

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GFRP DONATILARIN BETON İLE ADERANSINA DONATI
YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE SICAKLIK ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Oğuzhan ÇAKIROĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK

Nisan 2023

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GFRP DONATILARIN BETON İLE ADERANSINA DONATI
YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE SICAKLIK ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Oğuzhan ÇAKIROĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 28/04/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Doç. Dr. Ferhat AYDIN	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

M. Oğuzhan ÇAKIROĞLU

28/04/2023

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Metin İPEK'e teşekkür ederim.

Malzeme laboratuvarında gerçekleştirdiğim deneylerin hazırlanmasında emeği bulunan teknikerlerimiz Sami GÜRSES ve Şenol DAĞLI 'ya teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimim boyunca izin alma konusunda yardımlarını esirgemeyen çalıştığım iş yerim Aladağ Yapı Denetim Ltd. Şti. ailesine teşekkür ederim.

Tüm hayatımda olduğu gibi yüksek lisans eğitimim boyunca da beni yalnız bırakmayan maddi ve manevi yanımda olan bana inanan, güvenen dualarını eksik etmeyen aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Eğitim süreci boyunca bir an olsun yanımdan ayrılmayan, elinden gelen bütün yardımı sağlayan hayat arkadaşım Mimar Elif E. KARAKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 091-2022) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	v
TABLOLAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Yöntemi	2
1.2. Literatür Araştırması	3
1.3. Hipotez	9

BÖLÜM 2.

FRP DONATILAR VE KULLANIM ALANLARI	11
2.1. FRP Kompozitler.....	11
2.2. FRP Donatıların Kullanım Alanları	13
2.2.1. Polimer matrisler.....	17
2.2.1.1. Epoksiler	17
2.2.1.2. Polyesterler.....	17
2.2.2. Lifler.....	18
2.3. Pultrüzyon Yöntemi	19
2.4. Yapı Malzemelerinde Sıcaklık Etkisi.....	21
2.4.1. FRP donatı üzerinde ısının dağılımı.....	23

BÖLÜM 3.

MALZEME, YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMA.....	26
3.1. Malzemeler.....	26
3.1.1. GFRP donatı.....	26
3.1.2. Beton	29
3.1.2.1. Çimento.....	30
3.1.2.2. Agregalar.....	30

3.1.2.3. Süper akışkanlaştırıcı	31
3.1.2.4. Basınç küp numuneleri test sonuçları	31
3.1.3. Isıl malzemeler	33
3.2. Deney Yöntemi	34
3.3. Deneysel Çalışma	37
3.3.1. Deney Parametreleri	37
3.3.2. Deney numunelerinin üretimi	38
3.3.2.1. Deney numune kalıpları	38
3.3.2.2. Beton yüzeyinde bırakılacak pas payının ayarlama	39
3.3.2.3. Kenetlenme boyunu ayarlama	40
3.3.2.4. GFRP donatıların yerleştirilmesi ve beton dökümü	41
3.3.2.5. Numuneleri istenilen sıcaklık değerine ulaştırma	45
3.3.2.6. GFRP donatıları başlıklandırma	49
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	53
4.1. Nervürlü GFRP donatıların sıcaklık altındaki davranışları	55
4.2. Kumlu GFRP donatıların sıcaklık altındaki davranışları	57
4.3. GFRP Donatı Yüzey Özelliklerinin Sıyrılmaya Ve Aderansa Etkisi	58
4.4. GFRP Donatı Çapının Aderansa Etkisi	60
4.5. Beton Dayanımının Aderansa Etkisi	61
4.6. Sıcaklığın Aderansa Etkisi	63
4.7. Numunelerde Gerçekleşen Deformasyonlar	65
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	72
EKLER	77

KISALTMALAR

AFRP : Aramid Fiber Takviyeli Polimer

BFRP : Bazalt Fiber Takviyeli Polimer

GFRP : Cam Fiber Takviyeli Polimer

CTP : Cam Takviyeli Plastik

LVDT : Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler

FRP : Fiber Takviyeli Polimer

CFRP : Karbon Fiber Takviyeli Polimer

CSA : Kanada Standartlar Birliği

SİMGELER

τ	: Aderans dayanımı (N/mm ²)
ϵ	: Birim Şekil Değişirme(mm)
P	: Çekme kuvveti (N)
l	: Donatının gömülme derinliği (mm)
d	: Donatı çapı (mm)
d _b	: Donatı ile beton arasında kalan pas payı(mm)
l _b	: Donatının betona kenetlenme boyu(mm)
E	: Elastisite Modülü(N/mm ²)
T _g	: Geçiş sıcaklığı
σ	: Normal Gerilme(N/mm)
F	: Uygulanan kuvvet

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1: Çelik ile GFRP donatıların mekanik özellikleri karşılaştırılması (Acı 440.1R2006).....	16
Tablo 2.2: FRP malzeme üretiminde kullanılan termoset reçinelerin özellikleri.	18
Tablo 2.3: Yapılarda kullanılan malzemelerin kıyaslanması.....	20
Tablo 2.4: FRP malzemelerde kullanılan liflerin özellikleri.....	21
Tablo 3.1: FRP donatıların ağırlıkça lif oranları.....	27
Tablo 3.2: GFRP donatıların elastisite modülü.....	28
Tablo 3.3: Çimento kimyasal özellikleri.....	30
Tablo 3.5: C20 ve C40 1m ³ için beton karışım oranları.....	32
Tablo 3.6: C20 beton küp numunesi 28 günlük kırım sonuçları.....	32
Tablo 3.7: C40 beton küp numunesi 28 günlük kırım sonuçları.....	33
Tablo 3.8: Deneyde kullanılan Nervürlü ve Kumlu GFRP donatılara ait deney parametreleri.....	37
Tablo 4.1: Nervürlü GFRP donatıların aderans dayanımları.....	53
Tablo 4.2: Kumlu GFRP donatıların aderans dayanımları.....	54
Tablo 4.3: Maksimum yük altında kritik sıyrılma noktaları.....	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: Korozyona uğramış betonarme blok.....	1
Şekil 2.1: Çeşitli FRP ürünleri	11
Şekil 2.2: Anadol marka araç ve fiberglas malzemesi	13
Şekil 2.3: Korozyona uğramış bazı yapılar	14
Şekil 2.4: Beton dökülecek zeminin FRP donatı ile güçlendirme	14
Şekil 2.5: Köprü tabliyesinde FRP donatıların kullanımı	15
Şekil 2.6: FRP donatıların yapılarda kullanımı.....	16
Şekil 2.7. Liflerin gerilme-birim uzamaları	19
Şekil 2.8: Pultrüzyon aşamaları.....	19
Şekil 2.9: Liflerin reçine banyosu ve üretim bandı	20
Şekil 2.10: Yapıda çıkan yangın	21
Şekil 2.11: Yangın esnasında betonun durumu.....	23
Şekil 3.1: Deneylerde kullanılan kumlu ve nervürlü GFRP donatılar.	26
Şekil 3.2: Yanma sonucu elde edilen cam lifi.....	27
Şekil 3.3: GFRP donatıların çekme testi.	29
Şekil 3.4: Beton üretiminde kullanılan malzemeler (dere kumu ve mıcır).	30
Şekil 3.5: Süper beton akışkanlaştırıcı.	31
Şekil 3.6: Beton küp numunelerinin kırımı.....	32
Şekil 3.7: K tipi çift girişli prop ve K tipi yüzey ve hava termokulpu.....	33
Şekil 3.8: Folyo kaplı cam yünü boru ve folyo bant	34
Şekil 3.9: Pürmüz tabancası ve hortumu.....	34
Şekil 3.10: Numunelerin test hazır şeması ve üretilen makine aparatı.	35
Şekil 3.11: Numunelerin çekme test düzeneği.....	36
Şekil 3.12: Kalıpların ve donatı oturumları ve hazırlanan plywood kalıplar.	39
Şekil 3.13: Pas payını ayarlama kalıbı ve 35mm pas payı ayarlanmış numune.	40
Şekil 3.14: GFRP donatıların borular ile sarılıp kenetlenme yerlerinin belirlenmesi.40	
Şekil 3.15: Beton içerisinde kalacak olan kumlu GFRP donatıların kenetlenme boylarının ayarlanması.	41
Şekil 3.16: Beton mikseri ve slump deneyi.....	42
Şekil 3.17:Alınan örnek numunelerin yağlanması.	42
Şekil 3.18: Numunelerin 1. ve 2. tabakasının şişlenmesi.....	43
Şekil 3.19: Numunelerin titreşim sehpasında boşluk oranının düşürülmesi.	43
Şekil 3.20: Her çaptaki donatı için pas payı gösterimi ve şarjlı el vibratörü.	44
Şekil 3.21: Dökülen numunelerin kalıp içerisinden sökülmesi ve kür havuzunda bekletme.	45
Şekil 3.22: Numunenin folyolu bant ile sarılması ve propun yerleştirilmesi.....	46

Şekil 3.23: Prefabrik borunun donatı yüzeyine yerleştirilmesi.....	46
Şekil 3.24: Açıkta kalan donatının Prefabrik camyünü borular ile sarılması.	47
Şekil 3.25: Numunenin pürmüz yardımıyla istenilen sıcaklığa ulaştırılması.	48
Şekil 3.26: K tipi termokulpun beton içerisindeki konumu.	48
Şekil 3.27: Çekme deneyleri için hazırlanan çelik borular ve boru içine açılan dış..	50
Şekil 3.28: Çelik boru içerisine konulan epoksi bileşeni.	50
Şekil 3.29: Hazırlanan epoksinin sosis tabancası içerisine konulması.	51
Şekil 3.30: Epoksinin çelik borular içine doldurulması.	51
Şekil 3.31: Epoksi dolu boruların donatıya yerleştirilmesi.	52
Şekil 3.32: Epoksinin kurumması için numunelerin oda sıcaklığında bekletilmesi.	52
Şekil 4.1: C20 beton sınıfına sahip nervürlü GFRP donatıların sıcaklık altında grafik dağılımları.....	56
Şekil 4.2: C40 beton sınıfına sahip nervürlü GFRP donatıların sıcaklık altında grafik dağılımları.....	56
Şekil 4.3: C20 beton sınıfına sahip kumlu GFRP donatıların sıcaklık altında grafik dağılımları.....	57
Şekil 4.4: C40 beton sınıfına sahip kumlu GFRP donatıların sıcaklık altında grafik dağılımları.....	58
Şekil 4.5: GFRP donatıların yüzey özelliklerinin karşılaştırması.....	59
Şekil 4.6: GFRP donatıların çap artışının aderansa etkisi.....	60
Şekil 4.7: GFRP donatıların beton dayanımı artışının aderansa etkisi.....	62
Şekil 4.8: GFRP donatıların sıcaklık altında aderans dayanımı değerleri.	63
Şekil 4.9: Yüksek ısıya maruz numunelerin ön yüzeyindeki kılcal çatlaklıklar (<0,5mm).....	66
Şekil 4.10: Yüksek ısıya maruz numunelerin alt ve üst yüzeyindeki kılcal çatlaklıklar (<0,5mm).....	66
Şekil 4.11: Yüksek ve ani ısınmaya bağlı betonun kabuk atması.....	67
Şekil 4.12: Nervürlü GFRP donatıların sıcaklık altındaki deformasyonları.	67
Şekil 4.13: Kumlu GFRP donatıların sıcaklık altındaki deformasyonları.	68
Şekil 4.14: GFRP donatıların sıcaklık altında kararına yapması.	68
Şekil 4.15: Nervürlü GFRP donatının 22 °C ve 285 °C’de beton içinde davranışı. ..	69
Şekil 4.16: Kumlu GFRP donatının 22 °C ve 285 °C’de beton içinde davranışı.	69
Şekil A.1: 10mm nervürlü donatılar: (a) Ø10_N_t22_C20, (b) Ø10_N_t22_C40, (c) Ø10_N_t115_C20, (d) Ø10_N_t115_C40, (e) Ø10_N_t285_C20, (f) Ø10_N_t285_C40.....	78
Şekil B.1: 12mm nervürlü donatılar: (a) Ø12_N_t22_C20, (b) Ø12_N_t22_C40, (c) Ø12_N_t115_C20, (d) Ø12_N_t115_C40, (e) Ø12_N_t285_C20, (f) Ø12_N_t285_C40.....	79
Şekil C.1: 12mm kumlu donatılar: (a) Ø12_K_t22_C20, (b) Ø12_K_t22_C40, (c) Ø12_K_t115_C20, (d) Ø12_K_t115_C40, (e) Ø12_K_t285_C20, (f) Ø12_K_t285_C40.....	80
Şekil D.1: 16mm kumlu donatılar: (a) Ø16_K_t22_C20, (b) Ø16_K_t22_C40, (c) Ø16_K_t115_C20, (d) Ø16_K_t115_C40, (e) Ø16_K_t285_C20, (f) Ø16_K_t285_C40.....	81

GFRP DONATILARIN BETON İLE ADERANSINA DONATI YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE SICAKLIK ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Elyaf takviyeli polimer (FRP) donatıların yüksek çekme dayanımı, yüksek korozyon dayanımı, kimyasallara karşı dayanıklı olması, manyetik alan oluşturmaması vb. üstün özellikleri sayesinde betonda çelik donatıya alternatif olarak kullanımının yolları aranmaktadır. Çelik donatının betona aderansı donatı yüzeyinde üretim aşamasında oluşturulan nervür ve profiller sayesinde FRP donatıların betona aderansı üretim aşamasında donatı etrafına sarılan iplik ile oluşturulan nervürlüleme ve/veya donatı etrafına epoksili kum kaplama ile sağlanmaktadır. Ancak FRP ile beton arasındaki aderans nervürlüleme ve kumlanmanın niteliğine bağlı olarak değişmektedir. Beton ve FRP donatıların aderansı lifin türü, donatının yüzey özellikleri, donatının çapı, betonda gömülme boyu, pas payı, beton dayanımı, reçine türü, donatının eleman içindeki konumu, sıcaklığın etkisi ve çevre koşulları gibi değişkene bağlıdır. Bu tez çalışmasında nervürlü ve kumlu yüzeye sahip cam FRP (GFRP) donatıların betona aderansına sıcaklığın donatı çapı, donatı yüzey özelliği, beton dayanımı değişken parametreleri ile incelenmiştir. Çalışmada 10 mm ve 12 mm nervürlü GFRP donatı, 12 mm ve 16 mm ince kumlanmış GFRP donatı kullanılarak 28,46 MPa (C20) ve 53,33 MPa (C40) küp basınç dayanımına sahip beton numuneleri farklı değişkenlere bağlı olarak her bir gruptan 3 adet olmak üzere toplamda 24 grup (72 adet) çekme test numuneleri (pull-out) üretilmiştir. GFRP donatılar 150*150*110 mm kalıplara 60 mm kenetlenme boyunda, 35 mm pas payına denk gelecek şekilde aksel olarak yerleştirilmiştir. Numuneler oda sıcaklığı 22 °C, geçiş sıcaklığı (T_g) 115 °C ve 285 °C yangın sıcaklığına maruz kaldıktan sonra sıcaklık değişiminin çekme (pull-out) testi yapılarak beton ve donatı aderansına etkisi araştırılmıştır. Yangın sıcaklığı fırın ortamında elde edilmeyip, dışarıdan gerçek bir ateş tutularak veriler gerçeğe yakın elde edilmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre nervürlü GFRP donatılarda çap arttıkça ve beton dayanımı yükseldikçe GFRP-beton aderansının iyileştiği, kumlu GFRP donatılarda ise çap yükseldikçe aderansın azaldığı, beton dayanımı yükseldikçe aderansın arttığı tespit edilmiştir. 22 °C’de en iyi sonucu 53,33 MPa (C40) beton dayanımına sahip, 16,66 MPa aderans dayanımında 12 mm nervürlü GFRP donatıların verdiği görülmüştür. 115 °C sıcaklıklarına çıkıldığında en iyi sonucu 53,33 MPa (C40) beton dayanımında sahip, 13,76 MPa aderans dayanımında 12 mm nervürlü GFRP donatıların verdiği görülmüştür. 285 °C’de ise 53,33 MPa (C40) beton dayanımına sahip, 5,18 MPa aderans dayanımında 12 mm nervürlü GFRP donatıların verdiği görülmüştür. Sonuç olarak 12 mm nervürlü GFRP donatılar çalışmada kullanılan diğer GFRP donatılara göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: GFRP Donatı-Beton Aderansı, Kenetlenme Boyu, Aderansa Sıcaklığın Etkisi, Pull-Out Metodu

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE REINFORCEMENT SURFACE PROPERTIES AND TEMPERATURE ON ADHESION OF GFRP WITH CONCRETE

ABSTRACT

Fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcements have high tensile strength, high corrosion resistance, resistance to chemicals, not creating magnetic fields, etc. Thanks to its superior properties, ways of using it in concrete as an alternative to steel reinforcement are sought. The adherence of the steel reinforcement to the concrete is provided by the ribs and profiles formed on the reinforcement surface during the production phase, and the bonding of the FRP reinforcements to the concrete during the production phase by the ribs formed with the yarn wrapped around the reinforcement and/or by epoxy sand coating around the reinforcement. However, the adherence between FRP and concrete varies depending on the nature of the ribbing and sandblasting. The adherence of concrete and FRP reinforcement depends on variables such as fiber type, surface properties of reinforcement, diameter of reinforcement, length of embedment in concrete, rust margin, concrete strength, resin type, position of reinforcement in the element, effect of temperature and environmental conditions. In this thesis, the adherence of glass FRP (GFRP) reinforcements with ribbed and sandy surfaces to the concrete was investigated with the variable parameters of temperature, reinforcement diameter, reinforcement surface properties, and concrete strength. In the study, concrete samples with a cube compressive strength of 28.46 MPa (C20) and 53.33 MPa (C40) using 10 mm and 12 mm ribbed GFRP reinforcement, 12 mm and 16 mm fine sandblasted GFRP reinforcement were collected 3 pieces from each group depending on different variables. A total of 24 groups (72 pieces) tensile test specimens (pull-out) were produced. GFRP reinforcements are axially placed in 150*150*110 mm molds with 60 mm clamping length and 35 mm rust margin. After the samples were exposed to room temperature 22 °C, transition temperature (T_g) 115 °C and 285 °C fire temperature, the effect of temperature change on concrete and reinforcement adherence was investigated by performing pull-out test. The fire temperature was not obtained in the furnace environment, but a real fire was kept from the outside and the data was tried to be obtained close to reality. It has been observed that GFRP reinforcements with a concrete strength of 53.33 MPa (C40) and a bond strength of 16.66 MPa with 12 mm ribs give the best results at 22 °C. It has been observed that GFRP reinforcements with a concrete strength of 53.33 MPa (C40) and a bond strength of 13.76 MPa with 12 mm ribs give the best results when the temperatures are increased to 115 °C. At 285 °C, it was observed that GFRP reinforcements with a concrete strength of 53.33 MPa (C40) and a bond strength of 5.18 MPa with 12 mm ribs yielded. As a result, it was observed that GFRP reinforcements with 12 mm ribs performed better than other GFRP reinforcements used in the study.

Keywords: GFRP Reinforcement-Concrete Adherence, Docking Length, Effect of Temperature on Adherence, Pull-Out Method

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Birden fazla malzemenin makro boyutlarda birleştirilerek mühendislik uygulamalarında ihtiyaca cevap verebilmesi beklenirken aynı zamanda kendine has özellikleri koruyarak (fiziksel, kimyasal ve mekaniksel) laboratuvar ortamında birleştirmesi ile üretilen malzemelere kompozit malzeme denilmektedir. Bu malzemeler 1940'lı yıllardan itibaren sürekli ilerleme ve gelişme kaydetmesi sayesinde özellikle polimer kompozitlerin gelişimi hızla artmıştır. Kompozit bu günlerde; inşaat alanları, tekne üretiminde, otomotiv sektörü, yenilenebilir enerji, sanayi, havacılık ve savunma, spor ve ev aletleri gibi hafiflik ve korozyonun ön plana çıktığı uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere çeliğin zaman içerisinde korozyona uğramasıyla betonarme yapıların bozulmasına katkıda bulunan ana faktörlerden biridir. Bu bozulmaların önüne geçebilmek için alternatif olarak üretilen Lif Takviyeli Polimer (FRP) donatıların kullanımı zamanla artmaya başlamıştır. Bu donatılar çeliğe kıyasla daha hafif, aynı zamana daha yüksek çekme kuvvetine ve düşük bakım maliyetlerine sahiptirler.



Şekil 1.1: Korozyona uğramış betonarme blok [1].

FRP donatıların yangın davranışıyla ilgili bilgi eksiklikleri hala binalarda kullanımını kısıtlamaktadır. Aslında çelik donatıların yüksek sıcaklıkta üst üste binen kısımlarında

erken bağ kaybına neden olduğu ve yangına maruz kalan taşıyıcı bölgelerin yapısal bozukluğunu rapor edildiği görülmektedir. Lif takviyeli kompozit donatıların yüzey şekillerinin yanı sıra mekanik özelliklerinin de çelik donatılardan farklı olması sebebine bağlı olarak, beton ile aderansı farklılık gösterebilir. Lif takviyeli kompozitlerde(FRP) betondaki yüzey aderansını belirleyen değişkenler, FRP üretiminde kullanılan lif türü (aramid, bazalt.cam.karbon vb.) donatı yüzey özelliği (düz, sargılı, nervürlü, kumlanmış, vs.), elastisite modülü, pas payı, beton dayanımı, matris (yapıştırıcı) çeşidi, sıcaklığın etkisi FRP-beton arası aderansı etkileyen faktörler olarak bilinmektedir.

Uluslararası FRP donatılı beton yönetmeliklerinde, ACI 440.1R-15 [2], CNR [3], CSA S6-14 [4], CSA S806-12 [5], JSCE 1997 [6], FRP donatı-beton aderans gerilmesini veya kenetlenme boyunun tespiti hakkında bağıntılar yayınlamışlardır. Yalnız bu bağıntılar aşırı güvenli tarafta kalmalarından dolayı, bu yönetmeliklerdeki aderans bağıntılarının düzenlenmesi gerektiği düşünülmektedir.

1.1. Tezin Amacı ve Yöntemi

Bu tez çalışmasında cam FRP (GFRP) donatıların betona aderansına sıcaklığın etkisi donatı çapı, donatı yüzey özelliği, beton dayanımı ve sıcaklık değişimi değişken parametreleri altında incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklar fırın ortamında elde edilmeyip, dışarıdan gerçek bir ateş tutularak veriler gerçeğe yakın elde edilmeye çalışılmıştır. Bulunan sonuçlar, değer grafikleri üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenerek GFRP donatıların birbiri üzerindeki üstünlükleri yorumlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, 10 mm ve 12 mm nervürlü GFRP donatı, 12 mm ve 16 mm ince kumlanmış GFRP donatı, 28,46 MPa (C20) ve 53,33 MPa (C40) basınç dayanımına sahip betonlar üzerinde her bir gruptan 3 adet olmak üzere toplamda 24 grup (72 adet) çekme numunesi üretilmiştir. Numuneler üretilirken 150*150*110 mm kalıplara 60 mm kenetlenme boyunda ve 35 mm pas payında numune ortasına denk gelecek şekilde aksinel olarak yerleştirilmiştir. Numuneler oda sıcaklığı 22 °C geçiş sıcaklığı (T_g) 115 °C ve 285 °C yangın sıcaklığına maruz kaldıktan sonra sıcaklık değişiminin çekme (pull-out) testi yapılarak beton ve donatı aderansına etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışmada beton-GFRP donatı arasındaki yüzey aderansını etkileyen aşağıdaki parametreler araştırılmıştır.

- GFRP donatısının yüzey özelliklerinin aderansa etkisi (ince taneli kumlanmış ve nervürlü GFRP donatılar)
- Donatı çapının aderansa etkisi (10-12mm nervürlü, 12-16 mm ince kumlanmış)
- Beton basınç dayanımının aderansa etkisi (C20, C40)
- Sıcaklığın aderansa etkisi (22 °C, 115 °C ve 285 °C)

1.2. Literatür Araştırması

Önceki çalışmalarda FRP donatıların sıcaklık altında beton aderansına etkileri birçok kez incelenmiştir. Çalışmaların çoğu aderansı etkileyen faktörlerin az bir kısmını incelendiği görülmüştür. Çalışmaların ayrıntılı özetlerini kapsayan literatür araştırması aşağıda verilmiştir.

Chiang and Tsai (2003), yaptığı deney çalışmasında yangın etkisinden sonra yapılarda nasıl bir yol izleneceğine betondaki gerek yüzey gerekse dayanımsal hasarın tahmin edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmanın amacı, yüksek sıcaklık etkisinden dolayı bağ kuvvetlerindeki değişiklikleri hesaplayarak basit bir eşitlik formülü geliştirmektir. Yapılan bu çalışma için çubuklar düşey olarak 60 mm ve 80 mm boylarında 49MPa basınç mukavemetindeki betona düşey olarak gömülmüştür. Isıtma işlemi için 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak numuneler fırın ortamında 240-320-400-500 ve 550 °C'ye kadar ısıtılmıştır. İkinci aşamaysa üretilen deneyler istenilen sıcaklıklarda 30-60-90-120-150 ve 180 dk zamanla sıcaklıkları sabit tutulmuştur. Son aşamada ise numuneler soğutulmaya bırakılmıştır. Soğuduktan sonra normal sıcaklığına getirildikten bir gün sonra numuneler fırından çıkarılmış ve pull-out çekmeleri yapılmıştır. Çubuklar betondan 1 cm/dk hızla çıkarılmıştır. En yüksek pull-out çekme mukavemeti kenetlenme kuvveti olarak bulunmuştur. Isıtılan numunelerden elde edilen değerler ısıtılmayan numune sonuçlarına oranlanarak aderans katsayıları belirlenmiştir. Sıcaklık 200 °C'yi geçtiğinde aderansa büyük değer kayıpları olduğu görülmüştür [7].

Gamage et al. (2006), yaptıkları deney çalışmasında CFRP-beton kompozit malzemenin sıcaklık etkisindeki davranışını bulabilmek için üç boyutlu bir model yapmayı amaçlamışlardır. Yaptıkları deney modeli, yapılan deneysel sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Hem deney çalışmasından hem de tasarlanan modelden elde edilen sonuçlar

doğrultusunda yüksek ısılarda beton ile karbon donatı arasındaki bütünlüğü sağlamak için bağlayıcı matris elemanının sıcaklığı 70 °C'yi aşmaması gerektiği bulmuşlardır. Aderansın karbon donatının içerdiği bağ uzunluğuna bağlı olmadığı tespit etmişlerdir. CFRP-beton arasındaki düzensiz bozulmanın kenetlenme boyuna bağlı olmadığı ve bağlayıcı matris elemanının sıcaklığına bağlı olduğu hem deneyden elde edilen verilerle hem de tasarlanan model tahminleriyle belirlenmiştir [8].

Galati et al. (2006) ısı yükleri altında FRP donatı- beton arasındaki bağlantıyı bulabilmek için maksimum 70 °C'ye kadar çıkan ısılarda donatı-beton aderans dayanımları üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada numuneler ısıtıldıktan sonra pull-out çekme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde 9,5 mm çapındaki GFRP donatılar birbirinden farklı kenetlenme boylarında beton numunelere yerleştirilmiştir. Üretilen deney numunelerinin basınç dayanımları 27,6 MPa olduğu görülmüştür. GFRP çubukların yüzey özellikler örgülü ve kum kaplı seçilmiştir. Çoğu numunede sıcaklık işlemin yapışma dayanımında az bir azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bağ uzunluğunun çubuk çapının 15 katı olan deney çubuklarında bu uzunluğun gereğinden fazla olduğu ve bazı üretilen deney numunelerinde donatının sıyrılmaya başlamadan koptuğu belirlenmiştir. Ayrıca sıcaklık işleminin sonucuna göre etkilerin beton numunesi kalınlığının az olduğu durumlarda daha fazla belirgin olduğu ifade edilmiştir [9].

Wang et al. (2008),beton ile üretilen yapılarda kullanılan FRP donatıların yüksek ısılarda mekanik dayanım özellikleri incelemiştir. Çalışmada CFRP ile GFRP iki çeşit lif katkılı donat kullanılmıştır. Deney sonuçları, kopma zamanına kadar, yüksek ısılarda FRP çubuklar için gerilme mukavemeti ve deformasyon ilişkisinin doğrusal olduğunu tespit etmişlerdir. Elastisite modülünde 300-400 °C'ye kadar değişim olmadığını görmüşlerdir. Bu ısı değerlerinden sonra hızlı bir düşüş olduğunu görmüşlerdir [10].

Boğaçhan B. (2019) yaptığı doktora tezi çalışmasında; çeşitli çaplarda GFRP donatının nervürlü, düz, oluklu ve sıkı sargılı, CFRP donatının kaba taneli kumlanmış ve ince taneli kumlanmış, BFRP donatının kaba taneli kumlanmış sıkı sargılı ve çelik donatı ile farklı beton sınıfında üretilen numunelerin beton aderansları incelenmiştir. FRP donatılar-beton aderanslarını incelemek için 90 adet kiriş deney numunesi düşey yük uygulanarak test edilmiştir. Farklı değişkenlerin FRP donatı aderansına etkisi

incelenmiştir. Yapılan tez çalışmasında, aynı gömülme boyuna sahip ve aynı beton özelliklerine sahip çelik donatılı deney numuneleri de test edilerek, numunelerin karşılaştırmalı olarak aderans dayanımları incelenmiştir. Bulunan deney sonuçlarına bağlı olarak regresyon analizlerinin sonucunda analitik bağlanma boyu ve aderans dayanımı denklemleri geliştirilmiştir. Bu denklemler yapılan deneylerin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bu kapsamda en iyi aderans performansını iri taneli kumlanmış sargılı bazalt lif katkılı donatı sergilemiştir. Bu BFRP donatının aderans dayanımı normal çelik donatıya göre %105 ile %149 arasında daha iyi olduğu görülmüştür. Beton basınç dayanımının 20 MPa'dan 35 MPa'ya çıkarıldığında neredeyse tüm kompozit çubukların aderans gerilme değerlerinin arttığı görülmüştür. Yalnız beton dayanımlarının 40MPa'a çıkarıldığında maksimum aderans mukavemeti değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir [11].

Khaneghahi ve arkadaşları (2018), yaptıkları deneysel çalışmada şişen boya maddesinin yüksek sıcaklıklarda FRP donatılar üzerindeki performans etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, epoksi matrisli ve azot takviyeli şişen boya ile kaplaması yapılmış cam ve karbon FRP donatılar kullanılmıştır. Isı etkilerine ek olarak, çekme dayanımının etkisini belirleyebilmek için farklı çaplarda FRP donatılar kullanılmıştır. Aynı zamanda deneyler üzerinde yapılacak tahmin modelini geliştirmek ve FRP donatıların aderans dayanımındaki değişkenlerin katkısını anlayabilmek için sonuçlara hazırladıkları regresyon yöntemlerini uygulanmıştır. Sonuçlara bakılacak olursa, şişen boyanın FRP donatıların mekanik özelliklerinin, GFRP donatıların %30'a kadar çekme dayanımı kapasitesinde, 300-600 °C sıcaklık aralığında ciddi anlamda bozulmasını önlediğini ortaya koymuşlardır. Genel sonuçlara bakıldığında Şişen boyanın 300-600 °C aralığında işe yaradığı görülmüştür. Şişen boya kaplı FRP donatıların, kaplanmamış donatılara göre daha yüksek aderans dayanımı gösterdiği görülmüştür [12].

Chenchen L, Danying G. (2017) yaptıkları çalışmada, FRP donatıların ve beton kenetlenme özelliklerini incelenmiştir. Sıcaklığın, gömme uzunluğunun, FRP çubuk çaplarının ve donatı çeşitliliğinin(GFRP-BFRP), beton dayanımının, betonda bırakılacak pas payının ve yanmaz kaplama malzemesinin yapışma dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada sonuç olarak FRP donatı çekme numunelerinin aderans dayanımları, sıcaklık arttıkça azaldığı ve sıcaklığın GFRP donatılı numunelerde aderans dayanımları üzerindeki etkisi, BFRP donatılı numunelere göre daha fazla olduğu

görülmüştür. 70 °C ila 220 °C arasındaki sıcaklıklarda, BFRP donatılı numunelerde aderans dayanımı, oda sıcaklığındaki aderans dayanımlarına göre %2,45-7,11 oranında azaldığı ve GFRP donatılı numuneler oda sıcaklıklarına göre aderans dayanımları %6,99-14,24 azaldığı gözlemlenmiştir. 270 °C'de ise BFRP ve GFRP donatıların aderans dayanımları yaklaşık olarak %30 oranında azaldığı görülmüştür. 350 C'de ise BFRP ve GFRP donatılı numunelerde aderans dayanımında ciddi ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Kritik sıcaklık aralığının 270-350 °C olduğu görülmüştür [13].

Solyom S. ve Di Benedetti M.(2019) yaptıkları çalışmada, betona gömülü 8 mm çapındaki GFRP donatılar 20 °C ila 300 °C arasındaki sıcaklıklara maruz kalarak aderans dayanımları deneysel ve analitik bir incelemesini sunmuşlardır. GFRP donatılar ve beton birleşimindeki sıcaklık değişimi termokupullarla kontrol edilmiştir. Test edilen sıcaklıklarda kenetlenme varyasyonları, gözlene hata modları ve aderans dayanımları ilişkisi temelinde araştırılmıştır. Deney sonucunda yapılan modellemeler, deneysel sonuçlara göre kalibre edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Tg(geçiş) sıcaklığından daha düşük değerlerde test edilen numuneler çekme esnasında donatı kopmasıyla sonuca varılmadığı görülmüştür. Sıcaklığın arttıkça aderans dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle Tg sıcaklığına yakın sıcaklıklarda, numuneler için aderans dayanımları 350 °C'deki numunelere göre %30'a kadar aderans dayanımı kaybı olduğu gözlemlenmiştir. 300 °C'de ise %10'luk bir azalış olduğu görülmüştür. Aderans dayanımındaki düşüş GFRP donatıların yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra esneklik modülündeki azalmadan etkilendiği düşünülmektedir [14].

Younes J. ve Marta B. (2022), yaptıkları çalışmada CFRP donatıların sıcaklık altında eğilme aderanslarını bulmak için FRP ile güçlendirilmiş kirişler hazırlamışlardır. 20 ° ve 50 C° sıcaklıklarda, çelik donatı oranlarını değiştirerek ve uygulanan yük süresi değiştirilerek toplamda 23 kiriş hazırlanmıştır. Uygulanan sıcaklığın 50 °C'ye kadar olan artıştan, numuneler üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bu durumu donatının geçiş sıcaklığı altında kaldığından ve yapıştırıcının sonradan sertleşmesine bağlamışlardır. Uzun süre yük altında kalan numunelerde ise sıcaklığın 20 °C'den 50 °C'ye çıkması, betonun zamana bağlı davranışını ve epoksi reçineyi daha fazla uzadığını tespit etmişlerdir [15].

Aydın F. (2018), yaptığı deneysel çalışmasında GFRP, CFRP, AFRP, BFRP donatıları için termal genleşme katsayısı belirlenmiş ve beton içerisindeki davranışlarını incelemiştir. Öncelikle FRP donatıların ısı genleşme katsayıları yaptığı deneysel çalışma yardımıyla belirlemiştir. FRP donatıların betonun sıcaklık değişiminin aderans üzerindeki etkilerine bakmak için, üç farklı beton dayanımı sınıfından beton numuneleri üretmiştir. Bu numunelerin içerisine çelik donatılarla birlikte FRP donatılar da yerleştirilmiştir. Donatılarla güçlendirilmesi sağlanmış beton numuneleri, betonda oluşacak olan deformeleri inceleyebilmek için numuneleri artan sıcaklıklara maruz bırakmıştır. Böylece ısı genleşme etkisi altında lif türü, beton dayanım sınıfı ve sıcaklık artış sürelerinin, ısı genleşme altında FRP donatıların nasıl etkilediğini gözlemlemiştir. Genel sonuçlara bakıldığında FRP donatıların ısı genleşme davranışları belirlenmiştir, çeşitli FRP donatıların ve farklı beton dayanımlarının ısı genleşmeye etkileri incelenmiştir. Bunlarla birlikte yüksek dayanımlı beton sınıfı kullanıldığında ısıya karşı deformasyonu yüksek ölçekte azaltılabileceği bulunmuştur [16].

Rosa C. ve Firmo P. (2021), yaptıkları deneysel çalışmada orta derecede ve yüksek sıcaklıklarda cam elyaf takviyeli polimer donatılar (GFRP) ve çelik donatılar ile beton arasındaki bağ davranışına ilişkin incelemelerde bulunmuşlardır. Farklı geçiş sıcaklıklarına sahip (T_g 104 °C ve 157 °C) nervürlü GFRP donatıda çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Yüksek sıcaklık olarak 300 °C'ye kadar ısıtmışlardır. Elde edilen sonuçlar çelik donatılar ile karşılaştırılmıştır. Sıcaklık arttıkça GFRP donatılar çelik donatılara göre çekme mukavemeti, elastik modülü, aderans dayanımı ve rijitliğinin önemli ölçüde düştüğünü tespit etmişlerdir. Çalışmada, 100 °C'deki çelik donatılar incelendiğinde aderans dayanımında %34 azalma görülürken, GRFP donatılarda ise yaklaşık %80 dayanım kaybettiğini göstermişlerdir. 250 °C'ye çıktıklarında ise tüm donatılarda yaklaşık %80-90 arası aderans dayanımında kayıplar görmüşlerdir [17].

Yu ve Kodur (2013), yaptıkları çalışmalarda FRP donatılarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yüksek sıcaklıklarda üzerindeki etkisine dair birkaç sayısal çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır. Yapılan analizlerde kullanılan modelin, yapı malzemelerinin yüksek ısı özelliklerini, daha gerçekçi yük ve kısıtlama koşullanmasında FRP donatı ile beton arasındaki ısıya bağlı kayma aderansını açıklaması öngörülmüştür. Model, sayısal verilerden elde edilen öngörüler ile yüksek sıcaklık deneylerinde ölçülen verilerle karşılaştırılarak belirlenmiştir. Yapılan analitik çalışmalardan elde edilen bulgular,

kullanılan donatı çeşidi, betonda bırakılan pas payı ve yangın esnasındaki deneylerin FRP donatılar kullanılarak yapılan beton kirişlerin yüksek sıcaklık etkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve kirişe gelen aksel kısıtlamaların varlığının yüksek sıcaklık üzerindeki aderans dayanımının orta düzeyde bir etki ettiğini göstermiştir [18].

Hajiloo ve Green (2018), yaptıkları çalışmada GFRP donatılı betonarme döşemelerin yüksek sıcaklıktan sonraki dayanımıyla ilgili kritik veriler sağlamışlardır. Çekme ve bağ kuvveti deneyleri için üç farklı çapta GFRP donatıdan ve bir GFRP levha içeren döşemeler yaparak yüksek sıcaklık altında incelenmişlerdir. Aderans dayanımını için Ø16 mm GFRP donatılarını, 450 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklara maruz bırakarak, 24 saatin sonunda oda sıcaklığında test etmişlerdir. Numuneler oda sıcaklığında yükleme altında bırakılarak deneyler yapılmıştır. Diğer numuneler ise, üç saat süren bir yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra dayanım kapasitesini incelemek için oda sıcaklığında test edilmiştir. Burada çekme testi sonuçlarına göre 400 °C'ye maruz bırakılan donatıların bekledikten sonraki dayanım ısıdan hemen sonraki dayanıma göre %45'ini geri kazandığını gözlemlemişlerdir. 300 °C yapılan deneyler için ise yaklaşık %40'ını geri kazandığını göstermiştir. Döşemelerin yüksek sıcaklıktan sonraki dayanım kuvveti, oda sıcaklığında bükülme kuvvetinin %68'i olduğu görülmüştür [19].

Haz Z, Guanghui L. (2019) çalışmada, toplam 13 adet FRP donatı ile güçlendirilmiş beton kirişler, farklı yüksek sıcaklık işlemlerinden sonra yük altında yüksek sıcaklık, ateşi tutma süreleri, uygulanan yük kapasiteleri ve farklı FRP donatılar dikkate alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak, kirişlerdeki sapma ve yorulma ömürleri hazırlanan modellemeler ile tahmin edilmiştir. Deneysel çalışmalar ve teorik analizlere dayanarak bazı sonuçlar elde edilmiştir. Çelik donatılı beton kirişler için üç model kullanılarak her bir kirişin açıklığının ortasındaki sehim gelişimi tahmin edilmiş ve test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. CEB-FIP modeli, %2,8-7,0'lik değişim oranlarıyla en iyi sonucu gösterdiği görülmüştür. GFRP donatılı beton kirişlerinde oda sıcaklığına ve yüksek ısıya maruz kaldıktan sonra dayanımları tahmin edilmiştir. 400 °C'ye 2 saat maruz bırakılan kirişlerin, aderans dayanımını %10-12 MPa aralığında düştüğü gözlemlenmiştir [20].

Yapılan çalışmalarda beton sınıfına, donatı çapına, GFRP donatı yüzeyine ve sıcaklık çeşitliliği parametrelerine bağlı elde edilen sonuçların, değişken parametrelerin hepsinin aynı anda kullanıldığı ve yangında oluşabilecek ani yüksek ısı verilerek yapılan çalışmaların literatür araştırmasında eksik olduğu görülmüştür. Bu çalışmamızda belirtilen bütün değişken parametreleri kullanarak literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedefliyoruz.

1.3. Hipotez

Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) donatı üstün mekanik dayanımı, hafiflik özelliği, korozyona karşı dayanım göstermesi, düşük yoğunluk ve dayanım/yoğunluk oranının daha yüksek olmasından kaynaklı bazı alanlarda kullanımı zaman geçtikçe arttığı bilinmektedir. FRP donatılar betonarme elemanlarda korozyon direnci ve dayanıklılığı sayesinde donatı olarak çelik donatı yerine kullanılabilir. FRP donatı kullanımıyla donatının paslanması (korozyonu) probleminin önlenmesi, çevresel şartların elverişsiz olduğu yerlerde kullanılan yapıların kullanım ömrünün uzatılmasının yapı maliyetlerine ve ülkeye getireceği önemli ölçüde yararlar düşünüldüğünde, kompozit donatılı beton gelecekte daha gelişmiş derecede yaygınlık kazandıracak bir üretim tekniği olduğu görülmektedir. Lif katkılı donatılar üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda FRP donatıların çekme kuvveti karşısında beton içerisindeki aderansı bazı durumlarda çelik donatıya göre daha az olduğu bilinmektedir. FRP donatıların yüzey özelliklerine bağlı olarak beton ile kenetlenme problemi ve sıcaklık altında olumsuz etkilendiği literatür araştırmalarında görülmüştür. Ancak, sıcaklık altında FRP-Beton aderansını neler etkiliyor? Beton-FRP kenetlenme aderansını beton sınıfı, donatı çapı, gömülme boyu, FRP donatı yüzey özelliklerinin ve sıcaklık parametrelerinin etken olduğu bilinmektedir.

Deneysel çalışmamızda, FRP donatı yüzey özellikleri ve donatı çapının, beton dayanımının, farklı sıcaklık altında FRP-Beton aderansına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada nervürlü ve ince kumlanmış yüzey özelliklerine sahip 10 mm, 12 mm ve 16 mm GFRP donatılar kullanılmıştır. C20 ve C40 dayanım sınıfında betonlar kullanılmıştır. Beton içerisine 60 mm kenetlenme boyunda FRP donatılar yerleştirilmiştir. Numuneler farklı sıcaklık değerlerine maruz bırakıldıktan sonra oda

sıcaklığında test edilerek aderans dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Bu sayede sıcaklığın beton–FRP donatı aderansına etkisi araştırılmıştır.

Bir yüksek lisans tezi tamamlanacak ve bilim insanının yetişmesine katkı sağlayacaktır.



BÖLÜM 2. FRP DONATILAR VE KULLANIM ALANLARI

2.1. FRP Kompozitler

FRP'ler, yüksek çekme mukavemetine sahip liflerin reçineye bulanmasıyla elde edilen kompozit bir malzemelerdir. Yüksek dayanımlı beton yapılarda FRP ürünleri 1940'lardan beri kullanılmaktadırlar. Günümüzde bu FRP malzemeler donatı, kumaş, plaka, profil vb. birçok çeşitte üretildiği için başta savunma sanayi olmak üzere, inşaat, havacılık, otomotiv vb. birçok alanda kullanılmaktadırlar (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Çeşitli FRP ürünleri [21].

İnsanoğlu, var olduğun beri daha iyi bir yaşam sürebilmek ve kaliteyi artırmak amacıyla sürekli gelişim içerisinde bulunmuş ve ihtiyaçlarını karşılamak için yeni malzeme arayışlara yönelmişlerdir. Çabaladıkları bu amaç uğruna ilk çağlardan beri doğada bulunabilen malzeme çeşitleri üstünde tasarımlar ve değişiklikler yaparak daha kullanılabilir malzemeler elde etmişlerdir. Bu günlerde tüm teknik alanlarda olduğu gibi malzeme teknolojilerinde de insanoğlunun ihtiyaç duydukları ve istekleri doğrultusunda yaşanan problemlere paralel olarak her geçen gün artmaktadır. Bunun gibi sorunları azaltmak ve istekleri karşılayabilmek amacıyla yeni malzeme türleri ve uygulamalar

üzerinde çalışılmaktadır. Son zamanlarda araştırmacılar yoğunluğunu kompozit malzemeler üzerine vermişlerdir.

Kompozit malzemeler en az iki ayırt edici ürünün birleşimiyle meydana gelen malzemelerdir. Bizim deneylerimizde kullanılacak olan ise kompozit donatılardır. Bu donatı bileşenlerinde biri fiber(lif) diğeri ise yapıştırıcıdır(matris). İki malzemeyi bir araya getirerek, tek olarak çok fazla işe yaramayan malzemedan üstün özellikleri olan FRP donatılar meydana getirilmiş olur. Bir başka özellikleri ise plastik malzemelerin avantaj olarak görülmeleri hafif olmalarıdır. Bu nedenle ağırlığa bağlı olarak kuvvet ve sertlik oranları geleneksel olarak kullanılan malzemelerden çok daha üstündür. Başka özellikleri arasında; dayanıklılığın yüksek olması, çok fazla bakım gerektirmemesi, düşük yaşam döngüsü maliyeti, ses ve elektrik yalıtımı ve korozyona karşı yüksek mukavemetli ve uzun ömürlü olmasıdır [22].

FRP malzemelerin yüksek avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. FRP polimer malzemelerin en önemli dezavantajı; çeliğe oranla düşük ateşten kolaylıkla etkilenebilmesidir. Polimer matrislerin yangın performansı hakkında öngörü vermektedir. FRP'ler için çalışmaların kapsamlı standartlarının geliştirilmekte olduğu yangın ısıyla ilgili standartlar çok sınırlı ve karmaşık kalmıştır [23].

Çok eski zamanlardan beri kompozit malzemeler var olmaktadır. (Eski Taş Çağı olarak da bilinir). Ziggurat (Tapınak kulesi) Babil şehir merkezine inşa edilmiştir. Yapımında kısıtlı tek malzeme olarak kıyılmış saman ile karışımı yapılmış kilden oluşmuştur. Firavun zamanı mısırdan yapılmış ve o dönemde tuğlalar için güçlendirme aracı olarak kullanılmıştır. Kompozit malzeme oluşturmak için saman ile papirüsten elyaf kompozitlerin kullandığını bildirmiştir. Japonya'da ise Samuray Kılıcı olarak bilinen katana kılıçları kompozit malzemelerin birleşimi olarak geliştirilip üretildiğini söylemişlerdir. Herakovich'e göre doğal olarak bilinen nesnelerin bir çoğu beden, bitkiler ve hayvanlar birer kompozit olarak görülmüştür. Yalnız ilgilendiğimiz bu denli kompozitler Kelly ve Mileiko'ya göre kompozit malzemelerin en eski uygulamaları arasında görülmüşlerdir [24].

1966 yıllarında ise Türkiye'de üretimi gerçekleşen fiberglas malzemeyle kullanılarak Anadol marka araçlar üretilmiştir(Şekil 2.2). Bernar Nahum ve Rahmi Koç 1963 yıllarında fiberglas kullanılarak yapılmış bir otomobil görmüşler ve bu durum ilgilerini

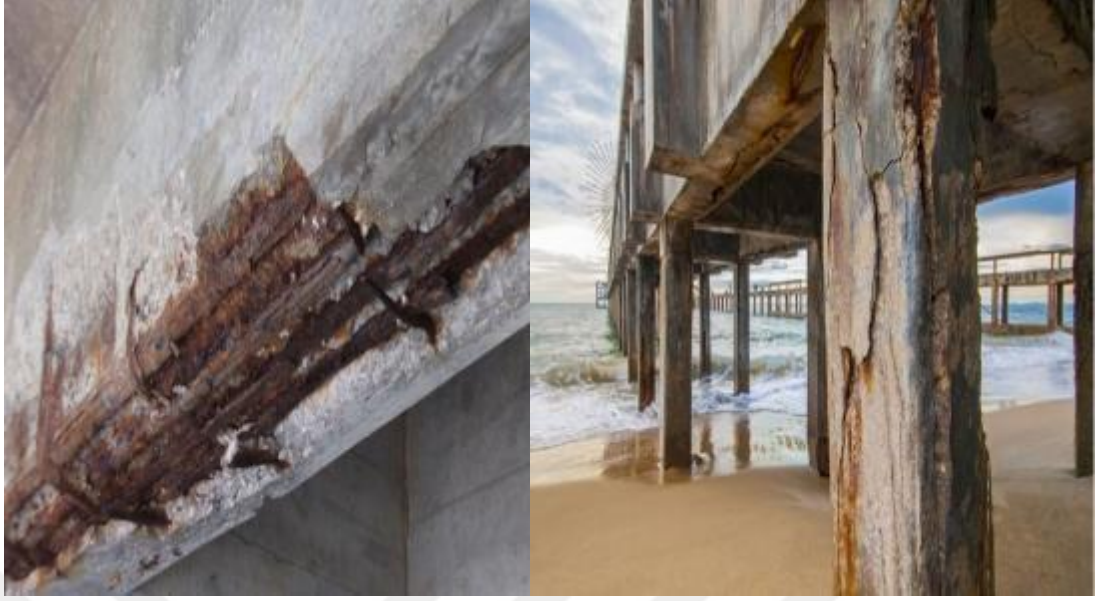
çekmiştir. O dönemlerde fiberglas malzeme ülkemizde henüz yaygın değildi ve fazla bilinmiyordu. Bu duruma rağmen malzeme ucuzdu ve gördükleri otomobil gövdesinde kullanılabileceğini kanıtlar nitelikteydi. Bu durum Türkiye Makine Mühendisleri Odası tarafından yeterlilik belgesi ve yönetmelik olayı 1967'yi bulmuştur. Bu sebeple otomobilin satışı 28 Şubat 1967 tarihini bulmuştur[22]. Kompozit malzemelerin alanı hızla büyümekte olsa da tamamen gelişimini bitirmiş değildir. FRP kompozitlerin gün geçtikçe özelliklerini değiştirerek geliştirildiği bilinmektedir [25].



Şekil 2.2: Anadolu marka araç ve fiberglas malzemesi [26].

2.2. FRP Donatılarının Kullanım Alanları

Çelik donatının korozyonu, yapıların en önemli sorunlarından biridir. Betonun, tuzlu suya maruz veya sürekli döngü içinde olan donma ve çözülme olayları gibi faktörlerden etkilenmesiyle çelik donatıda korozyon oluşabilmektedir(Şekil 2.3). Bunun sonucunda, çelik donatının hacminin artmasıyla betonda kabuk atma, kenetlenme özelliğinin kaybolması gibi yapılarda zamanla zararlar görebilmektedir. Bunun gibi çevresel etkenlerin etkisindeki yapılar otoparklar, liman yapıları, köprüler, denize yakın yapılan yapılar vb. gibi yapılarda gözlemlenmektedir [27].



Şekil 2.3: Korozyona uğramış bazı yapılar [28].

Lif takviyeli polimer donatıların (FRP), korozyon dayanımına karşı mukavemetli, çekme dayanımlarının yüksekliği ve istenilen formda üretilip aynı zamanda hafif bir malzeme olma özelliklerine sahip olması nedeniyle, standart yapıda kullanılan çelik donatıların yerini alabileceği öngörülmektedir (Şekil 2.4) [29]. FRP donatılı kompozitleri beton yapılarda yapı elemanı olarak aktif şekilde kullanabilmek ve kompozit malzemeleri içten veya dıştan takviye edilmiş betonarme yapıların dizayn edilebilmesi için standartlara uygun hale getirmek için büyük ölçüde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalara dayalı olarak, FRP donatının kullanıldığı yapılar projelendirmek için uygun dizayn metotları ve uygulama alanlarını geliştirmek için çalışmalar sürmektedir [27].



Şekil 2.4: Beton dökülecek zeminin FRP donatı ile güçlendirme [30].

FRP donatıların çelik donatılara kıyasla mekanik ve fiziksel özelliklerinin farklıdır olduğu bilinmektedir. FRP donatıların bazı değişken özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Bunlar kullanılan matrisin cinsi, lifin türü, lifin yoğunluğu, lif ve matrisin yapışabilme özelliğine, lifin şekil olarak geometrisine ve yapıştırıcı madde içerisindeki dağılımına göre değişmektedir. FRP donatıların yapılarda alışlagelmiş çelik donatılara oranla avantaj olarak özellikleri çekme dayanımı üstünlüğü, korozyona karşı direnci, hafiflik, düşük iletkenlik (ısı ve elektrik) olarak bilinmektedir[31]. Bütün bu avantaj olarak görülen özellikler günümüz yapılarda kullanılan inşaat demirlerinin yerine kullanılabilmesi yolunda geliştirildiğini göstermektedir. Bununla birlikte kullanım alanları olarak teknelerde, soğutma kulelerinde, spor ekipmanlarında, köprü inşalarında, otomobil sanayide, yüksek gerilim istasyonlarında, kıyı inşaatlarında, tuz depolama tesislerinde, kuru havuzlarda vb. gibi birçok alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Verilen örneklerde kullanılan fiber kompozit yapıların nasıl başarı elde edebileceği ve çeliğe alternatif oluşturduğu gözler önüne serilmektedir (Şekil 2.5).



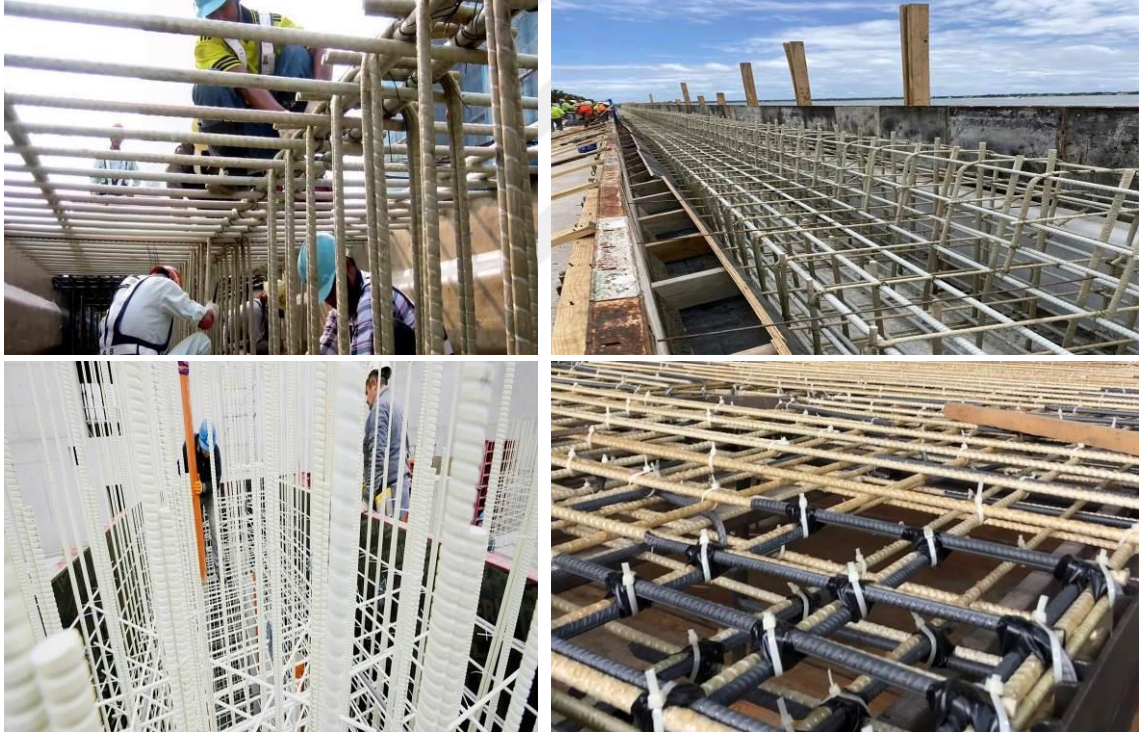
Şekil 2.5: Köprü tabliyesinde FRP donatıların kullanımı [30].

FRP donatıların yapılarda alışlagelmiş çelik donatılara göre dezavantajları ise akma özelliklerinin olmaması, Elastisite modülünün düşüklüğü, yüksek maliyet, dayanımın gücünün sabit olmaması, kötü çevre şartlarında düşük lif durabilitesi, düşük aderans dayanımı ve kenetlenme özellikleri başlıcalarıdır. Yaygın olarak kullanılanlar arasında cam lifi takviyeli polimer (GFRP) donatı, ile standart çelik donatının bazı özellikleri Tablo 2.1.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2.1: Çelik ile GFRP donatıların mekanik özellikleri karşılaştırılması (Acı 440.1R2006) [31].

	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Elastisite Modülü (N/mm ²)	Akma Şekil Değişirme (%)	Kopma Şekil Değişirme (%)
ÇELİK	276-517	483-690	200000	0,14-0,25	6-12
GFRP(Cam)	*	483-1600	35000-51000	*	1,2-3,1

Tablo 2.1 incelendiğinde FRP donatıların çekmeye maruz kaldığında elastik malzeme özelliği gösterirken, çelik donatılarda kopmadan önce akma şekil değişiminin FRP donatılarda oluşmadığı görülmektedir. Çelik donatılar akma dayanımında ulaştıktan sonra sünek davranış gösterirken, FRP donatılarda ise akma durumu olmadığı için direk kopma durumu görülmektedir. Bu gözlemlerle FRP donatıların gevrek davranış gösterdiği görülmektedir [31]. Örnek çalışmalar Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6: FRP donatıların yapılarda kullanımı [32-33-34].

Bunun gibi örneklerle birlikte FRP donatıların beton içerisinde kullanımında oluşturacağı pozitif etkiler, FRP donatı-beton davranışlarını anlamamıza olanak sağlamaktadır. Lif takviyeli elemanların ve bununla birleşen yapıştırıcıların bir araya gelerek oluşturduğu FRP donatılar ileride, günümüzde olduğundan daha fazla malzeme çeşitliliğiyle birlikte literatürde yer alacaktır.

2.2.1. Polimer matrisler

Lif katkılı ürünlerin içeriğinden biri olan reçine(matris), lifleri bir arada tutarak liflerin dağılmasını ve saçaklanmasını önlemesinin yanında dış etkenlerden gelebilecek olumsuz durumlara karşı koruyucu olmuşlardır [35]. FRP malzemenin kat arası ve aynı düzlemde kayma mukavemetlerini aktarmaktadır [36]. Lif katkılı malzemelerde polimer reçineler çoğunlukla termoplastik ve termoset yapıştırıcı olarak ikiye ayrılırlar. Yalnız lif katkılı malzemeler, değişik ürünlerde kullanılan epoksiler genellikle termoset polimer matrislerdir. İlk durumda, termoset yapıştırıcılar genellikle düşük erime noktalı veya sıvı sert maddelerdir ve bir ısıtıcı ile sıcaklık veya ikisinin bir kombinasyonu ile katılaşabilirler. Sert termoset matrisler, termoplastik matrislere nazaran, bir kez katılaştığında bir daha sıvı duruma geçemezler veya şekillendirilemezler [37]. Termoset matrislerin, diğer matrislere nazaran, daha sağlam mekanik özellikler taşımasının yanında uzama dayanımlarının, ısı kararlılıklarının ve kimyasal dayanımların da daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak düşük darbe dayanımları, uzun süren şekil değiştirilebilme süreleri, saklama olanaklarının kısıtlı olması gibi olumsuz yönlerinede sahiptirler [38].

2.2.1.1. Epoksiler

Matrisler, yüksek mekanik özelliklerinin yanında, kolay şekil alabilme, bazı liflere daha iyi tutunması, yüksek korozyon dayanımına sahip olması, sıcaklık ve suya göre diğer polimer yapıştırıcılara göre daha az zarar görmesi, korozyona ve değişik ortam koşullarına karşı yüksek dayanım göstermesi gibi avantajlara sahip olmasının yanında çelik donatılara oranla daha yüksek maliyete ve uzun süren yapım aşaması gibi dezavantajlara sahiptir [37].

2.2.1.2. Polyesterler

Polyester matrisi oda sıcaklığında sert bir hal aldığından işleme kolaylığı ve maliyetinin düşük olması nedeniyle çoğunlukla kullanılan yapıştırıcılardandır[39]. Yalnız vinilester ve epoksi matrisleri ile kıyaslandığında kimyasal etkilere diğerlerine oranla daha az dayanıklı olması üretimdeyken bazı soru işaretlerine yol açabilmektedir [37]. Bunun yanında mukavemeti ve elastisite modülü epoksi reçinelerle karşılaştırıldığında daha

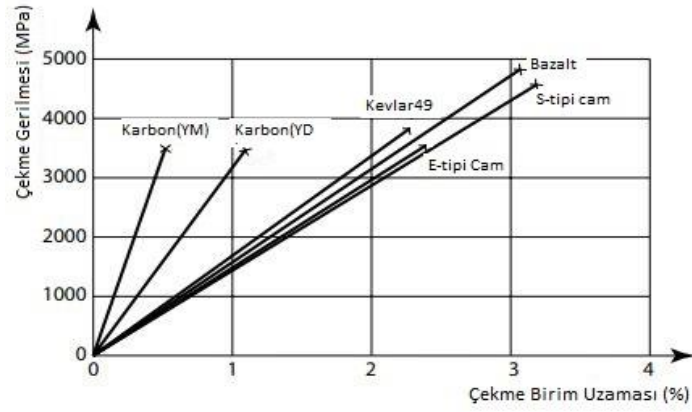
düşük olmasının yanında %6 ile %13 oranında yüksek büzölmeye sahip olmaları, üretimi tamamlanmış malzemelerde düzensiz bozulmalara yol açabilmektedir [38]. Reçinelerin özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2: FRP malzeme üretiminde kullanılan termoset reçinelerin özellikleri [40].

Reçine	Özgöl Ağırlık	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Büzölme Oranı
Epoksi	1,20 - 1,30	2,80 – 4,15	55,10 – 135,00	1,00 – 5,00
Polyester	1,10 - 1,41	2,15 – 3,50	35,00 – 105,00	5,00 – 11,00

2.2.2. Lifler

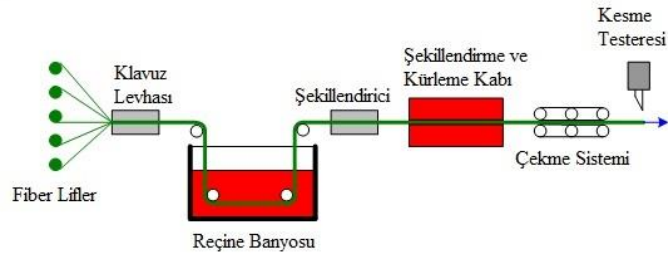
Lifler FRP malzemelerin boyuna doğru uzantısı yönünde yüklerin taşınmasını sağlarken ayrıca üretilen FRP malzemeye yüksek dayanım ve durabilite sağlarlar. Lif çeşitleri doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Piyasada çoğunlukla ticari olarak kullanılanlar lifler ise yapay liflerdir [41]. Farklı yüzey özelliklerine ve farklı çaplara sahip olan liflerin dayanım performansı, uzunluk, boyutlar ve kimyasal birleşimlerine göre değişkenlik gösterirler. FRP’ler içinde en çok tercih edilen lifler cam lifidir [42]. Bu liflerin tipik mekanik özellikleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Donatı üretiminde ise en yaygın olarak kullanılan pultrüzyon yöntemidir. Sağladığı avantajlar arasında kolay şekil verilebilme, korozyona karşı dayanıklılık, düşük ağırlık ve montaj kolaylığı gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Yaptığımız bu deney çalışmasında nervürlü ve ince kumlanmış GFRP donatılar pultrüzyon metodu ile üretilerek deneylerimizde kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Liflerin gerilme-birim uzamaları [43].

2.3. Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon makinesi genel olarak sabit ve enine ürünler üretmek için bir işlemdir. Yapılan pultrüzyon yöntemi, düşük işçiliğe ve yüksek geri dönüşüm verimliliğine sahiptir. Çünkü pultrüzyon sürekli geri dönüşüm işlemi yapma tekniğidir [44]. Diğer işlemlerin nazaran, oldukça hızlı(seri) ve daha az işçilik gerektiren bir işlemdir. Bu gibi özellikler olarak son zamanda geliştirilen diğer üretim süreçlerinden pultrüzyon metodu maliyete oranla en iyi verimlilik oranını sunmaktadır. Pultrüzyon metodu ilk Amerika'da 1950'li yıllarda Goldsworthy tarafından, en çok kayak malzemeleri, olta takımları gibi malzemeler üretmek için kullanılmıştır. Daha çok pultrüzyon metodu uygulanırken polyester reçinesi ile cam elyaf birleştirir. Pultrüzyon metodu şematığı Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8: Pultrüzyon aşamaları [45].

Yapılar için yapılan uygulamalarda yaygın olarak kullanılan malzemeler ahşap, alüminyum ve çelikten oluşmaktadır. Ancak bazı yapılarda bu malzemeler, ağırlıkça hafif ve korozyona karşı dayanıklılık gibi nedenlerle GFRP ile yer değiştirmektedir[46].

Aşağıdaki Tablo 2.3.'de yapılarda kullanılan bazı yapı malzemeleri karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2.3: Yapılarda kullanılan malzemelerin kıyaslanması [46].

	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Gerilme Kuvveti (MPa)	Elastik Modül	Termal Genleşme Katsayısı (K-1)	Termal İletkenlik (W/Mk)
Pultrüzyon	1,8	400	26	11*10 ⁻⁶	0,35
Ağaç	0,7	80	12	14*10 ⁻⁶	0,1
Alüminyum	2,7	250	70	23*10 ⁻⁶	170
Çelik	7,8	400	210	12*10 ⁻⁶	40
PVC	1,5	70	3	85*10 ⁻⁶	0,1

Cam lifleri çoğunlukla silika kumundan yapılmıştır ayrıca farklı kalitede de üretilebilmektedir (Şekil 2.9.). Çoğunlukla kullanılan cam lifleri, düşük maliyeti, elektriğe daha dayanıklı olduğu için ve yüksek dayanım özelliği taşıyan E tipi cam, diğerlerine nazaran yüksek çekme mukavemeti ve yüksek elastisite modülü özelliklerini taşıyan S tipi cam liflerdir [37]. GFRP'leri diğer lif çeşitleri ile karşılaştırıldığında düşük maliyet, yüksek çekme mukavemetleri, yüksek kimyasal dayanıklılıkları, elektriği iletmemeleri gibi pozitif yönlerinin yanında çoğunlukla düşük elastisite modülüne, daha sert formda olmaları, küçük miktar daha az yorulma dayanımına sahiplerdir [38]. Bazı lif türlerinin mekanik özellikleri Tablo 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Liflerin reçine banyosu ve üretim bandı [47].

Tablo 2.4: FRP malzemelerde kullanılan liflerin özellikleri [43].

Lif Türü	Yoğunluk (kg/m ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Nihai Birim Uzaması (%)	Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	Poisson Oranı
E-tipi Cam	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
S-tipi Cam	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
Yüksek Dayanımlı Karbon	1750	3500	240	1,1	-0,6-0,2	0,20
Aramid (Kevlar 49)	1440	3620	124	2,2	-2,0 boyuna 59 radyal	0,35
Bazalt	2800	4840	89	3,1	8	-

2.4. Yapı Malzemelerinde Sıcaklık Etkisi

Ateş çok uzun yıllar önce bulunmuş olmasına rağmen insanlığın kullanım amacına göre yararlı veya zararlı olarak ayrılmaktadır. Kontrolsüz biçimde oluşan ateş yer veya mekanlarda çıkması sonucu oluşan olaya yangın denilmektedir. Yangınlar genelde yapılarda mal veya can kaybıyla sonuçlanmaktadır (Şekil 2.10). Bundan dolayı yapılan araştırmalarda ısı etkisini çoğu alanda detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapı malzemesi literatürü incelendiğinde geleneksel ve yeni nesil malzemelerin sıcaklık altında göstermiş olduğu tepkilerini ve sıcaklığın yayılımı hakkındaki incelemeler ön plana çıkmaktadır.



Şekil 2.10: Yapıda çıkan yangın [48].

Betonun yüksek ısı işlemindeki davranışı, ısı artış hızına, agrega çeşidine ve stabilitesi dahil olmak üzere farklı etkenlerden etkilenir. Ani ısı değişimleri, ısı şok sebebiyle beton yüzeyinde dağılma ve çatlaklara neden olabilir. Agreganın genleşmesiyle beton içerisinde de zararlar verebilmektedir. Yüksek ısılarda betonun basınç mukavemeti de zarar görebilmektedir. 99 °C'nin üstüne çıktığında, çimento hamuru su kaybetmeye başlar, bu durum çimento hamurunu ve hamur-agrega bağlantısını zamanla zayıf kılar. Betonun sürekli ulaştığı sıcaklık sonucu, agregada renk değişikliği gözlemlenebilir. Örnek verilecek olursa, kireçtaşı agregaları yaklaşık 285°C'ye yaklaştığında pembe bir görüntüye döner, bu durum büyük ölçüde basınç dayanımını kaybettiği anlamına gelmektedir [53-54].

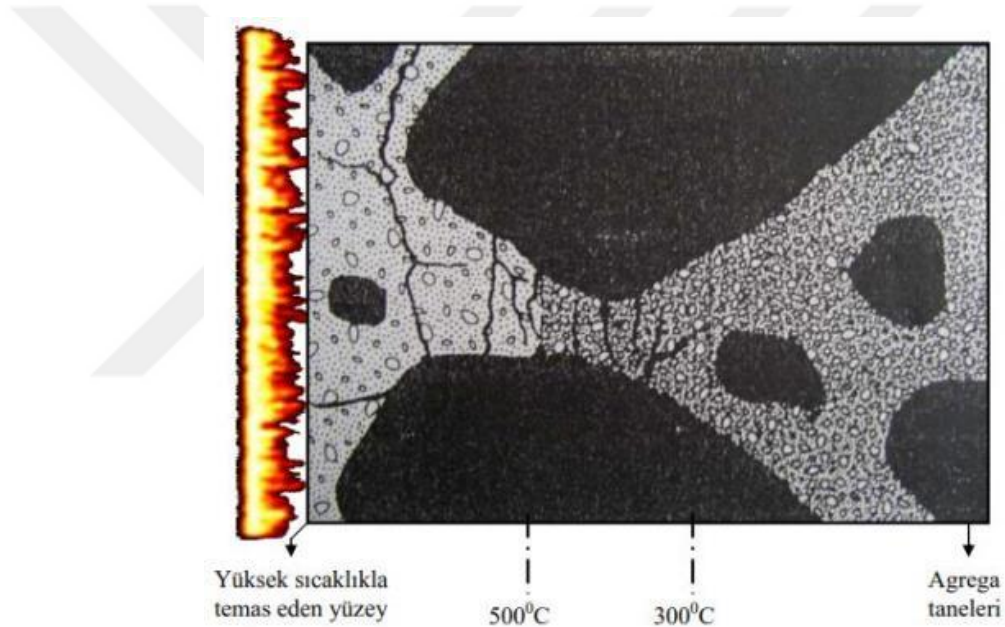
Yüksek ısı etkisi, beton içerisindeki basınç mukavemetine etkisi şöyle anlatılabilir; basınç mukavemeti 100°C'de azalmaktadır, bu azalma %11-36 oranında değişmektedir. Bu ısı yükseliminden sonra 220°C'ye kadar mukavemette arttığı gözlenirken 220°C'den sonraki beton dayanımlarında aşağıya gönen bir grafik görürüz 800-850°C aralığında beton dayanım kaybı %22-55 arasında değişmektedir. Bu beton dayanımındaki artış veya azalış üretimde gerçekleştirilen beton için kullanılan agrega türü ve agrega oranını direk etkiler biçimdedir. İçerisinde kalker bulunan agregalar ile üretilen betonların ısıya maruz kaldığında, silis esaslı agrega ile üretilen betonlardan daha iyi dayanım gösterdiği görülmektedir.

Bazı yapılarda beton standart ısının üzerinde bir ortam içinde bulunma durumunda kalır. Örnek verilecek olursa betondan yapılmış bir fabrika bacasında betona temas eden yüzeyi yaklaşık 400 °C dolaylarında bir ısı ile temas halinde bulunabilir. Betonarme yapılarda meydana gelen yangında beton ısısı 600-1000 °C ye kadar yükseldiği tahmin edilen bir sıcaklık ile karşılaşmaktadır. Bu gibi durumlarda sorunların çözümünde istenen ısı termik izolasyonunun sağlanabilmesi için betonun ısı iletkenlik özelliklerinin bilinmesi gereklidir [55].

Beton ve çeşitlerinin yangın gibi kısa sürede yüksek sıcaklıklara çıktıklarında dayanıklı olabilmeye karşılık, sürekli olarak ısı altında kalan betonun sıcaklığı 100°C den daha fazla olmaması gerekmektedir. Sürekli olarak yüksek sıcaklığa maruz kalan beton zamanla (yaklaşık 8-12 yıl) bünyesinde bulundurduğu hidratları kaybederek daha kolay parçalanıp bölünebilir duruma gelmektedir. Bu nedenle sanayi yapılarının aşırı ısınan

yerlerde, fırınların bulunduğu bölgeler veya bacaya denk gelen beton yüzeylerinde betonun sıcaklıktan korunması için ısı yalıtım maddesiyle korunması gerekmektedir. Bunun içinde çoğunlukla ısının derecesine göre özel tuğlalar kullanmak gerekmektedir. Betonun 600°C ısıda direncinin çoğunu kaybetmesi içeriğinde bulunan suyun azalması hatta kaybettiğinden, yangından sonra yapılması gereken düzenli şekilde ıslatarak veya nemli tutarak bu kayıp mukavemeti bir ölçüde geri getirebildiği düşünülmektedir [58].

Betonların yüksek ısılarda mukavemetini sıcaklıktaki artış hızının yanı sıra agrega çeşidi dahil olmak üzere çeşitli parametrelere bağlı değişim gösterir. Hızlı ısı değişiklikleri termal şoka bağlı olarak çatlama ve dağılmalara neden olur. Agregaların genişmesi beton içinde de sıkıntılı bir durum yaratabilir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Yangın esnasında betonun durumu [61].

2.4.1. FRP donatı üzerinde ısının dağılımı

Korozyona dayanıklılığı ile bilinen elyafların yanmadığı bilinirken, FRP kompozitlerde kullanılan matris (reçine) olarak kullanılan çoğu termoset reçineler yanmayı desteklediği bilinmektedir. Ateşe dayanıklı reçine olarak bilinenler bile, dışarıdan kaynaklanan yangınlarda şiddetli şekilde yanacaktır. Bu yanmayı geciktirici matrisler için ısı yayılımının daha düşük olduğu bilinmektedir. Ateşe dayanıklı reçinelerin içeriğinde genel olarak halojen veya brom molekülleri bulundurduğundan yanma işlemi

gerçekleştğinde, bu katkı maddelerinin ateşi bastırıldığı ve kendiliğinden sönmeye zorladığı görülmüştür.

Elyaf takviyeli kompozitler için çoğunlukla kullanılan termoset reçineler yakıldığında fazla miktarda siyah ve yoğun duman oluştururlar. Bu yapıştırma matrislerinde karbon zincirleri dumanın artmasına katkıda bulunur. Isıya dayanıklı olmayan matris ile ateşe dayanıklı matris arasında tek fark, duman miktarının daha az olması ve ateş harici bir kaynak tarafından desteklenmemesidir. Bazı tesisler yangının oluşturabileceği zarar yerine dumandan daha fazla zarar alsa da birçok yapı için yangının kendisi ve sebep olabileceği zarar durumu dumandan çok daha fazla endişe verici olmuştur [59].

Sonuç olarak incelemelerde malzemelerin direnci artan ısıya balı olarak azalmaktadır. FRP elemanlar genellikle yavaş oranlarda sıcaklığa maruz kaldığında malzemenin dış yüzeyi boyunca tek tip ısıtmaya maruz kalmaktadır. Sonuç olarak ısı altında yapısal bozukluklar sıklıkla meydana geldiği görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda kompozit malzemeler çoğunlukla anizotropik ısı sergilerler. Bu kompozitler yanarken siyah duman çıkarırlar ve incelirler. FRP'lerde yüksek ısılarda çalışırken bileşenlerinin davranışına alışlagelmiş olmak için gerekli ısılarda kompozit malzemelerde mekanik ve fiziksel özellikler ciddi oranlarda etkilenir [60].

FRP'ler fazla yüksek olmayan sıcaklıklarda kullanılabilirler ancak daha yüksek ısılarda kimyasal ve fiziki şekil özelliklerini kaybedebilirler. Yani yumuşayabilirler. Modül kaybı düşük sıcaklıklarda sıralı olarak gerçekleşir. Yalnız her polimer matris yumuşamaya ulaştığında bileşiğin camsı bir durumdan elastik bir duruma geçtiği bir ısıya sahiptir. Yumuşamaya başladığını andaki sıcaklığa camsı geçiş sıcaklığı (T_g) denir. Yapı alanında yapılacak bir uygulamada FRP kompozitin geçiş sıcaklığına maruz kalabileceği sıcaklıktan daha fazla olmamasına özen göstermelidir. Yapısal olmayan uygulamalarda ise geçiş sıcaklığı aşılsa kompozit fiziksel olarak değiştiği için geçiş sıcaklığı önem arz eder.

Çalışmalarımızda kullandığımız camsı geçiş sıcaklığı son derece önem teşkil etmektedir. Burada kullandığımız GFRP donatıların camsı geçiş sıcaklığı(T_g) ise 115 °C santigrat derecedir. Reçine geçiş sıcaklığı veya (T_g) cam geçiş sıcaklığı olarak bilinen bu değer, donatının camsı haldeyken yumuşamaya başladığı anda ki sıcaklık değeri olarak bilinir. Yapılan literatür çalışmalarında T_g geçiş sıcaklığının 80-120 °C

arasında değiştiği görülmektedir. Bu donatılar üzerine yapılan (T_g) geçiş sıcaklığı değeri Xiaolu Wang ve Xiaoxiong Zha alışmasından 115 °C olarak alınmıştır[63]. T_g=239 ° F (115 ° C) olarak kabul görmüş ve deneylerde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bir diğer kritik sıcaklık değeri ise 285 °C'dir. Chenchen Li ve Danying Gao yaptıkları araştırmada GFRP donatılarda aderans dayanımının yarısına yakını 270-350 °C'lerde kaybettiğini ortaya koymuştur [13]. Yapılan bu çalışmaya göre çalışmamızda üst sıcaklık değeri 285 °C seçilmiştir.



BÖLÜM 3. MALZEME, YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Malzemeler

3.1.1. GFRP donatı

Bu deneysel çalışmada nervürlü ve kumlu yüzey özelliğine sahip GFRP donatılar kullanılmıştır. Nervürlü donatılar 10 mm ve 12 mm çapında, kumlu donatılar 12 mm ve 16 mm çapındadır. Nervürlenme işlemi donatıların üretim aşamasında yüzeyine 10 mm aralıklarla iplik sararak yapılmıştır. 10 mm ve 12 mm nervürlü donatılarda nervür derinliği 0,5 mm ölçülmüştür. Kumlama işlemi ise düz donatıların yüzeyini epoksili kum kaplama ile yapılmıştır. Kullanılan donatılara ait görseller Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1: Deneysel çalışmada kullanılan kumlu ve nervürlü GFRP donatılar.

GFRP donatılar 320 mm kesilmiş numunelerin fırın ortamında yakılarak içeriğindeki lif oranları ağırlıkça tespit edilmiştir. Elde edilen lifler hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.2). Lif miktarları tablosu Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: FRP donatıların ağırlıkça lif oranları.

İsimlendirme	Normal Ağırlık (gr)	Kaplamasız Ağırlık (gr)	Lif Ağırlığı (gr)
10 mm Nervürlü	53	-	42
12 mm Nervürlü	77,5	-	55
12 mm Kumlu	86,5	68,5	50
16 mm Kumlu	136	126,5	82,5



Şekil 3.2: Yanma sonucu elde edilen cam lifi.

Deneyde kullanılan GFRP donatıların elastisite modülü çekme deneyleri sonucunda alınan bulgulara göre Denklem 3.1’e göre hesaplanarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 3.2’te gösterilmiştir.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.1)$$

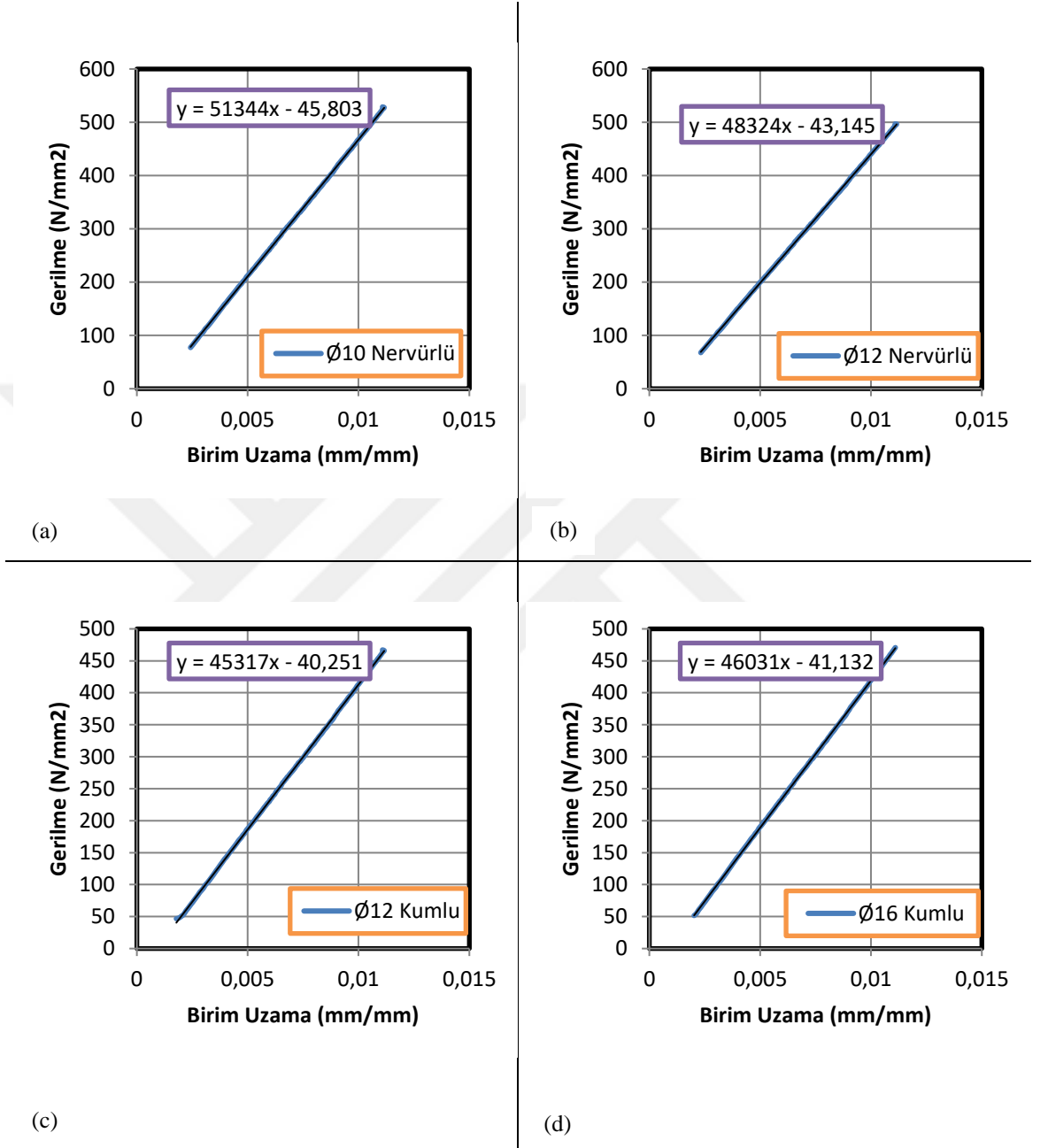
Burada;

E = Elastisite Modülü(N/mm²)

σ = Normal Gerilme(N/mm²)

ϵ = Birim Uzama (mm/mm)

Oluşturulan grafik eğrileri elastisite modülünü vermektedir. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere elastisite modülü yaklaşık olarak 45-51GPa aralığında geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.3: Elastisite modülü eğrileri: (a) $\text{Ø}10$ _Nervürlü, (b) $\text{Ø}12$ _Nervürlü, (c) $\text{Ø}12$ _Kumlu, (d) $\text{Ø}16$ _Kumlu

Tablo 3.2: GFRP donatıların elastisite modülü.

İsimlendirme	Elastisite Modülü (N/mm ²)
10 mm Nervürlü	51345
12 mm Nervürlü	48324
12 mm Kumlu	45317
16 mm Kumlu	46031

Elastisite modülünü elde edebilmek için GFRP donatıları çelik borular içerisine epoksi reçine ile sabitledikten sonra çekme cihazında test edilmiştir(Şekil 3.3). Elde edilen veri eğrilerinden elastisite modülü hesaplanmıştır.



Şekil 3.3: GFRP donatıların çekme testi.

3.1.2. Beton

Çalışmada C20 ve C40 olmak üzere iki farklı dayanım sınıfında geleneksel beton kullanılmıştır. Beton numunelerinde CEM_I 42.5R çimento, 0-4 mm dere kumu, 4-24 mm aralığında mıcır, Sakarya Büyük Şehir Belediyesinin içilebilir çeşme suyu kullanılarak Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi inşaat mühendisliği laboratuvarında beton mikseri ile üretilmiştir. Beton karışımı yaparken su ve çimento ile birlikte yeterli akışkanlığı elde edebilmek için yüksek dayanım göstermesi beklenen

betonlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Beton içeriği ve malzemelerine ait bilgiler alt başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

3.1.2.1. Çimento

Çalışmada Nuh Çimento'nun bir ürünü olan CEM-I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'de sunulmuştur.

Tablo 3.3: Çimento kimyasal özellikleri[64].

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	NaO (%)	Kızdırma Kaybı (%)
Çimento	18,6	4,44	3,85	62,43	3,13	2,81	0,59	0,20	3,07

Tablo 3.4. Çimento fiziksel özellikleri[64].

	Priz Başlangıcı (dk)	Priz Sonu (dk)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Hacim Genleşmesi (mm)	Litre Ağırlığı (g/l)	2 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (Mpa)
Çimento	135-180	190-230	3,14	0-2	980-1030	26-35	56-61

3.1.2.2. Agregalar

Beton karışımında dere kumu ve 2 boyutta kırma taş agrega kullanılmıştır. Çalışmada beton üretimi için kullanılan agregaların tane çapları; 4-12 mm, 12-24 mm ve kum çapı 0-4 mm aralığındadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Beton üretiminde kullanılan malzemeler (dere kumu ve mıcır).

3.1.2.3. Süper akışkanlaştırıcı

Beton üretiminde betonun işlenebilirliği arttırmak ve su miktarını düşürmek için flowaid SCC isimli akışkanlaştırıcı madde kullanılmıştır(Şekil 3.5). Akışkanlaştırıcı karışıma çimento miktarının 0,003 katı kadar ilave edilmiştir.



Şekil 3.5: Süper beton akışkanlaştırıcı.

3.1.2.4. Basınç küp numuneleri test sonuçları

Beton karışım oranları TS 802'den alınarak en büyüğü 24 mm olan kırma taş agregalar kullanılmıştır. Beton içeriğinde süper akışkanlaştırıcı çimento kütesinin 3/1000'ü oranında kullanılmıştır. Hava sürüklenmemiş beton üretimi için hava içeriği %1,4 bulunmuştur. Beton basınç dayanımlarından C20 beton sınıfı için s/ç oranı 0,61, C40 beton sınıfı için 0,41 bulunmuştur. Agrega karışım oranları ise laboratuvarında yapılan testler ile uygun karışım oranları kum %45, 4-12 mm kalınlığındaki mıcırdan %27,5 ve 12-24 mm kalınlığındaki mıcırdan ise %27,5 oranında bulunmuştur. Agrega yoğunluğu 2,7 ve çimento yoğunluğu 3,15 alınarak beton karışım hesabı yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.5'te sunulmuştur.

Tablo 3.5: C20 ve C40 1m3 için beton karışım oranları

Malzeme	Beton Sınıfı	
	C20	C40
Su/Çimento	0,610	0,410
Su(kg)	190,0	190,0
Çimento(kg)	311,5	452,4
1 Nolu Mıcır(kg)	515,0	481,0
2 Nolu Mıcır(kg)	515,0	481,0
Kum(kg)	841,0	787,0
Süper Akışkanlaştırıcı(kg)	0,960	1,35
Toplam(kg)	2373,46	2392,73

Çekip-çıkarma deneylerinde kullanılacak olan numuneler teste tabi tutulmadan önce hazırlanan küp numunelerin 28 günlük dayanımlarına bakmak için beton küp numuneler test edilip kırılmıştır(Şekil 3.6). Sonuçları Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre beton numunelerinin C20 ve C40 beton dayanımını sağladığı görülmüştür. C20 beton dayanım sonuç ortalaması 28,46 MPa gelirken C40 beton dayanım sonuç ortalaması 53,33 MPa tespit edilmiştir(Tablo 3.6, Tablo 3.7).



Şekil 3.6: Standart küp beton numune testi.

Tablo 3.6: C20 küp beton numunesi 28 günlük basınç dayanım sonuçları.

Numune	Yük(N)	Basınç Dayanımı (MPa) (28. gün)
1	691,9	29,75
2	637,2	28,32
3	614,4	27,31
Ortalama	647,8	28,46

Tablo 3.7: C40 küp beton numunesi 28 günlük basınç dayanım sonuçları.

Numune	Yük(N)	Basınç Dayanımı (MPa) (28. gün)
1	1203,3	53,48
2	1216,5	54,07
3	1179,9	52,44
Ortalama	1199,9	53,33

3.1.3. Isıl malzemeler

Deneyde kullanılan ısıl malzemeler; k tipi prop, k tipi hava ve yüzey termokulp, folyo kaplı camyünü boru, folyolu bant ve pürmüz deney numunelerini hazırlanmasında kullanılmıştır.

K tipi prop tası marka olup çift girişli ve -50°C ila 1350°C arası sıcaklık ölçüm aralığına sahiptir. K tipi hava ve yüzey termokulpu -50°C ila 350°C arası sıcak ölçebilmektedir. Bir metre uzunluğa sahiptir (Şekil 3.7). İkiş birbirine geçerek istenilen yerin ısısını kolaylıkla okumaya yaramıştır.



Şekil 3.7: K tipi çift girişli prop ve K tipi yüzey ve hava termokulpu [65-66].

Numunelerin ısıtılma esnasında donatı yüzeylerinin zarar görmemesi ve sonuçları etkilememesi için açıkta kalan donatılar folyo kaplı cam yünü borular ile sarılmıştır. 300+50°C'ye kadar ısıl koruma sağlamaktadır. Donatı içine konulan k tipi termokulpları donatıya yapıştırma, folyo kaplı cam yünlerinin kapatamadığı yerleri kapatmada ve aynı zamanda donatıların bulunduğu yerleri ekstra korumak için kullanılmıştır(Şekil 3.8).

Cam yünü borular folyo bant ile sabitlenmiştir. Folyo bant 50-100 °C aralığındaki sıcaklıklar için koruma sağlamaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Folyo kaplı cam yünü boru ve folyo bant [70-71].

Üretilen numuneleri istenilen sıcaklığa ulaştırabilmek için pürmüz kullanılmıştır. Pürmüz ucundan yaklaşık 800-1200 °C ısı açığa çıkmaktadır (Şekil 3.9).

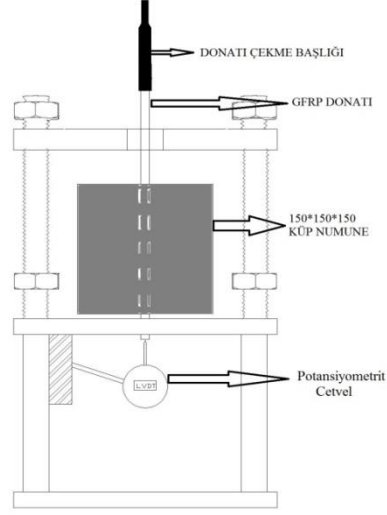


Şekil 3.9: Pürmüz tabancası ve hortumu.

3.2. Deney Yöntemi

Çekip çıkarma deneyleri için çekme makinesine uygun aparat 091-2022 numaralı tez projesi kapsamında tasarlanarak üretilmiştir (Şekil 3.10). Aparat iki hücreden oluşmakta ve sert çelikten yapılmıştır. Birinci hücreye yerleştirilen dijital komparatör saati ile

donatının beton içerisinde hareketi ölçülmüştür. İkinci hücrede ise beton numuneler yerleştirilip sabitlendikten sonra bırakılan boşluktan donatı çekilerek çıkarma testi yapılmıştır.



Şekil 3.10: Numunelerin test hazır şeması ve üretilen makine aparatı.

Çekme deneylerinde okuma cihazı hazırlanan makine aparatına sabitlenmiştir. Deney sırasında okumalar video kaydedici tarafından deney boyunca kayıt altına alınmıştır. Çekme makinesi SHIMADZU marka olup kapasitesi 50KN'dur ve kendisi rölatif yer değiştirme miktarını ölçmektedir. Ancak burada numunelerin alt kısmına dijital komparatör saati olarak okuma cihazı yerleştirilmiştir. Böylelikle okumalar sadece donatının sıyrılma miktarını okuması sağlanmıştır.

Okuma cihazı makine aparatının alt bölümüne konulmuştur. Hazırlanan küp numunelerin alt kısmından 18 mm dışarı çıkan GFRP donatıdan okumalar alınmıştır. Numuneler teste hazırlanırken yerine tam oturması için numune yüzeyinde oluşan parça betonlar zımpara yardımıyla giderilmiştir. Numune alt kısmında donatı yüzeyleri de spiral yardımıyla etrafı temizlenerek çekme sırasında betonda tekrardan sürtünmeye maruz kalmaması için donatı dış çapı küçültülmüştür. Böylelikle sadece istenilen bölgedeki sıyrılma okunmuştur. Hazırlanan numunelere çekme makinesinde çekme hızını 3 mm/dk olarak belirlenmiştir. Yapılan çekme deney düzeneği Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Numunelerin çekme test düzeneği.

GFRP donatı ile hazırlanan beton numuneler aderans dayanımları için dört aşamada incelenmiştir. Sıcaklığa maruz kaldıktan sonra deney numuneleri, GFRP donatılarını; çaptaki artışın etkisi, beton sınıfı farklılıklarının etkileri, donatı yüzey özelliklerinin etkisi ve sıcaklık etkisi değişiminin aderans dayanımına etkisi araştırılmıştır. Burada hesaplar yapılırken nervürlü ve kumlu donatıların yüzeylerindeki girintiler sonuçları çok küçük miktarda etkileyeceğinden dolayı düz kabul edilerek hesaplanmıştır.

GFRP donatılar ile beton arasındaki aderans dayanımını Denklem 3.2'e göre hesaplanmıştır.

$$\tau = \frac{P}{\pi dl} \quad (3.2)$$

Burada;

τ : Aderans dayanımı (N/mm²)

P: Maksimum çekme kuvveti (N)

l: Donatının gömülme derinliği (mm)

d: Donatı çapı (mm)

3.3. Deneysel Çalışma

3.3.1. Deney Parametreleri

Çalışmada sıcaklığa maruz kalmış GFRP donatılı betonlarda, beton sınıfının, donatı çapının, donatı yüzey özelliklerinin kenetlenmeye etkileri incelenmek üzere yapılan tüm deney parametreleri Tablo 3.8’de gösterilmiştir. Tabloda gösterilen isimlendirmelerde Ø10, Ø12 ve Ø16 donatı çapını (mm), N ve K donatının yüzey özelliğini (N=nervürlü, K=kumlu), t22, t115 ve t285 numunelerin hangi sıcaklığa maruz kaldıklarını (22-115-285°C) ve C20-C40 ise beton sınıflarını (28,46Mpa ve 53,33MPa) göstermektedir.

Tablo 3.8: Deneyde kullanılan Nervürlü ve Kumlu GFRP donatılara ait deney parametreleri.

İsimlendirme	Donatı Yüzey Özelliği	Donatı Çapı (mm)	Beton Sınıfı	Kenetlenme Boyu (mm)	Numune Sıcaklığı (°C)	Numune Adeti	Pas Payı
Ø10_N_t22_C20	Nervürlü	Ø10	C20	60	22	3	35
Ø10_N_t115_C20	Nervürlü	Ø10	C20	60	115	3	35
Ø10_N_t285_C20	Nervürlü	Ø10	C20	60	285	3	35
Ø10_N_t22_C40	Nervürlü	Ø10	C40	60	22	3	35
Ø10_N_t115_C40	Nervürlü	Ø10	C40	60	115	3	35
Ø10_N_t285_C40	Nervürlü	Ø10	C40	60	285	3	35
Ø12_N_t22_C20	Nervürlü	Ø12	C20	60	22	3	35
Ø12_N_t115_C20	Nervürlü	Ø12	C20	60	115	3	35
Ø12_N_t285_C20	Nervürlü	Ø12	C20	60	285	3	35
Ø12_N_t22_C40	Nervürlü	Ø12	C40	60	22	3	35
Ø12_N_t115_C40	Nervürlü	Ø12	C40	60	115	3	35
Ø12_N_t285_C40	Nervürlü	Ø12	C40	60	285	3	35
Ø12_K_t22_C20	Kumlu	Ø12	C20	60	22	3	35
Ø12_K_t115_C20	Kumlu	Ø12	C20	60	115	3	35
Ø12_K_t285_C20	Kumlu	Ø12	C20	60	285	3	35
Ø12_K_t22_C40	Kumlu	Ø12	C40	60	22	3	35
Ø12_K_t115_C40	Kumlu	Ø12	C40	60	115	3	35
Ø12_K_t285_C40	Kumlu	Ø12	C40	60	285	3	35
Ø16_K_t22_C20	Kumlu	Ø16	C20	60	22	3	35
Ø16_K_t115_C20	Kumlu	Ø16	C20	60	115	3	35
Ø16_K_t285_C20	Kumlu	Ø16	C20	60	285	3	35
Ø16_K_t22_C40	Kumlu	Ø16	C40	60	22	3	35
Ø16_K_t115_C40	Kumlu	Ø16	C40	60	115	3	35
Ø16_K_t285_C40	Kumlu	Ø16	C40	60	285	3	35

Nervürlü ve kumlanmış yüzeyli GFRP donatılardan her grupta 3'er adet numune hazırlanmıştır. Deneylede GFRP donatılarda toplam 24 grup (72 adet) farklı özelliklere sahip numuneler hazırlanmıştır.

Bu deneylede 10 mm nervürlü GFRP donatılar için tamamı 60 mm kenetlenme (6l_b) ve (3,5d_b) 35 mm pas payı bırakılarak üretilmiştir. 6 tanesi 22 °C'de ve 6 tanesi 115 °C'de, son 6 tanesi de 285 °C'de sıcaklıkta test edilmiştir. 10 mm nervürlü GFRP donatı için toplam 18 adet numune üretilmiştir.

12 mm nervürlü GFRP donatılar için tamamı 60 mm kenetlenme (5l_b) ve (2,91d_b) 35 mm pas payı bırakılarak üretilmiştir. 6 tanesi 22 °C'de, 6 tanesi 115 °C'de ve son 6 tanesi de 285 °C'de test edilmiştir. 12 mm nervürlü ve nervürlü GFRP donatı için toplam 18 adet numune test edilmiştir.

12 mm ince kumlanmış GFRP donatılar için tamamı 60 mm kenetlenme (5l_b) ve (2,91d_b) 35 mm pas payı bırakılarak üretilmiştir. 6 tanesi 22 °C'de, 6 tanesi 115 °C'de ve son 6 tanesi de 285 °C'de test edilmiştir. 12 mm ince kumlanmış GFRP donatı için toplam 18 adet numune test edilmiştir.

16 mm ince kumlanmış GFRP donatılar için tamamı 60 mm kenetlenme (3,75l_b) ve (2,19d_b) 35 mm pas payı bırakılarak üretilmiştir. 6 tanesi 22 °C'de, 6 tanesi 115 °C'de ve son 6 tanesi de 285 °C'de test edilmiştir. 16 mm ince kumlanmış GFRP donatı için toplam 18 adet numune test edilmiştir.

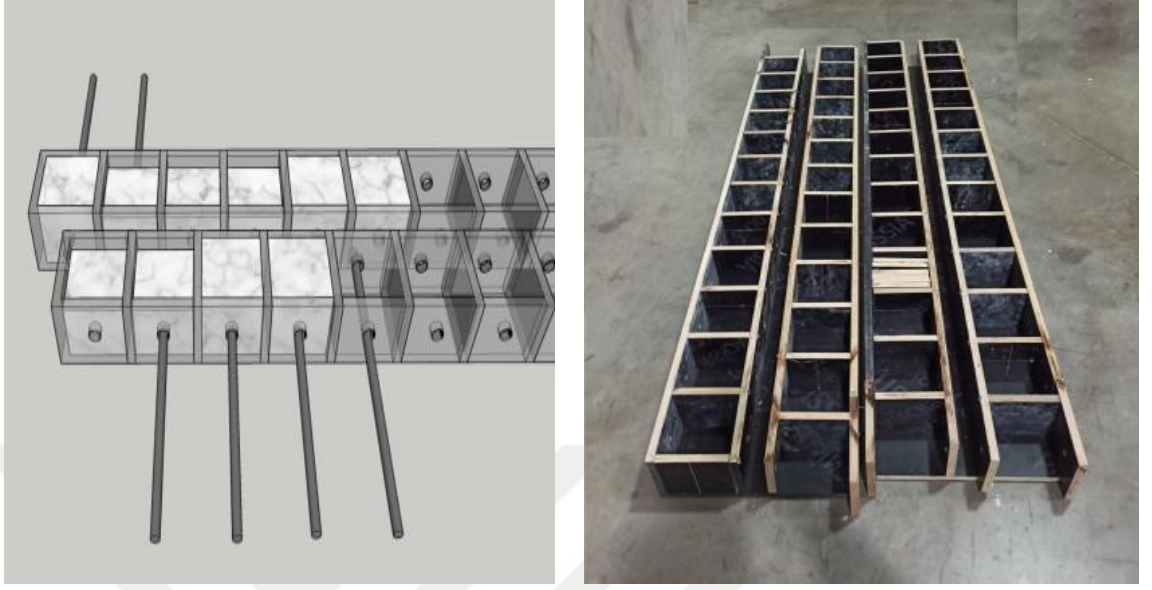
Çalışmada elde edilen verilere göre aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri oluşturulmuştur. 22 °C baz alınarak nervürlü ve kumlu donatıların kritik sıcaklar üzerindeki davranışları yorumlanmıştır. Donatıların yumuşama davranışları, kenetlenme davranışları ve gösterdikleri maksimum aderans dayanımı, donatı çapı, beton dayanım sınıfı donatı yüzey özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3.3.2. Deney numunelerinin üretimi

3.3.2.1. Deney numune kalıpları

Çekip çıkarma numune kalıpları laboratuvar ortamında farklı çalışmalarda kullanılması bakımından 150 mm ayrıtında küp numune boyutlarında plywood kontrplak malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Kalıplara çeşitli çapta donatılar geçecek şekilde paç

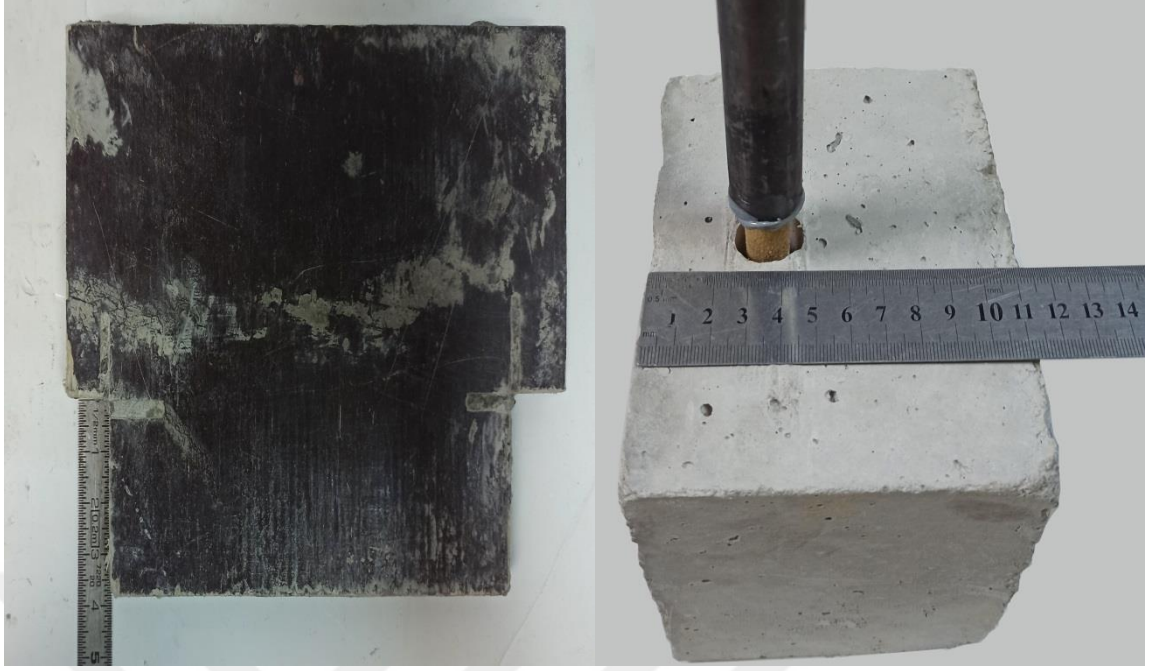
yardımıyla kesit ortasına karşılıklı delikler açılmıştır. Pas payı plywood özel olarak hazırlanan aparat sayesinde beton dökümü sırasında ayarlanmıştır(Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Kalıpların ve donatı oturumları ve hazırlanan plywood kalıplar.

3.3.2.2. Beton yüzeyinde bırakılacak pas payının ayarlama

Pas payı net beton örtüsü demektir. Yani donatının orta noktası ile beton yüzeyi arasında kalan mesafeye pas payı denilmektedir. Yapılan deneyde 10 mm donatılar için 3,5 d_b, 12 mm donatılar için 2,91 d_b, 16 mm donatılar için ise 2,19 d_b kullanılmıştır. Buda demek oluyor ki 150*150*110 küp numuneler için 35 mm pas payı bırakılmıştır. Yönetmelik TS-500 de gösterilen donatılardaki pas payı 25 mm'den daha küçük olamaz ve yangına karşı binaların yangından korunması hakkında ki yönetmelikte kolonların en az 40 mm, döşemelerin ise 25 mm olması gerektiği ibaresinden dolayı 35 mm seçilmiştir[74]. Bu doğrultuda numune içindeki donatıların ısıtma esnasında harcanan süreyi kısaltma imkanı tanımıştır. Pas payı ayarlanırken hazırlanmış olduğumuz ahşap kalıp sayesinde pas payları doğru şekilde ayarlanmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13: Pas payını ayarlama kalıbı ve 35 mm pas payı ayarlanmış numune.

3.3.2.3. Kenetlenme boyunu ayarlama

GFRP donatıların kenetlenme boyları donatı üzerine geçirilen ayırıcı olarak kullanılan hortumlar sayesinde sağlanmıştır. Hortum uçları tel ile sabitlenerek beton dökümü esnasında oluşacak olası hareket önlenmiştir. 60 mm'lik donatı boyu açıkta bırakılarak betonla kenetlenmesi sağlanmıştır. Kenetlenme boyu için bırakılan mesafe 18 mm uzun bırakılmıştır. Bırakılan bu 18 mm'lik yer elektrik bantı ile sarılarak beton ile teması kesilmiştir. Daha sonra beton numuneler dayanımını aldıktan sonra borular donatı yüzeyinden çekilerek çıkarılmıştır(Şekil 3.14).



Şekil 3.14: GFRP donatıların borular ile sarılıp kenetlenme yerlerinin belirlenmesi.

3.3.2.4. GFRP donatıların yerleştirilmesi ve beton dökümü

Asıl numuneler için öncelikle GFRP donatılar kalıp içerisinde yatay şekilde konumlandırılacak şekilde delikler açılmıştır. FRP donatıların yatay şekilde yerleştirilerek beton dökümü esnasında donatıların hareketi önlenmiştir. Kalıplar yağlandıktan sonra, yerleştirilen donatılar tam ekseninde olup kalıp dışına 18 mm küçük çıkma bırakılarak kalıba sabitlenmiştir(Şekil 3.15).



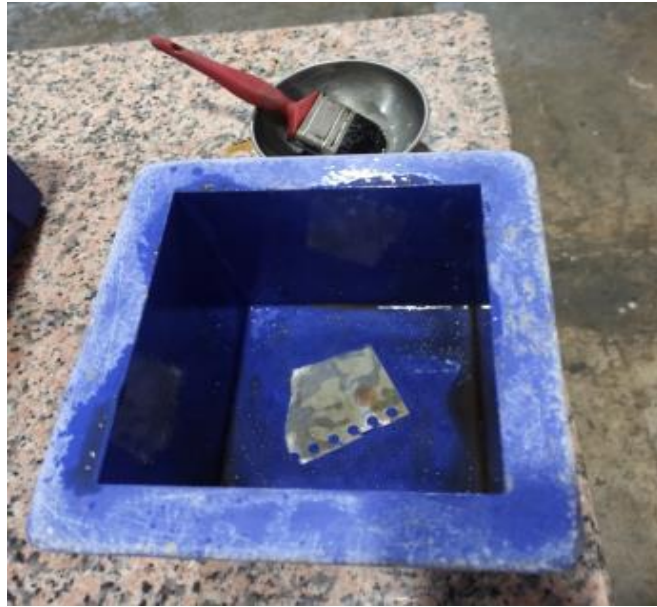
Şekil 3.15: Beton içerisinde kalacak olan kumlu GFRP donatıların kenetlenme boylarının ayarlanması.

Beton malzemeleri laboratuvar ortamında hazırlanarak beton mikseri ile karıştırılmıştır(Şekil 3.16). Betonun kıvamı slump deney seti ile kontrol edilmiştir. Yapılan test sonucunda beton slumpu 18 ± 3 cm olarak bulunmuştur. Hazırlanan beton numunelerinden her dökümden ikişer adet standart küp numune alınarak yirmi dört saat kalıp içerisinde bekletilmiş ve sonrasında kalıptan çıkarıldıktan sonra 28 gün boyunca kür havuzunda dayanım kazanması için bırakılmıştır.



Şekil 3.16: Beton mikseri ve slump deneyi.

Örnek numuneler her beton sınıfında toplamda 3 grup 2'şer olacak şekilde toplamda 6 adet alınmıştır. Numunelerin 3 tanesi 7 günlük sonuç için geri kalan 3 tanesi de 28 günlük sonuçlar için kür havuzunda bekletilmiştir(Şekil 3.17).



Şekil 3.17:Alınan örnek numunelerin yağlanması.

Alınan numuneler 2 tabakada şeklinde alınmıştır. Her tabakada numunelerin sıkışması ve içerisindeki boşluk oranının en aza düşmesi için 20-25 arası tekrar ile şişlenmiştir(Şekil 3.18). Numunelerin şişlenme işlemi bittikten sonra tokmaklanarak bir mala yardımıyla üst yüzeyi düzlenmiştir.



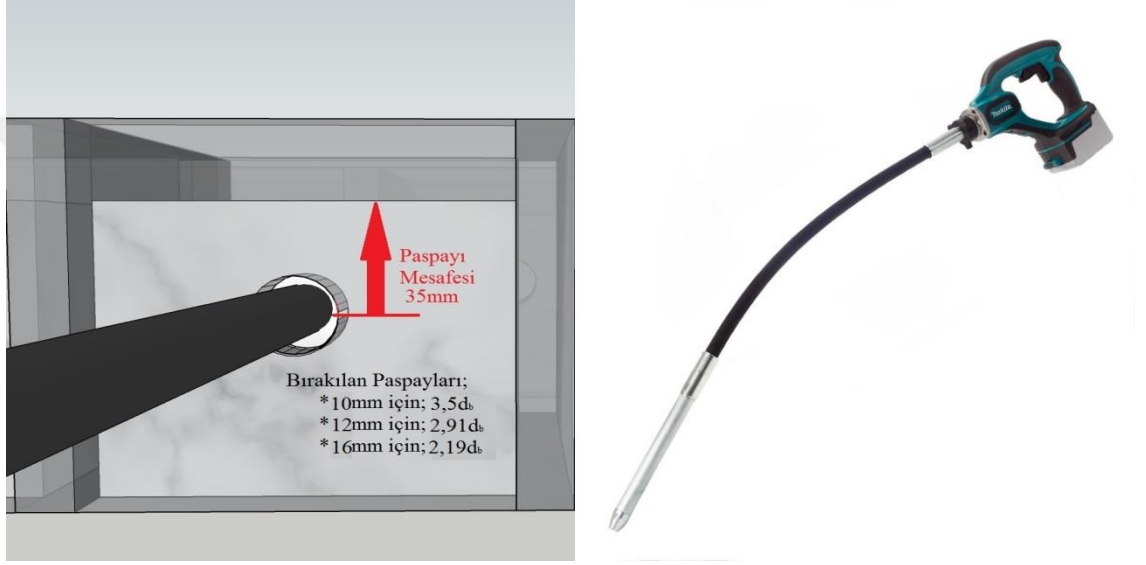
Şekil 3.18: Numunelerin 1. ve 2. tabakasının şişlenmesi.

Alınan beton numunelerin boşluk oranı en aza düşürmek için numuneler 2'şer dakika titreşim sehpasına bırakılmışlardır(Şekil 3.19).



Şekil 3.19: Numunelerin titreşim sehpasında boşluk oranının düşürülmesi.

Çekip çıkarma yapılacak numunelerdeki GFRP donatıların yerleri ayarlandıktan sonra beton döküm işlemi yapılmıştır. Beton önce donatı hizasına kadar 1. tabaka olarak donatı üstü de 2. tabaka olarak ayarlanmıştır. Donatı hizasına beton doldurulduktan sonra numuneler 20-25 tekrar olacak şekilde şişlenmiştir. 2. tabaka ise bırakılacak olan pas payı ayarlaması yapılarak numuneler 35 mm pas payı bırakılması sonucu şişlenmiştir. Pas payı ayarlaması plywood'tan yaptığımız T şeklindeki parça ile ayarlanmıştır. Numunelerin içinde boşluk kalmaması için şarjlı vibratör ile titreşim verilip düzlenmiştir(Şekil 3.20).



Şekil 3.20: Her çaptaki donatı için pas payı gösterimi ve şarjlı el vibratörü.

Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra toplamda 28 gün olacak şekilde kür havuzuna bırakılmıştır. Söküm işlemi bittikten sonra numuneler 28 günlük kür sürecini tamamlaması için kür havuzuna $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de bekletilmiştir. Numuneler 7 gün kürlendikten sonra plastik boru kısımları sökülmüştür. Numunelerin kürlenme işlemi bittikten sonra çıkarılmış ve oda sıcaklığında numune içerisindeki suyun boşalması için yaklaşık 1 hafta beklenmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21: Dökülen numunelerin kalıp içerisinden sökülmesi ve kür havuzunda bekletme.

3.3.2.5. Numuneleri istenilen sıcaklık değerine ulaştırma

Yapılan deneysel çalışmada numuneleri ısıtma işlemleri için kendi arasında oda sıcaklığı, Tg(geçiş) sıcaklığı ve yüksek sıcaklık olmak üzere 3 grupta ayrılmıştır. Oda sıcaklığında (22 ± 2) teste tabi tutulacaklar için deney yapılacak laboratuvar içerisinde dış ortam sıcaklığına maruz kalmayacak şekilde muhafaza edilmiştir. 1 hafta numune içerisindeki suyun atılması beklenmiştir. 115°C ve 285°C sıcaklığa maruz kalacak numuneler ise öncelikle donatının bulunduğu bölüm ısıya dayanıklı folyolu bant ile iyice sarılmıştır. Numune bant ile sarıldıktan sonra K tipi ısı propu ısının geleceği 35 mm'lik pas payının bulunduğu bölüme folyolu bant ile sarılarak düzgün ve doğrusal olarak yerleştirilmiştir. Yerleştirme sırasında propun sağa veya sola kayması engellenmiştir. Prop daha sonra numune üzerine folyolu bant yardımıyla sabitlenmiştir(şekil 3.22).



Şekil 3.22: Numunenin folyolu bant ile sarılması ve propun yerleştirilmesi.

Numuneler ısıtılmaya maruz bırakılmadan önce İzocam markanın folyo kaplı camyünü boruları (prefabrik boru) ile üst ve alt kısımdan geçirilmiştir. TS-EN 14707 standartlarında üretilen prefabrik boruların ısı hizmet sıcaklıkları $300+50^{\circ}\text{C}$ ifade edilmiştir[72]. K tipi proplar prefabrik boru içerisinde dışarıya içerideki ısıyı okuyabilmek için uzatılmıştır. Donatının ve propun boru içerisinde çıkış noktasında boşluk kaldığı için içerisine el ile cam yünü takviye edilip üzeri folyolu bant ile sıkıca kapatılmıştır(şekil 3.23).



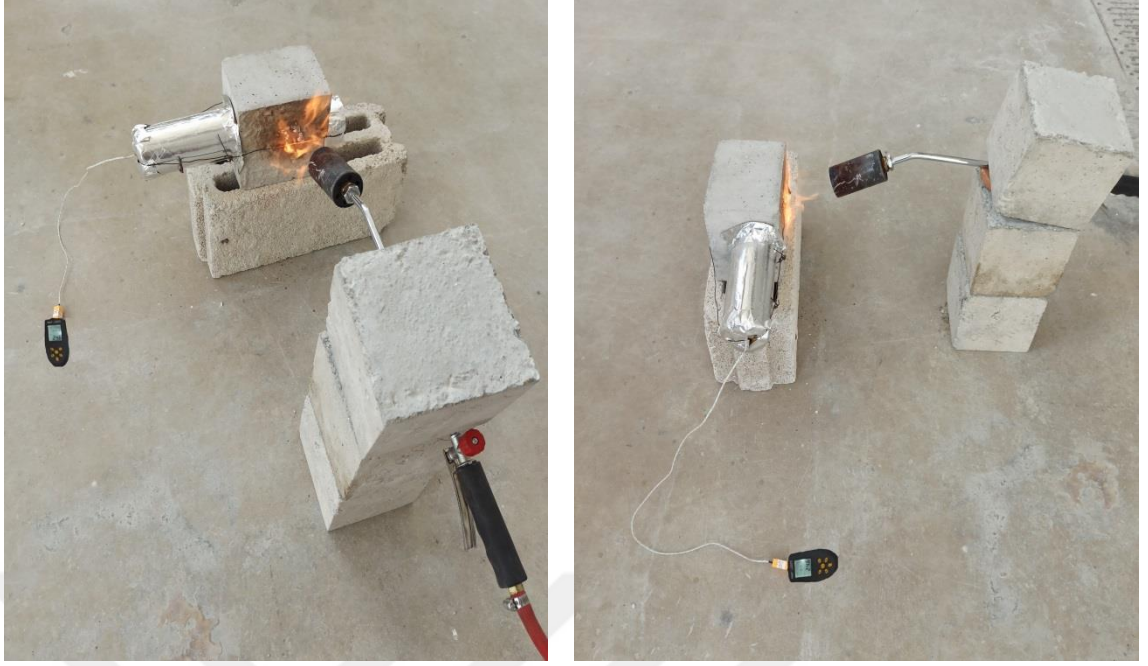
Şekil 3.23: Prefabrik borunun donatı yüzeyine yerleştirilmesi.

Prefabrik boruların beton ile bağlantısının kesilebilmesi için temas ettiği yerlere folyolu bant yapıştırılıp, alt ve üst kısım tel ile sabitlenmiştir. Böylece donatının açık yüzeyleri dışarıdan gelecek olan ısıya karşı üretilmiştir(şekil 3.24).



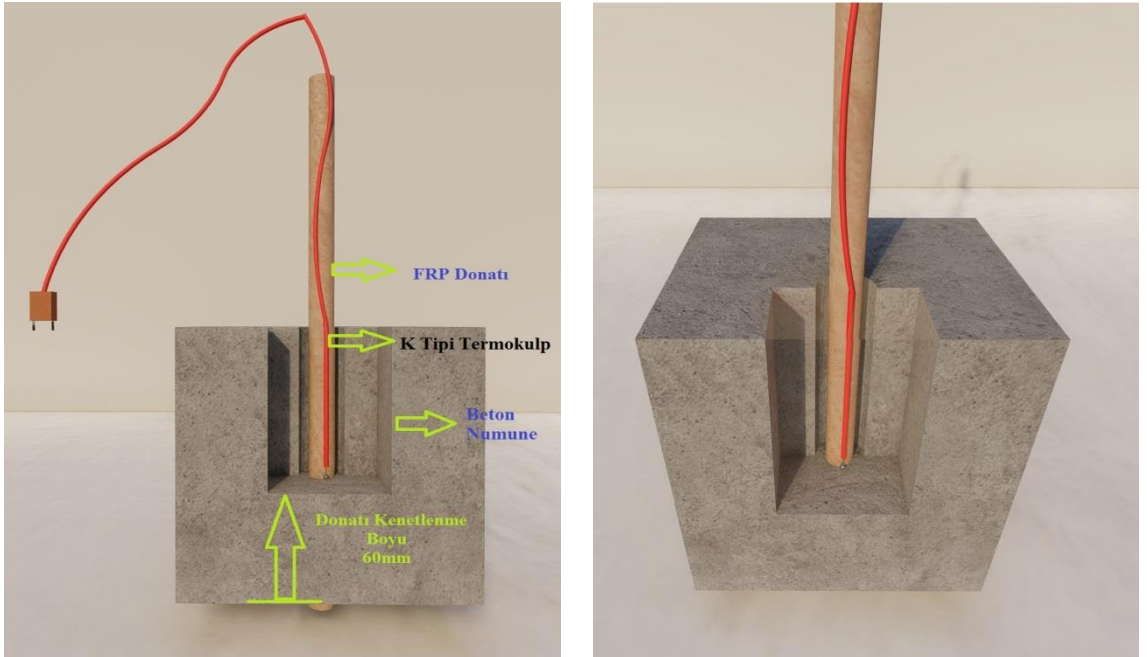
Şekil 3.24: Açıkta kalan donatının Prefabrik camyünü borular ile sarılması.

Donatılar ısıya karşı muhafaza edildikten sonra numuneleri istenilen sıcaklığa çıkarabilmek için tüplü ısı işlem düzeneği kurulmuştur. Düzenek kurulurken ısı kaybını en aza indirebilmek için zemin ile teması kesilerek bims tuğlalar ile yükseltilmiş. GFRP donatının beton ile kenetlenmiş olan bölgesi yangın esnasında oluşabilecek yüksek ateşi temsilen pürmüz ile ısıtılmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25: Numunenin pürmüz yardımıyla istenilen sıcaklığa ulaştırılması.

Numuneler ısıtılma esnasında K tipi prop ile ateşin geldiği noktadaki ısıyı her 5 dakikada bir ölçüm alınmıştır. Her numune 115°C ve 285°C için istenilen değere gelene kadar ısıtılmıştır. C20 ve C40 beton numuneleri için ayrı ayrı değerler alınmıştır. Numune içerisindeki K tipi termokulplar şematik olarak Şekil 3.26'daki gibi yerleştirildiği yerden ölçümler alınmıştır.



Şekil 3.26: K tipi termokulpun beton içerisindeki konumu.

Numunelere tek yüzeyden ateş tutulmasının nedeni olası gerçek yangın seneryosunda ısının beton yapıların tek yüzeyine etki etmesinden kaynaklanmaktadır. Kolonlarda duvar örülmesinden dolayı tek yüzeylerinin açık olması ve döşemelerin üst yüzeyinde yangın oluşmasından dolayı üretilen numunelere tek yüzeyden ısı verilmiştir.

Isıtma esnasında düzeneğin içinde bulunan prop ile beton sıcaklığı ve donatının sarılmış olduğu yerler zarar görüp görmediği kontrol edilmiştir. Isıtma esnasında donatının zarar görmediği tespit edilmiştir. Isıtma işlemleri tamamlandıktan sonra numuneler çekip çıkarma deneyleri için başlıklandırma işlemine geçilmiştir.

3.3.2.6. GFRP donatıları başlıklandırma

Hazırlanan numunelerde çekme deneyi esnasında makine ağzının donatıları ezmemesi için çelik boru yaptırılmıştır. Bunun üste donatının üstüne net 100 mm girecek şekilde ve çekme yeri 50 mm olacak şekilde toplamda 150 mm uzunluğunda çelik boru profiller kullanılmıştır. Donatılar için iki çap kullanılmıştır. 10 mm ve 12 mm GFRP donatılar için iç net çap ölçüsü 16 mm olan çelik boru ve 16 mm GFRP donatılar için iç net çap ölçüsü 21 mm olan çelik boru profiller kullanılmıştır. Çelik boruların et kalınlığı 3 mm olup doğalgaz borularından üretilmiştir. Profil boruların her biri 150 mm kesilip içerisine koyulacak olan epoksiyi donatılar daha iyi kenetlenebilmeleri için torna makinelerinde 70 mm uzunluğunda her iki taraftan dış açılmıştır. Üst 50 mm ise pres makinesinde preslenerek çekip çıkarma deneyleri için makine başlığına girecek şekilde ayarlanmıştır (Şekil 3.27).



Şekil 3.27: Çekme deneyleri için hazırlanan çelik borular ve boru içine açılan diş.

Hazırlanan boru profillerin içersine Sikadur-330 iki bileşenli epoksi esaslı doyumma reçinesi ve yapıştırıcısı kullanılmıştır(Şekil 3.28). A ve B bileşeni olmak üzere iki bileşen 4:1 ağırlıkça oranında konularak karışım hazırlanmıştır. Karışım boş bir kaba konularak elektrikli matkap ucuna takılan karıştırma aparatı ile 3 dakika tam karıştırılarak hazırlanmıştır[73].



Şekil 3.28: Çelik boru içersine konulan epoksi bileşeni.

Karışım bittikten sonra hazırlanan epoksi sosis tabancası içersine doldurulmuştur. Çelik borular içersine kolay yerleştirilmesine yardımcı olmuştur (Şekil 3.29).



Şekil 3.29: Hazırlanan epoksinin sosis tabancası içerisine konulması.

Epoksi karışımı 72 başlık için toplamda 1,5 kg karışım hazırlanmıştır. Epoksi karışımı hazırlanan boruların içerisine tam dolacak şekilde sıkılmıştır(Şekil 3.30).



Şekil 3.30: Epoksinin çelik borular içine doldurulması.

Doldurulan borular donatının çekim yönün dik gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Yerleştirme esnasında donatının tam girdiği ve tüm yüzeyinin epoksi ile kaplanıp içerisinde boşluk bırakılmamasına özen gösterilmiştir(Şekil 3.31).



Şekil 3.31: Epoksi dolu boruların donatıya yerleştirilmesi.

Başlıklama işlemi yapılırken yerleştirilen boruların sağa sola kayması önlenmiştir. Boruların hepsi sabit tek bir yöne hizalanarak konulmuştur(Şekil 3.32). Başlıklar donatılara yerleştirildikten sonra oda sıcaklığında yedi gün beklemeye alınmıştır. Yapılan epoksi karışımının yedi gün sonunda göstereceği çekme dayanımı 30N/mm^2 olduğu bilinmektedir[73]. Numuneler üst üste dizilerek başlıkların zarar görmesi veya oynaması engellenmiştir. Bekleme süresi dolduktan sonra numuneler çekip çıkarma deneyleri için hazır duruma gelmiştir.



Şekil 3.32: Epoksinin kuruması için numunelerin oda sıcaklığında bekletilmesi.

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Yüksek sıcaklıklardaki (115-285 °C) numuneler üzerinde aderans dayanımını etkileyen donatı çapının artmasına bağlı etki, donatı yüzey özelliklerinin etkisi ve beton sınıfı farklılıklarının aderans dayanımı üzerinde nasıl etkileyeceği araştırılmıştır. Burada 150*150*110 mm olacak şekilde beton numunelerinin içerisine GFRP donatılar yerleştirilerek çekip çıkarma deneyleri yapılmıştır.

Donatı çapındaki artış ise ikili gruplar halinde bakılmıştır. 10 mm nervürlü GFRP ile 12 mm nervürlü GFRP donatılar birbirleri arasında incelenirken, 12 mm kumlu GFRP ile 16 mm kumlu GFRP donatılar birbirleri arasında karşılaştırılmışlardır. Donatı yüzey özelliklerinin etkisi ise nervürlü donatılar ile kumlu donatılar arasında karşılaştırma olmuştur. Burada 12 mm nervürlü GFRP donatılar ile 12 mm kumlu GFRP donatılar birbirleriyle karşılaştırılmışlardır. Numuneler 22 °C ile kıyaslanmıştır.

GFRP donatılarla hazırlanan toplamda sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığında çekip çıkarma deneyine tabi tutulan toplamda 24 grup numunenin sonuçları bu bölümde sunulmuştur. sıcaklığa maruz kalmış numunelerin aderansına beton dayanımının, GFRP donatı çapının ve Donatı yüzey özelliklerinin etkisi araştırılmıştır. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de nervürlü ve kumlu GFRP donatıların aderans dayanımları verilmiştir.

Tablo 4.1: Nervürlü GFRP donatıların aderans dayanımları.

İsmlendirme	Aderans Dayanımı (MPa)			Standart Sapma (S)
	1	2	3	
Ø10_N_t22_C20	9,21	10,10	10,19	0,54
Ø10_N_t115_C20	8,15	9,94	10,79	1,34
Ø10_N_t285_C20	2,30	3,67	3,82	0,83
Ø10_N_t22_C40	11,28	12,84	13,27	1,04
Ø10_N_t115_C40	10,02	11,74	13,67	1,82
Ø10_N_t285_C40	2,20	4,00	4,70	1,29
Ø12_N_t22_C20	9,42	7,95	11,51	1,79

Tablo 4.1: (Devamı) Nervürlü GFRP donatıların aderans dayanımları.

Ø12_N_t115_C20	7,77	10,10	10,80	1,59
Ø12_N_t285_C20	2,28	3,76	4,11	0,96
Ø12_N_t22_C40	16,66	17,46	17,89	0,62
Ø12_N_t115_C40	12,95	13,76	15,29	1,17
Ø12_N_t285_C40	4,60	5,18	*	0,41

Tablo 4.2: Kumlu GFRP donatıların aderans dayanımları.

İsmlendirme	Aderans Dayanımı (MPa)			Standart Sapma (S)
	1	2	3	
Ø12_K_t22_C20	6,23	7,00	7,95	0,85
Ø12_K_t115_C20	5,31	5,33	6,46	0,65
Ø12_K_t285_C20	2,71	2,74	3,10	0,21
Ø12_K_t22_C40	12,01	13,00	13,86	1,00
Ø12_K_t115_C40	11,80	13,25	13,74	1,73
Ø12_K_t285_C40	4,28	5,04	6,27	1,00
Ø16_K_t22_C20	7,00	8,97	*	1,35
Ø16_K_t115_C20	4,81	5,96	7,65	1,43
Ø16_K_t285_C20	3,14	4,08	*	0,66
Ø16_K_t22_C40	10,04	11,52	11,95	0,92
Ø16_K_t115_C40	7,87	9,88	11,33	1,00
Ø16_K_t285_C40	4,44	4,87	5,10	0,33

Test sonuçları incelendiğinde numune gruplarının dayanımları birbirine yakın ve standart sapması ikinin altında çıkmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak donatı çap artışı aderans dayanımını nervürlü donatılarda olumlu etkilerken kumlu yüzeye sahip GFRP donatılarda olumsuz etkilemiştir. Sıcaklık arttıkça kenetlenme dayanımı düşerken beton dayanımının artışı kenetlenmeyi artırmıştır. Numunelerdeki maksimum yükteki sıyrılma noktaları, donatıların mekanik kenetlenme özelliklerinin farklılıklarından dolayı ortaya çıkmıştır. Donatıların maksimum yükteki sıyrılma noktaları Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Maksimum yük altında kritik sıyrılma noktaları.

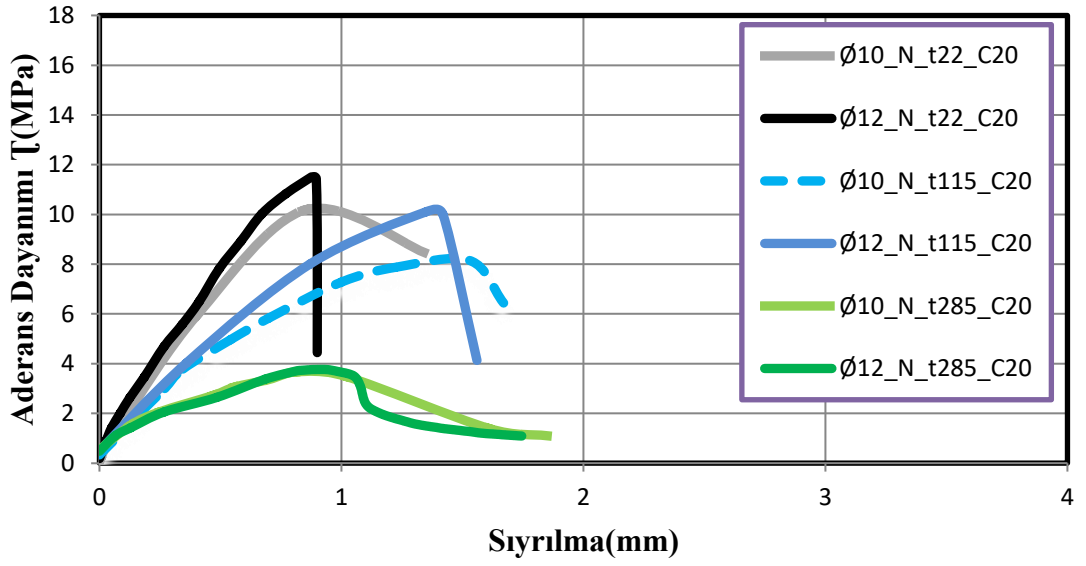
İSİMLENDİRME	MAKSİMUM YÜK (KN/mm ²)(T)	KRİTİK SİYRİLMA NOKTASI(mm)
Ø10_N_t22_C20	10,19	0,85
Ø10_N_t115_C20	8,15	1,53

Tablo 4.3: (Devamı) Maksimum yük altında kritik sıyrılma noktaları.

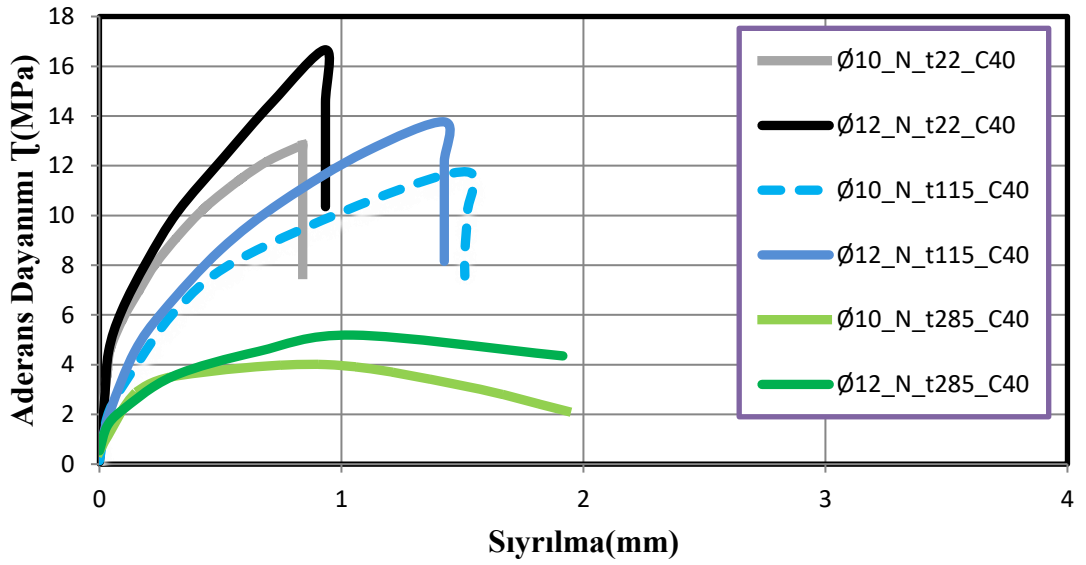
Ø10_N_t285_C20	3,67	0,81
Ø10_N_t22_C40	12,84	0,84
Ø10_N_t115_C40	11,74	1,52
Ø10_N_t285_C40	4,00	0,93
Ø12_N_t22_C20	11,51	0,87
Ø12_N_t115_C20	10,10	1,35
Ø12_N_t285_C20	3,76	0,81
Ø12_N_t22_C40	16,66	0,93
Ø12_N_t115_C40	13,76	1,42
Ø12_N_t285_C40	5,18	1,04
Ø12_K_t22_C20	7,95	0,64
Ø12_K_t115_C20	6,46	0,96
Ø12_K_t285_C20	3,10	0,58
Ø12_K_t22_C40	13,00	0,60
Ø12_K_t115_C40	11,80	1,31
Ø12_K_t285_C40	5,04	0,84
Ø16_K_t22_C20	7,00	0,67
Ø16_K_t115_C20	5,96	1,02
Ø16_K_t285_C20	4,08	0,75
Ø16_K_t22_C40	11,52	0,68
Ø16_K_t115_C40	9,88	1,11
Ø16_K_t285_C40	4,87	0,75

4.1. Nervürlü GFRP donatıların sıcaklık altındaki davranışları

Nervürlü GFRP donatıların sıcaklık altında çekip çıkarma deneyleri yapılmış numunelerin temsili aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Grafikler oda sıcaklığı, Tg(geçiş)sıcaklığı ve yüksek sıcaklık (22-115-285 °C) olarak üç ayrı sıcaklık beton sınıflarına göre hazırlanmıştır. Deneyler esnasında donatılarda herhangi bir kopma meydana gelmemiş tüm donatılar beton içerisinden sıyrılmıştır. Hazırlanan grafikler 22 °C baz alınarak kıyaslama yapılmıştır. Grafikler incelendiğinde kenetlenme davranışı, yumuşama davranışı ve aderans dayanımları tespit edilebilmektedir.



Şekil 4.1: C20 beton sınıfına sahip nervürlü GFRP donatıların sıcaklık altında grafik dağılımları.



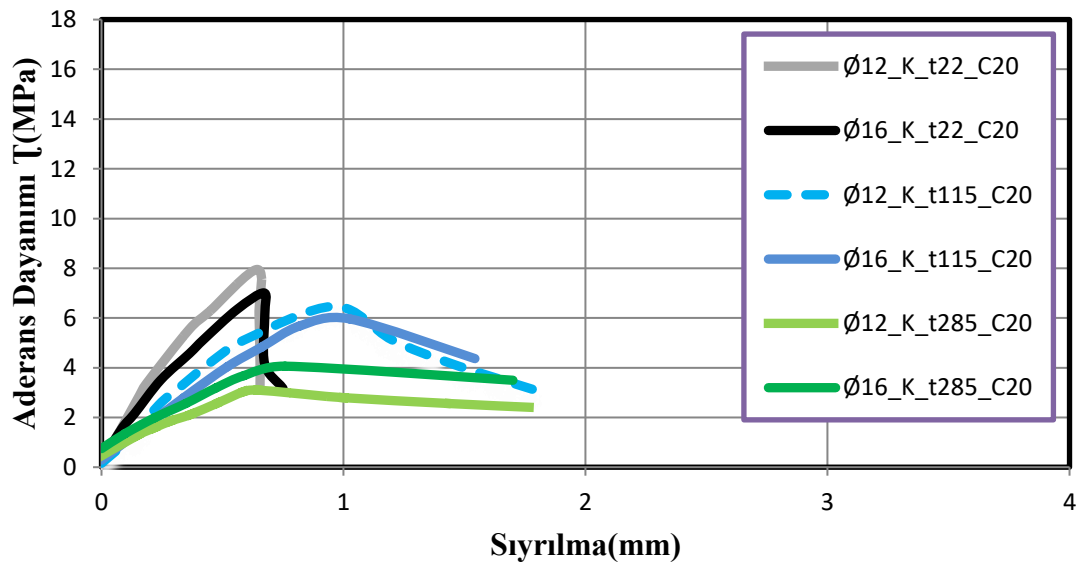
Şekil 4.2: C40 beton sınıfına sahip nervürlü GFRP donatıların sıcaklık altında grafik dağılımları

Ø10-Ø12_N_C20-C40 GFRP donatılara bakıldığında, 22 °C ve 115 °C’de donatı çapı ve beton dayanımının artmasıyla kenetlenmenin arttığı ve daha yüksek aderans dayanımlarda sıyrılma gerçekleştiği tespit edilmiştir. 285 °C’de ise donatılarda kenetlenmenin büyük ölçüde düştüğü görülürken C20 beton dayanımında aynı aderans dayanımlarında sıyrıldıkları ve C40 beton dayanımında 12 mm nervürlü donatının 10 mm nervürlü donatıya göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Sıcaklığa maruz

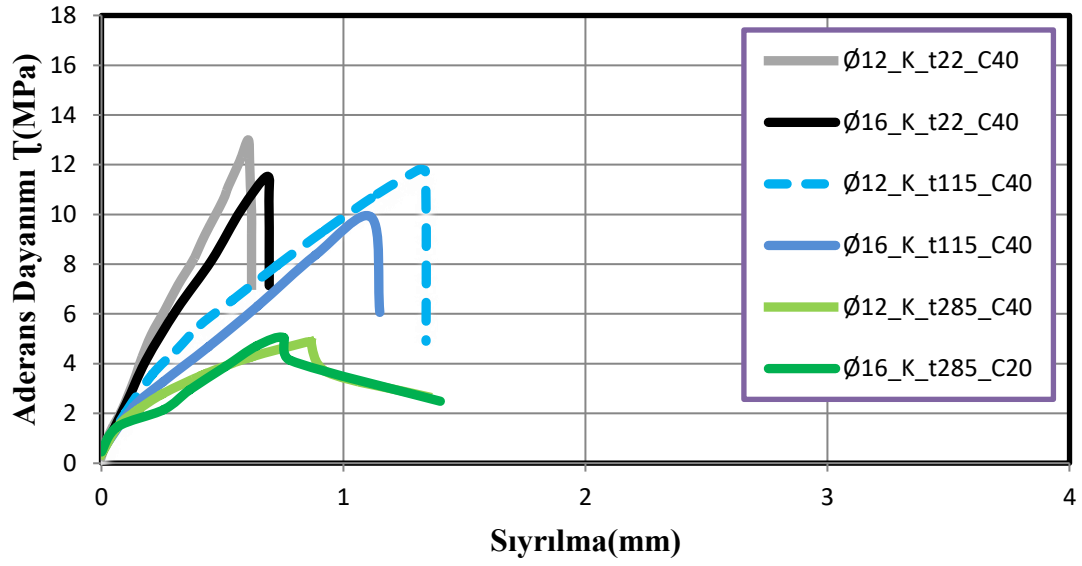
numunelerde 10 mm donatılarda yumuşamanın daha erken başladığı ve kenetlenmenin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerde sıcaklığın artmasıyla birlikte donatılarda yumuşama, kenetlenme ve aderans dayanımlarında da azalmalar tespit edilmiştir. 285 °C’de bu azalmalar büyük ölçüde görülmektedir. 22 °C’de baz alındığında sıcaklık arttıkça numunelerin daha düşük aderans dayanımlarında sıyrıldıkları tespit edilmiştir. Nervürlü donatılar maksimum sıyrılma dayanımına eriştikten sonra ani bir dayanım kaybı ile beton içerisinden sıyrılmıştır.

4.2. Kumlu GFRP donatıların sıcaklık altındaki davranışları

Kumlu GFRP donatıların deneyleri yapılmış numunelerin aderans dayanımı ortalamaları kullanılarak temsili grafikler aşağıda verilmiştir(Şekil 4.3 ve Şekil 4.4). Grafikler hazırlanırken C20 ve C40 beton numunelerine göre ayrı ayrı verilmiştir. Grafiklerde 22-115-285°C olarak üç ayrı sıcaklık beton sınıflarına göre hazırlanmıştır. Deneyler esnasında donatılarda herhangi bir kopma meydana gelmezken bazı numunelerde betonun kırılması sonucu test edilememiştir.



Şekil 4.3: C20 beton sınıfına sahip kumlu GFRP donatıların sıcaklık altında grafik dağılımları.

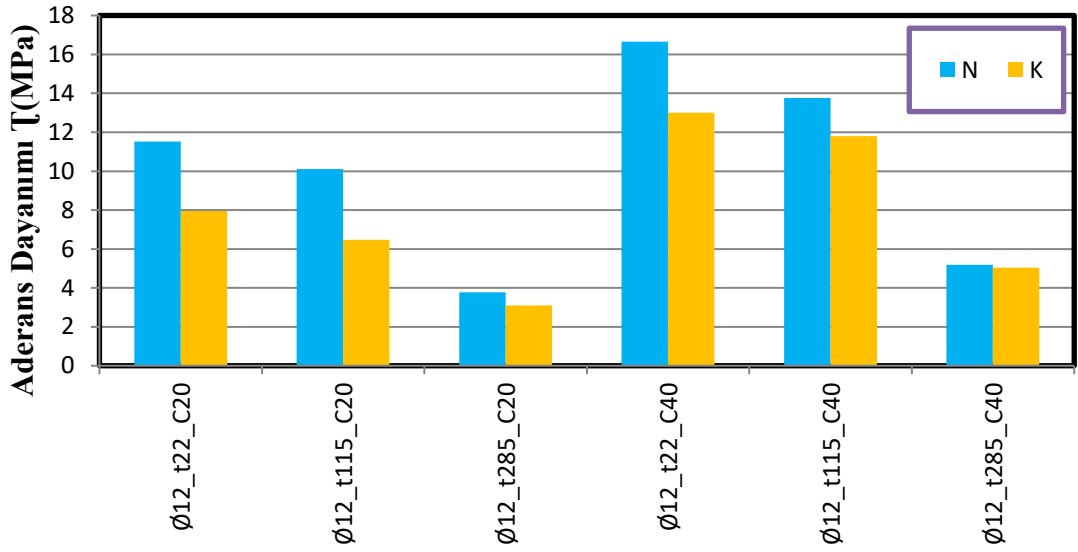


Şekil 4.4: C40 beton sınıfına sahip kumlu GFRP donatıların sıcaklık altında grafik dağılımları.

Ø12-Ø16_K_C20-C40 GFRP donatılara bakıldığında, 22 °C ve 115 °C’de beton dayanımının artmasıyla kenetlenmenin arttığı ve daha yüksek aderans dayanımlarda sıyırılma gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ancak donatı çapının artmasıyla 22 °C ve 115 °C’de aderans dayanımının ters yönde etkilendiği anlaşılmıştır. 285 °C’de ise donatılarda kenetlenmenin büyük ölçüde düştüğü görülürken C40 beton dayanımında aynı aderans dayanımlarında sıyırıldıkları ve C20 beton dayanımında 12 mm kumlu donatının 16 mm kumlu donatıya göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Sıcaklığa maruz numunelerde C20 beton sınıfında yumuşamanın daha erken başladığı ve kenetlenmenin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerde sıcaklığın artmasıyla birlikte donatılarda yumuşama, kenetlenme ve aderans dayanımlarında da azalmalar tespit edilmiştir. 285 °C’de bu azalmalar büyük ölçüde görülmektedir. 22 °C’de baz alındığında sıcaklık arttıkça numunelerin daha düşük aderans dayanımlarında sıyırıldıkları tespit edilmiştir.

4.3. GFRP Donatı Yüzey Özelliklerinin Sıyrılmaya Ve Aderansa Etkisi

Kumlu ve nervürlü GFRP donatıların deneyleri yapılmış numunelerin aderans dayanım grafikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.5). Grafiklerde 12 mm nervürlü ve 12 mm kumlu GFRP donatılar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.5: GFRP donatıların yüzey özelliklerinin karşılaştırması.

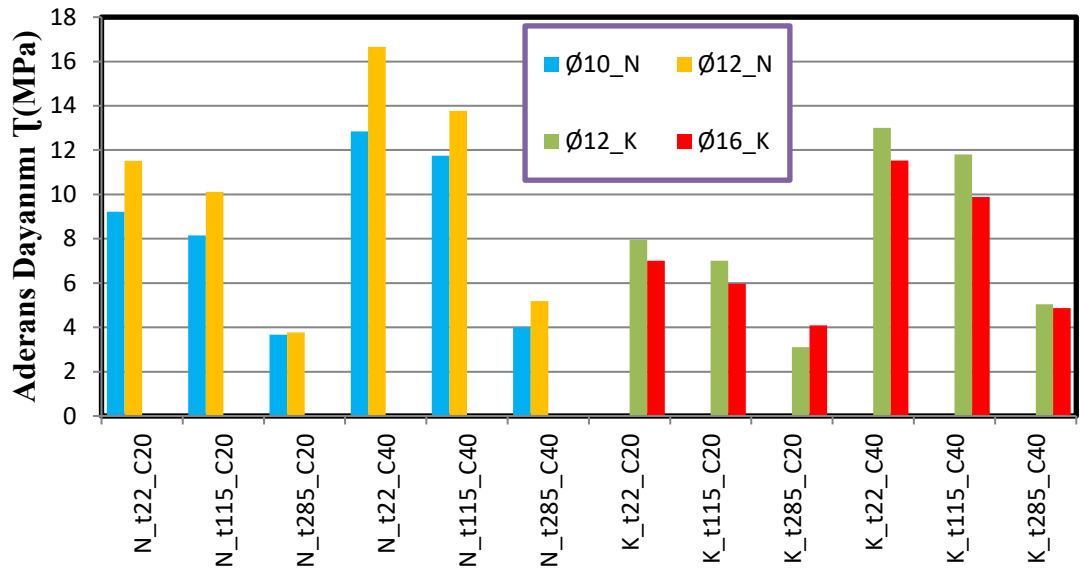
Ø12_N-K_C20-C40 GFRP donatılara bakıldığında, 22 °C ve 115 °C’de nervürlü donatıların kumlu donatılara kıyasla betona daha iyi kenetlendiği ve daha yüksek aderans dayanımlarında sıyrılma gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. 285 °C’de ise donatılarda yüzey özelliği farkının kalmadığı iki donatı çeşidi içinde yaklaşık aynı sonuçların görüldüğü görülmüştür. C20 ve C40 aderans dayanımlarına bakıldığında nervürlü donatıların kumlu donatılara göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Kumlu donatıların sıyrılma noktası nervürlü donatılara göre daha erken olduğu görülmektedir. Bunun nedenini kenetlenme yüzeyi girintili ve nervürleşmeye yakın olan donatının aderans dayanımının daha fazla olduğu görülmüştür. Numunelerde sıcaklığın artmasıyla birlikte donatılarda yumuşuma, kenetlenme ve aderans dayanımlarında da azalmalar tespit edilmiştir. 285 °C’de bu azalmalar büyük ölçüde görülmektedir. 22 °C’de baz alındığında sıcaklık arttıkça numunelerin daha düşük aderans dayanımlarında sıyrıldıkları tespit edilmiştir. Numunelerin sayısal verileri aşağıda sunulmuştur.

Ø12_N_C20 GFRP donatıların 22-115-285 °C’de aderans dayanımları sırasıyla 11,51 MPa 10,10 MPa ve 3,76 MPa tespit edilmiştir. Ø12_K_C20 GFRP donatıların ise sırasıyla 7,95 Mpa 6,46 Mpa ve 3,10 MPa tespit edilmiştir. 22 °C’de %44,7 aderans dayanım farkı, 115 °C’de %56,3 aderans dayanım farkı ve 285 °C’de ise %21,3’lük bir aderans dayanım farkıyla C20 beton dayanım sınıfında nervürlü donatıların kumlu donatılara göre üstün olduğu anlaşılmıştır.

Ø12_N_C40 GFRP donatılarda ise 22-115-285 °C’de aderans dayanımları sırasıyla 16,66 MPa 13,76 MPa ve 5,18 MPa olarak ölçülmüştür. Ø12_K_C40 GFRP donatılarının ise 13,00 MPa 11,80 MPa ve 5,04 MPa tespit edilmiştir. 22 °C’de %28,1 aderans dayanımı farkı, 115 °C’de %16,6 aderans dayanımı farkı ve 285 °C’de ise %2,7’lük bir aderans dayanımı farkıyla C40 beton dayanım sınıfında nervürlü donatıların kumlu donatılara göre üstün olduğu anlaşılmıştır. Ancak yüzey özellikleri araştırmasında C40 beton numunelerinde ki fark C20 beton numunelerinde ki farka oranla azaldığı görülmektedir.

4.4. GFRP Donatı Çapının Aderansa Etkisi

GFRP numunelerin donatı çapı artışıdaki ortalama aderans dayanımı etkileri Şekil 4.6’de sunulmuştur. Ø10-Ø12_N ve Ø12-Ø16_K donatılar kendi içinde kıyaslanmıştır.



Şekil 4.6: GFRP donatıların çap artışının aderansa etkisi.

Ø10_N_C20 GFRP donatılarının 22-115-285 °C’de aderans dayanımları sırasıyla 9,21 Mpa 8,15 Mpa ve 3,67 MPa tespit edilmiştir. Ø12_N_C20 GFRP donatılarının ise sırasıyla 11,51 MPa 10,10 MPa ve 3,76 MPa tespit edilmiştir. GFRP donatı çapındaki artıştan 22 °C’de %24,9 artış, 115 °C’de %23,9 artış ve 285 °C’de %2,4’lük bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Ø10_N_C40 GFRP donatılarda ise 22-115-285 °C'de aderans dayanımları sırasıyla 12,84 MPa 11,74 MPa ve 4,00 MPa tespit edilirken Ø12_N_C40 GFRP donatıların ise sırasıyla 16,66 MPa 13,76MPa ve 5,18 MPa tespit edilmiştir. Donatılarda çap artışında 22 °C'de %29,75 artış, 115 °C'de %17,2 artış ve 285 °C'de %29,5'lük bir artış olduğu tespit edilmiştir. Nervürlü GFRP donatılarda çap artışının olumlu yönde etkilendiği tespit edilmiştir.

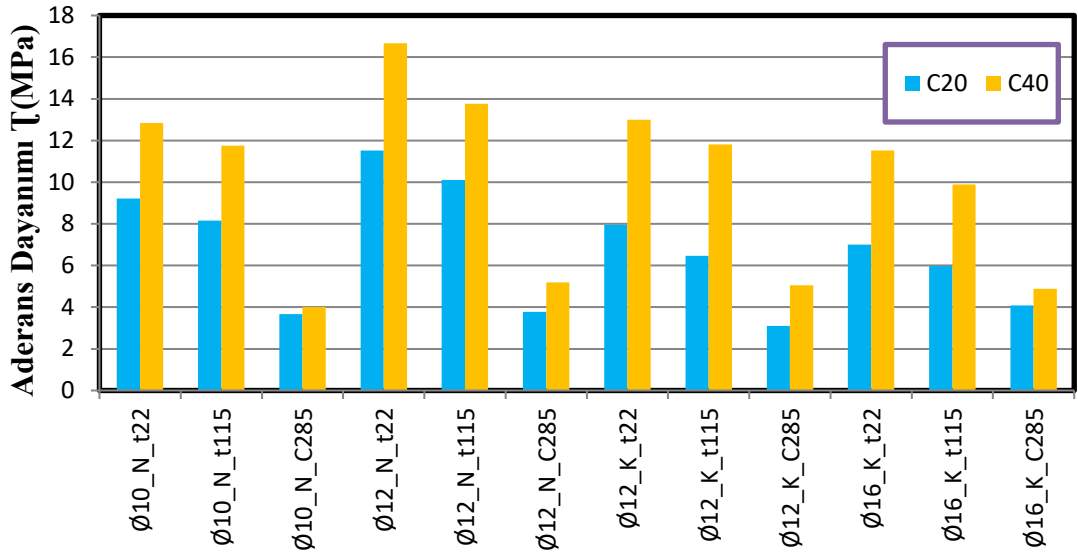
Ø12_K_C20 GFRP donatıların 22-115-285 °C'de aderans dayanımları sırasıyla 7,95 Mpa 6,46 Mpa ve 3,10 MPa tespit edilmiştir. Ø16_K_C20 GFRP donatıların ise sırasıyla 7,00 MPa 5,96 MPa ve 4,08 MPa tespit edilmiştir. GFRP donatı çapındaki artıştan 22 °C'de %11,9 azalma, 115 °C'de %7,7 azalma ve 285 °C'de %31,6'lık bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Ø12_K_C40 GFRP donatılarda ise 22-115-285 °C'de aderans dayanımları sırasıyla 13,00 MPa 11,80 MPa ve 5,04 MPa tespit edilirken Ø16_K_C40 GFRP donatıların ise sırasıyla 11,52 MPa 9,88 MPa ve 4,87 MPa tespit edilmiştir. Donatılarda çap artışında 22 °C'de %11,3 azalma, 115 °C'de %16,2 azalma ve 285 °C'de %3,3'lük bir artış olduğu tespit edilmiştir. Kumlu GFRP donatılarda çap artışının olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir.

Donatı çapının artmasıyla payda durumunda olan donatı çapı aderans dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Kumlu GFRP donatılarda daha yüksek çekme kuvvetinde olan Ø16 donatılar çapın etkisiyle Ø12 kumlu donatılara göre daha düşük aderans dayanımı sergilemişlerdir. Aynı durumun nervürlü donatılar için geçerli olmadığı tespit edilmiştir. Nervürlü donatılarda çapın artmasıyla aderans dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. GFRP donatılarda çap artışının aderans dayanımına etkisi incelenirken aynı zamanda yüzey özelliğinin de etkisinin büyük olduğu tespit edilmiştir.

4.5. Beton Dayanımın Aderansa Etkisi

Numunelerin beton dayanım sınıfı artışındaki ortalama aderans dayanımı etkileri Şekil 4.7'te sunulmuştur. Ø10_N, Ø12_N, Ø12_K ve Ø16_K donatılar kendi içinde beton dayanım artışındaki etkileri tüm sıcaklıklar altında tespit edilmiştir.



Şekil 4.7: GFRP donatıların beton dayanımı artışının aderansa etkisi.

Ø10_N_C20 GFRP donatıların 22-115-285 °C’de aderans dayanımları sırasıyla 9,21 Mpa 8,15 Mpa ve 3,67 MPa tespit edilmiştir. Ø10_N_C40 GFRP donatıların ise sırasıyla 12,84 MPa 11,74 MPa ve 4,00 MPa tespit edilmiştir. Beton dayanımındaki artıştan 22 °C’de %39,4 artış, 115 °C’de %44 artış ve 285 °C’de %8,9’lük bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Ø12_N_C20 GFRP donatılarda ise 22-115-285 °C’de aderans dayanımları sırasıyla 11,51 MPa 10,10 MPa ve 3,76 MPa tespit edilirken Ø12_N_C40 GFRP donatıların ise sırasıyla 16,66 MPa 13,76MPa ve 5,18 MPa tespit edilmiştir. Beton dayanımı artışında 22 °C’de %44,7 artış, 115 °C’de %36,2 artış ve 285 °C’de %37,76’luk bir artış olduğu tespit edilmiştir. Nervürlü GFRP donatılarda beton dayanım artışından olumlu yönde etkilendiği tespit edilmiştir.

Ø12_K_C20 GFRP donatıların 22-115-285 °C’de aderans dayanımları sırasıyla 7,95 Mpa 6,46 Mpa ve 3,10 MPa tespit edilmiştir. Ø12_K_C40 GFRP donatıların ise sırasıyla 13,00 MPa 11,80 MPa ve 5,04 MPa tespit edilmiştir. Beton dayanımındaki artıştan 22 °C’de %63,5 artış, 115 °C’de %82,6 artış ve 285 °C’de %62,5’lük bir artış olduğu tespit edilmiştir.

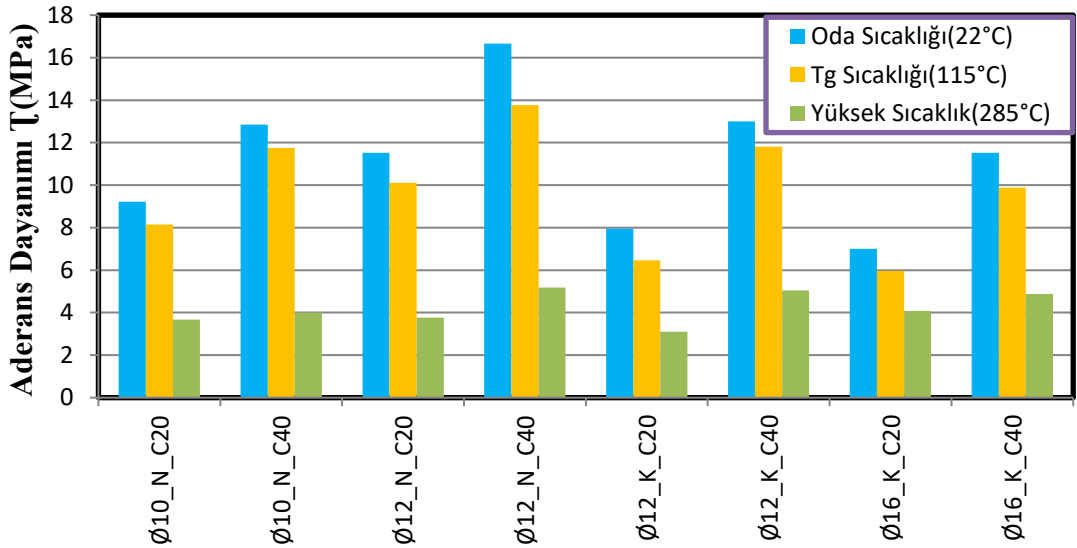
Ø16_K_C20 GFRP donatılarda ise 22-115-285 °C’de aderans dayanımları sırasıyla 7,00 MPa 5,96 MPa ve 4,08 MPa tespit edilirken Ø16_K_C40 Beton dayanımı artışında 11,52 MPa 9,88MPa ve 4,87 MPa tespit edilmiştir. Donatılarda çap artışında 22 °C’de

%64,5 artış, 115 °C’de %65,7 artış ve 285 °C’de %19,3’lük bir artış olduğu tespit edilmiştir. Kumlu GFRP donatılarda beton dayanım artışından olumlu yönde etkilendiği tespit edilmiştir.

Nervürlü ve kumlu GFRP donatılarda beton dayanım artışından ikisinin de olumlu yönde etkilendiği tespit edilmiştir. Ancak kumlu donatıların nervürlü donatılara oranla daha fazla aderans dayanımı kazandığı tespit edilmiştir. Bu durumun kumlu donatılarda nervürleşmenin olmamasından dolayı beton dayanımının artmasıyla aderans dayanımını büyük ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir.

4.6. Sıcaklığın Aderansa Etkisi

Sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin 22 °C’deki dayanımları baz alınarak aderans dayanımları ve sıyrılmaları Şekil 4.8’te incelenmiştir. Her donatı kendi içinde incelenerek karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4.8: GFRP donatıların sıcaklık altında aderans dayanımı değerleri.

Ø10_N_C20 GFRP donatıların 22 °C, 115 °C ve 285 °C’de aderans dayanımları sırasıyla 9,21 Mpa, 8,15 Mpa ve 3,67 MPa tespit edilmiştir. 115 °C’de %11,5 azalma ve 285 °C’de %60,1’lik büyük ölçüde aderans dayanımı kaybettiği tespit edilmiştir. Ø10_N_C40 GFRP donatıların ise aderans dayanımları sırasıyla 12,84 MPa, 11,74 MPa ve 4,00 MPa bulunmuştur. 115 °C’de %8,5 azalma ve 285 °C’de %68,8’lik büyük oranda aderans dayanımı kaybettiği tespit edilmiştir.

Ø12_N_C20 GFRP donatılarının 22 °C, 115 °C ve 285 °C'de aderans dayanımları sırasıyla 11,51 Mpa, 10,10 Mpa ve 3,77 MPa tespit edilmiştir. 115 °C'de %12,3 azalma ve 285 °C'de %67'lik büyük ölçüde aderans dayanımı kaybettiği tespit edilmiştir. Ø12_N_C40 GFRP donatılarının ise aderans dayanımları sırasıyla 16,66 MPa, 13,76 MPa ve 5,18 MPa bulunmuştur. 115 °C'de %17,4 azalma ve 285 °C'de %68,9'luk büyük oranda aderans dayanımı kaybettiği tespit edilmiştir.

Ø12_K_C20 GFRP donatılarının 22 °C, 115 °C ve 285 °C'de aderans dayanımları sırasıyla 7,95 Mpa, 6,46 Mpa ve 3,10 MPa tespit edilmiştir. 115 °C'de %18,7 azalma ve 285 °C'de %61'lik büyük ölçüde aderans dayanımı kaybettiği tespit edilmiştir. Ø12_K_C40 GFRP donatılarının ise aderans dayanımları sırasıyla 13,00 MPa, 11,80 MPa ve 5,04 MPa bulunmuştur. 115 °C'de %9,2 azalma ve 285 °C'de %61,2'lik büyük oranda aderans dayanımı kaybettiği tespit edilmiştir.

Ø16_K_C20 GFRP donatılarının 22 °C, 115 °C ve 285 °C'de aderans dayanımları sırasıyla 7,00 Mpa, 5,96 Mpa ve 4,08 MPa tespit edilmiştir. 115 °C'de %14,85 azalma ve 285 °C'de %41,7'lik büyük ölçüde aderans dayanımı kaybettiği tespit edilmiştir. Ø16_K_C40 GFRP donatılarının ise aderans dayanımları sırasıyla 11,52 MPa, 9,88 MPa ve 4,87 MPa bulunmuştur. 115 °C'de %14,2 azalma ve 285 °C'de %57,7'lik büyük oranda aderans dayanımı kaybettiği tespit edilmiştir.

Tg geçiş sıcaklığının olduğu noktada donatının yumuşamaya başladığı ve aderans dayanımını yavaştan kaybettiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta ise aderans dayanımının büyük kısmını kaybettiği tespit edilmiştir. Bu durumda yüksek ısı altında kumlu GFRP donatılarda %41 ila %61 arasında kenetlenme aderans dayanımı kaybettikleri görülürken nervürlü GFRP donatılarda %60 ila %69 arasında kenetlenme aderans dayanımı kaybettikleri tespit edilmiştir. Sıcaklık altında oransal olarak kumlu donatıların daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ancak aderans dayanım değerlerine bakıldığında nervürlü donatıların üstün oldukları tespit edilmiştir.

Genel sonuçlara bakıldığında t115_C20 numunelerinde aderansı en az kaybedenin %11,5 ile Ø10_N GFRP donatı olduğu tespit edilmiştir. t285_C20 numunelerinde ise %41,7 ile Ø16_K GFRP donatı olmuştur. t115_C40 numunelerine bakıldığında aderans kaybını en az %8,5 ile Ø10_N GFRP donatının olduğu tespit edilmiştir. Bu değere en yakın numune %9,2 aderans kaybıyla Ø12_K GRFP donatı olmuştur. t285_C40

numunelere bakılacak olursak bütün numunelerin aderans kayıpları %58-68 arasında olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta donatı yüzey özelliği, beton sınıfı ve donatı çapı gibi özelliklerin bir öneminin kalmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca nervürlü GFRP donatıların, kumlu GFRP donatılara göre sıcaklık altında daha iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır.

4.7. Numunelerde Gerçekleşen Deformasyonlar

Isıtma esnasında 115 °C ve 22 °C'deki beton numunelerinde kılcal çatlama görülmezken, 285°C'ye kadar ısıtılan numune yüzeylerinde ve pas payından donatıya kadar olan kısımda her biri 0,5 mm'yi geçmeyen kılcal çatlaklıklar meydana geldiği tespit edilmiştir. Kılcal çatlaklar sadece donatının kenetlenme bölgesinde olmayıp sıcaklığın geldiği tüm bölgelerde görülmüştür. Bu durumun donatılardaki genleşme durumuyla ilgisinin olmadığı, donatının betona bağlanmayan bölümündeki beton yüzeyinde de çatlaklıkların devam ettiği tespit edilmiştir.

Numunelerin 3-4 tanesinde ise ısıtma işlemi gerçekleşirken beton yüzeyinde çapı 50 mm'yi geçmeyen patlama ve kabuk atma gözlenmiştir. Bu durum numune içerisinde kalan hava kabarcıklarının genleşerek basınç oluşturması nedeni ile meydana geldiği düşünülmektedir. Sıcaklığa bağlı oluşan deformasyonlar aşağıdaki şekillerde verilmiştir(Şekil 4.9-4.11).



Şekil 4.9: Yüksek ısıya maruz numunelerin ön yüzeyindeki kılcal çatlaklıklar (<0,5mm).

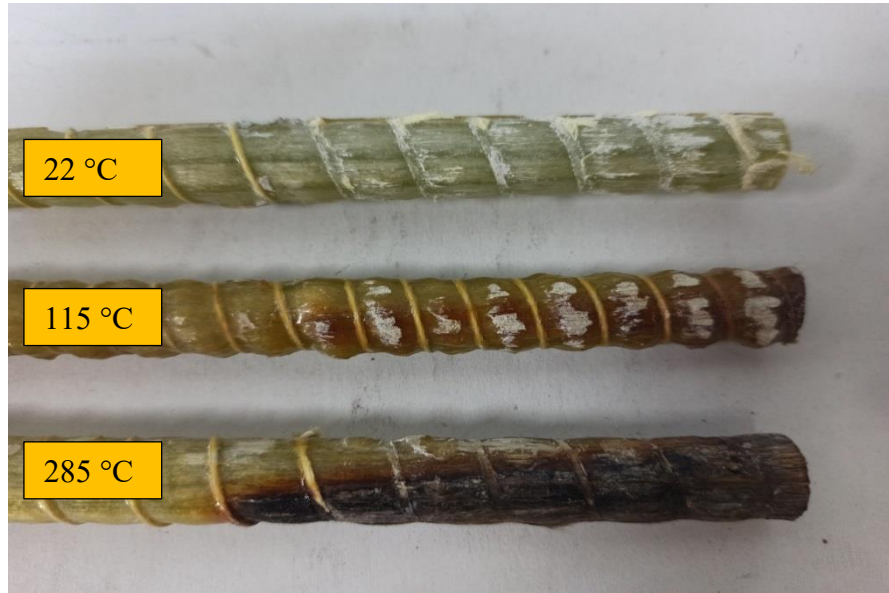


Şekil 4.10: Yüksek ısıya maruz numunelerin alt ve üst yüzeyindeki kılcal çatlaklıklar (<0,5mm).



Şekil 4.11: Yüksek ve ani ısınmaya bağlı betonun kabuk atması.

Betonun ısıtılmasıyla birlikte içerisinde bulunan GFRP donatılar ısıdan etkilenerek epoksi reçinesi kararmıştır. 115 °C'deki donatılarda koyu sararma görülürken, 285 °C'de kararma ve donatıların özelliklerini yitirdikleri tespit edilmiştir. Sıcaklığa bağlı donatılardaki deformasyonlar aşağıdaki şekillerde verilmiştir(Şekil 4.12-4.14).



Şekil 4.12: Nervürlü GFRP donatıların sıcaklık altındaki deformasyonları.

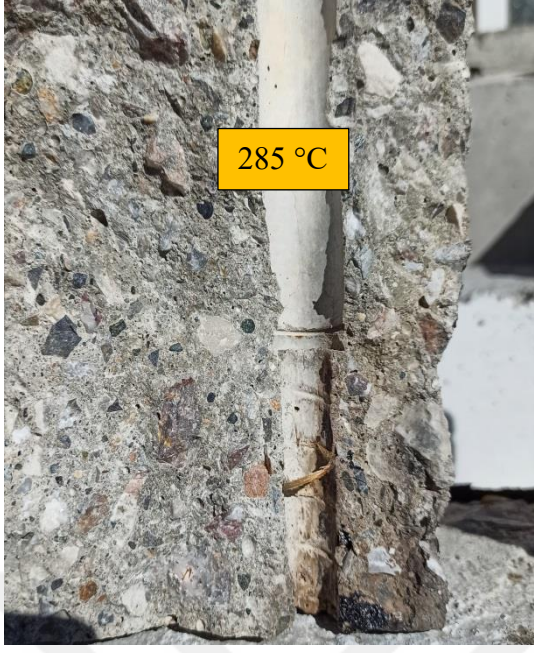


Şekil 4.13: Kumlu GFRP donatıların sıcaklık altındaki deformasyonları.

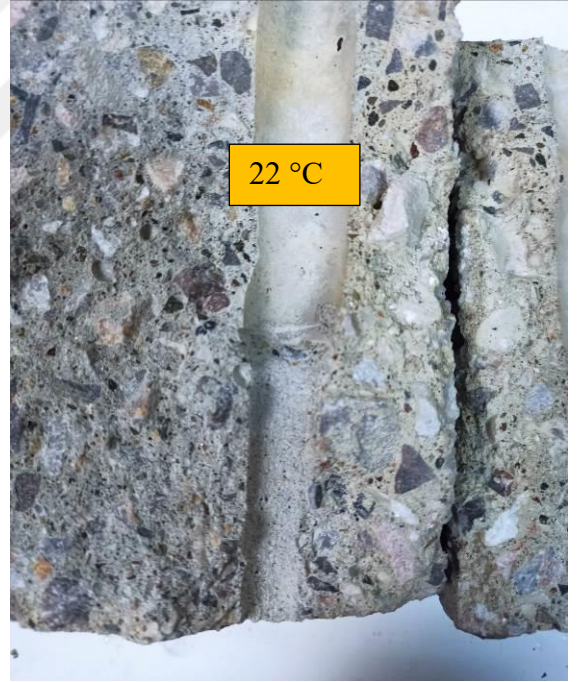
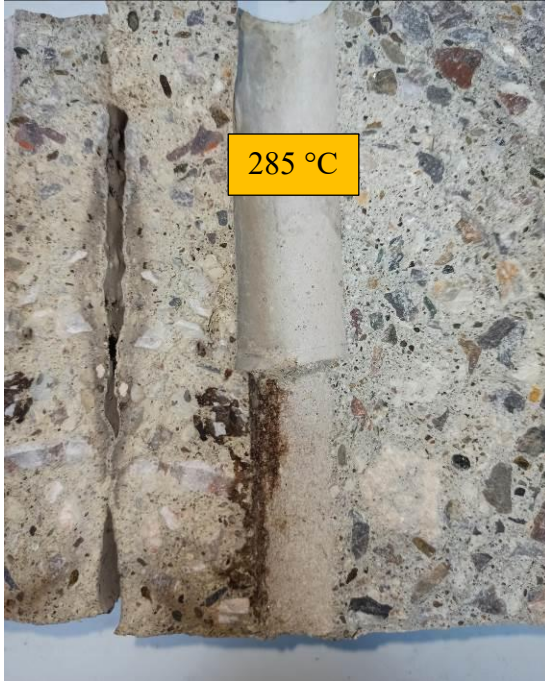


Şekil 4.14: GFRP donatıların sıcaklık altında kararma yapması.

Çekme dayanımı altında GRFP donatılar beton numunelerinden çıkma esnasında sürtünmeye maruz kalmışlardır. Sürtünmeden oluşan beton yüzeyindeki deformasyonlar aşağıdaki şekillerde sunulmuştur(Şekil 4.15 ve Şekil 4.16).



Şekil 4.15: Nervürlü GFRP donatının 22 °C ve 285 °C'de beton içinde davranışı.



Şekil 4.16: Kumlu GFRP donatının 22 °C ve 285 °C'de beton içinde davranışı.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar, şekil ve tablolarda detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Deneysel çalışmada GFRP donatıların farklı sıcaklıklar, farklı yüzey özellikleri, çeşitli çaplarda ve farklı beton sınıflarında hazırlanan numunelerin aderans dayanımına etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

1. Deneysel çalışmada yapılan çekme deneylerinde tüm GFRP donatılar kopmadan beton içerisinden sıyrılmıştır. Bu nedenle sıcaklık etkisi altında donatı-beton arası aderans dayanımının belirlenmesi için bu yöntem kullanılabilir.
2. Oda sıcaklığında test edilen nervürlü numunelerde donatı çapı arttıkça GFRP – beton arasındaki aderans dayanımı artmıştır. Kumlu donatılarda ise çap arttıkça numuneler daha yüksek bir kayma yükünde sıyrılmış ancak aderans dayanımının düştüğü tespit edilmiştir.
3. Oda sıcaklığındaki numunelerde donatılar daha düşük bir şekil değiştirme ile göçerken, sıcaklık artışı ile birlikte numunelerde sıyrılmamanın yumuşamaya bağlı olarak daha fazla bir şekil değiştirme ile göçmüştür. Bu sonuç sıcaklık artışı ile birlikte donatı-beton arasındaki bağın yumuşamasına atfedilir.
4. Donatılarda, aderans dayanım beton dayanımı artışı ile birlikte artmıştır. 22 °C’de her iki beton dayanım sınıfında olan numunelerde en yüksek aderans dayanımı 16,7 MPa olarak Ø12_N_C40 GFRP donatı olurken, en düşük aderans dayanımı ise 7,0 MPa olarak Ø16_K_C20 GFRP donatı göstermiştir.
5. 115 °C’de C20 beton kullanılarak üretilen nervürlü numunelerde 22 °C’deki numunelere kıyasla aderans dayanımında ortalama %11-13 arası azalma olurken, C40 betonu kullanılarak üretilen numunelerde %9-17 azalma olmuştur. Bu sonuç kumlu yüzeye sahip donatılarda ise C20 betonda aderans dayanımında %15-18

arası azalma olurken C40 betonunda ise %9-14 arasında azalma olmuştur. Beton dayanımının artması sıcaklığa bağlı olarak oluşan aderans kaybını azaltmıştır.

6. 285 °C'de C20 betonu ile üretilen nervürlü donatılı numunelerde 22 °C numunelerine kıyasla ortalama %60-67 arası dayanım kaybı olurken C40 betonu ile üretilen numunelerde %68-69 arası dayanım kaybı tespit edilmiştir. Kumlu donatılarda ise bu durum sırasıyla %42-60 ve %57-62 olarak tespit edilmiştir.
7. GFRP donatıların yüzey özellikleri karşılaştırıldığında C20 beton numuneleri için 22 °C'de %44,7 115 °C'de %69,4 ve 285 °C'de %21,2 oranla nervürlü donatıların kumlu yüzeye sahip donatılara göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. C40 beton numunelerinde ise 22 °C'de %44,6 115 °C'de %39,29 ve 285 °C'de %2,7 ile nervürlü donatıların kumlu yüzeye sahip donatılara göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Nervürlü GFRP donatıların, kumlu GFRP donatılara göre sıcaklık altında daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.
8. Her iki donatı için epoksi reçine ile lifler birbirine yapıştırılmıştır. Bu durum sıcaklık artışı ile epoksinin yumuşamasına neden olmaktadır. Ancak nervürlü numunelerde görülen dış betona içerisine girerek kenetlenmeyi arttırmıştır. Donatı yüzeyinde girinti ve nervürleşmeye yakın oluşumlar artmaya başladıkça aderans gerilmesini de büyük oranda arttırdığı tespit edilmiştir.
9. Beton numuneleri içinde ısınan GFRP donatılar 115°C'de koyu şekilde sararmaya başlarken 285 °C'de kararma ve şekil bozukluğu tespit edilmiştir.
10. Göçme deformasyonları ise nervürlü numunelerde ortalama 0,83 mm iken kumlu numunelerde ortalama 0,65 mm sıyrılmaya yaparak göçmüştür. Sıcaklığın artması ile 115 °C'de nervürlüde ortalama 1,40 mm iken kumluda ortalama 1,10 mm altında göçmüştür. 285 °C'de ise iki donatı türü içinde ortalama 0,90 mm altında göçmenin gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Çalışmada GFRP donatıların kritik sıcaklıklar altında aderans gerilmeleri üzerinde durulmuştur. Literatürdeki boşluğun ara sıcaklıklar, daha yüksek beton dayanım sınıfları ve yüzeyi nervürlü ve üzeri kum kaplı GFRP donatılar çalışılarak boşluğun doldurulması gerektiği kanaatine varılmıştır. Ayrıca elyaf türü değişen donatılarda araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Url-1 <<http://structpedia.com/betonarme-yapilarda-korozyon/>>, erişim tarihi: 26.12.2022.
- [2] ACI (2015). *Guide For The Design And Construction of Structural Concrete Reinforced With FRP Bars* (ACI 440.1 R-15). Retrieved from American Concrete Institute.
- [3] Federica, L. (2017). *Behaviour of rammed earth structures: Sustainable materials and strengthening techniques* (Doctoral dissertation), University of Florence, Italy.
- [4] CSA (2014). *Canadian Highway Bridge Design Code* (CSA S6-14). Retrieved from Canadian Standards Association.
- [5] CSA (2012). *Design and Construction of Building Structures with FibreReinforced Polymers* (CSA S806-12). Retrieved from Canadian Standards Association.
- [6] Uomoto, T., Mutsuyoshi, H., Katsuki, F., & Misra, S. (2002). Use of fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 14(3), 191-209.
- [7] Chiang, C. H., & Tsai, C. L. (2003). Time-temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1651-1654.
- [8] Gamage, J. C. P. H., Al-Mahaidi, R., & Wong, M. B. (2006). Bond characteristics of CFRP plated concrete members under elevated temperatures. *Composite Structures*, 75(1-4), 199-205.
- [9] Galati, N., Vollintine, B., Nanni, A., Dharani, L. R., & Aiello, M. A. (2004). Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete. *In Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction* (pp. 501-508).
- [10] Wang, Y. C., Wong, P. M. H., & Kodur, V. (2007). An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures. *Composite structures*, 80(1), 131-140.
- [11] Boğaçhan, B., (2019). *Beton-frp donatı arasındaki aderansı etkileyen faktörler ve kenetlenme boyu bağıntısının belirlenmesi*, (Doktora tezi), Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [12] Khaneghahi, M. H., Najafabadi, E. P., Shoaei, P., & Oskouei, A. V. (2018). Effect of intumescent paint coating on mechanical properties of FRP bars at elevated temperature. *Polymer Testing*, 71, 72-86.

- [13] Li, C., Gao, D., Wang, Y., & Tang, J. (2017). Effect of high temperature on the bond performance between basalt fibre reinforced polymer (BFRP) bars and concrete. *Construction and Building Materials*, 141, 44-51.
- [14] Solyom, S., Di Benedetti, M., Guadagnini, M., & Balázs, G. L. (2020). Effect of temperature on the bond behaviour of GFRP bars in concrete. *Composites Part B: Engineering*. 183, 107602.
- [15] Jahani, Y., Baena, M., Codina, A., Barris, C., & Torres, L. (2022). Time-dependent behavior of NSM CFRP-strengthened RC beams under different service temperatures. *Composite Structures*. 300, 116106.
- [16] Aydın F. (2018). Betona gömülü FRP çubuk davranışı üzerindeki ısıl genleşme ve beton dayanım etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 163, s.1 -8.
- [17] Rosa, I. C., Firmo, J. P., Correia, J. R., & Mazzuca, P. (2021). Influence of elevated temperatures on the bond behaviour of ribbed Gfrp bars in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104119.
- [18] Yu, B., & Kodur, V. K. R. (2013). Factors governing the fire response of concrete beams reinforced with FRP rebars. *Composite Structures*, 100, 257-269.
- [19] Hajiloo, H., & Green, M. F. (2018). Post-fire residual properties of GFRP reinforced concrete slabs: A holistic investigation. *Composite Structures*, 201, 398-413.
- [20] Zhao, J., Li, G., Wang, Z., & Zhao, X. L. (2019). Fatigue behavior of concrete beams reinforced with glass-and carbon-fiber reinforced polymer (GFRP/CFRP) bars after exposure to elevated temperatures. *Composite Structures*, 229, 111427.
- [21] ISIS (2007). *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers* (ISIS Design Manual No.3). Retrieved from ISIS Canada Research Network.
- [22] Url-2 <<https://www.arabam.com/blog/genel/anadol-ne-amacla-uretildi-uretimi-neden-durdu/>>, erişim tarihi: 08.04.2023.
- [23] Agarwal, S., & Gupta, R. K. (2018). The use of thermosets in the building and construction industry. *In Thermosets*, 45, pp. 279-302.
- [24] Nguyen, Q., Tran, J., Ren, X., Zhang, G., & Mendis, P. (2018). Fire performance of maritime composites. *In Marine Composites*, 21, pp. 115-160.
- [25] Akyürek, M. (2019). *Yüksek sıcaklığa maruz FRP Donatılı betonlarda paspayı ve beton dayanımının etkisi*. (Doktora tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Entitüsü, Sakarya.
- [26] Url-3 <https://tr.wikipedia.org/wiki/Anadol_A1>, erişim tarihi: 08.04.2023.
- [27] Yavuz, G., (2011). Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı. *Engineering Sciences*, 6(4), 1001-1015.
- [28] Url-4 <<https://santiyede.com/korozyon-nedir/>>, erişim tarihi: 15.03.2023.

- [29] Rizkalla, S., Hassan, T., & Hassan, N. (2003). Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 5(1), 16-28.
- [30] Url-5 <<http://www.aslanFRP.com/>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [31] Özşahin, B., Mulayam, A. ve Arkoç, O., (2015). Betonarme yapı elemanlarında lif takviyeli polimer kullanımı, 9. *Uluslararası Sinan Sempozyumu*, (s.109-115). Edirne.
- [32] Url-6 <<https://www.youtube.com/watch?v=xDLYrJEwZeo>>, erişim tarihi: 19.03.2023.
- [33] Url-7 <<https://www.fiberebars.com/en>>, erişim tarihi: 19.03.2023.
- [34] Url-8 <<https://eurometal.net/gfrp-rebars-composites-building-on-a-niche/>>, erişim tarihi: 19.03.2023.
- [35] ACI (2012). *Guide Test Methods for Fiber- Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures* (ACI 440.3R-12). Retrieved from American Concrete Institute.
- [36] ACI (2003). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars* (ACI 440.1R-03). Retrieved from American Concrete Institute.
- [37] Zadeh, H. J., & Nanni, A. (2017). Flexural stiffness and second-order effects in fiber-reinforced polymer-reinforced concrete frames. *ACI Structural Journal*, 114(2), 533.
- [38] Box, GangaRao, H. V., Taly, N., & Vijay, P. V. (2006). *Reinforced concrete design with FRP composites*. London : CRC Press.
- [39] Ametrano, D. (2011). *Bond Characteristics of Glass Fibre Reinforced Polymer Bars Embedded in High Performance and Ultra-High Performance Concrete*. (Master thesis). Ryerson University, Toronto, Canada.
- [40] Url-9 <<http://www.atermit.com/Sayfalar/teknik-bilgiler>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [41] ACI (2007). *Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures* (ACI 440R-07). Retrieved from American Concrete Institute.
- [42] ISIS (2007). *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers* (ISIS Design Manual No.3). Retrieved from ISIS Canada Research Network.
- [43] Hii, A. K., & Al-Mahaidi, R. (2007). Torsional capacity of CFRP strengthened reinforced concrete beams. *Journal of Composites for Construction*, 11(1), 71-80.
- [44] Baran, I. (2015). Pultrusion processes for composite manufacture. *In Advances in Composites Manufacturing and Process Design*. 379-414.
- [45] Url-10 <<http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=pultrusion>>, erişim tarihi: 27.12.2022.
- [46] Url-11 <<http://www.fiberpull.com/uretimteknolojileri.html>>, erişim tarihi: 27.12.2022.

- [47] Url-12 <<https://yasikmakina.com/40-mm-capli-cubuk-cekme-pultruzyon-makinesi/>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [48] Url-13 <<https://www.sonmuhur.com/gundem/bes-katli-binada-yangin-81195.html>>, erişim tarihi: 27.12.2022.
- [49] Chow, W. K., Han, S. S., & Du, W. F. (2006). Bridge-mixing of gasified fuel vapors and simultaneous ignitions of different combustibles at flashover. *Journal Of Fire Sciences*. 24(1), 65-76.
- [50] Budnick, E. K., & Klein, D. P. (1979). Mobile home fire studies: summary and recommendations. *Natl Bur Stand (U.S.)*, NBSIR 79-1720, (1979)
- [51] Ma, Z., & Mäkeläinen, P., (2006). Structural behaviour of composite slim floor frames in fire conditions. *Journal of constructional steel research*, 62(12), 1282-1289.
- [52] Wang, Y. C., (2005). Performance of steel–concrete composite structures in fire. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), 86-102.
- [53] Url-14 <www.concreteconstruction.net> erişim tarihi: 27.12.2022.
- [54] ASTM (1998). *Sertleşmiş Betonun Petrografik İncelenmesi İçin Standart Uygulama* (ASTM C 856). Retrieved from American Concrete Institute.
- [55] Calles, A. F., Carou, D., & Ferreira, R. L. (2022). Experimental investigation on the effect of carbon fiber reinforcements in the mechanical resistance of 3D printed specimens. *Applied Composite Materials*, 29, 937–952
- [56] Uysal, A., (2004). *Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkileri*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [57] Url-15 <<https://www.arabam.com/blog/genel/anadol-ne-amacla-uretildi-uretimi-neden-durdu/>>, erişim tarihi: 08.04.2023.
- [58] Peacock, R. D., Reneke, P. A., Bukowski, R. W., & Babrauskas, V. (1999). Defining flashover for fire hazard calculations. *Fire Safety Journal*, 32(4), 331-345.
- [59] Url-16 <ytong.com.tr/blog-detay.asp?blogID=10>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [60] Url-17 <insapedia.com/betonun-isi-genlesme-katsayisi-ve-isi-gecirgenligi/>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [61] Alper, U., (2004). *Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkileri*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [62] Url-18 <beetleplastics.com/FRP-fire-resistance-fiberglass-reinforced-plastic-and-fires/>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [63] Xiaolu, W. and Xiaoxiong Z., (2011). *Experimental research on mechanical behavior of gfrp bars under high temperature*. (Doctoral dissertation). Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, China (2011).
- [64] Url-19 <<https://www.nuhcimento.com.tr/cimento/#1501415143224-0db9511c-1e59>>, erişim tarihi: 08.04.2023.

- [65] Url-20 <<https://tr.dhgate.com/product/tasi-8620-portable-k-type-thermocouple-probe/237285803.html>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [66] Url-21 <<https://www.sanayimalzemeleri.com/lyk-389-k-tipi-hava-ve-yuzey-probu-50c-350c>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [67] Url-22 <<https://dogalgaz.net/tesisat-borulari/>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [68] Url-23 <<https://www.improfix.com/silikon-sosis-tabancasi>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [69] Url-24 <<https://www.tasciyapi.com.tr/su-hortumu-1-silikonlu-50mt-MjA4MQ==>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [70] Url-25 <<https://koctek.com.tr/urun/aluminyum-folyo-kapli-prefabrik-borular/>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [71] Url-26 <<https://www.hepsiburada.com/pass-takviyeli-aluminyum-folyo-bant-44-mm-x-20-m-bant-pm-HB00000QRTEV>>, erişim tarihi: 08.03.2023.
- [72] Url-27 <<https://www.izocam.com.tr/tr/urunler/tesisat-yalitimi/prefabrik-boru#>> erişim tarihi: 12.02.2023.
- [73] Url-28 <<https://tur.sika.com/tr/yapi/tamir-ve-guclendirme-sistemleri/yapisal-guclendirme/karbon-lifli-polimer-cfrp-kumaslar/sikadur-330.html>>, erişim tarihi: 24.02.2023.
- [74] Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (2007). Resmi Gazete, 26735, 19 Aralık 2007.

EKLER

EK A: 10 mm Nervürlü Donatıların Aderans Dayanımları

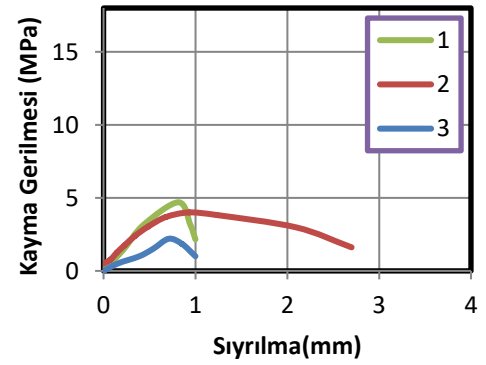
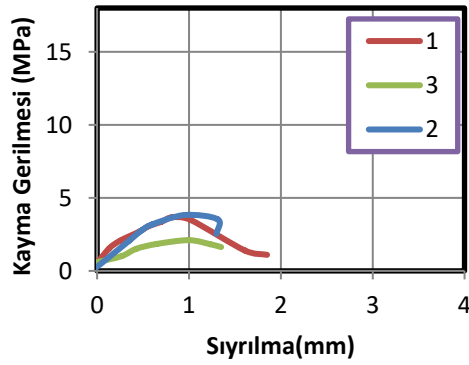
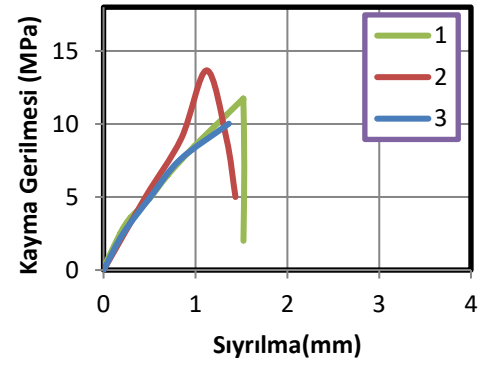
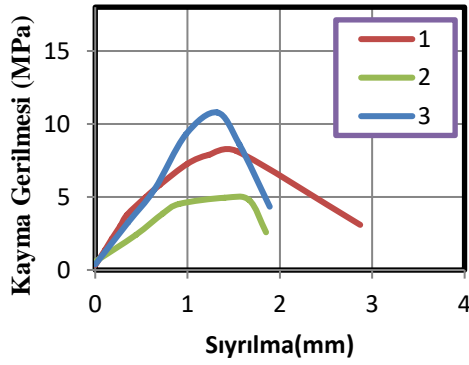
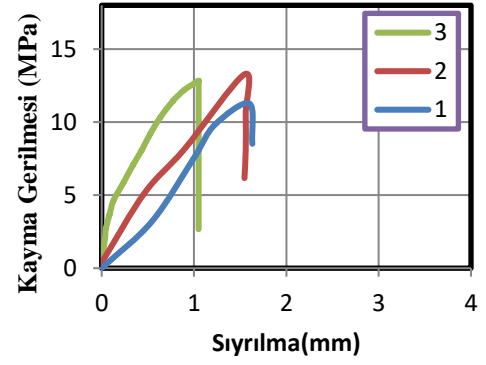
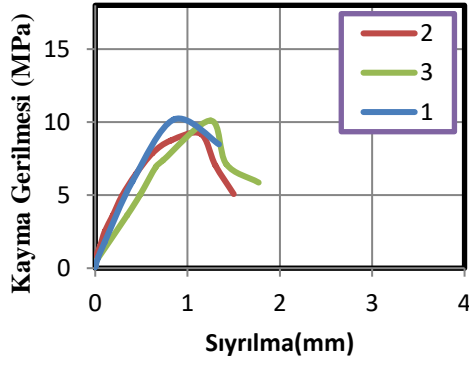
EK B: 12 mm Nervürlü Donatıların Aderans Dayanımları

EK C: 12 mm Kumlu Donatıların Aderans Dayanımları

EK D: 16 mm Kumlu Donatıların Aderans Dayanımları

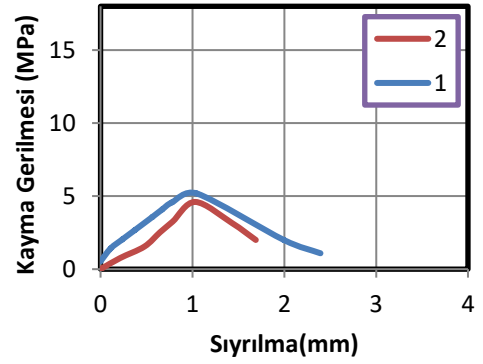
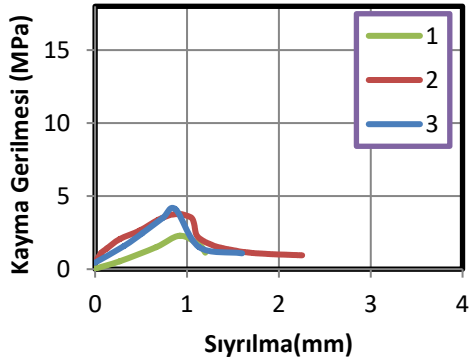
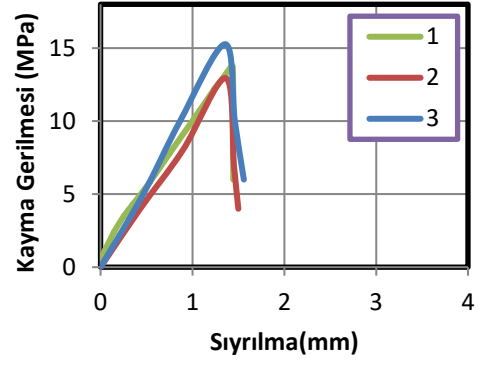
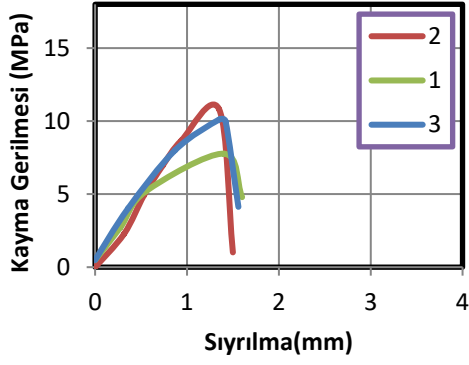
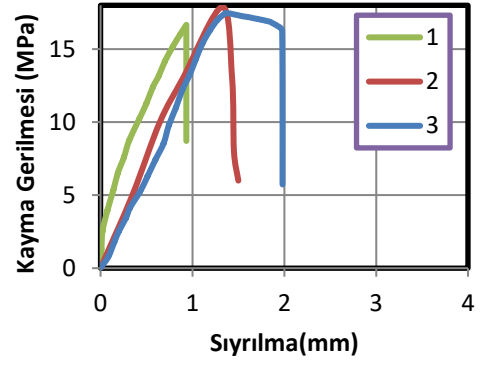
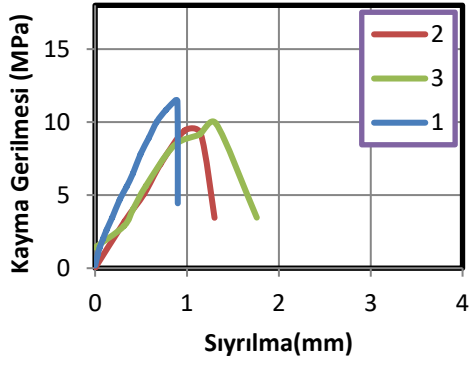


EK A:



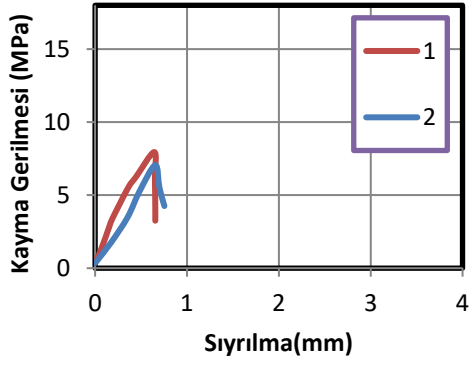
Şekil A.1: 10 mm nervürlü donatılar: (a) Ø10_N_t22_C20, (b) Ø10_N_t22_C40, (c) Ø10_N_t115_C20, (d) Ø10_N_t115_C40, (e) Ø10_N_t285_C20, (f) Ø10_N_t285_C40

EK B:

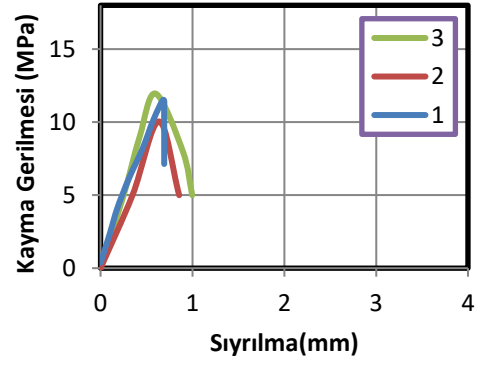


Şekil B.1: 12 mm nervürlü donatılar: (a) Ø12_N_t22_C20, (b) Ø12_N_t22_C40, (c) Ø12_N_t115_C20, (d) Ø12_N_t115_C40, (e) Ø12_N_t285_C20, (f) Ø12_N_t285_C40

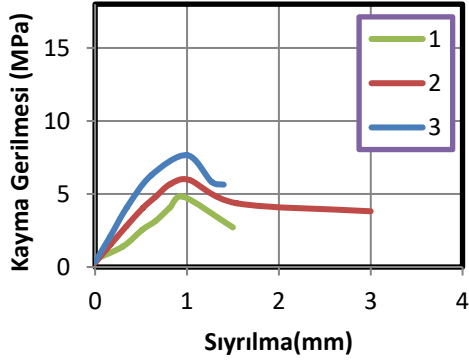
EK C:



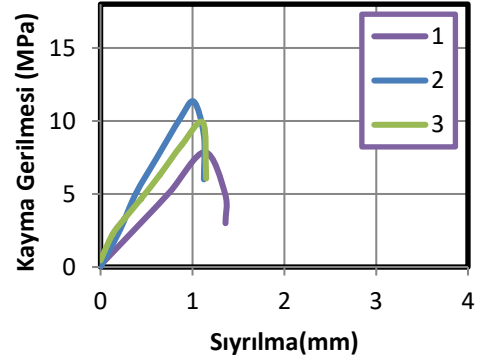
(a)



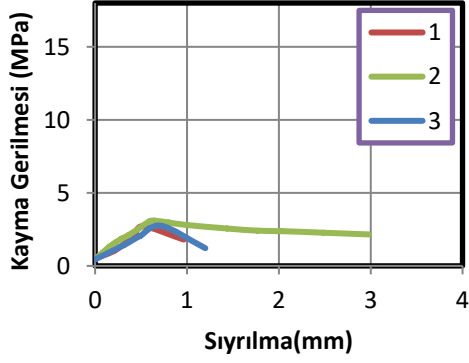
(b)



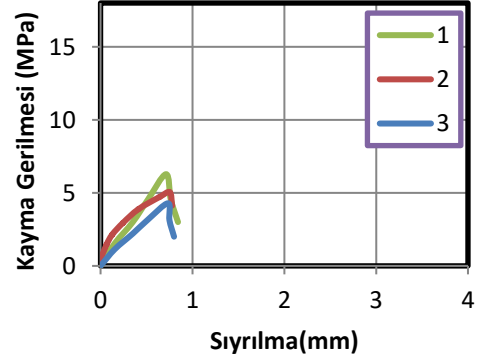
(c)



(d)



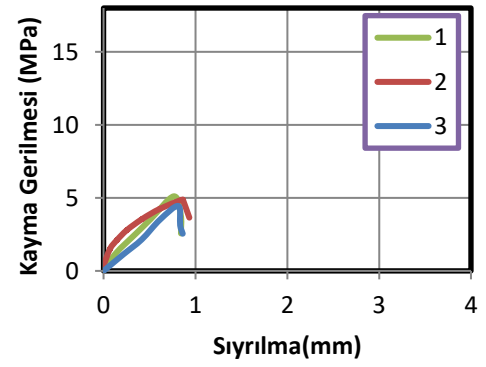
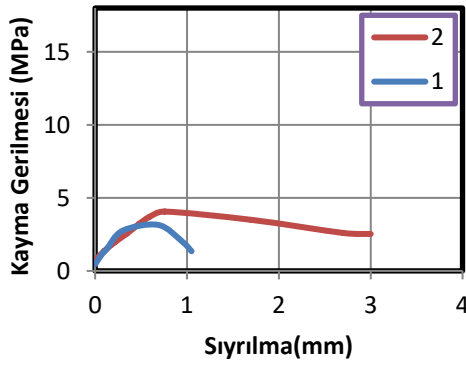
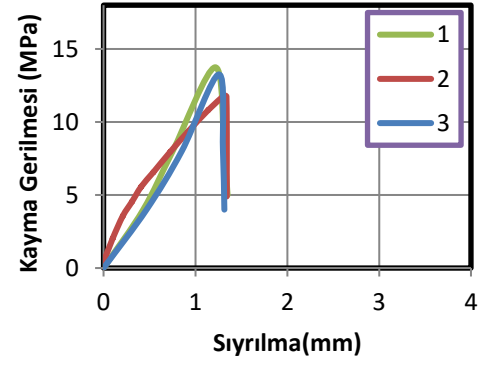
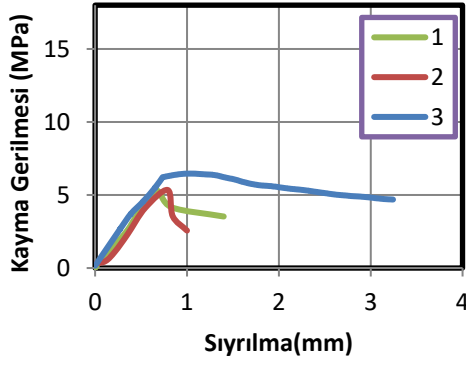
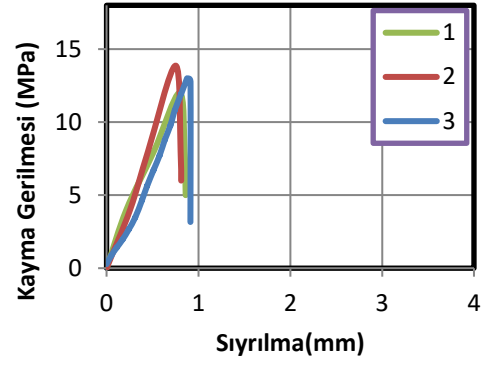
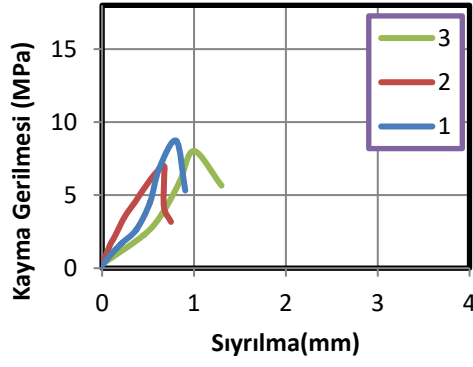
(e)



(f)

Şekil C.1: 12 mm kumlu donatılar: (a) Ø12_K_t22_C20, (b) Ø12_K_t22_C40, (c) Ø12_K_t115_C20, (d) Ø12_K_t115_C40, (e) Ø12_K_t285_C20, (f) Ø12_K_t285_C40

EK D:



Şekil D.1: 16 mm kumlu donatılar: (a) Ø16_K_t22_C20, (b) Ø16_K_t22_C40, (c) Ø16_K_t115_C20, (d) Ø16_K_t115_C40, (e) Ø16_K_t285_C20, (f) Ø16_K_t285_C40