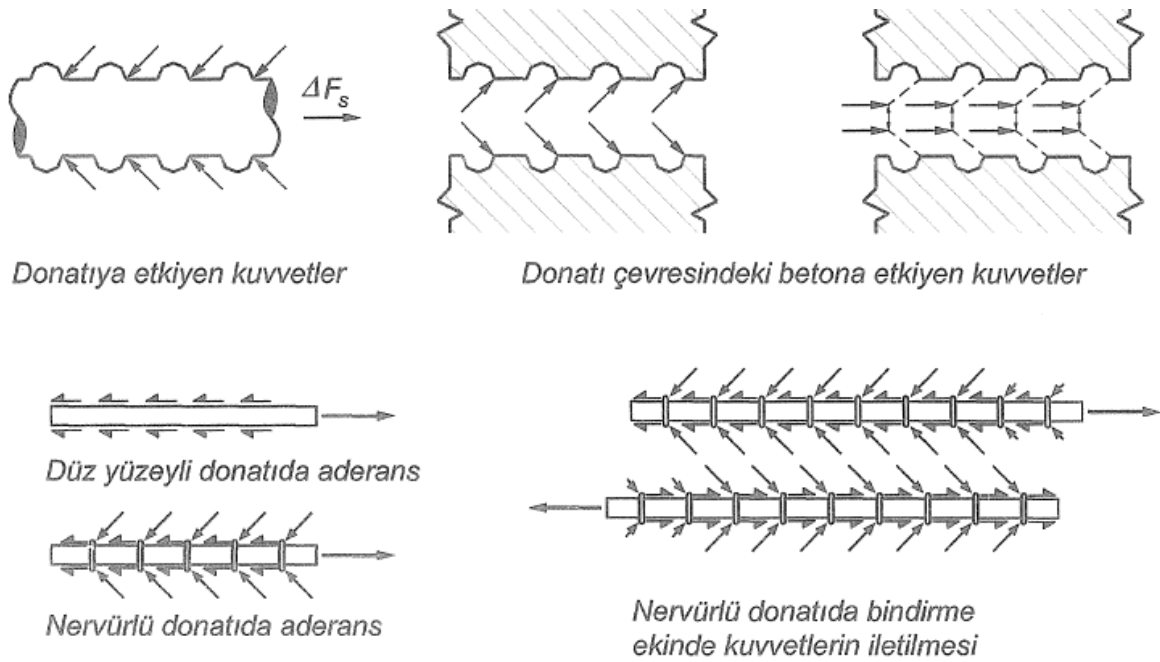
Bir yapı elemanının betonarme olarak performans sergileyebilmesi için matris içerisindeki beton ve donatının kenetlenmesi oldukça önemli bir parametredir. Matris içerisinde kenetlenmenin sağlanabilmesi için kesme gerilmeleri önemli bir rol oynamaktadır. Yani, beton malzemesi ile donatının kenetlenmesini sağlayan kesme kuvvetleri aderans olarak tanımlanmaktadır. Aderans kavramı ise eğilme aderansı ve kenetlenme aderansı olarak ikiye ayrılabilir. Eğilme aderansı, eğilme momenti altındaki betonarme elemanda donatıdaki değişen gerilmeler nedeniyle eğilme momentlerinin bir kesitten diğerine aktarılmasıdır. Fakat eğilme aderansı sunulan bu tez kapsamı dışındadır. Sunulan tez kapsamı içerisinde kenetlenme aderansı üzerinde durulmuştur. Kenetlenme aderansı ise beton kesit içerisinde gömülü olan donatının kesitten sıyrılıp çıkarılması olarak tanımlanır (Şekil 1).



Şekil 1. Aderans mekanizması (Ersoy vd. 2019)

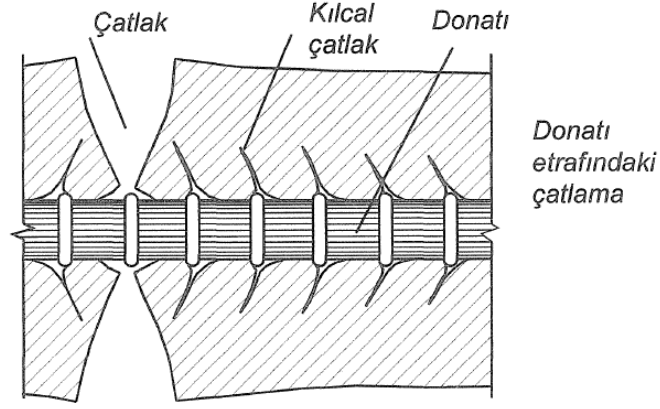
Genel olarak beton ve donatıdan oluşan bir yapı elemanının betonarme olarak tanımlanabilmesi için beton içerisine gömülen donatının kaymaması ve betona kenetlenmesi gerekmektedir. Buradan da anlaşılabileceği üzere yapı elemanlarının betonarme olarak adlandırılabilmesi için aderans kavramı oldukça önemlidir.

Beton ile donatı arasındaki kenetlenmeyi ifade eden aderans kavramı üç temel nedene dayanmaktadır. Birincisi, beton ve donatı arasındaki kenetlenme olarak adlandırılan moleküller ve kapiler bağ kuvvetidir. İkinci olarak beton ile donatı arasındaki sürtünme kuvvetleridir. Üçüncüsü ise donatı ile beton arasındaki mekanik dış kuvvetlerdir. Nervüzsüz düz yüzeyle donatılar için ilk iki madde genelde geçerli olmasına karşın nervürlü donatılarda aderans performansı için üçüncü madde özellikle önemli olmaktadır (**Şekil 2**).



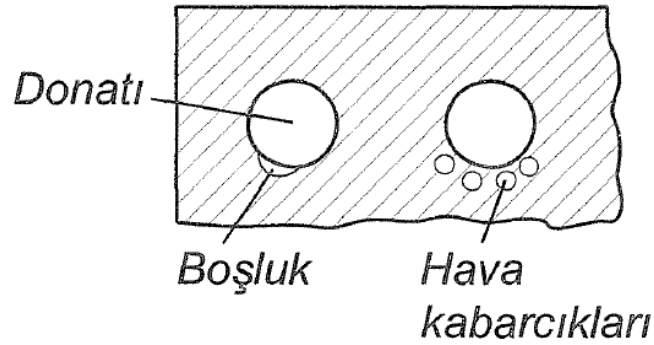
Şekil 2. Aderansı oluşturan kuvvetler (Celep 2011)

Betonun çekme dayanımı aderansı etkileyen önemli faktörlerden bir tanesidir. Donatının beton içerisinde sıyrılması esnasında donatı eksenine paralel aderans gerilmeleri ve bu gerilmelere dik yarıлма gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu yarıлма gerilmeleri ise beton yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Asal çekme gerilmelerinin betonun çekme mukavemetini aşması durumunda ise çatlaklar meydana gelmektedir (**Şekil 3**). Buradan da görüldüğü üzere betonun çekme mukavemetinin aderans performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Sunulan tez çalışması kapsamında da beton karışımında kullanılan farklı hacimde sentetik liflerin betonun çekme mukavemetine hangi ölçüde katkı sağladığının tespiti hedeflenmektedir. Dolayısıyla geopolimer betonda hacimce %0,5 ve %1 oranlarında lif takviyesi sunulan tezin bir parametresi olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3. Donatı etrafında oluşan çatlakların gösterimi (Celep 2011)

Donatı çapının da aderans dayanımı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Genel olarak donatı çapının artması aderans dayanımını azaltmaktadır. Betonun işlenebilirliği ya da sıkıştırılmasının da aderans dayanımı üzerinde bir etkisi olmaktadır. Özellikle kötü sıkıştırma ya da işlenebilirliği düşük betonda donatının etrafında hava kabarcıkları oluşabilmektedir (**Şekil 4**). Bu hava kabarcıkları ve hava kabarcıklarının sebep olduğu boşluklar ise aderansı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu parametre ise sunulan tez çalışmasında dolaylı olarak göz önüne alınmıştır. Geopolimer beton karışımında farklı oranlarda lif takviyesinin işlenebilirliği ve sıkıştırılabilirliği farklı şekilde etkileyebileceği ön görülmüştür. Dolayısıyla bu lif oranlarının aderans performansı üzerindeki etkisinin irdelenmesi hedeflenmiştir.

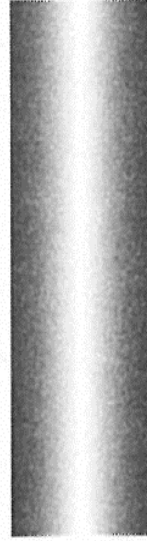


Şekil 4. Beton matrisi içerisinde ve donatı etrafında oluşan hava boşlukları (Celep 2011)

Düşen donatıların yatay konumlu donatılara göre aderans dayanımlarının daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Aderans bölgesi boyunca aderans gerilmesini etkilediği için donatının akma dayanımı da aderans performansını etkileyen önemli bir parametredir. Donatı yüzeyinin pürüzlülüğü de aderansı etkilemektedir. Diğer bir ifade ile donatının nervürlü ya da düz olması aderansı önemli ölçüde etkilemektedir (**Şekil 5**).



Nervürlü donatı



Düz yüzeyli donatı



Profil donatı

Şekil 5. Farklı yüzeyli donatı şekilleri

Kenetlenme boyunun değişmesi de aderans dayanımını etkilemektedir. Fakat kenetlenme boyu ile aderans dayanımı arasında doğrusal bir bağlantı yoktur. Yani kenetlenme boyunun iki kat artması aderans dayanımını iki kat arttırmayacaktır. Sunulan tez çalışması kapsamında da d donatı çapını temsil etmek üzere $4d$ ve $8d$ aderans boyu oluşturularak, aderans boyunun performansa etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Beton örtüsünün de aderans dayanım üzerinde belirleyici bir etkisi vardır. Yeterli pas payının olmadığı kesitlerde aderans dayanımı azalmaktadır.

Yukarıda sıralanan parametreler dikkate alındığında beton ile donatı arasındaki aderans dayanımının birçok parametreden etkilendiği için oldukça karmaşık ve bir o kadar da önemli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında da beton ile donatı arasındaki aderans performansına farklı parametrelerin etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu parametreler belirlenirken hem donatı hem de beton açısından ele alınmıştır.

Geopolimer Beton Kavramı

Gopolimer beton kavramı sürdürülebilirlik alanında ve performans olarak gelecek vaat eden ayrıca son zamanlarda araştırmacıların ilgi odağı olan yeni bir beton türüdür. Küresel ısınma tehdidi ile karşı karşıya olan dünyamızda hemen hemen her sektörde atmosfere salınan karbondioksit (CO_2) miktarının düşürülme amaçlanmaktadır. Bu sektörlerden bir tanesi de inşaat sektörüdür. İnşaat sektöründe geleneksel beton üretiminde kullanılan çimentonun üretim aşamasında atmosfere önemli ölçüde CO_2 gazı salınmaktadır. Bu açıdan bakıldığında inşaat sektöründe kullanılan geleneksel betonun alternatifi olarak yenilikçi beton türlerine yönelmeler

başlamıştır. Geopolimer beton da bu yenilikçi beton türlerinden bir tanesidir. Geopolimer beton, alüminosilikat malzemelerin alkali aktivatörlerle kimyasal reaksiyonuyla üretilen yenilikçi bir beton türüdür. Geopolimer betonun bir diğer önemli avantajı ise bağlayıcı olarak kullanılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi malzemelerin endüstriyel yan ürünler olmasıdır. Böylece endüstriyel yan ürünlerin de değerlendirilmesi önemli bir avantajdır.

Geopolimer beton yaygın olarak yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi atık malzemeler ve alkali aktivatörler gibi kimyasal esaslı malzemeler kullanılarak oluşturulmaktadır. Geopolimer beton türünün yüz yıllar önce eski uygarlıklar tarafından kullanıldığı bilinmektedir. Örneğin Pantheon ve Kolezyum (**Şekil 6**) gibi Roma ve Yunan yapılarında geopolimer türüne benzer malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir. Bu yapılarda volkanik kül, kireç ve kil gibi malzemeler kullanılmıştır. Hatta Mısır' daki ünlü Keops piramitlerinin taş bloklarında alüminosilikat esaslı malzemelerin aktive edilerek kullanıldığı üzerine çalışmalar yapılmıştır (Davidovits vd., 2019). Bu açıdan bakıldığında zaman eski çağlarda kullanılan geopolimer beton türüne araştırmacılar ve mühendisler tarafından bir geri dönüş trendi olduğu kanısına varılmıştır.



Şekil 6. Geopolimer beton benzeri yapı malzemelerinin kullanıldığı Pantheon (Anonim a, 2023) ve Kolezyum (Anonim b, 2023) yapıları

Geopolimer betonun içyapısı, inorganik bileşenlerin (sodyum ve/veya potasyum hidroksit ve alüminosilikat tozları) kimyasal reaksiyonları sonucu uzun silikat zincirlerinden oluşan üç boyutlu bir ağıdır. Bu ağ, inorganik maddelerin güçlü kimyasal bağlarından kaynaklanan yüksek mukavemet ve dayanıklılık özellikleriyle karakterizedir. Geopolimer betonun içyapısı, ayrıca alümin silikat hammaddelerin kimyasal reaksiyonları sonucu oluşan polimerik zincirlerin varlığına da bağlıdır. Bu zincirlerin uzunluğu ve bağlanma kuvveti, betonun dayanıklılığı ve mukavemeti üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Aynı zamanda, alkali aktivatörlerin türü, konsantrasyonu da geopolimer betonun içyapısını etkiler. Bu zincirler, inorganik bileşenlerin güçlü kimyasal bağlarından kaynaklanan mukavemet özellikleri sunar. Bu sayede, yapıların daha fazla yükler ve zorlu koşullar altında bile dayanabilecek şekilde

tasarlanmasını mümkün kılar. Ayrıca, bu beton türü, yüksek kimyasal dayanıklılık özellikleriyle de bilinir ve asit, baz ve tuzlu su gibi agresif ortamlara dayanabilir (Albitar *et al.* 2015; Izquierdo *et al.* 2009; Karamipour and de Brito, 2021; Liu *et al.* 2020; Nath and Sarker 2014). Geopolimer betonun bu tez çalışmasının konusu olarak seçilmesinin bir nedeni de bu beton türünün içyapısındaki yukarıda bahsedilen avantajlarından faydalanılmasının hedeflenmesidir.

Geopolimer betonun, çimento esaslı geleneksel betona göre birçok avantajı bulunmaktadır. Örneğin yapısında çimento bulundurmadağı için karbon ayak izi düşüktür. Yani çimentonun üretimin aşamasında atmosfere salınan karbondioksit (CO₂) gazı ortadan kaldırılmaktadır. Sunulan bu proje kapsamında geopolimer betonun özellikle bu avantajından da faydalanılması hedeflenmektedir. Küresel iklim tehdidi ile karşı karşıya kalan dünyamızda, iklim değışikliğinin olumsuz etkileri gün geçtikçe gözle görülür bir artış göstermektedir. İlerleyen zamanlarda iklim değışikliğinin önlenbilmesi için sert ve zorunlu tedbirlerin alınabileceğı yazarlar tarafından ön görölmektedir. Bu noktada da atmosfere salınan CO₂ gazının azaltılması olacaktır. Çoğu sektörde olduğı gibi çimento üretim sektöründe de önlemler alınması gerekmektedir. Örneğin 1 ton çimento üretimi, 1,5 ton taş ocağı malzemesi tüketimi, 5,6 Gj/ton enerji tüketimi, atmosfere salınan CO₂ gazının %5' ine karşılık gelen yaklaşık 0,9 ton CO₂ salınımına neden olmaktadır (Seco *et al.* 2012). Bu noktada ise karşımıza geopolimer beton kavramı çıkmaktadır. Dolayısıyla sunulan bu çalışmanın konusu olarak da geopolimer beton tercih edilmiştir. Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı ve çimento üretiminde kullanılan klinker gibi karbon esaslı ürünler yerine endüstriyel atıklar gibi alternatif malzemeler kullanıldığı için karbon ayak izinin de azaltılması hedeflenmektedir.

Geopolimer beton, çimento bazlı betona göre daha yüksek dayanıklılık özellikleri sunar. Yüksek sıcaklık dayanımı sayesinde yangın sırasında yapıların çökmesini önleyebilir. Ayrıca, yüksek kimyasal dayanıklılık özellikleriyle asit, baz ve tuzlu su gibi agresif ortamlara dayanabilir. Ayrıca geopolimer beton, çimento bazlı betona göre daha uzun ömürlüdür. Bu özellik, yapıların daha uzun süre dayanabileceğı anlamına gelir ve bakım maliyetlerini azaltır. Geopolimer beton, çimento bazlı betona göre daha az su gerektirir. Bu, daha az su kullanılarak daha fazla beton üretilabileceğı anlamına gelir ve su tasarrufuna yardımcı olur. Geopolimer beton, çimento bazlı betona göre daha hafiftir. Bu özellik, taşıma, montaj ve yapı elemanlarının daha kolay işlenmesine olanak tanır. Böylece yapı elemanının ağırlığının azalmasına ve daha az deprem kuvvetlerine maruz kalmasına neden olmaktadır. Geopolimer betonun bu avantajından da faydalanılması hedeflenmektedir.

Geopolimer betonun dayanıklılığı, özellikle çimento bazlı betona göre önemli avantajlarından birisi olduğu yukarıda bahsedilmiştir. Bu dayanıklılık üzerinde, karışımda kullanılan lif türlerinin etkisi de oldukça önemlidir. Lifler, geopolimer betonun dayanıklılığına katkıda bulunarak çatlakların oluşumunu azaltabilir ve betonun mekanik özelliklerini artırabilir. Bu nedenle, liflerin türü, miktarı ve dağılımı, geopolimer betonun durabilitesi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, polipropilen, çelik ve cam gibi lif türleri, geopolimer betonun dayanıklılığını artırabilir. Bu lifler, betonun sünekliğini artırarak, beton yüzeyindeki çatlakların oluşumunu azaltabilir. Ayrıca, polipropilen lifler, betonun sülfat direncini artırırken, cam lifler betonun kimyasal dayanıklılığını artırır. Diğer yandan, liflerin miktarı ve dağılımı da dayanıklılık üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Doğru miktarda ve uygun şekilde dağıtılmış lifler, betonun dayanıklılığını en üst seviyeye çıkarabilir. Ancak, liflerin aşırı kullanımı, betonun işlenebilirliğini azaltabilir (Amran *et al.* 2022; Masi *et al.* 2015; Methacanon *et al.* 2010; Ranjbar *et al.* 2016; Zhao *et al.* 2022).

Bu tez çalışmasında, kullanılması planlanan geopolimer betonun öneminin anlaşılabilmesi için ilk önce çimento üretiminin neden azaltılması gerektiği üzerinde durulmuştur. Öncelikle geopolimer betonun inşaat sektöründe kullanımının yaygınlaşması ile çimentonun üretim aşamasında atmosfere salınan CO₂ gazının miktarı azaltılması hususudur. Bu noktada dünyamızın son yıllarda karşı karşıya kaldığı küresel ısınma tehlikesi karşımıza çıkmaktadır. Küresel ısınma ya da son zamanlarda yaygın olarak kullanılan iklim değişikliği kavramı ilk 1896 yılında İsveçli bilim adamı Prof. Svante Arrhenius' un "Havadaki karbonik asidin yer sıcaklığı üzerindeki etkisi üzerine" makalesi ile gündeme gelmiştir (Arrhenius, 1896). Makalenin adından da anlaşılacağı gibi Prof. Arrhenius CO₂ gazını karbonik asit olarak tanımlamakta ve CO₂ gazının atmosferde sera gazı etkisi yaptığını ortaya koyan ilk kişidir. Bu zamandan günümüze iklim değişikliği ile ilgili birçok makale yayınlamıştır. Geline son noktada ise iklim değişikliği üzerine, Birleşmiş Milletlere bağlı Hükümetler Arası İklim Değişikliği' nin altıncı raporu 66 ülkeden 234 bilim insanının katkısı ile 2021 yılında yayınlanmıştır (Anonymous c, 2023). 3949 sayfadan oluşan bu raporda en dikkat çekici noktalardan bir tanesi dünyamızın ikliminde binlerce yıl boyunca geri döndürülemeyecek bir takım değişikliklerin olduğudur. Bu rapor, son 8 yıl boyunca gerçekleşen küresel iklim değişikliği üzerine son bilimsel kanıtları ve gözlemleri değerlendirmektedir. Rapor, insan faaliyetlerinin neden olduğu sera gazı emisyonlarının dünya genelindeki sıcaklık artışına ve diğer çevresel etkilere neden olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, rapor gelecekteki küresel sıcaklık artışı senaryolarını ve bunun muhtemel etkilerini de analiz etmektedir. Bu rapor, iklim değişikliği konusunda uluslararası topluma güncel bilimsel kanıtların sunulması

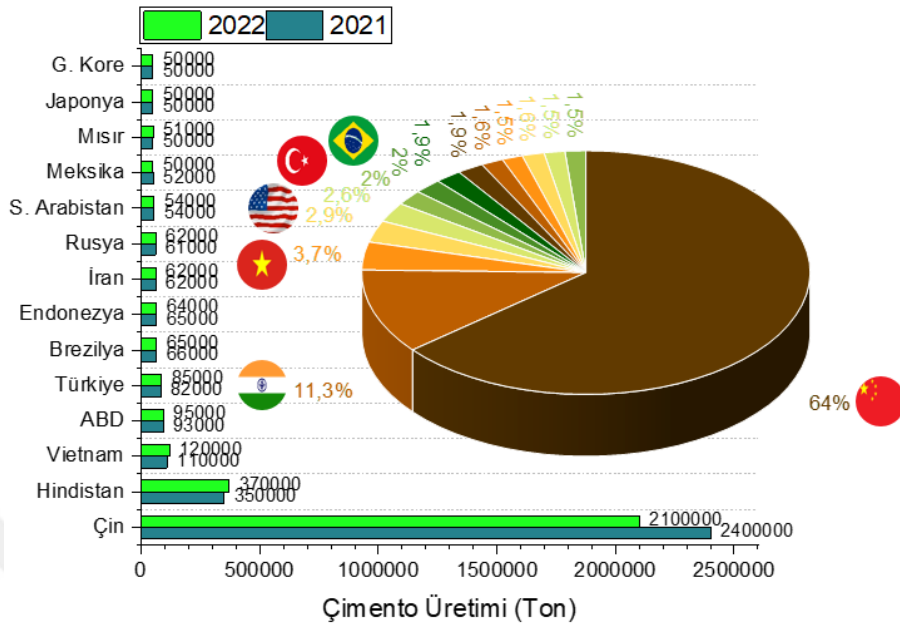
açısından son derece önemlidir. İklim değişikliği ile mücadele için alınması gereken önlemler hakkında politikalar ve kararlar alınmasına yardımcı olabilir.

Bu rapor doğrultusunda, raporun son derece önemli olduğu ve insanların iklim değişikliği ile mücadele etmek için acil önlemler alması gerektiği yönünde kanaate varılmıştır. Raporun sunmuş olduğu bilimsel kanıtlar, iklim değişikliğinin ciddiyetini vurgulamakta ve bu nedenle dünya liderleri, sivil toplum örgütleri ve bireyler bu konuda işbirliği yaparak iklim değişikliği ile mücadele etmek için acil önlemler almalıdır. Bu noktada da özellikle inşaat mühendisliği alanında alınabilecek en önemli önlemlerden bir tanesi de CO₂ gazının atmosfere salınımının azaltılmasıdır. Diğer bir deyişle gerek ülkemizde gerekse de dünya genelinde her yıl milyonlarca ton betonda bağlayıcı olarak kullanılan çimento yerine alternatifi bir malzeme kullanılmasıdır. Bu malzeme son yıllarda geopolimer beton olmuştur ve araştırmacıların da ilgi odağı haline gelmiştir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında da geopolimer beton yazarlar tarafından tercih edilmiştir. Böylece iklim değişikliği karşısında ülkemiz adına geopolimer betonun betonarme elemanlarda kullanılması hakkındaki sonuçların literatüre sunulması hedeflenmektedir. Ayrıca iklim değişikliği raporunda dikkat çeken bir diğer husus ise CO₂ salınımının azaltılması ile iklim değişikliğinin kontrol altına alınabileceği ve hatta uzun vadede geriletilebileceğidir. Bu noktada da yazarlar inşaat mühendisliği alanında çimentosuz betonun betonarme elemanlarda kullanılması ile yukarıda bahsedilen iklim değişikliğinin kontrol altına alınabilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Dünya genelinde en çok çimento ve beton üreten ülkeler arasında Çin, Hindistan, ABD ve Türkiye gibi ülkeler bulunmaktadır. Ancak, üretim miktarları ülkeden ülkeye farklılık gösterir. 2020 yılında dünya genelinde çimento üretimi yaklaşık 4 milyar ton civarında olmakta ve Çin, bu üretimin yaklaşık yarısını gerçekleştirerek dünyanın en büyük çimento üreticisi konumundaydı. Beton üretimi konusunda ayrıntılı veriler bulunmamaktadır, ancak beton genellikle çimento kullanılarak üretildiğinden, çimento üretimi genellikle beton üretimini yansıtır. Beton ve çimento üretimi, sera gazı emisyonlarına katkıda bulunan endüstrilerden biridir ve bu nedenle sürdürülebilir çimento ve beton üretimi yollarının araştırılması ve uygulanması giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu yüzden geopolimer beton bu çalışmanın çıkış noktalarından bir tanesini oluşturmaktadır.

Küresel olarak, çimento üretimi dünyanın toplam CO₂ salınımının yaklaşık %7'sine neden olmaktadır. Diğer sektörlerin payı ise büyük ölçüde ülkelere ve endüstrilere göre değişebilir. Bununla birlikte, enerji üretimi, ulaşım, sanayi ve tarım sektörleri genellikle önemli CO₂ kaynaklarıdır. ABD İç İşleri Bakanlığı'na bağlı Jeolojik Araştırma Departmanı'nın 2023 yılında hazırladığı Mineral Hammadde Ürünleri Raporunda 2021 yılında dünya genelinde 4,4

milyar ton çimento, 3,7 milyar ton klinker ve 2022 yılında ise 4,1 milyar ton çimento ile 3,8 milyar ton klinker üretilmiştir. **Şekil 7'** de 2021 ve 2022 yıllarında ülkelerin ürettikleri çimento ve klinker miktarları görülmektedir.



Şekil 7. Dünya genelinde 2021 ve 2022 yıllarında üretilen çimento ve klinkerin dağılımı

Dünya genelinde yaklaşık 4 milyar ton gibi oldukça yüksek bir rakama ulaşıldığından yukarıda bahsedilmiştir. Bu konuda ülkemiz de **Şekil 7'** den görüldüğü üzere çimento üretiminde dünya genelinde önemli bir yere sahiptir. Dolayısıyla ilerleyen zamanlarda çimento üretiminin kısıtlanması gibi bir durum söz konusu olduğunda ülkemiz de bu konudan etkilenecek ülkelerin başında gelmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu' nun (TÜİK) 2021 yılı verilerine göre, Türkiye' nin toplam CO₂ salınımı 482,1 milyon tondur. Bu salınımın hangi sektörlerden kaynaklandığına dair ayrıntılı veriler de TÜİK tarafından sağlanmaktadır. Türkiye Çimento Birliği verilerine göre ülkemizde 2022 yılında Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği' ne kayıtlı 73 çimento fabrikası bulunmaktadır (Anonim d, 2023). **Şekil 8'** de ülkemizdeki çimento fabrikaları görülmektedir.



Şekil 8. Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği' ne kayıtlı çimento fabrikaları (Anonim e, 2023)

Yukarıda geopolimer beton ve aderans kavramları ayrı ayrı ele alınmış olup konunun önemini vurgulamak hedeflenmiştir. Sunulan bu tez çalışması kapsamında da geopolimer beton ve aderans kavramlarının birlikte değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda da geopolimer betondan üretilen numunelerin aderans performanslarına çeşitli parametrelerin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Aşağıda da beton ile donatı arasındaki aderans hakkında ulaşılan literatürdeki çalışmalardan elde edilen veriler sunulmuştur.

Sarker (2011) beton basınç dayanımı, pas payı ve donatı çapının hem geleneksel betonlu hem de geopolimer betonlu numunelerin aderans dayanımına etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Beton basınç dayanımı 25 MPa ile 39 MPa arasında değişmekle birlikte 20 mm ve 24 mm çaplarında farklı donatılar kullanmışlardır. Yazar geopolimer betondan üretilen numunelerin aderans dayanımlarının geleneksel betonlu numunelerden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Castel and Foster (2015) deforme olmuş ve düz yüzeyli donatıların ve geopolimer betonunda kür koşullarının aderans performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda 48 s 80 °C sıcaklıkta kür koşulunun aderans performansını iyileştirdiği belirtilmiştir.

Dahou *et al.* (2016) farklı zaman dilimlerinde geopolimer betondan üretilen numunelerin aderans dayanımlarını incelemişlerdir. Artan zamanla birlikte aderans dayanımının da arttığı belirtilmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda yazarlar aderans dayanımı için bir model de önermişlerdir.

Seshu (2018) normal beton ile geopolimer betondan üretilen numunelerin aderans performanslarını karşılaştırmıştır. Çalışmada 20, 35 ve 50 MPa basınç dayanımına sahip numunelerin aderans dayanımları üzerinde durulmuştur. Çalışma sonunda geleneksel betonlu

numunelerin aderans dayanımının geopolimer betonlu numunelere göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca hem geleneksel betonlu hem de geopolimer betonlu numunelerde beton basınç dayanımının artmasının aderans dayanımını arttırdığını vurgulamışlardır. Fakat bu artışın doğrusal olmadığı da belirtilmiştir. Pandurangan *et al.* (2018) geopolimer betonda uçucu kül ve cüruf oranının 7 ve 28 günlük numunelerin aderans dayanımına etkisini incelemişlerdir.

Mo *et al.* (2018) palmye yağı külünden üretilen normal ağırlıklı ve hafif geopolimer betonunun aderans dayanımı üzerinde durmuşlardır. Deneysel çalışmanın parametreleri olarak ise donatı çapı (12 mm ve 16 mm), pas payı (50 mm ve 100 mm) ve beton türü (normal/hafif geopolimer beton ve normal/hafif geleneksel beton) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda geleneksel betonlu numunelerin aderans dayanımının palmye yağı küllü geopolimer numunelerden daha yüksek çıktığı belirtilmiştir. Ayrıca hafif geleneksel ve geopolimer betonlu numunelerin aderans dayanımlarının da normal ağırlıklı numuneler göre daha yüksek olduğu da yazarlar tarafından belirtilmiştir.

Al-Azzawi *et al.* (2018) geopolimer beton karışımında kullanılan dört farklı tipte ve üç farklı oranda uçucu külün aderans dayanımına etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda uçucu külün karışımdaki oranının aderans dayanımını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Uçucu külün farklı mikro boyutta olması ve içeriğindeki SiO_2 , Al_2O_3 ve CaO miktarlarının farklılık göstermesi açısından aderans dayanımında önemli bir etkisinin olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca karışımdaki uçucu kül oranının artmasının aderans dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir.

Kefiyalew and Jaya (2021) polivinil alkol (PVA) lifin geopolimer betondan üretilen numunelerin aderans dayanımına etkisini incelemişlerdir. Polivinil alkol lif oranı hacimce %0,2, %0,4, %0,6 ve %0,8 olarak seçilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında geleneksel beton ve geopolimer betonun aderans dayanımı açısından karşılaştırmasını da yapmışlardır. PVA lif kullanılmasının aderans dayanımını %25 oranında arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca karışımda %0,6 oranında PVA lif kullanılması durumunda maksimum aderans dayanımına ulaşılmasını sağlamıştır. Son olarak ise geopolimer beton kullanılan numunelerin aderans dayanımlarının geleneksel betonlu numunelere göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Mawlood *et al.* (2022) yüksek fırın cüruf esaslı geopolimer betonda aderans boyunun, basınç dayanımının ve donatı çapının aderans dayanımına etkisini geleneksel betonlu numunelerle karşılaştırarak deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda donatı çapının aderans dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir.

Sajjad *et al.* (2023) çalışmalarında cüruf ve uçucu külden üretilen geopolimer betona grafen nano parçacık eklenmesinin geleneksel betonla karşılaştırılmalı olarak aderans

dayanımına etkisi incelemişlerdir. Ayrıca çalışmanın bir diğerk parametresi donatı çapı (10, 12, 16 ve 20 mm) olarak belirlenmiştir. Yazarlar geopolimer betona grafen nano parçacık eklenmesinin aderans dayanımını %13 ile %19 aralığında arttırdığını belirtmişlerdir.



MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında aderans performansı için deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Dolayısıyla deneysel çalışma kapsamında numunelerin üretimi için farklı malzemeler kullanılmıştır. Ayrıca aderans performansının değerlendirilebilmesi için ilgili standartların belirlediği test yöntemi takip edilmiştir. Tezin “Materyal ve Yöntem” başlığında deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri sunulmuştur. Bununla birlikte aderans dayanımı için takip edilen test yöntemi, numunelerin geometrik özellikler, deney parametreleri, beton karışım hesabı, beton dökümü, uygulanan kür ve yüksek sıcaklık prosedürü açıklanmıştır.

Sunulan tez çalışmasında mikro sentetik lif oranı, etriye varlığı, aderans boyu, geopolimer betonun kür koşulları ve maruz kalınan sıcaklık değerinin beton ile donatı arasındaki aderans performansına etkisinin deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında sentetik lif oranının etkisinin belirlenmesi için hacimce %0, %0,5 ve %1 oranlarında lif takviyesi kullanılmıştır. Etriye varlığının aderans dayanımına etkisi için etriyeli ve etriyesiz olmaz üzere numuneler üretilmiştir. Çalışmada spiral etriye düzeni kullanılmıştır. Aderans boyunun etkisinin incelenmesi için ise d, donatı çapını göstermek üzere 4d ve 8d olmak üzere iki farklı aderans boyu oluşturulmuştur. Geopolimer betonda kür koşulunun aderans dayanımına etkisi için ise üç farklı kür ortamı oluşturulmuştur. Birinci olarak numunelere ortam kürü uygulanmıştır. İkinci ve üçüncü koşullarda ise 80 °C sıcaklıkta 4 ve 8 saat sıcaklık kürü uygulanmıştır. Son olarak ise maruz kalınan yüksek sıcaklık değerlerinin aderans dayanımı üzerindeki etkisi için ise numuneler 150 °C, 300 °C ve 600 °C sıcaklığa 2 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Yukarıda bahsedilen deneysel program için her numuneden üç adet olmak üzere toplam 432 adet, 100x200 mm boyutlarında silindir numuneler üretilmiş olup bu numunelere *pull-out* testi uygulanmıştır. Tüm numunelerde 14 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Tüm numuneler yüksek fırın cürufu esaslı olarak üretilmiştir. Materyal başlığında çalışmada kullanılan malzemeler, karışım hesabı, kür ve yüksek sıcaklık prosedürü vb., Yöntem başlığında ise numunelerin geometrik özellikleri, uygulanan test yöntemi vb. parametreleri açıklanmıştır.

Materyal

Sunulan çalışmada deney numuneleri yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betondan üretilmiştir. Çalışma kapsamında üç farklı beton üretilmiştir. Karışım-1’ de lifsiz geopolimer beton, Karışım-2 ve Karışım-3’ de ise sırasıyla hacimce %0,5 ve %1 oranında lif takviyeli

karışımlar üretilmiştir. Beton karışım oranları **Tablo 1'** de sunulmuştur. Beton karışımı dizayn edilirken literatürdeki çalışmalar (Bayrak et al. 2023a; Bayrak et al. 2023b; Kaplan et al.2023) dikkate alınmıştır. Beton karışımında bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufuna ek olarak silis dumanı da kullanılmıştır. Silis dumanının amorf ve çok ince bir malzeme olmasından dolayı yüksek reaktif özelliğinden faydalanılmak hedeflenmiştir. Bağlayıcının %76' sı yüksek fırın cürufu %24' ü ise silis dumanından oluşmaktadır. Çalışmada dere kumu ve kuvars kumu olmak üzere iki farklı agrega kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Alkali aktivatörler işlenebilirlik açısından bağlayıcının %70' i oranında kullanılmıştır. Ayrıca sodyum silikatın sodyum hidroksite oranı 2,5 olarak alınmıştır. Beton karışımında kullanılan malzemelerin fotoğrafları **Şekil 9'** sunulmuştur.

Tablo 1. 1 m³ için Beton Karışım Miktarları (kg)

	Karışım-1	Karışım-2	Karışım-3
Yüksek fırın cürufu	650	650	650
Silis dumanı	200	200	200
İnce agrega	365	365	365
Kuvars agregası	325	325	325
Sodyum silikat	425	425	425
Sodyum hidroksit	170	170	170
Lif	-	5	10



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 9.Geopolimer karışımında kullanılan malzemeler (a) yüksek fırın cürufu (b) silis dumanı (c) ince agrega (d) kuvars agregası

Geopolimer beton karışımlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Türkiye' de Bolu ilinden bulunan OYAK çimento fabrikasından temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufunun bu çalışmada esas bağlayıcı malzeme olarak seçilmesinin birkaç nedeni vardır. Öncelikle yüksek fırın cürufu sahip olduğu yüksek orandaki kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminattan dolayı alkali aktivatörler reaksiyona girerek geopolimerizasyon sürecini başlatmakta ve güçlü bir yapı oluşturmaktadır. Yüksek fırın

cürufunun pozolanik aktivitesinin yüksek olması bir diğer tercih nedeni olmuştur. Bunların dışında yüksek fırın cürufu demir çelik fabrikalarında atık bir malzeme olarak elde edilmektedir. Bu atık malzeme daha öncelerden toprağa gömülmektedir. Fakat içeriğinin anlaşılması ile beton teknolojisinden kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada da atık bir malzeme olan yüksek fırın cürufunun yeniden üretim sürecine dâhil edilerek değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu ASTM C618 (2023) standardına uygundur. Geopolimer beton karışımında kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri de **Tablo 2** ve **Tablo 3'** de sunulmuştur. Ayrıca karışımında kullanılan yüksek fırın cürufunun X ışını kristalografisi (XRD) ve elek analizi de **Şekil 10** ve **Şekil 11'** de sunulmuştur.

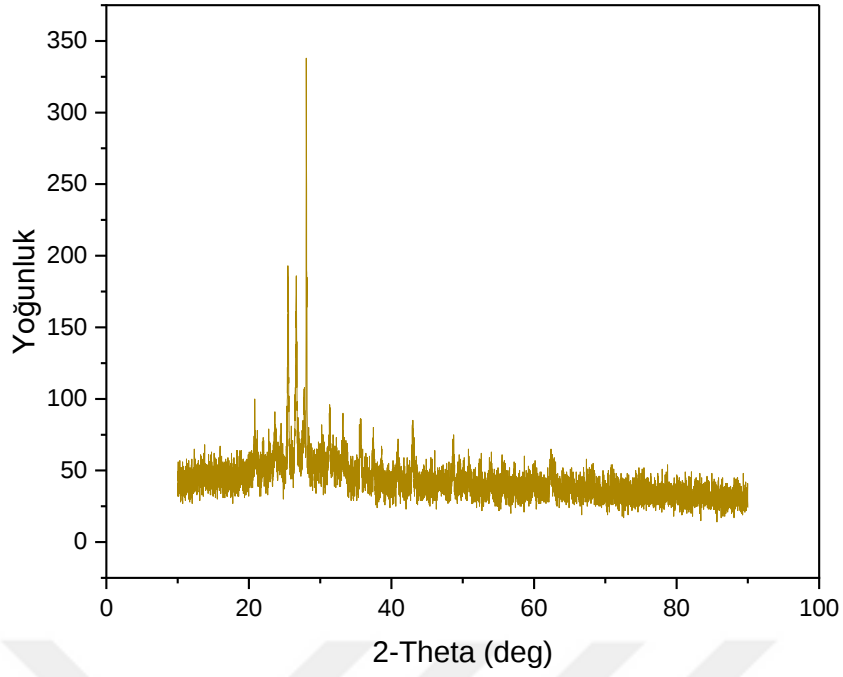
Tablo 2. Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri

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

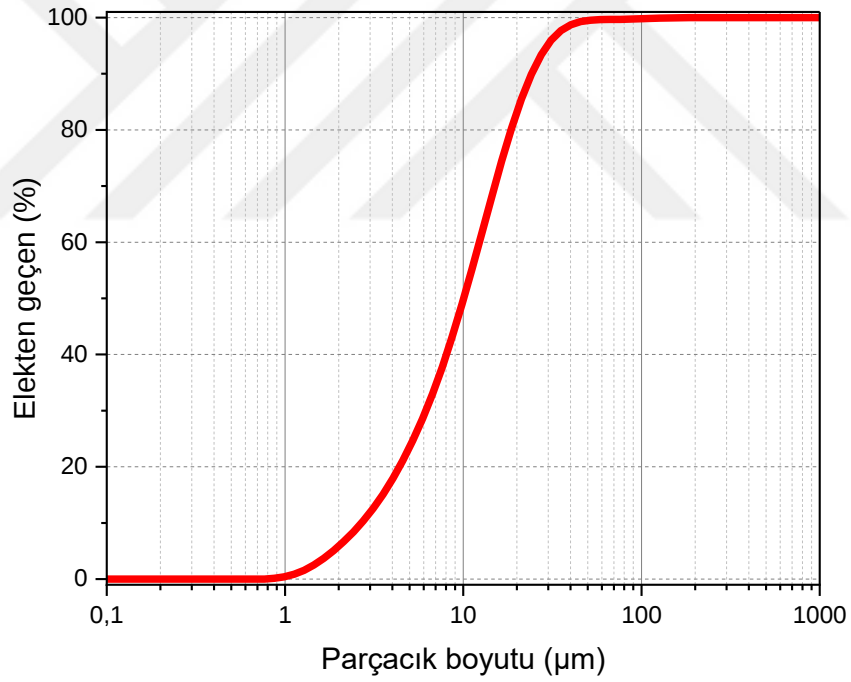
Tablo 3. Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri (%)

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



Şekil 10. Yüksek fırın cürufunun XRD deseni



Şekil 11. Yüksek fırın cürufu elek analizi

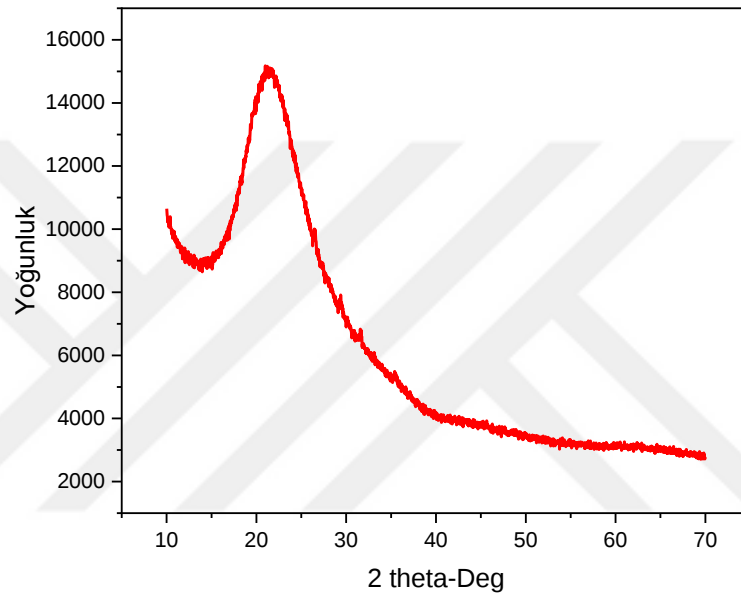
Geopolimer beton karışımında bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufuna ilaveten silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanı hem amorf bir yapıya sahip olması hem de çok ince taneli bir malzeme olmasından dolayı tercih edilmiştir. Silis dumanının çok ince yapıda olmasından mikro boyutta matristeki boşlukları doldurabilmesinden dolayı daha kompakt bir içyapı oluşturulması hedeflenmiştir. Ayrıca silis dumanı puzolanik bir malzeme olmasından dolayı alkali aktivatörler etkili bir şekilde reaksiyona girerek dayanımın artırılması

hedeflenmiştir. Karışımda kullanılan silis dumanının kimyasal özellikleri **Tablo 4'** de sunulmuştur. Bununla birlikte silis dumanının XRD deseni ve elek analizi de sırasıyla **Şekil 12** ve **Şekil 13'** de sunulmuştur. Silis dumanının birim hacim ağırlığı $2,24 \text{ gr/cm}^3$, incelik modülü ise $21200 \text{ m}^2/\text{kg}$ dır.

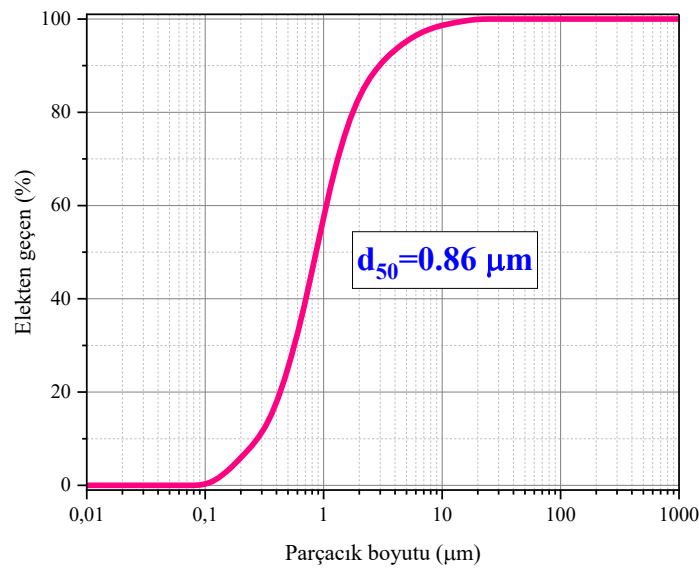
Tablo 4. Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
95,8	0,3	0,3	0,7	0,8	0,3	0,5	0,2

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,



Şekil 12. Silis dumanının XRD deseni



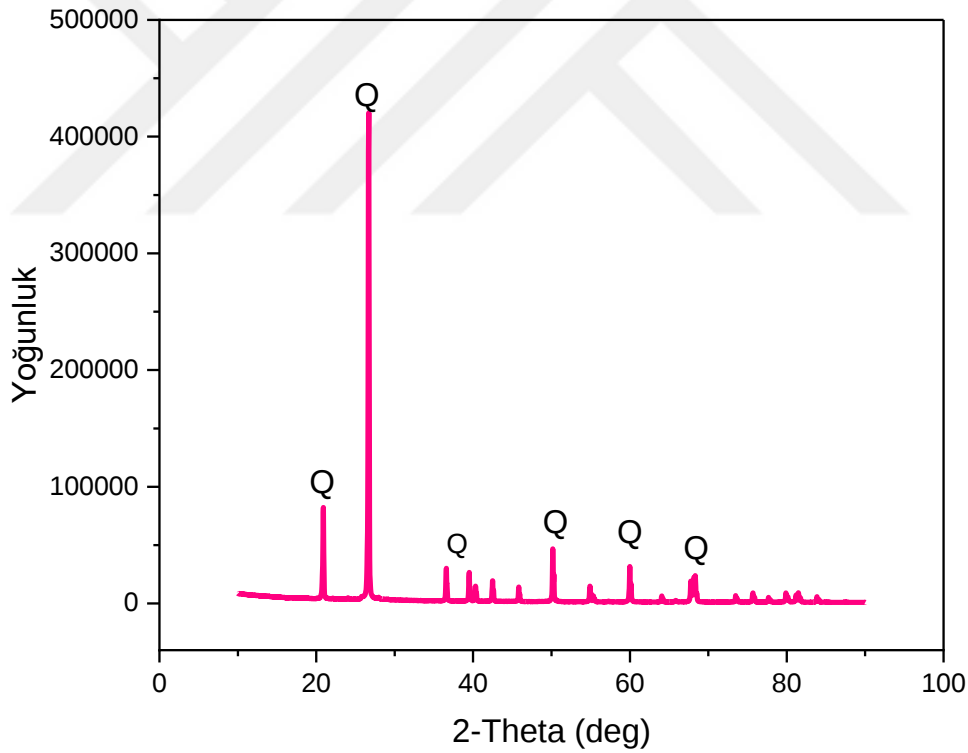
Şekil 13. Silis dumanı elek analizi

Geopolimer beton karışımında kullanılan bir diğer malzeme ise maksimum tane çapı 0,5 mm olan kuvars tozudur. Karışımında dere kumu ve kuvars tozu olmak üzere iki farklı ince agrega kullanılmıştır. Karışımında iki farklı agrega tipinin kullanılmasının nedeni; kuvars tozunun sahip olduğu yüksek silis oranından dolayı tercih edilmekle birlikte ekonomik olmasından dolayı da dere kumu da kullanılmıştır. Kuvars tozunun kimyasal özellikleri **Tablo 5**' de sunulmuştur. Kuvars tozunun birim hacim ağırlığı 2,71 gr/cm³' tür. Kuvars tozunun XRD deseni ve elek analizi sonuçları da **Şekil 14** ve **Şekil 15**' de sunulmuştur. Ayrıca kuvars tozunun su emme oranı %1,8 ve incelik modülü de 1,7' dir.

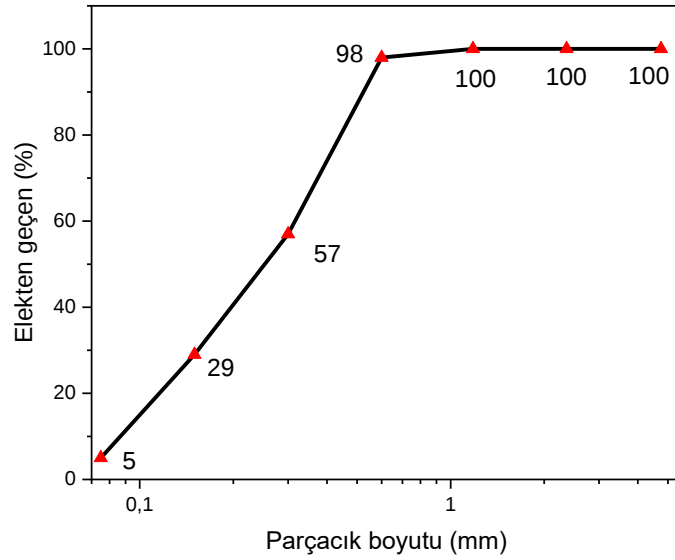
Tablo 5. Kuvars Tozunun Kimyasal Özellikleri

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
98,2	0,7	0,2	<0,1	<0,1

SiO₂: silisyum dioksit, Al₂O₃: alüminyum oksit; Fe₂O₃: demir(III) oksit, MgO: magnezyum oksit, SO₃: sülfür trioksit,

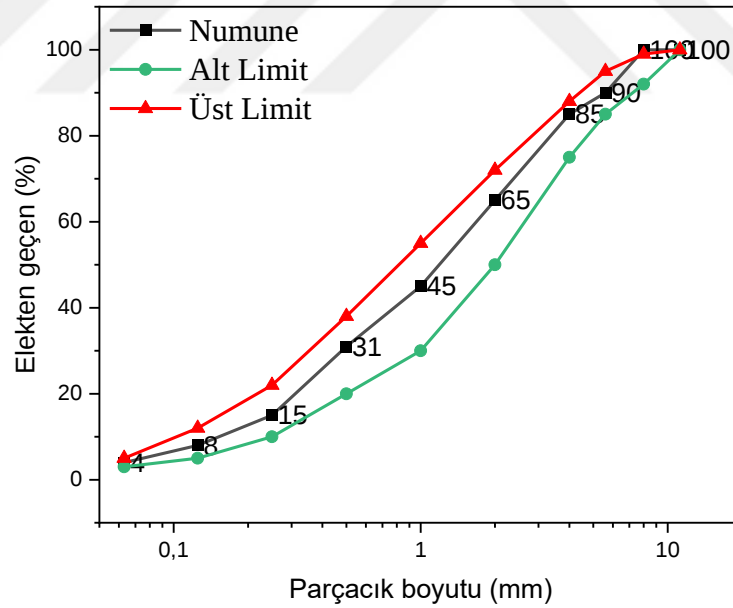


Şekil 14. Kuvars tozu XRD deseni



Şekil 15. Kuvars tozu elek analizi

Karışımında kullanılan bir diğer ince agrega ise dere kumudur. İnce agrega Türkiye’ de Erzurum ilinde bulunan hazır beton santralinden temin edilmiştir. Dere kumunun birim hacim ağırlığı $2,64 \text{ gr/cm}^3$ tür. Ayrıca su emme oranı %1,3 ve incelik modülü de 2,7’ dir. Dere kumunun elek analizi sonucu **Şekil 16’** da sunulmuştur.



Şekil 16. Dere kumu elek analizi

Geopolimer beton karışımında beton hacminin %0,5 ve %1’ i oranında olmak üzere iki farklı oranda polimer esaslı mikro sentetik lif kullanılmıştır. Bu lif türünün özellikle sıcaklık altında beton matris ile donatı arasına yapışma özelliğinden faydalanılması hedeflenmiştir. Karışımında kullanılan lifin birim hacim ağırlığı 1 gr/cm^3 tür. Liflerin görünüm ve teknik özellikleri **Tablo 6’** da sunulmuştur.

Tablo 6. Mikro Sentetik Liflerin Teknik Özellikleri

Uzunluk (mm)	Yarıçap (mikron)	Çekme dayanımı (MPa)	Erime noktası (°C)	Fiber sayısı (~#/kg)	Uygunluk
12	17-21	800-1100	255-265	200 milyon	ASTM C1579-13

Görünüm



Geopolimer beton karışımında alkali aktivatör olarak iki farklı kimyasal malzeme kullanılmıştır. Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) deneysel çalışmada geopolimer beton üretimi için alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Karışımında alkali aktivatörün oranı bağlayıcı malzemenin %70' i olarak alınmıştır. Ayrıca literatürdeki çalışmalar (Öz *et al.* 2022; Kaplan *et al.* 2022; Öz *et al.* 2023) göz önünde bulundurularak uygun işlenebilirlik ve dayanım açısından sodyum silikatın, sodyum hidroksite oranı 2,5 olarak tercih edilmiştir. Sodyum hidroksitin 30 °C' de birim hacim ağırlığı 1,38 gr/cm³ ve sodyum silikatın 20 °C' de birim hacim ağırlığı ise 1,38 gr/cm³ dür. Ayrıca sodyum silikat ve sodyum hidroksitin kimyasal bileşenleri **Tablo 7'** de sunulmuştur.

Tablo 7. 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 8. Sodyum Silikatın Kimyasal Özellikleri (%)

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

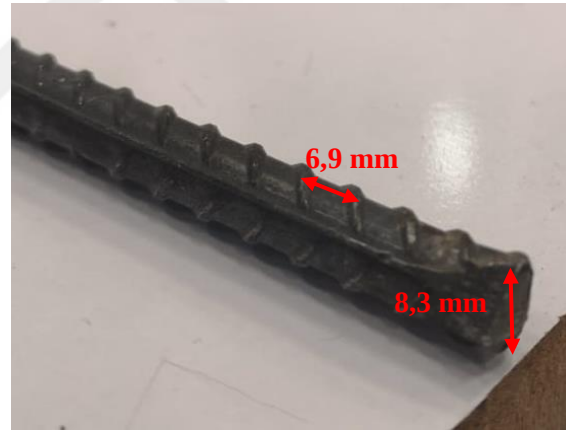
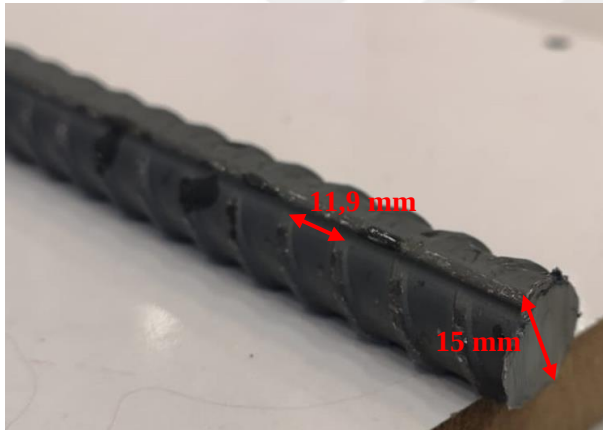
SiO_2 : silisyum dioksit veya silika; Na_2O : sodyum oksit; H_2O : su; Fe: demir

Numunelerin üretiminde 8 mm ve 14 mm çaplarında nervürlü donatılar kullanılmıştır. 8 mm çapındaki donatılar etriyelerin yapımında, 14 mm çapındaki donatılar ise geopolimer

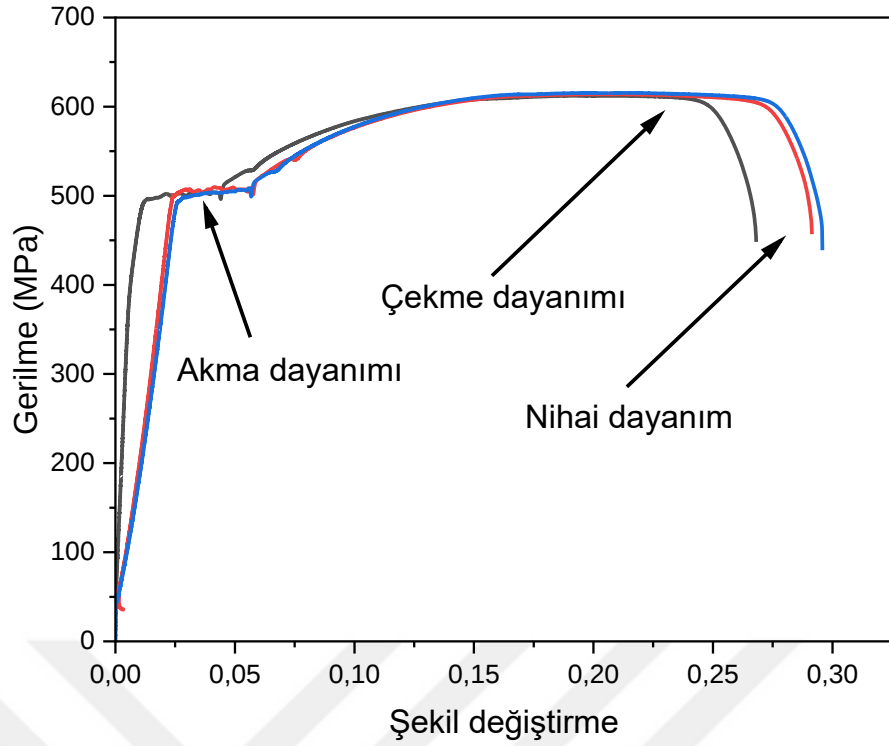
betona gömülmüştür. 8 mm ve 14 mm çapındaki donatıların mekanik özellikleri **Tablo 9'** da sunulmuştur. 8 mm ve 14 mm çaplı donatıların geometrik özellikleri de **Şekil 17'** de sunulmuştur. Ayrıca 8 mm ve 14 mm çaplı donatıların gerilme-şekil değiştirme eğrileri de **Şekil 18** ve **Şekil 19'** da sunulmuştur. Donatılarla ilgili tablo ve grafiklerde üç adet numunenin parametreleri görülmektedir.

Tablo 9. 8 mm ve 14 mm Çaplı Donatıların Özellikler

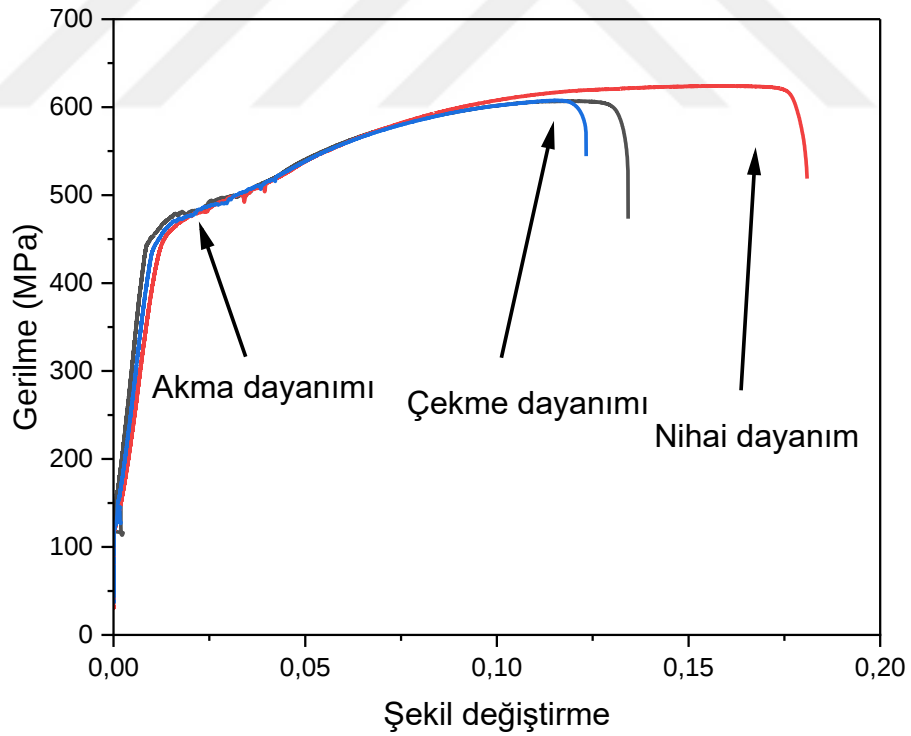
Nominal (mm)	çap (mm)	Ölçülen (mm)	çap (mm)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Nihai Dayanım (MPa)
8 mm		8,3		458,99	624,28	518,68
8 mm		8,2		444,30	606,98	473,19
8 mm		8,3		467,18	607,71	544,37
14 mm		15		495,79	612,26	448,25
14 mm		14,9		503,91	614,01	456,92
14 mm		14,9		493,80	615,48	438,93



Şekil 17. 8 mm ve 14 mm çaplı donatıların geometrik özellikleri



Şekil 18. 14 mm çapındaki donatıların gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 19. 8 mm çapındaki donatıların gerilme şekil değiştirme grafiği

Numunelerin beton döküm işlemleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bünyesinde bulunan laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Beton dökümü için 300 dm³ kapasiteli laboratuvar tipi beton mikseri kullanılmıştır. Her numuneden üç adet

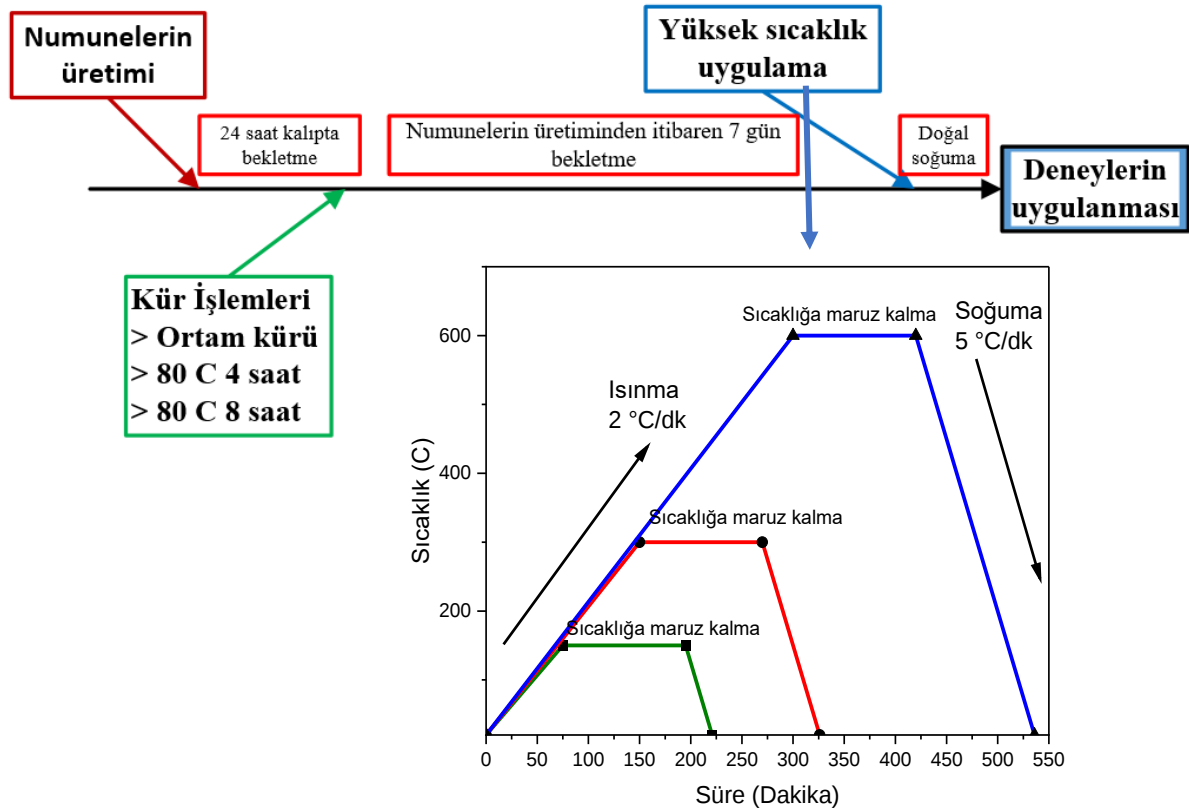
üretilmiş olup bu numunelerin ortalama değerleri kullanılmıştır. Beton dökümünde önce katı malzemeler 3 dakika boyunca mikserde karıştırılmıştır. Ardından lifsiz numunelerde alkali aktivatörler eklenerek karışım 5 dakika daha karıştırılmıştır. Lifli numunelerde ise lifler kuru karışıma eklenip karıştırıldıktan sonra alkali aktivatörler eklenmiştir. Numunelerin beton döküm işlemi bittikten sonra 24 saat kalıpta bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan numunelere ilgili kür işlemleri uygulanmıştır. Beton dökümü, beton dökümü biten numunelerin gösterimi **Şekil 20'** de sunulmuştur. Toplam 432 adet 100x200 mm boyutlarında silindir numune üretilmiştir. Beton dökümü aşamasında üç farklı beton türünün mekanik özelliklerinin tespiti için üçer adet 100x200 mm boyutlarında silindir numune örneği alınmıştır.



Şekil 20. Beton dökümü

Deney numunelerinin üretiminde deney anına kadarki uygulanan işlemlerin şematik gösterimi **Şekil 21'** de sunulmuştur. Beton dökümü tamamlanan numuneler 24 saat kalıpta bekletildikten sonra plastik kalıplardan çıkarılmıştır. Ardından numuneler üç farklı kür ortamına maruz bırakılmıştır. Bir grup numuneler sadece ortam kür uygulanmıştır. Yani deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmişlerdir. Tüm numunelerin deneyleri üretildikten 7 gün sonra uygulanmıştır. Burada geopolimer betonun erken yüksek dayanım özelliğinden faydalanılmak hedeflenmiştir. Literatürde ulaşılan çalışmalarda (Kong and Sanjayan 2008; Zhang *et al.* 2014; Bayrak *et al.* 2023b; Bayrak *et al.* 2023c; Öz *et al.* 2023) geopolimer betonun hızlı geopolimerizasyon sürecinden dolayı dayanımını erken sürede kazandığı görülmektedir. İkinci gruptaki numunelere ise 80 °C sıcaklıkta 4 saat bekletilmiştir. Üçüncü gruptaki numunelere ise 80 °C sıcaklıkta 8 saat boyunca sıcaklık kürü uygulanmıştır. Böylece ortam kürü ve sıcaklık kürünün aderans dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Ayrıca sıcaklık kürü de iki farklı sürede uygulanarak kür süresinin aderans dayanımı üzerindeki etkisinin tespiti hedeflenmiştir. Numunelere üç farklı kür uygulandıktan sonra yüksek sıcaklığın aderans dayanımına etkisinin araştırılması için numuneler *pull-out* testinden birkaç saat önce (doğal soğumaya bırakılan numunelerin soğuma zamanları maruz kaldıkları sıcaklık değeri ile değişmektedir) üç farklı yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Numuneler deneyden önce 150 °C, 300 °C ve 600 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. 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. 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. Hedef sıcaklıkta 120 dakika yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler fırın kapatılarak doğal soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 21. Numunelerin üretiminden deney anına kadarki işlemlerin şematik gösterimi

Sunulan tez çalışmasının amacının lif katkısının, etriye varlığının, aderans boyunun, kür sıcaklığı ile kür süresinin ve yüksek sıcaklık etkisinin aderans performansına etkisinin deneysel olarak irdelenmesi olduğu vurgulanmıştır. Bu amaç doğrultusunda deney parametreleri **Tablo**

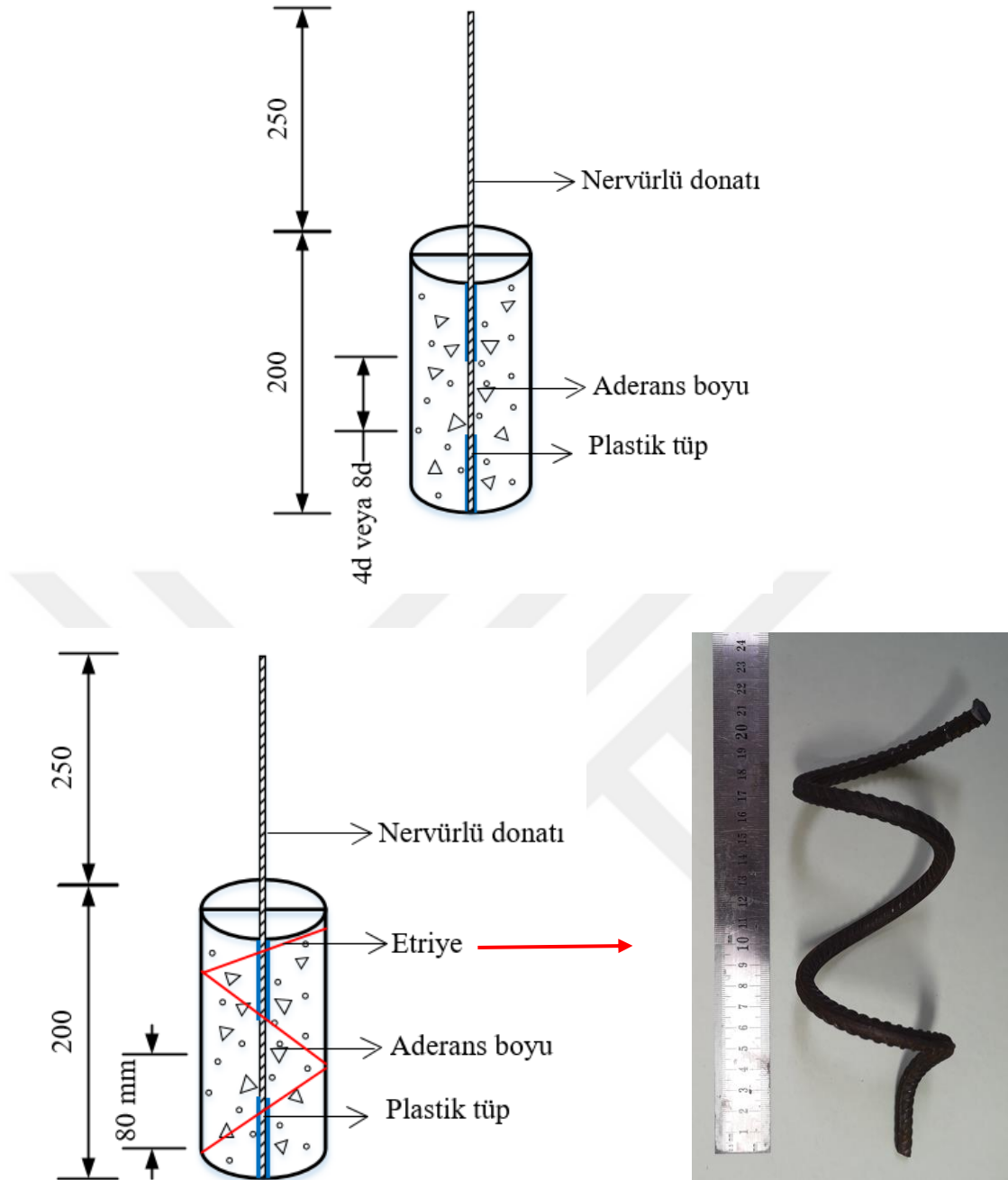
10' da sunulmuştur. Öncelikle lif takviyesinin etkisi için referans olması açısından lifsiz numuneler üretilmiştir. Diğer iki beton karışımında ise hacimce %0,5 ve %1 oranlarında polimer esaslı sentetik lif kullanılmıştır. Etriye kullanılmasının aderans dayanımına etkisi için ise bir grup numunelerde spiral etriye kullanılmıştır. diğer numunelerde ise etriye kullanılmamıştır. Bir diğer parametre olan aderans boyunun etkisi için ise iki farklı donatı boyu oluşturulmuştur. d donatı çapını göstermek üzere donatı çapının dört katı (4d) ve sekiz katı (8d) aderans boyu oluşturulmuştur. Kür koşullarının etkisinin araştırılması için ise ortam kürü ve iki farklı sürede sıcaklık kürü uygulanmıştır. Son olarak ise yüksek sıcaklığın etkisinin araştırılması için numuneler 150 °C, 300 °C ve 600 °C yüksek sıcaklığa 2 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Numunelerin isimlendirilmesi yönteminde bu parametreler göz önüne alınmıştır. Lif katkısı F0 (lifsiz), F0,5 (%0,5 lifli) ve F1 (%1 lifli) olarak kodlanmıştır. Etriye varlığı, etriyeli numuneler S ile etriyesiz numuneler WS ile kodlanmıştır. Aderans boyu, 4d ve 8d şeklinde kodlanmıştır. Kür koşulları ise ortam kürü R ile 80 °C 4 saat 4h ile 80 °C 8 saat 8h şeklinde kodlanmıştır. Son olarak yüksek sıcaklık etkisi 150C, 300C ve 600C şeklinde kodlanmıştır.

Tablo 10. Deney Parametreleri

Lif katkısı	Etriye varlığı	Aderans boyu	Kür sıcaklığı ve süresi	Yüksek sıcaklık etkisi
%0	Ø8/8	4d	Ortam	150 °C
%0,5	x	8d	80 °C / 4 saat	300 °C
%1			80 °C / 8 saat	600 °C

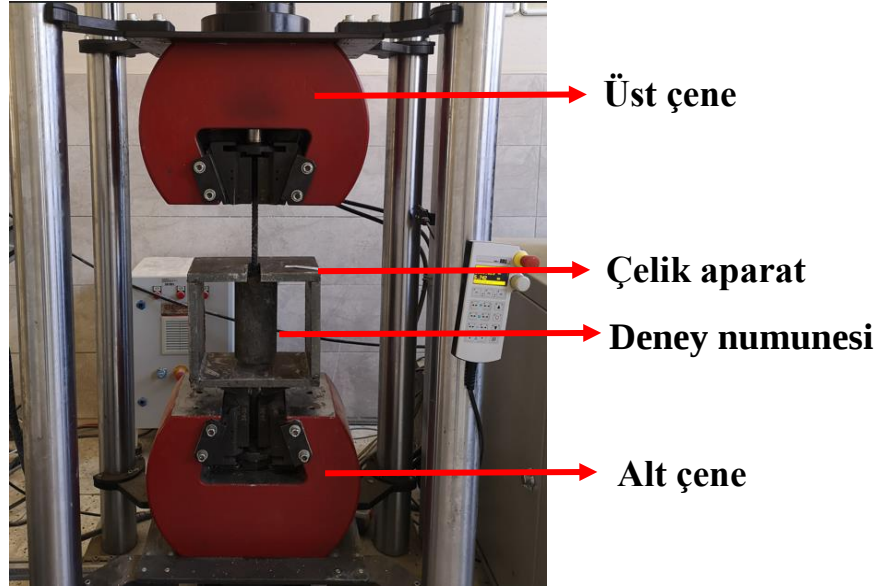
Yöntem

Deneyisel çalışma kapsamında her numuneden üç adet olmak üzere toplam 432 adet silindir numune üretilmiştir. Deney numunelerinin şematik gösterimi **Şekil 22'** de gösterilmiştir. Tüm numuneler 100x200 mm silindir numune şeklinde üretilmiştir. Tüm numunelerde 450 mm boyunda 14 mm çapında nervürlü inşaat demiri kullanılmıştır. Bir grup numunelerde 8 mm çaplı nervürlü donatıdan spiral şeklinde ve 80 mm aralıklı etriye kullanılmıştır. Diğer grup numunelerde ise herhangi bir yanal donatı kullanılmamıştır. Numunelerde aderans boyu oluşturmak için plastik malzemeler kullanılmıştır. Tüm numunelerde aderans boyu numunenin orta bölgesinde oluşturulmuştur.



Şekil 22. Deney numunelerinin geometrik özellikleri

Tüm numunelere ASTM C900 (2015) ve ACI4403R (2004) standartlarına uygun olarak *pull-out* testi uygulanmıştır. **Şekil 23'** de deney düzeneği gösterilmiştir. Aderans deneyleri için numuneler çelik bir aparata yerleştirildikten sonra donatı üst çeneler arasına sıkıştırılmıştır. Aderans deneyleri, bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilen çekme cihazı yardımıyla uygulanmıştır. Tüm numunelerde beton matris içerisine gömülen donatı 0,2 mm/dk çekme hızı ile yukarı yönde çekilerek beton matrsten sıyrılması sağlanmıştır.



Şekil 23. Deney düzeneği

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 takviyesinin, etriye kullanılmasının, aderans boyunun, kür koşullarının ve yüksek sıcaklığın aderans dayanımı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda her bir numuneden üç adet olmak üzere toplam 432 adet 100x200 mm boyutlarında silindir numunelere *pull-out* testi uygulanmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında deney parametrelerinin 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 açıklanmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

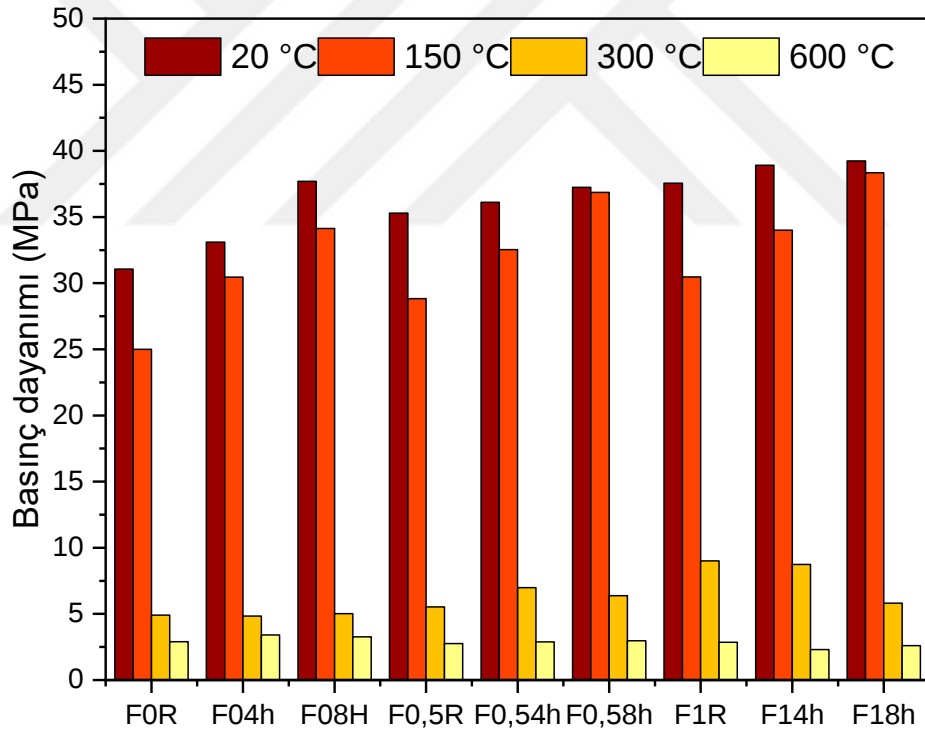
Araştırma Bulguları ve Tartışma başlığında pull-out testleri uygulanan numunelerden elde edilen veriler ışığında aderans performansı değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen veriler bu bölümde gerek ayrı ayrı gerekse de bir birleri ile karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. B bölümde öncelikle geopolimer betonun basınç dayanımı ele alınmıştır. Lifsiz ve lifli geopolimer betonların farklı kür ve farklı yüksek sıcaklık etkisi altındaki basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Böylece aderans performansı değerlendirilirken basınç dayanımından elde edilen sonuçlar ışığında yorumlar da yapılmıştır. Daha sonra numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri tek tek sunulmuştur. Son olarak ise deney parametrelerinin aderans dayanımı üzerindeki etkisi ayrı başlıklar altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Geopolimer Betonun Basınç Dayanımı

Aderans deneyi uygulanan numunelerde genel olarak lifsiz, %0,5 lifli ve %1 lifli olmak üzere üç farklı beton türü kullanılmıştır. Bu numunelere de ortam 4 saat 80 °C ve 8 saat 80 °C derece olmak üzere ayrıca üç farklı kür uygulanmıştır. Son olarak ise bu beton türlerine ortam (20 °C) ve 150 °C, 300 °C ve 600 °C olmak üzere üç farklı yüksek sıcaklık uygulanmıştır. Bu açıdan bakıldığında toplam 36 farklı basınç dayanımı olmaktadır. **Tablo 11'** de aderans dayanımında kullanılan 36 farklı beton türünün 7 günlük basınç dayanımı sonuçları sunulmuştur. Her bir numuneden üç adet üretilmiş olup numunelerin ortalama sonuçları sunulmuştur. Basınç dayanımı, TS EN12390-3 (2019) standardına göre ve 100x200 mm boyutlarındaki silindir numuneler kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca numunelerin basınç dayanımı karşılaştırması **Şekil 24'** de sunulmuştur. Tablo ve şekilden görüldüğü üzere numunelerde lif kullanılması basınç dayanımını arttırmıştır. Numunelerde %0,5 oranında lif kullanılması %15' e kadar dayanımda artışa neden olmakla beraber, %1 oranında lif kullanılması durumunda basınç dayanımındaki artış %21' e kadar çıkmaktadır. Benzer şekilde numunelere uygulanan kür işlemlerinin de basınç dayanımı üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. Sıcaklık kürü ve süresinin de basınç dayanımı üzerinde arttırıcı bir etkisinin olduğu görülmektedir. Kür sıcaklığı ve kür süresinin arttırılmasının basınç dayanımını %11 ile %21 arasında arttırdığı görülmektedir. Bununla birlikte numunelere uygulanan yüksek sıcaklığında dayanım üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde dayanım kayıplarının olduğu görülmektedir. Özellikle 300 °C ve 600 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise önemli derecede dayanım kayıpları meydana gelmiştir.

Tablo 11. 7 Günlük Basınç Dayanımı Sonuçları

	Sıcaklık			
	20 °C	150 °C	300 °C	600 °C
F0R	31,06	25,00	4,91	2,90
F04h	33,10	30,46	4,83	3,41
F08H	37,70	34,13	5,02	3,27
F0,5R	35,30	28,83	5,53	2,76
F0,54h	36,11	32,53	6,98	2,88
F0,58h	37,25	36,86	6,38	2,97
F1R	37,56	30,47	9,01	2,85
F14h	38,92	34,01	8,74	2,30
F18h	39,24	38,35	5,81	2,60

**Şekil 24.** Basınç dayanımı karşılaştırması

Özellikle 300 °C ve 600 °C gibi yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımındaki kaybın nedenlerinden bir tanesi karışımdaki yüksek fırın cürufu ve silis dumanının bu sıcaklık değerlerinde amorf yapılarının bozularak kristalleşmesi olabilir. Amorf yapının bozularak kırılmalışması nedeni ile bu bağlayıcı malzemelerin bağlayıcılık özelliklerinde azalışlar meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı da basınç dayanımında önemli kayıplar meydana

gelmiştir. Bir diğer neden ise alkali aktivatörlerden dolayı olabilmektedir. Yüksek sıcaklık değerlerinde alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksitte kimyasal ayrışmalar meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı da dayanımda kayıplar meydana gelmiştir. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise hem bağlayıcı malzeme açısından hem de aktivatörlerin yapısı açısından önemli bozulmaların olmamasından dolayı dayanım kayıpları düşük seviyelerde kalmıştır. Bunlarla birlikte 300 °C ve 600 °C yüksek sıcaklık değerlerinde termal genleşmelerin neden olduğu mikro çatlaklar da dayanım kayıplarına neden olmuştur. Hatta özellikle 600 °C sıcaklıktan çıkarılan numunelerin yüzeylerinde çatlak oluşumları da gözlemlenmiştir.

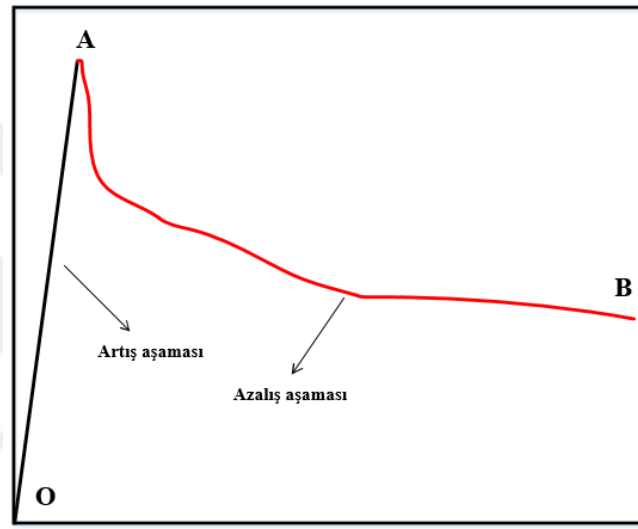
Bununla birlikte kür süresi ve kür sıcaklığının da basınç dayanımı üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Özellikle ortam kürüne kıyasla sıcaklık kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımlarının artmasının bir nedeni, sıcaklık etkisi ile karışımdaki bağlayıcı malzemeler ile aktivatörlerin reaksiyona girmesi daha hızlı bir şekilde olmuştur. Bir diğer neden ise sıcaklığın, küçük moleküllerin daha güçlü bir ağ oluşturmak üzere birleştiği süreç olan polimerizasyon sürecine yardımcı olmuştur. Polimerizasyon sürecinin daha etkin ve sağlam olmasından dolayı basınç dayanımında artışlar meydana gelmiştir. Bir diğer neden ise sıcaklık kürünün beton fazında gözenekleri ve boşlukları azaltarak daha az kusurlu bölgenin oluşmasına neden olmuştur. Daha kompakt bir yapının oluşması da dayanım artışına neden olmuştur.

Ulaşılan literatürde de geopolimer betonun yüksek sıcaklığa maruz bırakılması durumunda basınç dayanımında azalmaların meydana geleceği belirtilmiştir. Dalğış and Yılmaz (2024) 100, 300, 600 ve 900 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan seramik lifli geopolimer numunelerde sıcaklığın artmasının basınç dayanımının azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde Tanyıldızı and Yonar (2016) da PVA lifli geopolimer betonda hem kür sıcaklığının hem de yüksek sıcaklığın basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kür sıcaklığının artmasının basınç dayanımını arttırmakla birlikte maruz kalınan sıcaklığın artması ile de basınç dayanımında azalmaların olduğunu belirtmişlerdir. Kong *et al.* (2007), Babalola *et al.* (2021) ve Humur and Çevik (2022) de yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolşmer betonların basınç dayanımlarında azalmaların meydana geldiğini vurgulamışlardır. Literatürdeki çalışmalar ile sunulan tez çalışmasında kullanılan malzemelerin farklılık gösterdiği ve bu farklılıkların da dayanıma farklı şekilde yansıdığı da görülmektedir.

Aderans dayanımı-sıyrılma ilişkisi

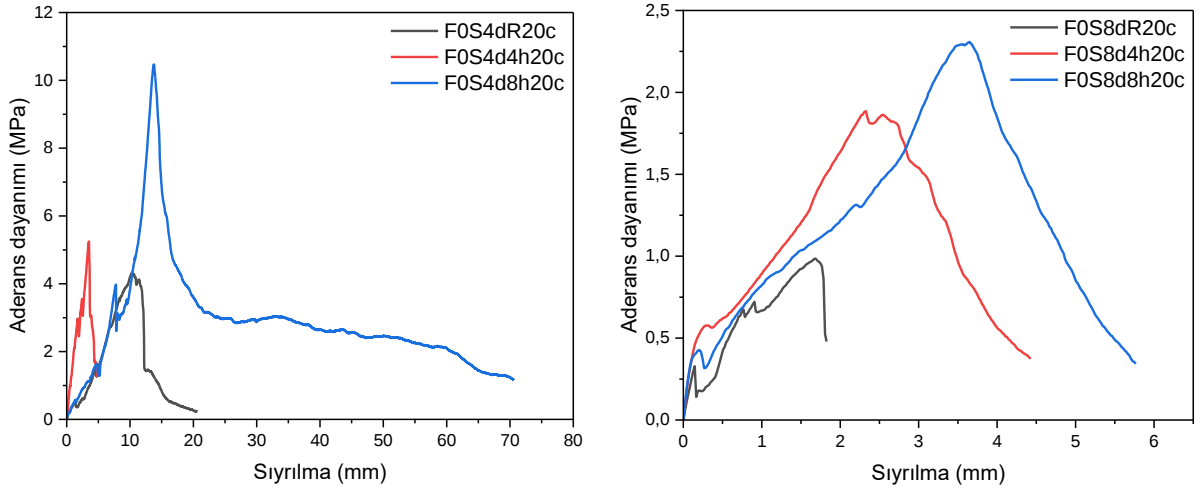
Bu bölümde numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri sunulmuştur. Grafikler, sıyrılma miktarı test anında cihazdan alınan sıyrılma miktarı (mm) ile Denklem 1' deki formül yardımıyla elde edilen aderans dayanımı kullanılarak çizilmiştir. Şekil 25' de klasik aderans

dayanımı sıyrılma grafiği gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere aderans dayanımı sıyrılma grafikleri iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada (OA) genellikle lineer ya da lineere çok yakın bir davranış elde edilmektedir. Bu bölgede yüksek aderans dayanımlarına ulaşılırken sıyrılma miktarları düşük seviyelerde kalmaktadır. AB aşamasında ise aderans dayanımında ani bir azalmak meydana gelmektedir. Bu bölgede aderans dayanımında azalma meydana gelmesine rağmen sıyrılma miktarında artmalar devam etmektedir. Lifsiz numunelerde AB bölgesinde fazla bir uzama görülememektedir. Aderans dayanımının maksimum yüke ulaşmasından sonra ani azalış ile donatı numunenin içerisinden çıkmakta ve deney sonlanmaktadır. Fakat lifli numunelerde özellikle liflerin etkinliğinden dolayı AB bölgesi uzamaktadır.

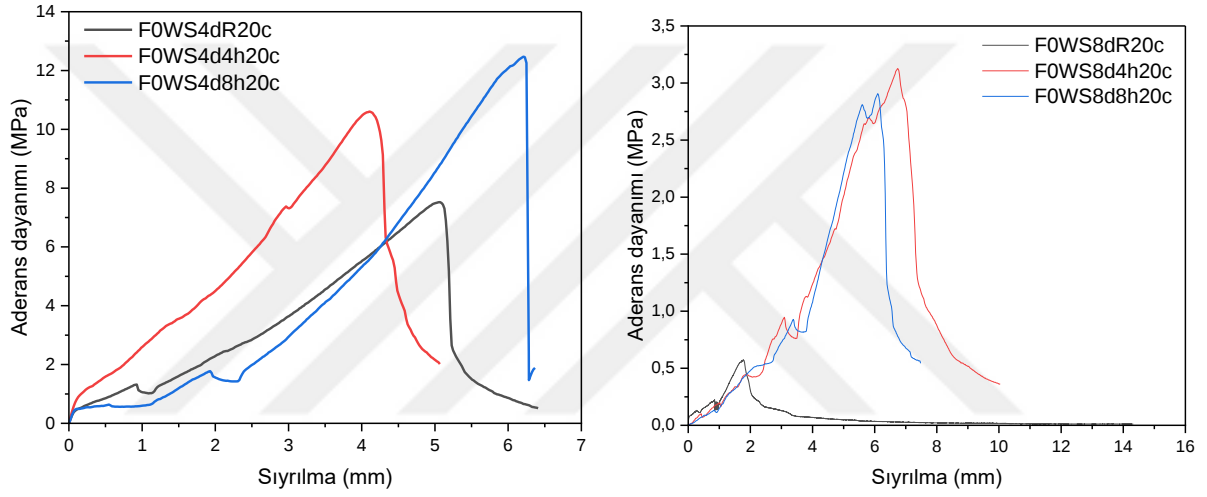


Şekil 25. Klasik aderans dayanımı sıyrılma grafiği

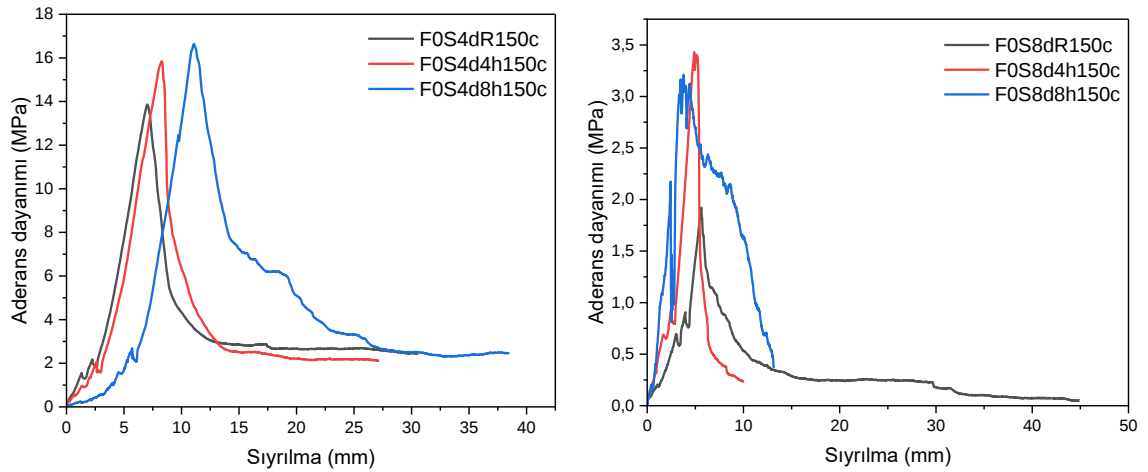
Aderans dayanımı sıyrılma grafikleri çizilirken davranışların daha iyi anlaşılabilir olması için kendi aralarında gruplandırılmıştır. **Şekil 26-49'** da numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri sunulmuştur. Aderans dayanımı-sıyrılma grafiklerinden görüldüğü üzere numunelerin grafikleri **Şekil 25'** de sunulan klasik aderans dayanımı-sıyrılma grafiği gibidir. Grafiklerden görüldüğü üzere numuneler ilk önce hızlı bir dayanım artışı sergileyerek maksimum aderans dayanımına ulaşmışlardır. Ardından bazı numunelerde maksimum aderans dayanımından sonra ani bir dayanım azalmasının meydana geldiği görülmüştür. Özellikle %1 lifli numunelerde ise maksimum aderans dayanımından sonra kuyruk bölgesi oldukça fazla olduğu görülmektedir. Yani aderans dayanımındaki azalış diğer numunelere göre daha yavaş olmakla beraber sıyrılma miktarı oldukça fazla olduğu görülmektedir.



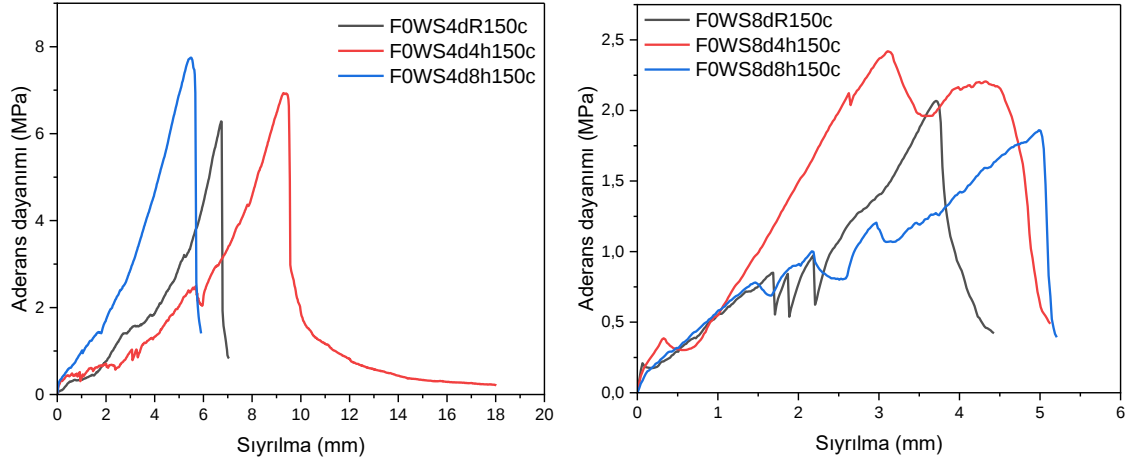
Şekil 26. 20 °C bekletilen, etriyeli ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



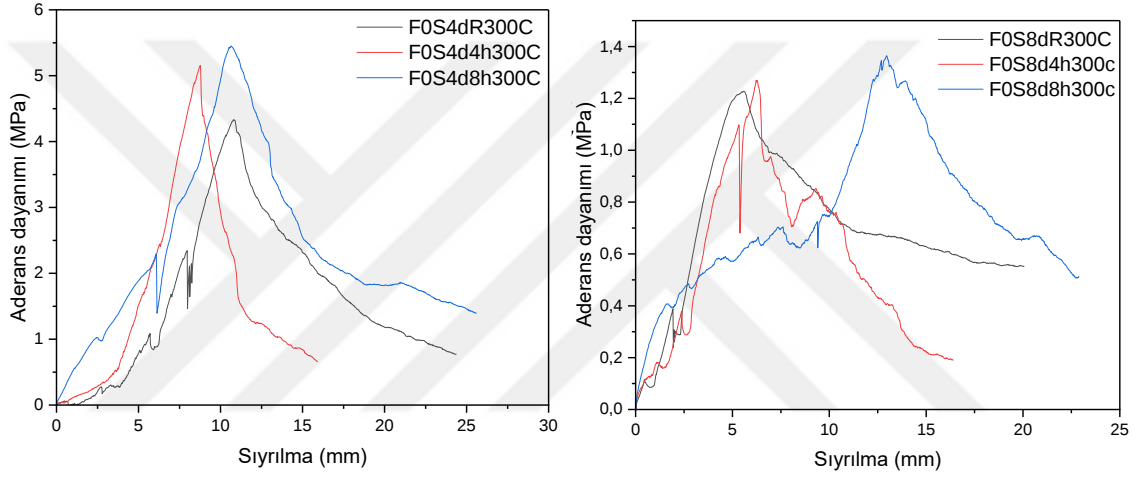
Şekil 27. 20 °C bekletilen, etriyesiz ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



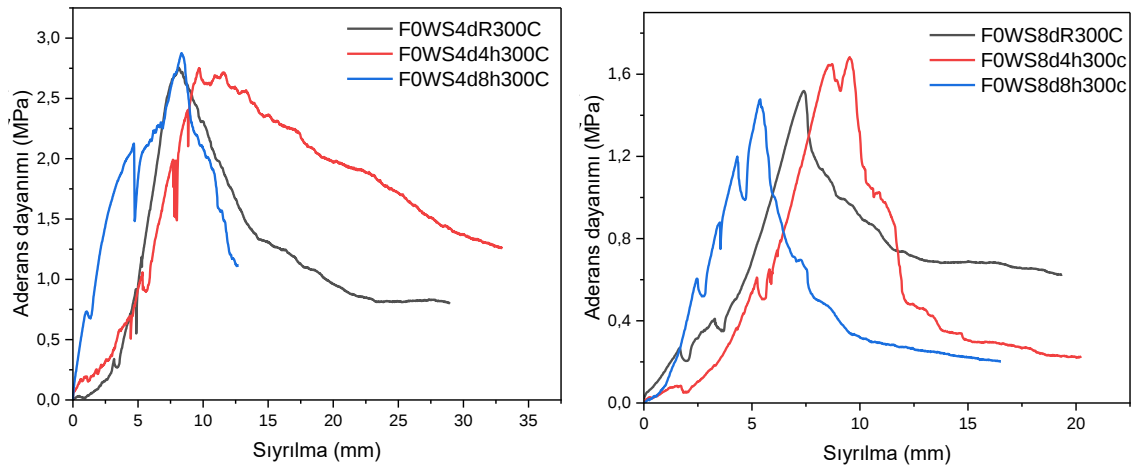
Şekil 28. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



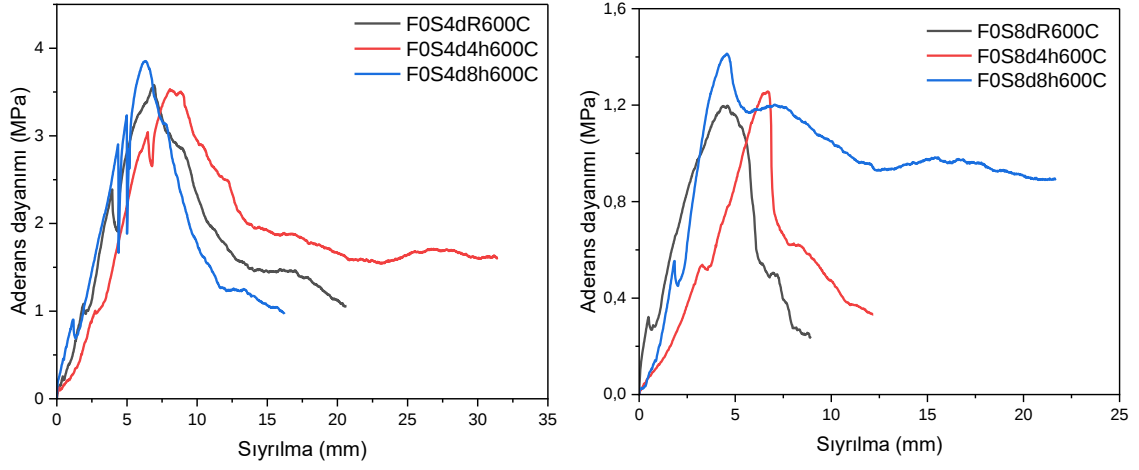
Şekil 29. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



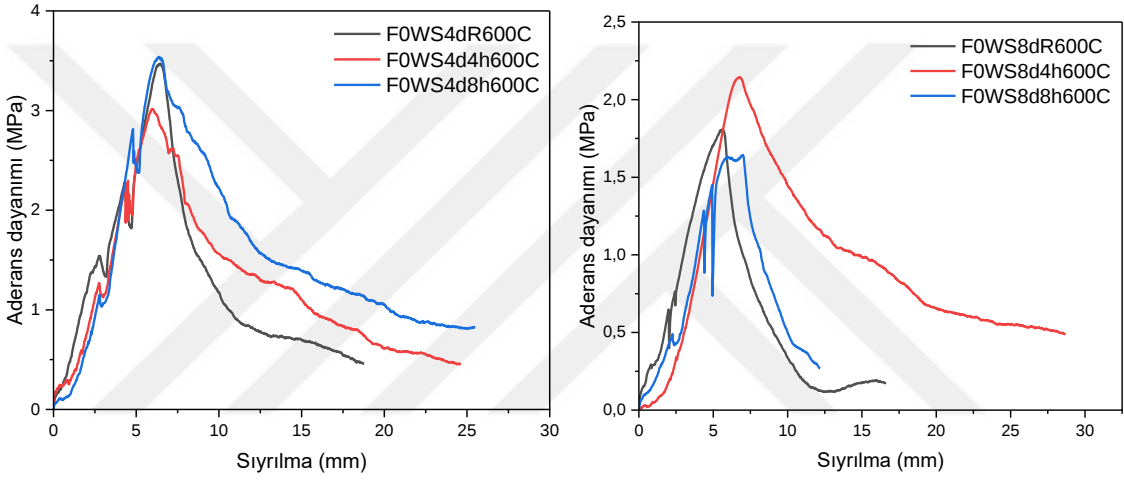
Şekil 30. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



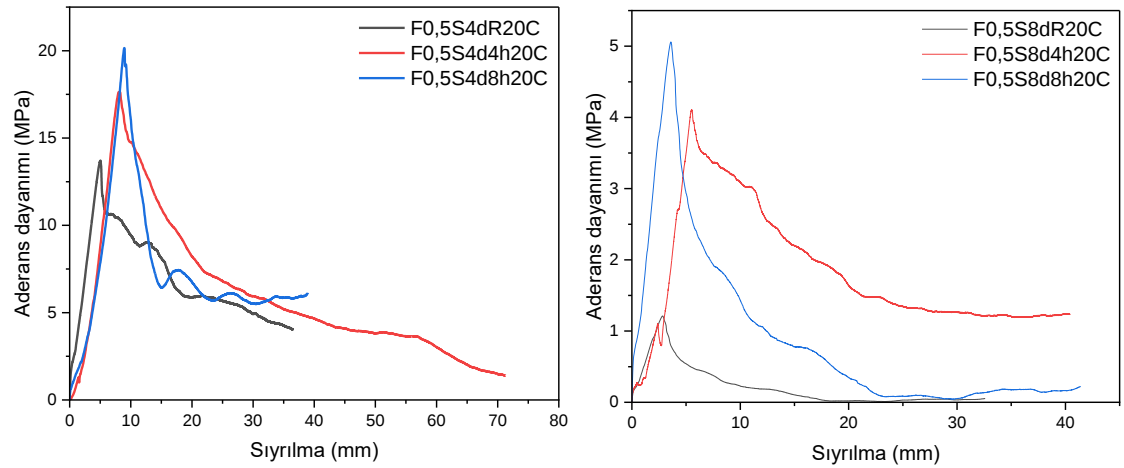
Şekil 31. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



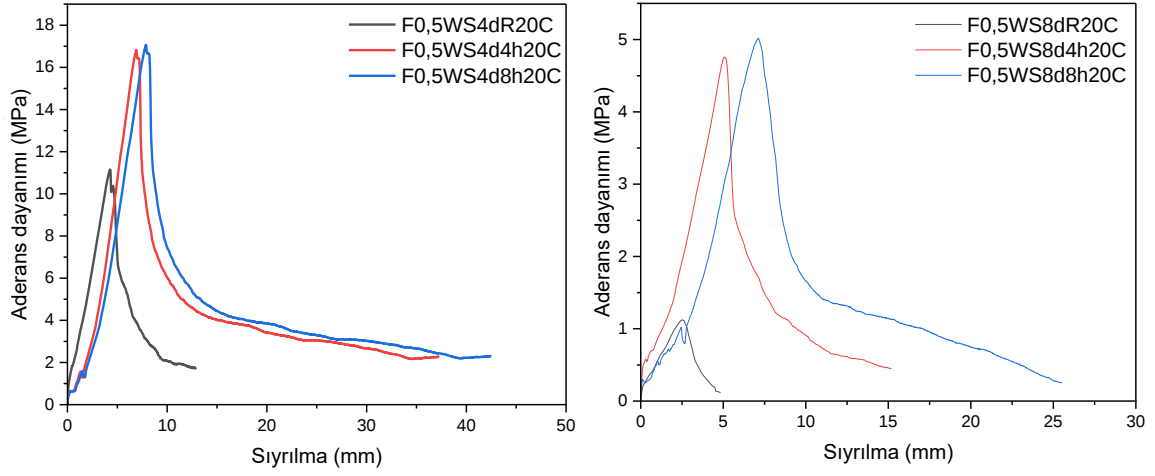
Şekil 32. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



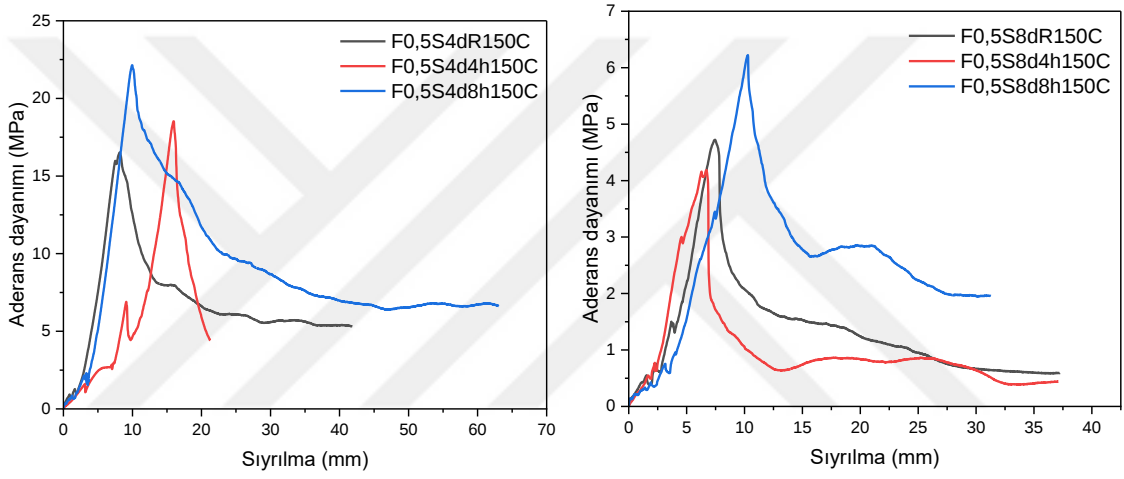
Şekil 33. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve lifsiz numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



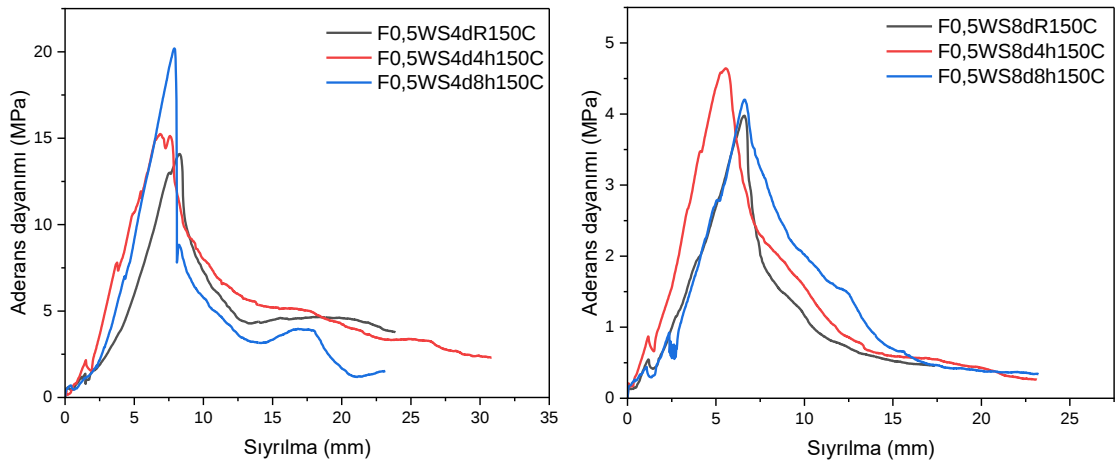
Şekil 34. 20 °C bekletilen, etriyeli ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



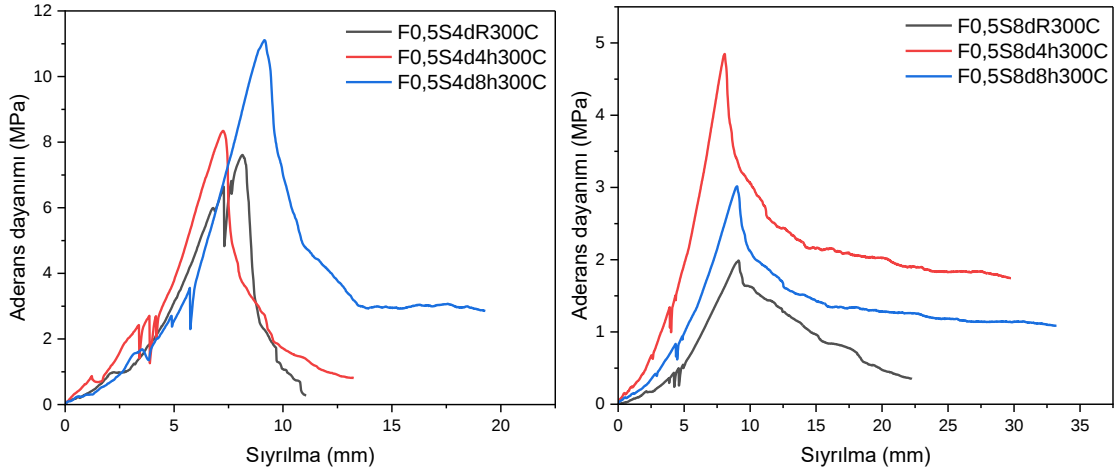
Şekil 35. 20 °C bekletilen, etriyesiz ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



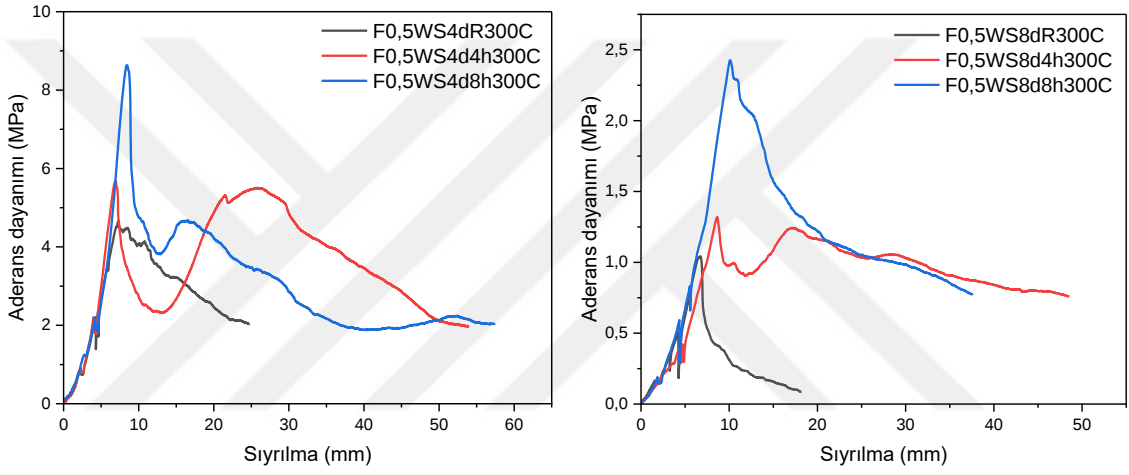
Şekil 36. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



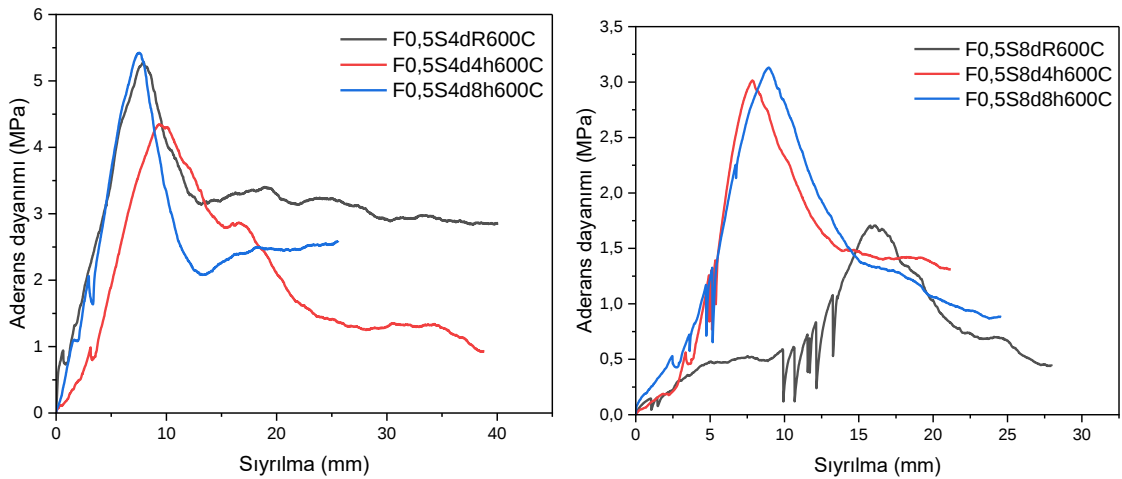
Şekil 37. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



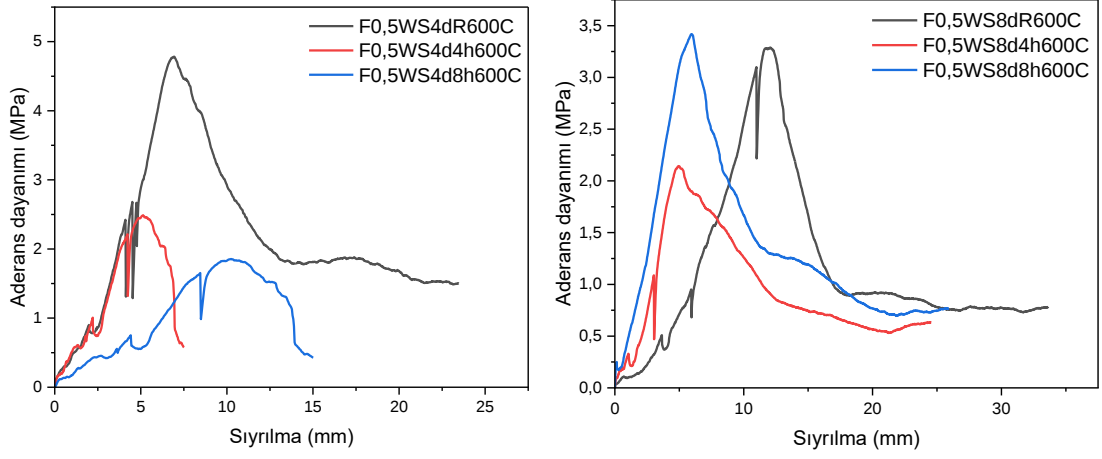
Şekil 38. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



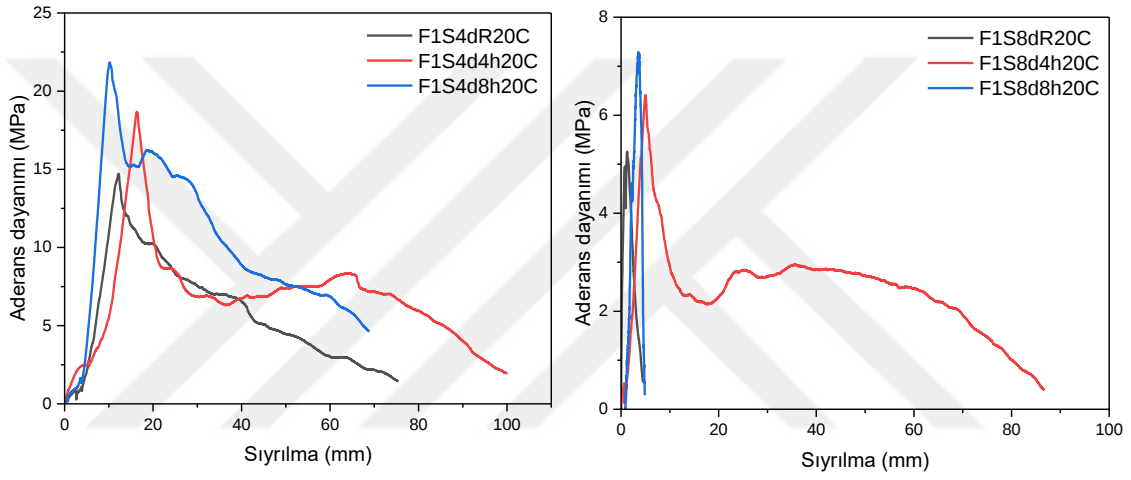
Şekil 39. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



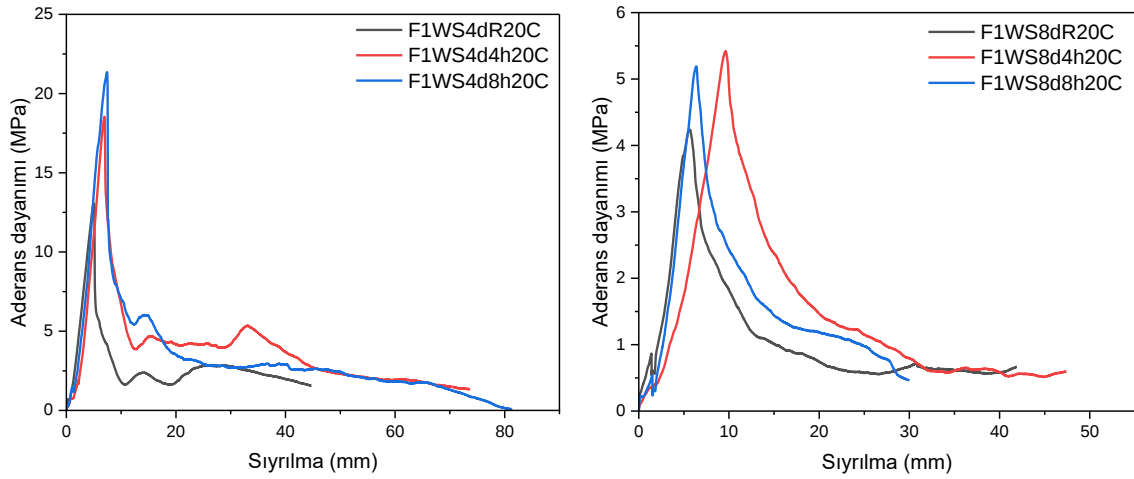
Şekil 40. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



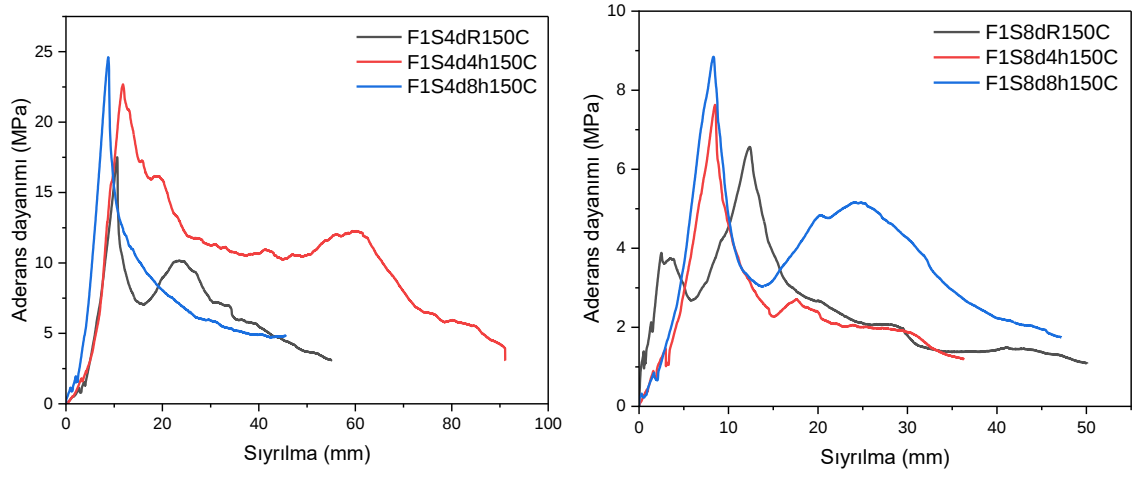
Şekil 41. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %0,5 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



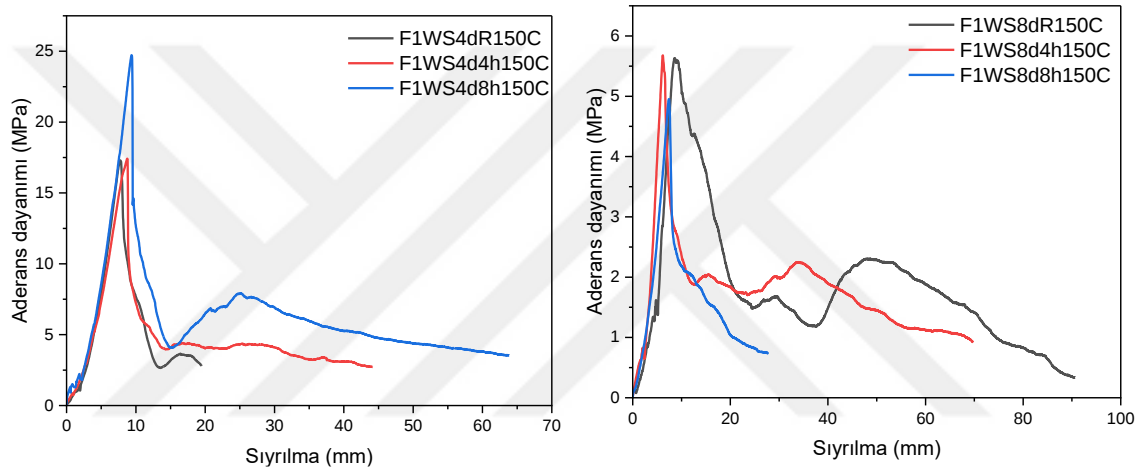
Şekil 42. 20 °C bekletilen, etriyeli ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



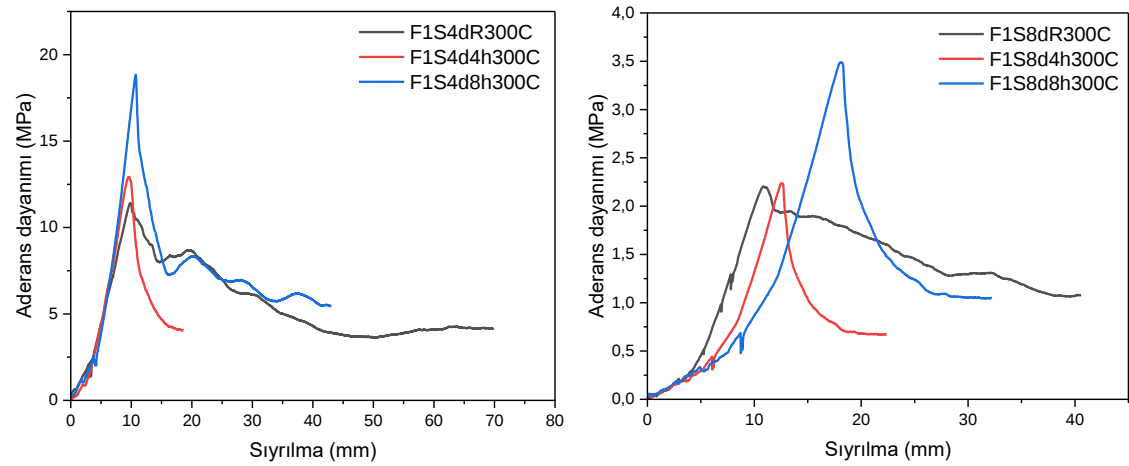
Şekil 43. 20 °C bekletilen, etriyesiz ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyırılma grafikleri



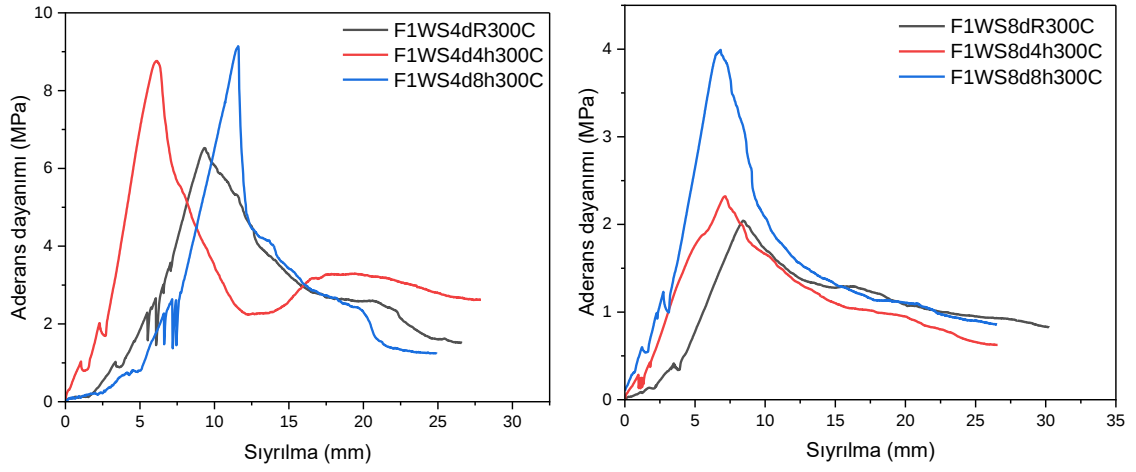
Şekil 44. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



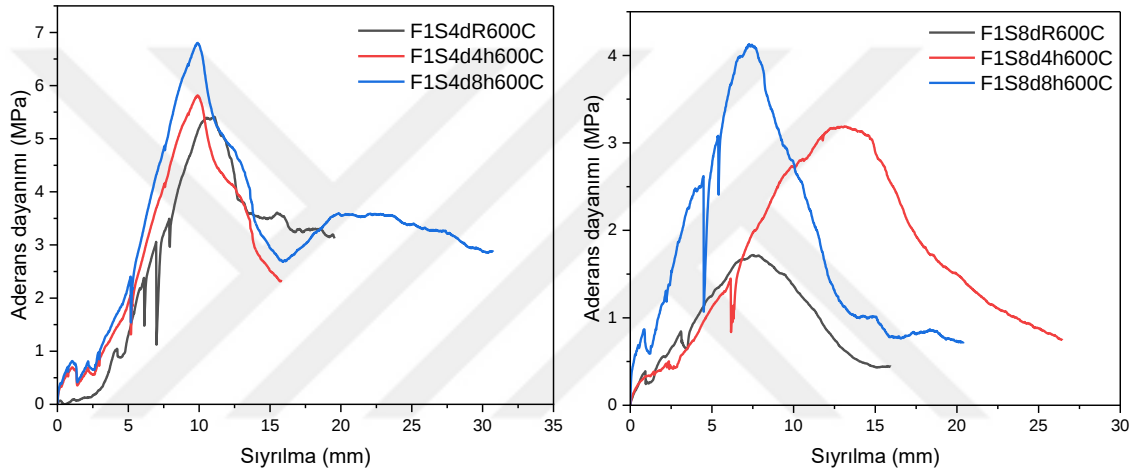
Şekil 45. 150 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



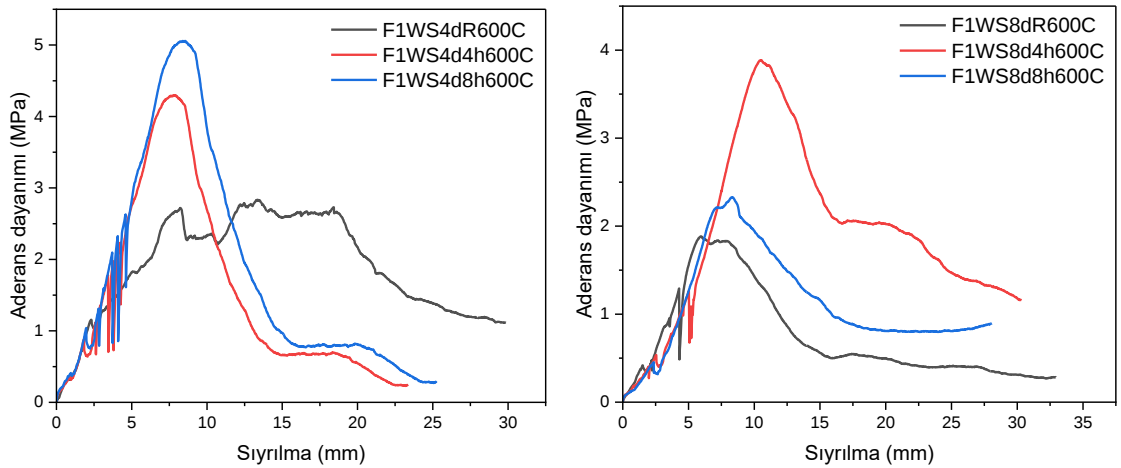
Şekil 46. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



Şekil 47. 300 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri

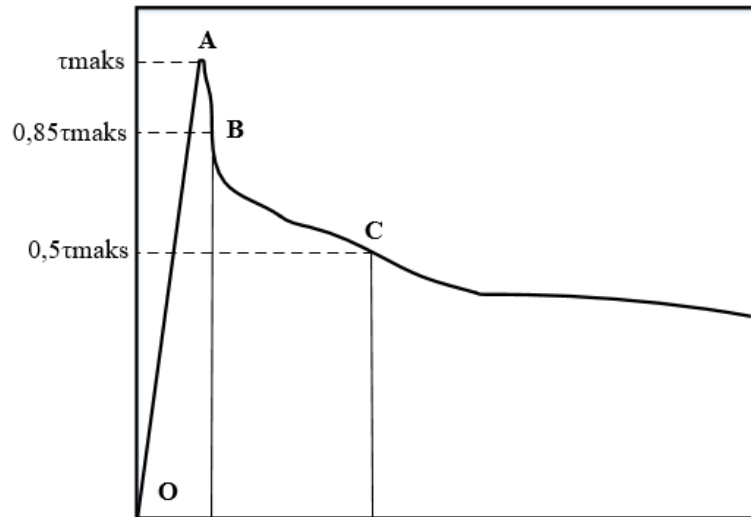


Şekil 48. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyeli ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri



Şekil 49. 600 °C sıcaklığa maruz kalan, etriyesiz ve %1 lifli numunelerin aderans dayanımı sıyrılma grafikleri

Tablo 12, 13 ve 14' de deneysel çalışma sonucundan elde edilen veriler sunulmuştur. Tablolarda öncelikle her bir numunenin basınç dayanımı (f_{cu}) sunulmuştur. Ardından numunelerin ulaştıkları maksimum aderans dayanımları sunulmuştur. Numunelerin beton basınç dayanımları farklı olduğu için beton basınç dayanımının egale edilebilmesi için normalleştirilmiş aderans dayanımı değeri de tablolarda sunulmuştur. Normalleştirilmiş aderans dayanımı $\tau_n = \tau_{maks} / \sqrt{f_{cu}}$ formülü ile hesaplanmıştır. Böylece numunelerin karşılaştırılması yapılırken beton basınç dayanımının etkisi ihmal edilmiş olmaktadır. Tabloda maksimum aderans dayanımına karşılık gelen sıyrılma miktarı (S_{maks}) ve nihai sıyrılma miktarı (S_u) değerleri de verilmiştir. Tabloda sunulan değerler her üç numunenin ortalamasıdır. Bu yüzden elde edilen maksimum aderans dayanımı, maksimum aderans dayanımına karşılık gelen sıyrılma değeri ve nihai sıyrılma değeri sonuçlarının standart sapma (SS) değerleri de tabloda sunulmuştur. Tablonun son sütunlarında ise numunelerin enerji sönümleme kapasitelerine yer verilmiştir. Enerji sönümleme kapasiteleri hesaplanırken numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri altında kalan alandan hesaplanmıştır. Fakat enerji sönümleme kapasiteleri hesaplanırken numunelerin grafiklerinin altında kalan üç bölgeden faydalanılmıştır. Enerji sönümleme kapasiteleri hesaplanırken **Şekil 57'** de şematik olarak gösterilen grafik kullanılmıştır. $E_{0,85}$, maksimum aderans dayanımından sonra %15 dayanım kaybının olduğu OAB bölgesinin altında kalan alandan hesaplanmıştır. $E_{0,5}$, ise maksimum aderans dayanımından sonra %50 oranında dayanım kaybının olduğu OAC bölgesinin altında kalandan hesaplanmıştır. T_{Toplam} ise tüm eğrinin altında kalan alandan hesaplanmıştır.



Şekil 50. Enerji sönümleme kapasitesinin şematik gösterimi

Tablo 12. Lifsiz Numunelerin Aderans Testi Sonuçları

Numune kodu	f'_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F0S4dR20C	31,06	4,33	0,78	1,03	10,31	1,01	20,61	1,02	26,44	27,38	33,31
F0S4d4h20C	33,10	5,24	0,91	1,02	3,47	1,02	4,85	1,03	9,72	11,16	12,54
F0S4d8h20C	37,70	10,46	1,70	1,01	13,74	1,01	70,61	1,03	49,96	62,25	201,66
F0S8dR20C	31,06	0,98	0,18	1,02	1,69	1,02	1,83	1,02	-	-	1,11
F0S8d4h20C	33,10	1,88	0,33	1,02	2,23	1,03	4,42	1,01	3,41	4,28	4,82
F0S8d8h20C	37,70	2,31	0,38	1,03	3,64	1,01	5,76	1,02	4,99	6,18	6,92
F0WS4dR20C	31,06	7,52	1,35	1,01	5,04	1,03	6,41	1,03	17,66	17,86	19,30
F0WS4d4h20C	33,10	10,61	1,84	1,02	4,10	1,01	5,06	1,02	22,73	23,76	25,67
F0WS4d8h20C	37,70	12,46	2,03	1,03	6,21	1,02	6,37	1,01	-	-	28,54
F0WS8dR20C	31,06	0,57	0,10	1,04	1,77	1,02	14,32	1,04	0,50	0,56	1,07
F0WS8d4h20C	33,10	3,12	0,54	1,02	6,74	1,02	10,03	1,02	9,07	9,63	11,45
F0WS8d8h20C	37,70	2,91	0,47	1,03	6,10	1,02	7,48	1,03	2,42	7,05	7,88

Tablo 12. (devamı)

Numune kodu	f_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F0S4dR150C	25,00	13,86	2,77	1,04	7,03	1,03	30,56	1,02	43,34	52,68	117,65
F0S4d4h150C	30,46	15,84	2,87	1,04	8,29	1,03	27,18	1,02	51,81	57,76	109,40
F0S4d8h150C	34,13	16,63	2,85	1,03	11,11	1,02	38,51	1,01	62,78	84,55	178,40
F0S8dR150C	25,00	1,92	0,38	1,02	5,71	1,02	44,91	1,02	4,09	6,05	14,91
F0S8d4h150C	30,46	3,42	0,62	1,03	4,89	1,03	10,01	1,01	7,28	7,51	9,83
F0S8d8h150C	34,13	3,21	0,55	1,01	3,80	1,02	13,13	1,01	8,40	19,82	22,62
F0WS4dR150C	25,00	6,28	1,26	1,04	6,73	1,01	7,04	1,02	-	-	13,99
F0WS4d4h150C	30,46	6,93	1,26	1,02	9,31	1,01	18,02	1,02	22,69	22,84	28,69
F0WS4d8h150C	34,13	7,75	1,33	1,03	5,48	1,02	5,90	1,03	18,13	18,13	19,18
F0WS8dR150C	25,00	2,06	0,41	1,01	3,71	1,01	4,42	1,02	3,44	3,60	3,95
F0WS8d4h150C	30,46	2,41	0,44	1,02	5,12	1,01	5,12	1,03	6,71	7,18	7,36
F0WS8d8h150C	34,13	1,86	0,32	1,03	5,01	1,03	5,20	1,02	4,98	5,04	5,09

Tablo 12. (devamı)

Numune kodu	f_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F0S4dR300C	4,91	4,33	1,95	1,03	10,81	1,02	24,38	1,02	17,14	28,13	39,81
F0S4d4h300C	4,83	5,15	2,34	1,02	8,75	1,02	15,92	1,03	15,18	20,01	26,61
F0S4d8h300C	5,02	5,44	2,43	1,04	10,69	1,03	25,60	1,02	29,97	40,15	60,36
F0S8dR300C	4,91	1,22	0,55	1,04	5,45	1,02	20,06	1,03	4,37	11,38	13,88
F0S8d4h300C	4,83	1,27	0,58	1,03	6,29	1,03	16,41	1,02	3,80	7,36	9,30
F0S8d8h300C	5,02	1,36	0,61	1,02	12,95	1,02	22,88	1,03	10,67	14,71	16,91
F0WS4dR300C	4,91	2,75	1,24	1,01	8,14	1,02	28,96	1,01	11,62	19,51	34,04
F0WS4d4h300C	4,83	2,75	1,25	1,02	11,63	1,03	32,94	1,02	24,31	51,01	55,37
F0WS4d8h300C	5,02	2,87	1,28	1,03	8,39	1,02	12,72	1,01	18,63	21,36	22,54
F0WS8dR300C	4,91	1,51	0,68	1,04	7,39	1,01	19,34	1,02	4,61	8,28	13,67
F0WS8d4h300C	4,83	1,68	0,76	1,03	9,57	1,02	20,24	1,01	6,44	8,32	11,14
F0WS8d8h300C	5,02	1,47	0,66	1,02	5,39	1,03	16,52	1,02	3,72	4,76	7,99

Tablo 12. (devamı)

Numune kodu	f_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F0S4dR600C	2,90	3,58	2,10	1,03	6,93	1,02	20,64	1,01	15,80	25,56	37,93
F0S4d4h600C	3,41	3,53	1,91	1,04	8,09	1,03	31,38	1,02	19,26	38,07	59,19
F0S4d8h600C	5,02	3,85	1,72	1,03	6,29	1,01	16,22	1,03	15,57	21,71	30,22
F0S8dR600C	2,90	1,19	0,70	1,04	4,69	1,02	8,94	1,02	4,54	4,93	6,04
F0S8d4h600C	3,41	1,25	0,68	1,04	6,68	1,01	12,16	1,01	4,01	4,81	6,73
F0S8d8h600C	5,02	1,41	0,63	1,04	4,5	1,02	21,66	1,02	-	3,94	20,45
F0WS4dR600C	2,90	3,46	2,03	1,04	6,49	1,02	18,76	1,01	12,51	15,30	24,09
F0WS4d4h600C	3,41	3,01	1,63	1,02	6,05	1,01	24,61	1,02	11,84	17,85	30,38
F0WS4d8h600C	5,02	3,53	1,58	1,03	6,33	1,02	25,46	1,01	13,71	22,69	38,79
F0WS8dR600C	2,90	1,81	1,06	1,04	5,71	1,01	16,62	1,02	5,96	7,44	10,17
F0WS8d4h600C	3,41	2,14	1,16	1,05	6,89	1,02	28,68	1,03	8,37	15,25	26,25
F0WS8d8h600C	5,02	1,64	0,73	1,04	7,03	1,03	12,18	1,02	6,45	8,00	9,64

Tablo 13. %0,5 Lifli Numunelerin Aderans Testi Sonuçları

Numune kodu	f'_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	S_{max} (mm)	SD	S_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F0,5S4dR20C	35,30	13,71	2,31	1,02	5,03	1,03	36,50	1,05	41,21	145,47	251,22
F0,5S4d4h20C	36,11	17,64	2,94	1,04	8,21	1,03	71,25	1,04	81,34	192,98	422,77
F0,5S4d8h20C	37,25	20,15	3,30	1,04	8,95	1,05	38,96	1,05	83,96	121,61	288,15
F0,5S8dR20C	35,30	1,21	0,20	1,02	2,84	1,03	32,58	1,04	2,24	3,19	6,86
F0,5S8d4h20C	36,11	4,11	0,68	1,02	5,55	1,02	40,41	1,05	12,68	39,69	73,09
F0,5S8d8h20C	37,25	5,06	0,83	1,03	3,62	1,01	41,38	1,05	11,87	16,91	36,37
F0,5WS4dR20C	35,30	11,15	1,88	1,04	4,29	1,02	12,86	1,03	29,63	35,97	55,46
F0,5WS4d4h20C	36,11	16,82	2,80	1,04	6,91	1,03	37,26	1,05	53,12	62,84	164,25
F0,5WS4d8h20C	37,25	17,07	2,80	1,04	7,87	1,02	42,50	1,04	61,04	72,56	190,45
F0,5WS8dR20C	35,30	1,12	0,19	1,02	2,49	1,01	4,82	1,02	2,01	2,33	2,78
F0,5WS8d4h20C	36,11	4,75	0,79	1,02	5,09	1,02	15,19	1,03	12,53	14,06	23,18
F0,5WS8d8h20C	37,25	5,01	0,82	1,01	7,15	1,02	25,52	1,04	17,21	20,29	37,21

Tablo 13. (devamı)

Numune kodu	f_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F0,5S4dR150C	28,83	16,52	3,08	1,03	8,18	1,03	41,80	1,04	72,64	112,45	288,68
F0,5S4d4h150C	32,53	18,52	3,25	1,04	15,97	1,04	21,26	1,04	93,19	115,22	135,08
F0,5S4d8h150C	36,86	22,14	3,65	1,03	9,97	1,02	63,04	1,05	96,54	244,86	562,02
F0,5S8dR150C	28,83	4,72	0,88	1,02	7,47	1,02	37,22	1,04	14,94	17,95	49,71
F0,5S8d4h150C	32,53	4,19	0,73	1,02	6,71	1,02	37,11	1,03	13,09	13,42	36,79
F0,5S8d8h150C	36,86	6,22	1,02	1,02	10,29	1,04	31,26	1,04	24,70	37,14	80,00
F0,5WS4dR150C	28,83	14,09	2,62	1,03	8,29	1,03	23,88	1,05	48,93	63,43	126,89
F0,5WS4d4h150C	32,53	15,24	2,67	1,03	6,91	1,02	30,82	1,05	61,25	85,44	171,81
F0,5WS4d8h150C	36,86	20,21	3,33	1,05	7,91	1,03	23,12	1,04	61,87	62,43	116,65
F0,5WS8dR150C	28,83	3,97	0,74	1,01	6,55	1,03	17,36	1,04	11,84	13,71	22,25
F0,5WS8d4h150C	32,53	4,64	0,81	1,02	5,71	1,02	23,12	1,05	13,96	18,14	31,41
F0,5WS8d8h150C	36,86	4,21	0,69	1,01	6,64	1,02	23,22	1,05	12,58	19,54	30,71

Tablo 13. (devamı)

Numune kodu	f_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F0,5S4dR300C	5,53	7,60	3,23	1,03	8,12	1,02	11,06	1,05	24,37	25,66	29,35
F0,5S4d4h300C	6,98	8,34	3,16	1,03	7,27	1,02	13,24	1,05	23,63	25,95	35,51
F0,5S4d8h300C	6,38	11,11	4,40	1,03	9,15	1,02	19,28	1,04	35,85	43,92	72,77
F0,5S8dR300C	5,53	1,98	0,84	1,01	9,09	1,03	22,26	1,03	6,83	13,88	18,74
F0,5S8d4h300C	6,98	4,84	1,83	1,02	8,09	1,02	29,76	1,04	15,28	28,04	61,82
F0,5S8d8h300C	6,38	3,01	1,19	1,02	9,02	1,02	33,23	1,04	10,59	19,45	42,94
F0,5WS4dR300C	5,53	4,67	1,99	1,02	7,31	1,03	24,72	1,05	30,30	59,77	68,05
F0,5WS4d4h300C	6,98	5,69	2,15	1,02	6,93	1,03	53,90	1,05	15,83	24,33	185,69
F0,5WS4d8h300C	6,38	8,63	3,42	1,03	8,45	1,03	57,38	1,06	28,10	76,20	170,32
F0,5WS8dR300C	5,53	1,04	0,44	1,01	6,78	1,02	18,18	1,03	2,96	3,37	5,81
F0,5WS8d4h300C	6,98	1,31	0,50	1,01	8,57	1,02	48,54	1,04	4,65	-	43,19
F0,5WS8d8h300C	6,38	2,42	0,96	1,01	10,15	1,03	37,58	1,04	13,79	25,74	42,92

Tablo 13. (devamı)

Numune kodu	f_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F0,5S4dR600C	2,76	5,28	3,18	1,02	7,95	1,03	40,06	1,05	29,94	-	126,82
F0,5S4d4h600C	2,88	4,32	2,55	1,02	9,47	1,03	38,82	1,04	29,00	51,09	77,15
F0,5S4d8h600C	2,97	5,42	3,15	1,02	7,53	1,02	25,58	1,03	25,27	33,57	68,82
F0,5S8dR600C	2,76	1,71	1,03	1,02	15,75	1,04	28,00	1,04	12,15	16,03	20,52
F0,5S8d4h600C	2,88	3,01	1,77	1,02	7,85	1,02	21,18	1,04	12,03	20,41	31,20
F0,5S8d8h600C	2,97	3,13	1,82	1,01	8,95	1,03	24,54	1,05	16,06	23,30	35,33
F0,5WS4dR600C	2,76	4,78	2,88	1,02	6,93	1,03	23,46	1,05	19,22	28,71	50,50
F0,5WS4d4h600C	2,88	2,48	1,46	1,01	5,12	1,02	7,50	1,03	8,17	9,80	10,20
F0,5WS4d8h600C	2,97	1,85	1,07	1,01	10,25	1,02	15,04	1,03	12,16	14,61	15,22
F0,5WS8dR600C	2,76	3,28	1,97	1,02	12,09	1,03	33,64	1,04	17,75	22,41	38,59
F0,5WS8d4h600C	2,88	2,14	1,26	1,01	4,95	1,02	24,54	1,03	7,78	14,18	23,46
F0,5WS8d8h600C	2,97	3,41	1,98	1,02	5,97	1,02	25,90	1,05	13,13	19,64	35,69

Tablo 14. %1 Lifli Numunelerin Aderans Testi Sonuçları

Numune kodu	f'_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	S_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F1S4dR20C	37,56	14,71	2,40	1,03	12,18	1,03	75,34	1,07	78,03	247,45	434,88
F1S4d4h20C	38,92	18,67	2,99	1,04	16,41	1,06	100,00	1,06	123,12	164,54	673,19
F1S4d8h20C	39,24	21,85	3,49	1,04	10,21	1,04	68,78	1,04	112,57	435,88	698,51
F1S8dR20C	37,56	5,23	0,85	1,01	1,27	1,02	4,51	1,02	7,58	10,58	13,28
F1S8d4h20C	38,92	6,42	1,03	1,02	5,03	1,02	86,61	1,05	17,97	32,75	209,00
F1S8d8h20C	39,24	7,29	1,16	1,03	3,54	1-02	4,88	1,02	13,23	15,15	15,91
F1WS4dR20C	37,56	13,06	2,13	1,03	5,01	1,02	44,71	1,04	30,79	32,75	128,05
F1WS4d4h20C	38,92	18,55	2,97	1,03	6,93	1,02	73,61	1,05	50,57	65,34	282,37
F1WS4d8h20C	39,24	21,35	3,41	1,03	7,43	1,03	81,31	1,05	70,63	73,51	272,81
F1WS8dR20C	37,56	4,24	0,69	1,02	5,56	1,02	41,92	1,04	12,91	19,87	46,41
F1WS8d4h20C	38,92	5,42	0,87	1,02	9,63	1,03	47,36	1,03	14,83	35,72	69,81
F1WS8d8h20C	39,24	5,18	0,83	1,02	6,39	1,02	30,00	1,04	15,12	23,41	49,49

Tablo 14. (devamı)

Numune kodu	f_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F1S4dR150C	30,47	17,51	3,17	1,03	10,63	1,03	55,06	1,03	60,57	82,32	357,48
F1S4d4h150C	34,01	22,68	3,89	1,04	11,87	1,03	91,11	1,05	134,99	354,25	917,40
F1S4d8h150C	38,35	24,61	3,97	1,04	8,75	1,02	45,54	1,03	83,66	125,74	352,96
F1S8dR150C	30,47	6,56	1,19	1,02	12,43	1,03	50,12	1,04	48,21	61,06	122,26
F1S8d4h150C	34,01	7,63	1,31	1,02	8,51	1,03	36,28	1,04	25,53	36,66	90,45
F1S8d8h150C	38,35	8,84	1,43	1,02	8,35	1,02	47,16	1,04	31,95	121,20	170,08
F1WS4dR150C	30,47	17,30	3,13	1,03	7,75	1,02	19,51	1,02	54,51	67,58	109,61
F1WS4d4h150C	34,01	17,42	2,99	1,04	8,75	1,02	44,12	1,04	64,25	68,48	209,15
F1WS4d8h150C	38,35	24,72	3,99	1,04	9,39	1,02	63,82	1,05	92,24	100,07	398,04
F1WS8dR150C	30,47	5,62	1,02	1,02	8,59	1,03	90,58	1,05	29,71	56,56	165,00
F1WS8d4h150C	34,01	5,67	0,97	1,02	6,19	1,02	69,72	1,04	15,24	21,32	123,51
F1WS8d8h150C	38,35	4,95	0,80	1,02	7,45	1,02	27,72	1,03	16,09	19,41	45,23

Tablo 14. (devamı)

Numune kodu	f_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F1S4dR300C	9,01	11,41	3,80	1,03	9,91	1,03	69,84	1,04	70,52	222,76	379,59
F1S4d4h300C	8,74	12,93	4,37	1,03	9,65	1,03	18,58	1,03	56,56	72,34	102,43
F1S4d8h300C	5,81	18,83	7,81	1,03	10,75	1,03	43,00	1,03	76,12	112,26	309,36
F1S8dR300C	9,01	2,21	0,74	1,01	11,11	1,02	40,56	1,04	19,81	-	53,86
F1S8d4h300C	8,74	2,23	0,75	1,01	12,69	1,02	22,36	1,03	9,52	11,97	17,89
F1S8d8h300C	5,81	3,50	1,45	1,02	18,09	1,02	32,21	1,04	22,10	26,79	40,20
F1WS4dR300C	9,01	6,53	2,18	1,02	9,35	1,03	26,61	1,03	30,31	47,02	73,95
F1WS4d4h300C	8,74	8,76	2,96	1,02	6,15	1,02	27,88	1,03	26,16	38,73	94,41
F1WS4d8h300C	5,81	9,14	3,79	1,02	11,61	1,03	24,92	1,03	30,75	34,47	66,06
F1WS8dR300C	9,01	2,04	0,68	1,01	8,39	1,02	30,24	1,03	9,09	24,76	32,23
F1WS8d4h300C	8,74	2,32	0,78	1,01	7,19	1,02	26,56	1,03	11,07	19,72	29,96
F1WS8d8h300C	5,81	3,99	1,66	1,01	6,83	1,02	26,50	1,03	15,94	21,97	41,59

Tablo 14. (devamı)

Numune kodu	f_{cu} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_n (MPa)	SD	s_{max} (mm)	SD	s_u (mm)	SD	$E_{0,85}$ (MPa.mm)	$E_{0,5}$ (MPa.mm)	E_{Toplam} (MPa.mm)
F1S4dR600C	2,85	5,41	3,20	1,02	11,05	1,03	19,54	1,04	29,75	-	55,00
F1S4d4h600C	2,30	5,81	3,83	1,02	9,91	1,03	15,82	1,03	28,14	41,56	46,27
F1S4d8h600C	2,60	6,81	4,22	1,03	9,91	1,02	30,74	1,05	32,93	48,63	102,89
F1S8dR600C	2,85	1,71	1,01	1,01	7,49	1,02	15,94	1,03	10,40	13,25	15,42
F1S8d4h600C	2,30	3,19	2,10	1,02	13,15	1,03	26,46	1,05	29,06	36,29	44,51
F1S8d8h600C	2,60	4,13	2,56	1,02	7,29	1,02	20,42	1,04	20,11	28,02	37,16
F1WS4dR600C	2,85	2,83	1,68	1,01	7,89	1,03	29,84	1,04	40,76	49,93	56,51
F1WS4d4h600C	2,30	4,29	2,83	1,02	7,77	1,03	23,34	1,05	20,61	25,69	35,29
F1WS4d8h600C	2,60	5,05	3,13	1,01	8,54	1,02	25,25	1,04	26,25	32,69	44,91
F1WS8dR600C	2,85	1,88	1,11	1,02	5,91	1,02	32,94	1,03	10,61	14,45	23,91
F1WS8d4h600C	2,30	3,88	2,56	1,02	10,49	1,03	30,32	1,03	24,86	43,88	57,52
F1WS8d8h600C	2,60	2,32	1,44	1,01	8,31	1,03	28,06	1,04	12,03	19,96	31,14

Deney Parametrelerinin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Yüksek sıcaklığın aderans dayanımı üzerindeki etkisi

Tablo 15, 16 ve 17' de yüksek sıcaklığın farklı lif hacmi ile üretilen numuneler üzerindeki etkisi gösterilmiştir. **Şekil 51, 52 ve 53'** de yüksek sıcaklığın farklı lif hacimli numunelerin aderans dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırması yapılmıştır. İlgili tablo ve şekiller incelendiğinde öncelikle lifsiz numuneler arasında 150 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler 20 °C sıcaklıkta bekletilen numunelere göre aderans dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Fakat bu numuneler arasında etriyenin kullanılmadığı numunelerde ise 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımlarında azalış görülmektedir. %0,5 lifli numunelerde ise 20 °C oda sıcaklığında bekletilen numunelerin aderans dayanımları 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelere göre azalmıştır. Benze durum %1 lif kullanılan numunelerde de görülmektedir. Lifsiz numunelerde maruz kalınan sıcaklığın 300 °C' ye çıkarılması durumunda ise dayanım kayıpları artmaktadır. Lifsiz ve etriyeli numunelerde bu dayanım kaybı ise etriyesiz numunelere göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Burada etriye kullanılmasının yüksek sıcaklıktan kaynaklı aderans dayanımını tolere ettiği de görülmektedir. %0,5 lifli numunelerde de 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımları 3 kata kadar azalmaktadır. %1 lif kullanılan numunelerde ise 300 °C' deki aderans dayanım kayıpları %0,5 lifli numunelere göre daha az seviyededir. Lif hacminin arttırılması 300 °C sıcaklıktaki aderans dayanım kayıplarını azaltmıştır. %0,5 lifli numunelerde 20 °C oda sıcaklığında bekletilen numunelerde 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelere göre maksimum 3,63 kat kadar aderans dayanım azalması olmasına karşın %1 lif hacimli numunelerde bu oran 2,34 kata kadar azalmaktadır. Lifsiz numunelerde ise aderans dayanımındaki azalma maksimum 4,34 kattır. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere 300 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında lif hacminin arttırılması aderans dayanımındaki kayıpları azaltmıştır. 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise lif kullanılmasının aderans dayanımına olumsuz bir etkisinin olduğu görülmektedir. Lifsiz numunelerde 20 °C oda sıcaklığında bekletilen numunelerin 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelere göre ortalama 1,85 kat azalma meydana gelmiştir. %0,5 ve %1 lifli numunelerde ise 20 °C oda sıcaklığında bekletilen ve 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise dayanım azalması sırasıyla ortalama olarak 2,75 ve 3,25 kat azalmıştır. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere lif hacminin artması 600 °C yüksek sıcaklıkta aderans dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmuştur.

Tablo 15. Yüksek Sıcaklığın Lifsiz Numunelerin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

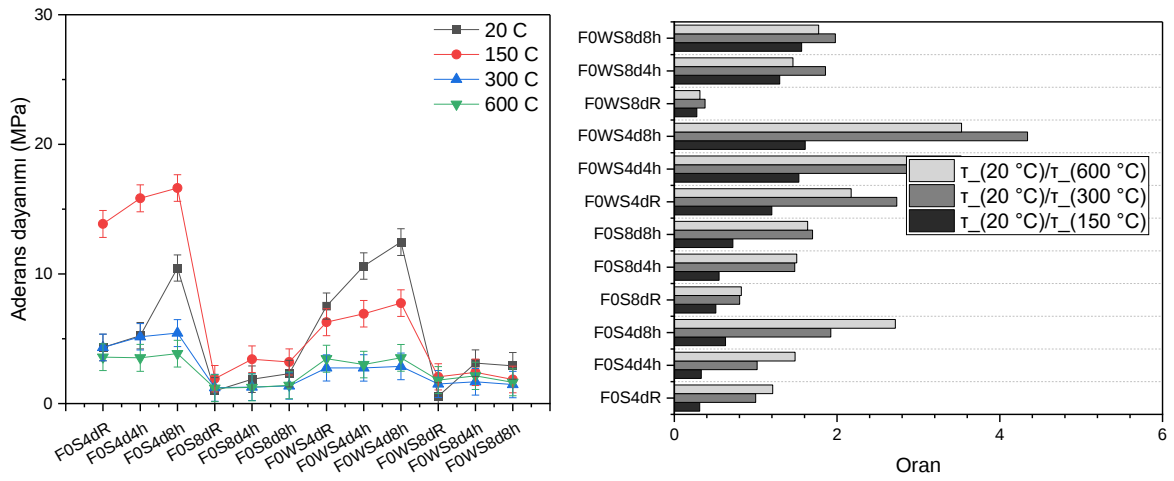
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	$\tau_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$ $/\tau_{150\text{ }^{\circ}\text{C}}$	$\tau_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$ $/\tau_{300\text{ }^{\circ}\text{C}}$	$\tau_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$ $/\tau_{600\text{ }^{\circ}\text{C}}$
F0S4dR20C	4,33	F0S4dR150C	13,86	F0S4dR300C	4,33	F0S4dR600C	3,58	0,31	1,00	1,21
F0S4d4h20C	5,24	F0S4d4h150C	15,84	F0S4d4h300C	5,15	F0S4d4h600C	3,53	0,33	1,02	1,48
F0S4d8h20C	10,46	F0S4d8h150C	16,63	F0S4d8h300C	5,44	F0S4d8h600C	3,85	0,63	1,92	2,72
F0S8dR20C	0,98	F0S8dR150C	1,92	F0S8dR300C	1,22	F0S8dR600C	1,19	0,51	0,80	0,82
F0S8d4h20C	1,88	F0S8d4h150C	3,42	F0S8d4h300C	1,27	F0S8d4h600C	1,25	0,55	1,48	1,50
F0S8d8h20C	2,31	F0S8d8h150C	3,21	F0S8d8h300C	1,36	F0S8d8h600C	1,41	0,72	1,70	1,64
F0WS4dR20C	7,52	F0WS4dR150C	6,28	F0WS4dR300C	2,75	F0WS4dR600C	3,46	1,20	2,73	2,17
F0WS4d4h20C	10,61	F0WS4d4h150C	6,93	F0WS4d4h300C	2,75	F0WS4d4h600C	3,01	1,53	3,86	3,52
F0WS4d8h20C	12,46	F0WS4d8h150C	7,75	F0WS4d8h300C	2,87	F0WS4d8h600C	3,53	1,61	4,34	3,53
F0WS8dR20C	0,57	F0WS8dR150C	2,06	F0WS8dR300C	1,51	F0WS8dR600C	1,81	0,28	0,38	0,31
F0WS8d4h20C	3,12	F0WS8d4h150C	2,41	F0WS8d4h300C	1,68	F0WS8d4h600C	2,14	1,29	1,86	1,46
F0WS8d8h20C	2,91	F0WS8d8h150C	1,86	F0WS8d8h300C	1,47	F0WS8d8h600C	1,64	1,56	1,98	1,77

Tablo 16. Yüksek Sıcaklığın %0,5 Lifli Numunelerin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

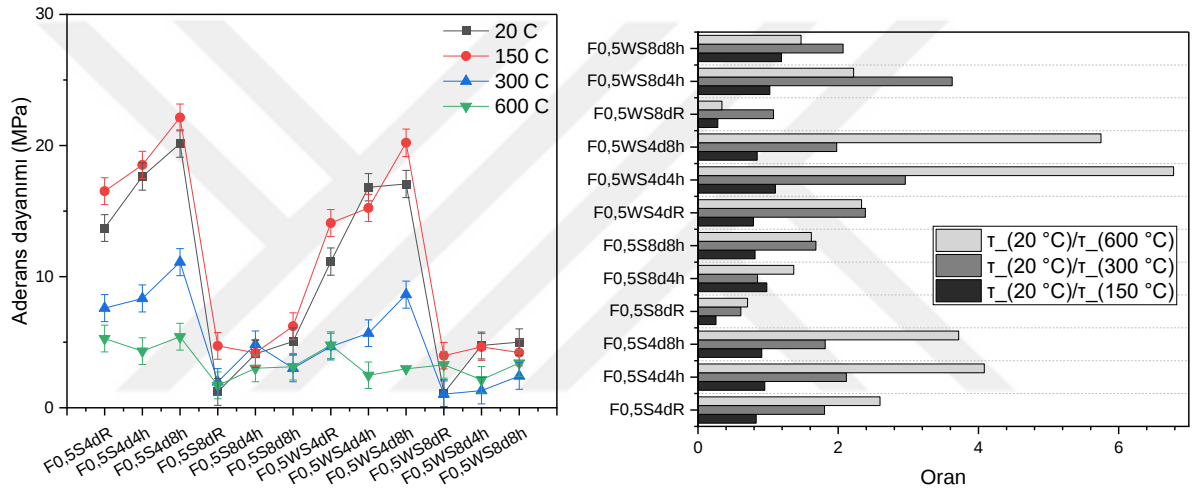
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	$\tau_{20^\circ C}$ $/\tau_{150^\circ C}$	$\tau_{20^\circ C}$ $/\tau_{300^\circ C}$	$\tau_{20^\circ C}$ $/\tau_{600^\circ C}$
F0,5S4dR20C	13,71	F0,5S4dR150C	16,52	F0,5S4dR300C	7,6	F0,5S4dR600C	5,28	0,83	1,80	2,60
F0,5S4d4h20C	17,64	F0,5S4d4h150C	18,52	F0,5S4d4h300C	8,34	F0,5S4d4h600C	4,32	0,95	2,12	4,08
F0,5S4d8h20C	20,15	F0,5S4d8h150C	22,14	F0,5S4d8h300C	11,11	F0,5S4d8h600C	5,42	0,91	1,81	3,72
F0,5S8dR20C	1,21	F0,5S8dR150C	4,72	F0,5S8dR300C	1,98	F0,5S8dR600C	1,71	0,26	0,61	0,71
F0,5S8d4h20C	4,11	F0,5S8d4h150C	4,19	F0,5S8d4h300C	4,84	F0,5S8d4h600C	3,01	0,98	0,85	1,37
F0,5S8d8h20C	5,06	F0,5S8d8h150C	6,22	F0,5S8d8h300C	3,01	F0,5S8d8h600C	3,13	0,81	1,68	1,62
F0,5WS4dR20C	11,15	F0,5WS4dR150C	14,09	F0,5WS4dR300C	4,67	F0,5WS4dR600C	4,78	0,79	2,39	2,33
F0,5WS4d4h20C	16,82	F0,5WS4d4h150C	15,24	F0,5WS4d4h300C	5,69	F0,5WS4d4h600C	2,48	1,10	2,96	6,78
F0,5WS4d8h20C	17,07	F0,5WS4d8h150C	20,21	F0,5WS4d8h300C	8,63	F0,5WS4d8h600C	2,97	0,84	1,98	5,75
F0,5WS8dR20C	1,12	F0,5WS8dR150C	3,97	F0,5WS8dR300C	1,04	F0,5WS8dR600C	3,28	0,28	1,08	0,34
F0,5WS8d4h20C	4,75	F0,5WS8d4h150C	4,64	F0,5WS8d4h300C	1,31	F0,5WS8d4h600C	2,14	1,02	3,63	2,22
F0,5WS8d8h20C	5,01	F0,5WS8d8h150C	4,21	F0,5WS8d8h300C	2,42	F0,5WS8d8h600C	3,41	1,19	2,07	1,47

Tablo 17. Yüksek Sıcaklığın %1 Lifli Numunelerin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

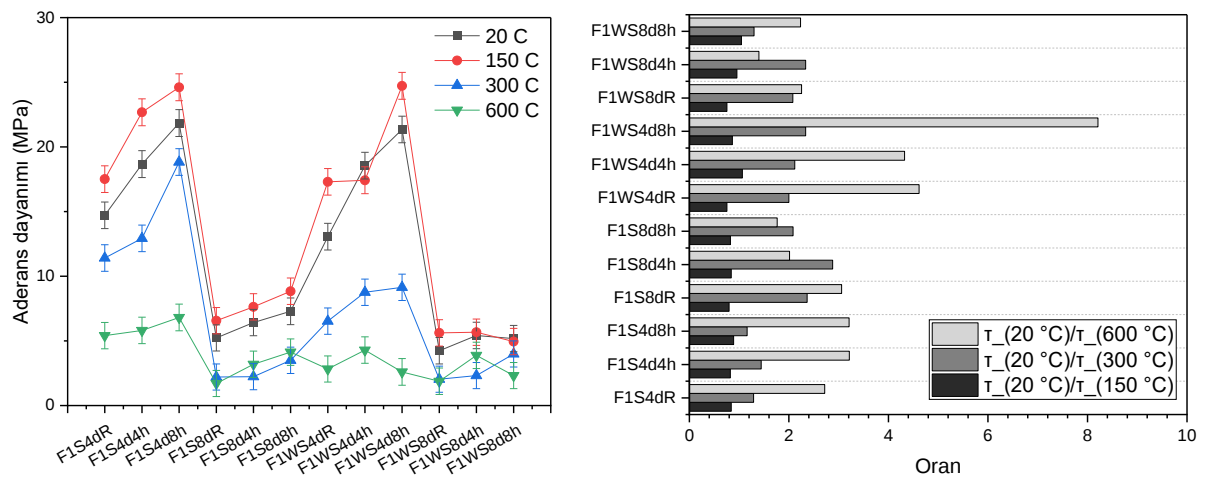
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	$\tau_{20^\circ C}$ $/\tau_{150^\circ C}$	$\tau_{20^\circ C}$ $/\tau_{300^\circ C}$	$\tau_{20^\circ C}$ $/\tau_{600^\circ C}$
F1S4dR20C	13,71	F1S4dR150C	17,51	F1S4dR300C	11,41	F1S4dR600C	5,41	0,84	1,29	2,72
F1S4d4h20C	17,64	F1S4d4h150C	22,68	F1S4d4h300C	12,93	F1S4d4h600C	5,81	0,82	1,44	3,21
F1S4d8h20C	20,15	F1S4d8h150C	24,61	F1S4d8h300C	18,83	F1S4d8h600C	6,81	0,89	1,16	3,21
F1S8dR20C	1,21	F1S8dR150C	6,56	F1S8dR300C	2,21	F1S8dR600C	1,71	0,80	2,37	3,06
F1S8d4h20C	4,11	F1S8d4h150C	7,63	F1S8d4h300C	2,23	F1S8d4h600C	3,19	0,84	2,88	2,01
F1S8d8h20C	5,06	F1S8d8h150C	8,84	F1S8d8h300C	3,5	F1S8d8h600C	4,13	0,82	2,08	1,77
F1WS4dR20C	11,15	F1WS4dR150C	17,3	F1WS4dR300C	6,53	F1WS4dR600C	2,83	0,75	2,00	4,61
F1WS4d4h20C	16,82	F1WS4d4h150C	17,42	F1WS4d4h300C	8,76	F1WS4d4h600C	4,29	1,06	2,12	4,32
F1WS4d8h20C	17,07	F1WS4d8h150C	24,72	F1WS4d8h300C	9,14	F1WS4d8h600C	2,60	0,86	2,34	8,21
F1WS8dR20C	1,12	F1WS8dR150C	5,62	F1WS8dR300C	2,04	F1WS8dR600C	1,88	0,75	2,08	2,26
F1WS8d4h20C	4,75	F1WS8d4h150C	5,67	F1WS8d4h300C	2,32	F1WS8d4h600C	3,88	0,96	2,34	1,40
F1WS8d8h20C	5,01	F1WS8d8h150C	4,95	F1WS8d8h300C	3,99	F1WS8d8h600C	2,32	1,05	1,30	2,23



Şekil 51. Lifsiz numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması



Şekil 52. %0,5 Lifli numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması



Şekil 53. %1 Lifli numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması

Yukarıdaki sonuçlardan yola çıkarak lif kullanılımasının yüksek sıcaklık altındaki aderans dayanımında neden olduğu olumlu ve olumsuz etkilerin birkaç nedeni olabilmektedir.

Oda sıcaklığında bekletilen numunelerde matris içerisinde rastgele dağılan liflerin etkinliği görülmektedir. Maruz kalınan sıcaklığın 150 °C artırılması durumunda matris içerisindeki liflerin etkinliğine göre bazı numunelerde dayanım artışı bazı numunelerde ise dayanım azalış görülmüştür. Fakat bu dayanım azalışlarının neden bu sıcaklık değerinde matris ile donatı arasındaki liflerin zarar görmesi olabilmektedir. 300 °C sıcaklıkta ise beton fazında bozulmaların başladığı fakat bu bozulmalardan kaynaklı kusurlu bölgelerin lifler tarafından tolere edildiği anlaşılmaktadır. 300 °C sıcaklıkta geopolimer beton fazı ile donatı arasındaki mekanik bağlar beton fazı açısından zarar görmüştür. Fakat lif kullanılması beton ile donatı arasındaki bu mekanik bağı güçlendirici yönde etki etmiştir. Buradan da anlaşılabileceği üzere 300 °C sıcaklıkta mikro sentetik lifler önemli ölçüde zarar görmemiş ve beton içerisinde köprüleme ve gerilmeleri karşılama görevlerini yerine getirmişlerdir. Burada lif hacminin artması da kusurlu bölgedeki lif hacminin de artmasına neden olduğu için aderans dayanımındaki kayıpları azaltmıştır.

600 °C sıcaklıkta ise beton matrisi içerisinde önemli derecede termal bozulmalar meydana gelmiştir. Buda donatı ile beton arasındaki yapışma ve mekanik bağı azalmasına neden olmuştur. 600 °C sıcaklık değerinde de beton matrisi içerisindeki mikro sentetik lifler erimiş olabilir. Liflerin erimesi öncelikle kusurlu bölgelerdeki kendilerinden beklenen performansın düşmesine neden olmuştur. Bununla birlikte performanslarını sergilememelerinin yanı sıra beton matrisi içerisinde de daha zayıf bölgelerin oluşmasına neden olmuşlardır. Liflerin 600 °C sıcaklıkta erimesi ile bu bölgelerde boşluklar meydana gelmiştir. Gerilme yığılmaları da bu boşluklardan yayılması daha kolay olmuştur. Diğer bir deyişle bu boşluklar betonun performansını azaltmıştır. Bu sebepten dolayı da 600 °C’ de lif hacminin artması daha fazla kusurlu bölgeye neden olduğu için aderans dayanımının azalmasına neden olmuştur.

Ulaşılan literatür incelediğin de ise Zhao *et al.* (2023) FRP donatı ile geopolimer betonun aderans dayanımını incelemişlerdir. Zhao *et al.* (2023) sıcaklık değerinin artmasının aderans dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. 350 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde %56 ile %83 arasında aderans dayanımında azalmanın olduğunu belirtmişlerdir. Sunulan çalışmada ise mikro sentetik liflerin 300 °C’ de aderans dayanımındaki azalmaları azalttığı görülmektedir. Zhang *et al.* (2018) ise geopolimer betonda 300 °C sıcaklığa kadar aderans dayanımında önemli bir azalmanın olmamasına karşın 500 °C ve 700 °C sıcaklıkta önemli azalmaların olduğunu belirtmişlerdir. Fakat bu çalışmada 48 ve 64 MPa basınç dayanımlı geopolimer betonlar kullanılmıştır. Sunulan tez çalışmasında ise daha düşük basınç dayanımlarında benzer etki mikro sentetik lifler yardımıyla elde edilmiştir. Mathew (2021) de yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içerikli geopolimer betonlarda 600 °C ve 800 °C gibi yüksek sıcaklık değerlerinde aderans

dayanımında önemli dayanım azalmalarının olduğunu belirtmişlerdir. Ame *et al.* (2023) de yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer betonlu numunelerin aderans dayanımlarının 300 °C ve 600 °C sıcaklıktan sonra önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir.

Kür sıcaklığı ve kür süresinin aderans dayanımı üzerine etkisi

Kür sıcaklığı ve kür süresinin aderans dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi için üç farklı senaryo oluşturulmuştur. Kür sıcaklığının etkisinin araştırılması için bir grup numune oda sıcaklığında bekletilirken diğer gruptaki numunelere 80 °C sıcaklık kürü uygulanmıştır. Kür süresinin etkisinin araştırılması için bir grup numune 4 saat 80 °C sıcaklıkta kür edilirken diğer gruptaki numuneler 8 saat 80 °C’ de kür edilmiştir. Böylece kür sıcaklığı ve kür süresinin etkisi irdelenmiştir. Kür sıcaklığı ve kür süresinin aderans dayanımına etkisi **Tablo 19, 20 ve 21’** de sunulmuştur. Ayrıca kür sıcaklığı ve kür süresinin karşılaştırmalı sonuçları da **Şekil 54, 55 ve 56’** da gösterilmiştir.

İlgili tablo şekillerden görüldüğü üzere numunelere sıcaklık kürü uygulanmasının ve kür süresinin de arttırılmasının aderans dayanımı üzerinde olumlu bir etkisini vardır. Lifsiz numunelerde ortam kürü yürü yerine sıcaklık kürü uygulanmanın aderans dayanımını arttırdığı görülmektedir. Benzer şekilde sıcaklık kür süresinin de 4 saatten 8 saate çıkarılması aderans dayanımını arttırmıştır. Lifsiz numunelerde 20 °C’ de bekletilen numuneler arasında ortam kürü ile 4 saatlik sıcaklık kürü karşılaştırıldığında numunelerin aderans dayanımı ortalama olarak 1,21 kat artmıştır. Ortam kürü ile 8 saatlik sıcaklık kürü karşılaştırıldığında ise aderans dayanımı ortalama olarak 2,42 kat artmıştır. Sıcaklık kürünün süresinin 4 saatten 8 saate çıkarılması aderans dayanımını 2 kat arttırmıştır. Lifsiz numunelerde numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılması durumunda ise kür koşullarının etkisi azalmaktadır. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ortam kürü ile 4 ve 8 saatlik sıcaklık kürü karşılaştırıldığında aderans dayanımı ortalama olarak sırasıyla 1,30 ve 1,25 kat artmıştır. Yine 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde sıcaklık kürünün 4 saatten 8 saate çıkarılması durumunda aderans dayanımı ortalama olarak 0,97 kat artmıştır. 300 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ise 4 ve 8 saat sıcaklık kürünün uygulanması ortam kürünü göre aderans dayanımını sırasıyla 1,09 ve 1,10 kat arttırmıştır. Bu numuneler arasında da sıcaklık kür süresinin arttırılması aderans dayanımını ortalama olarak 1,01 kat arttırmıştır. 600 °C sıcaklığa maruz numunelerde de benzer durum gözlemlenmiştir. Bu numuneler arasında da aderans dayanımında artış olmasına rağmen düşük seviyelerde kalmıştır.

%0,5 lif kullanılan numunelerde de sıcaklık kürü ve sıcaklık kür süresinin arttırılması aderans dayanımını arttırmıştır. Fakat bu artışlar lifsiz numunelere göre daha fazla olmuştur. 20

°C bekletilen numuneler arasında ortam kürü yerine 4 saat 80 derece sıcaklık kürünü uygulanması aderans dayanımını ortalama olarak 2,61 kat artırmıştır. Sıcaklık kürünün 8 saatte çıkarılması durumunda ise ortalama aderans dayanımı 2,91 kat artmıştır. Sıcaklık kür süresinin 4 saatte 8 saatte çıkarılması durumunda ise aderans dayanımı ortalama olarak 1,11 kat artmıştır. Sıcaklık değerinin artması lifsiz numunelerde olduğu gibi %0,5 lifli numunelerde de aderans dayanımındaki artışı azaltmıştır 150 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ortam kürü yerine 4 ve 8 saat sıcaklık kürü uygulanması aderans dayanımını sırasıyla 1,06 ve 1,29 kat arttırmıştır. Kür sıcaklığı süresinin 4 saatten 8 saatte çıkarılması ise aderans dayanımını ortalama 1,23 kat artırmıştır 300 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında da benzer durum gözlemlenmiştir Kür sıcaklığının artırılması ortalama aderans dayanımını 1,50 ve 1,79 kat arttırmıştır. Bu numuneler arasında da kür süresinin artırılması aderans dayanımını ortalama olarak 1,33 kat arttırmıştır. 600 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ise ortam kürü yerine 4 ve 8 saatlik sıcaklık kürünün uygulanması aderans dayanımını ortalama olarak 0,94 ve 1,3 kat arttırmıştır. Bu numunelerde kür süresinin 4 saatten 8 saatte çıkarılması aderans dayanımı ortalama olarak 1,27 kat artırmıştır. Görüldüğü üzere kür süresi ve kür sıcaklığındaki değişim %0,5 lifli numuneler arasında lifsiz numunelere göre daha fazla dayanım artışına neden olmuştur. %1 lif kullanılan numunelerde kür sıcaklığını ve kür süresinin etkisi daha fazla olmuştur. Lif oranının artması kür sıcaklığı ve kür süresinin aderans dayanımı üzerindeki etkisini arttırmıştır. Oda sıcaklığında bekletilen numuneler arasında ortam kürü yerine 4 ve 8 saat sıcaklık kürünün uygulanmasının aderans dayanımını sırasıyla 1,3 ve 1,43 kat arttırmıştır. Sıcaklık kür süresinin de artırılması aderans dayanımını ortalama 1,10 kat arttırmıştır. %1 lifli numuneler arasında da yüksek sıcaklığa maruz kalınması durumunda kür sıcaklığının ve kür süresinin etkisi daha fazla olmuştur. 300 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ortam kürü yerine 4 ve 8 saatlik sıcaklık kürünün uygulanması aderans dayanımını ortalama olarak 1,16 ve 1,65 kat arttırmıştır. Sıcaklık kür süresinin 4 saatten 8 saate çıkarılması durumunda da aderans dayanımı ortalama olarak 1,45 kat artmıştır.

Tablo 18. Kür Sıcaklığı ve Kür Süresinin Lifsiz Numunelerde Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

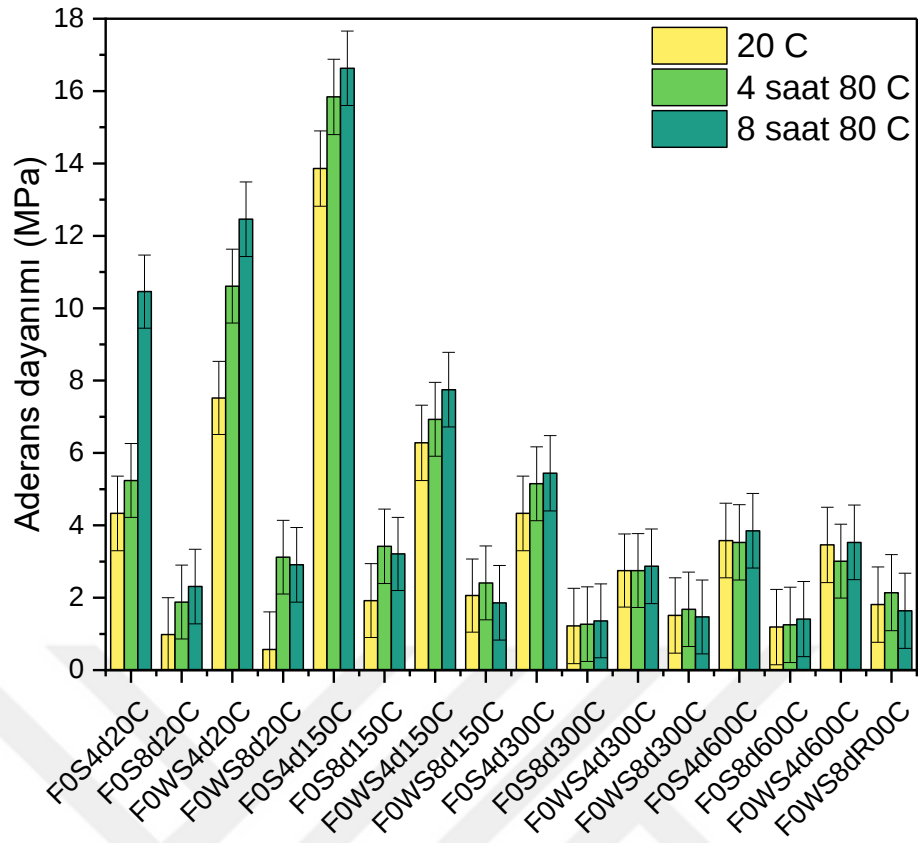
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_R/τ_{4h}	τ_R/τ_{8h}	τ_{4h}/τ_{8h}
F0S4dR20C	4,33	F0S4d4h20C	5,24	F0S4d8h20C	10,46	1,21	2,42	2,00
F0S8dR20C	0,98	F0S8d4h20C	1,88	F0S8d8h20C	2,31	1,92	2,36	1,23
F0WS4dR20C	7,52	F0WS4d4h20C	10,61	F0WS4d8h20C	12,46	1,41	1,66	1,17
F0WS8dR20C	0,57	F0WS8d4h20C	3,12	F0WS8d8h20C	2,91	5,47	5,11	0,93
F0S4dR150C	13,86	F0S4d4h150C	15,84	F0S4d8h150C	16,63	1,14	1,20	1,05
F0S8dR150C	1,92	F0S8d4h150C	3,42	F0S8d8h150C	3,21	1,78	1,67	0,94
F0WS4dR150C	6,28	F0WS4d4h150C	6,93	F0WS4d8h150C	7,75	1,10	1,23	1,12
F0WS8dR150C	2,06	F0WS8d4h150C	2,41	F0WS8d8h150C	1,86	1,17	0,90	0,77
F0S4dR300C	4,33	F0S4d4h300C	5,15	F0S4d8h300C	5,44	1,19	1,26	1,06
F0S8dR300C	1,22	F0S8d4h300C	1,27	F0S8d8h300C	1,36	1,04	1,11	1,07
F0WS4dR300C	2,75	F0WS4d4h300C	2,75	F0WS4d8h300C	2,87	1,00	1,04	1,04
F0WS8dR300C	1,51	F0WS8d4h300C	1,68	F0WS8d8h300C	1,47	1,11	0,97	0,88
F0S4dR600C	3,58	F0S4d4h600C	3,53	F0S4d8h600C	3,85	0,99	1,08	1,09
F0S8dR600C	1,19	F0S8d4h600C	1,25	F0S8d8h600C	1,41	1,05	1,18	1,13
F0WS4dR600C	3,46	F0WS4d4h600C	3,01	F0WS4d8h600C	3,53	0,87	1,02	1,17
F0WS8dR600C	1,81	F0WS8d4h600C	2,14	F0WS8d8h600C	1,64	1,18	0,91	0,77

Tablo 19. Kür Sıcaklığı ve Kür Süresinin %0,5 Lifli Numunelerde Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

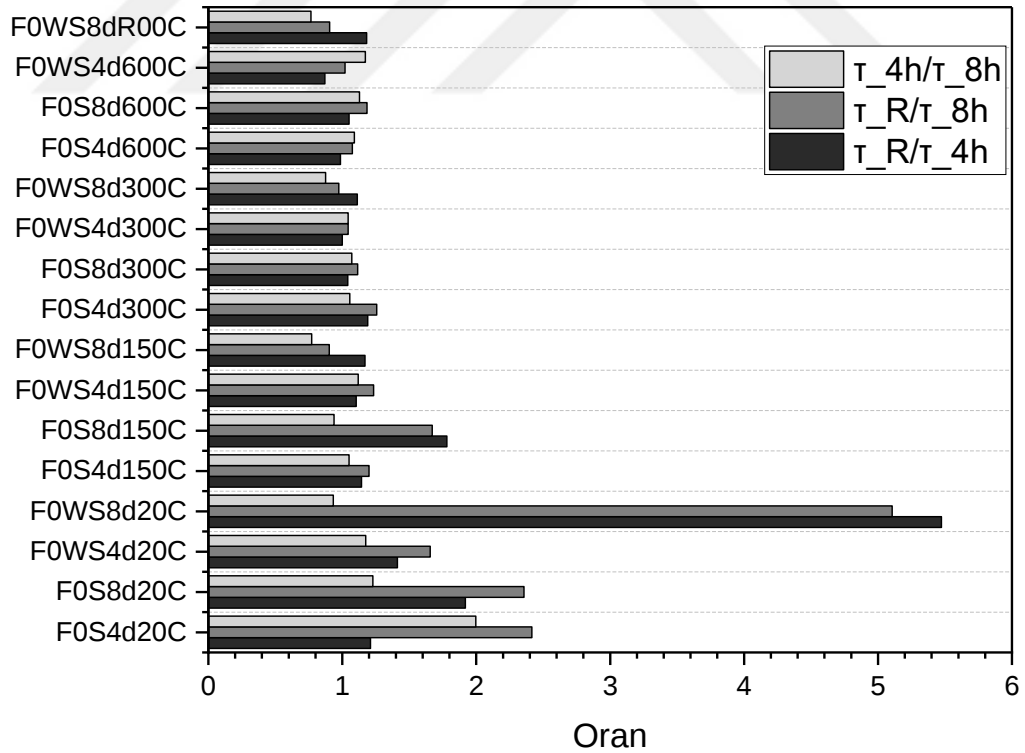
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_R/τ_{4h}	τ_R/τ_{8h}	τ_{4h}/τ_{8h}
F0,5S4dR20C	13,71	F0,5S4d4h20C	17,64	F0,5S4d8h20C	20,15	1,29	1,47	1,14
F0,5S8dR20C	1,21	F0,5S8d4h20C	4,11	F0,5S8d8h20C	5,06	3,40	4,18	1,23
F0,5WS4dR20C	11,15	F0,5WS4d4h20C	16,82	F0,5WS4d8h20C	17,07	1,51	1,53	1,01
F0,5WS8dR20C	1,12	F0,5WS8d4h20C	4,75	F0,5WS8d8h20C	5,01	4,24	4,47	1,05
F0,5S4dR150C	16,52	F0,5S4d4h150C	18,52	F0,5S4d8h150C	22,14	1,12	1,34	1,20
F0,5S8dR150C	4,72	F0,5S8d4h150C	4,19	F0,5S8d8h150C	6,22	0,89	1,32	1,48
F0,5WS4dR150C	14,09	F0,5WS4d4h150C	15,24	F0,5WS4d8h150C	20,21	1,08	1,43	1,33
F0,5WS8dR150C	3,97	F0,5WS8d4h150C	4,64	F0,5WS8d8h150C	4,21	1,17	1,06	0,91
F0,5S4dR300C	7,6	F0,5S4d4h300C	8,34	F0,5S4d8h300C	11,11	1,10	1,46	1,33
F0,5S8dR300C	1,98	F0,5S8d4h300C	4,84	F0,5S8d8h300C	3,01	2,44	1,52	0,62
F0,5WS4dR300C	4,67	F0,5WS4d4h300C	5,69	F0,5WS4d8h300C	8,63	1,22	1,85	1,52
F0,5WS8dR300C	1,04	F0,5WS8d4h300C	1,31	F0,5WS8d8h300C	2,42	1,26	2,33	1,85
F0,5S4dR600C	5,28	F0,5S4d4h600C	4,32	F0,5S4d8h600C	5,42	0,82	1,03	1,25
F0,5S8dR600C	1,71	F0,5S8d4h600C	3,01	F0,5S8d8h600C	3,13	1,76	1,83	1,04
F0,5WS4dR600C	4,78	F0,5WS4d4h600C	2,48	F0,5WS4d8h600C	2,97	0,52	0,62	1,20
F0,5WS8dR600C	3,28	F0,5WS8d4h600C	2,14	F0,5WS8d8h600C	3,41	0,65	1,04	1,59

Tablo 20. Kür Sıcaklığı ve Kür Süresinin %1 Lifli Numunelerde Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_R/τ_{4h}	τ_R/τ_{8h}	τ_{4h}/τ_{8h}
F1S4dR20C	14,71	F1S4d4h20C	18,67	F1S4d8h20C	21,85	1,27	1,49	1,17
F1S8dR20C	5,23	F1S8d4h20C	6,42	F1S8d8h20C	7,29	1,23	1,39	1,14
F1WS4dR20C	13,06	F1WS4d4h20C	18,55	F1WS4d8h20C	21,35	1,42	1,63	1,15
F1WS8dR20C	4,24	F1WS8d4h20C	5,42	F1WS8d8h20C	5,18	1,28	1,22	0,96
F1S4dR150C	17,51	F1S4d4h150C	22,68	F1S4d8h150C	24,61	1,30	1,41	1,09
F1S8dR150C	6,56	F1S8d4h150C	7,63	F1S8d8h150C	8,84	1,16	1,35	1,16
F1WS4dR150C	17,3	F1WS4d4h150C	17,42	F1WS4d8h150C	24,72	1,01	1,43	1,42
F1WS8dR150C	5,62	F1WS8d4h150C	5,67	F1WS8d8h150C	4,95	1,01	0,88	0,87
F1S4dR300C	11,41	F1S4d4h300C	12,93	F1S4d8h300C	18,83	1,13	1,65	1,46
F1S8dR300C	2,21	F1S8d4h300C	2,23	F1S8d8h300C	3,5	1,01	1,58	1,57
F1WS4dR300C	6,53	F1WS4d4h300C	8,76	F1WS4d8h300C	9,14	1,34	1,40	1,04
F1WS8dR300C	2,04	F1WS8d4h300C	2,32	F1WS8d8h300C	3,99	1,14	1,96	1,72
F1S4dR600C	5,41	F1S4d4h600C	5,81	F1S4d8h600C	6,81	1,07	1,26	1,17
F1S8dR600C	1,71	F1S8d4h600C	3,19	F1S8d8h600C	4,13	1,87	2,42	1,29
F1WS4dR600C	2,83	F1WS4d4h600C	4,29	F1WS4d8h600C	2,60	1,52	0,92	0,61
F1WS8dR600C	1,88	F1WS8d4h600C	3,88	F1WS8d8h600C	2,32	2,06	1,23	0,60

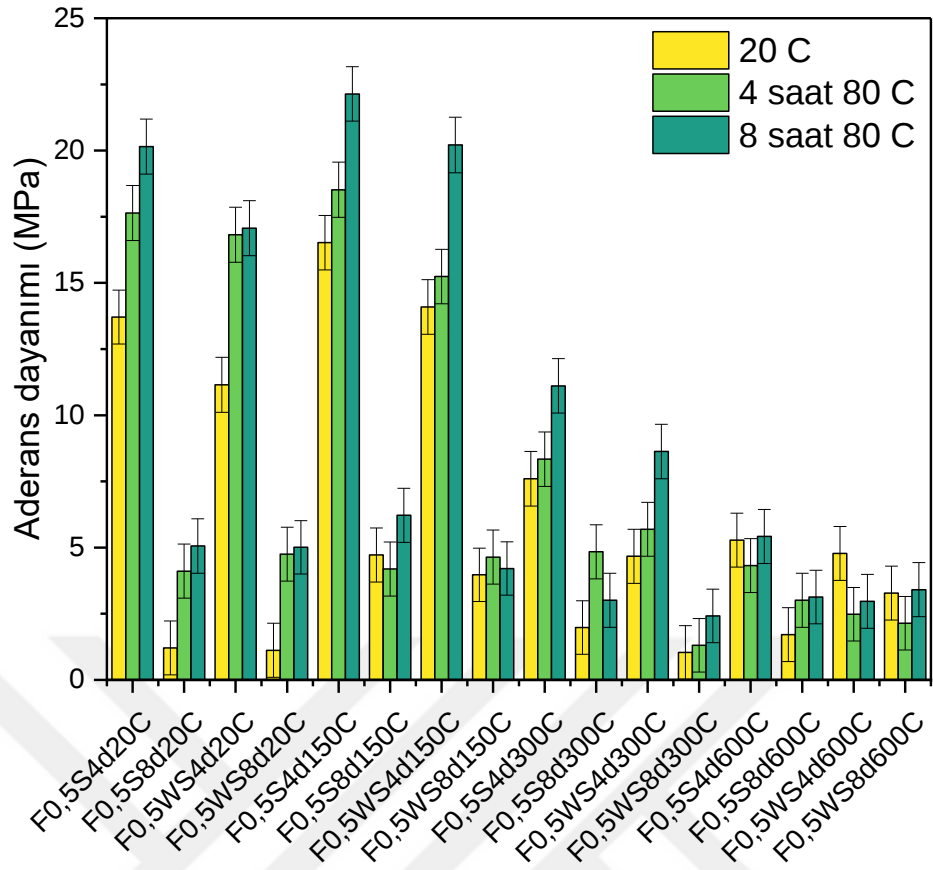


(a)

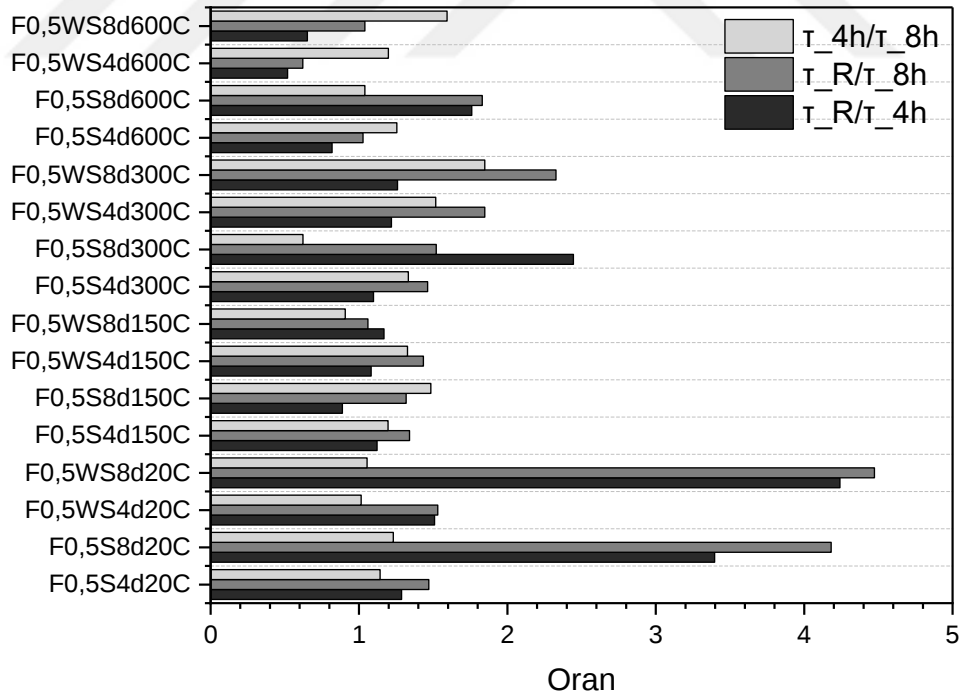


(b)

Şekil 54.Lifsiz numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması (a) aderans dayanım sonuçları (b) aderans dayanım karşılaştırması

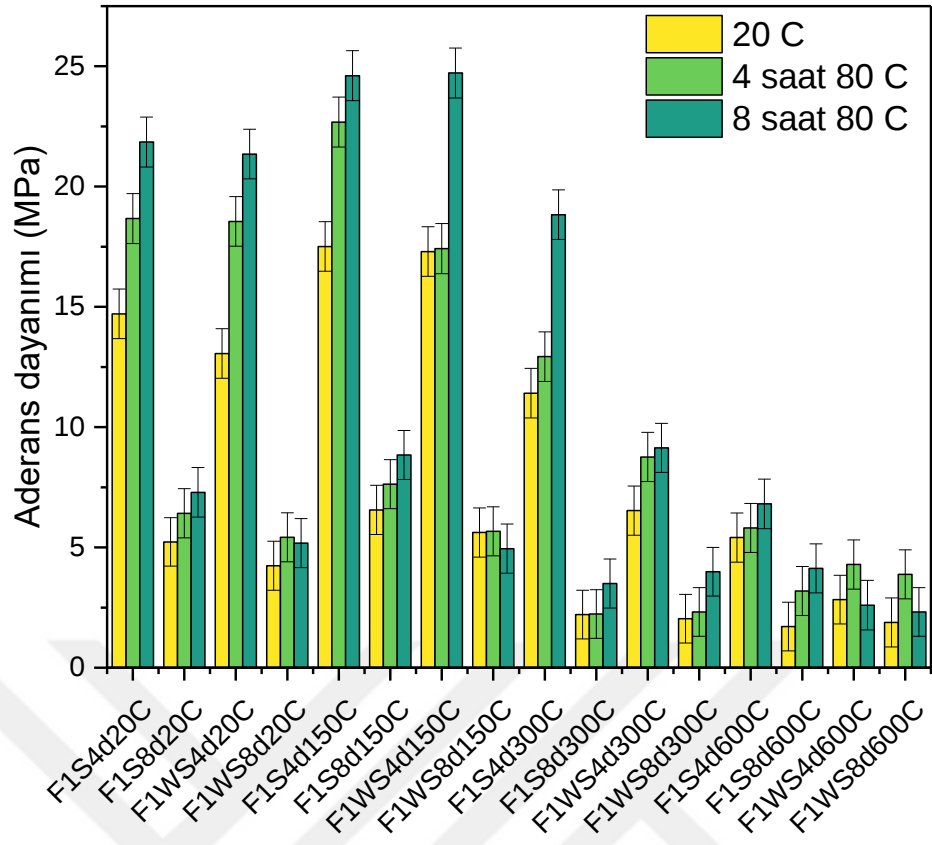


(a)

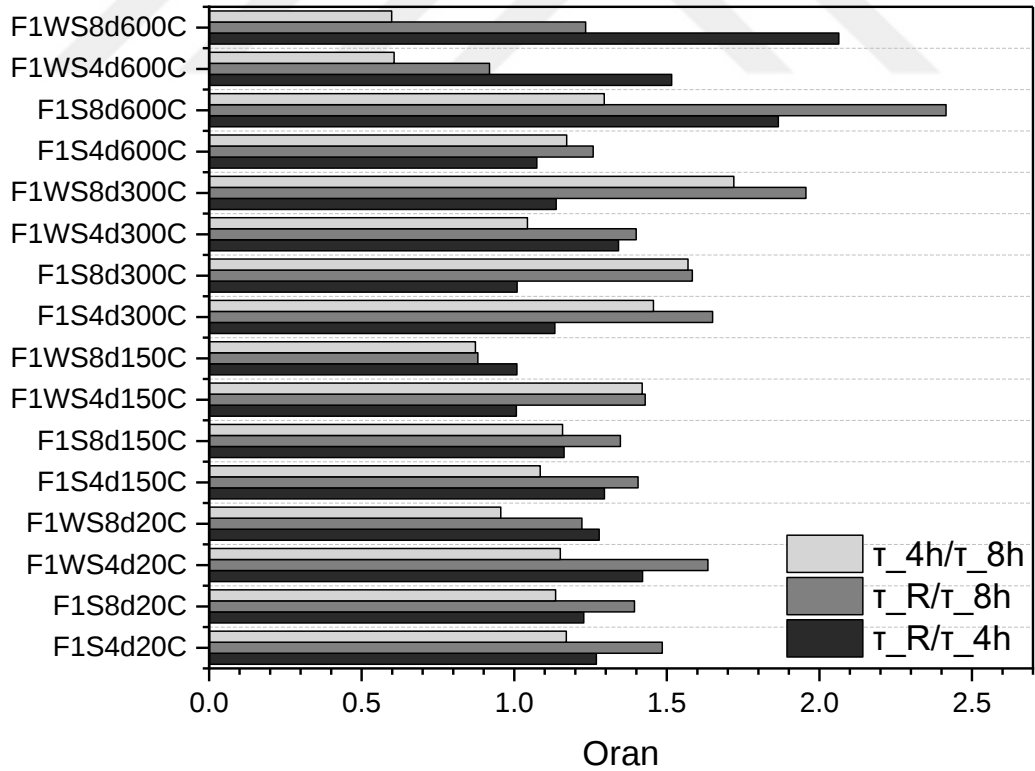


(b)

Şekil 55. %0,5 lifli numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması (a) aderans dayanım sonuçları (b) aderans dayanım karşılaştırması



(a)



(b)

Şekil 56. %1 lifli numunelerde yüksek sıcaklık etkisinin karşılaştırılması (a) aderans dayanım sonuçları (b) aderans dayanım karşılaştırması

Yukarıda lif kullanılması ile sıcaklık kürü ve sıcaklık kür süresi ilişkisinin aderans dayanımı üzerindeki etkisi karşılaştırılmalı olarak açıklanmıştır. Bu durumun nedenleri ise öncelikle sıcaklık kürü uygulanmasının geopolimer matris içerisinde geopolimerizasyon süreci üzerinde olumlu yönde daha fazla etkili olmuştur. Sıcaklık kürü uygulanması durumunda alkali aktivatörler ile bağlayıcıların kimyasal birleşimleri daha hızlı ve etkili olmuştur. Bu süreç de aderans dayanımı üzerinde olumlu yönde etkili olmuştur. Benzer şekilde sıcaklık kür süresinin arttırılması da geopolimerizasyon sürecinin daha uzun zaman boyunca devam etmesine neden olmuştur. Bu durumda aderans dayanımını arttırmıştır. Daha hızlı ve etkin bir geopolimerizasyon süreci de donatı ile beton matrisi arasındaki yapışma mekanizmasının daha etkili olmasına neden olmuştur. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacmi ile artan aderans dayanımı kür koşulları ilişkisi de yüksek sıcaklık değerlerinde liflerin termal çatlakları engellemesinden kaynaklanmaktadır. Ulaşılan literatürde geopolimer betonda kür koşullarının aderans dayanımı üzerine etkisinin incelendiği deneysel çalışma sayısının sınırlı olduğu görülmüştür. Sarker (2011) geopolimer betonda ortam kürü uygulayarak aderans dayanımını incelemiştir. Castel and Foster (2015) geopolimer betonda üç farklı kür senaryosunun aderans dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İlk senaryoda numuneler ortam kürüne maruz bırakılmıştır. İkinci senaryoda ise numuneler, 1 gün 80 °C’ de bekletildikten sonra 1 gün de 80 °C’ de suda bekletilmiştir. Üçüncü senaryoda numuneler 1 gün 40 °C’ de bekletildikten sonra 7 gün boyunca 80 °C’ de suda bekletilmiştir.

Aderans boyunun aderans dayanımı üzerindeki etkisi

Aderans boyunun, aderans dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılması için d, donatı çapı olmak üzere iki farklı aderans boyu oluşturulmuştur. aderans boyunun, aderans dayanımı üzerindeki etkisi **Tablo 21, 22 ve 23’** de ve **Şekil 57, 58 ve 59’** da karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Tablo ve şekillerden aderans boyunun, aderans dayanımını üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Aderans boyunun etkisi maruz kalınan yüksek sıcaklık değeri ve lif hacmi ile de değişmektedir. 20 °C’ de bekletilen lifsiz numuneler arasında aderans boyunun 4d’ den 8d’ ye çıkarılması aderans dayanımını ortalama olarak 5,43 kat arttırmaktadır. 150 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan lifsiz numuneler arasında ise aderans boyunun arttırılması aderans dayanımını ortalama 4,52 kat arttırmıştır. Lifsiz numunelerde 300 °C ve 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise aderans boyunun arttırılması aderans dayanımını sırasıyla 2,84 ve 2,34 kat arttırmıştır. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere lifsiz numunelerde maruz kalınan sıcaklık değeri arttıkça aderans boyunun, aderans dayanımı üzerindeki etkisi azalmaktadır. %0,5 lifi numunelerde de aderans boyunun arttırılması, aderans dayanımını azaltmaktadır. Bu numuneler arasında da maruz kalınan sıcaklık değerinin artması durumunda

aderans boyunun, aderans dayanımı üzerindeki azaltıcı etkisi de artmaktadır. 20 °C’ de bekletilen %0,5 lifli numuneler aderans boyunun 4d’ den 8d’ ye çıkarılması aderans dayanımını ortalama olarak 6,08 kat azaltmıştır. Lifsiz numunelerde olduğu gibi %0,5 lifli numunelerde de maruz kalınan sıcaklık değerinin artması aderans dayanımını azaltmıştır. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde aderans boyunun artması aderans dayanımını 3,85 kat azaltmıştır. 300 °C ve 600 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan %0,5 lifli numunelerde de aderans boyunun artması aderans dayanımını sırasıyla ortalama olarak 3,61 ve 1,62 kat azaltmıştır. %1 lifli numunelerde de benzer durum görülmektedir. Fakat %1 lifli numuneler arasında artan sıcaklıkla aderans boyunun, aderans dayanımı üzerindeki etkisi bir birine daha yakındır. 20 °C ve 150 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımları sırasıyla 3,22 ve 3,26 kat azalmıştır. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere aderans dayanımı üzerinde yüksek sıcaklık-aderans boyu ilişkisi açısından lif hacminin artması olumlu etkiye neden olmuştur. Lif hacminin artması aderans dayanımındaki kaybı azaltmıştır.

Tablo 21. Lifsiz Numunelerde Aderans Boyunun Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

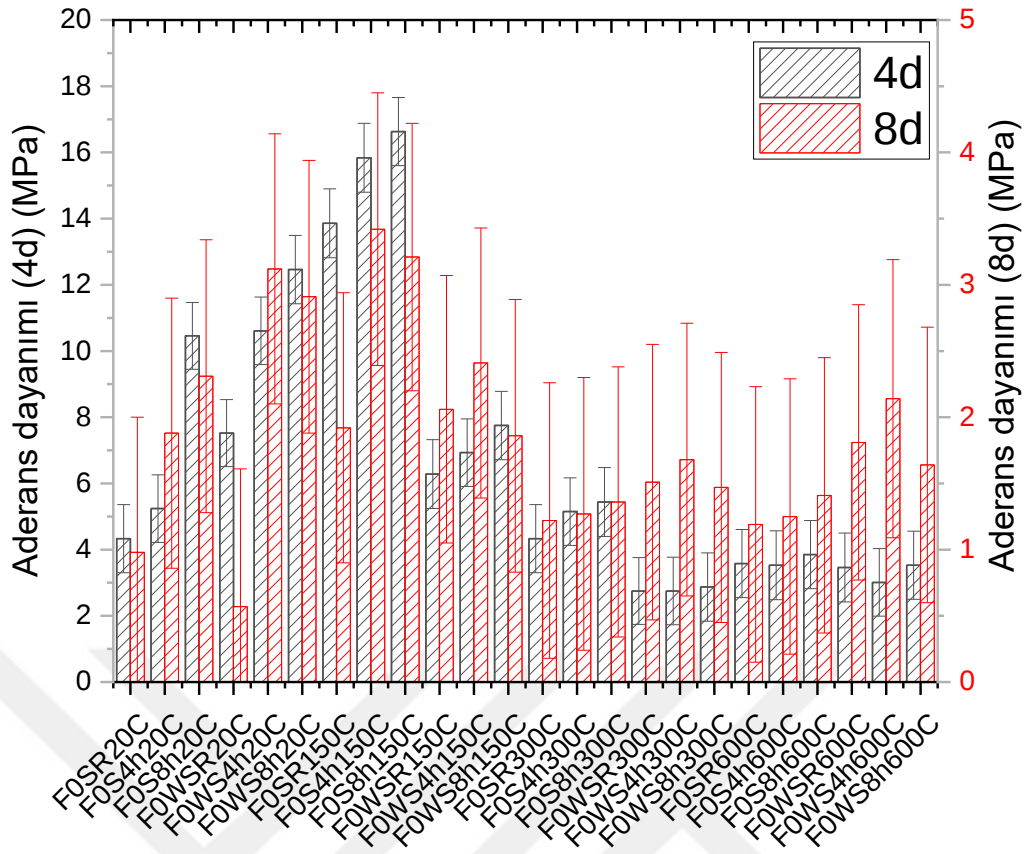
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_{4d}/τ_{8d}	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_{4d}/τ_{8d}
F0S4dR20C	4,33	F0S8dR20C	0,98	4,42	F0S4dR300C	4,33	F0S8dR300C	1,22	3,55
F0S4d4h20C	5,24	F0S8d4h20C	1,88	2,79	F0S4d4h300C	5,15	F0S8d4h300C	1,27	4,06
F0S4d8h20C	10,46	F0S8d8h20C	2,31	4,53	F0S4d8h300C	5,44	F0S8d8h300C	1,36	4,00
F0WS4dR20C	7,52	F0WS8dR20C	0,57	13,19	F0WS4dR300C	2,75	F0WS8dR300C	1,51	1,82
F0WS4d4h20C	10,61	F0WS8d4h20C	3,12	3,40	F0WS4d4h300C	2,75	F0WS8d4h300C	1,68	1,64
F0WS4d8h20C	12,46	F0WS8d8h20C	2,91	4,28	F0WS4d8h300C	2,87	F0WS8d8h300C	1,47	1,95
F0S4dR150C	13,86	F0S8dR150C	1,92	7,22	F0S4dR600C	3,58	F0S8dR600C	1,19	3,01
F0S4d4h150C	15,84	F0S8d4h150C	3,42	4,63	F0S4d4h600C	3,53	F0S8d4h600C	1,25	2,82
F0S4d8h150C	16,63	F0S8d8h150C	3,21	5,18	F0S4d8h600C	3,85	F0S8d8h600C	1,41	2,73
F0WS4dR150C	6,28	F0WS8dR150C	2,06	3,05	F0WS4dR600C	3,46	F0WS8dR600C	1,81	1,91
F0WS4d4h150C	6,93	F0WS8d4h150C	2,41	2,88	F0WS4d4h600C	3,01	F0WS8d4h600C	2,14	1,41
F0WS4d8h150C	7,75	F0WS8d8h150C	1,86	4,17	F0WS4d8h600C	3,53	F0WS8d8h600C	1,64	2,15

Tablo 22. %0,5 Lifli Numunelerde Aderans Boyunun Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

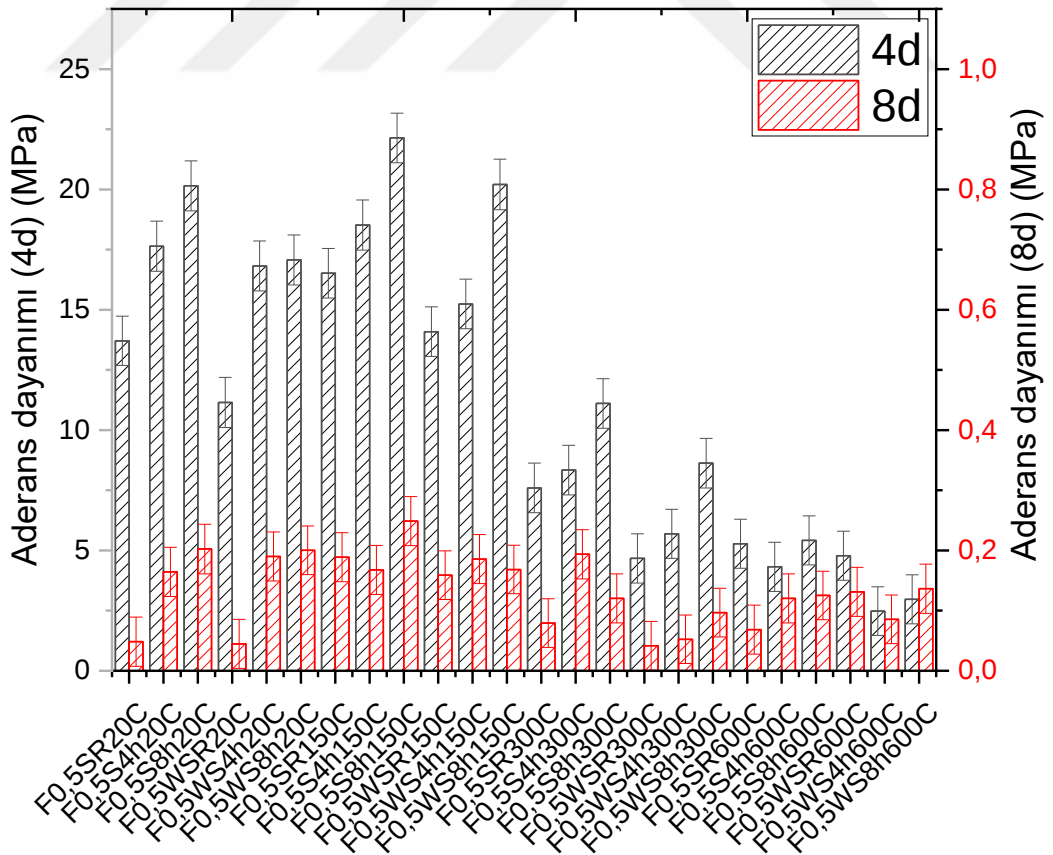
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_{4d}/τ_{8d}	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_{4d}/τ_{8d}
F0,5S4dR20C	13,71	F0,5S8dR20C	1,21	11,33	F0,5S4dR300C	7,6	F0,5S8dR300C	1,98	3,84
F0,5S4d4h20C	17,64	F0,5S8d4h20C	4,11	4,29	F0,5S4d4h300C	8,34	F0,5S8d4h300C	4,84	1,72
F0,5S4d8h20C	20,15	F0,5S8d8h20C	5,06	3,98	F0,5S4d8h300C	11,11	F0,5S8d8h300C	3,01	3,69
F0,5WS4dR20C	11,15	F0,5WS8dR20C	1,12	9,96	F0,5WS4dR300C	4,67	F0,5WS8dR300C	1,04	4,49
F0,5WS4d4h20C	16,82	F0,5WS8d4h20C	4,75	3,54	F0,5WS4d4h300C	5,69	F0,5WS8d4h300C	1,31	4,34
F0,5WS4d8h20C	17,07	F0,5WS8d8h20C	5,01	3,41	F0,5WS4d8h300C	8,63	F0,5WS8d8h300C	2,42	3,57
F0,5S4dR150C	16,52	F0,5S8dR150C	4,72	3,50	F0,5S4dR600C	5,28	F0,5S8dR600C	1,71	3,09
F0,5S4d4h150C	18,52	F0,5S8d4h150C	4,19	4,42	F0,5S4d4h600C	4,32	F0,5S8d4h600C	3,01	1,44
F0,5S4d8h150C	22,14	F0,5S8d8h150C	6,22	3,56	F0,5S4d8h600C	5,42	F0,5S8d8h600C	3,13	1,73
F0,5WS4dR150C	14,09	F0,5WS8dR150C	3,97	3,55	F0,5WS4dR600C	4,78	F0,5WS8dR600C	3,28	1,46
F0,5WS4d4h150C	15,24	F0,5WS8d4h150C	4,64	3,28	F0,5WS4d4h600C	2,48	F0,5WS8d4h600C	2,14	1,16
F0,5WS4d8h150C	20,21	F0,5WS8d8h150C	4,21	4,80	F0,5WS4d8h600C	2,97	F0,5WS8d8h600C	3,41	0,87

Tablo 23. %1 Lifli Numunelerde Aderans Boyunun Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

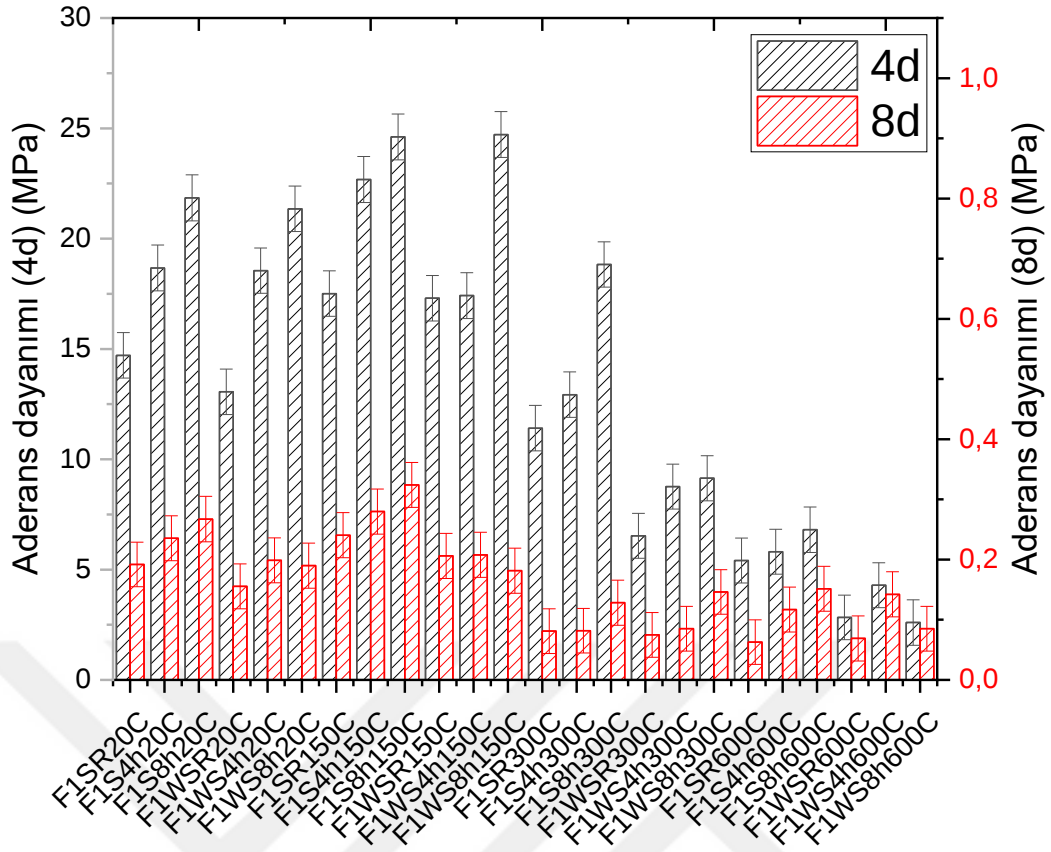
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_{4d}/τ_{8d}	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_{4d}/τ_{8d}
F1S4dR20C	14,71	F1S8dR20C	5,23	2,81	F1S4dR300C	11,41	F1S8dR300C	2,21	5,16
F1S4d4h20C	18,67	F1S8d4h20C	6,42	2,91	F1S4d4h300C	12,93	F1S8d4h300C	2,23	5,80
F1S4d8h20C	21,85	F1S8d8h20C	7,29	3,00	F1S4d8h300C	18,83	F1S8d8h300C	3,5	5,38
F1WS4dR20C	13,06	F1WS8dR20C	4,24	3,08	F1WS4dR300C	6,53	F1WS8dR300C	2,04	3,20
F1WS4d4h20C	18,55	F1WS8d4h20C	5,42	3,42	F1WS4d4h300C	8,76	F1WS8d4h300C	2,32	3,78
F1WS4d8h20C	21,35	F1WS8d8h20C	5,18	4,12	F1WS4d8h300C	9,14	F1WS8d8h300C	3,99	2,29
F1S4dR150C	17,51	F1S8dR150C	6,56	2,67	F1S4dR600C	5,41	F1S8dR600C	1,71	3,16
F1S4d4h150C	22,68	F1S8d4h150C	7,63	2,97	F1S4d4h600C	5,81	F1S8d4h600C	3,19	1,82
F1S4d8h150C	24,61	F1S8d8h150C	8,84	2,78	F1S4d8h600C	6,81	F1S8d8h600C	4,13	1,65
F1WS4dR150C	17,3	F1WS8dR150C	5,62	3,08	F1WS4dR600C	2,83	F1WS8dR600C	1,88	1,51
F1WS4d4h150C	17,42	F1WS8d4h150C	5,67	3,07	F1WS4d4h600C	4,29	F1WS8d4h600C	3,88	1,11
F1WS4d8h150C	24,72	F1WS8d8h150C	4,95	4,99	F1WS4d8h600C	2,6	F1WS8d8h600C	2,32	1,12



Şekil 57. Lifsiz numunelerde adersans boyunun adersans dayanımına etkisi



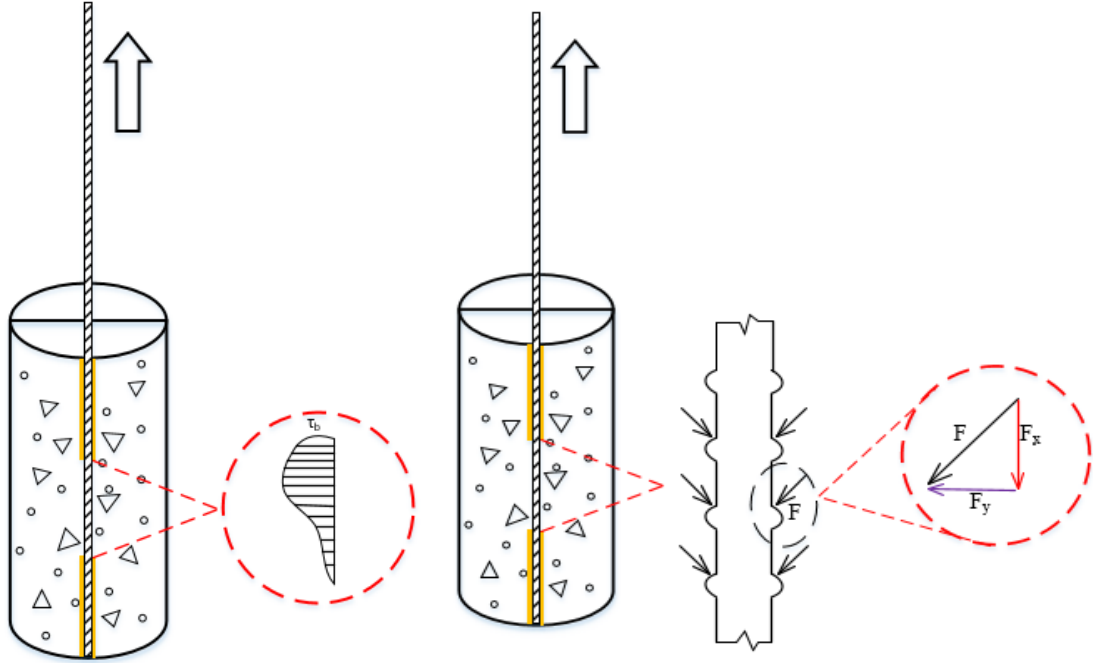
Şekil 58. %0,5 lifli numunelerde adersans boyunun adersans dayanımına etkisi



Şekil 59. %1 Lifli numunelerde aderans boyunun aderans dayanımına etkisi

Yukarıdaki sonuçlardan anlaşılacağı üzere numuneler üzerinde aderans boyunun önemli bir etkisi vardır. Öncelikle aderans boyunun artması beton matris ile donatının ara yüzeyini arttırmıştır. Bu da kusurlu bölgenin artmasına neden olmuştur. Kusurlu bölgenin artması da aderans dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Yüksek sıcaklık değerlerinde de kusurlu bölgenin daha fazla zarar görmesine neden olmuştur. Ayrıca aderans testi sırasında da donatının nervürleri arasında yaklaşık olarak 45 derece olacak şekilde gerilmeler etki etmektedir. **Şekil 57'** de 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. Aderans boyunun artması bu bölgedeki gerilmelerin ve bu gerilmelerin bileşenlerinin büyüklüklerinin de artmasına neden olmuştur. Bu gerilmeler beton fazında çekme gerilmelerine neden olmakla birlikte betonun asal çekme dayanımını geçmesi durumunda da mikro düzeyde çatlakların oluşmasına ve artan yük ile birlikte bu mikro çatlakların ilerleyerek büyümesine neden olmuştur. Bundan dolayı aderans boyunun artması aderans dayanımının azalmasına neden olmuştur. Ayrıca yine **Şekil 60'** da görüldüğü üzere aderans bölgesinde donatıda oluşan gerilme dağılımı artan yük ile birlikte düzgünlüğünü kaybetmektedir. Bu da bu bölgenin boyunun artmasının gerilme dağılımındaki düzensizliğin artmasına neden olmuştur. Böylece aderans boyunun artması aderans dayanımının da azalmasına neden olmuştur. Bir diğer etken ise

aderans boyu bölgesindeki beton matrisi ile donatının temas yüzeyidir. Donatıdaki nervürlerin yüzey alanı aynı donatı çapı olduğu için ihmal edilirse silindirik yüzeyin yüzey alanı $= \pi d \cdot \text{aderans boyu}$ formülü ile hesaplanabilir. 4d aderans boyu numunelerde bu alan $4\pi d^2$ iken 8d aderans boyu numunelerde bu alan $8\pi d^2$ ’ dir. Yüzey alanları bir birlerine oranlarsa $(4\pi d^2/8\pi d^2)$ 8d aderans boyu numunelerin temas yüzeyi, 4d aderans boyu numunelere göre 2 kat daha fazla olmaktadır. Artan bu yüzey alanından dolayı da aderans dayanımı azalmaktadır.



Şekil 60. Aderans bölgesindeki gerilmelerin şematik gösterimi

Ulaşılan literatürde de genel olarak aderans boyunun artmasının aderans dayanımını azalttığı yönündedir. Peng *et al.* (2022) karbon FRP donatılı numunelerde yürüttükleri deneysel çalışmada aderans boyunun donatı çapının 5, 10 ve 15 katı kadar arttırılmasının aderans dayanımını yaklaşık olarak %20-%30 kadar düşürdüğünü belirtmişlerdir. Sunulan çalışmada da çelik donatılı ve mikro sentetik lifli numunelerde aderans boyunun artmasının aderans dayanımını azalttığı gösterilmiştir. Hatta lif hacminin artması aderans boyundan kaynaklı aderans dayanımı azalmasını azalttığı da gösterilmiştir. Pop *et al.* (2013) de kendiliğinden yerleşen geleneksel betonlarda aderans boyunun arttırılmasının aderans dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde Liu *et al.* (2021) de kendiliğinden yerleşen geleneksel betonda aderans boyunun artmasının aderans dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Aderans boyunun donatı çapının 3, 4, 5 ve 6 katı kadar kullanılması durumunda artan aderans boyu ile aderans dayanımının önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada aderans bölgesi boyunca gerilme dağılımı üzerinde de durmuşlardır. Zhang *et al.* (2023) geri dönüşümlü agregadan üretilen beton ile korozyona uğratılmış ultra yüksek dayanımlı çelik donatı

arasındaki aderans dayanımı üzerinde durmuşlardır. Çalışmanın parametrelerinden bir tanesi de aderans boyu olarak belirlenmiştir. Aderans boyu donatı çapının 10 ve 20 katı olarak alınmıştır. Çalışma sonucunda aderans boyunun artmasının aderans dayanımı önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir.

Etriye varlığının aderans dayanımı üzerindeki etkisi

Aderans deneylerinde üretilen numuneler genel olarak yatay donatı kullanılmadan üretilmekte ve bu yatay donatının sargılama etkisinin aderans performansı üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Ulaşılan literatürde de aderans deneylerinde etriye kullanımının çok sınırlı olduğu görülmüştür. Bu sebeple sunulan bu tez çalışmasında etriye varlığının aderans dayanımı üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Bu hedef doğrultusunda da etriyeli ve etriyesiz olmak üzere her gruptan numuneler üretilmiş olup aderans dayanımları da karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Etriye varlığının aderans dayanımı üzerindeki etkisi **Tablo 24, 25 ve 26** sunulmuştur. Ayrıca etriye kullanımının aderans dayanımı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak **Şekil 61-66** da gösterilmiştir.

Numunelerde etriye kullanılmasının aderans dayanımı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bu etki ise numunelerin lif hacmi ve maruz kaldıkları yüksek sıcaklık değerine göre de farklılık göstermiştir. Öncelikle lifsiz numuneler arasında 20 °C’ de bekletilen numuneler arasında etriye kullanılmasının önemli bir etkisini olmadığı fakat 150 °C ve 300 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ise etriye kullanılması aderans dayanımını ortalama olarak sırasıyla 1,79 ve 1,31 kat arttırmıştır. Lifsiz numuneler arasında 600 °C yüksek sıcaklık etkisinden sonra numunelerin aderans dayanımlarında önemli bir artış görülmemiştir. Yine lifsiz numuneler arasında etriye kullanılmasının etkisi 4d aderans boyu numuneler arasında daha fazla etkili olmuştur. Bu numunelerde düşük aderans boyunun neden olduğu yüksek aderans dayanımının yanı sıra etriye kullanılmasının olumlu etkisi olduğu için bu fark oluşmuştur. 8d aderans boyu lifsiz numuneler arasında etriye kullanımının aderans dayanımı üzerindeki etkisi daha sınırlı olmuştur. %0,5 lifli numunelerin büyük çoğunluğunda etriye kullanılması aderans dayanımını arttırmıştır. Yine bu numuneler arasında etriye varlığının aderans dayanımı üzerindeki etkisi diğer parametreler bağlı olarak farklı düzeylerde etki etmiştir. %0,5 lifli numunelerde 20 °C oda sıcaklığında bekletilen numunelerde etriye kullanılması aderans dayanımını ortalama 1,07 kat arttırmıştır. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ise etriye kullanılması aderans dayanımını ortalama olarak 1,18 kat arttırmıştır. Maruz kalınan yüksek sıcaklık değerinin artması yani 300 °C sıcaklığa maruz kalınması durumunda etriye kullanımı aderans dayanımını ortalama 1,87 kat arttırmıştır. 600 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında da etriye kullanılması aderans dayanımını

arttırmasına rağmen bu ortalama artış değeri 1,25 kat ile 300 °C' ye göre daha az olmuştur. Bu durumun nedenin ise 600 °C gibi yüksek sıcaklıkta beton fazının mekanik ve yapışma özelliklerinde önemli azalmalar olmuş olmasıdır. Beton fazının zayıflaması ile etriye kullanımının bu zayıflamayı tolere edebilme yeteneği sınırlı düzeyde kalmıştır.

%1 lifli numunelerde de etriye kullanılması aderans dayanımını çoğunlukla arttırmıştır. 20 °C' de bekletilen numunelerde etriye kullanılması aderans dayanımını ortalama olarak 1,16 kat arttırmıştır. 150 °C ve 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etriye kullanılması aderans dayanımını ortalama olarak sırasıyla 1,27 ve 1,37 kat arttırmıştır. %0,5 lifli numunelerin aksine %1 lifli numuneler 600 °C sıcaklığa maruz kalınması durumunda etriye kullanımı aderans dayanımını 1,57 kat arttırmıştır. Yani %1 lifli numunelerde 300 °C ile 600 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasındaki artış %0,5 lifli numunelere göre artmıştır.



Tablo 24 Lifsiz. Numunelerde Etriye Varlığının Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

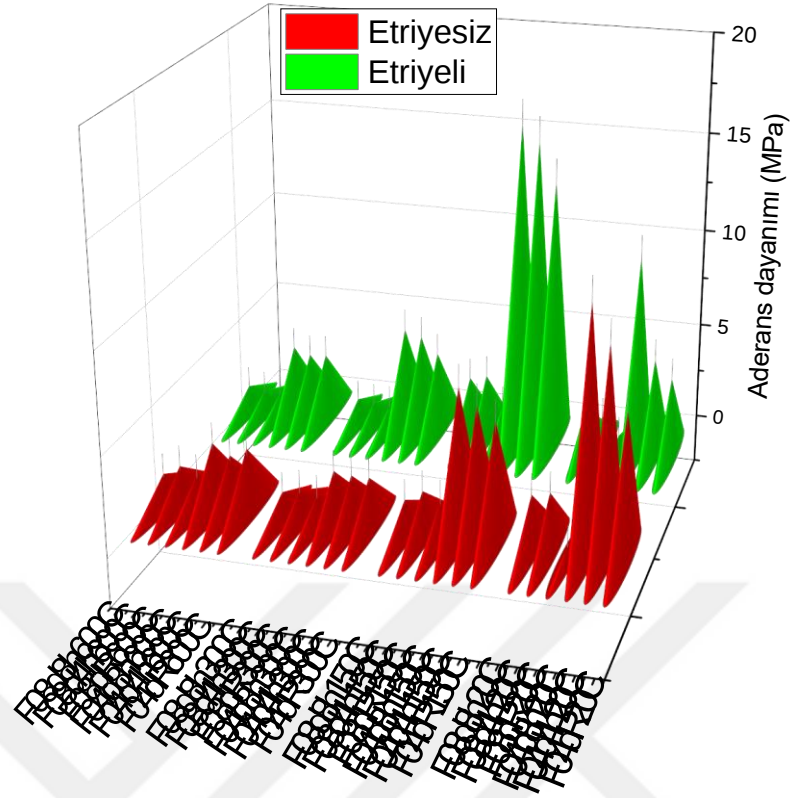
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_s/τ_{WS}	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_s/τ_{WS}
F0S4dR20C	4,33	F0WS4dR20C	7,52	0,58	F0S4dR300C	4,33	F0WS4dR300C	2,75	1,57
F0S4d4h20C	5,24	F0WS4d4h20C	10,61	0,49	F0S4d4h300C	5,15	F0WS4d4h300C	2,75	1,87
F0S4d8h20C	10,46	F0WS4d8h20C	12,46	0,84	F0S4d8h300C	5,44	F0WS4d8h300C	2,87	1,90
F0S8dR20C	0,98	F0WS8dR20C	0,57	1,72	F0S8dR300C	1,22	F0WS8dR300C	1,51	0,81
F0S8d4h20C	1,88	F0WS8d4h20C	3,12	0,60	F0S8d4h300C	1,27	F0WS8d4h300C	1,68	0,76
F0S8d8h20C	2,31	F0WS8d8h20C	2,91	0,79	F0S8d8h300C	1,36	F0WS8d8h300C	1,47	0,93
F0S4dR150C	13,86	F0WS4dR150C	6,28	2,21	F0S4dR600C	3,58	F0WS4dR600C	3,46	1,03
F0S4d4h150C	15,84	F0WS4d4h150C	6,93	2,29	F0S4d4h600C	3,53	F0WS4d4h600C	3,01	1,17
F0S4d8h150C	16,63	F0WS4d8h150C	7,75	2,15	F0S4d8h600C	3,85	F0WS4d8h600C	3,53	1,09
F0S8dR150C	1,92	F0WS8dR150C	2,06	0,93	F0S8dR600C	1,19	F0WS8dR600C	1,81	0,66
F0S8d4h150C	3,42	F0WS8d4h150C	2,41	1,42	F0S8d4h600C	1,25	F0WS8d4h600C	2,14	0,58
F0S8d8h150C	3,21	F0WS8d8h150C	1,86	1,73	F0S8d8h600C	1,41	F0WS8d8h600C	1,64	0,86

Tablo 25. %0,5 Lifli Numunelerde Etriye Varlığının Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

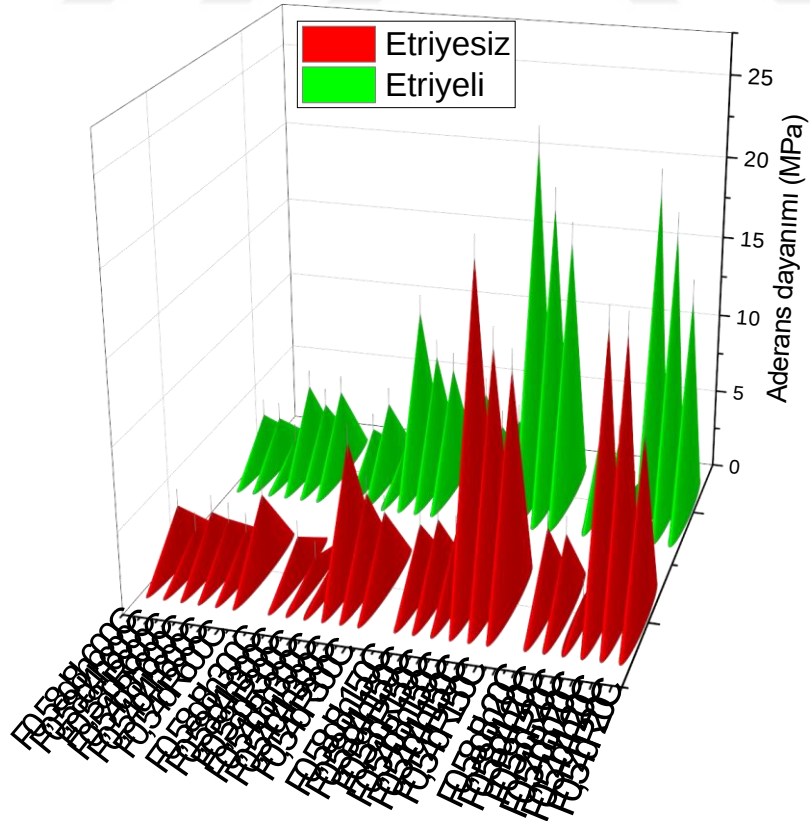
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_s/τ_{WS}	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_s/τ_{WS}
F0,5S4dR20C	13,71	F0,5WS4dR20C	11,15	1,23	F0,5S4dR300C	7,6	F0,5WS4dR300C	4,67	1,63
F0,5S4d4h20C	17,64	F0,5WS4d4h20C	16,82	1,05	F0,5S4d4h300C	8,34	F0,5WS4d4h300C	5,69	1,47
F0,5S4d8h20C	20,15	F0,5WS4d8h20C	17,07	1,18	F0,5S4d8h300C	11,11	F0,5WS4d8h300C	8,63	1,29
F0,5S8dR20C	1,21	F0,5WS8dR20C	1,12	1,08	F0,5S8dR300C	1,98	F0,5WS8dR300C	1,04	1,90
F0,5S8d4h20C	4,11	F0,5WS8d4h20C	4,75	0,87	F0,5S8d4h300C	4,84	F0,5WS8d4h300C	1,31	3,69
F0,5S8d8h20C	5,06	F0,5WS8d8h20C	5,01	1,01	F0,5S8d8h300C	3,01	F0,5WS8d8h300C	2,42	1,24
F0,5S4dR150C	16,52	F0,5WS4dR150C	14,09	1,17	F0,5S4dR600C	5,28	F0,5WS4dR600C	4,78	1,10
F0,5S4d4h150C	18,52	F0,5WS4d4h150C	15,24	1,22	F0,5S4d4h600C	4,32	F0,5WS4d4h600C	2,48	1,74
F0,5S4d8h150C	22,14	F0,5WS4d8h150C	20,21	1,10	F0,5S4d8h600C	5,42	F0,5WS4d8h600C	2,97	1,82
F0,5S8dR150C	4,72	F0,5WS8dR150C	3,97	1,19	F0,5S8dR600C	1,71	F0,5WS8dR600C	3,28	0,52
F0,5S8d4h150C	4,19	F0,5WS8d4h150C	4,64	0,90	F0,5S8d4h600C	3,01	F0,5WS8d4h600C	2,14	1,41
F0,5S8d8h150C	6,22	F0,5WS8d8h150C	4,21	1,48	F0,5S8d8h600C	3,13	F0,5WS8d8h600C	3,41	0,92

Tablo 26. %1 Lifli Numunelerde Etriye Varlığının Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

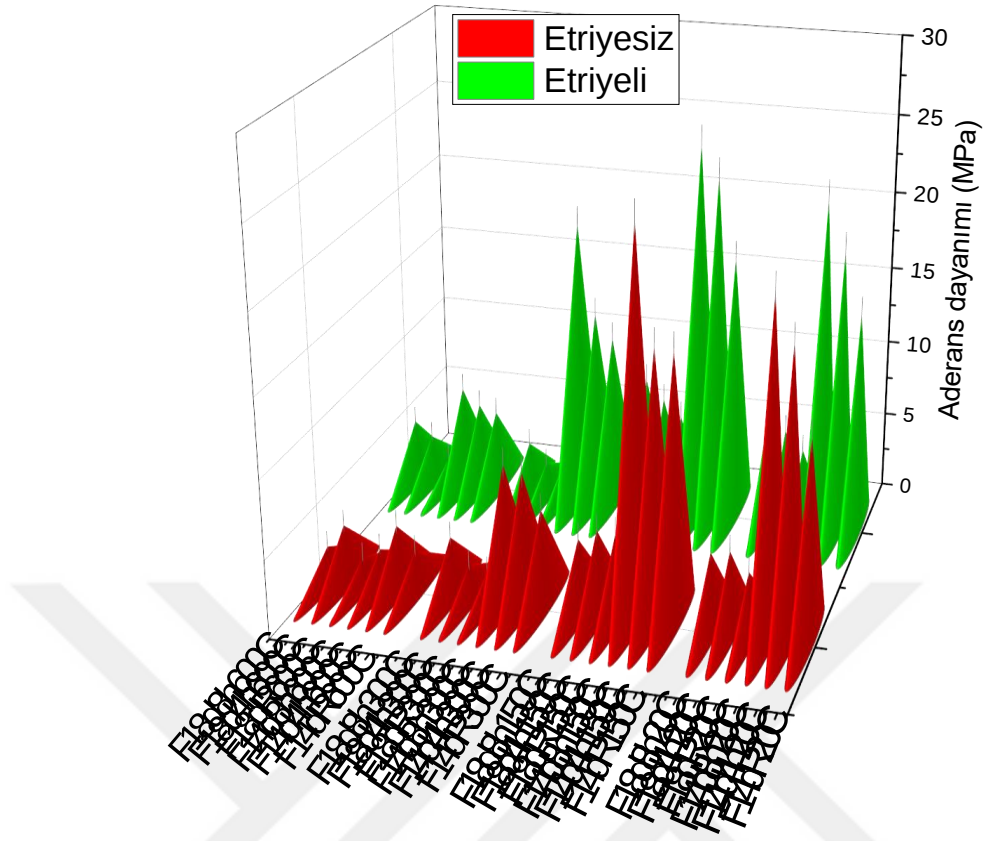
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_s/τ_{ws}	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	τ_s/τ_{ws}
F1S4dR20C	14,71	F1WS4dR20C	13,06	1,13	F1S4dR300C	11,41	F1WS4dR300C	6,53	1,75
F1S4d4h20C	18,67	F1WS4d4h20C	18,55	1,01	F1S4d4h300C	12,93	F1WS4d4h300C	8,76	1,48
F1S4d8h20C	21,85	F1WS4d8h20C	21,35	1,02	F1S4d8h300C	18,83	F1WS4d8h300C	9,14	2,06
F1S8dR20C	5,23	F1WS8dR20C	4,24	1,23	F1S8dR300C	2,21	F1WS8dR300C	2,04	1,08
F1S8d4h20C	6,42	F1WS8d4h20C	5,42	1,18	F1S8d4h300C	2,23	F1WS8d4h300C	2,32	0,96
F1S8d8h20C	7,29	F1WS8d8h20C	5,18	1,41	F1S8d8h300C	3,5	F1WS8d8h300C	3,99	0,88
F1S4dR150C	17,51	F1WS4dR150C	17,3	1,01	F1S4dR600C	5,41	F1WS4dR600C	2,83	1,91
F1S4d4h150C	22,68	F1WS4d4h150C	17,42	1,30	F1S4d4h600C	5,81	F1WS4d4h600C	4,29	1,35
F1S4d8h150C	24,61	F1WS4d8h150C	24,72	1,00	F1S4d8h600C	6,81	F1WS4d8h600C	2,6	2,62
F1S8dR150C	6,56	F1WS8dR150C	5,62	1,17	F1S8dR600C	1,71	F1WS8dR600C	1,88	0,91
F1S8d4h150C	7,63	F1WS8d4h150C	5,67	1,35	F1S8d4h600C	3,19	F1WS8d4h600C	3,88	0,82
F1S8d8h150C	8,84	F1WS8d8h150C	4,95	1,79	F1S8d8h600C	4,13	F1WS8d8h600C	2,32	1,78



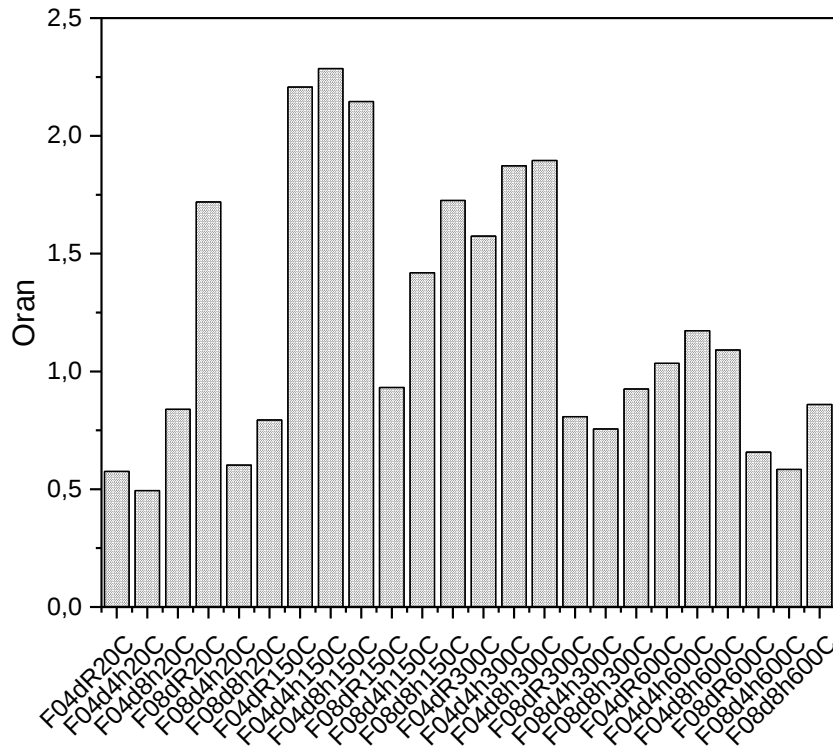
Şekil 61. Lifsiz numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisi



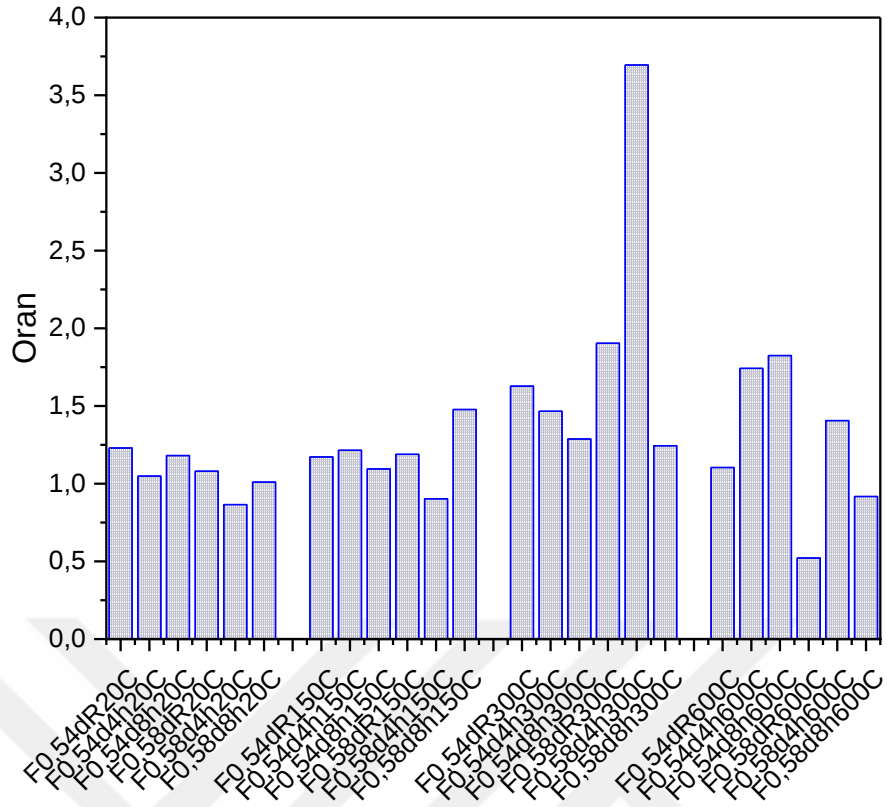
Şekil 62. %0,5 lifli numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisi



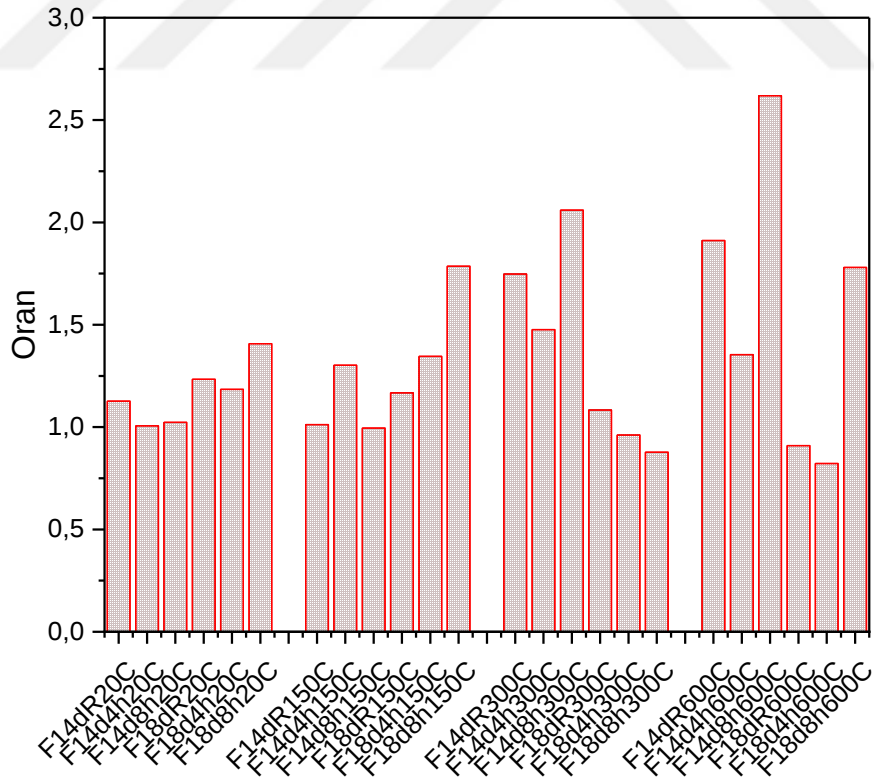
Şekil 63. %1 lifli numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisi



Şekil 64. Lifsiz numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması



Şekil 65. %0,5 lifli numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması



Şekil 66. %1 lifli numunelerde etriye varlığının aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması

Etriye kullanımı ile ilgili yukarıdaki sonuçlar değerlendirildiğinde lifsiz numunelerde özellikle düşük sıcaklık değerinde etriye kullanımının aderans dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmamasının nedeni, bu düşük sıcaklıkta betonun mekanik özelliklerinde zayıflamaların olmamasıdır. Bu nedenden dolayı 20 °C’ de beton fazında önemli değişimler olmadığı için etriye kullanımının etkisi sınırlı düzeyde kalmıştır. Lifsiz numunelerde de 150 °C ve 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etriyenin daha etkin olmasının nedeni de bu sıcaklıklarda bozulan beton fazını etriye kullanımının tolere etmesidir. Ayrıca numunelerde deney anında artan aderans gerilmeleri ile birlikte yanal basınçlar da artmıştır. Bu yanal gerilmeler etriye kullanılan numunelerde etriyeler tarafından karşılanmıştır. Yanal gerilmelerin neden olduğu çatlaklar da etriyeler tarafından engellenmiştir. Ulaşılan literatürde de etriye kullanımının aderans dayanımını arttırdığı belirtilmiştir. Bandelt and Billington (2016) aderans dayanımını kiriş testleri ile ele aldıkları çalışmalarında etriye kullanımının aderans dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Zhao *et al.* (2013) korozyona uğramış donatı ile normal beton ve geri dönüşüm agregalı beton arasındaki aderans dayanımını ele almışlardır. Çalışma sonucunda etriye kullanımının aderans dayanımını önemli ölçüde arttırdığını belirtmiştir. Pandurangan *et al.* (2010) da sargılama etkisinin aderans dayanımı üzerindeki etkisini kiriş aderans deneyleri ile ele almışlardır. Yazarlar etriye kullanımının aderans dayanımı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu belirtmekle birlikte etriye kullanımının göçme modu üzerinde de önemli bir etkisinin olduğunu vurgulamışlardır. Law *et al.* (2011) korozyona maruz bırakılan numunelerde sargılama etkisinin aderans dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yatay donatı ile sargılanan numunelerin aderans dayanımlarında olumlu yönde artışların olduğunu belirtmişlerdir. Benze şekilde Ba *et al.* (2021) da aderans dayanımında sargılama etkisini korozyona uğrayan numuneler üzerinde ele almışlardır. Çalışma sonucunda da korozyona uğrayan numunelerde etriye kullanılmasının aderans dayanımı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Yang *et al.* (2016) da etriye kullanılmasının aderans dayanımını artırdığını belirtmişlerdir. Yukarıda bahsedilen etriye-aderans dayanımı ilişkisi görüldüğü üzere ya kiriş numunelerde ya da korozyona uğrayan numuneler arasında ele alınmıştır. Sunulan bu tez çalışması kapsamında ise etriye varlığının aderans dayanımına etkisi lif hacmi ve yüksek sıcaklık açısından ele alınmış olup elde edilen veriler literatüre sunulmuştur.

Mikro sentetik lif kullanılmasının aderans dayanımı üzerindeki etkisi

Çalışma kapsamında mikro sentetik lif hacminin aderans dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılması için %0, %0,5 ve %1 oranlarında lif kullanılmıştır. Liflerin aderans dayanımı üzerindeki etkisi **Tablo 67** ile **Şekil 68-75**’ de sunulmuştur. İlgili tablo ve şekiller

incelendiğinde lif hacminin artırılması aderans dayanımını arttırmıştır. 20 °C' de bekletilen etriyeli numuneler arasında lif hacminin %0,5 ve %1' e çıkarılması aderans dayanımını ortalama olarak sırasıyla 2,35 ve 3,49 kat arttırmıştır. Bu numuneler arasında lif hacminin %0,5' den %1' e çıkarılması ise aderans dayanımını ortalama olarak 1,76 oranında arttırmıştır. Yine 20 °C' de bekletilen numunelerde etriye kullanılmadığı durumunda da lif hacminin %0' dan %0,5 ve %1' e çıkarılması aderans dayanımını sırasıyla 1,61 ve 2,69 oranında arttırmıştır. Bu numunelerde lif hacminin %0,5' den %1' e artırılması ise aderans dayanımı ortalama 1,58 kat arttırmıştır. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere 20 °C' de bekletilen etriyeli ve etriyesiz numunelere lif hacminin %0' dan %0,5' e çıkarılması, %0,5' den %1' e çıkarılmasından daha fazla etkili olmuştur. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etriye kullanılması durumunda lif hacminin %0' dan %0,5 ve %1' e çıkarılması aderans dayanımını sırasıyla ortalama 1,55 ve 2,10 kat arttırmıştır. Lif hacminin %0,5' den %1' e artırılması durumunda ise aderans dayanımı ortalama olarak 1,34 kat artmıştır. 150 °C sıcaklığa maruz kalan etriyesiz numunelerde ise lif hacminin %0' dan %0,5 ve %1' e artırılması aderans dayanımını ortalama 2,19 ve 2,70 kat arttırmıştır. Lif hacminin %0,5' den %1' e artırılması ise aderans dayanımını ortalama 1,23 kat arttırmıştır. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etriyenin varlığı lif hacmi ilişkisinin aderans dayanımına etkisi ile 20 °C' de bekletilen numunelere göre farklılık göstermiştir. 20 °C' de bekletilen numunelerde etriye kullanıldığı durumunda lif hacmindeki değişim daha çok etkili olurken 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etriye kullanılmadığı durumda lifler daha fazla etkili olmuştur.

300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etriye kullanıldığı durumda lif hacminin %0' dan %0,5 ve %1' e çıkarılması aderans dayanımını ortalama 2,18 ve 2,46 kat arttırmıştır. Lif hacminin %0,5' den %1' e çıkarılması ise aderans dayanımını ortalama 1,25 kat arttırmıştır. Bu numunelerde etriye kullanılmadığı durumda ise lif hacmini %0' dan %0,5 ve %1' e artırılması aderans dayanımı ortalama 1,65 ve 2,37 kat arttırmıştır. 300 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında da lif hacminin %0' dan %0,5' e çıkarılması %0,5' den %1' e çıkarılması durumuna göre aderans dayanımı üzerinde daha etkili olmuştur. 300 °C sıcaklığa maruz kalan ve etriyesiz numunelerde lif hacminin %0,5' den %1' e çıkarılması aderans dayanımını ortalama 1,56 kat arttırmıştır. 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise lif takviyesini aderans dayanımı üzerindeki etkisi 150 °C ve 300 °C' ye maruz kalan numunelere göre daha sınırlı olmuştur. 600 °C sıcaklığa maruz kalan etriyeli numunelerde lif hacminin %0' dan %0,5 ve %1' e çıkarılması aderans dayanımını ortalama 1,70 ve 1,97 kat arttırmıştır. Bu numuneler arasında lif hacminin %0,5' den %1' e çıkarılması ise aderans dayanımını ortalama 1,17 kat arttırmıştır. 600 °C sıcaklığa maruz kalan ve etriyenin kullanılmadığı numunelerde ise lif

takviyesinin %0,5 ve %1' e çıkarılması aderans dayanımını sırasıyla ortalama 1,32 ve 1,21 kat arttırmıştır. Bu numunelerde lif takviyesinin %0,5' den %1' e artırılması ise aderans dayanımını 1,04 kat arttırmıştır. 600 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında da lif takviyesinin etkisi etriye kullanılan numunelerde etriyesiz numunelere göre daha fazla olmuştur.



Şekil 67. Lif Takviyesinin Aderans Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	$\tau_{\%0,5}/\tau_{\%0}$	$\tau_{\%1}/\tau_{\%0,5}$	$\tau_{\%1}/\tau_{\%0,5}$
F0S4dR20C	4,33	F0,5S4dR20C	13,71	F1S4dR20C	14,71	3,17	3,40	1,07
F0S4d4h20C	5,24	F0,5S4d4h20C	17,64	F1S4d4h20C	18,67	3,37	3,56	1,06
F0S4d8h20C	10,46	F0,5S4d8h20C	20,15	F1S4d8h20C	21,85	1,93	2,09	1,08
F0S8dR20C	0,98	F0,5S8dR20C	1,21	F1S8dR20C	5,23	1,23	5,34	4,32
F0S8d4h20C	1,88	F0,5S8d4h20C	4,11	F1S8d4h20C	6,42	2,19	3,41	1,56
F0S8d8h20C	2,31	F0,5S8d8h20C	5,06	F1S8d8h20C	7,29	2,19	3,16	1,44
F0WS4dR20C	7,52	F0,5WS4dR20C	11,15	F1WS4dR20C	13,06	1,48	1,74	1,17
F0WS4d4h20C	10,61	F0,5WS4d4h20C	16,82	F1WS4d4h20C	18,55	1,59	1,75	1,10
F0WS4d8h20C	12,46	F0,5WS4d8h20C	17,07	F1WS4d8h20C	21,35	1,37	1,71	1,25
F0WS8dR20C	0,57	F0,5WS8dR20C	1,12	F1WS8dR20C	4,24	1,96	7,44	3,79
F0WS8d4h20C	3,12	F0,5WS8d4h20C	4,75	F1WS8d4h20C	5,42	1,52	1,74	1,14
F0WS8d8h20C	2,91	F0,5WS8d8h20C	5,01	F1WS8d8h20C	5,18	1,72	1,78	1,03

Tablo 67. (devamı)

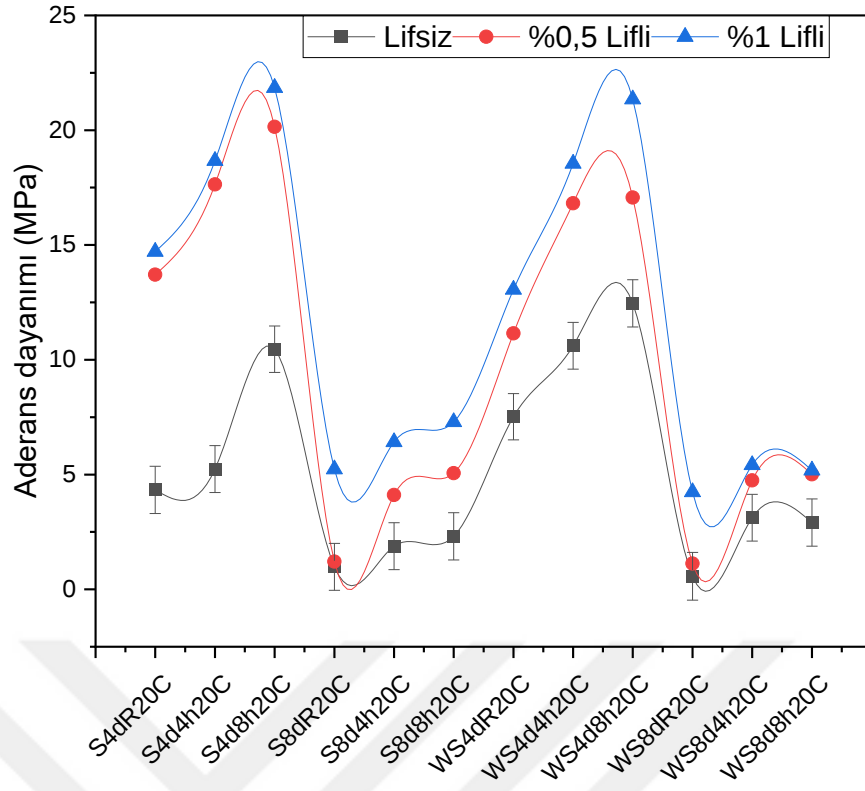
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	$\tau_{\%0,5}$ / $\tau_{\%0}$	$\tau_{\%1}$ / $\tau_{\%0,5}$	$\tau_{\%1}/\tau_{\%0,5}$
F0S4dR150C	13,86	F0,5S4dR150C	16,52	F1S4dR150C	17,51	1,19	1,26	1,06
F0S4d4h150C	15,84	F0,5S4d4h150C	18,52	F1S4d4h150C	22,68	1,17	1,43	1,22
F0S4d8h150C	16,63	F0,5S4d8h150C	22,14	F1S4d8h150C	24,61	1,33	1,48	1,11
F0S8dR150C	1,92	F0,5S8dR150C	4,72	F1S8dR150C	6,56	2,46	3,42	1,39
F0S8d4h150C	3,42	F0,5S8d4h150C	4,19	F1S8d4h150C	7,63	1,23	2,23	1,82
F0S8d8h150C	3,21	F0,5S8d8h150C	6,22	F1S8d8h150C	8,84	1,94	2,75	1,42
F0WS4dR150C	6,28	F0,5WS4dR150C	14,09	F1WS4dR150C	17,3	2,24	2,75	1,23
F0WS4d4h150C	6,93	F0,5WS4d4h150C	15,24	F1WS4d4h150C	17,42	2,20	2,51	1,14
F0WS4d8h150C	7,75	F0,5WS4d8h150C	20,21	F1WS4d8h150C	24,72	2,61	3,19	1,22
F0WS8dR150C	2,06	F0,5WS8dR150C	3,97	F1WS8dR150C	5,62	1,93	2,73	1,42
F0WS8d4h150C	2,41	F0,5WS8d4h150C	4,64	F1WS8d4h150C	5,67	1,93	2,35	1,22
F0WS8d8h150C	1,86	F0,5WS8d8h150C	4,21	F1WS8d8h150C	4,95	2,26	2,66	1,18

Tablo 67. (devamı)

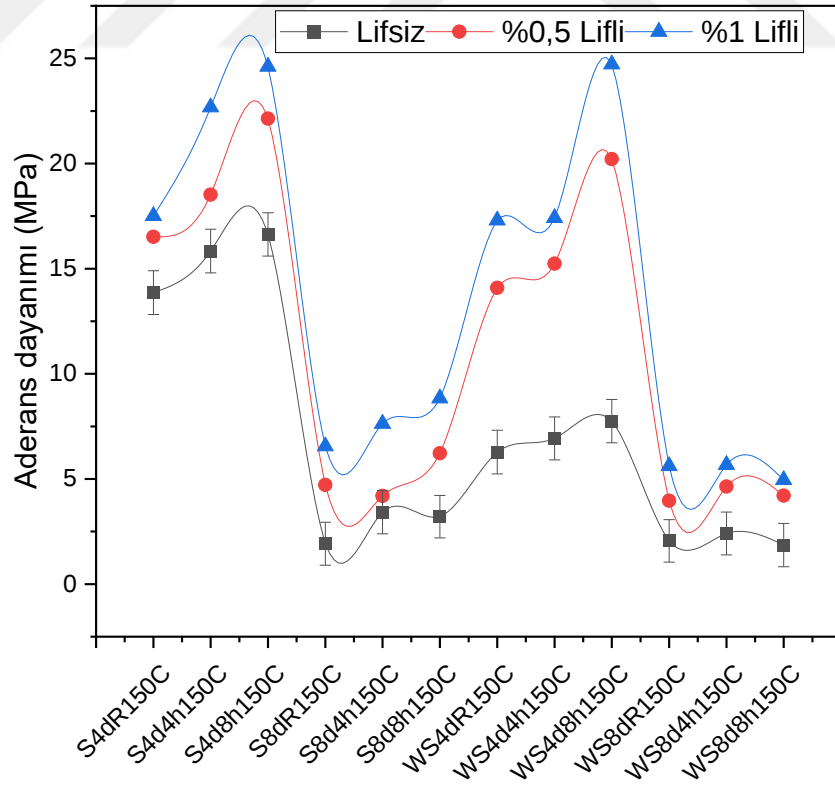
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	$\tau_{\%0,5}$ / $\tau_{\%0}$	$\tau_{\%1}$ / $\tau_{\%0,5}$	$\tau_{\%1}/\tau_{\%0,5}$
F0S4dR300C	4,33	F0,5S4dR300C	7,6	F1S4dR300C	11,41	1,76	2,64	1,50
F0S4d4h300C	5,15	F0,5S4d4h300C	8,34	F1S4d4h300C	12,93	1,62	2,51	1,55
F0S4d8h300C	5,44	F0,5S4d8h300C	11,11	F1S4d8h300C	18,83	2,04	3,46	1,69
F0S8dR300C	1,22	F0,5S8dR300C	1,98	F1S8dR300C	2,21	1,62	1,81	1,12
F0S8d4h300C	1,27	F0,5S8d4h300C	4,84	F1S8d4h300C	2,23	3,81	1,76	0,46
F0S8d8h300C	1,36	F0,5S8d8h300C	3,01	F1S8d8h300C	3,5	2,21	2,57	1,16
F0WS4dR300C	2,75	F0,5WS4dR300C	4,67	F1WS4dR300C	6,53	1,70	2,37	1,40
F0WS4d4h300C	2,75	F0,5WS4d4h300C	5,69	F1WS4d4h300C	8,76	2,07	3,19	1,54
F0WS4d8h300C	2,87	F0,5WS4d8h300C	8,63	F1WS4d8h300C	9,14	3,01	3,18	1,06
F0WS8dR300C	1,51	F0,5WS8dR300C	1,04	F1WS8dR300C	2,04	0,69	1,35	1,96
F0WS8d4h300C	1,68	F0,5WS8d4h300C	1,31	F1WS8d4h300C	2,32	0,78	1,38	1,77
F0WS8d8h300C	1,47	F0,5WS8d8h300C	2,42	F1WS8d8h300C	3,99	1,65	2,71	1,65

Tablo 67. (devamı)

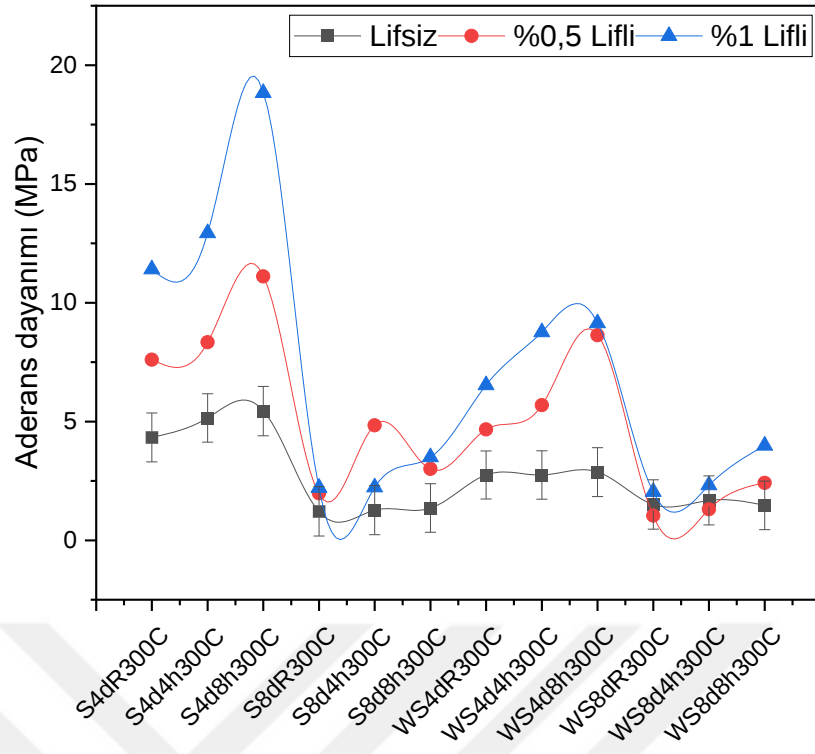
Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	Numune Kodu	τ_{max} (MPa)	$\tau_{\%0,5}$ $/\tau_{\%0}$	$\tau_{\%1}$ $/\tau_{\%0,5}$	$\tau_{\%1}/\tau_{\%0,5}$
F0S4dR600C	3,58	F0,5S4dR600C	5,28	F1S4dR600C	5,41	1,47	1,51	1,02
F0S4d4h600C	3,53	F0,5S4d4h600C	4,32	F1S4d4h600C	5,81	1,22	1,65	1,34
F0S4d8h600C	3,85	F0,5S4d8h600C	5,42	F1S4d8h600C	6,81	1,41	1,77	1,26
F0S8dR600C	1,19	F0,5S8dR600C	1,71	F1S8dR600C	1,71	1,44	1,44	1,00
F0S8d4h600C	1,25	F0,5S8d4h600C	3,01	F1S8d4h600C	3,19	2,41	2,55	1,06
F0S8d8h600C	1,41	F0,5S8d8h600C	3,13	F1S8d8h600C	4,13	2,22	2,93	1,32
F0WS4dR600C	3,46	F0,5WS4dR600C	4,78	F1WS4dR600C	2,83	1,38	0,82	0,59
F0WS4d4h600C	3,01	F0,5WS4d4h600C	2,48	F1WS4d4h600C	4,29	0,82	1,43	1,73
F0WS4d8h600C	3,53	F0,5WS4d8h600C	2,97	F1WS4d8h600C	2,6	0,84	0,74	0,88
F0WS8dR600C	1,81	F0,5WS8dR600C	3,28	F1WS8dR600C	1,88	1,81	1,04	0,57
F0WS8d4h600C	2,14	F0,5WS8d4h600C	2,14	F1WS8d4h600C	3,88	1,00	1,81	1,81
F0WS8d8h600C	1,64	F0,5WS8d8h600C	3,41	F1WS8d8h600C	2,32	2,08	1,41	0,68



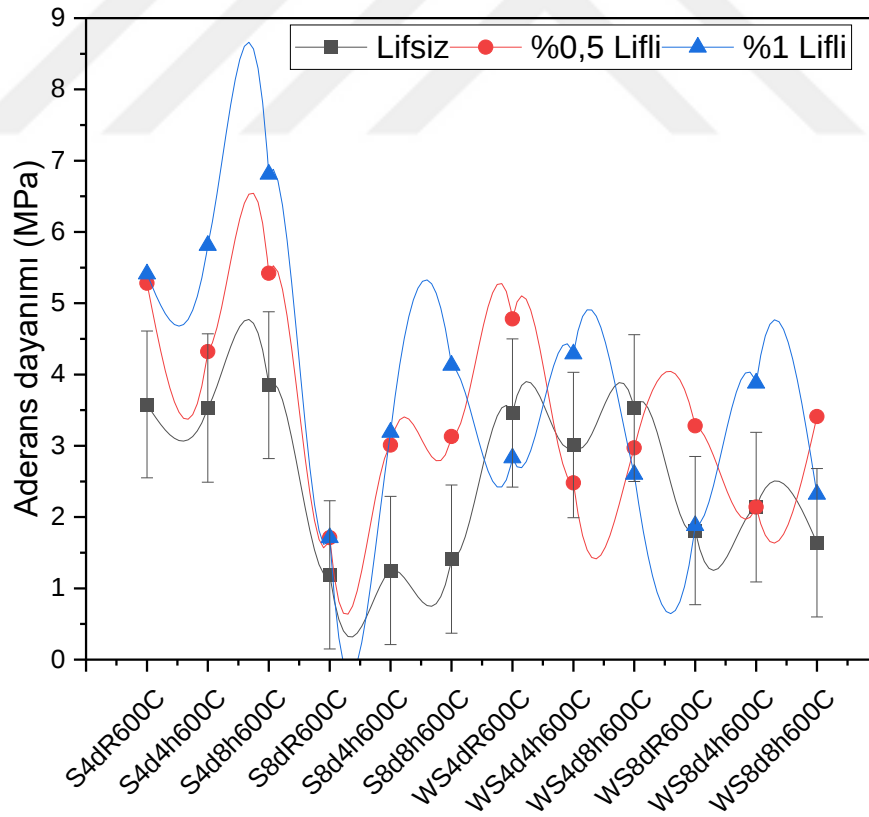
Şekil 68. 20 °C' de bekletilen numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisi



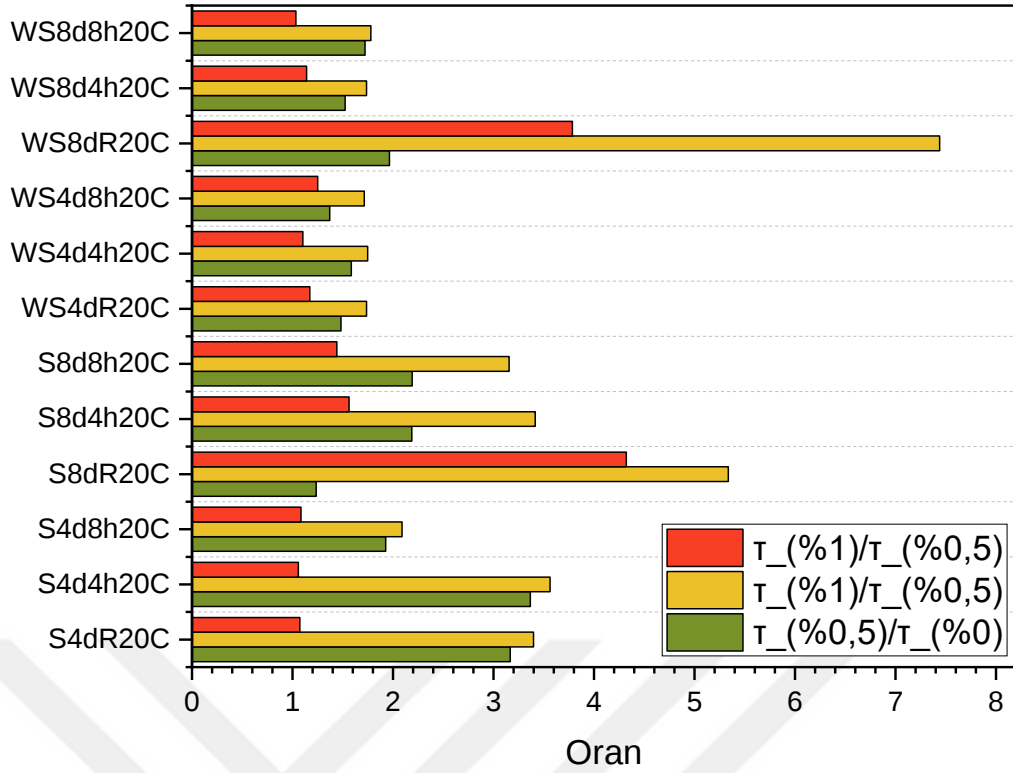
Şekil 69. 150 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisi



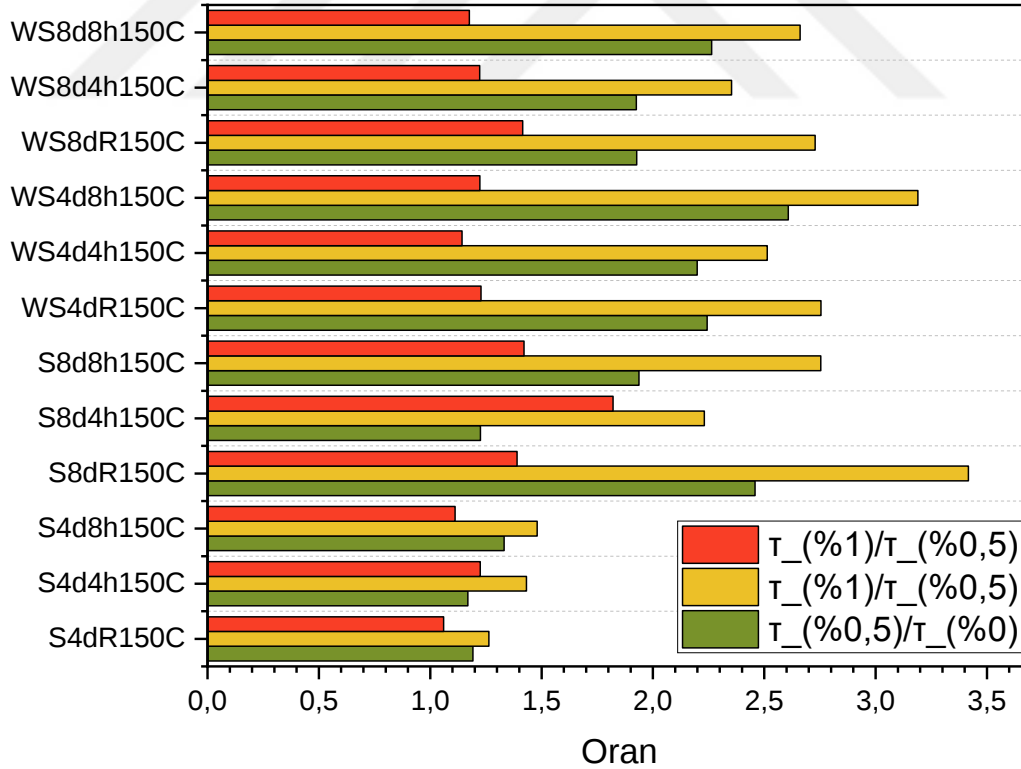
Şekil 70. 300 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisi



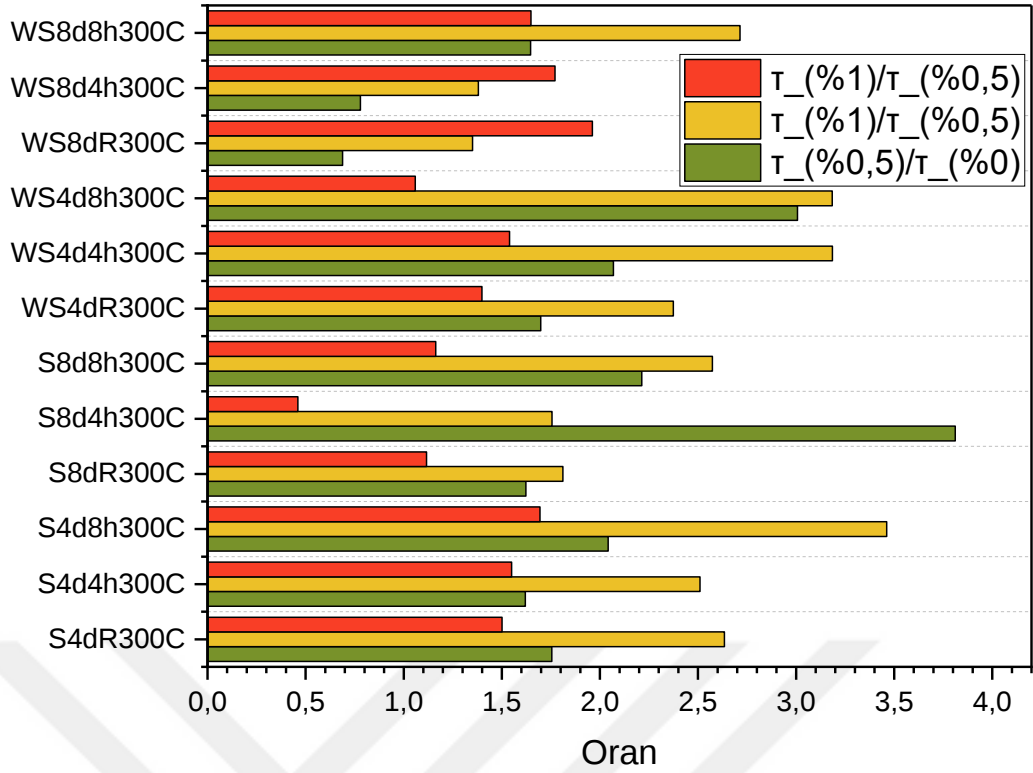
Şekil 71. 600 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisi



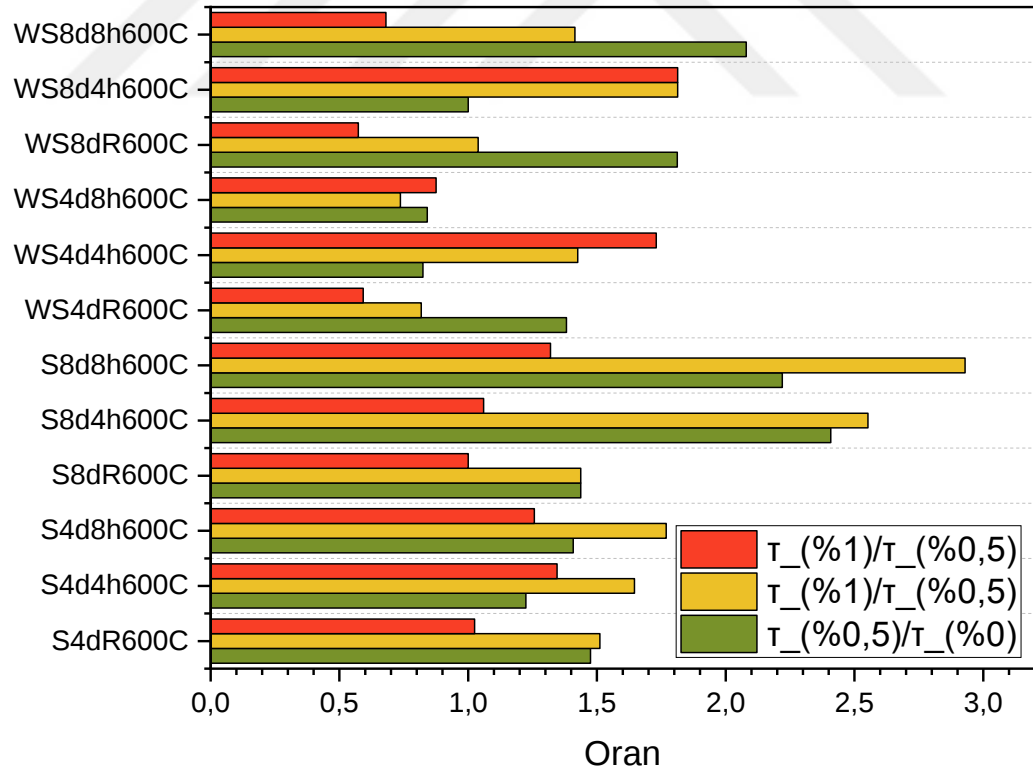
Şekil 72. 20 °C' de bekletilen numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisinin karşılaştırması



Şekil 73. 150 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması



Şekil 74. 300 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması



Şekil 75. 600 °C' de sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin aderans dayanımına etkisinin karşılaştırılması

Lif takviyesinin aderans dayanımını arttırmasının birkaç nedeni olabilmektedir. Bunlardan birincisi aderans deneyi sırasında oluşan asal çekme gerilmeleri bilindiği üzere beton çekme gerilmelerini aşması durumunda çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar ilerlemektedir. Lif takviyesi durumunda ise lifler betonun çekme gerilmesi dayanımını arttırmakta ve oluşan asal çekme gerilmelerinin karşılanmasında beton fazına yardımcı olmaktadır. Ardından lifler beton fazında oluşan gerilmeleri köprüleme etkisi göstererek gerilmelerin daha sağlam bölgelere transferini kolaylaştırmışlardır. Bu da çatlak dağılımı üzerinde pozitif yönde etki etmiş olup aderans dayanımı üzerinde de olumlu bir etkiye neden olmuştur. Bir diğer neden ise termal sıcaklık gerilmelerine maruz kalan numunelerde bu termal gerilmelerin neden olabileceği mikro çatlakların yayılmasına lifler engel olarak aderans dayanımının artmasına neden olmuştur.

Ulaşılan literatürde gerek geopolimer beton gerekse de geleneksel betonda lif takviyesi aderans dayanımı ilişkisi farklı lif türleri kullanılarak ele alınmıştır. Fakat literatürde geopolimer betonda mikro sentetik lif kullanılmasının aderans dayanımı üzerindeki etkisine ilişkin bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Burada farklı lif türlerinin kullanıldığı çalışmalarda lif takviyesi aderans dayanımı ilişkisi ele alınmıştır. Kefiyalew and Jaya (2021) alkali ile aktive edilmiş uçucu küllü betonda hacimce %0, 50,2, %0,4, %0,6 ve %0,8 oranında PVA lif kullanmışlardır. Çalışma sonucunda %0,6 oranında PVA lif kullanılmasının aderans dayanımı üzerinde daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca PVA lif kullanılmasının aderans dayanımını yaklaşık olarak %26 oranında arttırdığını belirtmişlerdir. Prasad *et al.* (2023) geopolimer betonda çelik, bazalt ve polipropilen lifleri tek tek ve hibrid şekilde kullanarak aderans dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çelik lif kullanılan numunelerde aderans dayanımı açısından daha yüksek sonuç aldıklarını belirtmişlerdir. Farhan *et al.* (2018) de korozyona uğratılan numunelerde çelik lif kullanımının aderans dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda geopolimer karışımında çelik lif kullanılmasının aderans dayanımını iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Göçme Modları

Şekil 76' da numunelerin aderans deneylerinden sonraki görüntüleri sunulmuştur. Öncelikle lifsiz numuneler arasında kıyaslama yapıldığında, ortam kürü uygulanan numunelerde etriye kullanılmadığı durumda numunelerde betonda parçalanmalar gözlemlenmiştir. Özellikle 4d aderans boyu uygulanan numunelerde betondaki parçalanmalar oldukça fazladır. F0WS4dR20C ve F0WS8dR20C numuneleri aderans deneyinden sonra oldukça fazla şekilde zarar görmüştür. Bu numunelerin betonları dağılmıştır. Ortam küründe bekletilen numunelerde etriye kullanılması da betondaki yüksek düzeyde beton

parçalanmalarının önüne geçememiştir. Ortam küründe bekletilen lifsiz numunelerde lif hacminin 0,5' e arttırılması göçme modu üzerinde önemli bir etkiye neden olmuştur. 0,5 oranında lif kullanılan ve etriyeli numunelerde betonların parçalanması önlenmiştir. Bu numuneler arasında kesme çatlakları gözlemlenmiştir. 0,5 hacimli ve etriyesiz numunelerde ise çatlak genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. %1 lif hacimli numunelerde de betondaki parçalanmalar gözlemlenmemiştir. Bu numuneler arasında da etriye kullanılması çatlak genişliğini arttırmıştır.

150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde, lif kullanılmayan numuneler arasında betondaki parçalanmaların FS8d4h150C numunesi hariç gözlemlenmemiştir. Bu numuneler arasında çatlak genişliği artmasına rağmen beton parçalanmaları ortam kürü uygulanan numunelere göre azalmıştır. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etriye kullanılmaması betondaki parçalanmalara neden olmuştur. Özellikle F0WS4dR150C, F0WS4d4h150C ve F0WS4d8h150C numuneleri aderans deneyinden sonra betonları parçalanmıştır. Lif hacminin %0,5' e arttırılması ise betondaki parçalanmaların önüne geçmiştir. %0,5 hacimli ve etriyeli numuneler arasında aderans boyunun arttırılması da çatlak dağılımının azalmasına neden olmuştur. 150 °C sıcaklığa maruz kalan %0,5 lifli ve etriyesiz numuneler arasında da aderans boyunun arttırılması çatlak dağılımını ve çatlak genişliğini azaltmıştır. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde %1 oranında lif kullanılması da çatlak genişliğinin azalmasına neden olmuştur. %1 hacimli ve etriye kullanılmayan numunelerde ise çatlak genişliği artmıştır. 300 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde de benzer durum gözlemlenmiştir. Bu numuneler arasında da lif hacminin ve aderans boyunun arttırılması çatlak genişliğini azaltmıştır.

600 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ortam kürü uygulanan ve etriyeli numunelerde aderans boyunun arttırılması ile betonda parçalanmalar gözlemlenmiştir. Bu numuneler arasında lif hacminin arttırılması ile çatlak genişliği azalmıştır. Fakat 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin %1' e arttırılması durumunda betonda dökülmeler gözlemlenmiştir.



F0S4dR20C



F0S4d4h20C



F0S4d8h20C



F0S8dR20C



F0S8d4h20C



F0S8d8h20C



F0WS4d4h20C



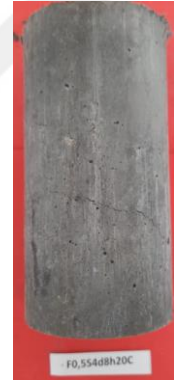
F0WS8d8h20C



F0,5S4dR20C



F0,5S4d4h20C



F0,5S4d8h20C



F0,5S8d4h20C



F0,5S8d8h20C



F0,5WS4d4h20C



F0,5WS8dR20C



F0,5WS8d4h20C

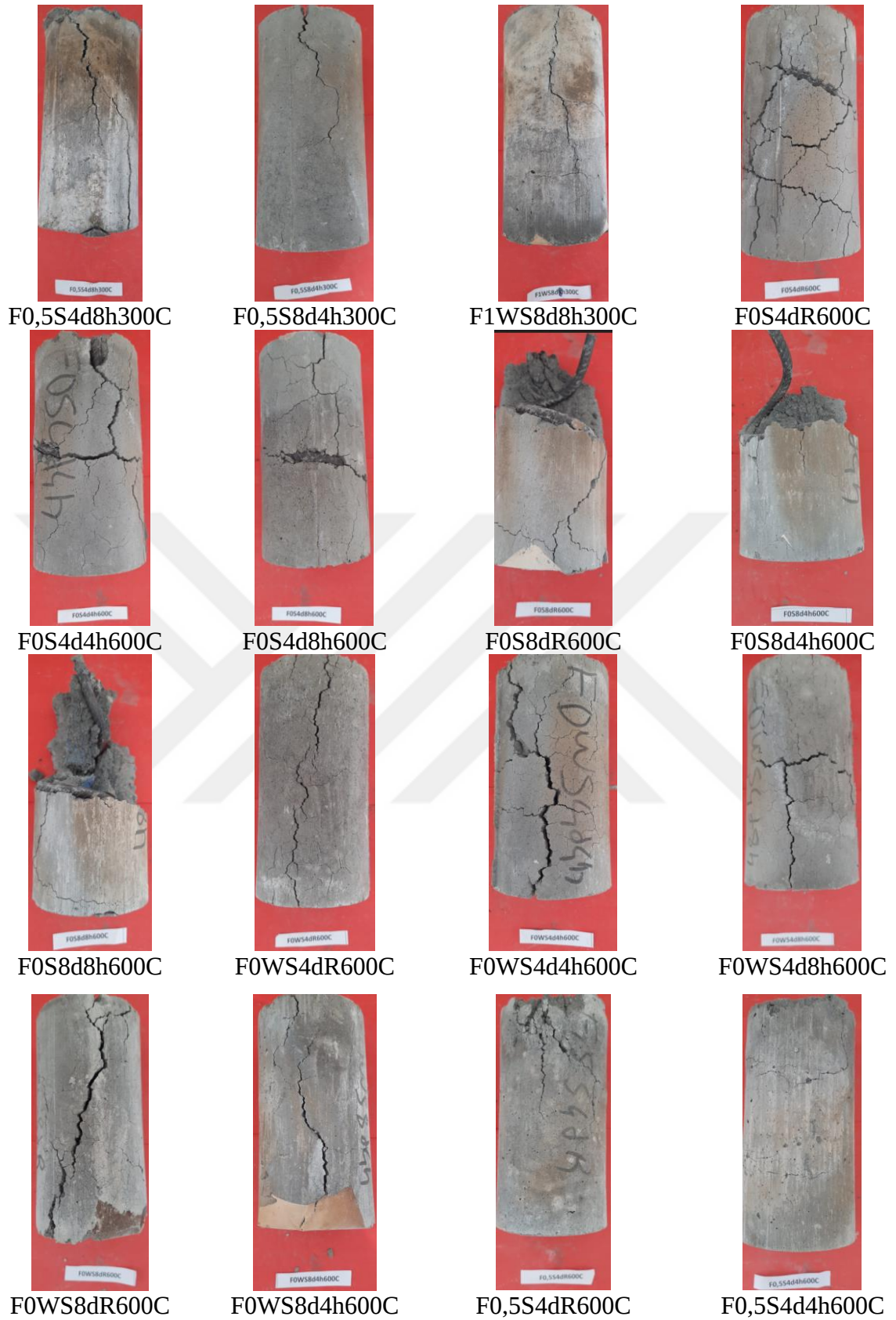
Şekil 76. Aderans deneylerinden sonra numunelerin görüntüsü



Şekil 76. Aderans deneylerinden sonra numunelerin görüntüsü (devamı)



Şekil 76. Aderans deneylerinden sonra numunelerin görüntüsü (devamı)



Şekil 76. Aderans deneylerinden sonra numunelerin görüntüsü (devamı)



Şekil 76. Aderans deneylerinden sonra numunelerin görüntüsü (devamı)



F1WS8dR600C



F1WS8d4h600C



F1WS8d8h600C

Şekil 77. Aderans deneylerinden sonra numunelerin görüntüsü

SONUÇ VE ÖNERİLER

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 miktarını 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. Sunulan bu tez çalışması kapsamında da daha çevreci (daha az CO_2 salınımı), yüksek işlenebilirlik kabiliyeti, daha yüksek durabilite kabiliyeti (sülfat, asit ve yüksek sıcaklığa vb. karşı direnç) gibi avantajlarından dolayı geopolimer betonun uygulaması üzerinde durulmuştur. Bu tezin amacı, yüksek sıcaklığa maruz kalan lifsiz ve mikro sentetik lifli geopolimer betonun aderans dayanımının farklı parametreler ile deneysel olarak araştırılmasıdır. Çalışmanın ana parametreleri; lif hacmi (%0, %0,5 ve %1), aderans boyu (4d ve 8d; d, donatı çapı olmak üzere), etriye varlığı, kür koşulları ve yüksek sıcaklığın (150°C , 300°C ve 600°C) aderans dayanımına etkisinin araştırılmasıdır. Çalışma sonucunda özetle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- i. Geopolimer beton karışımlarına lif eklenmesi ve lif hacminin %0,5' den %1' e arttırılması 7 günlük basınç dayanımlarını arttırmıştır. Karışımlarda lif kullanılması %9 ile %20 arasında basınç dayanımını arttırmıştır. Numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılmasının da basınç dayanımında önemli bir etkisi olmuştur. Özellikle 300°C ve 600°C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde basınç dayanımında azalmalar meydana gelmiştir. 300°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ortalama %80 seviyelerinde dayanım azalması olmakla birlikte 600°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde dayanım kaybı %94' e kadar çıkmaktadır. Bununla birlikte numunelerin ortam kürü yerine sıcaklık kürüne maruz bırakılması basınç dayanımını arttırmıştır. Sıcaklık kürünün de 4 saatten 8 saate çıkarılması da basınç dayanımını arttırmıştır.
- ii. Mikro sentetik lif kullanılmasının yüksek sıcaklık-aderans dayanımı ilişkisi üzerinde de önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bu etkinin özellikle 20°C oda sıcaklığında bekletilen numuneler ile 300°C ve 600°C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında olduğu belirlenmiştir. 300°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif kullanılmasının aderans dayanımı üzerinde olumlu bir etkisinin olmasına karşın 600°C sıcaklığa maruz numunelerde olumsuz bir etkiye neden olmuştur. %0,5 lifli numunelerde 20°C oda sıcaklığında bekletilen numunelerde 300°C sıcaklığa maruz

kalan numunelere göre maksimum 3,63 kat kadar aderans dayanım azalması olmasına karşın %1 lif hacimli numunelerde bu oran 2,34 kata kadar azalmaktadır. Lifsiz numunelerde 20 °C oda sıcaklığında bekletilen numunelerin 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelere göre ortalama 1,85 kat azalma meydana gelmiştir. %0,5 ve %1 lifli numunelerde ise 20 °C oda sıcaklığında bekletilen ve 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise dayanım azalması sırasıyla ortalama olarak 2,75 ve 3,25 kat azalmıştır.

- iii. Lifsiz numuneler arasında sıcaklık kürü ve sıcaklık süresinin aderans dayanımı üzerinde etkisinin olduğu görülmüştür. Lifsiz numunelerde ortam kürüne göre 4 saat 80 °C sıcaklık kürü uygulanması aderans dayanımını arttırmıştır. Benzer şekilde sıcaklık kür süresinin de 4 saatten 8 saate çıkarılması aderans dayanımını arttırmıştır. Fakat bu artışlar numunelerin yüksek sıcaklığa maruz kalma durumuna göre değişmektedir. Numunelerin maruz kaldığı sıcaklık değerinin artması durumunda kür sıcaklığı ve kür süresinin aderans dayanımı üzerindeki arttırıcı etkisi azalmıştır. Numunelerde lif kullanılması durumunda ise kür sıcaklığı ve kür süresinin aderans dayanımı üzerindeki etkisi değişmektedir. Karışımda %0,5 lif kullanılan numuneler arasında kür sıcaklığı uygulanmasını ve sıcaklık kürünün süresinin arttırılması lifsiz numuneler göre aderans dayanımını daha fazla arttırmıştır. Karışımındaki lif oranının artması sıcaklık kürü ve sıcaklık kür süresinin etkisini arttırmıştır. %1 lifli numuneler arasında ortalama kürü yerine 4 ve 8 saatlik sıcaklık kürü uygulanması aderans dayanımını %0,5 ve lifsiz numunelere göre daha fazla arttırmıştır. Benzer şekilde sıcaklık kür süresinin de %1 lifli numunelerde 4 saatten 8 saate çıkarılması ortalama aderans dayanımını diğer karışımlara göre daha fazla arttırmıştır.
- iv. Çalışma sonucunda aderans boyunun aderans dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu belirtilmiştir. Aderans boyunun, d donatı çapını göstermek üzere 4d' den 8d' ye arttırılması aderans dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. Aderans boyundaki değişimin aderans dayanımı üzerindeki etkisi lif hacmi ve maruz kalınan yüksek sıcaklık etkisi ile değişmiştir. Lifsiz numunelerde 20 °C' de bekletilen, 150 °C, 300 °C ve 600 °C yüksek sıcaklığa maruz kalınması durumunda aderans boyunun 4d' den 8d' ye arttırılması aderans dayanımı ortalama olarak sırasıyla 5,43, 4,52, 2,84 ve 2,35 kat azalmıştır. %0,5 lifli numunelerde ise 20 °C' de bekletilen, 150 °C, 300 °C ve 600 °C yüksek sıcaklığa maruz kalınması durumunda aderans boyunun artması aderans dayanımı ortalama olarak sırasıyla 6,08, 3,85, 3,61 ve 1,62 kat azalmıştır. Benzer şekilde %1 lifli numunelerde de aderans boyunun artması aderans dayanımını 20 °C'

de bekletilen, 150 °C, 300 °C ve 600 °C yüksek sıcaklığa maruz kalınması durumunda aderans dayanımı ortalama olarak sırasıyla 3,22, 3,26, 4,27 ve 1,73 kat azaltmıştır.

- v. Etriye kullanımının aderans dayanımı üzerindeki etkisi genel olarak olumlu yönde olmuştur. Etriye kullanımının aderans dayanımı üzerindeki etkisi lif hacmi ve numunelerin maruz kaldıkları sıcaklık değerlerine göre farklılık göstermiştir. lifsiz numuneler arasında 20 °C’ de bekletilen numuneler arasında etriye kullanılmasının önemli bir etkisini olmadığı fakat 150 °C ve 300 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ise etriye kullanılması aderans dayanımını ortalama olarak sırasıyla 1,79 ve 1,31 kat arttırmıştır. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ise etriye kullanılması aderans dayanımını ortalama olarak 1,18 kat arttırmıştır. Maruz kalınan yüksek sıcaklık değerinin artması yani 300 °C sıcaklığa maruz kalınması durumunda etriye kullanımı aderans dayanımını ortalama 1,87 kat arttırmıştır. %1 lifli numunelerde de etriye kullanılması aderans dayanımını çoğunlukla arttırmıştır. 20 °C’ de bekletilen numunelerde etriye kullanılması aderans dayanımını ortalama olarak 1,16 kat arttırmıştır. 150 °C ve 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etriye kullanılması aderans dayanımını ortalama olarak sırasıyla 1,27 ve 1,37 kat arttırmıştır.
- vi. Geopolimer betonda mikro sentetik lif kullanılması aderans dayanımını arttırmıştır. Fakat bu artış numunelerde etriye kullanılması durumu ve numunelerin maruz kaldıkları sıcaklık değerine göre farklılık göstermiştir. 20 °C’ de bekletilen numuneler arasında lif hacminin %0’ dan %0,5’ e artırılması, %0,5’ den %1’ e arttırılmasından daha fazla etkili olmuştur. 150 °C ve 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde de lif oranının %0,5’ den %1’ e arttırılması aderans dayanımını 2,19 kata kadar arttırmıştır. 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde de lif oranının %0’ den %0,5’ e artırılması, %0,5’ den %1’ e arttırılması durumuna göre aderans dayanımı üzerinde daha fazla etkili olmuştur.
- vii. Yüksek sıcaklık değerlerine maruz bırakılan geopolimer betonların aderans dayanımları üzerinde yürütülecek çalışmalarda önemli parametrelerden bir tanesi de soğutma yöntemidir. Yüksek sıcaklıktan sonra farklı soğutma yöntemlerinin aderans dayanımı üzerindeki etkisi de gelecekteki çalışmalarda ele alınabilir.
- viii. Özellikle aderans dayanımı üzerinde yürütülecek gelecekteki çalışmalarda sargılama etkisi üzerinde durulabilir. Aderans deneylerinde sargılama etkisi durabilite açısından ele alınabilir.

Ortam kürü uygulanan numuneler arasında lif kullanımının göçme modları üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ortam kürü uygulanan numunelerde lif hacminin arttırılması ise çatlak dağılımını etkilemiştir. Lif hacminin artması betondaki parçalanmaların azalmasına neden

olmuştur. Ortam kürü uygulanan numunelerde de aderans boyunun artması çatlak genişliğinin azalmasına neden olmuştur. 150 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında da lif hacminin artması çatlak dağılımı ve çatlak genişliğinin azalmasına neden olmuştur. Benzer şekilde 150 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etriye kullanılması ve aderans boyunun azaltılması çatlak genişliğini azaltmıştır. 600 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında ortam kürü uygulanan ve etriyeli numunelerde aderans boyunun arttırılması ile betonda parçalanmalar gözlemlenmiştir. Bu numuneler arasında lif hacminin arttırılması ile çatlak genişliği azalmıştır. Fakat 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde lif hacminin %1' e arttırılması durumunda betonda dökülmeler gözlemlenmiştir.



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.
- Al-Azzawi, M., Yu, T. and Hadi, M. N., 2018. Factors affecting the bond strength between the fly ash-based geopolymer concrete and steel reinforcement. Structures, 14, 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.03.010>
- Albitar, M., Visintin, P., Mohamed Ali, M. S. and Drechsler, M., 2015. Assessing behaviour of fresh and hardened geopolymer concrete mixed with class-F fly ash. KSCE Journal of Civil Engineering, 19, 1445-1455. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-1254-z>
- Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M. S., Rashad, A. and Khalaf, M. A., 2023. Realistic evaluation of reinforcement bond strength in alkali-activated slag concrete exposed to elevated temperature. International Journal of Concrete Structures and Materials, 17(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00596-2>
- Amran, M., Fediuk, R., Abdelgader, H. S., Murali, G., Ozbakkaloglu, T., Lee, Y. H. and Lee, Y. Y., 2022. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review. Journal of Building Engineering, 45, 103638. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103638>
- Anonim a., 2024. <https://www.history.com/topics/ancient-greece/pantheon>, Son erişim tarihi: 23.05.2024
- Anonim b., 2024. <https://www.yollardan.com/galleries/roma-kolezyum-fotograflari/>, Son erişim tarihi: 23.05.2024
- Anonymous c., 2024. Climate Change 2021 The Physical Science Basis
- Anonim d., 2024. <https://www.turkcimento.org.tr/>, Son erişim tarihi: 20.05.2024
- Anonim e., 2024. https://www.turkcimento.org.tr/tr/uye_fabrikalar, Son erişim tarihi: 20.05.202
- Arrhenius, S., 1896. XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(251), 237-276. <https://doi.org/10.1080/14786449608620846>
- 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. ASTM C900-15., 2015. Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Ba, G., Weng, X., Liu, C. and 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>
- Babalola, O. E., Awoyera, P. O., Le, D. H. and Romero, L. B., 2021. A review of residual strength properties of normal and high strength concrete exposed to elevated temperatures: Impact of materials modification on behaviour of concrete composite. Construction and Building Materials, 296, 123448. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123448>
- Bandelt, M. J. and Billington, S. L., 2016. Bond behavior of steel reinforcement in high-performance fiber-reinforced cementitious composite flexural members. Materials and Structures, 49, 71-86. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0475-4>

- Bayrak, B., Çelebi, O., Öz, A., Ustaş, İ., Kaplan, G. and Aydın, A. C., 2023a. 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133596>
- Bayrak, B., Benli, A., Alcan, H. G., Çelebi, O., Kaplan, G. and Aydın, A. C., 2023b. 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., Kaplan, G., Öz, A., Kavaz, E., Çelebi, O., Alcan, H. G., Mehrzad, M. and Aydın, A. C., 2023c. Metakaolin-based geopolymer concretes for nuclear protection: On the perspective of physicochemical, durability, and microstructure. *Structural Concrete*, 24(5), 6644-6671. <https://doi.org/10.1002/suco.202200839>
- Behnood, A. and 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(2), 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.003>
- Castel, A. and Foster, S. J., 2015. Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 72, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.016>
- Celep, Z., 2011. Betonarme Yapılar. Beta Dağıtım. 865 s, İstanbul.
- Dahou, Z., Castel, A. and Noushini, A., 2016. Prediction of the steel-concrete bond strength from the compressive strength of Portland cement and geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 119, 329-342. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.002>
- Dalğıç, A. and Yılmaz P. B., 2024. The behavior of ceramic fiber geopolymer concrete under the effect of high temperature. *Applied Sciences*, 14(4), 1607. <https://doi.org/10.3390/app14041607>
- Davidovits, J., Huaman, L. and Davidovits, R., 2019. Ancient geopolymer in south-American monument. SEM and petrographic evidence. *Materials Letters*, 235, 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.033>
- Doğangün, A., 2021. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı. Birsan Yayın Dağıtım Ltd. Şti., 768 s, İstanbul.
- Ergün, A., Kürklü, G. and 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., and Özbay, E., 2019. Betonarme Özel Konular. Evrim Yayınevi ve Bilgisayar San. Tic. Ltd. Şti., 315 s, İstanbul.
- Humur, G. and Çevik, A., 2022. Mechanical characterization of lightweight engineered geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Ceramics International*, 48(10), 13634-13650. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.243>
- Farhan, N. A., Sheikh, M. N. and Hadi, M. N., 2018. Experimental investigation on the effect of corrosion on the bond between reinforcing steel bars and fibre reinforced geopolymer concrete. *Structures*, 14, 251-261. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.03.013>

- Izquierdo, M., Querol, X., Davidovits, J., Antenucci, D., Nugteren, H. and Fernández-Pereira, C., 2009. Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching. *Journal of Hazardous Materials*, 166(1), 561-566. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.063>
- Kaplan, G., Öz, A., Bayrak, B. and Aydın, A. C., 2023. The effect of geopolymer slurries with clinker aggregates and marble waste powder on embodied energy and high-temperature resistance in prepacked concrete: ANFIS-based prediction model. *Journal of Building Engineering*, 67, 105987. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105987>
- Kaplan, G., Öz, A., Bayrak, B., Alcan, H. G., Çelebi, O. and Aydın, A. C., 2022. Effect of quartz powder on mid-strength fly ash geopolymers at short curing time and low curing temperature. *Construction and Building Materials*, 329, 127153. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127153>
- Karimipour, A. and de Brito, J., 2021. Influence of polypropylene fibres and silica fume on the mechanical and fracture properties of ultra-high-performance geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 283, 122753. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122753>
- Kefiyalew, Z. and Jaya, E. J., 2021. Bond strength in PVA fibre reinforced fly ash-based geopolymer concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 1(101), 10105.
- Kong, D. L., Sanjayan, J. G. and Sagoe-Crentsil, K., 2007. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1583-1589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.021>
- Kong, D. L. and Sanjayan, J. G., 2008. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 986-991. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.08.001>
- Law, D. W., Tang, D., Molyneaux, T. K. And Gravina, R., 2011. Impact of crack width on bond: confined and unconfined rebar. *Materials and Structures*, 44, 1287-1296. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9700-y>
- Liu, Y., Zhang, Z., Shi, C., Zhu, D., Li, N. and Deng, Y., 2020. Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): Influence of steel fiber on mechanical properties. *Cement and Concrete Composites*, 112, 103670. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103670>
- Liu, K., Zou, C., Yan, J. and Shan, X., 2021. Bond behavior of deformed steel bars in self-compacting concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(14), 1518-1533. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1851937>
- Masi, G., Rickard, W. D., Bignozzi, M. C. and Van Riessen, A., 2015. The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers. *Composites Part B: Engineering*, 76, 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.02.023>
- Mathew, G., 2021. Bond-slip behavior of geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 15(4).
- Mawlood, B. O., Mohammad, A. H. and Bzeni, D. K., 2022. Bond strength of deformed steel bars embedded in geopolymer concrete. *Advances in Concrete Construction*, 14(5), 331. <https://doi.org/10.12989/acc.2022.14.5.331>
- Methacanon, P., Weerawatsophon, U., Sumransin, N., Prahsarn, C. and Bergado, D. T., 2010. Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life

- geotextiles. Carbohydrate Polymers, 82(4), 1090-1096. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.06.036>
- Mo, K. H., Yeap, K. W., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z. and Bashar, I. I., 2018. Bond strength evaluation of palm oil fuel ash-based geopolymer normal weight and lightweight concretes with steel reinforcement. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(1), 19-35. <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1336195>
- Nath, P. and Sarker, P. K., 2014. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building materials*, 66, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- Öz, A., Bayrak, B., Kavaz, E., Kaplan, G., Çelebi, O., Alcan, H. G. and Aydın, A. C., 2022. The radiation shielding and microstructure properties of quartzic and metakaolin based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 342, 127923. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127923>
- Öz, A., Kara, İ. B., Bayrak, B., Kavaz, E., Kaplan, G. and Aydın, A. C., 2023. Characterization study of geopolymer concretes fabricated with clinker aggregates. *Construction and Building Materials*, 384, 131461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131461>
- Pandurangan, K., Kothandaraman, S. and Sreedaran, D., 2010. A study on the bond strength of tension lap splices in self compacting concrete. *Materials and Structures*, 43, 1113-1121. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9570-3>
- Pandurangan, K., Thennavan, M. and Muthadhi, A., 2018. Studies on effect of source of flyash on the bond strength of geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12725-12733. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.256>
- Peng, K. D., Zeng, J. J., Huang, B. T., Huang, J. Q., Zhuge, Y. and Dai, J. G., 2022. Bond performance of FRP bars in plain and fiber-reinforced geopolymer under pull-out loading. *Journal of Building Engineering*, 57, 104893. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104893>
- Pop, I., De Schutter, G., Desnerck, P. and Onet, T., 2013. Bond between powder type self-compacting concrete and steel reinforcement. *Construction and Building Materials*, 41, 824-833. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.029>
- Prasad, B. V., Anand, N., Kanagaraj, B., Kiran, T., Naser, M. Z., Arumairaj, P. D. And 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>
- Ranjbar, N., Talebian, S., Mehrli, M., Kuenzel, C., Metselaar, H. S. C. and Jumaat, M. Z., 2016. Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Composites Science and Technology*, 122, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.11.009>
- Sajjad, U., Sheikh, M. N. and Hadi, M. N., 2023. Improvement in bond strength of steel bar in geopolymer concrete by adding graphene nanoplatelets. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(6), 04023115. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-14093>
- 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>
- Seco, A., Ramirez, F., Miqueleiz, L., Urmeneta, P., García, B., Prieto, E. and Oroz, V., 2012. Types of waste for the production of pozzolanic materials—a review. *Environmental Science, Materials Science, Engineering*, 141-150.

- Seshu, D. R., 2018. A comparative study on bond strength of normal and geopolymer concrete to steel bar. *Cement Wapno Beton* 23(2) 89-97.
- Tanyildizi, H. and Yonar, Y., 2016. Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 126, 381-387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.001>
- TS EN 197-1., 2012. Genel Çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012
- TS EN12390-3., 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin. Türk Standart Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Yang, H., Lan, W., Qin, Y. and Wang, J., 2016. Evaluation of bond performance between deformed bars and recycled aggregate concrete after high temperatures exposure. *Construction and Building Materials*, 112, 885-891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.220>
- Zhao, Y., Lin, H., Wu, K. and Jin, W., 2013. Bond behaviour of normal/recycled concrete and corroded steel bars. *Construction and building materials*, 48, 348-359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.091>
- Zhao, J., Trindade, A. C. C., Liebscher, M., de Andrade Silva, F. and Mechtcherine, V., 2022. A review of the role of elevated temperatures on the mechanical properties of fiber-reinforced geopolymer (FRG) composites. *Cement and Concrete Composites*, 104885. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104885>
- Zhao, J., Wang, S., Wang, Z., Wang, K. and Fu, C., 2023. Bond performance between FRP bars and geopolymer concrete after elevated temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 384, 131476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131476>
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Qi, S. L., Cao, L. and 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. and 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>
- Zhang, J., Peng, J., Tao, X., Zhao, D. and Cao, W., 2023. Bond behavior between recycled concrete and corroded ultrahigh-strength steel bars. *International Journal of Civil Engineering*, 21(7), 1195-1217. <https://doi.org/10.1007/s40999-023-00822-8>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Kaan KOÇ
Doğum Tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
Email:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek Lisans:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Eserler	