

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

BETON-FRP DONATI ARASINDAKİ ADERANSI ETKİLEYEN
FAKTÖRLER VE KENETLENME BOYU BAĞINTISININ BELİRLENMESİ

BOĞAÇHAN BAŞARAN

HAZİRAN 2019

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Boğaçhan BAŞARAN tarafından hazırlanan
BETON-FRP DONATI ARASINDAKİ ADERANSI ETKİLEYEN FAKTÖRLER
VE KENETLENME BOYU BAĞINTISININ BELİRLENMESİ adlı Doktora Tezinin
Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Orhan DOĞAN

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine
getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ _____

Üye (Danışman) : Doç Dr. İlker KALKAN _____

Üye : Doç. Dr. Levent UĞUR _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şule BAKIRCI ER _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Eda AVANOĞLU SICACIK _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora
derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

BETON-FRP DONATI ARASINDAKİ ADERANSI ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE KENETLENME BOYU BAĞINTISININ BELİRLENMESİ

BAŞARAN, Boğaçhan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. İlker KALKAN

Haziran 2019, 228 sayfa

Beton-FRP donatı aderansını belirleyen değişkenler, donatının lif türü, donatının reçine türü, donatı yüzey özelliği, donatı çapı, elastisite modülü, betona gömülme uzunluğu, donatı aralığı ve pas payı, donatının eleman içerisindeki konumu, beton dayanımı ve lif oranı, elemandaki enine donatı oranı ve çevre koşulları olarak sıralanabilir. Ancak geçmişte yapılan çalışmalar, aderansı belirleyen birçok değişken bulunmasının göz ardı edilmesi nedeniyle, yalnızca bir deney değişkeninin etkisini incelemek üzere diğer deney değişkenlerinin sabit tutulması esasına uygun olarak yapılmamıştır. Uluslararası FRP donatılı beton yönetmeliklerinde geçen kenetlenme boyu bağıntılarının ise aşırı güvenli sonuçlar vermesinden dolayı, bu yönetmeliklerdeki aderans bağıntılarının revize edilmesi gerektiği açıktır.

Bu tez çalışmasında, FRP donatıların beton ile olan aderanslarını incelemek maksadı ile 90 adet mafsallı kiriş deney numunesi tekdüze düşey yükler altında test edilerek, farklı değişkenlerin FRP-beton aderansına etkisi incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, aynı gömülme boyuna ve beton özelliklerine sahip nervürlü çelik donatılı numunelerde test edilerek, FRP donatılı numunelerin aderans dayanımları ile kıyaslanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına dayalı olarak regresyon analizleri sonucunda analitik kenetlenme boyu ve aderans dayanımı denklemleri geliştirilerek, bu denklemler hem deney

sonuçları hem de uluslararası FRP donatılı beton yönetmeliklerinde geçen kenetlenme boyu denklemleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda önerilen aderans gerilmesi ve kenetlenme boyu denklemlerinin uluslararası yönetmeliklerde geçen bağıntılar ile elde edilen değerlerden çok daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: FRP Donatı-Beton Aderansı, Kenetlenme Boyu, Aderans, Mafsallı Kiriş Deneyi



ABSTRACT

THE PARAMATERS AFFECTING THE CONCRETE-FRP BOND STRENGTH AND EVALUATION OF THE DEVELOPMENT LENGTHS OF FRP BARS

BAŞARAN, Boğaçhan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker KALKAN

June 2019, 228 pages

Reinforcement fiber type, resin type, surface deformation properties, diameter, modulus of elasticity, embedment length, position of the reinforcement within the concrete, vertical and horizontal concrete cover, concrete strength, ratio of transverse reinforcement and the environmental conditions can be listed as the factors influencing the FRP rebar-concrete bond. Previous studies in the literature were not designed to isolate a single parameter affecting the bond while keeping the remaining parameters constant among the specimens. The FRP-reinforced concrete codes also emphasized the need for studies on development lengths and bond behavior of FRP bars with different properties and surface conditions. It is clear that the equations in these codes need to be revised due to the extremely safe results of development length equations in international FRP reinforced concrete codes.

In this study, 90 hinged beam test specimens were tested under uniform vertical loads to investigate the effects of certain parameters on FRP rebar-concrete bond. As a result of the regression analysis based on the experimental results, an analytical development length equation and a bond strength equation were developed and these equation were compared to the equations of the international FRP reinforced concrete codes and experimental results. As a result of the study, it has been observed that the proposed

bond strength and development length equations gives more consistent results with experimental values than the values obtained with equations of the international code.

Key Words: Bond of FRP Bars in Concrete, Development Length, Bond Strength, Hinged Beam Test



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her konuda bana destek olan, yardımlarını ve tecrübelerini esirgemeyen, birlikte çalışmaktan gurur duyduğum, hem akademik hem de kişilik olarak kendini örnek aldığım değerli büyüğüm, danışman hocam Sayın Doç. Dr. İlker KALKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca aldığım her kararda yaptığım her işte arkamda duran ve her işte olduğu gibi tez çalışmamın deneysel her aşamasında da bana yardım edip, bıkmadan usanmadan çalışan babam, Bekir BAŞARAN, annem, Songül BAŞARAN ve eşim, Kübra BAŞARAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen, karşılaştığım her problemde bana yardımcı olmaya çalışıp bana vakit ayıran değerli arkadaşım, Arş. Gör. Saruhan KARTAL'a, değerli hocalarım, Öğr. Gör. Mehmet Ali SELVİ'ye, Doç. Dr. Levent UĞUR'a, Dr. Öğr. Üyesi Harun YAKA'ya, Öğr. Gör. Salih GÜVERCİN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Cenk GEZEGİN'e teşekkürlerimi borç bilirim.

2018/014 No'lu proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
SİMGELER DİZİNİ	xx
KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Konusu ve Amacı	1
1.2. Lif Takviyeli Polimer (FRP).....	4
1.2.1. Polimer Matrisler	5
1.2.2. Lifler	7
1.2.3. Üretim Süreci.....	9
1.2.4. FRP Donatıların Özellikleri ve Çelik Donatı ile Karşılaştırılması	10
1.2.5. Uluslararası FRP Donatılı Beton Yönetmelikleri	14
1.3. FRP Donatı Beton Aderansı	15
1.3.1. Aderans Mekanizması.....	15
1.3.2. Çelik Donatı ile Beton Arasındaki Aderans Davranışı	16
1.3.3. FRP Donatı ile Beton Arasındaki Aderans Davranışı	20
1.4. Aderans Sıyrılma Modelleri.....	21
1.4.1. BPE Modeli.....	21
1.4.2. Malvar Modeli	22
1.4.3. Modifiye edilmiş BPE modeli	23
1.4.4. CMR Modeli	24
1.5. Donatı-Beton Aderansının Belirlenmesi.....	25
1.6. FRP Donatı-Beton Aderansını Etkileyen Faktörler	26
1.6.1. FRP Donatı Özelliklerinin FRP Donatı-Beton Arasındaki Aderansa Etkisi.....	27

1.6.2. Donatı Detaylarının FRP Donatı-Beton Arasındaki Aderansa Etkisi...	32
1.6.3. Beton Özelliklerinin FRP Donatı-Beton Arasındaki Aderansa Etkisi..	37
1.6.4. Deneysel Çalışmaların FRP Donatı-Beton Aderansına Etkisi.....	40
1.6.5. FRP Donatı-Beton Arasındaki Aderans Dayanımının Yönetmeliklerde ve Literatürde Verilen Bağıntılar İle Karşılaştırılması.....	41
1.7. Kenetlenme Boyunun Tespitinde Yaşanan Sıkıntılar ve Mevcut Yönetmelikler ile Değerlendirilmesi	45
1.8. Özgün Değer	52
2. DENEYSEL ÇALIŞMA ve ANALİTİK YÖNTEM	54
2.1. Mafsallı Kiriş Deneyleri	54
2.2. Mafsallı Kiriş Deney Numunelerinin Numaralandırılması	56
2.3. Çalışmada Kullanılan Mafsallı Kiriş Deney Numune Listesi	57
2.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması	59
2.4.1. Deneylerde kullanılacak kalıpların hazırlanması.....	59
2.4.2. Beton basınç dayanımının tayini için beton kalıplarının hazırlanması.	61
2.4.3. Kirişlerin enine ve boyuna etriyelerinin hazırlanması.....	62
2.4.4. Boyuna donatıların hazırlanması ve kalıplara yerleştirilmesi.....	63
2.4.5. Betonun dökülmesi, bakımı ve kalıplardan çıkarılması.....	64
2.4.6. Kirişlerde kullanılan mafsalların üretilmesi ve presin modifikasyonu.	65
2.5. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri ve Testleri.....	67
2.5.1. Beton testleri	67
2.5.2. Donatı testleri.....	68
2.6. Deney Prosedürü.....	72
2.7. Deney Verilerinden Aderans Gerilmesinin Tespiti	73
2.8. Aderans Gerilmesi ve Kenetlenme Boyu Bağıntısının Tespiti.....	75
2.8.1. Regresyon analizi.....	75
2.8.2. Çoklu Doğrusal Regresyon.....	75
2.8.3. Veri tabanı tanımlamaları ve parametre aralıkları	76
2.8.4. Beton dayanımı dönüşüm bağıntıları	78
2.8.5. Çalışmada kullanılan hata ölçütleri.....	81
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE GÖZLEMLER.....	84
3.1. Alt pas payının aderansa etkisi	84
3.1.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler	85

3.1.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler.....	86
3.1.3. Oluklu GFRP donatılı kirişler.....	87
3.1.4. Nervürlü GFRP donatılı kirişler	88
3.1.5. Çelik donatılı kirişler	89
3.1.6. İri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı kirişler.....	90
3.1.7. Alt pas payının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması	91
3.2. Yan pas payının aderansa etkisi.....	93
3.2.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler	93
3.2.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler.....	94
3.2.3. Oluklu GFRP donatılı kirişler.....	96
3.2.4. Nervürlü GFRP donatılı kirişler	97
3.2.5. Çelik donatılı kirişler	98
3.2.6. İri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı kirişler.....	98
3.2.7. Yan pas payının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması	100
3.3. Donatı çapının aderansa etkisi	102
3.3.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler	102
3.3.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler.....	104
3.3.3. İri taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler.....	105
3.3.4. Oluklu GFRP donatılı kirişler.....	106
3.3.5. Nervürlü GFRP donatılı kirişler	107
3.3.6. Çelik donatılı kirişler	108
3.3.7. İri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı kirişler.....	109
3.3.8. Sargılı GFRP donatılı kirişler	111
3.3.9. Donatı çapının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması	111
3.4. Beton basınç dayanımının aderansa etkisi	113
3.4.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler	113
3.4.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler.....	114
3.4.3. Oluklu GFRP donatılı kirişler.....	116
3.4.4. Nervürlü GFRP donatılı kirişler	117
3.4.5. Çelik donatılı kirişler	118

3.4.6. İri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı kirişler.....	119
3.4.7. Beton basınç dayanımının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması	121
3.5. Donatı gömülme boyunun aderansa etkisi.....	122
3.5.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler	122
3.5.2. Oluklu GFRP donatılı kirişler.....	124
3.5.3. Nervürlü GFRP donatılı kirişler	125
3.5.4. Çelik donatılı kirişler	126
3.5.5. Gömülme boyunun aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması	127
3.6. Donatılar arası mesafenin aderansa etkisi.....	128
3.6.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler	129
3.6.2. Nervürlü GFRP donatılı kirişler	130
3.6.3. Çelik donatılı kirişler	131
3.6.4. Donatılar arası mesafenin aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması	133
3.7. Etriye varlığının aderansa etkisi	133
3.7.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler	134
3.7.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler.....	135
3.7.3. Oluklu GFRP donatılı kirişler.....	136
3.7.4. İri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatılı kirişler.....	137
3.7.5. Nervürlü GFRP donatılı kirişler	138
3.7.6. Çelik donatılı kirişler	139
3.7.7. Kirişlerde etriye varlığının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması	140
4. FRP DONATI-BETON ARASINDAKİ ADERANS VE KENETLENME BOYU DENKLEMLERİNİN BELİRLENMESİ	142
4.1. Aderans Gerilmesi ve Kenetlenme Boyu Denkleminin Tespiti.....	142
4.2. Optimizasyonlu ve optimizasyonsuz kenetlenme boyu denklemlerinin karşılaştırılması	152
4.3. Kenetlenme boyu bağıntısının kullanım sınırları.....	153
5. ADERANS GERİLMESİ VE KENETLENME BOYU DENKLEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	155

5.1. FRP donatı-Beton Aderans Bağıntısı ile Tespit Edilen Aderans Gerilmesi Değerlerinin Uluslararası Yönetmelikler ve Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması	155
5.2. FRP donatı-Beton Kenetlenme Boyu Bağıntısı ile Tespit Edilen Kenetlenme Boyu Değerlerinin Uluslararası Yönetmelikler ve Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması	158
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	162
GELECEK ÇALIŞMALAR.....	167
KAYNAKLAR	168
EKLER.....	179
A. DENEY FOTOĞRAFLARI.....	179
B. MAFSALLI KİRİŞ DENEYLERİ	193
ÖZGEÇMİŞ.....	227

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

Çizelge 1.1. FRP malzemelerde kullanılan termoset reçinelerinin tipik özellikleri [7]	5
Çizelge 1.2. FRP malzemelerde kullanılan liflerin tipik özellikleri [14]	8
Çizelge 1.3. FRP malzemelerin çelik donatılara göre avantajları ve dezavantajları [1]	11
Çizelge 1.4. Lif oranı 0.5 ile 0.75 olan FRP donatıların yoğunlukları (kg/m ³) [14]	12
Çizelge 1.5. Lif oranı 0.5 ile 0.75 olan FRP donatıların termal genleşme katsayıları (x10 ⁻⁶ /°C) [14]	12
Çizelge 1.6. Lif oranı 0.5 ile 0.75 olan FRP donatıların çekme özellikleri [14]	12
Çizelge 1.7. FRP donatılar için önerilen yüzey deformasyon isimleri	13
Çizelge 1.8. Uluslararası FRP donatılı beton yönetmeliklerinin tarihsel kronolojisi	14
Çizelge 1.9. FRP donatıların kenetlenme boyları ve aderans dayanımlarının karşılaştırılması	43
Çizelge 2.1. Deney numunelerinin numaralandırılması	56
Çizelge 2.2. Gömülme boyunun etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler	57
Çizelge 2.3. Beton basınç dayanımının etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler	58
Çizelge 2.4. Etriye etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler	58
Çizelge 2.5. Yan pas payının etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler	58
Çizelge 2.6. Alt pas payının etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler	58
Çizelge 2.7. Donatı çapının etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler	59
Çizelge 2.8. Donatılar arası mesafenin etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler	59
Çizelge 2.9. 1m ³ Hacmindeki Betonun Karışım Oranları	67
Çizelge 2.10. 28 günlük beton basınç dayanımları	67
Çizelge 2.11. Slump deney sonuçları	68
Çizelge 2.12. Betonların yoğunlukları	68

Çizelge 2.13. Çelik donatıların çekme deney sonuçları	69
Çizelge 2.14. FRP donatıların yüzey deformasyon ve fiziksel özellikleri	70
Çizelge 2.15. FRP donatıların mekanik özellikleri	71
Çizelge 2.16. Veri tabanında bulunan değişkenlerin ve çıktıların aralıkları	77
Çizelge 2.17. EN 206'da [127] tavsiye edilen silindir numune basınç dayanımı- küp numune basınç dayanımı ilişkisi	78
Çizelge 4.1. Eşitlik 4.1 için S katsayıları	146
Çizelge 4.2. Eşitlik 4.2 için S katsayıları	147
Çizelge 4.3. Eşitlik 4.3 için S katsayıları	147
Çizelge 4.4. Eşitlik 4.4 için S katsayıları	148
Çizelge 4.5. Eşitlik 4.5 için S katsayıları	148
Çizelge 4.6. Eşitlik 4.6 için S katsayıları	149
Çizelge 4.7. Eşitlik 4.7 için S katsayıları	149
Çizelge 4.8. Eşitlik 4.8 için S katsayıları	150
Çizelge 4.9. Aderans gerilmesi denklemlerinin karşılaştırılması	150
Çizelge 4.10. Kenetlenme boyu bağıntısı için değişken sınırları	154
Çizelge B.1. Bu çalışmada deneyi yapılan mafsallı kiriş deneyleri	193
Çizelge B.2. Mafsallı kiriş deneyleri veri tabanı	198
Çizelge B.3. Deneme testleri veri tabanı	206

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

Şekil 1.1. Çeşitli FRP ürünleri [7]	4
Şekil 1.2. Liflerin gerilme-birim uzama davranışları [14]	7
Şekil 1.3. Pültruzyon süreci (Anonim, 2018'den değiştirilerek).....	10
Şekil 1.4. FRP donatı ve bileşenlerinin çekme özellikleri	11
Şekil 1.5. Donatı-beton arasındaki aderans mekanizması (ACI 408R-03, 2013'den, değiştirilerek)	15
Şekil 1.6. Çelik donatı ile beton arasındaki aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi (fib Bulletin 10, 2000'dan, değiştirilerek)	16
Şekil 1.7. a)Donatı ile beton arasındaki mekanik kilitlenme ve betonun ezilmesi b)Boyuna ayrışma çatlakları c)Gerilme tepe noktaları d)Göreceli donatı hareketi (fib Bulletin 10, 2000'dan, değiştirilerek)	18
Şekil 1.8. a)Sıyrılma göçme tipi b)Nervürlerin altındaki betonun ezilmesi ya/ya da betonun kesilmesi ile ayrışma kaynaklı sıyrılma göçmesi c)Ayrışma göçmesi (fib Bulletin 10, 2000'dan, değiştirilerek)	19
Şekil 1.9. Çeşitli ayrışma göçme tipleri (Thompson vd., 2002'den, değiştirilerek)	19
Şekil 1.10. FRP donatının göçme tipleri (fib Bulletin 40, 2007'dan, değiştirilerek)	20
Şekil 1.11. BPE modeli	22
Şekil 1.12. Modifiye BPE modeli	24
Şekil 1.13. Çekip çıkarma deneyi.....	25
Şekil 1.14. a)Basit kiriş veya bindirme eki boyu deneyi b)Eğilmede kenetlenme deneyi c)Mafsallı kiriş deneyi d)Konsol kiriş deneyi e)Makas kiriş deneyi f)Kiriş ucundan çekip çıkarma deneyi (ACI 440R-07, 2007'den, değiştirilerek])	26
Şekil 1.15. Kayma gecikmesi etkisi	27
Şekil 1.16. Lif türleri	29
Şekil 1.17. Beton ayrışması göçme şekilleri	33
Şekil 1.18. Aderans gerilmesi ve donatı gerilmesi ilişkisi [23]	35

Şekil 1.19. Donatı konumunun aderansa etkisi [25]	36
Şekil 1.20. Beton içinde kullanılan lif katkıları	40
Şekil 2.1. Mafsallı kiriş deney numunesi 3D görünümü.....	55
Şekil 2.2. Mafsallı kiriş deney numunesi detayları	55
Şekil 2.3. Kiriş kalıplarının montaj aşamaları.....	60
Şekil 2.4. Kalıpların imalatı ve montajları	61
Şekil 2.5. Beton küp numune kalıpları	62
Şekil 2.6. Etriye makinesinin ve etriye kolunun büküm başlığı.....	62
Şekil 2.7. Kirişlerde kullanılacak etriyeler.....	63
Şekil 2.8. Boyuna donatının beton ile olan temasının kesilmesi.....	63
Şekil 2.9. Kiriş donatılarının kalıba yerleştirilmesi aşamaları	64
Şekil 2.10. Kiriş donatılarının kalıplara yerleştirilmesi	64
Şekil 2.11. Beton mikserinin hazırlanması.....	65
Şekil 2.12. Kirişlerde kullanılan orta mafsallar.....	65
Şekil 2.13. Hidrolik presin modifikasyonu	66
Şekil 2.14. FRP donatı çekme numunesi.....	71
Şekil 2.15. Deney düzeneği.....	72
Şekil 2.16. Potansiyometrelerin kirişe sabitlenmesi.....	73
Şekil 2.17. Aderans gerilmesi modeli	74
Şekil 2.18. Veri tabanında kullanılan FRP donatıların lif türüne ve yüzey özelliğine göre sayıları	77
Şekil 2.19. Silindir numune basınç dayanımı-küp numune basınç dayanımı ilişkisi	79
Şekil 2.20. Küp numune basınç dayanımı-silindir numune basınç dayanımı ilişkisi	80
Şekil 3.1. Alt pas payı değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	85
Şekil 3.2. Alt pas payı değişimine göre ince taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	86
Şekil 3.3. Alt pas payı değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı	87
Şekil 3.4. Alt pas payı değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı	89

Şekil 3.5. Alt pas payı değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı	90
Şekil 3.6. Alt pas payı değişimine göre sargılı ve iri taneli kumlanmış BFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı	91
Şekil 3.7. Alt pas payı değişimine göre farklı türdeki donatıların maksimum aderans gerilmelerinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 3.8. Yan pas payı değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	94
Şekil 3.9. Yan pas payı değişimine göre ince taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	95
Şekil 3.10. Yan pas payı değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	96
Şekil 3.11. Yan pas payı değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	97
Şekil 3.12. Yan pas payı değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı	98
Şekil 3.13. Yan pas payı değişimine göre iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı	99
Şekil 3.14. Yan pas payı değişimine göre farklı türdeki donatıların maksimum aderans gerilmelerinin karşılaştırılması.....	100
Şekil 3.15. Donatı çapı değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	103
Şekil 3.16. Donatı çapı değişimine göre ince taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	104
Şekil 3.17. Donatı çapı değişimine göre iri taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	105
Şekil 3.18. Donatı çapı değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	106
Şekil 3.19. Donatı çapı değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	107
Şekil 3.20. 12mm çelik donatılı mafsallı kirişte oluşan kaldırma etkisi.....	108
Şekil 3.21. Donatı çapı değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı	109

Şekil 3.22. 12 mm çapa sahip iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatılı kirişte oluşan kesme çatlağı.....	110
Şekil 3.23. Donatı çapı değişimine göre iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı	110
Şekil 3.24. Sargılı FRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı	111
Şekil 3.25. Donatı çapı değişimine göre farklı türdeki donatıların maksimum aderans gerilmelerinin karşılaştırılması.....	112
Şekil 3.26. Beton basınç dayanımı değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı	114
Şekil 3.27. Beton basınç dayanımı değişimine göre ince taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı	115
Şekil 3.28. Beton basınç dayanımı değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı.....	116
Şekil 3.29. Beton basınç dayanımı değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı.....	118
Şekil 3.30. Beton basınç dayanımı değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı.....	119
Şekil 3.31. Beton basınç dayanımı değişimine göre iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı.....	120
Şekil 3.32. Beton basınç dayanımı değişimine göre donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı	121
Şekil 3.33. Gömülme boyu değişimine göre İnce taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı	123
Şekil 3.34. Gömülme boyu değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı.....	124
Şekil 3.35. Gömülme boyu değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı.....	125
Şekil 3.36. Gömülme boyu değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı	127
Şekil 3.37. Gömülme boyu değişimine göre farklı türde donatıların maksimum aderans gerilemelerinin karşılaştırılması.....	127
Şekil 3.38. Donatılar arası mesafenin değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı	130

Şekil 3.39. Donatılar arası mesafenin değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	131
Şekil 3.40. Donatılar arası mesafenin değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı.....	132
Şekil 3.41. Donatılar arası mesafenin değişimine göre donatıların maksimum aderans gerilmelerinin karşılaştırılması.....	133
Şekil 3.42. Etriye varlığının, ince taneli kumlanmış GFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi	135
Şekil 3.43. Etriye varlığının, ince taneli kumlanmış CFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi	136
Şekil 3.44. Etriye varlığının, oluklu GFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi.....	137
Şekil 3.45. Etriye varlığının, iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi	138
Şekil 3.46. Etriye varlığının, nervürlü GFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi.....	139
Şekil 3.47. Etriye varlığının, çelik donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi.....	140
Şekil 3.48. Etriye varlığının, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisinin farklı donatı türlerine göre karşılaştırılması.....	140
Şekil 4.1. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin gömülme boyuna göre maksimum aderans gerilme dağılımları	142
Şekil 4.2. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin alt pas payına göre maksimum aderans gerilme dağılımları	143
Şekil 4.3. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin beton basınç dayanımına göre maksimum aderans gerilme dağılımları	143
Şekil 4.4. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin donatı çapına göre maksimum aderans gerilme dağılımları	144
Şekil 4.5. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin elastisite modüllerine göre maksimum aderans gerilme dağılımları.....	144
Şekil 4.6. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin donatı çekme gerilmelerine göre maksimum aderans gerilme dağılımları.....	145
Şekil 5.1. Deneysel ve tahmini aderans gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması..	155

Şekil 5.2. Deneysel ve tahmini aderans gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması..	156
Şekil 5.3. Tahmini aderans gerilmesi değerlerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması	156
Şekil 5.4. Deneysel ve tahmini aderans gerilmesi değerleri arasındaki RMSE değerlerinin karşılaştırılması	157
Şekil 5.5. Deneysel ve tahmini aderans gerilmesi değerleri arasındaki MAPE oranlarının karşılaştırılması	158
Şekil 5.6. Deneysel ve tahmini kenetlenme boyu değerlerinin karşılaştırılması ..	159
Şekil 5.7. Tahmini kenetlenme boyu değerlerinin deney sonuçlarıyla korelasyonlarının karşılaştırılması	159
Şekil 5.8. Deneysel ve tahmini kenetlenme boyu değerleri arasındaki RMSE değerlerinin karşılaştırılması	160
Şekil 5.9. Deneysel ve tahmini kenetlenme boyu değerleri arasındaki MAPE oranlarının karşılaştırılması	161
Şekil A.1. Deney düzeneği mafsallarının hazırlanması	179
Şekil A.2. Deney giriş kalıplarının hazırlanması	180
Şekil A.3. Deney giriş donatılarının hazırlanması	181
Şekil A.4. Deney giriş donatılarının kalıplara yerleştirilmesi ve beton dökümü ..	182
Şekil A.5. Deney girişlerinin kalıplardan çıkarılması	183
Şekil A.6. Deney girişinin deney yükleme düzeneğine yerleştirilmesi.....	184
Şekil A.7. Sıyırılma göçmesiyle ile sonuçlanmış bir deney girişi.....	185
Şekil A.8. İnce taneli kumlanmış GFRP (GSf) donatının betondan sıyırılması sonrası yüzeyindeki deformasyon	186
Şekil A.9. İnce taneli kumlanmış CFRP (CSf) donatının betondan sıyırılması sonrası yüzeyindeki deformasyon	186
Şekil A.10. Nervürlü GFRP (GR) donatının betondan sıyırılması sonrası yüzeyindeki deformasyon	186
Şekil A.11. Oluklu GFRP (GWO) donatının betondan sıyırılması sonrası yüzeyindeki deformasyon	187
Şekil A.12. İri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP (BWw+Sc) donatının betondan sıyırılması sonrası yüzeyindeki deformasyon	187
Şekil A.13. Nervürlü betonarme çelik (SR) donatının betondan sıyırılma sonrası yüzeyindeki deformasyon	187

Şekil A.14. Donatı kopması ile sonuçlanmış kiriş numunesi	188
Şekil A.15. Kaldıraç etkisinden dolayı göçmüş bir kiriş numunesi.....	189
Şekil A.16. Beton ayrışma göçmesi ile sonuçlanmış bir deney kirişi.....	190
Şekil A.17. Deney kirişlerinde oluşan segregasyon.....	191
Şekil A.18. Deneyi tamamlanan kiriş numuneleri	192



SİMGELER DİZİNİ

a	Pas payı, Doğrunun y eksenini kestiği nokta
A, B, C, D, E	Farklı donatı türleri için deneysel katsayılar
$A_{f,bar}$	FRP donatı kesit alanı (mm^2)
A_r	Boyuna donatı alanı (mm^2)
A_{tr}, A_t	Enine donatı alanı (mm^2)
A_y	Mafsalda oluşan tepki kuvveti (kN)
b	Bağımsız değişken katsayıları
C, d_{cs}	Alt pas payı (mm)
C_{ccsb}	Donatılar arası mesafe (donatı merkezinden donatı merkezine) (mm)
C_s	Yan pas payı (mm)
D_b, d_b	Donatı anma çapı (mm)
D_i	Donatı net (iç) çapı (mm)
D_o	Donatı dış çapı (mm)
E_0	Standart elastisite modülü (200,000MPa)
E_{FRP}	FRP donatının elastisite modülü (GPa)
E_s	Çelik donatının elastisite modülü (GPa)
E_t	Enine donatının elastisite modülü (MPa)
F_a	Uygulanan kuvvet (kN)
F_b	Donatı ve beton arasında oluşan aderans kuvveti (kN)
f_{bod}	Betonun tasarım aderans dayanımı (MPa)
F_c	Betonda oluşan basınç kuvveti (kN)
$f_c, f_c', f_{ck}, f_{cy}$	Silindir beton basınç dayanımı (MPa)
f_{cr}	Betonun çatlama dayanımı (MPa)
f_{ct}, f_t	Betonun çekme dayanımı (MPa)
$f_{frp}, f_{FRP}, f_d, \sigma_f$	FRP donatı tasarım çekme gerilmesi (MPa)
F_{mode}	Kiriş göçme tipi
F_r	Boyuna donatılarda oluşan çekme kuvveti (kN)
f_r	Donatıda oluşan çekme gerilmesi (MPa)
f_{tsp}	Beton yarmada çekme dayanımı (MPa)
f_y	Çelik donatının akma gerilmesi (MPa)

k	Orantı katsayısı
K_1	Donatı yerleştirme faktörü
K_2	Beton ağırlık faktörü
K_3	Donatı kesit alanı faktörü
K_4	Donatı lif faktörü
K_5	Donatı yüzey şekli faktörü
K_t	Enine donatı dizilimi katsayısı
L	Donatı başlıkları arası donatı mesafesi (mm)
L_a	Donatı başlık uzunluğu (mm)
L_d, l_d	Kenetlenme boyu (mm)
l_e, l_b	Gömülme boyu (mm)
L_f	Lif uzunluğu (mm)
n	Bindirme bölgesinde yada kenetlenmede donatı sayısı, Enine donatı sayısı, Boyuna donatı sayısı, Deney sayısı
N	Donatıya uygulanan boyuna kuvvet (kN)
$\emptyset_f$	Lif çapı (mm)
p^*, p^{**}	Nervür yüzeyinin altındaki donatı-beton basıncı
r	Değişkenler arasındaki ilişki düzeyi
r	Korelasyon katsayısı
R^2	Tanımlayıcılık katsayısı
RI	Lif güçlendirme etkisi
s	Donatı sıyrılması, Enine donatı aralığı (mm)
S	Sargı mesafesi (mm), Yüzey özelliği katsayısı
S_0	Çelik çekme numunesi kesit alanı (mm ²)
s_1	Aderans gerilmesine karşılık gelen donatı sıyrılması (mm)
s_2	Akma platosunun sonunda ölçülen donatı sıyrılması (mm)
s_3	Nihai donatı sıyrılması (mm)
s_c	Donatılar arası mesafe (mm)
s_{cb}	Donatılar arası net mesafe (mm)
s_r, β	Farklı donatı türleri için deneysel katsayılar
T	Etriye varlığı
V_f	Hacimce lif oranı
W	Sargı kalınlığı (mm)

x	Bağımsız değişkenlerin değerleri
$\bar{x}$	x verilerinin ortalaması
x_i	x i'inci değeri
y	Bağımlı değişken
$\bar{y}$	y verilerinin ortalaması
y_e	Deneysel değerler
y_f	Tahmin edilen değerler
y_i	y i'inci değeri
α	Donatı nervür açısı, Deney sonuçlarından elde edilen eğri uydurma parametresi, Donatı yerleştirme faktörü
α_2	Aderans dayanım değiştirme katsayısı
γ_c	Beton basınç dayanımı için karakteristik değer
ρ	Deney sonuçlarından elde edilen eğri uydurma parametreleri
σ_{maks}	Maksimum normal gerilme (MPa)
σ_{min}	Minimum normal gerilme (MPa)
σ_{ort}	Ortalama normal gerilme (MPa)
σ_r	Eksenel simetrik radyal basınç (MPa)
τ, u	Aderans gerilmesi (MPa)
τ_1	Maksimum aderans gerilmesi, Enine çatlama anındaki aderans gerilmesi (MPa)
τ_2	Kısmi çatlama anındaki aderans gerilmesi (MPa)
τ_3	Nihai aderans gerilmesi, Boyuna çatlama anındaki aderans gerilmesi (MPa)
τ_{max}	Maksimum aderans gerilmesi (MPa)
τ_{PO}	Sıyırılma göçme anındaki maksimum aderans gerilmesi (MPa)
τ_{SP}	Ayrışma göçmesi anındaki maksimum aderans gerilmesi (MPa)
τ_{SPc}	Donatı çevresindeki betonun ayrışma anındaki maksimum aderans gerilmesi (MPa)

KISALTMALAR DİZİNİ

A	Segregasyon
B	Örgülü
BH1	Kalıp alınları
BM1	Kalıp orta parçaları
BS	Kalıp kanatları
CNC	Bilgisayar sayımlı yönetim
DB	Nervürlü donatı
ECC	Çimento bağlayıcılı kompozitler
ECC	Çimento Bağlayıcılı Kompozit
HM	Yüksek modüllü
LM	Düşük modüllü
LVDT	Doğrusal potansiyometre
MAPE	Ortalama mutlak yüzde hata
NDB	Normal dayanımlı beton
P	Sıyırılma göçmesi
PAN	Poliakrilonitril
PB	Düz donatı
PP	Polipropilen
PS	Sıyırılma ve beton ayrışma göçmesi
PSS	Geopolimer çimentolu beton
PVA	Polivinil alkol
R	Nervürlü
R _d	Çift sargılı nervürlü
RMSE	Hata kareleri ortalamasının karekökü
RR	Donatı kopması
S	Beton ayrışma göçmesi
S _c	Kaba taneli kumlanmış
SCC, KYB	Kendiliğinden yerleşen beton
S _f	İnce taneli kumlanmış

SFSCC	Çelik lif katkılı kendiliğinden yerleşen beton
Sh	Kesme göçmesi
T	Tavsiye edilen eşitlik, Kirişlerde etriye varlığı
VC	Vibrasyonla yerleştirilmiş beton
W _c	Dar aralıklı sıkı sargılı
WO	Oluklu
W _w	Geniş aralıklı sıkı sargılı
YDB	Yüksek dayanımlı beton



1. GİRİŞ

1.1. Tezin Konusu ve Amacı

Kompozit bir malzeme olan betonarmeyi oluşturan malzemelerden biri olan çeliğin zaman içinde korozyona uğramasıyla, betonarme yapılar, servis koşullarını zamanla karşılayamamaktadırlar. Bu yüzden betonarme yapılarda bakım ve yenileme çalışmaları gerekmektedir. Ancak betonarme yapıların bakım ve yenilenmesi hem yüksek maliyetli olmakta hem de büyük zaman almaktadır. Buna ilaveten bu yapıların yenileme çalışmaları sırasında işlevlerini yerine getirememesinden dolayı çeşitli ilave sorunlar (konforun bozulması, taşınma, trafik, alternatif güzergâh ihtiyacı, vs.) ilaveten ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu ek sorunların çözümü içinde ek tedbirler alınması gerekmektedir. Alınan ek tedbirler ise maliyeti arttırabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, çelik donatıların korozyon sorununa karşı araştırmacılar, çelik donatıyı epoksi ile kaplamak, katodik koruma yapmak, galvanizlemek gibi çeşitli çözüm arayışlarına girişmişlerdir. Ancak bu girişimlerin hiç biri soruna nihai çözüm getirmemiştir.

Lifli Polimer (FRP) donatılar, yüksek çekme ve yorulma dayanımları, korozyona karşı dayanıklı olmaları, hafiflik ve kolay işlenebilirlikleri, manyetik olmamaları ve yalıtkanlıkları gibi çeşitli nedenlerle çelik donatıların yerine yaygınlık kazanmaya başlamıştır. Fakat FRP donatıların çeliğe göre daha az bulunan ve daha maliyetli malzemelerden yapılması, gevrek gerilme-birim deformasyon özellikleri, elastisite modüllerinin düşük olması sebebiyle ortaya çıkan kullanılabilirlik sorunları, yanal dayanımların, eksenel çekme dayanımlarına göre önemli derecede düşük olması ve bu donatılarla ilgili standart ve yönetmeliklerin sınırlı olması gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Ancak FRP donatı kullanımıyla donatı korozyonu probleminin önlenerek çevresel şartların elverişsiz olduğu yerlerde yapının durabilitesi ve kullanım ömrünün uzatılmasının genel yapı maliyeti ve ülke ekonomisine yapacağı önemli katkılar düşünüldüğünde, FRP donatılı beton teknolojisinin gelecekte önemli derecede yaygınlık kazanacak bir yapım tekniği olduğu açıktır.

Salt FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını ve süneklik değerlerini belirleyen en önemli etmenlerden biri de FRP donatının betona tutunma kabiliyetleri yani aderans dayanımlarıdır. FRP donatı ile beton arasındaki aderans arttıkça, donatının artan yükler altında betondan sıyrılması gecikmekte ve dolayısıyla kirişin yük kapasitesinde ve deformasyon yapabilme kabiliyetinde önemli artışlar olmaktadır.

Günümüzde betonda donatı çubuğu olarak kullanılan Karbon Lifli Polimer (CFRP), Cam Lifli Polimer (GFRP), Aramid Lifli Polimer (AFRP), Bazalt Lifli Polimer (BFRP) olmak üzere dört ayrı lifli polimer donatı malzemesi bulunmaktadır. Bu polimer donatı çubuklarının betonla kenetlenmelerini sağlamak için donatı yüzeyleri farklı deformasyon işlemlerine tabi tutulmaktadır. Bu işlemler sonucu, düz, örgülü, sargılı, nervürlü, kumlanmış veya bunların kombinasyonu çeşitli yüzey deformasyonlarına sahip donatılar üretilmektedir.

FRP donatıların mekanik özelliklerinin ve yüzey deformasyon şekillerinin çelik donatılardan farklı olması nedeniyle, FRP donatıların beton ile olan aderans dayanımlarının çelik donatı-beton aderans dayanımından farklı olması beklenebilir. FRP donatı-beton aderansını belirleyen değişkenler, donatının lif türü (CFRP, GFRP, AFRP, BFRP), donatının reçine türü (epoksi, polyester, vinilester), donatı yüzey özelliği (düz, örgülü, sargılı, nervürlü, kumlanmış, vs.), donatı çapı, elastisite modülü, betona gömülme uzunluğu, donatı aralığı ve pas payı, donatının eleman içerisindeki konumu, beton dayanımı ve lif oranı, elemandaki enine donatı oranı ve çevre koşulları olarak sıralanabilir.

Geçmişte FRP-beton aderansı üzerine çok sayıda araştırma yapılmış olmasına karşın, yapılan çalışmalar, bu FRP donatı çeşitlerinden yalnızca birini veya birkaçını ve genellikle sadece bir veya birkaç yüzey özelliğini göz önünde bulundurmıştır. Ayrıca, aderansı belirleyen birçok değişken bulunmasının göz ardı edilmesi nedeniyle, deneyler yalnızca bir deney değişkeninin etkisini incelemek üzere diğer deney değişkenlerinin sabit tutulması esasına uygun olarak yapılmamıştır. Buna ilaveten bu çalışmaların çoğu çekip çıkarma deneyi tabanlıdır. Bu deney yöntemi ise aderans gerilmesini tespit etmek için değil donatılar arasında karşılaştırma yapabilmek için kullanılmalıdır.

Uluslararası FRP donatılı beton yönetmelikleri olan, ACI 440.1R-15 [1], CNR [2], CSA S6-14 [3], CSA S806-12 [4], JSCE 1997 [5], yönetmelikleri de FRP donatı-beton aderans gerilmesinin veya kenetlenme boyunun tespiti ile ilgili bağıntılar sunmuşlardır. Ancak bu bağıntılar aşırı güvenli sonuçlar vermesinden dolayı, bu yönetmeliklerdeki aderans bağıntılarının revize edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, FRP donatıların beton ile olan aderanslarını incelemek maksadı ile 90 adet mafsallı kiriş deney numunesi tekdüze düşey yükler altında test edilerek donatı lif türü (bazalt, cam, karbon), donatı yüzey özellikleri (nervürlü, sargılı, oluklu, kumlanmış), donatılar arası mesafe, donatı alt ve yan pas payı, donatı çapı, donatı gömülme boyu, etriye aralığı, beton basınç dayanımı gibi değişkenlerin FRP-beton aderansına etkisi incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, aynı gömme derinliğine ve beton özelliklerine sahip nervürlü çelik donatılı numuneler de test edilerek, bu donatıların dayanımları FRP donatılı numunelerin aderans dayanımları ile kıyaslanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına dayalı olan regresyon analizleri sonucunda analitik kenetlenme boyu denklemleri geliştirilerek, bu denklemlerden elde edilen değerler hem deney sonuçları hem de uluslararası FRP donatılı beton yönetmeliklerinde geçen kenetlenme boyu denklemlerinden bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda önerilen aderans gerilmesi ve kenetlenme boyu denklemlerinin uluslararası yönetmeliklerde geçen bağıntılar ile elde edilen değerlerden çok daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu konu kapsamında beton-FRP donatı arasındaki aderansı etkileyen aşağıdaki parametreler incelenecektir. Ayrıca bu deneyler çelik donatılı kirişler için de yapılacaktır.

- FRP donatı lif etkisinin aderansa etkisi (GFRP, BFRP, CFRP)
- FRP donatı yüzey özelliklerinin aderansa etkisi (ince taneli kumlanmış, iri taneli kumlanmış, oluklu, sargılı, nervürlü ve iri taneli kumlanmış sargılı yüzeyli)
- FRP donatı çapının aderansa etkisi (6 mm, 8 mm ve 12 mm)
- Beton basınç dayanımının aderansa etkisi (C25, C30, C35 ve C40)

- Alt pas payının aderansa etkisi ($2.5d_b$, $3.5d_b$ ve $4.5d_b$)
- Yan pas payının aderansa etkisi ($2.5d_b$, $3.5d_b$ ve $4.5d_b$)
- Donatılar arası mesafesinin aderansa etkisi ($3.75d_b$, $7d_b$ ve $11d_b$)
- Donatı gömülme boyunun aderansa etkisi ($5d_b$, $10d_b$ ve $20d_b$)
- Etriye varlığının aderansa etkisi

1.2. Lif Takviyeli Polimer (FRP)

Lif takviyeli polimer (FRP), yüksek çekme dayanımına sahip liflerin polimer reçine matrisi içine yerleştirilmesiyle elde edilen kompozit bir malzemedir. Yüksek çekme dayanımına sahip lifler yükleri taşıırken, matris, lifleri koruma, birlikte tutma ve yükleri liflere aktarma gibi fonksiyonlara sahiptir.

Takviyeli beton yapılarda lif takviyeli plastik (FRP) ürünler 1950'lerden beri kullanılmaktadırlar [6]. Günümüzde FRP malzemeler, çubuk, donatı, tendon, kumaş, plaka, ızgara vb. birçok formda üretilebildikleri için başta havacılık sanayi olmak üzere, inşaat, otomotiv vb. birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Çeşitli FRP ürünleri [7]

FRP ürünlerini meydana getiren lif ve matrisin özellikleri, üretim sürecini ve bu üretim süreci sonunda ortaya çıkan ürünlerin mekanik özelliklerini önemli oranda etkilemektedirler.

1.2.1. Polimer Matrisler

FRP ürünlerin bileşenlerinden biri olan polimer matris (reçine), lifleri birarada tutarak liflerin dağılmasını engellemesinin yanında lifleri dışarıdan gelebilecek zararlara karşı korumaktadır [8]. Bunlara ek olarak, reçine liflerin basınç yükleri altında yanıl burkulmalarını önler, ayrıca FRP malzeme de katmanlar arası ve düzlem içi kayma gerilmelerini aktarmaktadır [9].

FRP malzemelerde kullanılan polimer matrisler genellikle termoplastik ve termoset polimer reçine olarak iki kategoriye ayrılabilirler. Ancak FRP malzemelerde kullanılan matrisler genellikle termoset polimer reçinelerdir. İlk formunda, termoset reçineler genellikle sıvı veya düşük erime noktalı katı maddelerdir ve bir katalizör ile ısı veya ikisinin bir kombinasyonu ile sertleştirilirler. Katı termoset reçineler, termoplastik reçinelerin (nylon vb.) aksine, bir kez sertleştğinde, orijinal sıvı formlarına geri dönüştürülemez veya yeniden şekillendirilemezler [10].

Termoset reçinelerin, termoplastik reçinelere göre, daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasının yanında sünme dirençlerinin, termal kararlılıklarının ve kimyasal dirençleri de daha yüksektir. Ancak düşük darbe dayanımları, uzun şekil verme süreleri, depolama ömrünün sınırlı olması gibi dezavantajlara da sahiptirler [11]. Bu termoset reçinelerin tipik özellikleri Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. FRP malzemelerde kullanılan termoset reçinelerinin tipik özellikleri [7]

Reçine	Özgül Ağırlık	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kür Büzülmesi (%)
Epoksi	1.20-1.30	55.00-130.00	2.75-4.10	1.00-5.00
Polyester	1.10-1.40	34.50-103.50	2.10-3.45	5.00-12.00
Vinilester	1.12-1.32	73.00-81.00	3.00-3.35	5.40-10.30

Kompozit sanayinde en yaygın olarak kullanılan termoset polimer reçineler epoksiler, polyester ve vinilesterlerdir [10].

Epoksi

Epoksi reçinesi, yüksek mekanik özelliklerinin yanısıra, işleme kolaylığı, kürlenme sırasında düşük büzülme yapması, çeşitli liflere iyi yapışması, yüksek korozyon direncine sahip olması, su ve ısıdan diğer polimer matrislere göre daha az etkilenmesi, aşındırıcı sıvı ve ortamlara karşı yüksek dayanıklılığı gibi avantajlara sahip olmasının yanında yüksek maliyete ve uzun kür süresi gibi dezavantajlara sahiptir [10].

Polyester

Polyester reçinesi ortam sıcaklığında sertleştiğinden işleme kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle en yaygın kullanılan reçinelerdendir [12]. Ancak vinilester ve epoksi reçinesi ile karşılaştırıldığında kimyasal etkilere daha az dayanıklı olması üreticide birtakım soru işaretlerine yol açabilmektedir [10]. Ayrıca dayanımı ve elastisite modülü epoksi reçineler ile kıyaslandığında daha düşük olmasının yanında %5 ila %12 oranında yüksek büzülmeye sahip olmaları, tamamlanmış ürünlerde düzensiz deformasyonlara yol açabilmektedir [11].

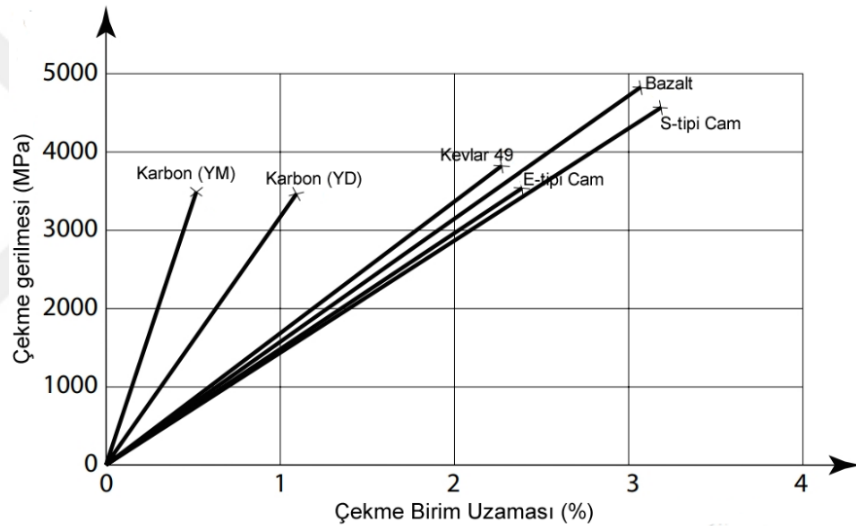
Vinilester

Vinilesterler, epoksi reçinesi gibi kimyasal etkilere dayanıklı ve yüksek mukavemetli olmaları yanında, viskozite ve hızlı sertleştirme gibi polyester özelliklerinde bazılarını sergiler. Ayrıca vinilesterler iyi alkali dirençlerinin yanısıra, cam elyafı tarafından emilimlerinin iyi olması ve iyi yapışması nedeniyle cam lif takviyeli polimer donatı (GFRP) üretiminde başlıca tercih sebebi olmaktadır [10].

1.2.2. Lifler

Lifler (fiberler, elyaflar) FRP malzeme içinde kullanıldıkları uzunluk boyunca hem yükün taşınmasını sağlarlar hemde FRP malzemeye dayanım ve rijitlik sağlarlar. Lifler doğal ve yapay olmalarının yanında genellikle ticari olarak kullanılan lifler yapay liflerdir [13].

Farklı kesit şekillerine ve boyutlarına sahip olan liflerin performansı, uzunluklarından, kesit şekillerinden ve kimyasal birleşimlerinden etkilenirler. FRP'ler içinde en yaygın kullanılan lifler karbon, cam ve aramittir [7]. Bu liflerin tipik mekanik özellikleri Çizelge 1.2'de bulunabilir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Liflerin gerilme-birim uzama davranışları [14]

Cam Lifleri

Cam lifleri çeşitli kalitelere olmak üzere silika kumundan yapılmaktadırlar. Yaygın olarak kullanılan cam lifleri, düşük maliyeti, yüksek elektrik dayanıklılığı ve yüksek mekanik özelliği bulunan E tipi cam (E-glass), daha yüksek çekme dayanımına ve elastisite modülüne sahip olan S tipi cam (S-glass) ve alkali dayanımı yüksek olan alkali dirençli cam (AR-glass) liflerdir [10]. Cam lifleri diğer lifler ile kıyaslandığında

düşük maliyetleri, yüksek çekme dayanımları, yüksek kimyasal dayanıklılıkları, yalıtkan olmaları gibi avantajlarının yanında genellikle düşük elastisite modülüne, yüksek sertliğe, nispeten daha az yorulma dayanımına sahiplerdir [11].

Çizelge 1.2. FRP malzemelerde kullanılan liflerin tipik özellikleri [14]

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 (E-glass)	2500	3450	72.4	2.4	5	0.22
S tipi cam (S- glass)	2500	4580	85.5	3.3	2.9	0.22
Alkali dirençli cam (AR-glass)	2270	1800-3500	70-76	2.0-3.0	-	-
E-CR cam	2620	3500	80.5	4.6	6	0.22
Yüksek modüllü karbon (Carbon- HM)	1950	2500-4000	350-650	0.5	-1.2...-0.1	0.20
Yüksek dayanımlı karbon (Carbon-HS)	1750	3500	240	1.1	-0.6...-0.2	0.20
Aramid (Kevlar 29)	1440	2760	62	4.4	-2.0 boyuna 59 radyal	0.35
Aramid (Kevlar 49)	1440	3620	124	2.2	-2.0 boyuna 59 radyal	0.35
Aramid (Kevlar 149)	1440	3450	175	1.4	-2.0 boyuna 59 radyal	0.35
Aramid (Technora H)	1390	3000	70	4.4	-6.0 boyuna 59 radyal	0.35
Aramid (SVM)	1430	3800-4200	130	3.5	-	-
Bazalt (Albarrie) (Basalt)	2800	4840	89	3.1	8	-

Karbon Lifleri

Karbon liflerinin üretiminde genellikle, katran petrol damıtılmasının bir yan ürünü olan katran, PAN (poliakrilonitril), bitkisel ipek kullanılmaktadır ve karbon liflerinin özellikleri kusurların moleküler yapısı ve derecesi ile kontrol edilmektedir [6]. PAN tabanlı karbon lifleri yüksek dayanımları ve yüksek modülleri dolayısıyla inşaat

mühendisliği uygulamalarında genellikle tercih edilmektedirler [10]. Karbon lifleri diğer lifler ile kıyaslandığında yüksek çekme dayanımına, yüksek elastisite modülüne, çok düşük genleşme katsayısına, yüksek yorulma dayanımı gibi avantajlarının yanında genellikle yüksek maliyetli olmaları, gevrek olmaları, elektrik iletkenlikleri olması gibi dezavantajlara sahiptirler [11].

Aramid Lifleri

Aromatik poliamid organik bir lif olan aramid lifler, yüksek çekme dayanımları, çok düşük yoğunlukları, çarpışma dayanımlarının yüksek olması, elektrik ve ısı yalıtkanlıklarının yüksek olması gibi nedenlerle tercih edilirler. Ancak bu lifler düşük basınç dayanımlarına sahip olmaları nedeniyle genellikle kablo ya da halat olarak kullanılmaktadırlar [13]. İnşaat sektöründe kullanım alanlarının kısıtlı olması yanında daha çok savunma sanayinde kullanılırlar.

Bazalt Lifleri

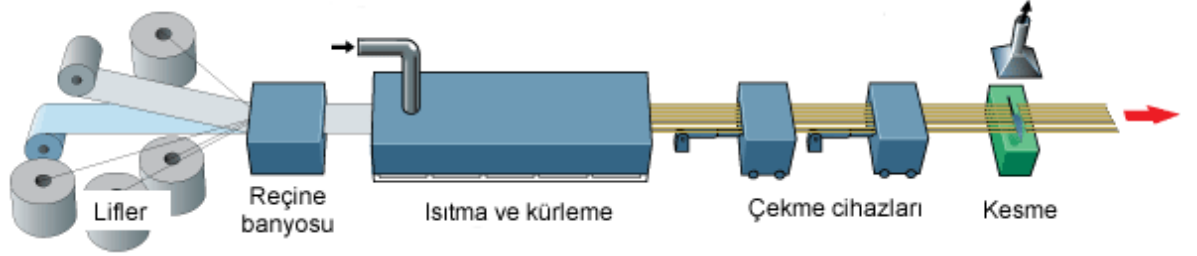
Bazalt lifleri ezilmiş volkanik lavlar ile eritilmesiyle elde edilen tek bileşenli bir malzemedir. Bu lifler, karbon liflerine göre çok daha ucuz ve cam liflerine göre daha uygun fiziko-mekanik özelliklere sahiptirler. Bazalt lifleri yüksek çekme dayanımları ve yüksek kimyasal dayanıklılıklarına sahiptirler [14].

1.2.3. Üretim Süreci

FRP malzemelerini üretmek için pultrüzyon, el yatırması, iplik sarma vb. bir çok yöntem bulunmasına rağmen FRP çubuk ve donatı üretiminde genellikle pultrüzyon yöntemi kullanılmaktadır [10].

Bu yöntemde liflerin sürekli olarak çekilmesi sırasında, uygun bir sıvı reçine banyosuna sokularak lifler reçineyle emdirildikten sonra uygun bir kütleme fırınına sokularak reçinenin sertleşmesi sağlanarak çubuk üretilir. Daha sonra istenen boylarda kesilerek üretim işlemi tamamlanmış olur. Ayrıca, üretim

sürecinde FRP çubuklar, krleme fırınına sokulmadan önce kum kaplama veya lif sarma gibi işlemlerden geçirilerek istenen yüzey deformasyon şekilleri verilebilmektedir. Üretim yöntemi ile ilgili süreç Şekil 1.3'de gösterilmiştir.

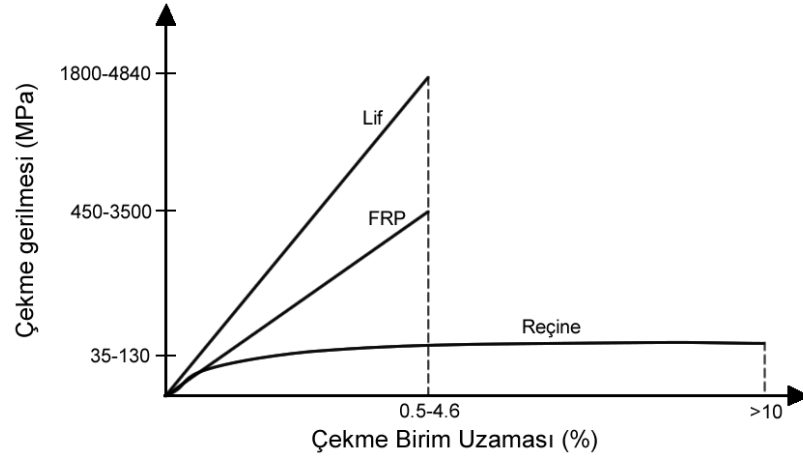


Şekil 1.3. Pltruzyon süreci (Anonim, 2018'den değiştirilerek)

1.2.4. FRP Donatıların Özellikleri ve Çelik Donatı ile Karşılaştırılması

Dünyada, ticari amaçla kullanılan FRP donatılar hem üretiminin artması hem de üretim artışına endeksli fiyatların düşmesiyle beraber gittikçe yaygınlaşmaya başlamışlardır.

FRP donatılar, çelik donatılar gibi, üretim yöntemlerine göre çeşitli çaplarda ve yüzey özelliklerinde üretilebilmektedirler. Ancak çelik donatıdan farklı olarak kompozit FRP donatıyı meydana getiren lif ve reçinelerin türü, kalitesi ve hacimsel oranları (hacimsel lif oranı en az %55 olmalıdır [7]) ile üretimin kalitesi FRP donatının hem fiziksel hem de mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. FRP donatı ve bileşenlerinin çekme özellikleri

FRP donatıların, çelik donatılara göre avantajları ve dezavantajları Çizelge 1.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.3. FRP malzemelerin çelik donatılara göre avantajları ve dezavantajları [1]

FRP donatıların avantajları	FRP donatının dezavantajları
• Yüksek çekme dayanımı (lif doğrultusunda) • Korozyona uğramaması • Manyetik olmaması • Yüksek yorulma direnci • Hafiflik (Çelik yoğunluğunun yaklaşık 1/4’ü ile 1/5’dir.)	• Kopmadan önce akma göstermezler (doğrusal davranış gösterirler) • Düşük elastisite modülü • Düşük yangın dayanımı • Anizotropik yapı • Termal genleşme katsayısı lif doğrultusunda ve radyal doğrultuda farklıdır. • Beton içine yerleştirilmeden önce nemden ve güneş ışığından korunmalıdır.

Ticari amaçla üretilen FRP donatıların başında hem üretiminin fazla olması hem de diğer FRP donatılara göre daha uygun fiyatlarda olması nedeniyle cam lif takviyeli polimer (GFRP) donatılar gelmektedir. Ancak bazalt FRP (BFRP) donatıların kullanımı da gün geçtikçe artmaktadır. Karbon ve aramid FRP (CFRP ve AFRP) donatılar ise fiyatların pahalı olması nedeniyle şuan için araştırma aşamasında daha çok kullanılmaktadırlar.

Ticari ve araştırma amacı ile kullanılan FRP donatıların (AFRP, BFRP, CFRP, GFRP) fiziksel özelliklerinden yoğunlukları Çizelge 1.4’de ve termal genleşme katsayıları ise Çizelge 1.5’de gösterilmiştir. Ayrıca bu donatıların mekanik özelliklerinden çekme özellikleri ise Çizelge 1.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 1.4. Lif oranı 0.5 ile 0.75 olan FRP donatıların yoğunlukları (kg/m³) [14]

Matris	CFRP	AFRP	GFRP	Çelik
Polyester	1430-1650	1310-1430	1750-2170	7850
Epoksi	1440-1670	1320-1450	1760-2180	
Vinilester	1440-1630	1300-1410	1730-2150	

Çizelge 1.5. Lif oranı 0.5 ile 0.75 olan FRP donatıların termal genleşme katsayıları (x10⁻⁶/°C) [14]

Doğrultu	CFRP	AFRP	GFRP	Çelik
Boyuna	-9...0	-2...-6	6...10	11
Enine	74...104	60...80	21...23	11

Çizelge 1.6. Lif oranı 0.5 ile 0.75 olan FRP donatıların çekme özellikleri [14]

	CFRP	AFRP	GFRP	Çelik
Elastisite modülü (GPa)	100-580	40-125	35-60	200
Çekme dayanımı (MPa)	600-3500	1000-2000	450-1600	450-700
Kopma birim uzaması (%)	0.5-1.7	1.9-4.4	1.2-3.7	5-20

FRP donatılar yüksek çekme dayanımlarına sahip olmalarına rağmen basınç gerilmelerine karşı dayanacak şekilde tasarlanmaları, liflerin mikro burkulmalarından ve kesme hatalarından dolayı önerilmemektedir [1]. Ancak GFRP ve CFRP donatıların kolonlarda kullanılması durumunda, ortalama taşıma kapasiteleri maksimum yükün sırasıyla %5 ile %12’sidir [1]. Ayrıca FRP donatıların basınç dayanımının belirlenmesi için henüz bir test metodu geliştirilememiş olduğu unutulmamalıdır [10].

FRP donatıların kesme dayanımları içinde standart bir test metodu bulunmamaktadır. Tipik kesme dayanımları ise 30 ile 50 MPa arasında değişmektedir [10].

FRP donatıların yüzey deformasyon şekilleri çok çeşitli olduğundan, yüzey deformasyon isimlerinde literatürde bir karışıklık bulunmaktadır. Bu nedenle bir makalede bahsedilen deformasyon şekli ile başka bir makalede bahsedilen deformasyon şekli aynı olmasına karşı isimlendirmeler farklı yapılabilmektedir. Ya da farklı deformasyon özelliklerine sahip donatıların isimlendirmeleri aynı olabilmektedir. Bu nedenlerle özellikle literatürde deney sonuçlarının kıyaslanması sırasında yüzey isimlendirmeden kaynaklı hatalar sonuçların yanlış yorumlanmasına neden olabilmektedir. Bu çalışmada ayrıca mümkün olan tüm donatı yüzey deformasyon çeşitleri araştırılarak literatürdeki bu isim karışıklığına çözüm bulabilmek maksadı ile donatılar yüzey deformasyon şekillerine göre tekrar isimlendirilmişlerdir. FRP donatıların yüzey deformasyon şekilleri yeni isimlendirmeleri ile Çizelge 1.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.7. FRP donatılar için önerilen yüzey deformasyon isimleri

FRP Yüzey Şekilleri							
Malzeme Ekleme Yöntemi						Malzeme Çıkarma Yöntemi	Örme Yöntemi
Sıkı Sargılı		Gevşek Sargılı		Kumlanmış			
							
W _c	W _w	R	R _d	S _c	S _f	WO	B
W_c : Dar aralıklı sıkı sargılı (Closely-spaced and tight wrapping) W_w : Geniş aralıklı sıkı sargılı (Widely-spaced and tight wrapping) R : Nervürlü (Ribbed) R_d : Çift sargılı nervürlü(Ribbed (double strand)) S_c : Kaba taneli kumlanmış (Coarse sand coated) S_f : İnce taneli kumlanmış (Fine sand coated) WO : Oluklu(Wound) B : Örgülü(Braided)							

1.2.5. Uluslararası FRP Donatılı Beton Yönetmelikleri

Uluslararası FRP donatılı beton yönetmeliklerinin tarihsel kronolojisi Çizelge 1.8’de sunulmuştur.

Çizelge 1.8. Uluslararası FRP donatılı beton yönetmeliklerinin tarihsel kronolojisi

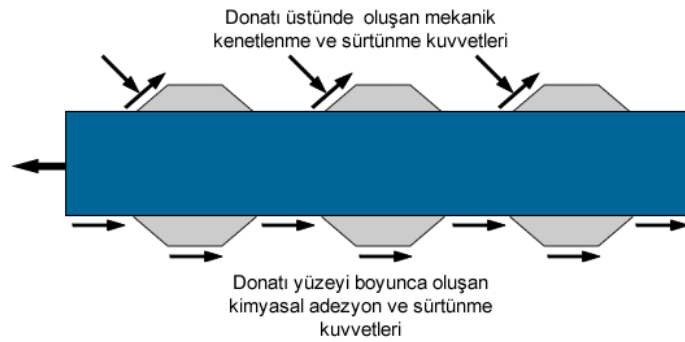
Ülke	Kuruluş	Yönetmelik/Teknik Rapor	Yıl
Japonya	Japan Society of Civil Engineers (JSCE)	JSCE 1997 [5]	1997
Kanada	Canadian Standards Association (CSA)	CSA S6-00 [16]	2000
Kanada	Intelligent Sensing for Innovative Structure (ISIS)	Design Manuel No.3 [17]	2001
Amerika Birleşik Devletleri	American Concrete Institute (ACI)	ACI 440.1R-01 [18]	2001
Kanada	Canadian Standards Association (CSA)	CSA S806-02 [19]	2002
Amerika Birleşik Devletleri	American Concrete Institute (ACI)	ACI 440.1R-03 [9]	2003
Mısır	Housing and Building National Research Centre (HBNRC)	ECP 208-2005 [20]	2005
Kanada	Canadian Standards Association (CSA)	CSA S6-06 [21]	2006
Amerika Birleşik Devletleri	American Concrete Institute (ACI)	ACI 440.1R-06 [22]	2006
İtalya	Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (CNR)	CNR DT203-2006 [2]	2006
Canada	Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS)	Design Manuel No.3 [7]	2007
İsviçre	The International Federation for Structural Concrete (fib)	fib Bulletin 40 [14]	2007
Kanada	Canadian Standards Association (CSA)	CSA S806-12 [4]	2012
Kanada	Canadian Standards Association (CSA)	CSA S6-14 [3]	2014
Amerika Birleşik Devletleri	American Concrete Institute (ACI)	ACI 440.1R-15 [1]	2015

1.3. FRP Donatı Beton Aderansı

1.3.1. Aderans Mekanizması

FRP donatılı beton elemanların eğilme davranışlarını etkileyen en önemli etkenlerden biri de FRP donatıyla beton arasındaki aderanstır. Betonarme eğilme elemanlarında, donatılar tarafından taşınan çekme kuvveti betonda basınç kuvvetini dengeler. Beton yüzeyi ve donatı arasındaki aderans sayesinde çekme kuvvetleri donatıya aktarılır. Beton-FRP donatı arasındaki aderans mekanizması, çelik donatıların aderans mekanizmasına benzerdir. Donatıda oluşan çekme kuvvetleri donatıyı saran betona üç yolla aktarılabilir [23] (Şekil 1.5).

- Donatı-beton arasında oluşan kimyasal adezyonla
- Donatı yüzeyindeki pürüzlerden, donatı yüzeyinde betonun sargılama kuvveti ve donatı sıyrılması esnasından oluşan sürtünme kuvvetleriyle
- Donatı nervürlerinin betona karşı kitlenmesinden oluşan mekanik kilitlenme neticesinde

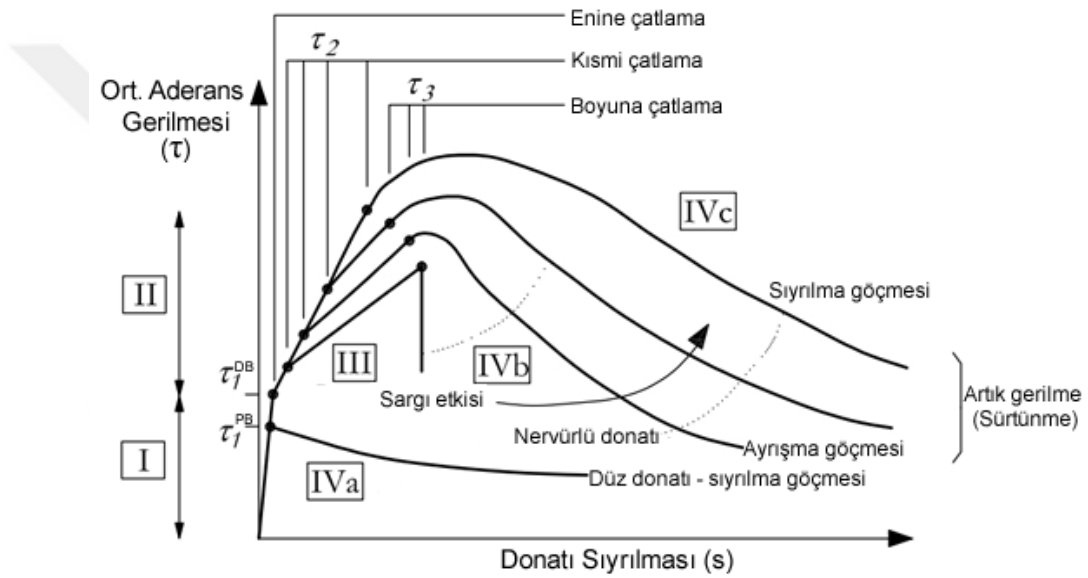


Şekil 1.5. Donatı-beton arasındaki aderans mekanizması (ACI 408R-03, 2013'den, değiştirilerek)

1.3.2. Çelik Donatı ile Beton Arasındaki Aderans Davranışı

Her ne kadar çalışmamızda FRP donatı-beton aderans davranışı araştırılıyor olsa da, bu davranışın daha iyi anlaşılmasına yardımcı olan beton-çelik donatı aderans davranışı bu bölümde anlatılacaktır.

Araştırmacılar çekip çıkarma kuvvetleri altında, çelik donatı ile beton arasındaki aderansı 4 farklı aşamada gerçekleştirebileceğini belirtmişlerdir. Bu aşamalar aşağıda madde madde belirtilmiştir [24].



Şekil 1.6. Çelik donatı ile beton arasındaki aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi (fib Bulletin 10, 2000'dan, değiştirilerek)

1. Aşama (çatlamamış beton): Düşük aderans gerilmelerinde ($\tau \leq \tau_1 = (0.2-0.8)f_{ct}$) aderans genellikle kimyasal adezyon tarafından sağlanır ve bu aşamada donatı sıyrılması oluşmaz. Ancak sınırlandırılmış yüksek gerilmeler nervür uçlarına doğru artmaktadır (Şekil 1.7.a). Donatının tüm aderansı dikkate alındığında kimyasal adezyon küçük bir öneme sahiptir.

Yüzeye göre göreceli ve betondaki kayma deformasyonları kaynaklı donatı sıyrılmalarının betonun şekil değiştirmemiş başlangıç durumuna göre belirlenmesi

gerekir (Şekil 1.7.d). Ayrıca bu aşamada donatıda sıyrılma olmasa bile ara yüzeye yakın yerlerde birim şekil değıştirmeler nedeniyle bir miktar yerdeğıştirme meydana gelebilir.

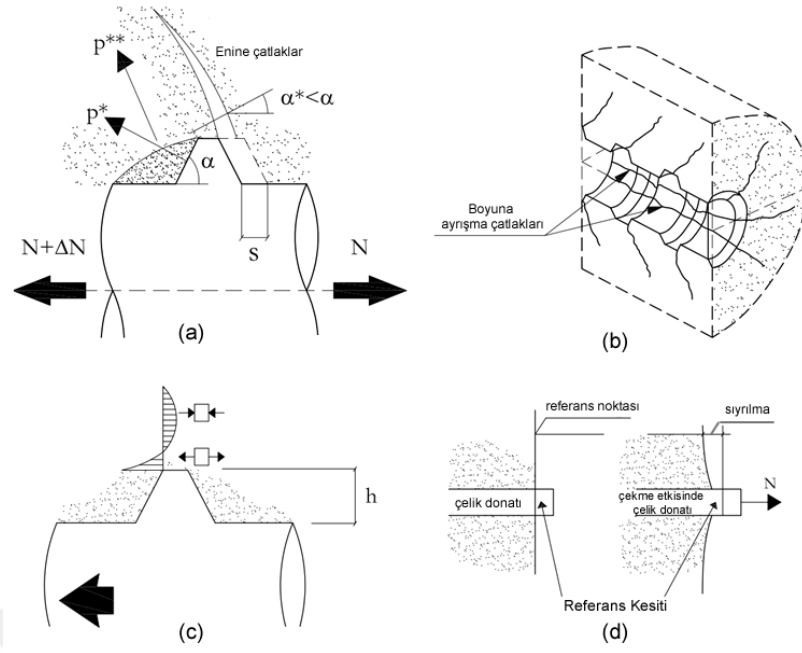
2. Aşama (ilk çatlaklar): Daha yüksek aderans gerilmelerinde ($\tau > \tau_I$) kimyasal adezyon sonlanır. Nervürlü donatılardaki nervürler betonda büyük yatak gerilmelerine neden olarak, enine kılcal çatlaklara yol açar (Şekil 1.7.a). Ancak nervürlerin basınç etkileri sınırlı kaldığı için betonda ayrışmalar yaşanmaz.

3. Aşama: Daha yüksek aderans gerilmelerinde ($\tau > \tau(1-3)f_{ct}$), nervürlerin basınç etkisiyle beton ezilerek boyuna çatlaklar (ayrışma çatlakları Şekil 1.7.b) radyal olarak yayılır.

Az oranlarda enine donatı kullanılması durumunda, betonda oluşan çatlaklar, betonun dış yüzeyine ulaştığı anda (kesintisiz çatlaklar τ_3) aderans gerilmesinde ani bir düşüş gerçekleşir ve beton ayrışma göçmesi (4. aşama b tipi, ayrışma göçmesi) meydana gelir.

Enine donatının ortalama oranlara yakın kullanılması durumunda ve donatı gömölme boyunun nispeten daha uzun olduğu durumlarda, ayrışma göçmesini donatı sıyrılması takip edebilir. Bu göçme tipi ise ayrışma kaynaklı sıyrılma göçmesi diye tanımlanmaktadır (Şekil 1.8.b).

Enine donatı oranının yüksek olması ya da büyük beton örtüsü kalınlıklarında, sargılanma etkisinin büyüklüğü nedeniyle, donatı etrafındaki beton çatlaması sınırlı kalarak (4. aşama c tipi, sıyrılma göçmesi) donatı betondan sıyrılır.



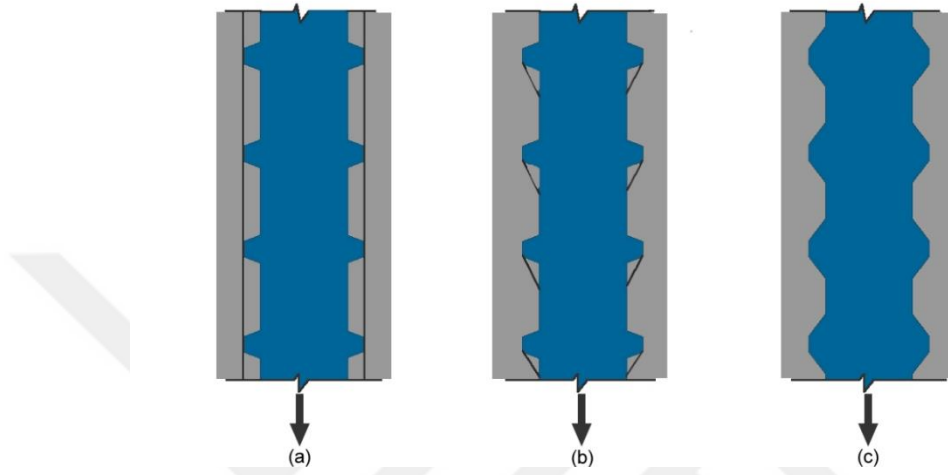
Şekil 1.7. a)Donatı ile beton arasındaki mekanik kilitleme ve betonun ezilmesi
b)Boyuna ayrışma çatlakları c)Gerilme tepe noktaları d)Göreceli donatı hareketi (fib Bulletin 10, 2000'dan, değiştirilerek)

4. Aşama (a): Düz donatı çubuklarında kimyasal adezyonunun bozulmasıyla kuvvet aktarımı sürtünme ile sağlanır ve sürtünme kuvvetleri enine kuvvetlerden büyük oranda etkilenmektedir. Betonun büzülmesi ve donatının pürüzlülüğü sürtünme kuvvetlerini arttırırken, sürtünme düzlemi boyunca arayüz aşınması radyal basınç gerilmelerini azaltarak aderans gerilmelerinin azalmasına yol açar.

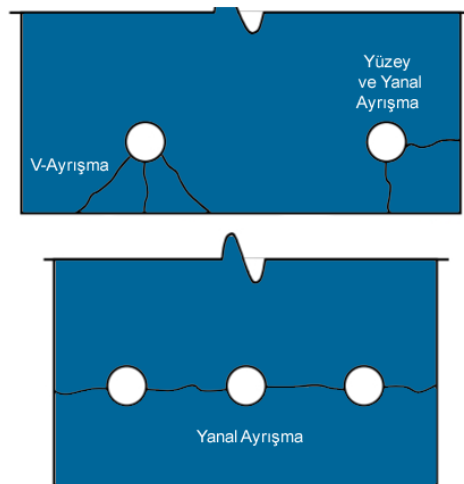
4. Aşama (b): Nervürlü donatıların enine donatıyla sarılma miktarına bağlı olarak (az ya da orta), ayrışma çatlakları tüm beton örtüsü ve donatılar arasındaki betonda aniden oluşarak, aderansı ani bir şekilde düşürür (Şekil 1.8.c).

Diğer taraftan nervürlü donatı yeterli miktarda enine donatı ile sargılandığında, sargılar tarafından oluşturulan sargılama etkisi ile beton ayrışmasına rağmen aderans performansı devam eder.

4.Aşama (c): Nervürlü donatıların enine donatıyla sarılma miktarının fazla olması durumunda ayrışma göçmesi önlenir ve donatı sıyrılması oluşur. Donatı sıyrılması esnasında kuvvet mekanizması mekanik kilitlenmeden, sürtünme ve betonun kesilmesine (nervürler arasındaki) doğru değişerek aderans gerilmesini yavaşça azalmasını sağlar (Şekil 1.8.a).



Şekil 1.8. a)Sıyrılma göçme tipi b)Nervürlerin altındaki betonun ezilmesi ya/ya da betonun kesilmesi ile ayrışma kaynaklı sıyrılma göçmesi c)Ayrışma göçmesi (fib Bulletin 10, 2000'dan, değiştirilerek)

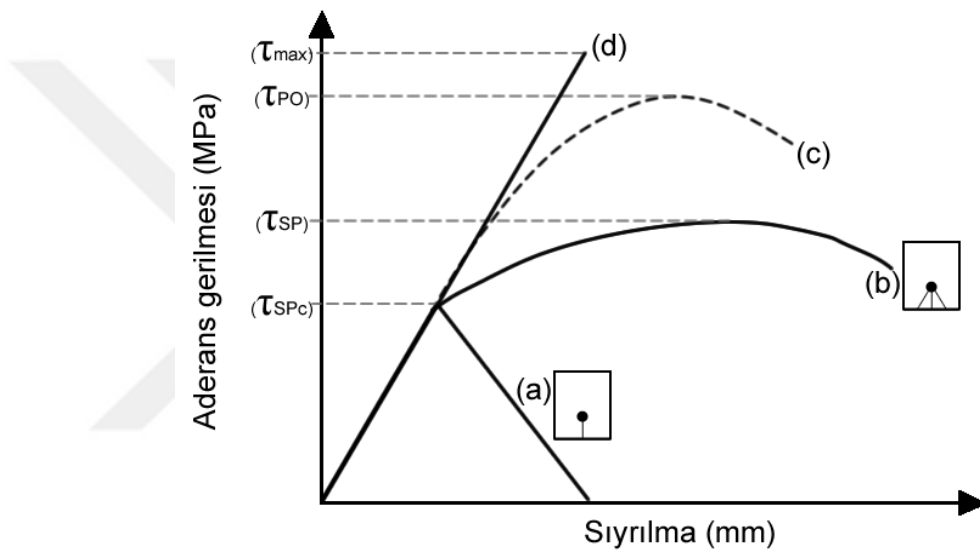


Şekil 1.9. Çeşitli ayrışma göçme tipleri (Thompson vd., 2002'den, değiştirilerek)

1.3.3. FRP Donatı ile Beton Arasındaki Aderans Davranışı

FRP donatıların beton ile aderansları sırasında oluşan göçme şekilleri 4 kategoriye ayrılabilir (Şekil 1.10): a)Ayrışma göçmesi, b)Tepe noktasının ötesinde kısmi yumuşamış donatı davranışı (Relatively mild post peak behavior) c)Sıyrılma göçme tipi d)Donatı kopması.

Ayrışma ise, net beton örtüsünün çatlaması veya donatı çevresindeki betonun ayrışması ile iki farklı şekilde oluşabilir (Şekil 1.10.a-b).



Şekil 1.10. FRP donatının göçme tipleri (fib Bulletin 40, 2007'dan, değiştirilerek)

Çekip çıkarma deneyinde, donatının beton içine kısa gömülmesi ve donatının beton ile yeterince kuşatılmasıyla (ayrışma göçmesi önlenir), maksimum ortalama aderans gerilmesine ulaşılabilir. Maksimum ortalama gerilmeden sonra aderans azalışı 4 farklı sıyrılma göçme tipi ile açıklanabilir [14].

Donatı yüzey deformasyonlarının bir kısmının ya da tümünün kırılması: Bu durumda FRP donatının aderansı betonun mukavemeti tarafından kontrol edilmez. FRP donatının aderansı, ya donatının yüzey deformasyonlarının (nervürlerinin, dişlerinin) kesme dayanımı ya da donatıyı oluşturan liflerin tabakaları arasındaki kesme dayanımı

tarafından kontrol edilir. Böyle bir göçme anından önce, donatı ile beton arasındaki aderans en yüksek değerlerine çıkabilmekte ancak göçmenin başlamasıyla ani yük azalışları oluşmaktadır (Şekil 1.10).

Beton kesilmesi: Bu durum çelik donatı ile beton arasındaki aderansın sıyrılma göçme tipine (Şekil 1.8.a) benzemektedir. Böyle bir durumda donatı yüzey deformasyonları arasındaki beton ezilir ve aderans dayanımı betonun kesme dayanımı tarafından kontrol edilir. Ancak FRP donatıların düşük yüzey sertliği ve kesme dayanımı yetersizliğinden dolayı betonda oluşan kılcal çatlakları büyütmek için gereken kuvvet çoğunlukla oluşmadığı için böyle bir göçme durumu pek olası görünmez.

Sürtünme: Aderans dayanımı radyal yönde düşük rijitliğe sahip olan donatının, yüzey deformasyonları ile betonu sıkıştırması sonucu sürtünme ile sağlanır. Bu durumda aderans davranışı çok daha sünektir ve maksimum aderans gerilmesi, betonun donatıyı kuşatmasına, çubuğun yüzey deformasyonlarına ve radyal rijitliğine bağlıdır.

Birleştirilmiş Göçme Tipleri: Yukarıda açıklanan göçme tiplerinin herhangi bir kombinasyonu nedeniyle olası başka bir göçme tipinin oluşmasıdır.

1.4. Aderans Sıyrılma Modelleri

Sıyrılma göçme tipinde FRP donatı-beton ya da nervürlü çelik donatı-beton arasındaki aderans-sıyrılma davranışları, birçok araştırmacı tarafından incelenerek çeşitli aderans-sıyrılma bağıntısı modelleri geliştirilmiştir.

1.4.1. BPE Modeli

Nervürlü çelik donatı-beton arasındaki aderans-sıyrılma ilişkisi için sıklıkla kullanılan modellerin başında bu model gelmektedir. Bu model Eligehausen vd. [26] tarafından geliştirilmiştir (Eşitlik 1.1, 1.2, 1.3, 1.4) [26].

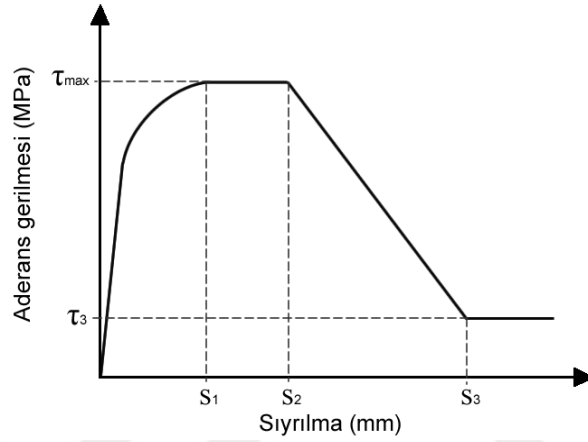
$$0 \leq s \leq s_1 \quad \text{için} \quad \tau = \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha \quad (1.1)$$

$$s_1 \leq s \leq s_2 \quad \text{için} \quad \tau = \tau_{max} \quad (1.2)$$

$$s_2 \leq s \leq s_3 \quad \text{için} \quad \tau = \tau_{max} - \frac{(\tau_{max} - \tau_3)(s - s_2)}{(s_3 - s_2)} \quad (1.3)$$

$$s_3 < s \quad \text{için} \quad \tau = \tau_3 \quad (1.4)$$

Burada, τ_{max} =maksimum aderans gerilmesi; s_1 =maksimum aderans gerilmesine ilk ulaşıldığı andaki sıyrılma miktarıdır. Eligehausen vd. (1983), çelik donatılar için α değerini 0.4 kullanıldığını önermiştir.



Şekil 1.11. BPE modeli

1.4.2. Malvar Modeli

Malvar [27], FRP donatı ve beton arasındaki aderans sıyrılma ilişkilerini inceleyen araştırmacıların başında gelmektedir. Malvar modeli çeşitli yüzey özelliklerindeki GFRP donatıların aderans sıyrılma ilişkilerinin tespiti için iki yöntem içermektedir. İlk yöntemde aderans gerilmesi ve sıyrılması ilişkisi eksenel simetrik radyal basıncın bir fonksiyonu olarak belirtilmiştir (Eşitlik 1.5 ve 1.6). İkinci yöntemde ise aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi $\tau = \tau(s, \sigma_r)$ eşitliğinin bir fonksiyonu olarak verilmiştir (Eşitlik 1.7).

$$\frac{\tau_{max}}{f_t} = A + B(1 - e^{-C\sigma_r/f_t}) \quad (1.5)$$

$$s_1 = D + E\sigma_r \quad (1.6)$$

Burada, f_t =betonun çekme dayanımı; A , B , C , D ve E ise farklı donatı türleri için deneysel katsayılar; σ_r =eksenel simetrik radyal basınçtır.

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{F\left(\frac{s}{s_1}\right) + (G-1)\left(\frac{s}{s_1}\right)^2}{1 + (F-2)\left(\frac{s}{s_1}\right) + G\left(\frac{s}{s_1}\right)^2} \quad (1.7)$$

Burada, τ_{max} =maksimum aderans gerilmesi; s_1 =maksimum aderans gerilmesine ilk ulaşıldığı andaki sıyrılma miktarı ve F , G ise donatı türüne göre deneysel katsayılardır.

Cosenza vd. [28] FRP donatı-beton arasındaki aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisini açıklayan Malvar modelinin BPE ve CMR modelinden daha az güvenilir olduğunu belirtmektedir.

1.4.3. Modifiye edilmiş BPE modeli

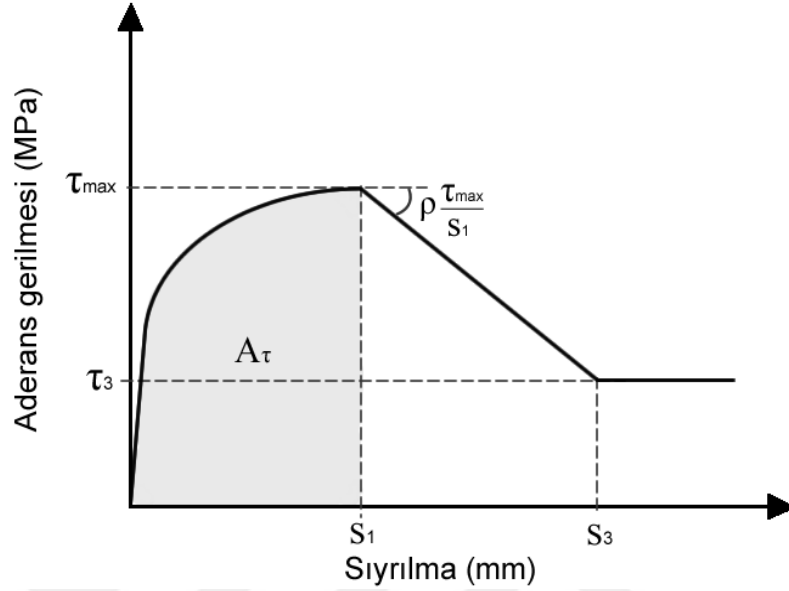
Cosenza vd. [29] FRP donatı-betona arasındaki aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisini tespit edebilmek için çelik donatılar için geliştirilen BPE modelini yeniden düzenlemiştir. Modelin deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında çok iyi bir uyum sergilediği görülmektedir [28]. Modelde BPE modelinin ilk çıkış eğrisi denklemini aynen kullanılmıştır (Eşitlik 1.8). Ancak modelde BPE modelinde orta kısımda yer alan doğru bu modelde kaldırılmıştır.

$$0 \leq s \leq s_1 \quad \text{için} \quad \tau = \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha \quad (1.8)$$

$$s_1 \leq s \leq s_3 \quad \text{için} \quad \frac{\tau}{\tau_{max}} = 1 - \rho \left(\frac{s}{s_1} - 1\right) \quad (1.9)$$

$$s_3 < s \quad \text{için} \quad \tau = \tau_3 \quad (1.10)$$

Burada, τ_{max} =maksimum aderans gerilmesi; s_1 =maksimum aderans gerilmesine ilk ulaşıldığı andaki sıyrılma miktarı α ve ρ = deney sonuçlarından elde edilen eğri uydurma parametreleridir.



Şekil 1.12. Modifiye BPE modeli

1.4.4. CMR Modeli

Cosenza vd. [30] BPE modelinin (Eşitlik 1.1) çıkış eğrisi denklemine alternatif olarak bu modelde kullandığı eğri denklemini önermiştir.

$$0 \leq s \leq s_1 \quad \text{için} \quad \frac{\tau}{\tau_{max}} = \left(1 - \exp\left\{-\frac{s}{s_r}\right\}\right)^\beta \quad (1.11)$$

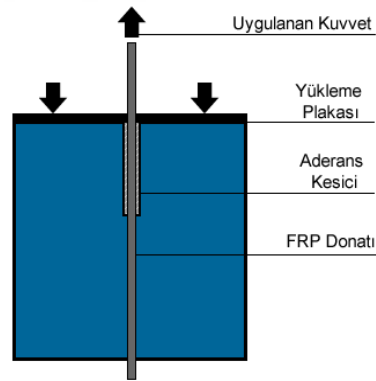
Burada, τ_{max} =maksimum aderans gerilmesi; s_r ve β deney sonuçlarından elde edilen eğri uydurma parametreleridir.

Cosenza vd. [28] ayrıca CMR modelinin BPE, Malvar ve modifiye BPE modelleri arasında, ilk çıkış eğrisini tanımlayan en iyi model olduğunu belirtmiştir.

Tighiouart vd. [31] farklı donatı çaplarında ve gömülme derinliklerinde GFRP donatılar için aderans gerilmesi ve sıyrılma ilişkisi üzerine deneysel çalışmalar yaparak, s_r ve β katsayıları için sırasıyla -0,25 ve 0,5 değerlerini önermiştir.

1.5. Donatı-Beton Aderansının Belirlenmesi

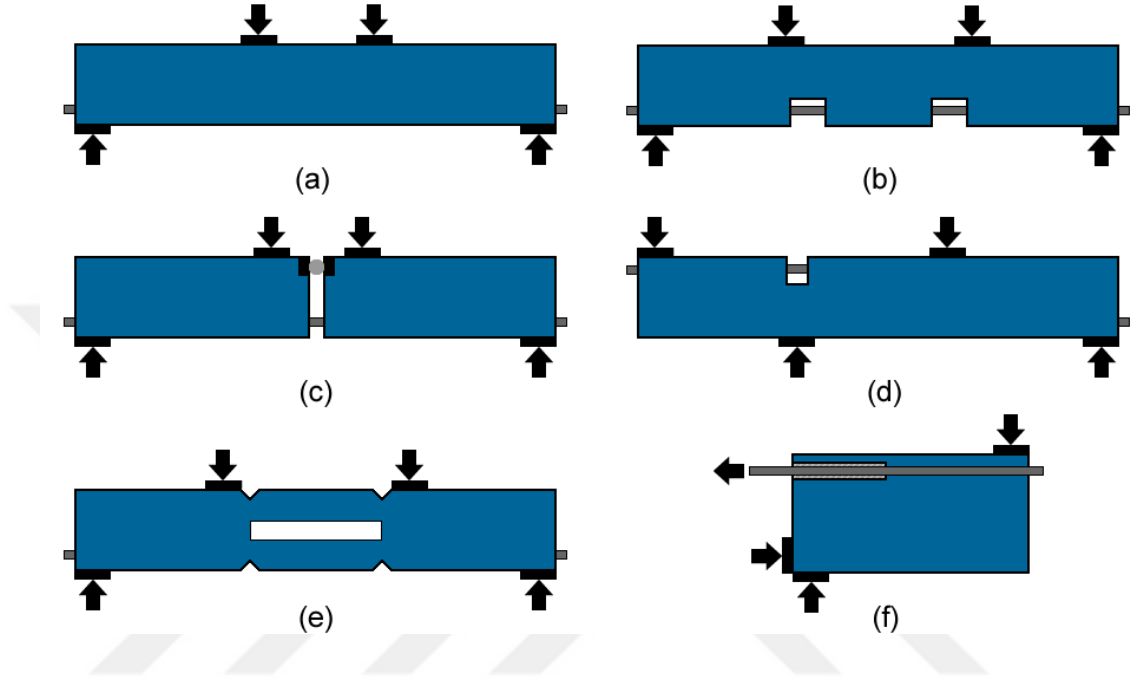
Çelik donatı-beton aderansını test etmek için birçok yöntem ve deney bulunmaktadır. RILEM RC5 [32] ve RC6 [33] yönetmeliklerinde, çekip çıkarma ve mafsallı kiriş deneyleri, ASTM A944-10 [34] yönetmeliğinde kiriş ucunda çekip çıkarma deneyi ve EN 10080-2005 [35] yönetmeliğinde ise çekip çıkarma ve mafsallı kiriş deneyleri yer almaktadır. FRP donatı-beton aderans deneyleri, çelik donatıların aderans deneyleriyle aynıdır. Buna ilaveten, FRP donatı-beton aderansını tespit etmek için ayrıca birkaç yönetmelik yayınlanmıştır ancak bu yönetmeliklerdeki deney yöntemleri sınırlıdır. ASTM D7913 [36], JSCE-E539-1995 [37], ISO10406-1 [38], ACI 440 3R-12 [8], yönetmelikleri sadece çekip çıkarma deneyini içermektedir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Çekip çıkarma deneyi

Yukarıda bahsedilen deney yöntemlerinden, testin basitliği ve kolay yapılabilmesi nedeniyle çekip çıkarma deneyleri oldukça yaygındır. Ancak bu deney, gerçek sonuçları en az yansıtan test yöntemi olduğundan, kenetlenme boyunun tespiti için önerilmemektedir [23]. Bu deney daha çok aderans dayanımının değişkenlerini ya da

parametrelerini karşılaştırmak için kullanılmalıdır [8,39]. Buna ilaveten, kiriş deneyleri, eğilme etkisindeki elemanların aderansını daha iyi yansıtmakta ve çekip çıkarma deneylerine göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir [23,40]. Donatı-beton aderansını belirlemek için kullanılan kiriş deneyleri Şekil 1.14’de gösterilmiştir.



Şekil 1.14. a)Basit kiriş veya bindirme eki boyu deneyi b)Eğilmede kenetlenme deneyi c)Mafsallı kiriş deneyi d)Konsol kiriş deneyi e)Makas kiriş deneyi f)Kiriş ucundan çekip çıkarma deneyi (ACI 440R-07, 2007'den, değiştirilerek)]

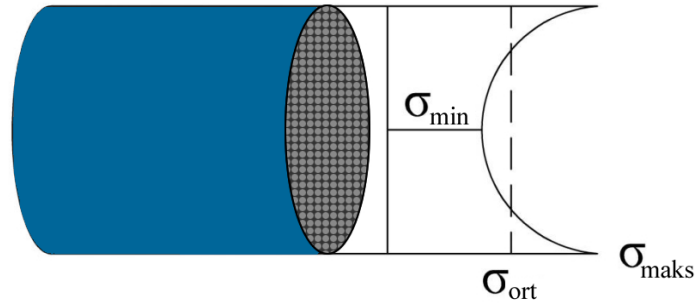
1.6. FRP Donatı-Beton Aderansını Etkileyen Faktörler

FRP donatıyı meydana getiren malzeme özelliklerinin farklı olması, üretim yöntemlerinin farklı olması gibi nedenlerden dolayı FRP donatıların beton ile olan aderans dayanımlarının çelik donatı-beton aderans dayanımından farklı olması beklenebilir.

1.6.1. FRP Donatı Özelliklerinin FRP Donatı-Beton Arasındaki Aderansa Etkisi

Donatı çapı

Donatı çapının, FRP donatı-beton aderans dayanımına etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır [31,39,49,50,41–48]. Bu çalışmalara göre, daha büyük donatı çaplarında, beton karışım suyunun donatı altına birikmesiyle büyük boşluklar oluşmakta ve çelik donatıda olduğu gibi, beton-FRP donatı aderans dayanımında azalma ortaya çıkmaktadır [39]. Buna ilaveten bu azalmanın, donatının eksenel kayma rijitliğinin (reçine ve reçine-lif arayüzündeki) az olmasından kaynaklı olabileceği de belirtilmektedir [51,52]. Kayma gecikmesi etkisi (shear lag effect) olarak bilinen bu davranışta çekirdek ile yüzey lifleri arasında göreceli bir hareket oluşabilmektedir (Şekil 1.15). Ancak, gömülme boyu ile karşılaştırıldığında çap değişimlerinin etkisi daha sınırlı olmaktadır [47]. Moallemi [43] ise kumlanmış GFRP donatısının çapının artırılmasıyla ortalama olarak aderans dayanımının %20 düştüğünü gözlemlemiştir. Rolland vd. [49] küçük donatı çaplarında AFRP ve çelik donatıların arasındaki aderanslarda küçük farklar olmasına rağmen büyük donatı çaplarında büyük farkların oluştuğunu belirtmiştir. Shen vd. [53], Rolland vd.'nin [49] yaptığı çalışmaya benzer sonuçları BFRP donatılar için bulmuştur.



Şekil 1.15. Kayma gecikmesi etkisi

Lif türü

Lif türünün (aramid, bazalt, cam ve karbon ya da AFRP, BFRP, GFRP ve CFRP), FRP donatı-beton aderans dayanımına etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve

genellikle çelik donatının aderans dayanımının daha büyük olduğu belirtilmesine rağmen [31,39,44,54–57], bazı araştırmacılar ise iki donatı türünün aderans dayanımlarının yakın olduğunu belirtmiştir [39,58]. FRP donatıların kendi içlerinde ve çelik donatı ile değerlendirilmesi hususunda ise büyük farklar göze çarpmaktadır. Çalışmalarda, FRP donatı, çelik donatı aderans oranı net olarak ortaya konamamıştır. İlaveten, literatürde, BFRP ve AFRP donatıların aderans dayanımı ile ilgili çok az çalışma vardır.

Tighiouart vd. [31] GFRP donatıların aderans dayanımlarının, çelik donatı çubuklarına göre daha düşük olduğunu [31,43,59] ve bu farkın, donatıların yüzey şekillerinin farklılığından kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Başka bir çalışmada [39] ise, sıyırılma hatası gözlenen FRP donatıların aderans dayanımlarının, çelik donatıların aderans dayanımlarının %40'ı ile %100'ü arasında olabileceğinden bahsedilmektedir. Benmokrane vd. [54,60] çalışmalarında, GFRP donatıların aderans dayanımlarının, çelik donatıların aderans dayanımlarının yaklaşık %60 ile %90'ı arasında olduğunu, Xue vd. [47], kumlanmış GFRP donatıların çelik donatılar arasındaki aderans dayanımı oranlarını 0.59 ile 1.27 katında değiştiğini, Gu vd. [61] ise kumlanmış donatıların aderans dayanımının çelik donatının %60'ı olduğunu belirtmiştir. Diğer bir çalışmada [56], GFRP donatılı kirişlerdeki aderans dayanımının çelik donatılı kirişlerdeki aderans dayanımının yaklaşık %50'si olduğu sonucuna varılmış, ayrıca, donatı mesafesi arttırıldığında bu oranın daha da fazla artacağından bahsedilmiştir.

GFRP donatıların aderans dayanımları CFRP donatıların aderans dayanımları ile incelendiğinde, Okelo [44], GFRP donatıların aderans dayanımlarının daha düşük olduğunu [62] ve bu durumun donatıların farklı rijitliklerine bağlı olabileceğini belirtmiştir. ACI 440.1R-06'da [22] ise , CFRP donatıların daha büyük rijitliğe sahip olmalarından dolayı, GFRP donatılara göre gerekli kenetlenme boyunun daha düşük olacağı belirtilmektedir. Diğer çalışmalarda, CFRP donatıların ortalama aderans dayanımlarının, çelik donatıların aderans dayanımlarının yaklaşık %85'i [44], başka bir çalışmada [55] ise, 0.79'u, başka bir çalışmada [63], ise 0.47'si olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 1.16. Lif türleri

Refai vd. [57], BFRP donatıların ortalama aderans dayanımlarının, GFRP donatıların aderans dayanımlarının yaklaşık %75'i olduğunu belirtmiştir. AFRP donatılı kirişlerdeki aderans dayanımlarının ise çelik donatılı kirişlerdeki aderans dayanımlarının yaklaşık %50'si [56], başka bir çalışmada [55] ise %68'i olduğu ifade edilmektedir. Aynı donatı çaplarında, nervürlü BFRP donatıların ortalama aderans dayanımlarının, nervürlü çelik donatıların aderans dayanımlarına yakın olduğu bilinmektedir [58]. Ancak başka bir çalışmada [57], BFRP donatıların ortalama aderans dayanımlarının, GFRP donatıların aderans dayanımının yaklaşık %75'i olduğu geçmektedir.

Elastisite Modülü

Literatürde doğrudan elastisite modülünün FRP donatı-beton aderansı üzerindeki etkisi ile ilgili direk olarak sadece bir çalışma olmasına rağmen [64], mevcut deneylerden FRP donatının elastisite modülünün aderans üzerinde önemli bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır [39,56,57]. Mosley vd. [56] yaptıkları kiriş deneylerinde, donatıların aderans gerilme değerlerinin, donatıların elastisite modülleriyle ilişkili olduğundan ve bu nedenle en büyük aderans gerilmesi değerlerinin sırasıyla çelik, AFRP ve GFRP donatılı numunelerde ortaya çıktığından bahsetmiş ve donatı elastisite modülünün artırılmasıyla aderans dayanımının artacağı sonucuna varmıştır. Benzer şekilde, Krem ve Soudki [62], elastisite modülünün artmasıyla, aderans gerilmesinin arttığını belirtmiştir.

Arias vd. [65] çalışmalarında, yüksek mukavemetli reçinelerde daha yüksek aderans dayanımının olduğunu ve bu nedenle donatı elastisite modülündeki artışın aderansı arttıracığını belirtmiştir. Benzer şekilde Mazaheripour vd. [66], nervürlü GFRP donatıların aderans rijitliğini kumlanmış GFRP donatılara göre daha fazla bulmuş ve bu donatıların daha fazla yük aldığını gözlemlemiştir. Araştırmacılar bu durumun nervürlü GFRP donatının rijitliğinden kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Krem ve Soudki [62], CFRP donatıların aderans gerilmesinin GFRP donatılara göre 1.5 kat fazla olmasını, CFRP donatıların elastisite modülünün yüksekliği ile açıklamıştır.

Başka bir çalışmada [57] ise, diğer parametrelerin ayarlanabilmesi durumunda, yüksek elastisite modülüne sahip FRP donatıların aderans dayanımlarının muhtemelen daha yüksek olacağından söz edilmiştir. Benzer şekilde, Fava vd. [67] yaptıkları sonlu eleman analiz sonuçlarına göre, elastisite modülündeki artışın kenetlenme boyunu düşürdüğünden bahsetmektedir.

Ancak yukarıdaki olumlu görüşlere rağmen, elastisite modülünün adersansa etkileri arasında bile bazı farklılıklar söz konusu olmuştur, Hossain vd. [64], yüksek elastisite modülüne (YE) sahip olan kumlanmış GFRP donatının düşük elastisiteli (DE) donatıya göre daha düşük aderans dayanımına sahip olduğunu ve bunun kumlanmış yüzey katmanının donatının çekirdeğinden daha erken sıyrılmasından dolayı olmasına bağlamış ve bu konuda daha fazla araştırma yapılması gerektiğinden bahsetmiştir. Buna karşın, Kanakubo vd. [68], He ve Tean [69] çalışmalarında, elastisite modülünün aderans dayanımını etkilemediğini belirtmesine rağmen; başka bir çalışmada [70], uzun kenetlenme boylarından ziyade kısa kenetlenme boylarına sahip donatı çubuklarında, FRP donatıların elastisite modüllerinin aderans dayanımını belirleyen önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir.

Öte yandan donatıların elastisite modülüne bağlı sıyrılmaları incelendiğinde, en düşük elastisite modülüne sahip olan GFRP donatının, diğer donatılara göre daha yüksek deformasyonlar göstereceği ve çoğunlukla yüzey deformasyonu önemli olan donatıların elastisite modülünün, aderans-sıyrılma teorisini etkilediği belirtilmiştir [71].

Yüzey deformasyon şekli

Literatürde, yüzey deformasyon şekillerinin FRP donatı-beton aderans dayanımı üzerindeki etkileri birçok araştırmacı tarafından incelenmesine rağmen, sonuçlar arasında uyumsuzluklar söz konusu olduğu için gerçekçi değerlendirmeler yapmak çok zordur.

Bazı araştırmacılar, FRP donatı yüzey deformasyon şeklinin aderans gerilmesini etkilemediğini belirtmişlerdir. Wambeke ve Shield [72] yaptıkları çalışmada, FRP donatının yüzey deformasyon şeklinin helikal dişli olmasının ya da spiral sargılı olmasının deney sonuçlarını etkilemediğini belirtmiştir. Benzer şekilde, Quayyum [45], yaptığı tez çalışmasında, donatı yüzey özelliğinin maksimum aderans gerilmesini etkilemediğini [69], ancak eşdeğer sıyrılma etkilediğini belirtmiş [73] ve maksimum aderans gerilmelerinde, helikal dişli ve nervürlü donatıların, spiral sargılı ve kumlanmış donatılara göre daha fazla sıyrılma gösterdiğini gözlemlemiştir. Buna ilaveten spiral sargılı donatıların kumlanmış donatılar ile benzer sıyrılma miktarı olduğunu belirtmiştir.

Ancak diğer araştırmacıların FRP donatı yüzey deformasyon şeklinin aderans gerilmesini etkilediğini belirtmiş olmasına rağmen, araştırmalar arasında ciddi farklılıklar vardır. Yu ve Fan [48], yüzey şeklinin aderans performansını büyük oranda etkilediği sonucunu çıkarmıştır [74,75]. Aiello vd. [71], spiral oluklu-kumlanmış yüzeyli donatıların ve nervürlü donatıların, sadece kumlanmış yüzeyli donatılara göre, mekanik kilitlenmenin aderansa katkısı nedeniyle, çok daha yüksek (3-4 katı) aderans gerilmelerine ulaştıklarını ve nervürlü donatıların oluklu donatılara göre daha az sıyrılma gösterdiklerini belirtmiştir. Benzer olarak, Kanakubo vd. [68], donatı yüzeylerini, mekanik kilitlenme (nervürlü ve dişli) ve sürtünme yoluyla (düz, örgülü, halat tipi) aderans yükünü aktarması bakımından iki gruba ayırmış ve mekanik kilitlenme yoluyla yük aktaran donatıların, beton yarıma aderans dayanımlarının çelik donatıya yakın olduğunu belirtmiştir. Sürtünme yoluyla yük aktaran donatıların aderans dayanımlarının ise çeliğin aderans dayanımının yaklaşık %80-95 olduğu sonucuna varmıştır. İncelenen iki grubun kendi içlerinde ise bazı aderans dayanım farklarının olduğu ve bu farkların nedeninin, donatıların diş uzunluğu/donatı çapı

oranındaki farklılıklar olduğu belirtilmiştir. Buna karşın, Park vd. [74], yaptıkları deneylerde en yüksek aderans dayanımlarının sırasıyla kumlanmış GFRP, nervürlü AFRP, örgülü CFRP, spiral sargılı GFRP ve sargılı (halat tipi) CFRP olduğunu gözlemlemiştir. Benzer şekilde, Arias vd. [76], kumlanmış nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesinin nervürlü GFRP donatılara göre daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Arias vd. [65], başka bir çalışmada ise, iyi kumlanmış donatıların büyük yüzey alanları nedeniyle iyi bir kimyasal adezyon sağlamalarına rağmen, daha kaba (course) kumlanmış donatılarda kimyasal adezyondan çok sürtünme ve mekanik kilitleme daha etkili olduğu için daha yüksek aderans dayanımı gözlemlemiştir.

Okelo vd. [39] ise nervürlerin, donatıların aderans gerilmelerinin artmasında etkili olduğunu ve düz yüzeyli donatılara nazaran kumlanmış yüzeyli ve fabrik dokuma yüzeyli donatıların aderans gerilmelerinin daha yüksek olduğunu vurgulamıştır.

Zhang ve Li [77], çift (twice) sargılı helikal nervürlü (spiral strand) GFRP donatılarda, tek sargılı nervürlü donatılara göre daha büyük aderans gerilmeleri oluştuğunu gözlemlemiştir. Ancak CFRP donatılar için Won vd. [78], bu sonuçların aksini elde etmiştir. Tek sargılı nervürlü donatıların, çift sargılı nervürlü donatılara göre %52-65 daha iyi aderans gösterdiğini belirtmiştir.

1.6.2. Donatı Detaylarının FRP Donatı-Beton Arasındaki Aderansa Etkisi

Pas payı ve donatı aralığı

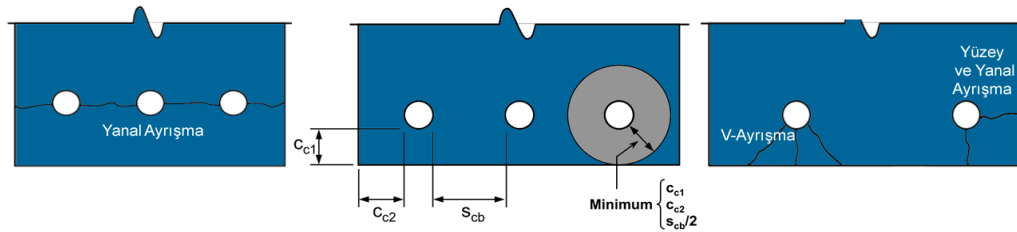
Literatürde, pas payının, FRP donatı-beton arasındaki aderans dayanımına ve donatı-beton arasında oluşacak göçme şekillerine etkileri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Ancak, literatürde FRP donatılar için, donatılar arası mesafenin aderansa etkisi ile ilgili çalışma sayısı çok azdır.

Ametrano [12] ve Quayyum [45] tez çalışmalarında, beton örtüsü kalınlığının artması nedeniyle, aderans dayanımının artacağını belirtmişlerdir. Ha ve Yoon'da [79] çalışmada benzer sonuçlar gözlemlemiştir. Yan vd. [75], pas payının artmasıyla mekanik kilitleme kuvvetlerinin arttığını dolayısıyla FRP donatı-beton aderans

gerilmesini artırdığını belirtmiştir. Choi vd. [80] çalışmasında, pas payı veya donatılar arası mesafe azaldıkça ortalama aderans dayanımının azalacağından, ancak $C/d_b \geq 2.5$ durumunda bu artışın aderans dayanımını artırabileceğinden bahsetmektedir. Ancak, İslam vd. [50] ise, $2.5d_b$ üzeri pas payı kalınlıklarında gözle görülür bir aderans artışının olmadığını belirtmektedir.

Okelo ve Yuan [39], aderans göçme şekillerinin, donatı yüzey şekli, pas payı ve aderans boyuyla alakalı olduğunu belirtmişlerdir. Ehsani vd. [81], GFRP donatılar için pas payının, aderans göçme modlarını önemli bir şekilde etkilediğinden ve pas payının $1d_b$ olması durumunda göçme şekillerini yarıma, pas payının $2d_b$ ve daha büyük olması durumunda ise sıyrılma veya donatının kopması olacağını gözlemlemiştir. Benzer şekilde Krem ve Soudki [62], GFRP donatılı kirişlerde C/d_b oranı 2 den küçük ise sıyrılma göçmesinden beton ayrışma göçme tipine geçiş olacağını gözlemlemiştir. ACI 440.1R-15 [1], normalleştirilmiş pas payı (C/d_b) oranı 3.5'in üzerinde ve donatının betona gömülme boyu $19d_b$ 'den büyük olduğunda, nihai göçmenin donatı sıyrılmasından kaynaklanacağı belirtilmektedir.

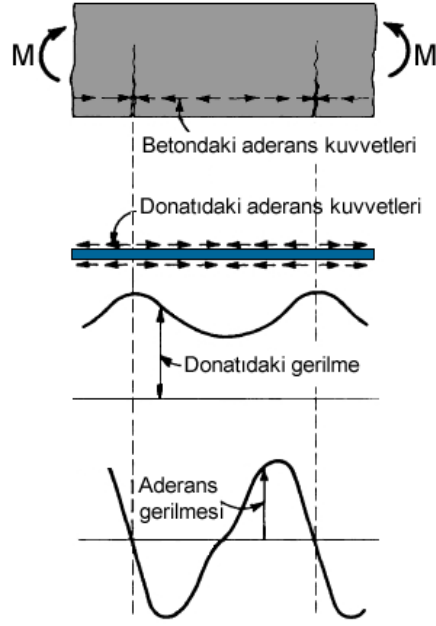
Donatılar arasındaki mesafenin aderans dayanımına etkisi incelendiğinde, Mosley vd. [56], yaptıkları kiriş deneylerinde, donatı mesafenin artırılmasıyla çelik donatılı numunelerin aderans dayanımının yaklaşık %24, FRP donatılı numunelerin ise yaklaşık %50 arttığını belirtmiştir.



Şekil 1.17. Beton ayrışması göçme şekilleri

Kenetlenme boyu

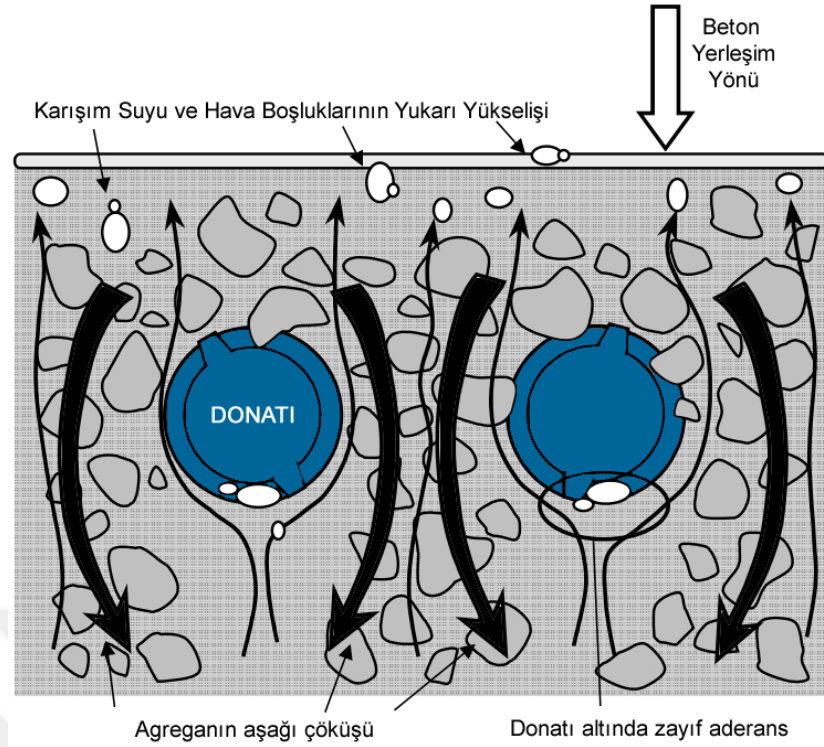
Literatürde, FRP donatı-beton arasındaki aderans dayanımına, kenetlenme boyunun (gömülme derinliğinin) etkisi çok fazla araştırmacı tarafından incelenmiştir. Çoğu araştırmacı, FRP donatının gömülme derinliği artırıldığında, üniform olmayan aderans gerilmesi dağılımları nedeniyle maksimum aderans dayanımının düştüğünü ancak maksimum aderans dayanım yükünün arttığını belirtmiştir [41,47,48,55,75,82,83]. Benzer şekilde, Quayyum [45] çalışmasında, donatı çapının ve kenetlenme boyunun artmasının, maksimum aderans gerilmesini düşürdüğünü ancak maksimum aderansa karşılık gelen donatı sırilmasını arttırdığını ifade etmektedir. Okelo ve Yuan [39], kısa aderans boylarında, donatı sıyrılma göçmesinin olası olduğunu ve yüksek beton basıncı altında ve kısa aderans boylarında ya da düşük beton basıncı altında ve uzun aderans boylarında, beton yarılmaları göçme şeklinin de görülebileceğini belilemiştir. Benzer şekilde Bi ve Wang [41], yaptıkları çekip çıkarma testlerinde, donatı gömülme boyu arttıkça aderans dayanımının azaldığını ve 40 mm gömülme boyuna sahip donatıların çoğunda donatı sıyrılması meydana geldiğini, ancak 100 mm gömülme boyuna sahip numunelerin hepsinde beton arıyışma göçmesi ortaya çıktığını gözlemlemiştir. He ve Tian [69], hem kiriş deneyleri hem de çekip çıkarma deneyleri üzerinde yaptığı regresyon analizinde, l_d/d_b oranı 10 dan küçük olduğunda ortalama aderans gerilmesinde önemli değişiklikler olduğunu ancak l_d/d_b oranı 10'dan büyük olduğunda aderans gerilmesinin yatay asimptota yaklaşarak ortalama 4.2 MPa değerine ulaştığı sonucunu çıkarmışlardır. Mazaheripour vd. [66] ise çelik fiberli SCC betonda donatı gömülme derinliği $20d_b$ den fazla olursa donatıların çekme gerilmesine ulaşabileceğini söylemiştir.



Şekil 1.18. Aderans gerilmesi ve donatı gerilmesi ilişkisi [23]

Donatı konumu

Araştırmacılar, beton dökülme esnasında donatının konumunun (altta ya da üstte) aderans dayanımına etkisini incelemişlerdir. ACI 440.1R-15’da [1] beton yerleştirilirken, hava, su ve ince agrega betonun üstüne doğru hareket ettiğinden ve yatay donatı altında aderans dayanımı önemli derecede düştüğünden (Şekil 1.19), 300 mm'den daha yüksek beton yerleşimlerinde üst donatı konum katsayısının "1.5" alınması gerektiği (aderansın %50 düşürülmesi gerektiği) belirtilmektedir. Altta konumlanan donatılar için bu katsayı "1" alınmaktadır.



Şekil 1.19. Donatı konumunun aderansa etkisi [25]

Benzer şekilde, Quayyum [36], donatı konumunun aderans gerilmesi üzerinde önemli etkilerinin olduğundan ve kiriş yüksekliğinin 300 mm'den daha büyük olması durumunda, kiriş üst bölgesine yerleştirilmiş donatıların, alt bölgeye yerleştirilenlere göre neredeyse %50 daha düşük aderans gerilmesi gösterdiğinden bahsetmiştir. Ayrıca, Tighiouart vd. [31], GFRP donatılar için, donatı yerleşim etkisini incelemiş ve üste yerleştirilen donatıların aderans dayanımlarının, alt donatı için bulunan aderans dayanımlarından "1.30" kat fazla olmasını tavsiye etmiştir. Ancak Ehsani vd. [84], yaptığı çalışmada bu oranı çok daha düşük olarak bulmuş ve yukarı konumlandırılan donatıların gömülme derinliklerinin, aşağı konumlandırılan donatılara göre 1.13 kat arttırılmasını önermiştir.

Enine Donatı

Literatürde, enine donatının aderans dayanımına etkisi, deneylerin zorluğu ve sayısı nedeniyle çok fazla çalışılamamıştır. ACI 440.1R-15 [1], FRP donatıların göreceli

olarak düşük diş alanlarına sahip olmasından dolayı, enine donatı etkisinin aderans dayanımını arttırmayabileceğini belirtmektedir. Bu nedenle, enine donatı etkisinin araştırılması gerektiği belirtilmiştir [22,72]. Quayyum ve Rteil [85], çalışmalarında, enine donatının, aderans dayanımını %10-15 arasında artırdığını belirtmiştir. Benzer şekilde, Jiang vd. [82] çalışmalarında, enine donatı oranının artmasıyla aderans dayanımının artmasının [75] nedeninin, bu donatının sünekliği ve göçme modunu önemli derecede etkileyen çatlakları engellenmesi olarak düşünmüştür. Mehr vd. [86] ise enine donatının hem etkisinden hemde etkisizliğinden bahsederek, nervürlü GFRP donatılı bindirme ekli kirişlerde enine donatının aderansı arttırdığı ancak kumlanmış donatılı numunelerde bu artışın önemli olmadığını vurgulamıştır. Thamrin [87], çıkmalı kirişler kullanarak yaptığı çalışmada, çıkma bölgesine konulan enine donatıların aderans gerilmesini önemli derecede etkilemediğini ancak kesme açıklığındaki enine donatıların ise aderans gerilmesini önemli oranda etkilediğini gözlemlemiştir.

1.6.3. Beton Özelliklerinin FRP Donatı-Beton Arasındaki Aderansa Etkisi

Beton basınç dayanımı

Jiang vd. [82], beton basınç dayanımındaki artışın aderans dayanımını arttırdığını ve bu artışın numunelerdeki iç çatlak yayılmalarının kısıtlanması nedeniyle ortaya çıktığını belirtmiştir. Benzer şekilde, Quayyum [45], beton dayanımı ve pas payı arttıkça aderans gerilmesinin arttığını ve sıyrılmanın azaldığını belirtmiştir. Baena vd. [88], beton basınç dayanımındaki değişikliklerin aderans göçme şeklini değiştirdiğini [44,88] ve düşük beton dayanımlı numunelerde donatının yüzey etkisinin sınırlı olmasına karşın yüksek beton dayanımlarında bu etkinin arttığını ifade etmiştir. Aynı çalışmada, 30 MPa'dan daha büyük beton dayanımlarında FRP donatının yüzeyinde deformasyonlar görüldüğünü ve bu nedenle beton dayanımının aderans dayanımını, büyük oranda etkilemediğini, aderansın daha çok donatı özelliklerine bağlı olduğunu belirtmiştir. Achillides and Pilakoutas [89] çalışmalarında benzer sonuçları gözlemlemiştir. Yaptıkları çalışmada, 30 MPa'dan daha büyük beton basınç dayanımlarında aderans göçmesinin donatının yüzeyinde soyulmadan dolayı ortaya çıktığını ve FRP donatıyı oluşturan reçine ve lif arasındaki interlaminar kesme

kuvvetinin aderans gerilmelerini etkilediğini belirtmiştir. Yine benzer olarak, Yan vd. [75], istatistiksel çalışmasında beton basınç dayanımı 50 MPa ve 60 MPa arasında olan 42 çekip çıkarma deneyinde yüksek basınç dayanımından dolayı, donatının dış katmanının soyulduğunu ancak beton basınç dayanımı 30 MPa ile 50 MPa arasındaki 32 çekip çıkarma deneyinde ise donatının koptuğunu tespit etmiştir. Khederzadeh ve Sennah'da [90] benzer olarak kumlanmış GFRP donatının yüzeyindeki aderansdan kaynaklı deformasyon yüzünden, GFRP donatıların aderansı beton basınç dayanımına çok bağlı olmadığına değinmiştir.

Ancak bazı çalışmaların [38,75,88,89] aksine, Veljkovic vd. [59], 25-40 MPa beton basınç dayanımlarında aderans gerilmesinin etkilenmemesine rağmen, 40-65 MPa dayanımlarda aderans gerilmesinin arttığını; bunun ise beton basınç mukavemetindeki artışla beraber çatlakların gecikmesine bağlamış ancak bu durumda hızlı ve pürüzsüz bir çatlak gelişmesi oluştuğunu belirtmiştir. Shen vd. [53] ise sargılı BFRP donatıların beton basınç dayanımının %64.7 arttırılmasına karşın aderans gerilmesinde %18'lik bir artışın olduğunu gözlemlemiştir.

Ametrano [12], 70 MPa ve 175 MPa arasında değişen beton dayanımlarında GFRP donatı ve beton arasındaki aderans dayanımını incelemiştir. Çok yüksek dayanımlı betonların aderans dayanımını etkilemediğini gözlemlemiştir. Ancak, Hossain vd. [64], beton basınç dayanımının artışıyla aderans dayanımının arttığını, YDB (79 MPa) ile UYDB (129 MPa ile 175 MPa) arasındaki aderans dayanımı artışının yaklaşık %16 olduğu fakat UYDB'ler arasındaki aderans dayanımı farkının önemsiz olduğunu belirtmektedir.

Lee vd. [91], çalışmasında ise beton basınç dayanımı artışının aderans gerilmesini arttırmasına karşın bu artışın çelik donatılarda daha fazla meydana geldiğini ve GFRP donatıların aderans dayanımının, beton basınç dayanımının 0.3 üssel katı kadar arttığını gözlemlemiştir. Çelik donatılarda aderans göçmesini betonun kesme dayanımı belirlerken, kumlanmış GFRP donatılarda sıyrılma göçmesi, yüksek dayanımlı betonlarda reçine ve fiber arasında gözükürken, normal dayanımlı beton numunelerinde sıyrılma göçmesi donatı yüzeyi ile reçine arasında olmuştur. Borosnyói [92], çalışmasında Lee vd. [91] ile benzer olarak, kumlanmış CFRP donatıda oluşacak

aderans göçmesinin reçineyle kum kaplamanın soyulması yüzünden ya da beton yüzey katmanında oluşan hata yüzünden meydana geldiğini belirtmiştir. Kum kaplamasındaki soyulmanın beton basınç dayanımı ile arttığını tespit etmiştir. Ayrıca, kumlanmış CFRP donatılar için, aderans gerilmesini beton basınç dayanımının kareköküyle lineer bir şekilde modellemenin ideal olmadığını belirtmiştir. Ehsani vd. [40], beton basınç dayanımının artmasıyla aderans gerilmesinin arttığını ancak literatürde önerilen basınç dayanımının karekökü gibi artmadığını belirtmektedir.

Lif katkısı

Bi vd. [42], C30 betonu ve %0.1 bazalt lif içerikli betonlarda, lifsiz betona nazaran daha yüksek aderans dayanımı elde etmelerine karşın daha yüksek bazalt lif içeriklerinde aderans dayanımının artmadığını bildirmiştir. Buna karşın, Bi ve Wang [41], C60 betonu ve %0.2 bazalt lif içerikli betonlarda, lifsiz betona nazaran daha yüksek aderans dayanımı elde etmiş ve bazalt lif içeriği arttıkça aderans dayanımının arttığını gözlemlemiştir.

Erdem vd. [93], çalışmasında aramid lifli betonun, nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesini arttırdığını tespit etmiştir. Donatının dişleri arasındaki harç içindeki lifler çekme dayanımını ve sıyrılma direncini arttırmıştır. Ayrıca lifler çatlak tutucu olarak rol oynamıştır. Ancak kumlanmış veya sargılı donatılarda, betonda kullanılan aramid lifler aderans gerilmesini arttırmamıştır.

Park vd. [94], yüksek dayanımlı betonda kullanıldığı PVA ve PSS liflerin, ayrışma çatlaklarını sınırladığı için, CFRP donatıların aderans dayanımını önemli miktarda arttırdığını belirlemiştir. Lee vd. [73] çelik, PP, PVA ve PVA-ECC lif katkılı beton aderans davranışını değiştirdiğini ancak aderans hata modunun büyük oranda donatının yüzey kalitesine bağlı olduğunu gözlemlemiştir. Ancak, Kang vd. [95], çelik, PVA, PP lif hacminin artmasıyla aderans dayanımının ve sertliğin yükselmesinden bahsetmiştir. Won vd. [96], benzer şekilde FRP donatılı ve yüksek mukavemetli beton arasındaki aderans dayanımının, sentetik ve çelik lif kullanılması durumunda arttığını belirtmiştir. Won vd. [78], yüksek dayanımlı betonlarda

kullanılan çelik lifler CFRP donatının aderans gerilmesini, betondaki ayrışma çatlaklarını azalttığı ve sınırladığı için %24 ila %67 arttırmış olduğunu gözlemlemesine karşın, Dancygier vd. [97], çelik donatılı ve normal dayanımlı beton arasındaki aderans dayanımının çelik lif katkısı nedeniyle %30 düştüğünü ancak yüksek mukavemetli betonda çelik lif katkısının aderans dayanımını %16 arttırdığını belirtmiştir.



Şekil 1.20. Beton içinde kullanılan lif katkıları

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB)

Esfahani vd. [98], GFRP donatıların normal dayanımlı beton ve kendiliğinden yerleşen betondaki aderans dayanımlarının neredeyse aynı olduğunu gözlemlemiştir. Benzer şekilde, Krem ve Soudki [62] ve Hossain vd. [99] çalışmalarında bu farkın çok az olduğundan bahsetmiştir. Golafshani vd. [100], kendiliğinden yerleşen beton ve çelik donatı arasındaki aderans dayanımının, normal dayanımlı beton ve GFRP donatı arasındaki aderans dayanımından %15.89 daha yüksek çıktığını belirtmiştir.

1.6.4. Deneysel Çalışmaların FRP Donatı-Beton Aderansına Etkisi

Eğilme altındaki elemanlarda kullanılan FRP donatı-beton aderans deneyleri, çelik donatıların aderans deneyleriyle aynıdır. Ancak, testin basitliği ve kolay yapılabilmesi nedeniyle çekip çıkarma deneyleri oldukça yaygındır. Ancak bu deney, gerçek sonuçları en az yansıtan test yöntemi olduğundan, kenetlenme boyunun tespiti için

önerilmemektedir [8]. Bu deney daha çok aderans dayanımının değişkenlerini ya da parametrelerini karşılaştırmak için kullanılmalıdır [8,39].

Çekip çıkarma deneylerinde bulunan aderans dayanımı sonuçları, kiriş deneylerinden bulunan sonuçlara göre daha yüksek çıkmaktadır. Bu durumla ilgili olarak, Tighiouart vd. [31], çekip çıkarma deneylerinde donatıyı kuşatan betonun basınç altında olmasından dolayı çatlakların azalmasıyla aderans dayanımının yüksek çıktığından, kiriş deneylerinde ise donatıyı kuşatan betonun çekme gerilmesi altında olduğundan, düşük gerilmelerde çatlakların artarak aderans dayanımını düşürmesinden bahsetmektedir. Sonuç olarak, kiriş deneyleri çekip çıkarma deneylerine göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir [23,40]. Ancak, çekip çıkarma deneylerinde nervürlü çelik donatıların aderans dayanımı nervürlü GFRP donatılardan yaklaşık %70 fazla olmasına rağmen mafsallı kiriş deneylerinde bu fark %10 civarındadır ve mafsallı kiriş deneylerinde çekip çıkarma deneylerinden daha düşük aderans gerilme değerleri bulunmasına rağmen daha fazla rijitlik göstermişlerdir [101].

Veljkovic [59] ise, eksantristik çekip çıkarma deneyi, merkezi çekip çıkarma deneyi ile karşılaştırıldığında daha yüksek aderans gerilmesi değerlerinin çıktığını ve daha az sıyrılmanın olduğunu belirtmektedir.

1.6.5. FRP Donatı-Beton Arasındaki Aderans Dayanımının Yönetmeliklerde ve Literatürde Verilen Bağıntılar İle Karşılaştırılması

Khederzadeh ve Sennah [102], GFRP donatılı numuneler üzerine yapılmış 114 adet çekip çıkarma deneyinden elde ettikleri sonuçları, CSA S806-02 [4] ve CSA S6-06 [103] yönetmeliklerinde geçen kenetlenme boyu bağıntısı ile karşılaştırmışlar ve bu bağıntıların kenetlenme boyunu neredeyse 2 kat güvenli olarak tahmin ettiğini belirlemişlerdir. Newman vd. [104], literatürde bulunan 48 adet GFRP ve CFRP donatılı kirişin korelasyon analizini yaparak, ACI 440.1R-06'da [22] verilen bağıntının çok fazla güvenli olduğunu belirtmiştir. Thamrin ve Kaku [105] ise yaptıkları 32 adet kiriş deneyiyle elde ettikleri sonuçları JSCE 1997'de [5] verilen kenetlenme boyu bağıntısından elde ettikleri değerler ile Hossain vd. [106], yaptıkları 96 adet çekip

çıkarma deneyinden elde ettikleri sonuçları CSA S806-02 [4], CSA S6-06 [103] ve ACI 440.1R-06 [22] yönetmeliklerinde verilen aderans gerilmesi bağıntısından elde ettikleri değerler ile karşılaştırarak aynı sonuçlara ulaşmışlardır. Benzer şekilde, Ametrano [12], yaptığı 32 adet kiriş ve 72 adet çekip çıkarma deneyinin sonuçlarına dayanarak, CSA S806-02 [4], CSA S6-06 [103], ACI 440.1R-06 [22] ve JSCE 1997'de [5] verilen kenetlenme boyu bağıntılarının büyük bir güvenlik payı olduğunu belirtmiştir. Mehr vd. [86] ise ACI 440.1R-06'nın [22] bindirme ekli kirişler için aderans dayanımının tahmin edilenden fazla çıktığını tespit etmiştir.

CSA S806-02 [4], CSA S6-06 [103], ACI 440.1R-06 [22] ve JSCE 1997'de [5] geçen aderans bağıntıları yönetmelikler arasında karşılaştırıldığında ise, Krem [107], CFRP donatılar için, ACI 440.1R-06 [22], deneysel sonuçlara göre, %30 daha yüksek kenetlenme boyu tahmin ettiğini ancak CSA S6-06'nın [103] ise %50 düşük sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Makhmalbaf [108], yaptığı kiriş ve çekip çıkarma deneylerinde 600 mm gömülme boyuna sahip donatıların kopmasına karşın, donatıların kenetlenme boylarının ACI 440.1R-06 [22] yönetmeliğine göre 1594 mm, CSA S806-12 [4] yönetmeliğine göre 947 mm ve CSA S6-06 [103] yönetmeliğine göre 735 mm olarak hesaplandığını belirtmiş ve bu yüzden kenetlenme boyu bağıntılarının revize edilmesi gerektiği sonucuna varmıştır. Islam vd. [50] ise çalışmasında önerdiği denkleme göre, CSA S806-02'nin [4] %51 güvenli tarafta kalmasına rağmen CSA S6-06'nın [103] %2 güvenli tarafta kaldığını belirtmiştir. Buna ilaveten, ACI 440.1R-06 [22], JSCE 1997'de [5] geçen kenetlenme boyu bağıntılarının da çok güvenli sonuçlar olduğunu belirtmiştir. Veljkovic vd. [59], yaptığı çekip çıkarma deneylerinde deneysel aderans gerilmesine, ACI 440.1R-15'in [1], CSA S6-06 [103], CSA S806-12 [4] ve JSCE 1997'ye [5] kıyasla daha yakın sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Diğer yönetmeliklerde çıkan aderans gerilmesinin aşırı az olduğunu belirtmektedir.

Moallemi [43] ise farklı olarak diğer yönetmeliklere (CSA S6-06 [103] ve CSA S806-02 [4]) nazaran ACI 440.1R-06 [22] yönetmeliğinin, geri dönüştürülmüş agrega kullanılan beton içindeki kumlanmış GFRP donatı aderans dayanımının test sonuçlarına daha yakın değerleri verdiğini belirtmiştir.

Çizelge 1.9. FRP donatıların kenetlenme boyları ve aderans dayanımlarının karşılaştırılması

Araştırmacı	FRP türü	Analiz Türü	Yönetmelikler	Deney Sonuçları	Karşılaştırma parametreleri
Khederzadeh ve Sennah [102]	GFRP	114 adet çekip çıkarma deneyi	Deney sonucu ACI 440.1R-03 CSA S806-02 CSA S6-06 JSCE 1997	557 715 1149 1124 1468	L_d (mm) $D_b=15,9$ mm
Newman vd. [104]	GFRP CFRP	48 adet kiriş deneyinin korelasyon analizi	ACI 440.1R-06	Çok güvenli	L_d (mm)
Thamrin ve Kaku [105]	CFRP	32 adet kiriş deneyi	JSCE 1997	Çok güvenli	L_d (mm)
Hossain vd. [106]	GFRP	96 adet çekip çıkarma deneyi	Deney sonucu ACI 440.1R-06 CSA S806-02 CSA S6-06	12.4-19.7 5.01 5.66 5.54	τ (MPa) $D_b=15,9$ mm LM 40mm pas payı
Ametrano [12]	GFRP	32 adet kiriş ve 72 adet çekip çıkarma deneyi	Deney sonucu ACI 440.1R-06 CSA S806-02 CSA S6-06 JSCE 1997	214 694 538 527 559	L_d $D_b=15,9$ mm $f_c=70$ MPa
Mehr vd. [86]	GFRP	13 bindirme ekli kiriş deneyi	ACI 440.1R-06	Yönetmelik değerleri fazla çıkmaktadır.	τ (MPa)
Krem [107]	CFRP	40 kiriş deneyi	ACI 440.1R-06 CSA S6-06	%30 daha yüksek %50 düşük	L_d (mm)
Makhmalbaf [108]	GFRP	4 kiriş deneyi	Deney sonucu ACI 440.1R-06 CSA S806-12 CSA S6-06	600 (RR) 1594 947 735	L_d (mm) $D_b=15$ mm
Islam vd. [50]	GFRP	180 çekip çıkarma deneyi	Önerdiği denklem ACI 440.1R-06 CSA S806-12 CSA S6-06 JSCE 1997	257 334 389 262 387	L_d (mm) $D_b=16$ mm
Veljkovic vd. [59]	GFRP	51 çekip çıkarma deneyi	ACI 440.1R-15 CSA S806-12 CSA S6-06 JSCE 1997	ACI deneysel sonuçlara daha yakın değerler vermektedir.	τ (MPa)
Moallemi [43]	GFRP	İtme (push out) deneyi	ACI 440.1R-06 CSA S806-02 CSA S6-06	ACI deneysel sonuçlara daha yakın değerler vermektedir.	τ (MPa)
Yan vd. [75]	GFRP	600 adet çekip çıkarma deneyi	ACI 440.1R-15 CSA S806-12 CSA S6-06 JSCE 1997	ACI deneysel sonuçlara daha yakın değerler vermektedir.	τ (MPa)
Fava vd. [67]	GFRP	Sonlu eleman	ACI 440.1R-06 JSCE 1997	Kenetlenme boyu tahmininde yetersiz kalmaktadırlar.	L_d (mm)

Yan vd. [75], ACI 440.1R-06 [22] yönetmeliğinde geçen aderans dayanımını denkleminin çekip çıkarma test sonuçlarına yakın sonuçlar verdiği diğer yönetmeliklerin ise (CSA S806-02 [4], CSA S6-06 [103] ve JSCE 1997 [5]) birbirlerine yakın sonuçlar verdiğini belirtmiştir. ACI 440.1R-06 [22] yönetmeliğinin donatıda oluşabilecek sıyrılma hatasına göre geliştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Fava vd. [67], ACI 440.1R-06 [22] ve JSCE 1997'nin [5], deneysel verilere göre, kenetlenme boyunun tahmininde yetersiz kaldığını gözlemlemiştir. GFRP donatılar için kenetlenme boyu bağıntısının revize edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Mevcut yönetmeliklere ek olarak literatürde önerilen başka bağıntılarda mevcuttur. Bu çalışmalar ise genellikle regresyon analizi tabanlıdır. Öte yandan aşağıdaki çalışmalarda, aderansı etkileyen çoğu parametre (donatı yüzey özelliği etkisi, donatı malzeme etkisi, donatı elastisite modülü etkisi, beton basınç dayanımının etkisinin hangi büyüklüğe kadar olduğu, enine donatının etkisi, donatılar arası mesafenin etkisi) atlanarak, aderans dayanımı ve kenetlenme boyları bulunmuştur. Ayrıca aşağıda verilen literatürden bazılarında ise sadece pullout deney sonuçlarından yararlanılarak regresyon analizi yapılmıştır ki, pullout gerçek sonuçları en az yansıtan test yöntemi olduğundan ve kenetlenme boyunun tespiti için önerilmediğinden [23] tekrar bahsetmek gerekir.

Pour vd. [109], önerdiği bağıntıların (beton basınç dayanımı < 40 MPa olanlar için), yönetmeliklerde geçen bağıntılara göre standart sapmasının %17 daha az olduğunu ve dolayısıyla daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Wambeke ve Shield [72], literatürde bulunan giriş deneylerinden oluşturdukları veri tabanını kullanarak, beton-GFRP donatının aderans dayanımını incelemişler ve regresyon analizi yaparak elde ettikleri kenetlenme boyu bağıntısını ACI 440.1R-03 [110] ve JSCE 1997'de [5] verilen bağıntılar ile karşılaştırarak önerdikleri denklemin, ACI 440'da verilen kenetlenme boyu bağıntısından 55 MPa'dan küçük beton basınçlarında, daha uzun kenetlenme boyunun çıktığını, 55 MPa'dan büyük beton basınç dayanımlarında ise daha kısa kenetlenme boyunun bulunduğunu belirtmişlerdir.

Yan vd. [111], doğrusal olmayan yapay sinir ağları ve genetik algoritma kullanarak literatürde ki 157 kiriş deneyinden elde edilen aderans dayanımından yararlanarak önerdiği bağıntıda, donatı çapı, donatı yüzey özellikleri, donatı gömülme uzunluğu, pas payı, beton basınç dayanımı ve enine donatının etkisini aderansa etkisini incelemiştir. Ancak bu parametrelerin aderansa etkisini incelemek için daha fazla deneysel çalışma yapılmasını önermiştir.

Pour vd. [109]*, literatürden elde ettiği 250 çekip çıkarma deneyiyle yaptığı regresyon analiziyle, FRP donatı-beton aderansını incelemiş ve 4 farklı bağıntı önermiştir. Bağıntılar, donatı yüzey özelliğine göre (kumlanmış ve diğer yüzeyler) ve beton basınç dayanımına göre ($NDB < 40$ MPa ve $YDB < 40$ MPa) farklılıklar göstermektedir. Bağıntıların mevcut bağıntılardan daha doğru sonuçlar gösterdiğini belirtmiştir.

Mousavi vd. [112]*, kendiliğinden yerleşen beton (KYB) donatı aderansını, literatürdeki deneylerden oluşturduğu veri tabanından yararlanarak yaptığı regresyon analizi ve 34 adet çekip çıkarma deneyi ile inceleyerek bir kenetlenme boyu denklemi önermiştir. Bu kenetlenme boyu denkleminin deneysel verilerle uyuştuğunu belirtmiştir.

*Ancak bu son iki çalışmadan elde edilen bağıntılarda, aderansı etkileyen birçok parametre atlanmıştır.

1.7. Kenetlenme Boyunun Tespitinde Yaşanan Sıkıntılar ve Mevcut Yönetmelikler ile Değerlendirilmesi

Beton-FRP donatı aderansını etkileyen parametreler ve yönetmeliklerde geçen kenetlenme boyu bağıntılarının kıyaslanması yukarıda verilen konu başlıkları dâhilinde özetlenmiştir. Aderansı etkileyen parametreler arasında neredeyse **tartışma olmayan**, parametre konu başlıkları aşağıda sıralanmıştır.

- Donatı çapının artmasıyla aderansın düştüğü ve donatı sıyrılmasının arttığı dolayısıyla kenetlenme boyunun arttığı,

- Pas payının artmasıyla göçme şekillerinin beton ayrışma göçmesinden sıyrılma göçmesine geçtiği, dolayısıyla aderansın arttığı ve kenetlenme boyunun azaldığı,
- Donatılar arası mesafenin artmasıyla aderans dayanımının arttığı ve kenetlenme boyunun azaldığı,
- Kenetlenme boyunun arttırılmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde ortalama aderans dayanımının düştüğü ancak göçme şekillerinin beton ayrışma göçmesinden sıyrılma göçmesine geçtiği dolayısıyla maksimum aderans yükünün arttığı,
- Yapı elemanlarında donatı yerleşim konumunda, alt bölgede yerleştirilen donatıların aderans dayanımlarının üst bölgede yerleştirilenlere göre daha yüksek olduğu dolayısıyla kenetlenme boyunun alt bölgede daha düşük olduğu,
- Beton lif katkısının, beton çekme dayanımını arttırdığı için aderansı arttığı dolayısıyla kenetlenme boyunun azaltılabileceği,
- Kendiliğinden yerleşen beton kullanılması durumunda aderans dayanımının normal dayanımlı betonlar ile neredeyse aynı olduğu.

Kenetlenme boyu, birçok parametreye bağlı olduğu için bir veya iki parametreye bağlı olarak yapılan çalışmalardan çok genel ve net olmayan sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Ancak bu parametrelerin beton-FRP donatı aderansını dolayısıyla kenetlenme boyunu hangi oranda etkiledikleri açık değildir. Bazı araştırmacıların kenetlenme boyunun tespiti için literatürde sunulan deneylerden yola çıkarak çoklu parametrelere bağlı olarak korelasyon analizleri yapmasına rağmen, hem korelasyon analizi yapan araştırmacılar arasında(çekip çıkarma ve kiriş deneyleri arasındaki farklılıklardan da ötürü) hemde birkaç parametreye bağlı çalışma yapan araştırmacıların gözlemledikleri sonuçlar arasında ciddi uyumsuzluklar söz konusudur. Aderansı etkileyen parametreler arasında **tartışma olan**, parametre konu başlıkları ise aşağıda özetlenmiştir.

- FRP donatılarda lif türünün aderansa etkisi konusunda lif türlerinin kendi içlerinde ve çelik donatı ile karşılaştırılması hususunda büyük farklar göze çarpmaktadır. Çalışmalarda, aynı lif türüne sahip donatılarda bile FRP donatı ile çelik donatı aderans oranı araştırmacıdan araştırmacıya büyük farklılıklar

göstermiştir. Ayrıca, literatürde bazalt lifli ve aramid lifli FRP donatılarının avantajlarına rağmen aderans dayanımı ile ilgili çok az çalışma vardır.

- Literatürde FRP donatıların elastisite modülünün aderansa etkisinin olup olmadığı konusunda varılan yargılar araştırmacılar arasında büyük farklılıklar göstermiştir.
- FRP donatıların yüzey deformasyon şekillerinin beton-FRP aderans dayanımına etkisi, birçok araştırmacı tarafından incelenmesine rağmen, farklı araştırmacılar aynı yüzey şekline sahip FRP donatı çubuklarının aderans dayanımları için çok farklı değerler elde etmiş ve yüzey deformasyon şeklinin aderansa etkisi konusunda farklı yargılara varmıştır.
- Enine donatının, beton-FRP donatı arasındaki aderans dayanımına etkisinin olup olmadığı hususunda araştırmacılar arasında görüş farklılıkları göze çarpmaktadır.
- Beton basınç dayanımının yaklaşık 40 MPa'dan büyük olduğu durumlarda beton-donatı aderansında artışın olup olmamasıyla ilgili farklı görüşler vardır.

Literatürde ortaya çıkan bu farklılıklar ve parametrelerin fazlalığı nedeniyle kenetlenme boyu üzerinde hangi parametrenin hangi oranda etkisi olduğu ya da etkisinin olup olmadığı tam olarak bilinmemektedir.

FRP donatı ile beton arasındaki kenetlenme boyu, yönetmeliklerde geçen kenetlenme boyu bağıntıları ile incelendiğinde ise,

ACI 440 1R-15'da [1] verilen kenetlenme boyu bağıntısında (Eşitlik 1.12),

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0.083\sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (1.12)$$

Burada, l_d =FRP donatının kenetlenme boyu (mm); α =donatı yerleştirme faktörü (300 mm'den daha yüksekte konumlandırılan donatılar için 1.5, diğer tüm durumlarda 1.0); f_{fr} =FRP donatı tasarım çekme gerilmesi (MPa); $\sqrt{f'_c}$ =beton basınç dayanımının

karekökü (Mpa); C =en küçük, pas payı yâda donatı aralığının yarısı (mm); d_b =donatı çapı (mm); $C/d_b=3.5$ 'den büyük olmamalıdır.

Literatürde beton basınç dayanımının belli bir değerden sonra aderansı arttırıp arttırmadığı hakkında tartışma olmasına rağmen yönetmelikte geçen bağıntıda böyle bir sınır konmadığı göze çarpmakta ve bundan dolayı yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda kenetlenme boyu çok yüksek çıkmaktadır. Verilen bağıntıda lif türünün etkisi sadece GFRP ile sınırlıdır. Bu eşitlik, CFRP, AFRP ve BFRP donatıları göz ardı etmektedir. Bunların yanında, verilen bağıntıda donatı yüzey deformasyon şekli, enine donatı etkisi, donatı elastisite modülü, beton lif katkısı gibi parametrelere yer verilmemiştir. İlave olarak, literatürde yapılan çalışmalarda, yönetmelikte geçen bağıntının aderans gerilmesi için çok küçük değerler verdiği ve kenetlenme boyları içinde çok yüksek değerler verdiği ortaya konmaktadır.

CSA S806-12'de [4] verilen kenetlenme boyu bağıntısında (Eşitlik 1.13),

$$l_d = 1.15 \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5}{d_{cs}} \frac{f_F}{\sqrt{f'_c}} A_{f,bar} \quad (1.13)$$

burada, l_d =FRP donatının kenetlenme boyu (mm); $A_{f,bar}$ =FRP donatı kesit alanı (mm²); d_{cs} =en küçük, pas payı yada donatı aralığının üçte ikisi (mm), $d_{cs} \leq 2.5d_b$; f_F =nihai sınır durumdaki FRP donatı tasarım çekme gerilmesi (MPa); $\sqrt{f'_c}$ =beton basınç dayanımının karekökü (MPa) (maksimum değeri 8); K_1 =donatı yerleştirme faktörü (300 mm'den daha yüksekte konumlandırılan donatılar için 1.3, diğer tüm durumlarda 1.0); K_2 =beton ağırlık faktörü (Normal beton için 1, yarı hafif beton için 1.2, hafif beton için 1.3); K_3 =donatı kesit alanı faktörü ($A_b < 300 \text{ mm}^2$ için 0.8, $A_b > 300 \text{ mm}^2$ için 1); K_4 =donatı lif faktörü (CFRP ve GFRP için 1, AFRP için 1.25); K_5 =donatı yüzey şekli faktörü (Aderans dayanımının deneysel verisi mevcut ise 1'den daha küçük değer alınabilir ancak 0.5'den daha küçük alınamaz, mevcut değil ise, yüzeyi pürüzlü veya kumlama yüzeyli veya örgülü yüzeyli donatılar için 1, oluklu yüzeyli veya nervürlü donatılar için 1.05, dişli donatılar için 1.8)

Geçmiş çalışmalarda, 30 MPa üzerindeki beton basınç dayanım değerlerinde basınç dayanımının arttırılmasıyla aderans dayanımının artmayacağından bahsedilmektedir. Ancak, Eşitlik 1.13 beton basınç dayanımının etkisi için böyle bir sınırlama getirmemektedir. Verilen bağıntıda donatı lif türü katsayısı, GFRP ve CFRP donatılar için 1 olarak alınmaktadır. Ancak, literatürde CFRP donatıların aderans dayanımlarının GFRP donatılardan daha iyi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, denklemde AFRP donatılar ile ilgili olarak verilen 1.25 katsayısı hiçbir deneysel veriye dayanmamaktadır. BFRP donatılar için ise herhangi bir katsayı verilmemiştir. Bu bağıntıda, enine donatı etkisi, donatı elastisite modülü ve beton lif katkısı gibi kenetlenme boyunu etkileyen parametrelere yer verilmemiştir. İlave olarak, literatürde yapılan çalışmalarda, yönetmelikte geçen bağıntının kenetlenme boyları için çok yüksek değerler verdiği ve aderans gerilmesini çok küçük olarak tahmin ettiğini ortaya konmaktadır.

CSA S6-10'da [103] verilen kenetlenme boyu bağıntısında (Eşitlik 1.14),

$$l_d = 0.45 \frac{K_1 K_5}{\left[d_{cs} + K_{tr} \frac{E_{FRP}}{E_s} \right]} \left(\frac{f_{FRP}}{f_{cr}} \right) A_{f,bar} \quad (1.14)$$

burada, l_d =FRP donatının kenetlenme boyu (mm) (250 mm'den az alınmamalıdır); $A_{f,bar}$ =FRP donatı kesit alanı (mm²); f_{cr} =Betonun çatlama dayanımı (MPa) (Normal beton için $0.4\sqrt{f'c}$, yarı hafif beton için $0.34\sqrt{f'c}$, hafif beton için $0.3\sqrt{f'c}$); f_{FRP} =nihai sınır durumdaki FRP donatı tasarım çekme gerilmesi (MPa); K_1 =donatı yerleştirme faktörü (300 mm'den daha yüksekte konumlandırılan donatılar için 1.3, diğer tüm durumlarda 1.0); K_5 =Donatı yüzey şekli faktörü (Aderans dayanımının deneysel verisi mevcut ise aynı kesit alanlı FRP donatı ile çelik donatının aderans dayanımı oranı, 1'den büyük olamaz, mevcut değil ise, 0.8 alınır.), E_{FRP} =FRP donatının elastisite modülü; E_s =çelik donatının elastisite modülü; d_{cs} =en küçük, pas payı yada donatı aralığının üçte ikisi (mm), $d_{cs} \leq 2.5d_b$; K_{tr} =enine donatı dizilimi katsayısı (Eşitlik 1.15).

$$K_{tr} = 0.45 \frac{A_{tr} f_y}{10.5 s n} \quad (1.15)$$

Burada, A_{tr} =enine donatı alanı (mm²); f_y =çeliğin akma gerilmesi (MPa); s =enine donatı aralığı (mm); n ; bindirme bölgesinde ya da kenetlenmede donatı sayısı.

Ancak burada, $(d_{cs} + K_{tr} \frac{E_{frp}}{E_s} \leq 2.5 d_b)$ olmalıdır.

Literatürdeki çalışmalar, bu denklemin aşırı emniyetli olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla aderans gerilmesini çok küçük olarak tahmin etmektedir. Denklem, BFRP donatılar için ise herhangi bir değer öngörmemektedir. Donatı yüzey özelliklerinin aderansı etkilemesine rağmen bağıntıda yüzey özellikleri arasında ise hiç bir ayırım yapılmamıştır.

JSCE 1997'de [5] verilen kenetlenme boyu bağıntısında (Eşitlik 1.16),

$$l_d = \alpha_1 \frac{f_d}{4 f_{bod}} d_b \quad (1.16)$$

Burada, l_d =FRP donatının kenetlenme boyu (mm); f_d =FRP donatı tasarım çekme gerilmesi (MPa); d_b =donatı çapı (mm); $\alpha_1=k_c \leq 1.0$ ise 1.0, $1.0 \leq k_c \leq 1.5$ ise 0.9, $1.5 \leq k_c \leq 2.0$ ise 0.8, $2.0 \leq k_c \leq 2.5$ ise 0.7, $k_c < 2.5$ ise 0.6; f_{bod} =Betonun tasarım aderans dayanımı (MPa). k_c ise Eşitlik 1.17'de gösterilmiştir.

$$k_c = \frac{c}{d_b} + \frac{15 A_t E_t}{s d_b E_0} \quad (1.17)$$

Burada, c =en küçük pas payı ya da donatı arası mesafenin yarısı (mm); A_t = enine donatı alanı (mm²); s =enine donatı arasındaki mesafe (mm); E_t =enine donatının elastisite modülü (MPa); E_0 =standart elastisite modülü (200,000 MPa). f_{bod} ise Eşitlik 1.18'de gösterilmiştir.

$$f_{bod} = \frac{0.28\alpha_2 f_{ck}'^{2/3}}{\gamma_c} \leq 3.2 \quad (1.18)$$

Burada, α_2 =Aderans dayanım değıştirme katsayısı: aderans dayanımının çelik donatıyla aynı ya da daha büyükse 1.0'dır, aksi halde deney sonucuna göre azaltılır; f_{ck} =beton basınç dayanımı (MPa); γ_c =beton basınç dayanımı için karakteristik değeri 1.3 alınabilir.

Geçmiş çalışmalarda, 30 MPa'nın üzerindeki beton basınç dayanım değerlerinde basınç dayanımının artırılmasıyla aderans dayanımının artmayacağından bahsedilmektedir. Ancak, Eşitlik 1.18 beton basınç dayanımının etkisi için böyle bir sınırlama getirmemektedir. Verilen bağıntıda lif türünün kenetlenme boyunu ne derece etkilediği öngörülmemiş olmakla beraber, donatı yüzey deformasyon şeklinin, donatı elastisite modülünün, beton lif katkısının etkisine değeri verilmemiştir. İlave olarak, literatürde yapılan çalışmalarda, yönetmelikte geçen bağıntının aderans gerilmelerinin tahmininde çok küçük tahminler verdiğini dolayısıyla kenetlenme boyları için ise çok yüksek değeri verdiğini ortaya konmaktadır.

CNR'de [2] verilen kenetlenme boyu bağıntısında (Eşitlik 1.19),

$$l_d = 0.1\sigma_f d_b \quad (1.19)$$

Burada, l_d =FRP donatının kenetlenme boyu(mm); σ_f =FRP donatı tasarım çekme gerilmesi (MPa); d_b =donatı çapı (mm);

Verilen bağıntıdan da görüleceği üzere, kenetlenme boyuna etki eden parametreler sadece donatı çapı ve FRP donatının tasarım çekme gerilmesidir. Oysaki kenetlenme boyuna etki eden parametreler bir hayli fazladır. Buna ilaveten, literatürde, verilen bağıntı ile ilgili herhangi bir veriye rastlanmamıştır.

1.8. Özgün Değer

Beton-FRP aderans dayanımını etkileyen birçok etken bulunmaktadır ve bu aderansın gerçekçi bir şekilde modellenmesi için bütün bu etkenlerin hesaba katılması gereklidir. Bu bağlamda, yapılan tez çalışması mevcut bilim, teknoloji ve bilgi birikimine katkısı dört ana başlık altında özetlenebilir:

1. Geçmişte beton-FRP donatı aderansı konusunda yapılmış olan çalışmalar, aderansa etki eden bütün deney değişkenleri hesaba katılmadan tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilmesi hedeflenen deneyler, aderansı etkileyen parametrelerden biri hariç tümü sabit tutulurken, yalnızca bir değişken üzerinde yoğunlaşarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, her değişkenin aderans üzerindeki etkisi net olarak belirlenmiştir.
2. Mevcut FRP donatılı beton yönetmelikleri, aderansı etkileyen bütün değişkenleri hesaba katan kenetlenme boyu denklemleri sunmamaktadır. Bu denklemler incelendiğinde, her denklemde bu değişkenlerden önemli bir bölümünün etkisinin hesaba katılmadığı ve denklemlerin bu eksiklikten dolayı deney sonuçlarından çok uzak kenetlenme boyu değerleri verdiği görülmektedir. Geçmişte yapılmış çalışmalar da bu eksikliği dikkat çekmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneylerin sonuçları, aderansı etkileyen bütün değişkenleri içeren analitik kenetlenme boyu denklemlerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır.
3. FRP donatılı beton yönetmelikleri, geçmişte bazalt lifli polimer (BFRP) çubuklarla ilgili deneyler yapılmamış olduğundan ötürü, BFRP çubukları tamamen göz ardı etmektedir. Bu çalışma kapsamında BFRP donatılı numuneler de test edilerek gerekli deney sonuçlarına ulaşılmıştır.
4. Yetersiz kenetlenme boylarında ya da donatının yüzey özelliğinin kötü olması durumunda donatı sıyrılması, beton ayrışma göçme tipinden önce de gerçekleşebilmektedir. FRP donatı-beton arasında maksimum aderans

gerilmesinin tam olarak tespit edilebilmesi için deneylerin sıyrılma göçme şeklini esas alacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Ayrışma ile sonuçlanan numunelerde, betonun çatlamasından doğan aderans kaybı neticesinde nihai aderans belirlenemeyeceği için aderansı etkileyen değişkenler de tam olarak tespit edilemez. Bu nedenle ayrışma ile sonuçlanan deneyler ile ortaya konan bağıntıların geçerliliği tartışmalıdır.

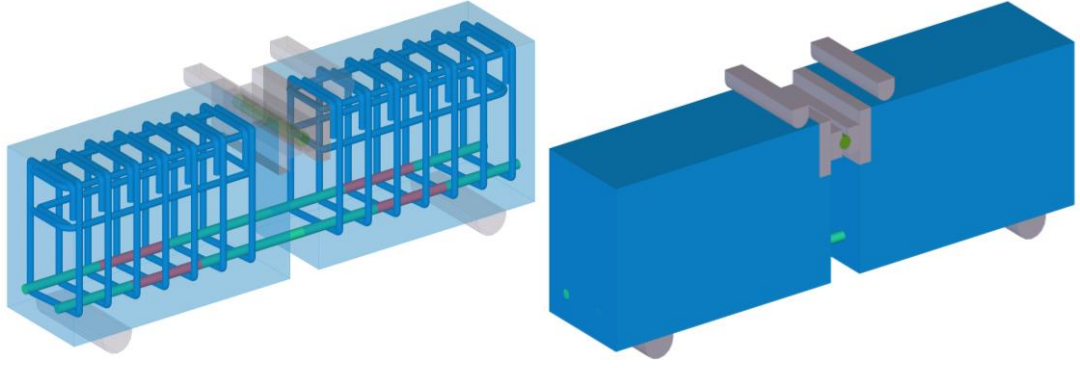
Geçmişte gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalarda, genellikle çekip çıkarma (pull-out) deney metoduna başvurulmuştur. Bu deney metodunda donatıyı çevreleyen beton gerçek eğilme elemanlarında donatı çubuklarını çevreleyen betona göre daha erken çatlamakta ve deney sonuçları, gerçek eğilme elemanı davranışını yansıtmamaktadır. Bu çalışma kapsamında, eğilme elemanlarında yer alan çekme donatı çubuklarının gerilme ve birim deformasyon durumlarını en yakın şekilde yansıtan ve donatıyı çevreleyen betonun erken çatlamadığı mafsallı giriş test metoduna başvurulmuştur. Bu sayede elde edilen deney sonuçlarının analitik denklemler geliştirilmesinde kullanılması daha sağlıklı olacağı düşünülmüştür.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA ve ANALİTİK YÖNTEM

2.1. Mafsallı Kiriş Deneyleri

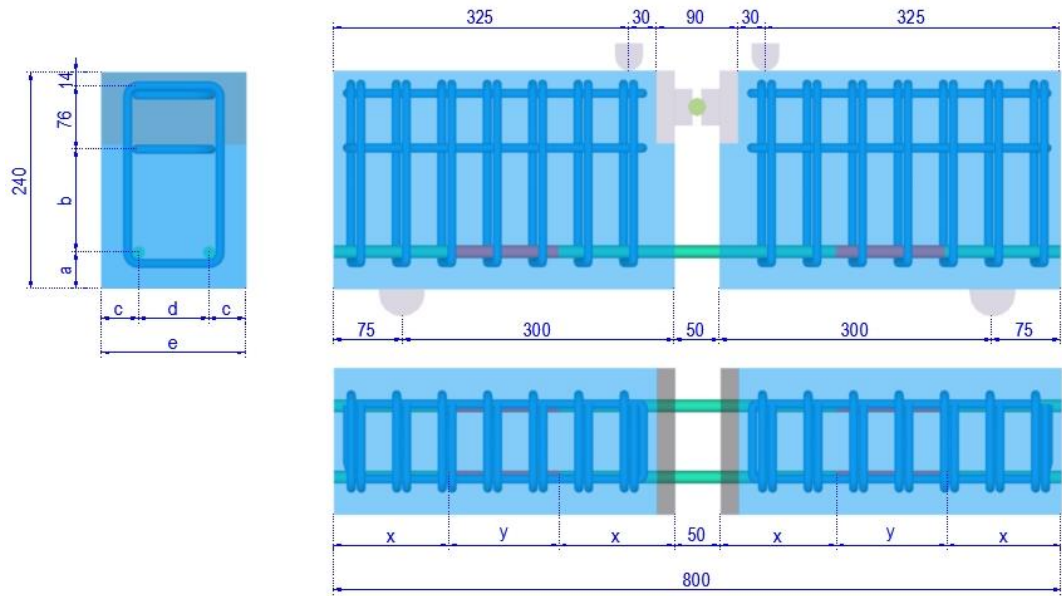
ACI 408R-03 [23] yönetmeliği çekip çıkarma, kiriş ucundan çekip çıkarma, eğilmede kenetlenme deneyi ve bindirme eki boyu deneyleri; ASTM standartları [34] çekip çıkarma; RILEM standartları da [32,33] çekip çıkarma ile mafsallı kiriş deneyleri; EN 10080-2005 standartları da [35] çekip çıkarma ile mafsallı kiriş deneyleri aracılığıyla beton-çelik donatı aderansının belirlenebileceğini belirtmektedir. Diğer birçok yönetmelik ve standart ise [8,36,37], betonla FRP donatı çubukları arasındaki aderansın belirlenmesinde yalnızca çekip çıkarma deneylerine değinmektedir. Beton ile FRP arasındaki aderansın ölçülmesinde, betonla çelik aderansının belirlenmesi için kullanılan yöntemler kullanılmaktadır.

Yukarıda sıralanan bu deneyler arasında, uygulama kolaylığı ve basitlik açısından genellikle çekip çıkarma deneylerine başvurulmaktadır. Ancak, çekip çıkarma deneylerindeki yükleme koşulları, bir eğilme elemanında donatı çubuklarının maruz kaldığı yükleme koşullarından farklı olduğu için çekip çıkarma deneylerine dayanarak kesin sonuçlara ve yargılara varılamamaktadır [23]. Çekip çıkarma deneylerine, farklı deney değişkenlerinin kenetlenme boyu üzerindeki etkisi incelenirken başvurulmalıdır [8,39]. Bu çalışmada, betonarme eğilme elemanlarında yer alan çekme çubuklarının yükleme koşullarına en yakın koşullara sahip mafsallı kiriş deneylerine başvurularak, farklı deney değişkenlerinin FRP-beton aderansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Mafsallı kiriş deneylerinde donatılar kesme kuvvetlerinin etkisiyle kaldıraç etkisine maruz kalsa da standart bir deney yönteminin takip edilmesi amacıyla bu etki göz ardı edilmiştir. Mafsallı kiriş deneyleri, aderans dayanımının çoklu parametre etkisinde incelenebilmesine olanak sağlayan en iyi yöntemlerden birisi olmasından dolayı bu çalışmada tercih edilmiştir. Çalışmada, toplamda 90 adet mafsallı deney kirişi (Şekil 2.1) test edilerek, donatı lif türü, donatı yüzey özellikleri, donatı elastisite modülü, donatı çapı, donatı yan ve alt pas payı, etriye aralığı, beton basınç dayanımı gibi değişkenlerin FRP-beton aderansına etkisi incelenmiştir.



Şekil 2.1. Mafsallı kiriş deney numunesi 3D görünümü

Mafsallı kiriş deney numuneleri, 102x240, 128x240, 160x240 ve 240x240 mm² değişen en kesitlere ve toplam 800 mm uzunluğa sahiptir (Şekil 2.2). Deney numuneleri EN 10080-2005 [35] yönetmeliğinde geçen mafsallı kiriş numunelerine benzer olup, tüm deney değişkenlerinin incelemek maksadıyla bu kiriş deney numuneleri tüm deney değişkenlerini kapsayacak şekilde ve alt ve yan pas payı etkisini gözlemleyebilmek için yeniden tasarlanmıştır.



Şekil 2.2. Mafsallı kiriş deney numunesi detayları

Bütün kirişlerde, 50 mm aralığa sahip S420 sınıfı $\Phi 8$ çelik etriyeler kullanılarak, kesme açıklıklarında diyagonal çatlakların, kiriş davranışını etkilemesi engellenmiştir. Etriyelerin montajının sağlanması amacıyla, her bir kirişte basınç donatısı olarak S420 sınıfı 2 $\Phi 8$ çelik boyuna donatı çubuğu kullanılmıştır. Ayrıca yatay yönde olabilecek muhtemel yatay kesme kuvvetlerinden oluşacak çatlakları önlemek maksadı ile tüm kirişlerde S420 sınıfı çelik 2 $\Phi 8$ gövde donatısı kullanılmıştır. Kiriş numuneleri, dört noktalı eğilme altında test edilmiştir.

2.2. Mafsallı Kiriş Deney Numunelerinin Numaralandırılması

Deney kirişlerinin isimleri üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci bölme işaretine kadar olan kısım, FRP donatı özelliklerini, birinci bölme işaretinden ikinci bölme işaretine kadar olan kısım kiriş içindeki donatı yerleşimini (Şekil 2.2) ve ikinci bölme işaretinden sonra olan kısım betonun basınç dayanımını simgelemektedir.

Çizelge 2.1. Deney numunelerinin numaralandırılması

Numune Numarası	G ¹ 8 ² Sf ³ */4.5 ⁴ -11 ⁵ -4.5 ⁶ -5 ⁷ -1 ⁸ */C30 ⁹ ***
*FRP donatı özellikleri	¹ FRP donatı türü: "G=GFRP; C=CFRP; B=BFRP; S=Çelik" ² FRP donatı anma çapı: 6; 8; 12 mm ³ Donatı yüzey özelliği: "Ww=Geniş aralıklı sıkı sargılı; WO=Oluklu; R=Nervürlü; Sc=İri taneli kumlanmış; Sf=İnce taneli kumlanmış"
**Kiriş içindeki donatı yerleşimi	⁴ c=Yan pas payı: 2.5; 3.5; 4.5d ⁵ d=Donatı aralığı: 11; 13; 15; 17.7d ⁶ a=Alt pas payı: 2.5; 3.5; 4.5d ⁷ y=Donatı gömülme boyu: 5; 10; 15d ⁸ Etriye etkisi: "Etriyeli kiriş=1; Etriyesiz kiriş=0"
***Beton özellikleri	⁹ Beton anma basınç dayanımı: 20; 30; 35; 40 MPa

Örneğin; G8Sf/4.5-11-4.5-5-1/C30 numaralı mafsallı kiriş numunesi için:

G8Sf: G harfi, GFRP donatıyı; 8 sayısı, donatı çapının 8 mm olduğunu; Sf harfleri, donatı yüzeyinin ince taneli olarak kumlanmış olduğunu belirtmektedir.

4.5-11-4.5-5-1: 4.5 sayısı, kiriş içinde yatay yönde donatı pas payının $4.5d_b$ (çekme donatısı çapının 4.5 katı) olduğunu; 11 sayısı, iki adet çekme donatısı arasındaki mesafenin $11d_b$ olduğunu; 4.5 sayısı, dikey yönde pas payının $4.5d_b$ olduğunu; 5 sayısı, donatı gömülme boyunun $5d_b$ olduğunu; 1 sayısı ise kirişin etriyeli olduğunu belirtmektedir.

C30: C30 terimi ise beton silindir anma basınç dayanımının 30 MPa olduğunu belirtmektedir.

2.3. Çalışmada Kullanılan Mafsallı Kiriş Deney Numune Listesi

Çalışma kapsamında hazırlanan mafsallı kiriş numune listesi, Çizelge 2.2-2.8'de sunulmaktadır. Donatı çapının etkisinin incelenmesi maksadı ile hazırlanan kirişlerin en kesit boyutları çekme donatısı 6 mm ve 8 mm olan kirişler için $160 \times 240 \text{ mm}^2$; 12 mm olan kirişler için $240 \times 240 \text{ mm}^2$ 'dir.

Çizelge 2.2. Gömülme boyunun etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler

Gömülme Boyu		
5d	10d	20d
G8Sf/4.5-11-4.5-5-1/C30	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30*	G8Sf/4.5-11-4.5-20-1/C20
G8WO/4.5-11-4.5-5-1/C30	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	G8WO/4.5-11-4.5-20-1/C20
G8R/4.5-11-4.5-5-1/C30	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C30	G8R/4.5-11-4.5-20-1/C20
C8Sf/4.5-11-4.5-5-1/C30	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	C8Sf/4.5-11-4.5-20-1/C20
B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-5-1/C30	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-20-1/C20
S8R/4.5-11-4.5-5-1/C30	S8R/4.5-11-4.5-10-1/C30	S8R/4.5-11-4.5-20-1/C20

*Bu deneyden 2 âdeti şahit numune olmak üzere toplamda 3 adet yapılmıştır.

Çizelge 2.3. Beton basınç dayanımının etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler

Beton Basınç Dayanımı			
C20	C30	C35	C40
G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C20	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C35	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C40
G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C20	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C35	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C40
G8R/4.5-11-4.5-10-1/C20	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C30	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C35	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C40
C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C20	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C35	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C40
B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C20	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C35	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C40
S8R/4.5-11-4.5-10-1/C20	S8R/4.5-11-4.5-10-1/C30	S8R/4.5-11-4.5-10-1/C35	S8R/4.5-11-4.5-10-1/C40

Çizelge 2.4. Etriye etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler

Etriye Etkisinin	
Etriyesiz	Etriyeli
G8Sf/4.5-11-4.5-10-0/C20	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
G8WO/4.5-11-4.5-10-0/C20	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30
G8R/4.5-11-4.5-10-0/C20	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C30
C8Sf/4.5-11-4.5-10-0/C20	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-0/C20	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30
S8R/4.5-11-4.5-10-0/C20	S8R/4.5-11-4.5-10-1/C30

Çizelge 2.5. Yan pas payının etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler

Yan Pas Payı		
2.5d	3.5d	4.5d
G8Sf/2.5-15-4.5-10-1/C30	G8Sf/3.5-13-4.5-10-1/C30	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
G8WO/2.5-15-4.5-10-1/C30	G8WO/3.5-13-4.5-10-1/C30	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30
G8R/2.5-15-4.5-10-1/C30	G8R/3.5-13-4.5-10-1/C30	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C30
C8Sf/2.5-15-4.5-10-1/C30	C8Sf/3.5-13-4.5-10-1/C30	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
B8Ww+Sc/2.5-15-4.5-10-1/C30	B8Ww+Sc/3.5-13-4.5-10-1/C30	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30
S8R/2.5-15-4.5-10-1/C30	S8R/3.5-13-4.5-10-1/C30	S8R/4.5-11-4.5-10-1/C30

Çizelge 2.6. Alt pas payının etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler

Alt Pas Payı		
2.5d	3.5d	4.5d
G8Sf/4.5-11-2.5-10-1/C30	G8Sf/4.5-11-3.5-10-1/C30	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
G8WO/4.5-11-2.5-10-1/C30	G8WO/4.5-11-3.5-10-1/C30	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30
G8R/4.5-11-2.5-10-1/C30	G8R/4.5-11-3.5-10-1/C30	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C30
C8Sf/4.5-11-2.5-10-1/C30	C8Sf/4.5-11-3.5-10-1/C30	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
B8Ww+Sc/4.5-11-2.5-10-1/C30	B8Ww+Sc/4.5-11-3.5-10-1/C30	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30
S8R/4.5-11-2.5-10-1/C30	S8R/4.5-11-3.5-10-1/C30	S8R/4.5-11-4.5-10-1/C30

Çizelge 2.7. Donatı çapının etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler

Donatı Çapı		
6 mm	8 mm	12 mm
G6Sf/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	G12Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
-	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	G12WO/4.5-11-4.5-10-1/C30
G6R/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C30	G12R/4.5-11-4.5-10-1/C30
-	-	G12Ww/4.5-11-4.5-10-1/C30
C6Sf/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	C12Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
C6Sc/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	-	-
B6Ww+Sc/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30	B12Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30
-	S8R/4.5-11-4.5-10-1/C30	S12R/4.5-11-4.5-10-1/C30

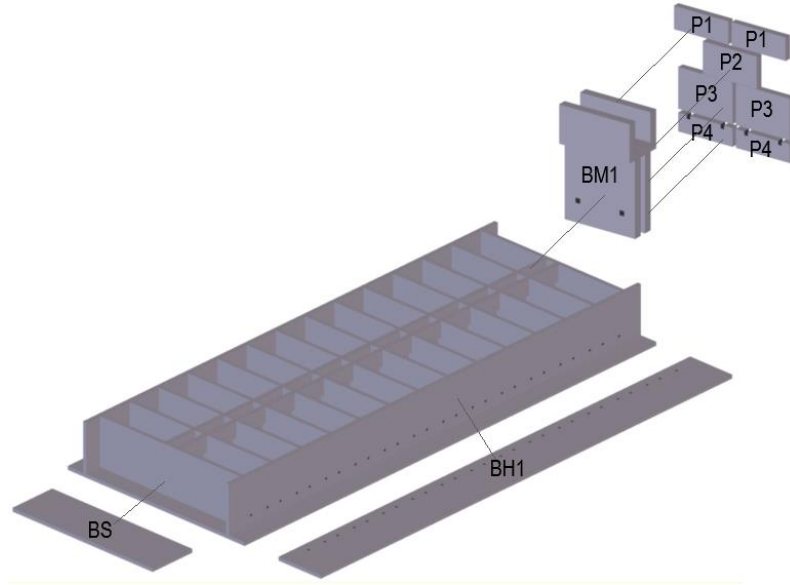
Çizelge 2.8. Donatılar arası mesafenin etkisinin incelenmesi için hazırlanan kirişler

Donatılar Arası Mesafe		
3.75d	7d	11d
G8Sf/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	G8Sf/4.5-7-4.5-10-1/C30	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
G8WO/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	G8WO/4.5-7-4.5-10-1/C30	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30
G8R/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	G8R/4.5-7-4.5-10-1/C30	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C30
C8Sf/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	C8Sf/4.5-7-4.5-10-1/C30	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30
B8Ww+Sc/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	B8Ww+Sc/4.5-7-4.5-10-1/C30	B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30
S8R/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	S8R/4.5-7-4.5-10-1/C30	S8R/4.5-11-4.5-10-1/C30

2.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması

2.4.1. Deneylerde kullanılacak kalıpların hazırlanması

Çalışmada kullanılacak mafsallı kirişlerin kalıp yapımında plywood kalıplar kullanılmıştır. Kalıplar CNC tezgahda milimetrik olarak kestirilen 3 ana parçadan oluşmaktadır (Şekil 2.3). Bunlar BS (Kalıp kanatları), BH1 (Kalıp alınları) ve BM1 (kalıp ortaları) parçalarıdır.



Şekil 2.3. Kiriş kalıplarının montaj aşamaları

BS (Kalıp kanatları): Kalıp kanatlarının boyu 800 mm, yükseklikleri 240 mm olmakla birlikte standart olarak üretilmişlerdir.

BH1 (Kalıp alınları): Yükseklikleri 240 mm ve boyları 2500 mm'dir. Ancak çalışmada kullanılan kiriş donatılarının değişen pas paylarından ve donatı çaplarından dolayı CNC'de milimetrik olarak donatı çaplarına uygun delikler açılmasıyla pas paylarının hatasız olarak yapılması sağlanmıştır. Bu nedenle değişken elemanlar olarak imal edilmişlerdir.

BM1 (Kalıp ortaları): Bir orta parça toplam 7 parçadan oluşmaktadır. Her bir deney değişkeni için kirişlerdeki donatı çaplarının ve pas paylarının değişmesi nedeniyle her bir deney değişkenine özgü olarak imal edilmişlerdir. Bu şekilde toplam 90 adet kalıp orta parçası imal edilmiştir. Orta parça numaraları her deney değişken grubu için ayrı olarak hazırlanmış ve parçalar buna göre numaralandırılmıştır. Deney kirişi dökümünden sonra kirişlerin kalıplardan kolay bir şekilde çıkarılabilmesi için, kiriş orta parçalarını (BM1) meydana getiren P1, P2 ve P3 parçaları, P4 parçasından çıkabilecek bir şekilde imal edilmiştir.

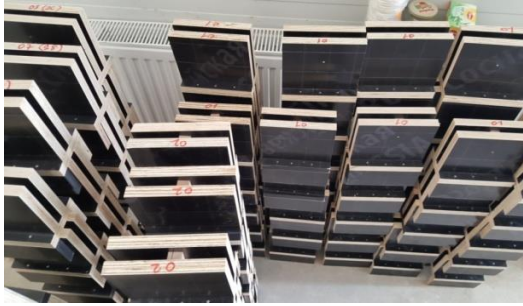
Çalışmada kullanılan kalıplar 750 âdete yakın parça zımparalandıktan sonra yapıştırıcı ve vidalar ile bir araya getirilmesi ile oluşturulmuşlardır. Beton dökümünün tek seferde ve hızlı bir şekilde yapılabilmesi için kiriş kalıpları yan yana imal edilmiştir. 1 adet çoklu kiriş kalıbında (Şekil 2.4.d) en fazla 13 adet kiriş dökümü gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde 11 adet çoklu kiriş kalıbı hazırlanmıştır.



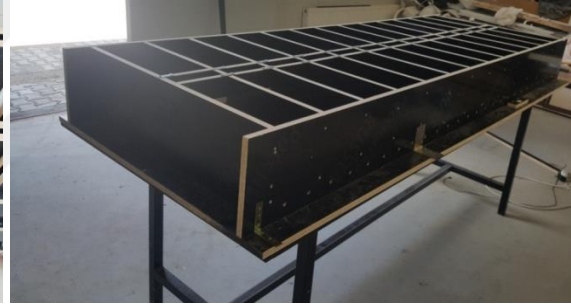
a)Orta parçaların CNC ile kesilmesi



b)Zımparalanmamış kalıp parçaları



c)Birleştirilen kalıp orta parçaları



d)Çoklu kiriş kalıbı

Şekil 2.4. Kalıpların imalatı ve montajları

2.4.2. Beton basınç dayanımının tayini için beton kalıplarının hazırlanması

Çalışma kapsamında, kirişlerde kullanılacak beton karışımlarının beton basınç dayanımı değerlerinin tespit edilebilmesi maksadı ile plywood kalıpları kullanılarak 150x150x150 mm³ boyutlarına sahip 22 adet küp numune kalıbı imal edilmiştir (Şekil 2.5). Tüm küp kalıpları EN 12390-1 [113] standartlarına uygun olarak imal edilmişlerdir.



Şekil 2.5. Beton küp numune kalıpları

2.4.3. Kirişlerin enine ve boyuna etriyelerinin hazırlanması

Çalışmada, deney kirişlerinin yapımında, yaklaşık 1176 adet enine etriye, 336 adet boyuna etriye hazırlanmıştır. Ancak etriye enlerinin kısa olması ve etriye makinesi büküm başlığının büyüklüğü nedeniyle tüm etriyeler etriye kolu ile bükülmüştür (Şekil 2.6). Hazırlanan etriyeler birbirilerine bağ telleri ile bağlanarak, kiriş etriyelerinin birbirlerine bağlantısı yapılmıştır (Şekil 2.7).



Şekil 2.6. Etriye makinesinin ve etriye kolunun büküm başlığı



Şekil 2.7. Kirişlerde kullanılacak etriyeler

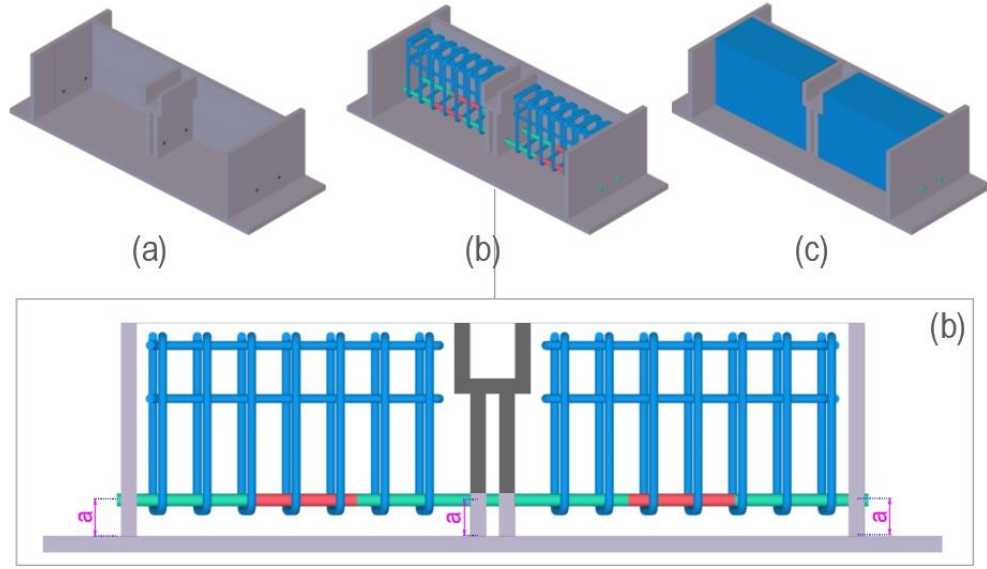
2.4.4. Boyuna donatıların hazırlanması ve kalıplara yerleştirilmesi

Çalışmada deney kirişlerinde asıl donatı olarak kullanılan boyuna donatıların beton ile olan temaslarını kesmek için şeffaf su terazileri kullanılmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Boyuna donatının beton ile olan temasının kesilmesi

Hazırlanan boyuna donatılar, etriyeler ile bağ telleri yardımıyla bağlanmıştır. Boyuna donatıların uçları, kiriş alın kalıplarında (BH1) ve P4 orta parçalarında kullanılan deliklere geçirilerek, pas payları ayarlanmıştır. Daha sonra ise Şekil 2.9.b’de görüldüğü üzere koyu gri orta bölme yerleştirilmiştir.



Şekil 2.9. Kiriş donatılarının kalıba yerleştirilmesi aşamaları



Şekil 2.10. Kiriş donatılarının kalıplara yerleştirilmesi

2.4.5. Betonun dökülmesi, bakımı ve kalıplardan çıkarılması

Deney kirişlerinin fazla olması sebebiyle ve kirişlerdeki betondan kaynaklı farklılıkları en aza indirilebilmek maksadı ile tüm kirişlerde hazır beton kullanılmıştır (Şekil 2.11). Beton kiriş kalıplarına, beton mikserin oluğu uzatılarak döküldüğü esnada, betonun

boşluksuz yerleştirilmesi için sıkıştırma yapılmıştır. Sıkıştırma işlemi, donatıların çok sıkı olması nedeniyle şişleme yöntemiyle yapılmıştır.

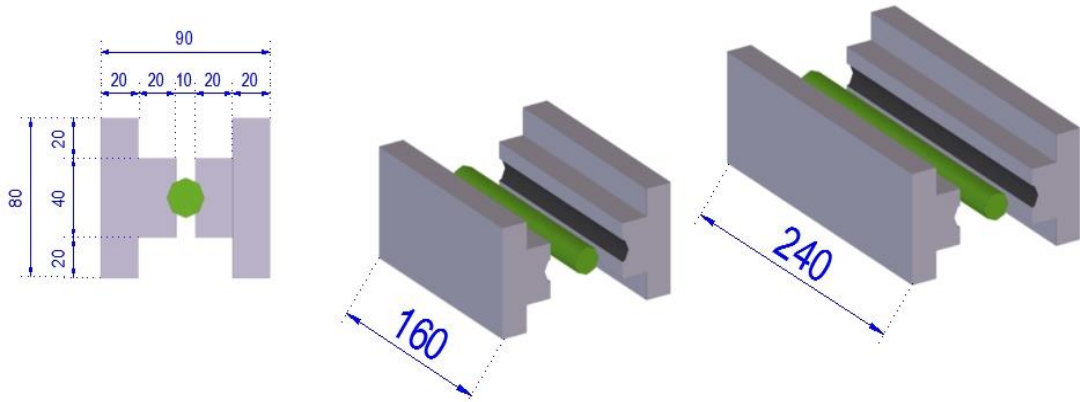


Şekil 2.11. Beton mikserinin hazırlanması

Tüm kiriş yan ve alın kalıpları beton dökümünden iki gün sonra çıkarılmıştır. Tüm kiriş numuneleri güneşten ve hava sıcaklığından etkilenmemeleri için sulanmış ve rötreye karşı üst yüzleri kalın plastik brandalar ile kapatılmıştır.

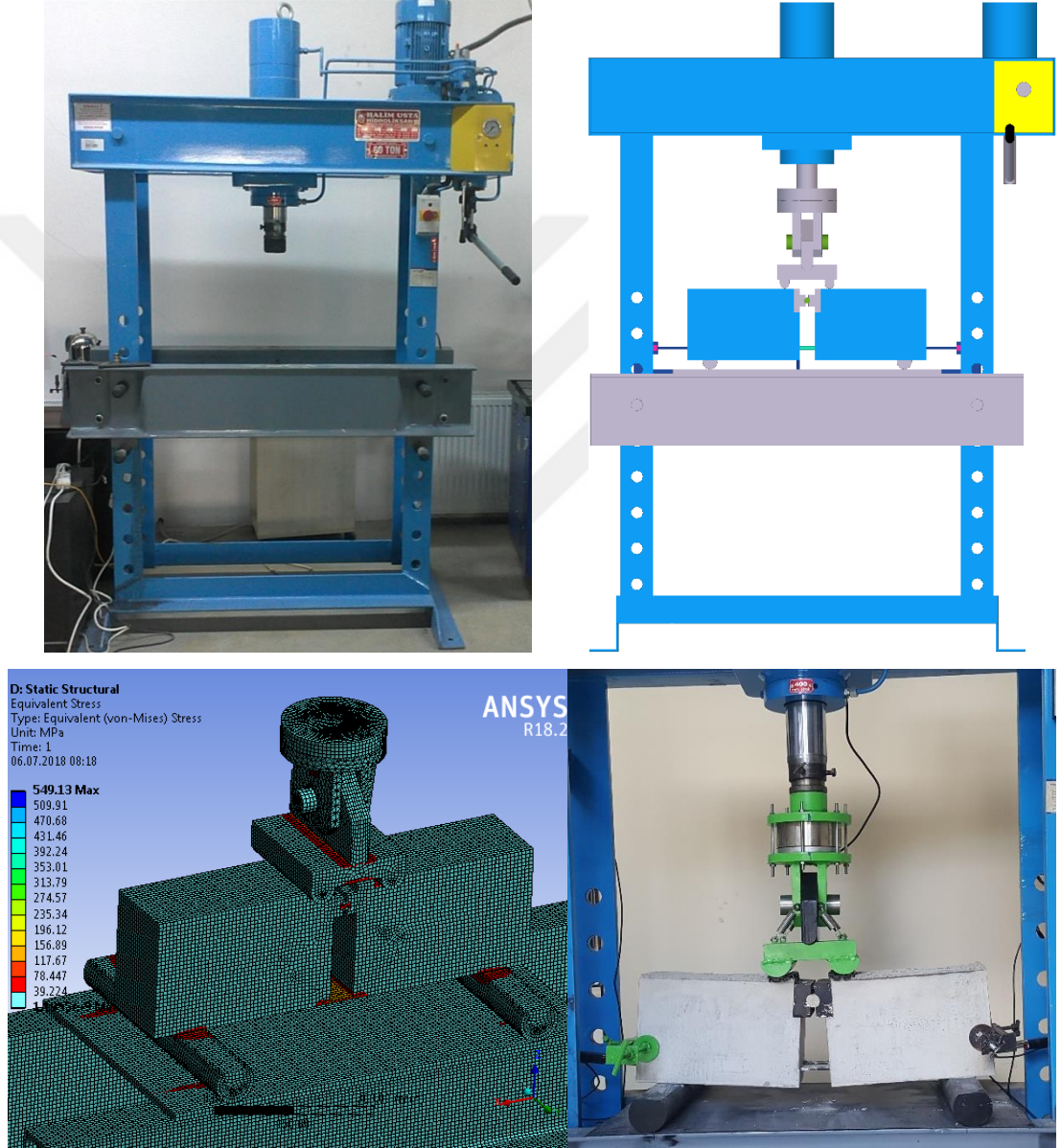
2.4.6. Kirişlerde kullanılan mafsalların üretilmesi ve presin modifikasyonu

Mafsallı kirişler 160x240 ve 240x240 mm² kesit alanına sahip olmalarında dolayı 160 mm ve 240 mm uzunluğa sahip iki farklı mafsal tel erezyon ve torna tezgâhı kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Kirişlerde kullanılan orta mafsallar

Sanayi tipi pres, kiriş deneylerinde kullanılacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Yükün açılal etkimesi sonucu yükleme mekanizmasının zarar görmesini engellemek amacıyla, presin yükleme ucuna küresel mafsall bağlanmıştır (Şekil 2.13). Ayrıca kirişin basit kiriş gibi çalışabilmesi için kirişin altına hareketli mesnetler yerleştirilmiştir. Tüm mafsalların tasarımı ve üretimi laboratuvarıda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.13. Hidrolik presin modifikasyonu

2.5. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri ve Testleri

2.5.1. Beton testleri

Deney kirişlerinin fazla olması ve betondan kaynaklı farklılıkları en aza indirilebilmek için tüm kirişlerde hazır beton kullanılmıştır. Kirişlerde kullanılan beton karışımlarının karışım oranları Çizelge 2.9'da verilmiştir. Karışımlarda kullanılan en büyük agrega çapı 16 mm'dir.

Çizelge 2.9. 1m³ Hacmindeki Betonun Karışım Oranları

Beton Anma Türü	Kaba Agrega (kg)	İnce Agrega (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	Süper Akışkanlaştırıcı (kg)	Toplam (kg)
C20	560	1259	314	182	3.14	2318.14
C30	611	1131	340	195	9.18	2286.18
C35	569	1056	480	195	12.48	2312.48
C40	552	1024	580	180	13.92	2349.92

Her bir beton türünün beton basınç dayanımını belirleyebilmek için EN 12350-1 [114] standardına göre numune alınmıştır. Her bir beton türünden 5 adet 150x150x150 mm³lük numune alınarak, EN 12390-2 [115] standartında belirtilen kür şartlarında 2, 7 ve 28 gün bekletilmiştir. Numunelerin basınç dayanımları EN 12390-3 [116] standartına göre belirlenmiştir. Ayrıca kirişlerin beton döküm ve sıkıştırma şartları ile kür şartlarını daha iyi yansıtabilmek maksadı ile 4 adet numune daha alınmış olup numuneler kirişlerin döküm, kürlenme ve sıkıştırma koşullarına maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.10. 28 günlük beton basınç dayanımları

Beton Anma Türü	TS EN 12390-2 Şartlarında 2 Gün Bekletilen Numunenin Beton Basınç Dayanımı (MPa) (1adet numune)	TS EN 12390-2 Şartlarında 7 Gün Bekletilen Numunenin Beton Basınç Dayanımı (MPa) (1adet numune)	TS EN 12390-2 Şartlarında 28 Gün Bekletilen Numunelerin Beton Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa) (3 adet numune)	Kirişler ile Aynı Koşullara Sahip 28 Gün Bekletilen Numunelerin Beton Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa) (4 adet numune)
C20	18.10	23.48	25.68	21.48
C30	28.67	35.91	38.10	35.90
C35	40.48	46.10	53.97	45.80
C40	53.15	60.20	63.18	50.61

Betonların akıcılığını ve yayılma durumunu tayin edebilmek için EN 12350-2 [117] standardına göre betonda slump deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 2.11'de verilmiştir.

Çizelge 2.11. Slump deney sonuçları

Beton Anma Türü	Çökme (mm)
C20	89
C30	87
C35	84
C40	85

Sertleşmiş betonların yoğunluğunu tayin edebilmek için EN 12390-7 [118] standardı kullanılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 2.12'de verilmiştir.

Çizelge 2.12. Betonların yoğunlukları

Beton Anma Türü	Yoğunluk (Mg/m ³)
C20	2.365
C30	2.358
C35	2.367
C40	2.370

2.5.2. Donatı testleri

Çelik donatı testleri

Çekme deneyleri EN ISO 15630-1 [119] ve EN ISO 6892-1 [120] standartlarına göre yapılmıştır. Deneylerde donatılar için ölçme boyları Eşitlik 2.1'e göre hesaplanmıştır.

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (2.1)$$

Burada; k =oranlı katsayısı (5.65 ya da 11.3) ve S_0 ise donatı kesit alanıdır.

Eşitlik 2.1'e göre 8 mm çapındaki donatılar için ölçme boyları 80 mm ve 12 mm çaplarındaki donatılar için ise 120 mm olmak üzere toplam numune boyları sırasıyla 300 mm ve 340 mm hesaplanmıştır. Her donatı çapı için beşer deney yapılmış ve bu deneyler evrensel çekme (UTM) makinesinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 2.13'de sunulmuştur.

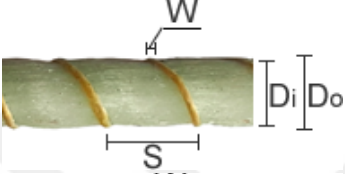
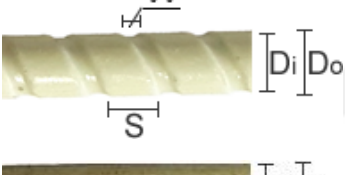
Çizelge 2.13. Çelik donatıların çekme deney sonuçları

Anma Çapı	Ort. Akma Dayanımı (MPa)	Ort. Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
8	592	696	200
12	468	582	200

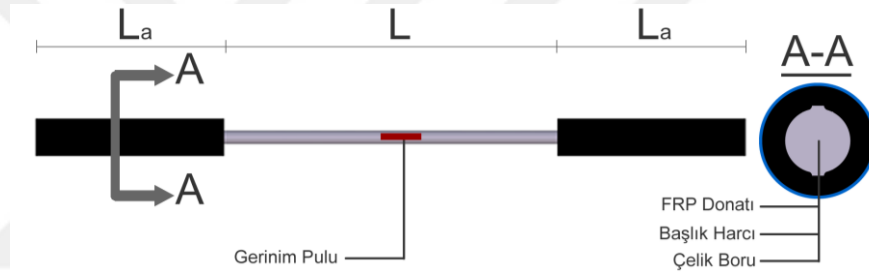
FRP donatı testleri

Çalışmada kullanılan FRP donatıların listesi ve yüzey deformasyon özellikleri Çizelge 2.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.14. FRP donatıların yüzey deformasyon ve fiziksel özellikleri

	Donatı Türü	D _b (mm)	D _i (mm)	D _o (mm)	W (mm)	S (mm)
	GFRP W _w	12	11.8	12	1	7.3
	GFRP R	6	5.1	6	2	4.1
		8	7.2	8	2	5.6
		12	11.2	12	2	6.1
	GFRP WO	8	8.1	8.9	2.5	6.1
		12	12.3	13.3	2.5	5.6
	GFRP S _f	6	6	6.25	-	-
		8	8	8.2	-	-
		12	12	12.4	-	-
	CFRP S _f	6	6	6.2	-	-
		8	8	8.2	-	-
		12	12	12.2	-	-
	CFRP S _c	6	6	6.4	-	-
	BFRP W _w +S _c	8	7.1	7.4	1	7.6
		12	11.6	12	1	7.6
	Çelik R	8	-	-	-	-
		12	-	-	-	-
W_w : Geniş aralıklı sıkı sargılı (Widely-spaced and tight wrapping) WO : Oluklu(Wound) R : Nervürlü (Ribbed) S_c : Kaba taneli kumlanmış (Coarse sand coated) S_f : İnce taneli kumlanmış (Fine sand coated)						

ASTM D7205-D7205M-16 [121] standardına göre FRP donatıların çekme testlerinde kullanılan donatı boyları 6 ve 8 mm çapındaki donatı için 980 mm, 12 mm çapındaki donatı için 1140 mm ve başlık çapları ise sırasıyla 35 mm ve 42 mm'dir. Ancak mevcut laboratuvar koşullarında kullanılan evrensel çekme makinesi (UTM) en fazla 800 mm uzunluğunda donatı numuneleri test edilebilmektedir. UTM kafaları arasındaki mesafenin bu şekilde sınırlı olması, numunelerin deneylerde başlıklardan sıyrılması sonucunu doğurmaktadır. Bu sebeple donatı çekme deneyleri yapılamamıştır. Ayrıca, FRP donatıların ülkemizde yaygın olmaması ve özel laboratuvarlar FRP donatıların çekme testi hizmetini vermemesinden dolayı FRP donatıların çekme testleri yapılamamıştır. Bu nedenle FRP donatıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde üretici firmaların katalog verilerindeki değerler kullanılmak zorunda kalınmıştır. Buna ilaveten FRP donatıların mekanik özellikleri Çizelge 2.15'de belirtilmiştir.



Şekil 2.14. FRP donatı çekme numunesi

Çizelge 2.15. FRP donatıların mekanik özellikleri

Donatı Türü	Lif Türü	Reçine Türü	Hacimce Lif İçeriği (%)	Yoğunluk (Mg/m ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
GFRP_{Sf}	E-glass	Vinilester	>65	1.80	>1000	>38
CFRP_{Sf}	Tenax STS40	Vinilester	>65	1.51	>2080	>145
GFRP_{WO}	E-CR glass	Vinilester	>75	2.2	>1000	>63.5
GFRP_R	Glass	Epoksi	-	-	>800	>50
BFRP_{W_w+S_c}	Basalt	-	-	2.0	>800	>55
GFRP_{W_w}	Glass	Vinilester	-	-	>600	>45
CFRP_{S_c}	Carbon	-	-	-	>1180	>150

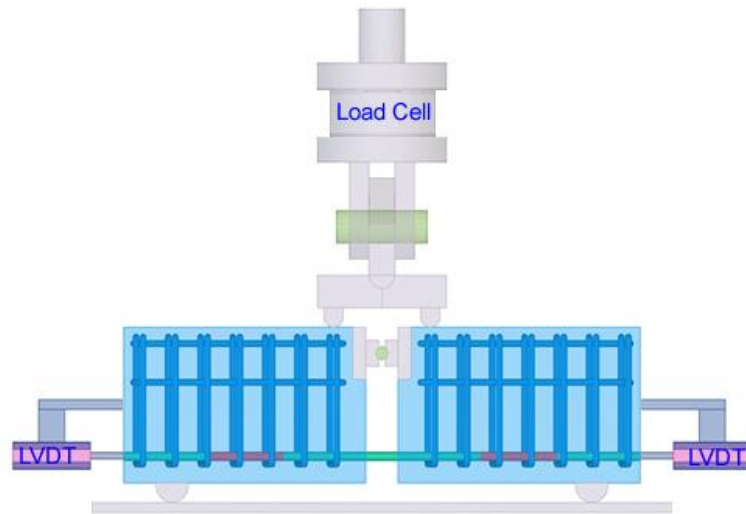
2.6. Deney Prosedürü

BFRP, CFRP, GFRP ve çelik donatı çeşitleriyle hazırlanan toplam 90 adet mafsallı deney kirişi, Amasya Üniversitesi İnşaat Laboratuvarı'nda test edilmiştir.

Mafsallı deney kirişleri, Amasya Üniversitesi Makine Laboratuvarı'nda bulunan 600 kN basma kapasitesine sahip olan pres makinesinde bazı düzenlemeler yapıldıktan sonra (Bölüm 2.4.6) geçici bir süreliğine İnşaat Laboratuvarına taşınmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu düzenlemeler, 4 noktalı eğilme deneyinin kiriş üzerindeki basma kiriş aparatını, presin yere ankrajlanmasını ve kirişin oturacağı mesnet aparatlarını kapsamaktadır. Bu işlemler Şekil 2.15'de açık gri renkli olarak gösterilmiştir.

Deney numuneleri 2 adet hareketli mesnet üzerine yerleştirilerek sistemin basit kiriş gibi davranması sağlanmıştır. Mesnetlerden biri sabit mesnet seçilmemiş her iki uçta da hareketli mesnet kullanılmıştır. Bunun sebebi, her iki kiriş yarısının da tamamen simetrik olarak test edilmesini temin etmektir. Buna ilaveten yükleme aparatında 3 boyutlu mafsallı kullanılmıştır. Ayrıca, yükleme yapılan mesnetlerin beton ile temas ettiği noktalarda betonun ezilmemesi için kauçuk plakalar kullanılmıştır. Bu sayede yükleme mafsallı betonda yuva oluşturmadığı için hareketi engellenmemiştir.



Şekil 2.15. Deney düzeneği

Mafsallı kiriş numunelerinde donatı sıyrılmalarının ölçülebilmesi için donatı uçlarında çapraz olarak yerleştirilen 2 adet doğrusal potansiyometre kullanılmıştır (Şekil 2.15). Potansiyometreler, basit mesnetli kirişlerin yükleme anındaki sehimlerden etkilenmemeleri için hazırlanan aparatlar sayesinde kiriş bloklarına sabitlenmişlerdir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Potansiyometrelerin kirişe sabitlenmesi

Deneylerde kirişlere uygulanan kuvvetler, 200 kN kapasiteye sahip yük hücresi (Load Cell) ile ölçülmüştür. Hem yük hücresindeki hemde potansiyometrelerdeki gerilim değişimleri, 16 bit yüksek çözünürlüklü bir veri toplama (data logger) sistemi aracılığı ile bilgisayara her 0.5 saniyede bir aktarılarak kaydedilmiştir.

2.7. Deney Verilerinden Aderans Gerilmesinin Tespiti

Deney sırasında deney kirişlerine uygulanan kuvvet (F_a) neticesinde donatı ile beton arasında oluşan ortalama aderans gerilmeleri Eşitlik 2.10 ile hesaplanmıştır. Eşitlik 2.10'un elde edilmesinde kullanılan bağıntılar da aşağıda sunulmuştur.

n =boyuna donatı sayısı; a =Pas payı (mm); A_r = boyuna donatı alanı (mm²); f_r =donatıda oluşan çekme gerilmesidir (N/mm²).

2.8. Aderans Gerilmesi ve Kenetlenme Boyu Bağıntısının Tespiti

Aderans gerilmesi ve kenetlenme boyu bağıntısının tespitinde çoklu doğrusal regresyon analizinden yararlanılmıştır.

2.8.1. Regresyon analizi

Regresyon analizi, bağımlı değişken ile bir veya daha fazla sayıda bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla sıklıkla kullanılan istatistiksel bir analiz yöntemidir. Bu ilişki modellenerek bağımlı değişkenin gelecekteki durumunun kestirilebilmesi amaçlanmaktadır. Regresyon analizinde bir tek bağımsız değişkenin kullanılması durumunda bu analize tek değişkenli (basit) regresyon analizi, birden fazla bağımsız değişkenin kullanılması durumunda ise, çok değişkenli regresyon analizi olarak isimlendirilir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi betimleyen matematiksel eşitlik regresyon modeli olarak adlandırılmaktadır. Doğru denklemiyle ifade edilen modeller doğrusal regresyon modelleri, diğerleri doğrusal olmayan regresyon modelleri olarak sınıflandırılmaktadır.

2.8.2. Çoklu Doğrusal Regresyon

Çoklu regresyon analizi, iki ya da daha çok bağımsız değişkene dayalı olan bağımlı değişkenin tahmin edilmesine olanak sağlayan regresyon modelidir. Çoklu doğrusal regresyon analizine ait matematiksel model, n tane bağımsız değişken için Eşitlik 2.11'de verilmektedir.

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2.11)$$

Burada, y =bağımlı değişken; a =doğrunun y eksenini kestiği nokta; b =bağımsız değişken katsayıları; x =bağımsız değişkenlerin değerleridir.

2.8.3. Veri tabanı tanımlamaları ve parametre aralıkları

Çalışmada, aderans gerilmesinin tespiti için kullanılan veriler iki kısımdan oluşmaktadır. Veri tabanında birinci kısım, bu çalışmadan elde edilen 51 adet mafsallı kiriş verisinden oluşmaktadır. Veri tabanında ikinci kısım ise, literatürde FRP donatı-beton aderansını belirlemek için yapılan 134 adet mafsallı kiriş deneyinden derlenmiştir [31,60,64,66,122–125]. Oluşturulan veri tabanı toplam 185 adet mafsallı kiriş deneyi içermektedir (Çizelge B.2).

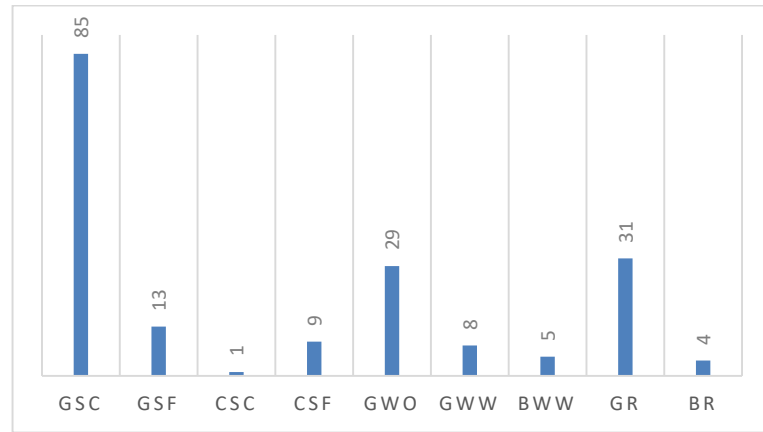
Veri tabanında kullanılan literatürden derlenen deneysel çalışmalar ile hem deney sayısı önemli miktarda artırılmış hem de veri tabanındaki parametre aralıkları genişletilerek daha geniş içerikli bir aderans bağıntısı tespit edebilmek amaçlanmıştır. Ancak literatürden derlenen deneysel çalışmalarda kullanılan betonların mekanik özellikleri farklıdır. Deneylerde kullanılan betonlar arasında, kendiliğinden yerleşen beton, lif katkılı beton, ECC beton mevcuttur. Ayrıca beton numune boyutları da farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıkları en aza indirebilmek için dönüşüm bağıntıları kullanılarak, bu numuneler tek bir beton ve boyut türüne çevrilerek veri tabanına işlenmiştir. Bu dönüşüm bağıntıları ve dönüştürme işlemleri Bölüm 2.8.4’de sunulmuştur.

Regresyon analizinde kullanılacak veri tabanı yapılan deneylerle ilgili birçok değişken barındırmaktadır. Bu parametreler, beton silindir basınç dayanımı (f_{cy}), betonun yarmada çekme dayanımı (f_{tsp}), donatı gömülme derinliği (l_e), donatı lif türü (bazalt, cam, karbon), donatı yüzey özelliği (nervürlü, sargılı, oluklu, kumlanmış, sargılı+kumlanmış), donatı anma ve dış çapı (d_b , d_{bo}), donatı elastisite modülü (E_{FRP}), donatı çekme dayanımı (f_{FRP}), donatı alt ve yan pas payı (C , C_s), donatı aralığı (C_{ccsb}), kirişlerdeki etriye varlığı (T), maksimum aderans gerilmesi (u_{max}), kiriş göçme şekli (F_{mode}) değişkenleridir. Bu parametrelerin veri tabanındaki aralıkları Çizelge 2.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.16. Veri tabanında bulunan değişkenlerin ve çıktılarının aralıkları

Mafsallı Kiriş Deneyleri				
Değişkenler	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
f_{cy} (MPa)	17.26	174.50	64.20	44.55
f_{tsp} (MPa)	2.33	10.00	5.50	2.31
l_e (db)	2.50	20.00	6.87	12.80
Yüzey Özellikleri	*	*	*	*
Tür	**	**	**	**
d_b (mm)	6.00	25.40	13.47	4.67
d_{bo} (mm)	6.00	25.40	14.26	5.06
E_{FRP}	38	150	57.80	23.02
f_{FRP}	600	2080	1088.95	349.16
C/d_b	1.33	6.25	3.16	0.95
C_s/d_b	-	-	-	-
C_{ccsb}	-	-	-	-
T	0	1	-	-
u_{max} (MPa)	5.04	27.50	14.68	5.06

Veri tabanında, kullanılan ve Çizelge 2.16’da gösterilen deney değişkenlerinden yüzey özellikleri* geniş aralıklı sıkı sargılı için W_w , oluklu için W_O , nervürlü için R , ince taneli kumlanmış için S_f , kaba taneli kumlanmış için S_c ve geniş aralıklı sıkı sargılı +kumlanmış için W_w+S_c sembolleri ile gösterilmişlerdir. Donatı türleri** olan BFRP, CFRP, GFRP ise sırasıyla B, C, G ve S sayısal değerleri ile gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Veri tabanında kullanılan FRP donatıların lif türüne ve yüzey özelliğine göre sayıları

2.8.4. Beton dayanımı dönüşüm bağıntıları

Betonun silindir basınç dayanımından yarmada çekme dayanımının belirlenmesi

Arioğlu vd. [126] yaptıkları çalışmada, betonun yarmada çekme dayanımı belirleyebilmek için Eşitlik 2.12'yi önermişlerdir.

$$f_{tsp} = 0.387f_{cy}^{0.63} \quad (2.12)$$

Burada, f_{tsp} =betonun yarmada çekme dayanımı (MPa), f_{cy} =Ø150x300 mm silindir beton numunesinin 28 günlük basınç dayanımıdır (MPa). $4 \leq f_{cy} \leq 120$ MPa arasındadır.

Ø150x300 mm silindir numune basınç dayanımının, 150 mm küp numune basınç dayanımına dönüştürülmesi

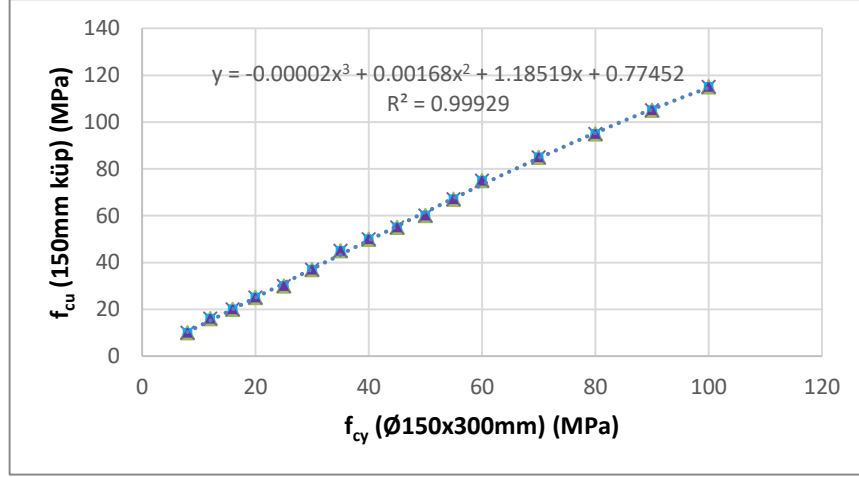
EN 206 [127], betonun silindir basınç dayanımı ve küp basınç dayanımı arasında Çizelge 2.17'de belirtilen dönüşümleri tavsiye etmiştir. Bu çalışmada, Çizelge 2.17'den yararlanılarak basit regresyon analizi ile dönüşüm bağıntısı (Eşitlik 2.13) elde edilmiştir.

Çizelge 2.17. EN 206'da [127] tavsiye edilen silindir numune basınç dayanımı-küp numune basınç dayanımı ilişkisi

F_{cy} (MPa)	8	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
F_{cu} (MPa)	10	16	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	115

$$f_{cu} = -0.00002f_{cy}^3 + 0.00168f_{cy}^2 + 1.18519f_{cy} + 0.77452 \quad (2.13)$$

Burada, f_{cu} =150 mm küp beton numunesinin basınç dayanımı (MPa), f_{cy} =Ø150x300 mm silindir beton numunesinin 28 günlük basınç dayanımıdır (MPa). $8 \leq f_{cy} \leq 100$ MPa arasındadır.



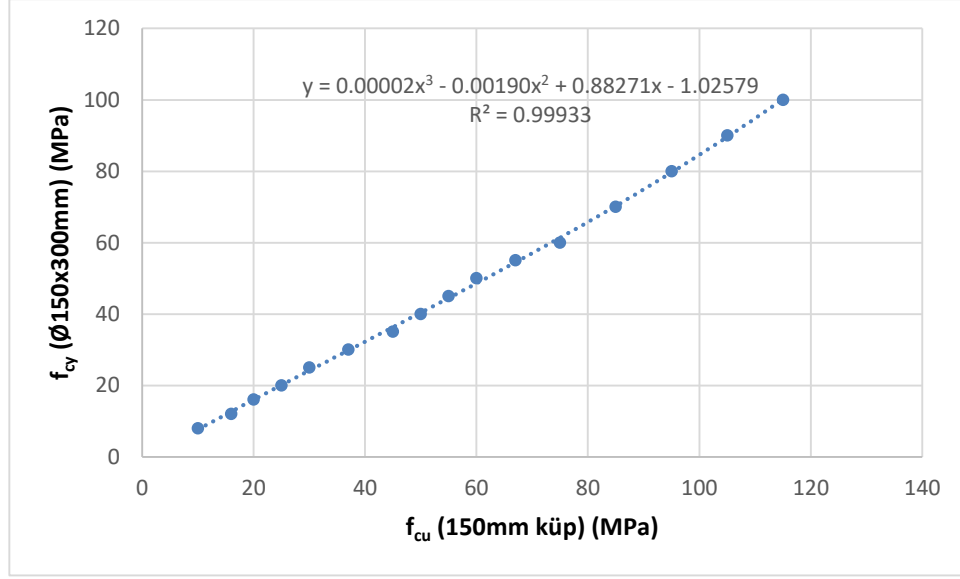
Şekil 2.19. Silindir numune basınç dayanımı-küp numune basınç dayanımı ilişkisi

150 mm küp numune basınç dayanımının, Ø150x300 mm silindir numune basınç dayanımına dönüştürülmesi

EN 206 [127], betonun silindir basınç dayanımı ve küp basınç dayanımı arasında Çizelge 2.17’de belirtilen dönüşümleri tavsiye etmiştir. Bu çalışmada, Çizelge 2.17’den yararlanılarak basit regresyon analizi ile dönüşüm bağıntısı (Eşitlik 2.14) elde edilmiştir.

$$f_{cy} = 0.00002f_{cu}^3 - 0.00190f_{cu}^2 + 0.88271f_{cy} - 1.02579 \quad (2.14)$$

Burada, f_{cy} =Ø150x300 mm silindir beton numunesinin basınç dayanımı (MPa), f_{cu} =150 mm küp beton numunesinin 28 günlük basınç dayanımıdır (MPa). $10 \leq f_{cu} \leq 115$ MPa arasındadır.



Şekil 2.20. Küp numune basınç dayanımı-silindir numune basınç dayanımı ilişkisi

Ø150x300 mm silindir numune basınç dayanımının, Ø100x200 mm silindir numune basınç dayanımına dönüştürülmesi

Literatürde yapılan çalışmalarda, Ø150x300 mm silindir beton basınç dayanımının, Ø100x200 mm silindir beton basınç dayanımına eşdeğer olarak kullanılabileceği belirtilmektedir [128,129].

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ile normal betonun yarmada çekme dayanımı ilişkisi

Bu çalışmada, FRP donatı-beton aderansındaki bağıntının tespitinde değişken olarak betonun yarmada çekme dayanımı kullanıldığı için, KYB beton ile normal beton arasındaki yarmada çekme dayanımı ilişkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla literatürde yapılan çok fazla çalışma olmamasına karşın, yapılan bir araştırmada KYB betonun, normal beton ile aynı yarmada çekme dayanımına sahip olduğu belirtilmektedir [130].

Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin (ECC) yarmada çekme dayanımı

Veri tabanında kullanılmış geçmiş deneylerden bazılarında ise ECC kullanılmıştır. ECC kullanılan çalışmada [122], ECC ve normal betonların eğilmede çekme dayanımları sırasıyla 6.7 ve 4.7 MPa'dır. Silindir basınç dayanımları ise 57 ve 63 MPa'dır. Ancak, literatürde, silindir numune dayanımı verileri kullanılarak, ECC'lerin yarmada çekme dayanımlarının belirlenebilmesi için herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle ECC'lerin yarmada çekme dayanımları tespit edilirken aşağıdaki yol izlenmiştir.

ECC'lerin silindir basınç dayanımları, normal betonlarda yarmada çekme dayanımı dönüşüm bağıntısı kullanılarak, yarmada çekme dayanımına dönüştürülmüştür. Daha sonra ise ECC'nin normal betonun eğilmede çekme dayanımına oranı olan 1.43 katsayısı ile çarpılmıştır.

Çelik lif katkılı betonun küp dayanımından yarmada çekme dayanımının belirlenmesi

Thomas ve Ramaswamy [131], yaptığı çalışmasında, çelik lif katkılı betonun küp dayanımından yarmada çekme dayanımının belirlenebilmesi amacıyla Eşitlik 2.15'i önermiştir.

$$f_{tsp} = 0.63f_{cu}^{0.5} + 0.288f_{cu}^{0.5}RI + 0.052RI \quad (2.15)$$

Burada, f_{tsp} =betonun yarmada çekme dayanımı (MPa), f_{cu} =150 mm küp normal beton numunesinin 28 günlük basınç dayanımı (MPa), RI=lif güçlendirme etkisi ($V_f L_f / \emptyset_f$), V_f =hacimce lif oranı, L_f =lif uzunluğu (mm), $\emptyset_f$ =lif çapı (mm).

2.8.5. Çalışmada kullanılan hata ölçütleri

Çalışmada kullanılan yöntemlerin performanslarını değerlendirmek için r, R^2 , MAPE, RMSE gibi istatistiksel değerlendirme ölçütleri kullanılmıştır. Çalışmada deneysel

aderans değerleri ile modellerden elde edilen tahmini aderans değerleri arasındaki ilişkinin varlığını, yönünü ve şiddetini ölçmek maksadı ile korelasyon analizi yapılmıştır (Eşitlik 2.16).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.16)$$

Burada, r = değişkenler arasındaki ilişki düzeyi (Pearson korelasyon katsayısı) (- 1 ise mükemmel negatif doğrusal ilişki; 0 ise ilişki yok; +1 ise mükemmel pozitif doğrusal ilişki); x_i = x i'inci değeri; $\bar{x}$ = x verilerinin ortalaması; y_i = y i'inci değeri; $\bar{y}$ = y verilerinin ortalaması; n =deney sayısıdır.

Çalışmada bağımsız değişkenler olan aderansı etkileyen değişkenlerin, bağımlı değişken olan aderansdaki değişimin yüzde ne kadarını tanımlayabildiğini gösterebilmek için ise tanımlayıcılık katsayısı “ R^2 ” kullanılmıştır. R^2 , korelasyon katsayısının (r) karesidir ve bu katsayı 1 değerine ne kadar yakın ise bağımsız değişkenler bağımlı değişkenleri o kadar iyi tanımlar.

Deneyssel aderans değerleri ile modellerden elde edilen tahmini aderans değerleri arasındaki hataları yüzdesel olarak gösterebilmek maksadı ile Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error-MAPE) istatistiği kullanılmıştır (Eşitlik 2.17).

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_f - y_e}{y_e} \right| \quad (2.17)$$

Burada, y_f =Tahmin edilen değerler; y_e =deneysel değerler; n =deney sayısıdır.

Deneyssel aderans değerleri ile modellerden elde edilen tahmini aderans değerleri arasındaki hataların ortalama büyüklüğünü ölçmek için Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü (Root Mean Square Error-RMSE) istatistiği kullanılmıştır (Eşitlik 2.18).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_f - y_e)^2} \quad (2.18)$$

Burada, y_f =Tahmin edilen değerler; y_e =deneysel değerler; n =deney sayısıdır.



3. DENEYSEL SONUÇLAR VE GÖZLEMLER

Bu çalışma kapsamında yapılmış, BFRP, CFRP, GFRP ve çelik donatı çeşitleriyle hazırlanmış toplam 90 adet mafsallı kirişin aderans deneyinin sonuçları bu bölümde değişken bazlı olarak değerlendirilmektedir. Ancak bazı deney sonuçlarının betonda oluşan segregasyondan etkilenmiş olabileceği düşüncesiyle sadece 68 deney sonucu analizlerde ve karşılaştırmalarda kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında hazırlanan mafsallı kiriş deneylerinde kullanılan isimlendirmelerin tanımları Bölüm 2.2’de verilmektedir. Buna ilaveten Bölüm 2.3 içinde Çizelge 2.2- 2.8’de yapılan deneysel çalışmaların listeleri sunulmaktadır.

Yapılan mafsallı kiriş deneylerinden elde edilen deneysel sonuçları ve bu sonuçları etkileyen deney değişkenleri Çizelge B.1’de sunulmaktadır. Ayrıca bu bölümün alt başlıkları içinde (aderansı etkileyen parametreler) deneysel tüm sonuçlara yer verilerek parametreler kendi içlerinde yüzey özelliklerine göre gruplandırılarak incelenmiştir.

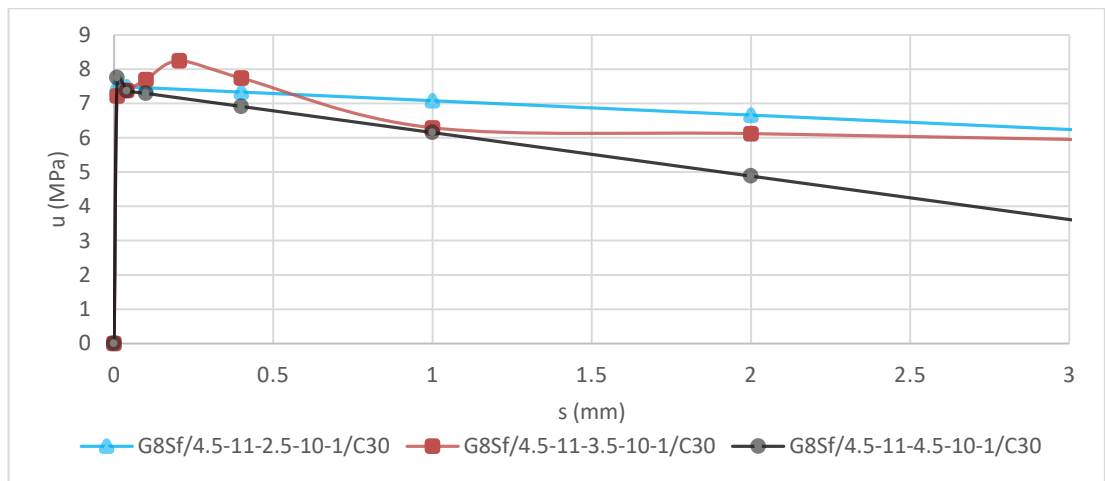
3.1. Alt pas payının aderansa etkisi

Bu çalışmada alt pas payının, FRP donatı-beton arasındaki aderans dayanımına ve donatı-beton arasında oluşacak göçme şekillerine etkisinin araştırılabilmesi amacıyla 14 adet mafsallı kiriş deneyi yapılmıştır. Bu kapsamda 8 mm anma çapına sahip boyuna donatılar kirişlere, $2.5d_b$ (20 mm), $3.5d_b$ (28 mm) ve $4.5d_b$ (36 mm) pas payı kalınlıklarında yerleştirilmiştir. Ancak bu bölüm kapsamındaki tüm deney grafiklerinin karşılaştırılmasında gerçek pas payı uzunlukları donatı gerçek dış çaplarına (D_o) bölünerek pas payları donatı çaplarına göre normalleştirilmiştir. Deney kirişlerinin donatı detayları Şekil 2.2’de gösterilmiş olup ölçülendirilmeleri ise Çizelge 2.6’da belirtilmiştir.

Alt pas payı kalınlığındaki değişimlerin aderansa etkisi, her donatı türü için ayrı ayrı gruplandırılmış aderans gerilmesi ve sıyrılma grafikleri esas alınarak belirlenmiştir. Ayrıca alt pas payının aderansa etkisi donatı türüne göre değil, bölüm sonunda tüm donatı türleri dikkate alınarak yorumlanmıştır.

3.1.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler

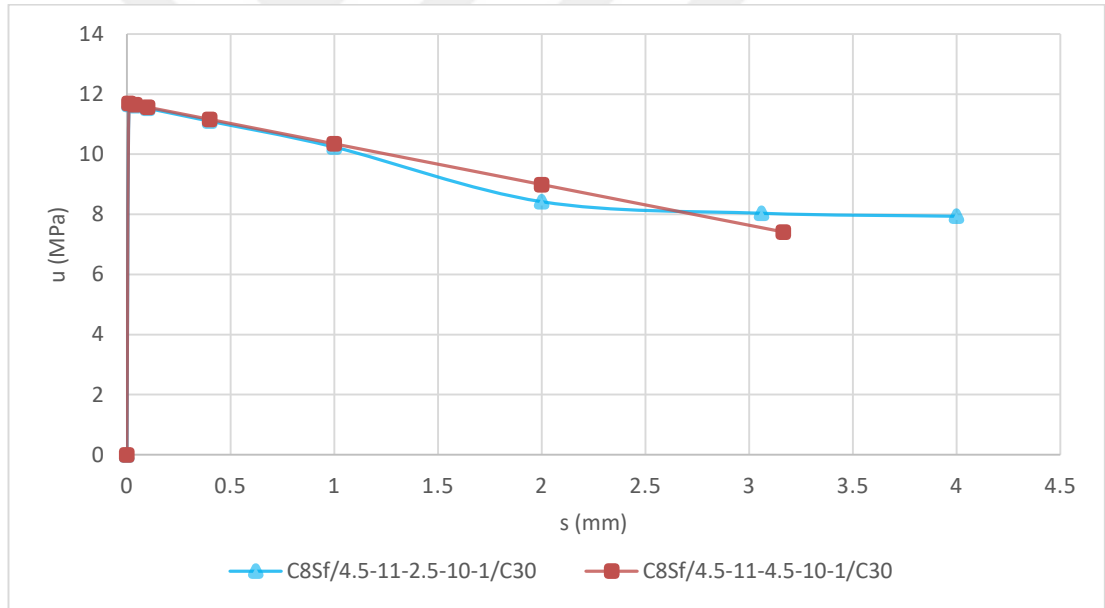
İnce taneli olarak kumlanmış GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri $2.5d_b$, $3.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip numunelerde sırasıyla 7.50, 7.22 ve 7.75 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.1’den de anlaşılaçağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında kirişlerin rijitliklerinin pas payının artmasıyla artmadığı anlaşılmaktadır. Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise $2.5d_b$ pas payına sahip kirişin aderansında herhangi bir değişkenlik olmazken $3.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip olan kirişlerin aderans gerilmelerinin sırasıyla 8.24 ve 7.75 MPa değerlerine çıktığı görülmektedir. Ancak bu artış miktarının sınırlı olması ve pas payının artışıyla aderans artışının küçülmesi, bu artışın donatının kumlama kalitesi ve homojenliği ile alakalı olduğunu ve deney sonuçlarının bu etkiyi tam olarak yansıtmadığı fikrini doğurmuştur. Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesinin yavaş yavaş azalması, kumlamadan dolayı oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisinden kaynaklandığı gözlenmiştir.



Şekil 3.1. Alt pas payı değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.1.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler

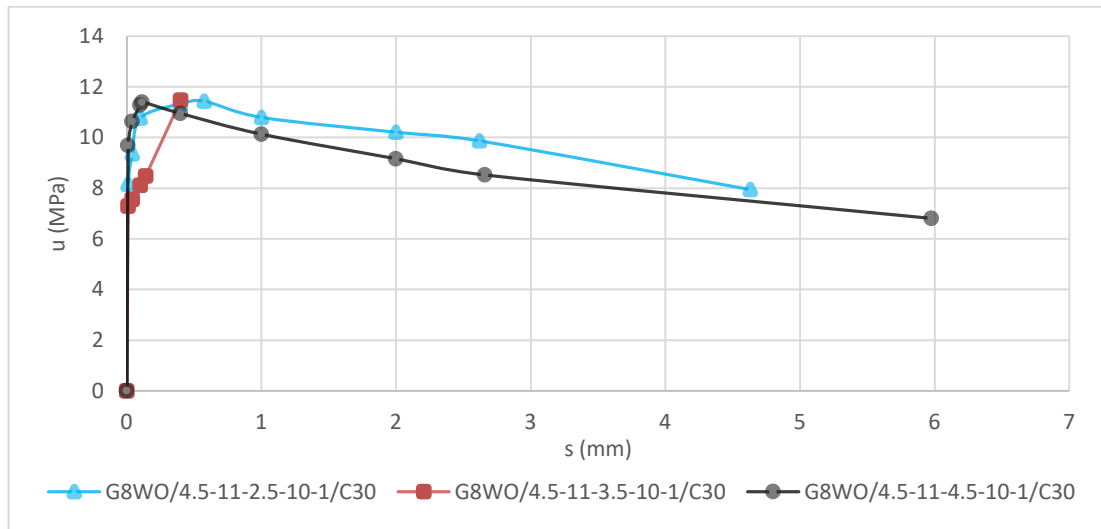
İnce taneli olarak kumlanmış CFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri $2.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip numunelerde sırasıyla 11.66 ve 11.69 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değerler aynı zamanda donatılarda oluşan maksimum aderans gerilmesi değerleridir. Pas payının artmasıyla kirişin ilk rijitlik değerlerinde ve aderans gerilmesi değerlerinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesinin yavaş yavaş azalması, kumlamadan dolayı oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisinden kaynaklandığı gözlenmiştir. Hem $2.5d_b$ hemde $4.5d_b$ pas payına sahip kirişlerde maksimum yük değerlerinden sonra benzer aderans göçmesi (sıyrılma göçmesi) gerçekleşmiş ve Şekil 3.2’den de anlaşılacağı üzere benzer düşüş eğilimi oluşmuştur.



Şekil 3.2. Alt pas payı değişimine göre ince taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.1.3. Oluklu GFRP donatılı kirişler

Oluklu GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 2.5d_b, 3.5d_b ve 4.5d_b pas payına sahip numunelerde sırasıyla 8.16, 7.29 ve 9.69 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.3'ten de anlaşılabacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında pas payının 2d_b kadar artmasıyla kirişlerin rijitliklerinde 2.53 MPa'lık bir artış olmaktadır. Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 11.43, 11.47 ve 11.39 MPa olarak tespit edilmiştir. Donatı sıyrılması 0.01 mm'yi geçtiği anda aderans gerilmesi-sıyrılma eğrisinin doğrusallığı bozulmuştur. Bu sıyrılma değeri ile maksimum adersana karşılık gelen sıyrılma değeri arasında önemli fark olmuştur. Bu durum, oluklu donatılarda oluklar arasına giren betonun zamanla olukların ezilmesine sebep olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda bu ezilme sırasında donatıdaki aderans gerilmesi maksimum değerlerine çıkmaktadır. Ancak 2.5d_b ve 3.5d_b pas paylarına sahip numunelerde ölçülen maksimum aderans gerilmesi değerlerinin yakın olması, pas payının aderans gerilmesine etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Hatta 4.5d_b pas payına sahip kirişin maks. aderans gerilmesi değerleri pas payının ciddi miktarda artmasına rağmen diğer iki kirişe nazaran çok daha küçük çıkmıştır. Bu durum kısa aderans boylarına sahip aderans deneylerinde betonun donatıyla temas ettiği noktalarda betonun homojenliğinin belirsizliği ile açıklanabilir.

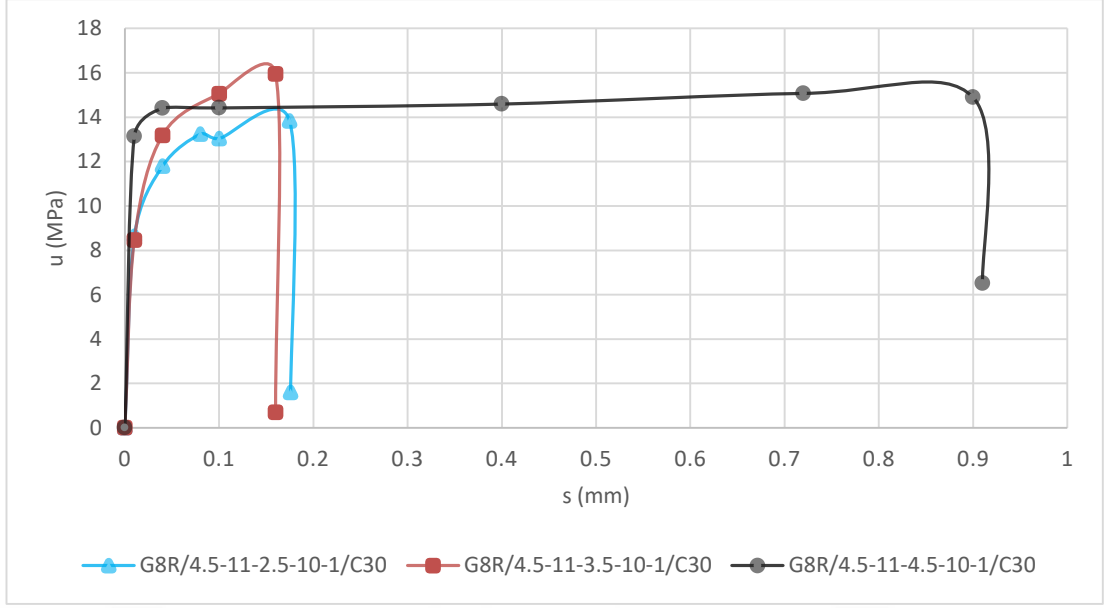


Şekil 3.3. Alt pas payı değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Bu donatı çubuklarında maksimum aderans gerilmesine ulaşıldıktan sonra aderans gerilmesi yavaş yavaş azalmaktadır. Bu yavaş azalma, oluklu donatıların oluklar arasında kalan yüzeylerinde gelişen sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. 3.5d_b pas payına sahip kirişin maksimum aderansdan sonraki sıyrılma değerleri ise, kirişe bağlı potansiyometrenlerin bağlı olduğu yerden çıkmasından dolayı ölçülememiştir.

3.1.4. Nervürlü GFRP donatılı kirişler

Nervürlü GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 2.5d_b, 3.5d_b ve 4.5d_b pas payına sahip numunelerde sırasıyla 8.64, 8.46 ve 13.14 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.4'den de anlaşılabileceği üzere 0.01 mm sıyrılma anında pas payının 2.5d_b'den 3.5d_b'ye çıkarılması ile kirişlerin rijitliklerinin artmadığı gözlemlenmiştir. Ancak 4.5d_b pas payına sahip kirişin rijitliği diğer modellere göre bir hayli fazladır. Belki de rijitliği etkileyen bu fazlalık donatıyı saran nervürlerin donatıya yapışma rijitliği ya da donatının beton ile temas eden noktalarındaki ezilmelerinden kaynaklanabilmektedir. Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 13.82, 15.95 ve 15.08 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.4'den de görüldüğü üzere 2.5d_b alt pas payının 3.5d_b ve 4.5d_b'ye çıkarılmasıyla maksimum aderans gerilme değerleri sırasıyla 2.13 ve 1.26 MPa artmıştır. Ancak 4.5d_b pas payına sahip kirişin maksimum aderans gerilmesi değeri, 3.5d_b pas payına sahip kirişten düşük çıkmıştır. Bu durum kısa aderans boylarına sahip aderans deney kirişlerinde betonun donatıyla temas ettiği noktalarda betonun homojenliğinin belirsizliği ile açıklanabilir.

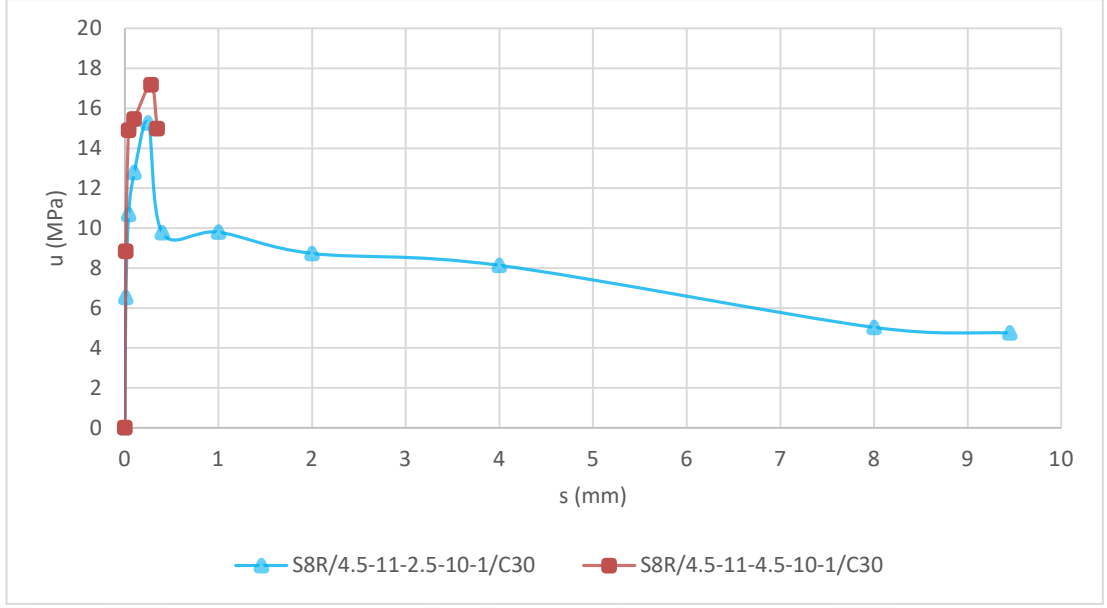


Şekil 3.4. Alt pas payı değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Nervürlü GFRP donatılarda aderans göçmesi, donatıyı saran nervürlerin ani bir şekilde kırılması ile ortaya çıkmıştır. Ancak göçme anındaki sıyrılma donatılardaki nervürlerin beton tarafından ezilmesine bağlı olarak ortaya çıkmıştır.

3.1.5. Çelik donatılı kirişler

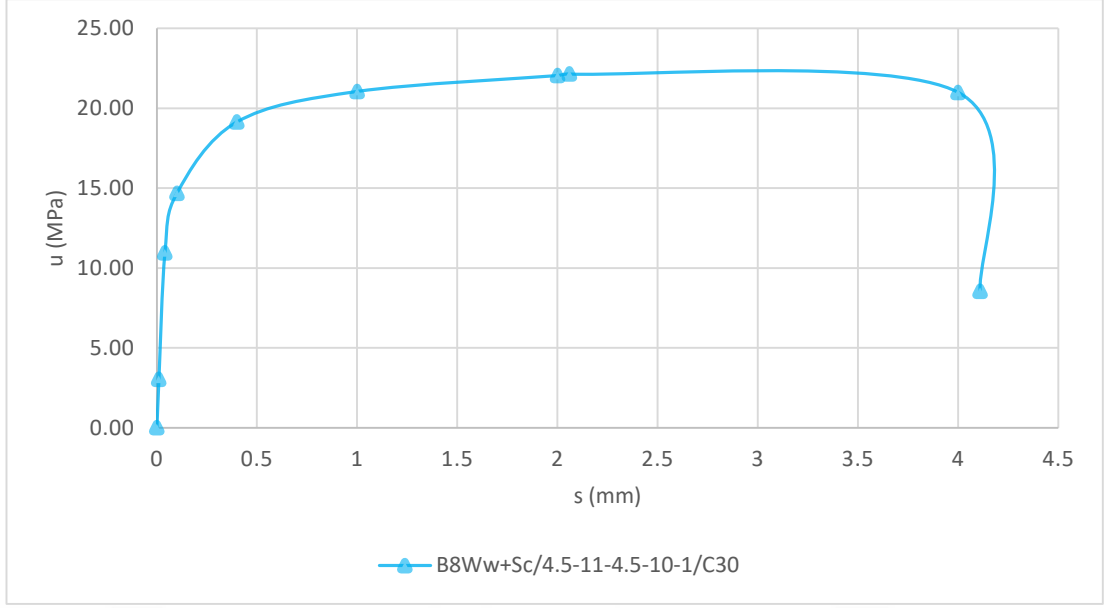
Nervürlü çelik donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri $2.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip numunelerde sırasıyla 6.53 ve 8.84 MPa olarak ölçülmüştür. Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 15.28 ve 17.18 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.5'den de görüldüğü üzere, pas payının $2.5d_b$ 'den $4.5d_b$ 'ye artırılması aderans gerilmesinde 1.90 MPa'lık bir artış sağlamıştır. Bu artış $4.5d_b$ pas payına sahip numunede çelik donatının aktıktan sonra pekleşmesiyle donatı aderans gerilmelerinin daha da artmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca bu durum sıyrılmanın da sabit kalmasına neden olmuştur. $2.5d_b$ pas payına sahip numunede ise sıyrılma göçmesi oluşmuştur.



Şekil 3.5. Alt pas payı değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.1.6. İri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı kirişler

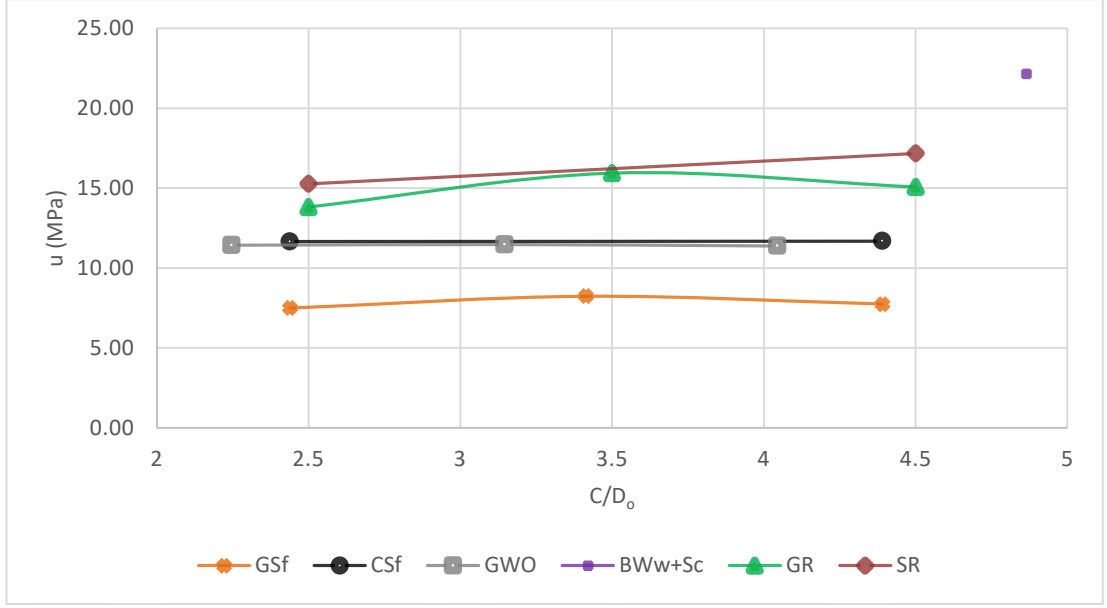
Bu bölümde alt pas payının iri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı mafsallı kirişlerin aderans davranışına etkisi incelenmemiş olup sadece 4.5d_b pas payına sahip diğer donatılı kirişler ile aderans gerilmesi-sıyrılma diyagramlarının karşılaştırılması maksadı ile verilmiştir. Aderansın bu denli yüksek çıkması iki gerekçeyle açıklanabilir. Birincisi, BFRP donatının iri taneli kumlama yüzeye sahip olmasından dolayı sürtünme mekanizmasından ziyade mekanik kilitlenme ile aderansın aktarılmasıdır. İkincisi, donatının çevresindeki sıkı sargıdan dolayı oluşan yüzey bombeleşmeleri mekanik kilitlenme ve yüzey sürtünme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır. Aderansın ani olarak düşmesi ise iri taneli kumlanmış yüzeyin kırılmasından ötürü kaynaklanmıştır.



Şekil 3.6. Alt pas payı değişimine göre sargılı ve iri taneli kumlanmış BFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.1.7. Alt pas payının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması

Şekil 3.7’den de görüleceği üzere $2.5d_b$ pas payı kalınlığından büyük pas payı kalınlıklarında pas payının FRP donatı-beton aderansına etkisi çok sınırlı kaldığından $2.5d_b$ pas payı kalınlıklarından sonra hem göçme tipi hemde aderans gerilmesi değerlerinin etkilenmediğini söylemek mümkündür. Benzer sonuçları İslam vd. [50] de gözlemlemişler ve çalışmalarında $2.5d_b$ üzeri pas payı kalınlıklarında gözle görülür bir aderans artışının olmadığını belirtmektedirler.



Şekil 3.7. Alt pas payı değişimine göre farklı türdeki donatıların maksimum aderans gerilmelerinin karşılaştırılması

Ancak çelik donatılı kirişlerde pas payının $2.5d_b$ 'den $4.5d_b$ 'ye çıkarılması ile donatı-beton aderansının tam olarak sağlanması neticesinde, donatıda sıyrılmanın önlenmesi ile donatılar akma gerilmesine ulaşmışlardır. Bu nedenle küçükde olsa bir aderans artışından (%12.6) söz edilebilmektedir.

Alt pas payının aderansa etkisi donatı türlerine göre karşılaştırıldığında $4.5d_b$ pas payları içinde en iyi aderans performansını iri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatı sergilemiş ve çelik donatı-beton aderansının %129'u fazla aderans performansı göstermiştir. Aderansın bu denli yüksek çıkması iki gerekçeyle açıklanabilir. Birincisi, BFRP donatının iri taneli kumlama yüzeye sahip olmasından dolayı sürtünme mekanizmasından ziyade mekanik kilitlenme ile aderans gerilmesinin aktarılmasıdır. İkincisi, donatının çevresindeki sıkı sargıdan dolayı oluşan yüzey bombeleşmeleri mekanik kilitlenme ve yüzey sürtünme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır. Nervürlü GFRP donatı-beton aderansı, çelik donatı-beton aderansına benzer olarak mekanik kilitlenme neticesinde gerçekleştiği için bu donatıların aderans gerilmesi değerleri, çelik donatı-beton aderansına yakın çıkmaktadır. $2.5d_b$ ve $4.5d_b$ yan pas

payına sahip Nervürlü GFRP donatılı numunelerin maksimum aderans gerilmeleri, çelik donatılı numunelerin aderansının %90'ı ve %88'idir.

Diğer donatılı numunelerde aderans gerilmesi aktarılırken mekanik kilitlenmeden ziyade sürtünme mekanizması ile aderans gerilmesi aktarılmıştır. Bu nedenle, bu donatılar ile oluşturulan numunelerin aderans gerilmesi değerleri çelik donatı-beton aderans gerilmesi değerlerinden düşüktür. 2.5d_b ve 4.5d_b pas paylarına göre ince taneli kumlanmış CFRP donatılar, çelik donatı-beton aderansının %76'sı ve %68'i, oluklu GFRP donatılar %75'i ve %66'sı, ince taneli kumlanmış GFRP donatılar ise %49'u ve %45'idir.

3.2. Yan pas payının aderansa etkisi

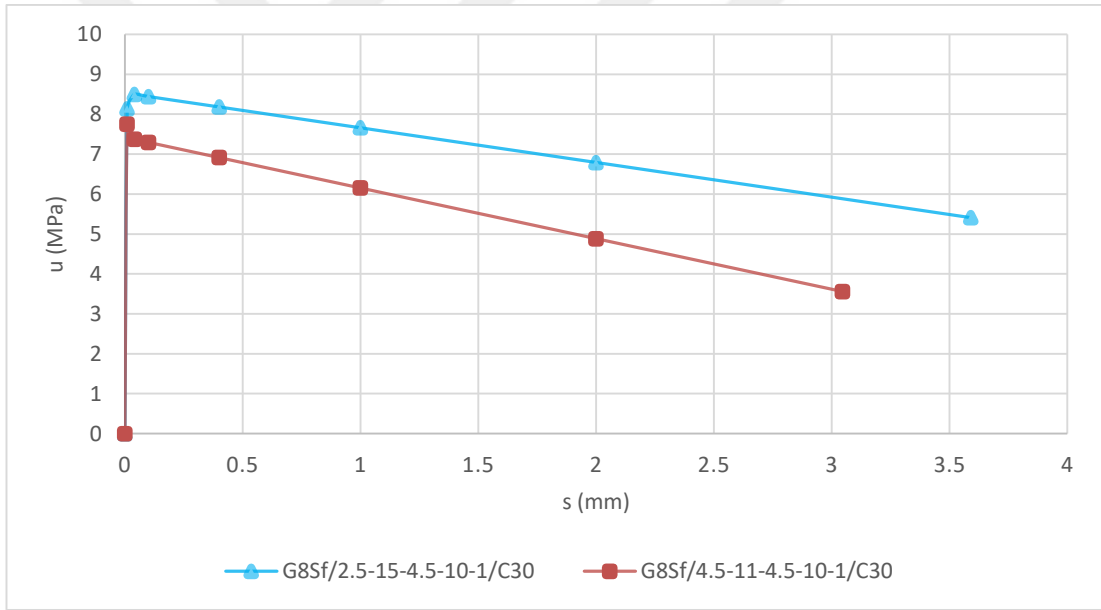
Bu çalışmada yan pas payının, FRP donatı-beton arasındaki aderans dayanımına ve donatı-beton arasında oluşacak göçme şekillerine etkisinin araştırılabilmesi amacıyla 13 adet mafsallı kiriş deneyi yapılmıştır. Bu kapsamda 8 mm anma çapına sahip boyuna donatılar kirişlere, 2.5d_b (20 mm), 3.5d_b (28 mm) ve 4.5d_b (36 mm) yan pas payı kalınlıklarında yerleştirilmiştir. Ancak bu bölüm kapsamındaki tüm deney grafiklerinin karşılaştırılmasında gerçek pas payı uzunlukları donatı gerçek dış çaplarına (D_o) bölünerek pas payları donatı çaplarına göre normalleştirilmiştir. Deney kirişlerinin donatı detayları Şekil 2.2'de gösterilmiş olup ölçülendirilmeleri ise Çizelge 2.5'de belirtilmiştir.

Yan pas payı kalınlığındaki değişimlerin aderansa etkisi, her donatı türü için ayrı ayrı gruplandırılmış aderans gerilmesi ve sıyrılma grafikleri esas alınarak belirlenmiştir. Ayrıca yan pas payının aderansa etkisi donatı türüne göre değil, bölüm sonunda tüm donatı türleri dikkate alınarak yorumlanmıştır.

3.2.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler

İnce taneli olarak kumlanmış GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma

anındaki aderans gerilmeleri $2.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip numunelerde sırasıyla 8.14 ve 7.75 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.8’den de anlaşılacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında kirişlerin rijitliklerinin pas payının artmasıyla artmadığı anlaşılmaktadır. Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise $2.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip olan kirişlerin aderans gerilmeleri sırasıyla 8.50 ve 7.75 MPa olduğu görülmektedir. Yan pas payının artırılması ile aderansın düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak pas payı artışının aderansı olumsuz etkilemesi beklenemez, bu nedenle aderansın düşmesi donatı kumlama kalitesinin değişkenliği veya kumlama kalitesinin homojenliği ile alakalı olabileceği gibi betonun homojenliği ile de alakalı olduğu düşünülmektedir. Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesinin yavaş yavaş azalması, kumlamadan dolayı oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisinden kaynaklandığı gözlenmiştir.



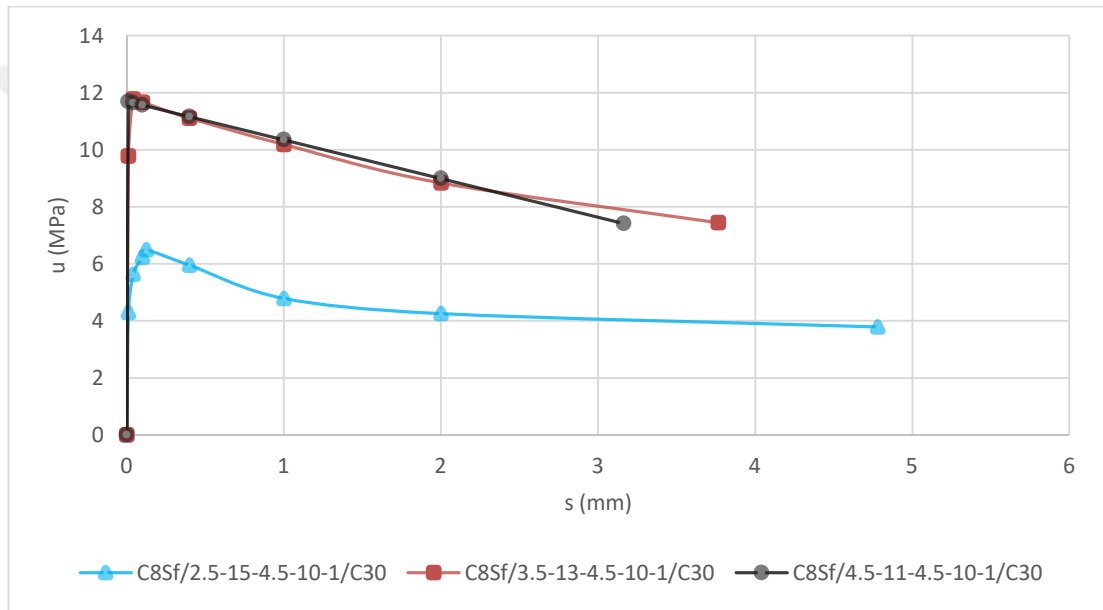
Şekil 3.8. Yan pas payı değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.2.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler

İnce taneli olarak kumlanmış CFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma

anındaki aderans gerilmeleri $2.5d_b$, $3.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip numunelerde sırasıyla 4.29, 9.67 ve 11.69 MPa olarak ölçülmüştür. Pas payının artmasıyla kirişin ilk rijitlik değerlerinde artış gözükmemektedir. Özellikle $2.5d_b$ yan pas payına sahip kiriş ile $4.5d_b$ pas payına sahip kiriş arasında 7.40 Mpa'lık bir artış söz konusudur.

Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 6.49, 11.78 ve 11.69 MPa olarak tespit edilmiştir. Maksimum aderans gerilmesi, yan pas payının $2.5d_b$ 'den $3.5d_b$ 'ye çıkmasıyla 5.29 MPa artmıştır. Ancak, $3.5d_b$ yan pas payının $4.5d_b$ 'ye çıkarılması maksimum aderans gerilmesini etkilememiştir.

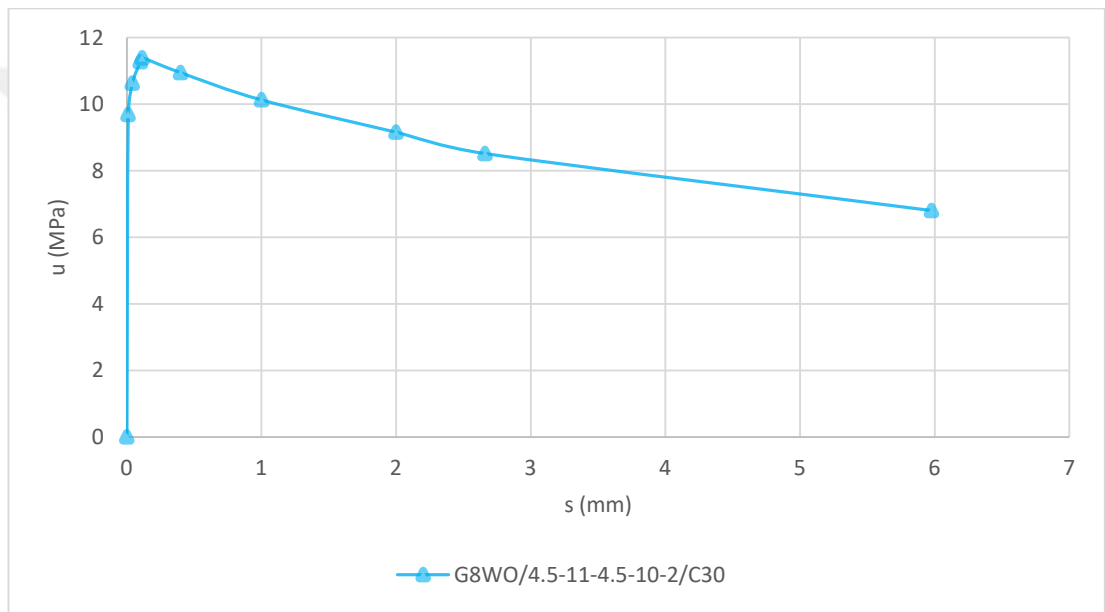


Şekil 3.9. Yan pas payı değişimine göre ince taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesinin yavaş yavaş azalması, kumlamadan dolayı oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisinden kaynaklandığı gözlenmiştir. Özellikle $3.5d_b$ ve $4.5d_b$ yan pas payına sahip kirişlerde maksimum yük değerlerinden sonra benzer aderans göçmesi gerçekleşmiş ve Şekil 3.9'dan da anlaşılabileceği üzere benzer düşüş eğilimi oluşmuştur.

3.2.3. Oluklu GFRP donatılı kirişler

Bu bölümde yan pas payının oluklu GFRP donatılı mafsallı kirişlerin aderans davranışına etkisi incelenmemiş olup sadece 4.5d_b pas payına sahip diğer donatılı kirişler ile aderans gerilmesi-sıyırılma diyagramlarının karşılaştırılması maksadı ile verilmiştir. Şekil 3.10’da dikkat edilirse 0.01 mm sıyırılma anında 9.69 MPa, maksimum aderans gerilmesi değeri ise 11.39 MPa olarak ölçülmüştür. Kirişin aderans gerilmesi-sıyırılma ilk rijitliğindeki aderansa göre 1.70 MPa’lık bir aderans gerilmesi artışı olmuştur.

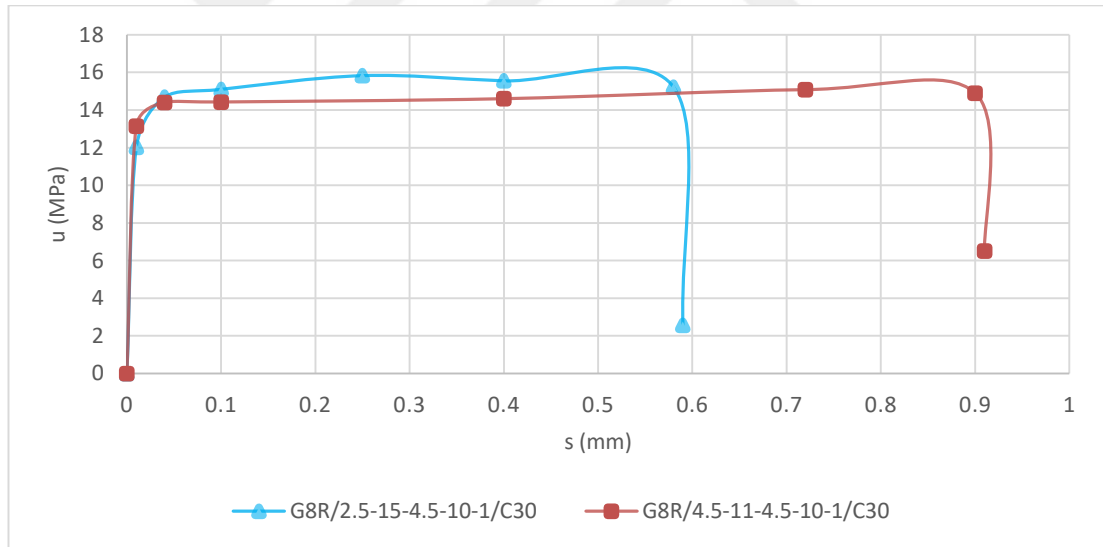


Şekil 3.10. Yan pas payı değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı

Bu donatı çubuklarında maksimum aderans gerilmesine ulaşıldıktan sonra aderans gerilmesi yavaş yavaş azalmaktadır. Bu yavaş azalma, oluklu donatıların oluklar arasında kalan yüzeylerinde gelişen sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır.

3.2.4. Nervürlü GFRP donatılı kirişler

Nervürlü GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri $2.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip numunelerde sırasıyla 12.01 ve 13.14 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.11'den de anlaşılabacağı üzere pas payının $2.5d_b$ 'den $4.5d_b$ 'ye çıkarılması ile 0.01 mm sıyrılma anında kirişlerin rijitliklerinin çok az miktarda arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 15.83 ve 15.08 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.11'den de görüldüğü üzere $2.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip kirişlerde $2d_b$ lik yan pas payı artışı maksimum aderans gerilmesinde artış meydana getirmemiş aksine düşüş ortaya çıkarmıştır. Ancak pas payı artışının aderansı olumsuz etkilemesi beklenemez, bu durum kısa aderans boylarına sahip aderans deney kirişlerinde betonun donatıyla temas ettiği noktalarda betonun homojenliğinin belirsizliği ile açıklanabilir.

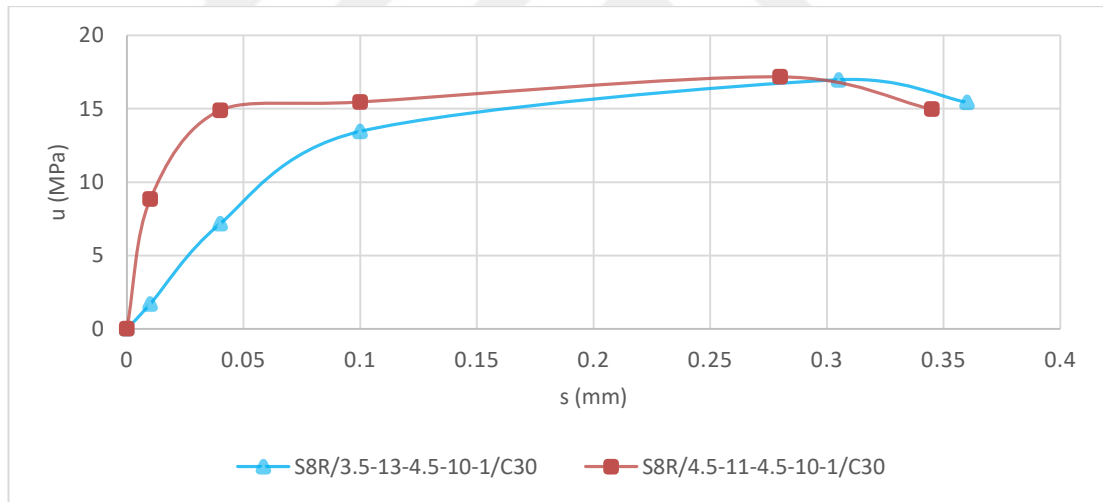


Şekil 3.11. Yan pas payı değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Nervürlü GFRP donatılarda aderans göçmesi, donatıyı saran nervürlerin ani bir şekilde kırılması ile ani olarak ortaya çıkmıştır. Ancak göçme anındaki sıyrılma miktarı donatılardaki nervürlerin beton tarafından ezilmesine bağlı olarak değişiklikler göstermiştir.

3.2.5. Çelik donatılı kirişler

Nervürlü çelik donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 3.5d_b ve 4.5d_b pas payına sahip numunelerde sırasıyla 1.70 ve 8.84 MPa olarak ölçülmüştür. Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 16.97 ve 17.18 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.12’den de görüldüğü üzere 3.5d_b ve 4.5d_b pas payına sahip kirişlerde 1d_b lik pas payı artışı maksimum aderans gerilmesinde küçük bir artış sağlamıştır. Ancak bu farkın her iki kiriş numunesinde çelik donatıların akması nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu nedenle donatılarda ki sıyrılma miktarı sabit kalmıştır. Bu benzerliklere rağmen kirişlerin başlangıç rijitlikleri aynı değildir. 3.5d_b yan pas payına sahip numune donatısının beton içinde ilk oturmasından kaynaklı olduğu düşünülen bir sıyrılma meydana gelmiştir. Ama her iki numunenin maksimum aderans gerilmelerinde, donatıda oluşan sıyrılma miktarları benzerdir.



Şekil 3.12. Yan pas payı değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

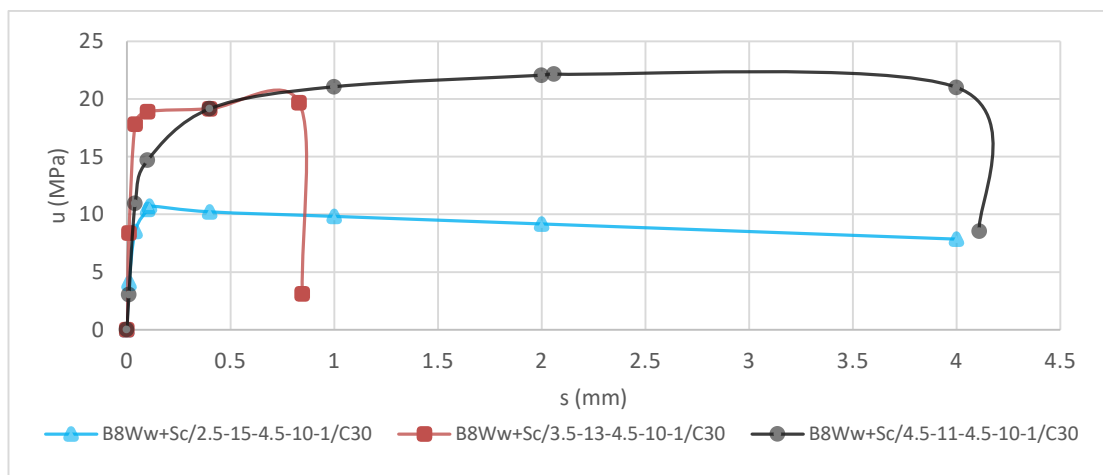
3.2.6. İri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı kirişler

Bu bölümde yan pas payının iri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı mafsallı kirişlerin aderans davranışına etkisi incelenmiş olup donatıların 0.01 mm sıyrılma

anındaki aderans gerilmeleri $2.5d_b$, $3.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payına sahip numunelerde sırasıyla 4.03, 8.39 ve 3.04 MPa olarak ölçülmüştür.

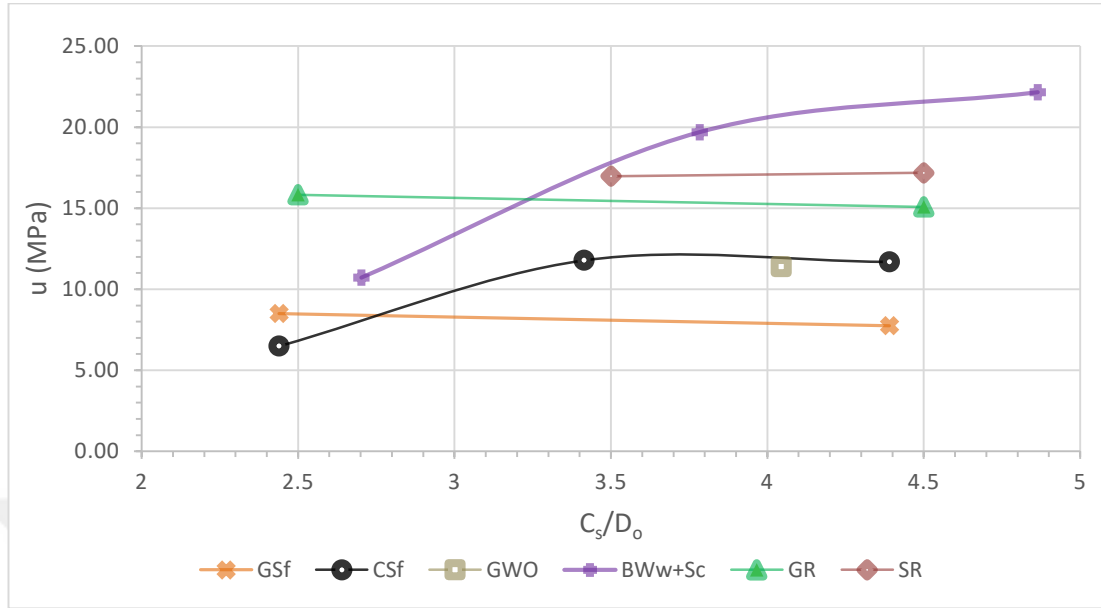
Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 10.72, 19.69 ve 22.15 MPa olarak tespit edilmiştir. $2.5d_b$ ve $3.5d_b$ yan pas payına sahip olan kirişlerde beton ayrışma göçmesi oluşmuştur. $4.5d_b$ yan pas payına sahip numunede ise sıyrılma göçmesi oluşmuştur. Tüm pas payı değerlerinde kiriş ilk rijitliklerinden sonra çok ciddi oranda aderans artışı gerçekleşmiştir. Değişken pas paylarında kiriş ilk rijitliklerinde bu denli bir değişim ve sonrasındaki aderans artışı, donatının beton ile temas ettiği noktalardaki kumlama kalitesine bağlı olarak beton ile donatının kumlama yüzeyi arasında kalan boşluklardaki oturmadan kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca maks. aderans gerilmesi yan pas payı artışından ciddi oranda etkilenmiştir. Ancak bu artış doğrusal değildir. Çünkü $3.5d_b$ 'den sonraki pas payında kiriş göçme modunda değişmiştir.

$3.5d_b$ pas payına sahip kirişte maksimum aderans gerilmesinden sonra beton ayrışma göçmesi nedeniyle aderans gerilmesi ani olarak düşmüştür. Ancak $2.5d_b$ yan pas payına sahip kirişte de beton ayrışma göçmesi oluşmasına rağmen aderans çok ani bir şekilde düşmemiştir. Bu davranış sıyrılma göçmesiyle, beton ayrışma göçmesinin neredeyse aynı anda meydana gelmesinden kaynaklıdır. $4.5d_b$ yan pas payına sahip kirişte ise maksimum aderansdan sonra aderans düşmesinin ani olarak gerçekleşmesi ise iri taneli kumlanmış yüzeyin kırılmasından ötürü gerçekleşmiştir.



Şekil 3.13. Yan pas payı değişimine göre iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.2.7. Yan pas payının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması



Şekil 3.14. Yan pas payı değişimine göre farklı türdeki donatıların maksimum aderans gerilmelerinin karşılaştırılması

Şekil 3.14'den de görüleceği üzere $2.5d_b$ pas payı kalınlığından büyük pas payı kalınlıklarında pas payının FRP donatı-beton aderansına etkisi çok sınırlı kaldığından $2.5d_b$ pas payı kalınlıklarından sonra hem göçme tipi hemde aderans gerilmesi değerlerinin etkilenmediğini söylemek mümkündür. Ancak iri taneli olarak kumlanmış sargılı BFRP donatılarda $2.5d_b$ ve $3.5d_b$ pas paylarında göçme tipi beton ayrışma göçmesi iken $4.5d_b$ pas payında göçme tipi sıyrılma göçmesine dönüşmüştür. Yan pas payının aderansa etkisi donatı türlerine göre karşılaştırıldığında $3.5d_b$ ve $4.5d_b$ pas payları içinde en iyi aderans performansını iri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatı sergilemiştir. BFRP donatı-beton aderansı $3.5d_b$ ve $4.5d_b$ yan pas paylarında çelik donatılar ile karşılaştırıldığında sırasıyla %116 ve %129 fazla aderans performans sergilemiştir. Aderansın bu denli yüksek çıkması iki gerekçeyle açıklanabilir. Birincisi, BFRP donatının iri taneli kumlama yüzeye sahip olmasından dolayı sürtünme mekanizmasından ziyade mekanik kilitlenme ile aderans gerilmesinin aktarılmasıdır. İkincisi, donatının çevresindeki sıkı sargıdan dolayı oluşan yüzey bombeleşmeleri mekanik kilitlenme ve yüzey sürtünme kuvvetlerinin artmasına neden

olmaktadır. Ancak 2.5d_b pas payına sahip BFRP donatılı numunede yan pas payının yetersiz gelmesinden dolayı beton ayrışma göçmesi oluşmuştur. Bu nedenle maksimum aderans gerilmesi değeri nervürlü GFRP donatılarında altındadır.

Aderansın mekanik kilitlenme ve sürtünme ile aktarıldığı donatılarda aderans, çelik donatılı numunelerden bile fazla olduğundan, bu gibi donatıların sıyrılma ile göçmeleri için en az 3.5d_b yan pas payı alınması gereklidir. Literatürde ise yan pas payının aderansa etkisi ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmadığından ötürü, elde edilen sonuçlar literatür ile kıyaslanamamıştır.

Çelik donatılı kirişlerde pas payının 3.5d_b'den 4.5d_b'ye çıkarılması ile donatı-beton aderansının tam olarak sağlanması neticesinde donatılar akma gerilmesine ulaşmışlardır. Bu nedenle ölçülen maksimum aderans gerilmeleri arasında pek bir farklılık söz konusu değildir.

Nervürlü GFRP donatı-beton aderansı, çelik donatı-beton aderansına benzer olarak mekanik kilitlenme neticesinde gerçekleştiği için bu donatıların aderans gerilmesi değerleri, çelik donatı-beton aderansına yakın çıkmaktadır. 2.5d_b ve 4.5d_b yan pas payına sahip Nervürlü GFRP donatılı numunelerin maksimum aderans gerilmeleri, çelik donatılı numunelerin aderansının %93'ü ve %88'idir.

İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişlerde ise yan pas payının 2.5d_b'den 3.5d_b'ye çıkarılmasıyla aderans gerilmesi ciddi miktarda artmış gibi gözükmektedir. Ancak bu durum benzer yüzey özelliğine sahip ince taneli kumlanmış GFRP donatılarda gözükmemiştir. Nervürlü GFRP donatılarda da herhangi bir artış söz konusu değildir. Bu nedenlerle 2.5d_b yan pas payına sahip CFRP donatılı kirişler için beton yerleşiminden kaynaklı bir olumsuz durum olduğu (kısmi segregasyon) ve deneyin hatalı olduğu düşünülmektedir.

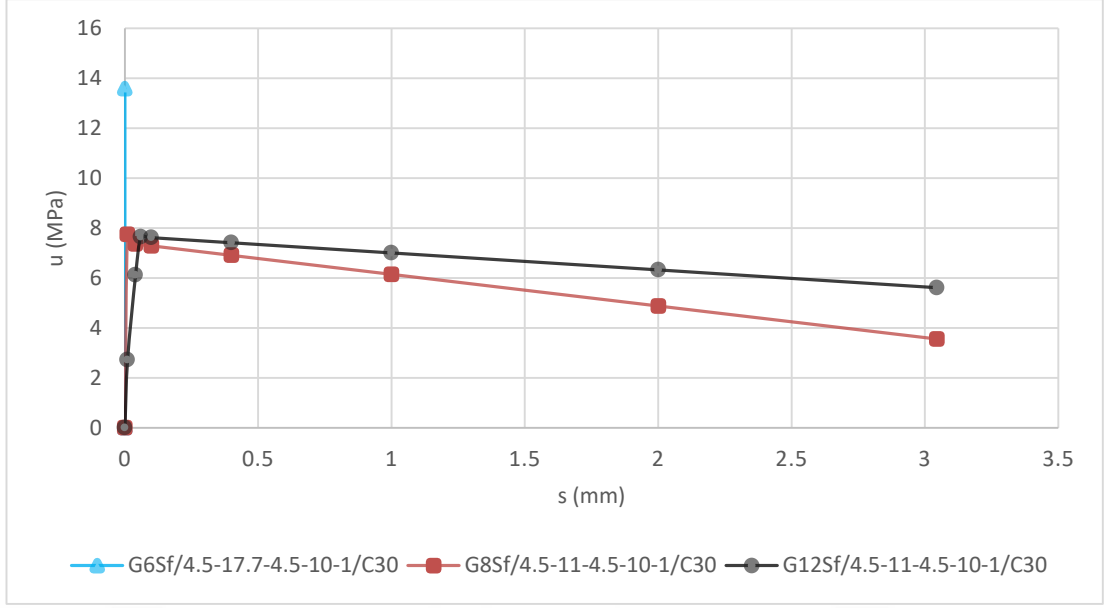
3.3. Donatı çapının aderansa etkisi

Bu çalışmada donatı çapının, FRP donatı-beton arasındaki aderans dayanımına etkisinin araştırılabilmesi maksadıyla 17 adet mafsallı kiriş deneyi yapılmıştır. Bu kapsamda, mafsallı kirişlerde 6 mm, 8 mm ve 12 mm anma çapına sahip elik ve FRP boyuna donatılar kullanılmıştır. Deney kirişlerinin donatı detayları şekil 2.2’de gösterilmiş olup ölçülendirilmeleri ise izelge 2.7’de belirtilmiştir.

Donatı çapındaki değişimlerin aderansa etkisi, her donatı türü için ayrı ayrı gruplandırılmış aderans gerilmesi ve sıyrılma grafikleri esas alınarak belirlenmiştir. Ayrıca donatı çapının aderansa etkisi donatı türüne göre değil, bölüm sonunda tüm donatı türleri dikkate alınarak yorumlanmıştır.

3.3.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler

İnce taneli olarak kumlanmış GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anında aderans gerilmeleri 6 mm, 8 mm ve 12 mm donatı çapına sahip numunelerde sırasıyla 13.59, 7.75 ve 7.65 MPa olarak ölçülmüştür. şekil 3.15’den de anlaşılacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında donatı aderanslarının donatı çapının artmasıyla azaldığı anlaşılmaktadır. Ancak bu azalma 6 mm ile 8 mm donatılı kirişler kıyaslandığında çok keskindir. Öte yandan bu sıyrılma değerine karşılık gelen aderans gerilme değerleri ise aynı zamanda donatılarda oluşan maksimum aderans gerilme değerleridir. Bu nedenle donatı çapının artmasıyla maksimum aderansa karşılık gelen sıyrılma değerlerinde değişiklik olmadığı görülmüştür.



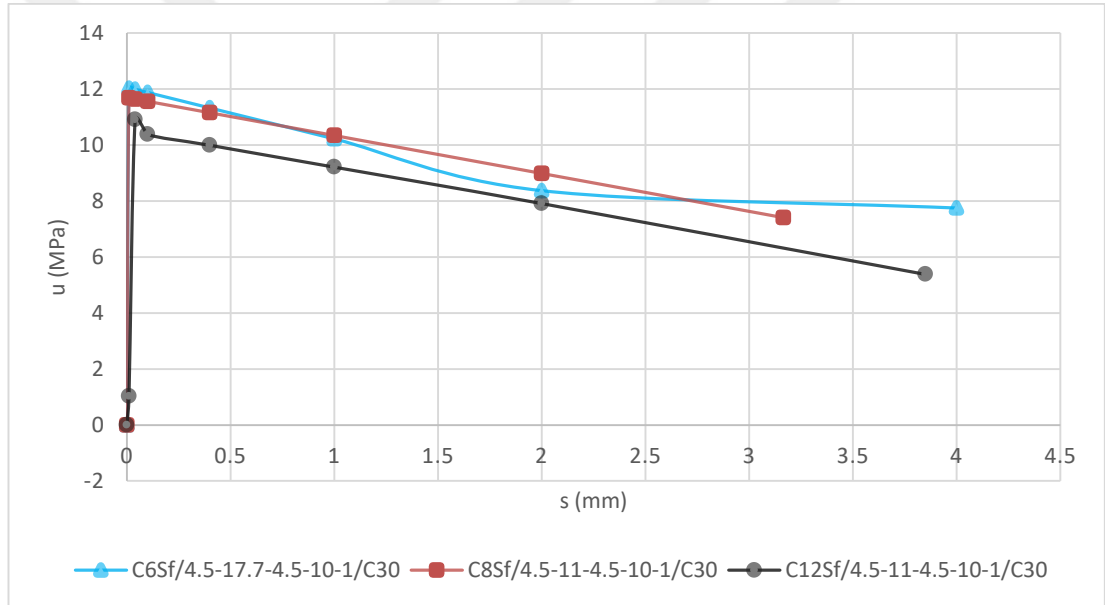
Şekil 3.15. Donatı çapı değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise 6 mm, 8 mm ve 12 mm çapa sahip donatıların aderans gerilme değerleri sırasıyla 13.59, 7.75 ve 7.65 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak 6 mm donatılar ile diğer 8 mm ve 12 mm donatılar arasında bu büyük aderans gerilmesi farkının, donatı kumlama kalitesi ve donatının beton ile temas ettiği noktalarda betonun homojen olmayan dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesinin yavaş yavaş azalması, kumlamadan dolayı sürtünme kuvvetlerinden olduğu gözlenmiştir. Ancak 6 mm donatı çapına sahip numunenin maksimum aderans gerilmesinden sonra, numunenin ani hareketinden dolayı potansiyometrelerin pozisyonları değiştiği için, bu noktadan sonra ölçüm alınamamıştır.

3.3.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler

İnce taneli olarak kumlanmış CFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 6 mm, 8 mm ve 12 mm donatı çapına sahip numunelerde sırasıyla 12.03, 11.69 ve 10.91 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.16'dan da anlaşılabacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında donatı aderanslarının, donatı çapının artmasıyla azaldığı anlaşılmaktadır. Öte yandan bu sıyrılma değerine karşılık gelen aderanslar ise aynı zamanda donatılarda oluşan maksimum aderans değerleridir. Bu nedenle donatı çapının artmasıyla maksimum aderansa karşılık gelen sıyrılma değerlerinde değişiklik olmadığı görülmüştür.



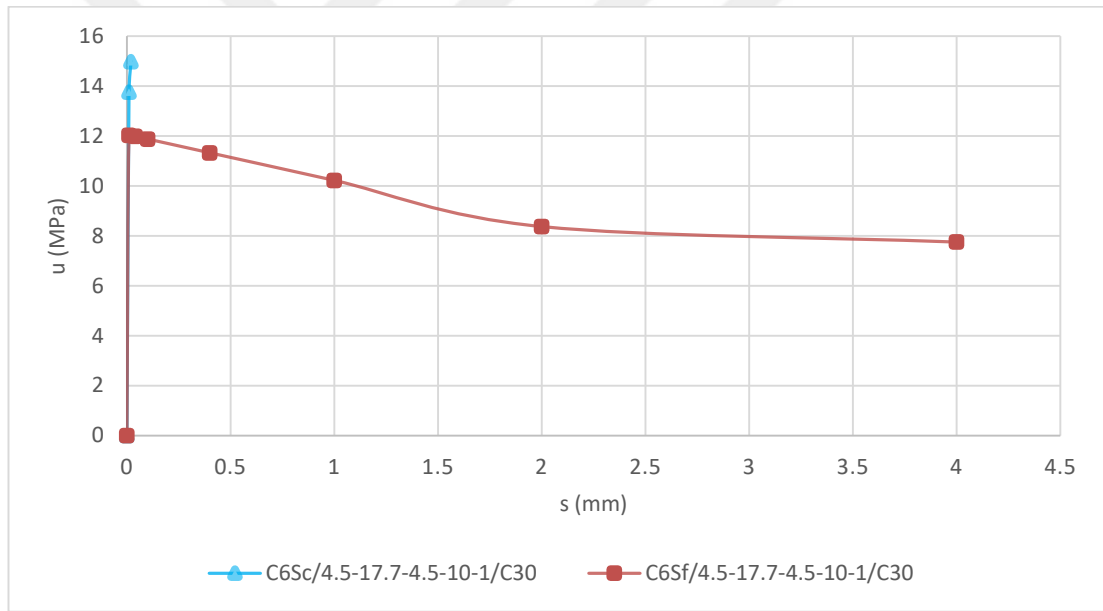
Şekil 3.16. Donatı çapı değişimine göre ince taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise 6 mm ile 8 mm donatı çapları arasında %3 ve 8 mm ile 12 mm donatı çapları arasında ise %7'lik bir aderans azalışı söz konusudur.

Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesinin yavaş yavaş azalması, kumlamadan dolayı oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisinden kaynaklandığı gözlenmiştir.

3.3.3. İri taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler

6 mm çapında iri taneli olarak kumlanmış CFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişin aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmesi 13.75 MPa'dır. Maksimum aderans gerilmesi ise 14.98 MPa'dır. Bu donatıların maks. aderans gerilme değeri, 6 mm anma çapındaki ince taneli olarak kumlanmış CFRP donatı (12.03 MPa) ile karşılaştırıldığında, aderans gerilmesi kumlama boyutunun artmasıyla 2.95 MPa (%25) artmıştır.

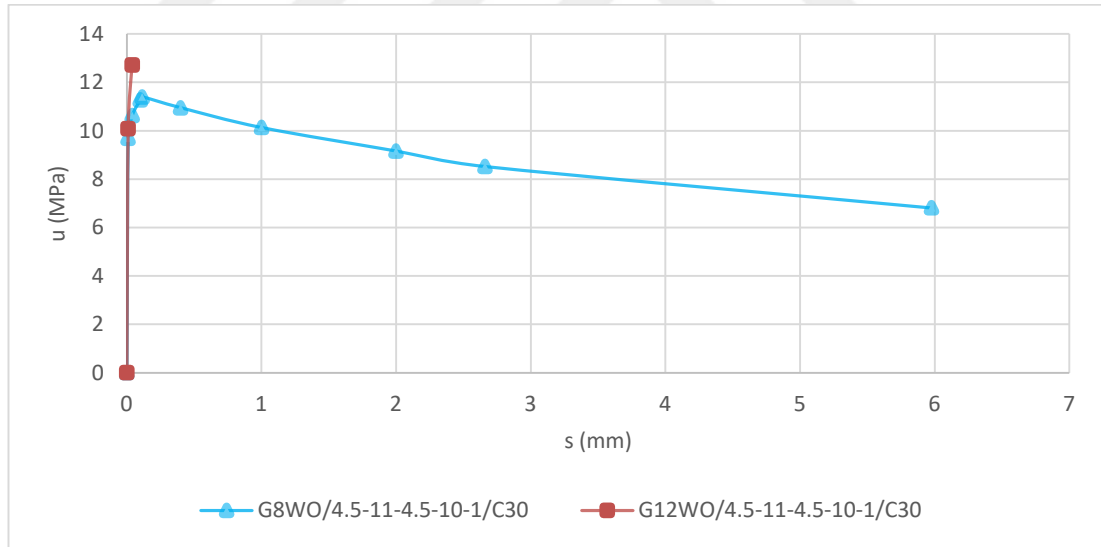


Şekil 3.17. Donatı çapı değişimine göre iri taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Ancak iri taneli kumlanmış FRP donatıya sahip numunenin, maksimum aderans gerilmesinden sonra, numunenin ani hareketinden dolayı potansiyometrelerin pozisyonları değiştiği için, bu noktadan sonra ölçüm alınamamıştır.

3.3.4. Oluklu GFRP donatılı kirişler

Oluklu GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 8 mm ve 12 mm donatı çapına sahip numunelerde sırasıyla 9.69 ve 10.09 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.18'den de anlaşılacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında donatı aderanslarının donatı çapındaki değişimden etkilenmediği varsayılabilir. Oluklu GFRP donatıların maksimum aderans değerleri ise 8 mm ve 12 mm donatı çapına sahip numunelerde sırasıyla 11.39 ve 12.71 MPa'dır. Donatı çapının artmasıyla 1.32 MPa'lık bir artış meydana gelmiştir. Donatı çapının artmasıyla donatı enkesitinde oluşacak kayma etkisinden dolayı aderans gerilmesinin düşmesi beklenmektedir. Ancak bu artışın 12 mm donatılarda oluk derinliğinin 8 mm'lik donatıya göre 0.1 mm artmış olmasından dolayı meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca donatıların maksimum aderans gerilmesi değerleri, 0.01mm sıyrılma anında ölçülen aderans gerilmesi değerlerine göre sırasıyla 1.70 ve 2.62 MPa artmıştır.



Şekil 3.18. Donatı çapı değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

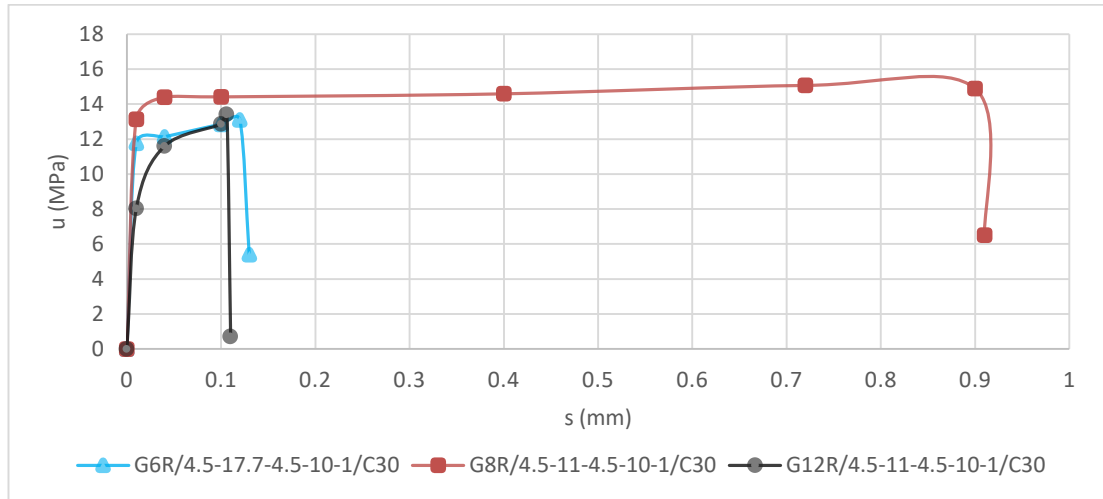
12 mm donatı çapına sahip numunede maksimum aderans gerilmesinden sonra sıyrılma değerleri, kirişin ani hareketinden dolayı potansiyometrelerin çıkmasıyla

ölçülememiştir. 8 mm'lik donatılı kirişte, maksimum aderans gerilmesinden sonra aderans gerilmesi yavaş yavaş azalmıştır. Bu durum, oluklu donatılarda oluklar arasına giren betonun zamanla olukların ezilmesine sebep olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.3.5. Nervürlü GFRP donatılı kirişler

Nervürlü GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 6 mm, 8 mm ve 12 mm donatı çapına sahip numunelerde sırasıyla 11.77, 13.14 ve 8.03 MPa olarak ölçülmüştür. Maksimum aderans gerilmeleri ise sırasıyla 13.10, 15.08 ve 13.42 MPa olarak ölçülmüştür.

Hem 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans değerlerinden hem de maksimum aderans değerlerinden anlaşılabileceği üzere donatı çapının artmasıyla aderans değerlerinde ilk önce artış daha sonra ise azalma meydana gelmiştir. Donatı çapının artmasıyla aderans gerilmesinin düşmesi beklenmektedir. Ancak 6 mm donatı ile 8 mm donatı arasındaki bu artış, 6 mm donatının nervür çapının 0.1 mm daha büyük olmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. 8 mm ile 12 mm donatılar arasındaki düşüş ise donatıların nervür çaplarının eşit olmasından ötürü, donatı çapının artmasıyla %11 düşmüştür.



Şekil 3.19. Donatı çapı değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

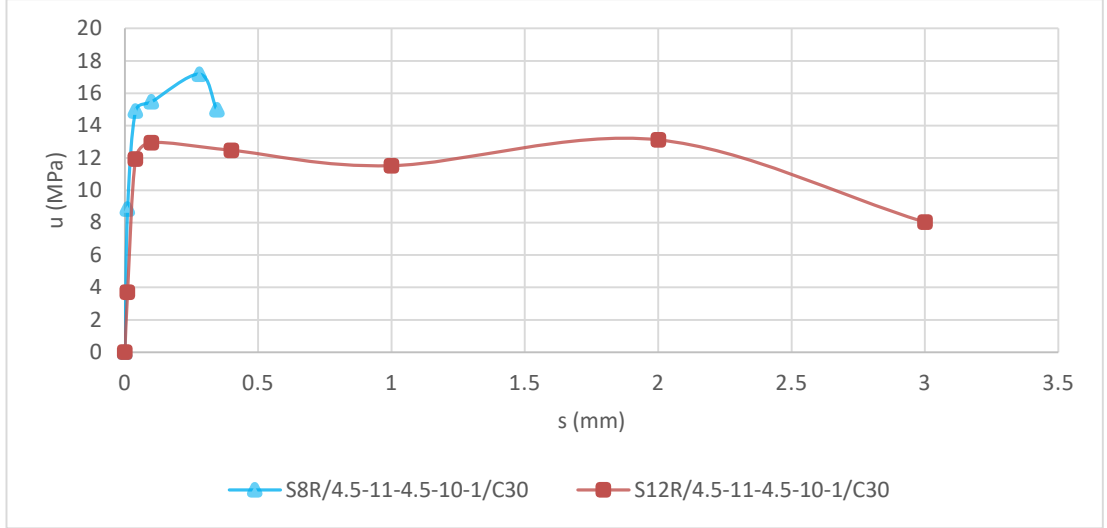
Nervürlü GFRP donatılarda aderans göçmesi, donatıyı saran nervürlerin ani bir şekilde kırılması ile ani olarak ortaya çıkmıştır. Ancak göçme anındaki sıyrılma donatılarda nervürlerin beton tarafından ezilmesine bağlı olarak değişmiştir.

3.3.6. Çelik donatılı kirişler

Nervürlü çelik donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 8 mm ve 12 mm donatı çapına sahip numunelerde sırasıyla 8.84 ve 3.71 MPa olarak ölçülmüştür. Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 17.18 ve 13.12 MPa olarak tespit edilmiştir. Hem 8mm hem de 12 mm çapa sahip olan donatılarda tam aderansın gerçekleşmesi nedeniyle çelik donatı akma gerilmesine ulaşmıştır. Bu nedenle 8 mm çapa sahip donatılarda donatı sıyrılmaları sabit kalmıştır. Ancak 12 mm çapa sahip donatılı kirişte kaldıraç etkisinden dolayı çekmeli eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Bu nedenle potansiyometrelerden ölçüm alınırken sanki donatıda sıyrılma olmuş gibi gözükmemektedir.



Şekil 3.20. 12mm çelik donatılı mafsallı kirişte oluşan kaldıraç etkisi



Şekil 3.21. Donatı çapı değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

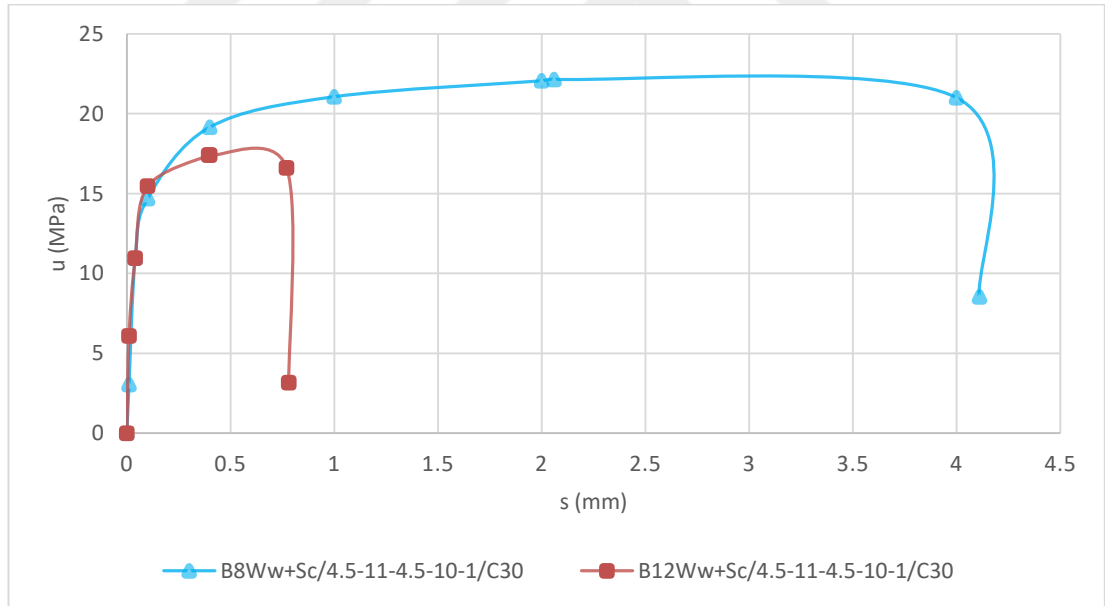
3.3.7. İri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı kirişler

Bu bölümde iri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı mafsallı kirişlerde donatı çapındaki değişimin aderans davranışına etkisi incelenmiştir. Donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 8 mm ve 12 mm donatı çapına sahip numunelerde sırasıyla 3.04 ve 6.09 MPa olarak ölçülmüştür.

Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 22.15 ve 17.41 MPa olarak tespit edilmiştir. Ancak 12 mm çapa sahip donatılı kiriş de kesme kuvvetlerinden dolayı kesme çatlağı meydana geldiği için yük ani düşmüştür. 8 mm donatı çapına sahip numunede maksimum aderansdan sonra aderans düşmesinin ani olarak gerçekleşmesi ise iri taneli kumlanmış yüzeyin kırılmasından ötürü gerçekleşmiştir.



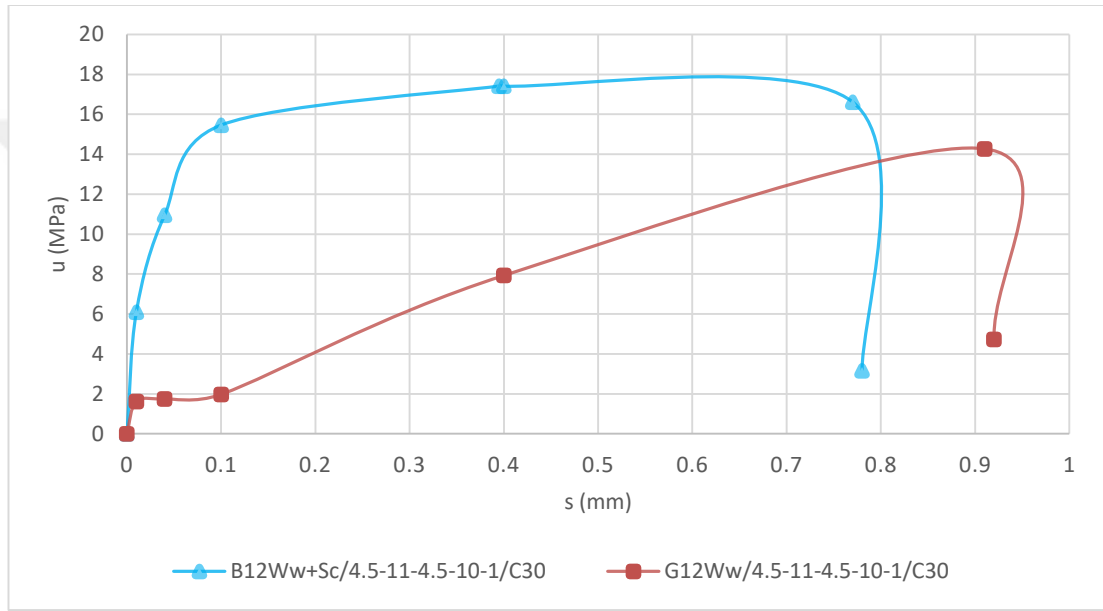
Şekil 3.22. 12 mm çapa sahip iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatılı kirişde oluşan kesme çatlağı



Şekil 3.23. Donatı çapı değişimine göre iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.3.8. Sargılı GFRP donatılı kirişler

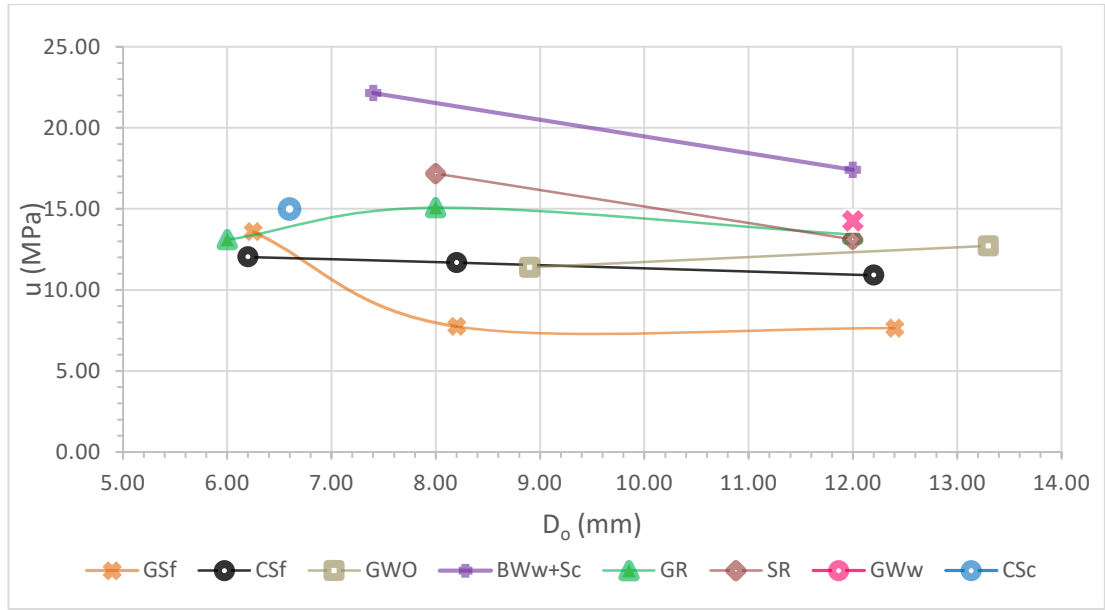
12 mm anma çapına sahip sargılı GFRP donatıların sargılarının beton ile temas ettiği ilk noktalarının kısmi ezilmesi nedeniyle sıyrılma değerleri maksimum aderansa kadar artış göstermiş ve daha sonra ezilmenin tamamen gerçekleşmesiyle aderans ani olarak düşmüştür. Şekil 3.24'den de dikkat edileceği üzere kumlanmış sargılı BFRP donatının aderans-sıyrılma eğrisi, iri taneli kumlamadan dolayı mekanik kilitlenmenin artmasından ötürü daha rijit davranış göstermiştir.



Şekil 3.24. Sargılı FRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.3.9. Donatı çapının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması

Şekil 3.25'den de görüleceği üzere 12 mm oluklu ve 6 mm nervürlü GFRP donatılar hariç tüm donatılarda artan donatı çapları dolayısıyla aderans gerilmelerinde azalma gözlenmiştir. Literatürde, benzer sonuçları araştırmacılarda gözlemlemişlerdir [39,41,42]. Ancak 12 mm oluklu donatıların 8 mm oluklu donatılardan daha derin oluklara ve 8 mm nervürlü GFRP donatıların ise 6 mm nervürlü donatılardan daha büyük nervür çapına sahip olmalarından dolayı, bu donatıların aderansları daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 3.25. Donatı çapı değişimine göre farklı türdeki donatıların maksimum aderans gerilmelerinin karşılaştırılması

6 mm çapında iri taneli kumlanmış CFRP donatılar, 6 mm anma çapındaki ince taneli kumlanmış CFRP donatı ile karşılaştırıldığında aderans gerilmesi değerleri kumlama çapının artmasıyla 2.95 MPa (%25) artmıştır. Benzer davranış 12 mm sargılı GFRP donatılar ile 12 mm iri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılar arasındadır. Sargının üzerine ilaveten yapılan iri kumlamadan ötürü donatı aderansının %22 arttığı gözlemlenmiştir. Hem CFRP hem de GFRP donatılarda neredeyse benzer elastisite modüllü donatılar kullanıldığından bu artışların yüzey özellikleriyle ilgili olduğu açıktır.

BFRP donatıların (8 mm'den 12 mm'ye) çap artışı ile gözüken aderans azalış oranı (%21) ile çelik donatıların çap artışı ile gözüken aderans azalış oranları (%24) benzerdir. Ancak bu oran nervürlü donatılarda %11, ince taneli kumlanmış CFRP donatılarda %7 ve ince taneli kumlanmış donatılarda ise 1% dolaylarındadır. Bu sonuçlardan, mekanik kilitlenme yoluyla aderans aktaran donatılardaki aderans azalışı, sürtünme yoluyla yük aktaran donatılardan daha fazla olduğu görülmektedir. Çünkü mekanik kilitlenme mekanizması ile yük aktaran donatılarda, donatı dış çaplarında artış olmasına rağmen donatı nervür derinlikleri aynı kalmaktadır. Bundan dolayı donatı nervür derinliğinin donatı dış çapına oranı düşmekte dolayısıyla donatıların

aderans mekanizması gittikçe sürtünme ile yük aktaran mekanizmaya benzediği düşünülmektedir.

3.4. Beton basınç dayanımının aderansa etkisi

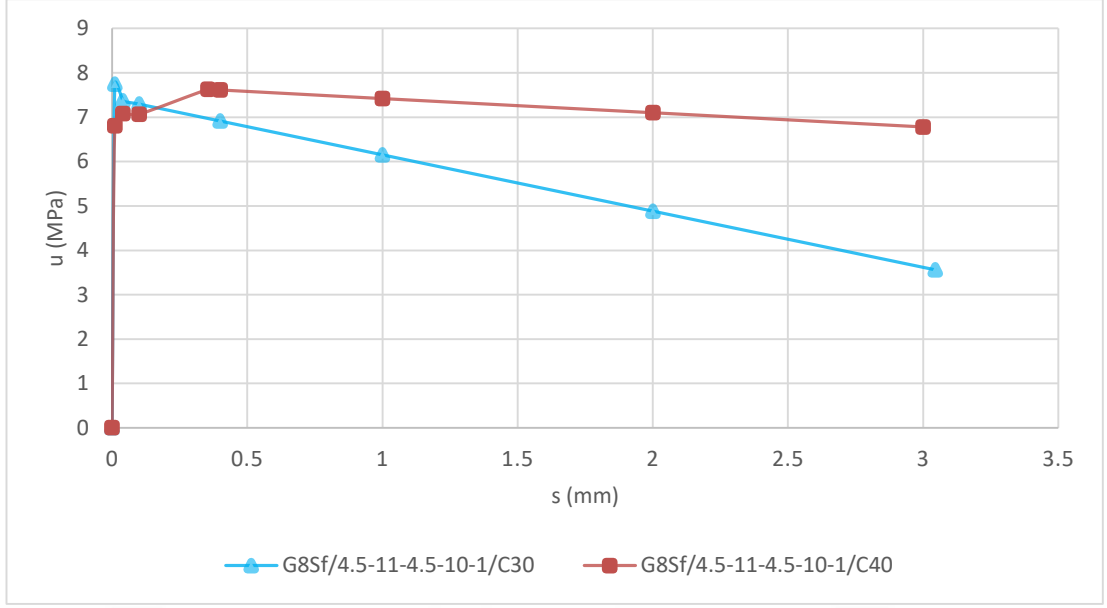
Bu çalışmada beton basınç dayanımının, donatı-beton arasındaki aderans dayanımına ve donatı-beton arasında oluşacak göçme şekillerine etkisinin araştırılabilmesi amacıyla 22 adet mafsallı kiriş deneyi yapılmıştır. Bu kapsamda, mafsallı kirişlerde 20, 30, 35 ve 40 MPa basınç dayanımlarına sahip beton kullanılmıştır.

Deney kirişlerinin donatı detayları Şekil 2.2’de gösterilmiş olup ölçülendirilmeleri ise Çizelge 2.3’de belirtilmiştir. Betonlara ait mekanik özellikler ise Çizelge 2.10’da gösterilmiştir.

Beton basınç değişimlerinin aderansa etkisi, her donatı türü için ayrı ayrı gruplandırılmış aderans gerilmesi ve sıyrılma grafikleri esas alınarak belirlenmiştir. Ayrıca beton basınç dayanımının aderansa etkisi donatı türüne göre değil, bölüm sonunda tüm donatı türleri dikkate alınarak yorumlanmıştır.

3.4.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler

İnce taneli kumlanmış GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 30 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde sırasıyla 7.75 ve 6.80 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.26. Beton basınç dayanımı değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

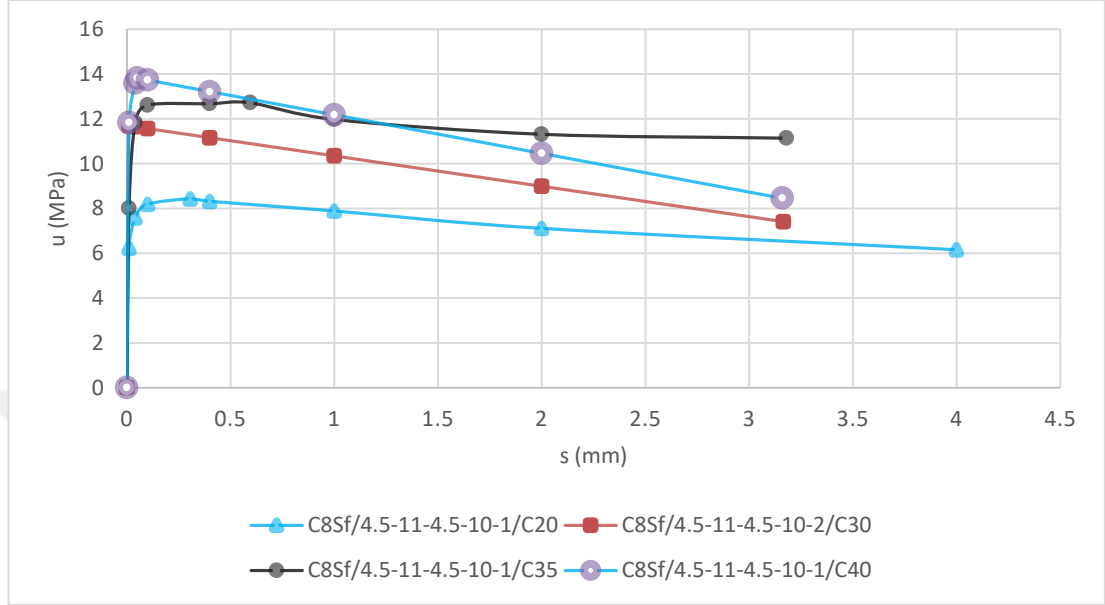
Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise 30 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde aderans gerilmeleri sırasıyla 7.75 ve 7.63 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.26'dan da görüleceği üzere beton basınç dayanımındaki artış donatı-beton arasında oluşan maksimum aderansları etkilememiştir.

Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesinin yavaş yavaş azalması, kumlamadan dolayı oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisinden kaynaklandığı gözlenmiştir. Ancak, maksimum aderans gerilmesinden sonra aynı sıyrılma değerlerinde, 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunenin aderans gerilmesi değerleri, 30 MPa basınç dayanımlı numuneden daha yavaş azalmıştır.

3.4.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler

İnce taneli olarak kumlanmış CFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip

numunelerde sırasıyla 6.22, 11.69, 8.01 ve 11.84 MPa olarak ölçülmüştür. Değerlerden de anlaşılacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında donatı aderanslarının, beton basınç dayanımının artmasından etkilenip etkilenmediği açık değildir.



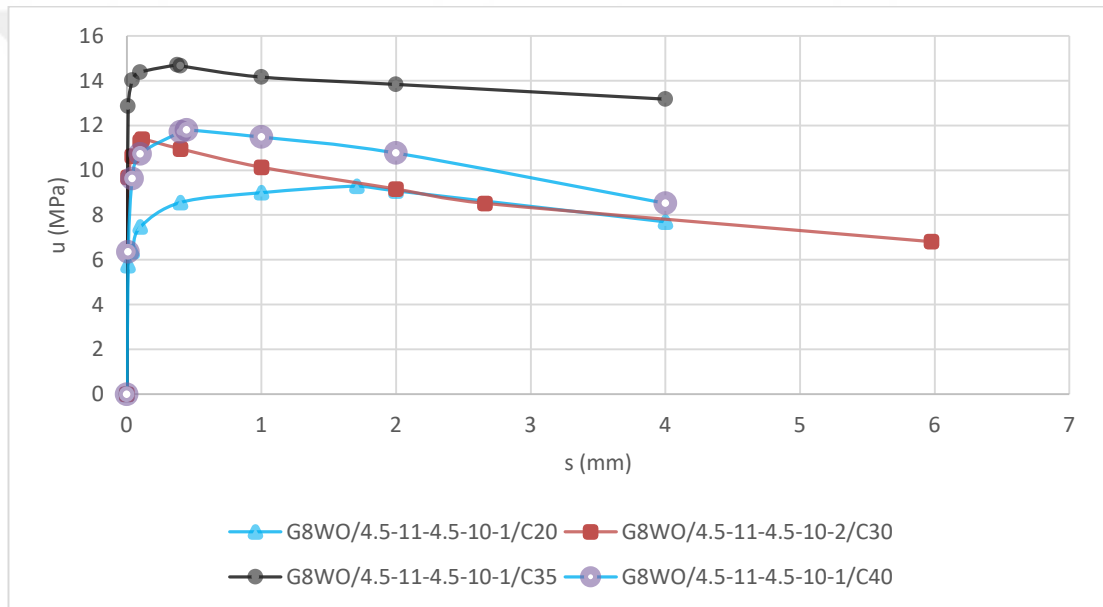
Şekil 3.27. Beton basınç dayanımı değişimine göre ince taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde aderans gerilmeleri sırasıyla 8.43, 11.69, 12.72 ve 13.82 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.27'den de görüleceği üzere beton basınç dayanımındaki artışla beraber donatıların aderans gerilmesi değerleri artmıştır. 20 MPa beton basınç dayanımının 30 MPa çıkarılması ile maksimum aderans gerilmesi %39, 30 MPa beton basınç dayanımının 35 MPa çıkarılması ile %9, 35 MPa beton basınç dayanımının 40 MPa çıkarılması ile %9 arttığı görülmüştür.

Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesinin yavaş yavaş azalması, kumlamadan dolayı oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkisinden kaynaklandığı gözlenmiştir.

3.4.3. Oluklu GFRP donatılı kirişler

Oluklu GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde sırasıyla 5.74, 9.69, 12.86 ve 6.35 MPa olarak ölçülmüştür. Değerlerden de anlaşılabacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında donatı aderanslarının, beton basınç dayanımının artmasından etkilenip etkilenmediği açık değildir. Çünkü 20 MPa beton basınç dayanımından 35 MPa basınç dayanımına kadar aderans ilk dayanımları %69 ve %33 artmasına rağmen 40 MPa beton dayanımına sahip olan numunelerde %51 düşmüştür.



Şekil 3.28. Beton basınç dayanımı değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde aderans gerilmeleri sırasıyla 9.29, 11.39, 14.70 ve 11.81 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.28'den de görüleceği üzere beton basınç dayanımındaki artışla beraber donatıların aderans gerilmesi değerleri artmıştır. 20 MPa beton basınç dayanımının 30 MPa çıkarılması ile maksimum aderans gerilmesi %23, 30 MPa beton basınç dayanımının 35 MPa çıkarılması ile %29

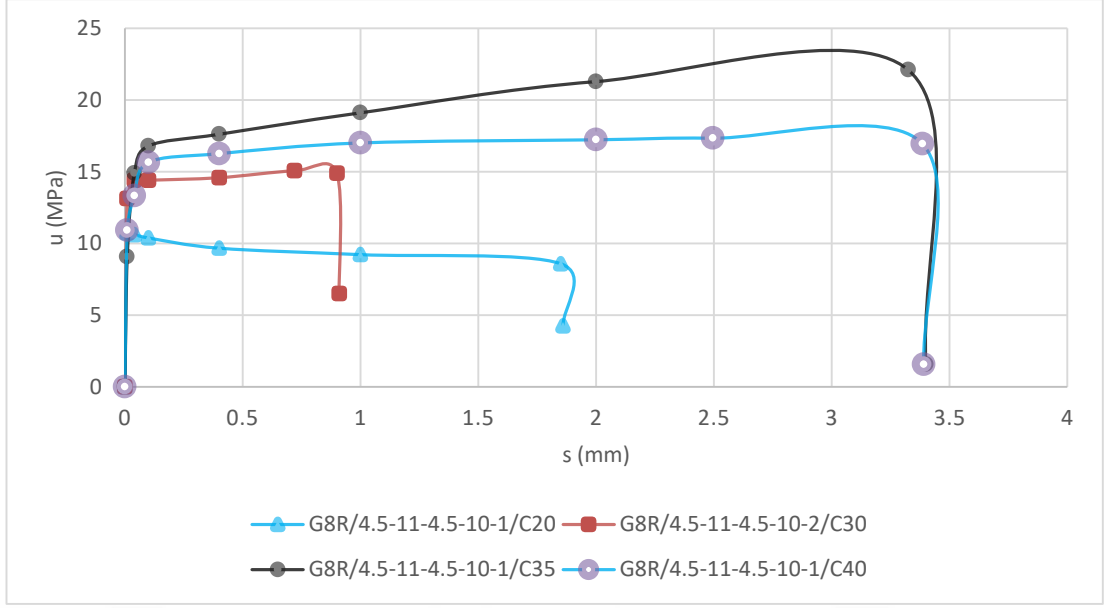
artmıştır. Ancak 35 MPa beton basınç dayanımının 40 MPa çıkarılması ile %20 düşmüştür. Bu düşüşün nedeni bölüm sonunda değerlendirilmiştir.

Bu donatı çubuklarında maksimum aderans gerilmesine ulaşılmasından sonra aderans gerilmesi yavaş yavaş azalmaktadır. Bu yavaş azalma, oluklu donatıların oluklar arasında kalan yüzeylerinde gelişen sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır.

3.4.4. Nervürlü GFRP donatılı kirişler

Nervürlü GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde sırasıyla 10.74, 13.14, 9.07 ve 10.94 MPa olarak ölçülmüştür. Değerlerden de anlaşılaçağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında donatı aderanslarının, beton basınç dayanımının artmasından etkilenmemiştir. Çünkü ilk aderans değerleri değerleri birbirlerine yakın değerler göstermekte ancak bu değerlerin değişimi değişkenlik göstermiştir. Bu değişkenliğin en büyük nedeni olarak betonun ilk aderansının donatıyla temas ettiğı yüzeylerdeki beton kalitesine bağılı olarak değiştiğı söylenebilir.

Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde aderans gerilmeleri sırasıyla 10.74, 15.08, 22.11 ve 17.35 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.29'dan da görüleceğı üzere beton basınç dayanımındaki artışla beraber donatıların aderans gerilmesi değerleri artmıştır. 20 MPa beton basınç dayanımının 30 MPa çıkarılması ile maksimum aderans gerilmesi %40, 30 MPa beton basınç dayanımının 35 MPa çıkarılması ile %47 artmıştır. Ancak 35 MPa beton basınç dayanımının 40 MPa çıkarılması ile %22 düşmüştür. Bu düşüşün nedeni bölüm sonunda değerlendirilmiştir.

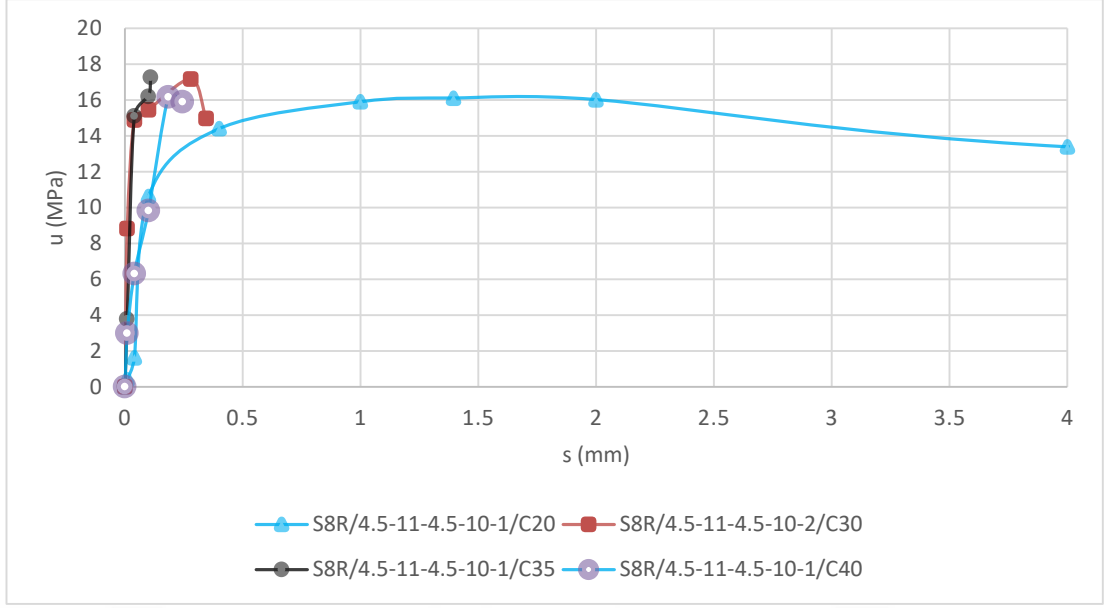


Şekil 3.29. Beton basınç dayanımı değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesi, nervürlü GFRP donatıyı saran nervürlerin ani bir şekilde kırılması ile ani olarak ortaya çıkmıştır. Ancak numunelerin göçme anındaki donatı sıyrılma miktarları donatılardaki nervürlerin beton tarafından ezilmesine bağlı olarak değişmiştir.

3.4.5. Çelik donatılı kirişler

Nervürlü GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde sırasıyla 1.62, 8.84, 3.57 ve 2.99 MPa olarak ölçülmüştür. Değerlerden de anlaşılabileceği üzere 0.01 mm sıyrılma anında donatı aderanslarının, beton basınç dayanımının artmasından etkilenmemiştir. Çünkü ilk aderans değerleri değerleri birbirlerine yakın değerler göstermekte ancak bu değerlerin değişimi değişkenlik göstermiştir. Bu değişkenliğin en büyük nedeni olarak betonun ilk aderansının donatıyla temas ettiği yüzeylerdeki beton kalitesine bağlı olarak değiştiği söylenebilir.



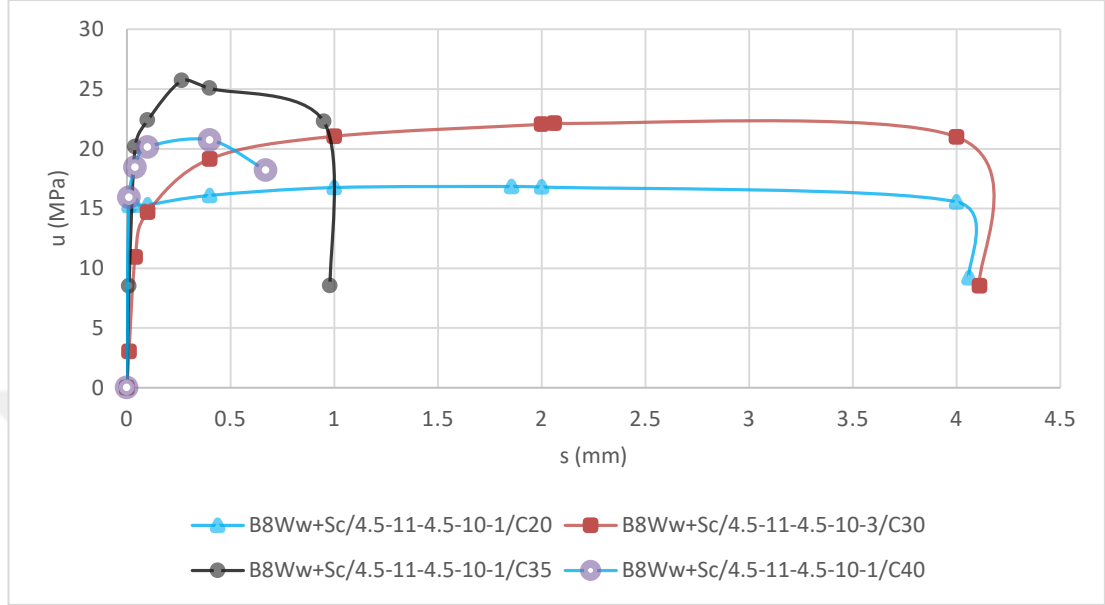
Şekil 3.30. Beton basınç dayanımı değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde aderans gerilmeleri sırasıyla 16.11, 17.18, 17.27 ve 16.17 MPa olarak ölçülmüştür. 20 MPa beton basınç dayanımının 30 MPa çıkarılması ile maksimum aderans gerilmesi %7 artmıştır. Ancak donatılarda oluşan sıyrılma göçmesi, donatı akmasına dönüştüğü için %7'lik bu artış sınırlandırılmış bir artış olmuştur. 30 MPa ve 35 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde tam aderansın gerçekleşmesi nedeniyle çelik donatılar akma gerilmesine ulaşmıştır. 40 MPa'lık beton basınç dayanımına sahip numunede ise donatı kopması sonucu kiriş göçmüştür.

3.4.6. İri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılı kirişler

Bu bölümde iri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde sırasıyla 15.25, 3.03, 8.50 ve 15.94 MPa olarak ölçülmüştür.

Değerlerden de anlaşılacağı üzere ilk aderans değerleri birbirlerinden çok farklı değerler göstermiştir. Bu değişkenliğin en büyük nedeni olarak betonun ilk aderansının donatıyla temas ettiği yüzeylerdeki beton kalitesine bağlı olarak değiştiği söylenebilir.



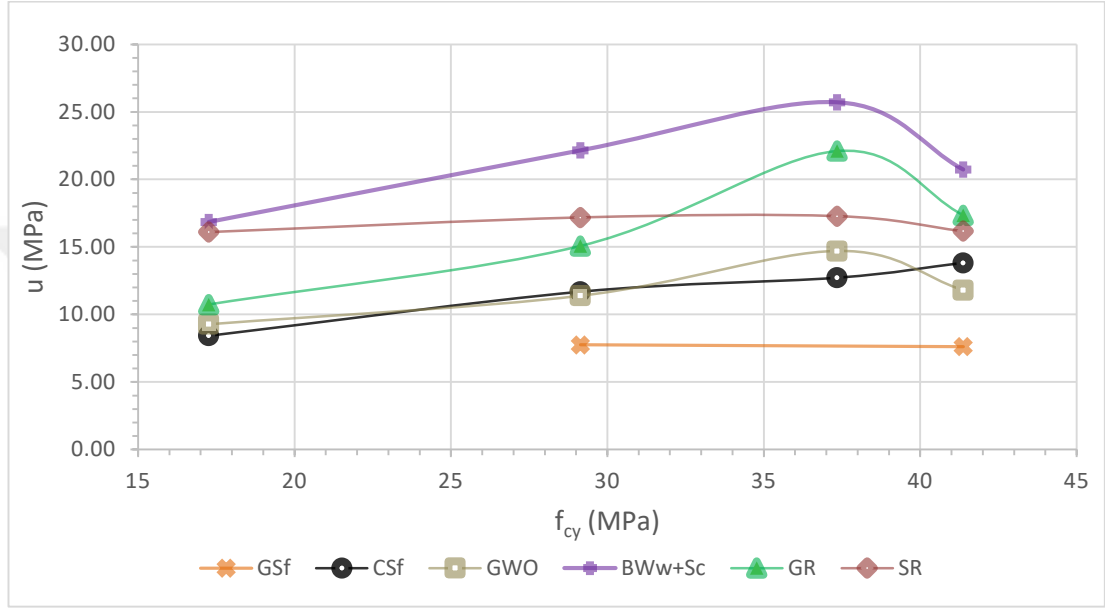
Şekil 3.31. Beton basınç dayanımı değişimine göre iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışı

Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise 20, 30, 35 ve 40 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde aderans gerilmeleri sırasıyla 16.85, 22.15, 25.71 ve 20.73 MPa olarak ölçülmüştür. 20 MPa beton basınç dayanımının 30 MPa çıkarılması ile maksimum aderans gerilmesi %31, 30 MPa beton basınç dayanımının 35MPa çıkarılması ile %16 artmıştır. Ancak 35 MPa beton basınç dayanımının 40 MPa çıkarılması ile %19 azalmıştır. Bu azalışın nedeni bölüm sonunda değerlendirilmiştir.

Maksimum aderans gerilmesinden sonra ise aderans gerilmesi, 20 MPa beton basınç dayanımına sahip numunede artan donatı sıyırılması neticesinde beton ayrışma göçmesi gerçekleşmiştir. Ancak 40 MPa'lık beton basınç dayanımına sahip olan numunede beton ayrışma göçmesi ise daha erken sıyırılma değerlerinde olmuştur. 30 ve 35 MPa beton basınç dayanımına sahip kirişlerde ise maksimum aderansdan sonra

aderans azalmasının ani olarak gerçekleşmesi iri taneli kumlanmış yüzeyin kırılmasından ötürü gerçekleşmiştir.

3.4.7. Beton basınç dayanımının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması



Şekil 3.32. Beton basınç dayanımı değişimine göre donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Şekil 3.32’den de görüleceği üzere neredeyse tüm FRP donatılarda beton basınç dayanımının 20 MPa’dan 35 MPa’ya çıkarılmasıyla aderans gerilmesinde artış gözlenmiştir. Ancak beton basınç dayanımının 40 MPa’a çıkarılmasıyla maksimum aderans gerilmesi değerlerinde azalış gözlenmiştir. Bu durum, beton basınç dayanımının artmasıyla beton sertliğinin artması sonucu, donatı yüzeyindeki soyulmadan dolayı gerçekleşmiştir. Benzer sonuçları Yan vd. [75], Baena vd. [88], Achillides and Pilakoutas [89] ve Borosnyói [92] çalışmalarında gözlemlemişlerdir. Ancak ince taneli kumlanmış donatılarda (GSf ve CSf) oluşan aderans gerilme değerleri, donatı yüzeyindeki soyulmaların değişkenliğine bağlı olarak değiştiği için beton basınç dayanımlarının 30 MPa’dan 40 MPa çıkarılmasıyla düşüş

göstermemişlerdir. Belki de bu durum, donatı birim yüzeyine düşen ince taneli kumların, donatıyla çok sayıda birleşim yapmalarından kaynaklıdır.

Çelik donatılı numunelerde 30, 35 ve 40 MPa basınç dayanımına sahip numunelerde tam aderansın gerçekleşmesi neticesinde donatılar akma gerilmesine ulaştığı için birbirleriyle benzer aderans gerilmesi değerleri göstermişlerdir.

FRP donatıların, beton basınç dayanımı değişimlerinden etkilenme oranları incelendiğinde ise Şekil 3.32’den de anlaşılabileceği üzere mekanik kilitlenme ile aderans yükü aktaran donatılar beton basınç değişimlerinden daha fazla etkilenmektedirler.

3.5. Donatı gömülme boyunun aderansa etkisi

Bu çalışmada donatı gömülme boyunun, donatı-beton arasındaki aderans dayanımına ve donatı-beton arasında oluşacak göçme şekillerine etkisinin araştırılabilmesi amacıyla 12 adet mafsallı kiriş deneyi yapılmıştır. Bu kapsamda 8 mm anma çapına sahip boyuna donatılar kirişlere, $5d_b$ (40 mm), $10d_b$ (80 mm) ve $20d_b$ (160 mm) beton ile temasları olacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Ancak bu bölüm kapsamında tüm deney grafiklerinin karşılaştırılmasında gerçek gömülme boyu uzunlukları donatı gerçek dış çaplarına (D_o) bölünerek gömülme boyları donatı çaplarına göre normalleştirilmiştir. Deney kirişlerinin donatı detayları Şekil 2.2’de gösterilmiş olup ölçülendirilmeleri ise Çizelge 2.2’de belirtilmiştir.

Gömülme boyu değişimlerinin aderansa etkisi, her donatı türü için ayrı ayrı gruplandırılmış aderans gerilmesi ve sıyrılma grafikleri esas alınarak belirlenmiştir. Ayrıca gömülme boyunun aderansa etkisi donatı türüne göre değil, bölüm sonunda tüm donatı türleri dikkate alınarak yorumlanmıştır.

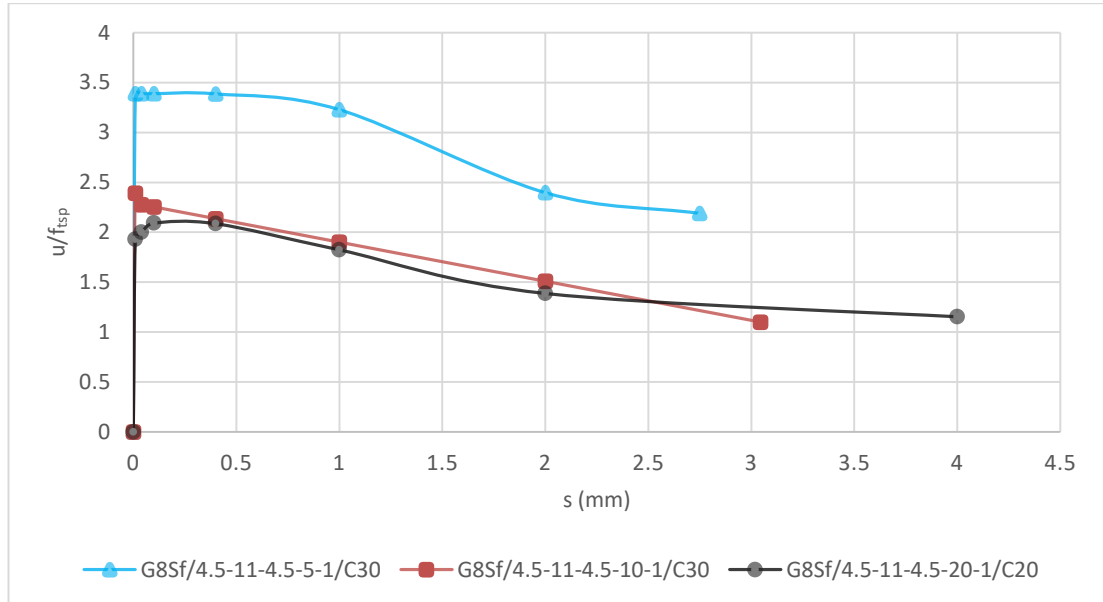
3.5.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler

İnce taneli olarak kumlanmış GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma

anındaki beton basınç dayanımına göre normalleştirilmiş aderans gerilmeleri $5d_b$, $10d_b$ ve $20d_b$ pas payına sahip numunelerde sırasıyla 3.39, 2.39 ve 1.93 MPa olarak ölçülmüştür. Değerlerdende anlaşılabileceği üzere 0.01 mm sıyrılma anında kirişlerin rijitlikleri gömülme boyunun artmasıyla azalmaktadır.

Normalleştirilmiş maksimum aderans gerilme değerleri 0.01mm sıyrılma anındaki aderans değerleri ile karşılaştırıldığında ise $5d_b$ (3,39 MPa) ve $10d_b$ (2.39 MPa) gömülme boyuna sahip kirişlerin normalleştirilmiş aderans değerlerinde herhangi bir artış olmamıştır. $20d_b$ (2.17 MPa) gömülme boyuna sahip olan kirişin aderans gerilmesi ise 0.24 MPa artış göstermiştir. Ancak, bu artışın, donatı kumlama kalitesinin değişkenliği veya kumlama kalitesinin homojenliği ile alakalı olabileceği düşünülmektedir.

Maksimum aderans gerilmeleri ise donatıların gömülme derinliklerinin $5d_b$ 'den $10d_b$ 'ye çıkarılmasıyla %30 azalma, $10d_b$ 'den $20d_b$ 'ye çıkarılması ile %9 azalma göstermiştir. Bu durum, gömülme boyunun artmasıyla donatının beton ile ilk aderans aktarımına başladığı noktadan uzaklaşmasıyla düzgün olmayan aderans dağılımlarından kaynaklanmaktadır.

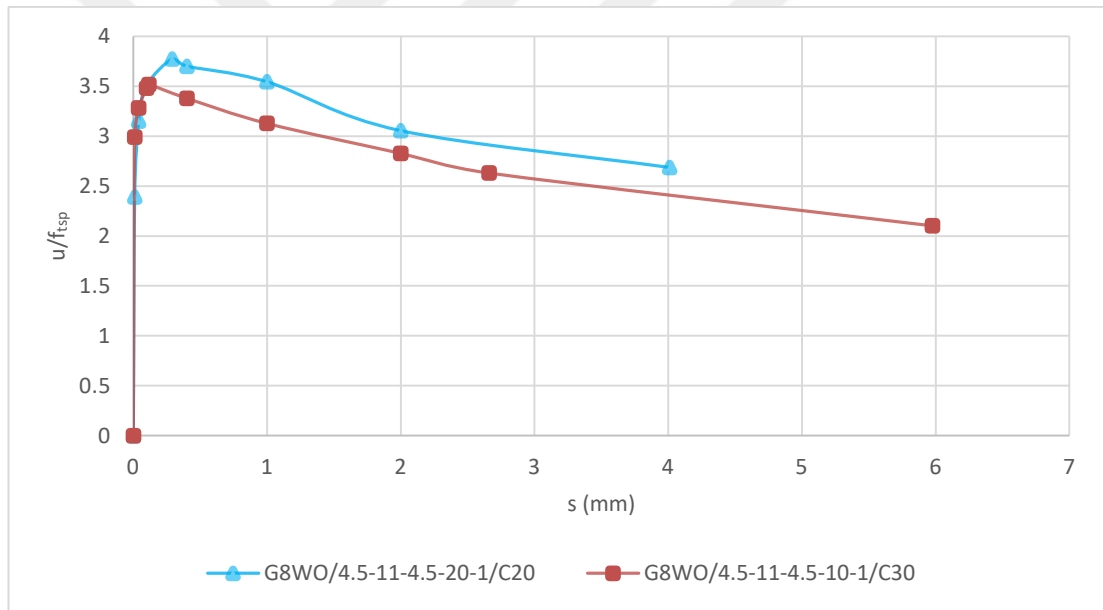


Şekil 3.33. Gömülme boyu değişimine göre İnce taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Maksimum aderans gerilmelerinden sonra ise, tüm gömülme boylarındaki numunelerin aderans düşüş eğilimleri benzer olduğu Şekil 3.33'den de anlaşılmaktadır.

3.5.2. Oluklu GFRP donatılı kirişler

Oluklu GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki normalleştirilmiş aderans gerilmeleri 10d_b ve 20d_b pas payına sahip numunelerde sırasıyla 2.99 ve 2.39 MPa olarak ölçülmüştür. Değerlerden de anlaşılabacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında kirişlerin rijitlikleri gömülme boyunun artmasıyla %20 azalmaktadır.



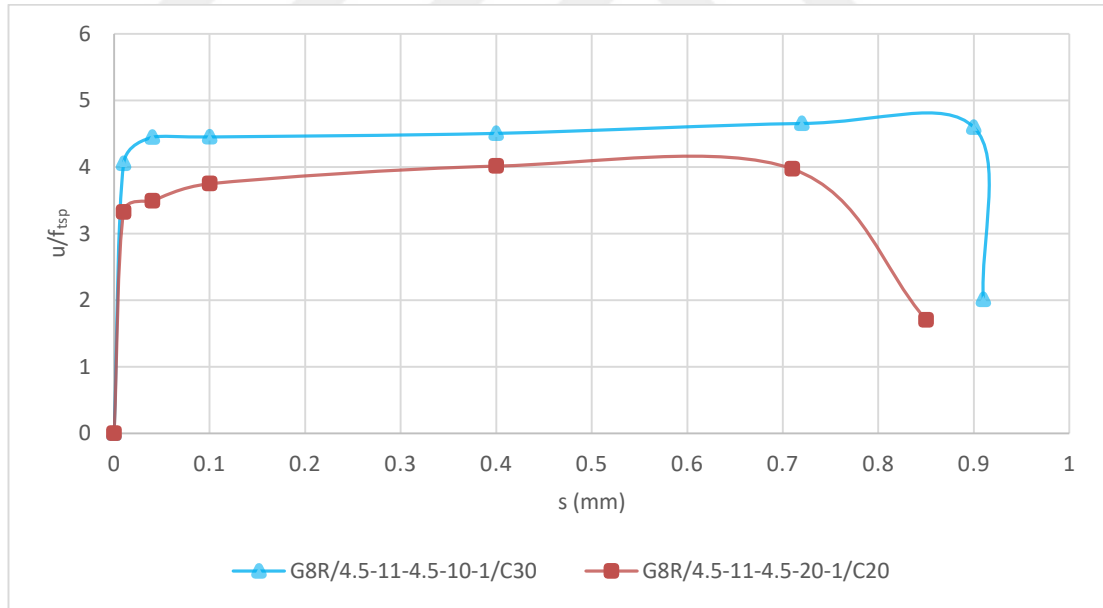
Şekil 3.34. Gömülme boyu değişimine göre oluklu GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Normalleştirilmiş maksimum aderans gerilme değerleri, 0.01 mm donatı sıyrılmasına karşılık gelen aderans değerleri ile karşılaştırıldığında, 10d_b (3.52 MPa) gömülme boyuna sahip kirişte %18 aderans artışı gerçekleşmişken, 20d_b (3.72 MPa) gömülme boyuna sahip olan kirişte ise %56 bir artış gerçekleşmiştir. Ancak 20d_b gömülme

boyuna sahip numunenin normalleştirilmiş maksimum aderans gerilme değeri, $10d_b$ gömülme boyuna sahip numuneden yüksek çıkması beklenmedik bir durumdur. Bu durum, betonun yerleştirilmesinden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ancak Şekil 3.34'den de dikkat edileceği üzere, tüm gömülme boylarındaki numunelerin aderans düşüş eğilimleri benzerdir.

3.5.3. Nervürlü GFRP donatılı kirişler

Nervürlü GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki beton basınç dayanımına göre normalleştirilmiş aderans gerilmeleri $10d_b$ ve $20d_b$ pas payına sahip numunelerde sırasıyla 4.06 ve 3.33 MPa olarak ölçülmüştür. Değerlerden de anlaşılabileceği üzere 0.01 mm sıyrılma anında kirişlerin rijitlikleri gömülme boyunun artmasıyla %18 azalmaktadır.



Şekil 3.35. Gömülme boyu değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Normalleştirilmiş maksimum aderans gerilme değerleri donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans değerleri ile karşılaştırıldığında ise $10d_b$ (4.66 MPa) gömülme

boyuna sahip kirişde %15 aderans artışı gerçekleşmişken, 20d_b (4.13 MPa) gömülme boyuna sahip olan kirişde ise %24 bir artış gerçekleşmiştir. Maksimum aderans gerilmeleri ise donatıların gömülme derinliklerinin 10d_b'den 20d_b'ye çıkarılmasıyla %11 azalma göstermiştir. Bu durum, gömülme boyunun artmasıyla donatının beton ile ilk aderans aktarımına başladığı noktadan uzaklaşmasıyla düzgün olmayan aderans dağılımlarından kaynaklanmaktadır.

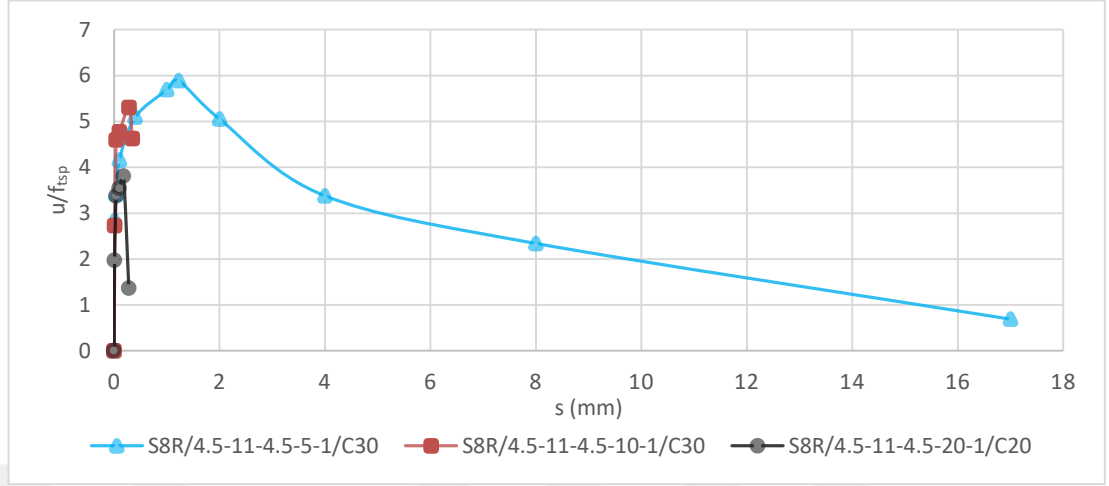
Maksimum aderans gerilmelerinden sonra ise, tüm gömülme boylarındaki numunelerin aderans azalış eğilimleri benzer olduğu Şekil 3.35'den de anlaşılmaktadır. Ancak göçme anındaki ezilmeden kaynaklı sıyrılma donatılardaki nervürlerin beton tarafından ezilmesine bağlı olarak değişmiştir.

3.5.4. Çelik donatılı kirişler

Nervürlü çelik donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki beton basınç dayanımına göre normalleştirilmiş aderans gerilmeleri 5d_b, 10d_b ve 20d_b pas payına sahip numunelerde sırasıyla 2.84, 2.73 ve 1.97 MPa olarak ölçülmüştür. Değerlerdende anlaşılabacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında kirişlerin rijitlikleri gömülme boyunun artmasıyla azalmaktadır.

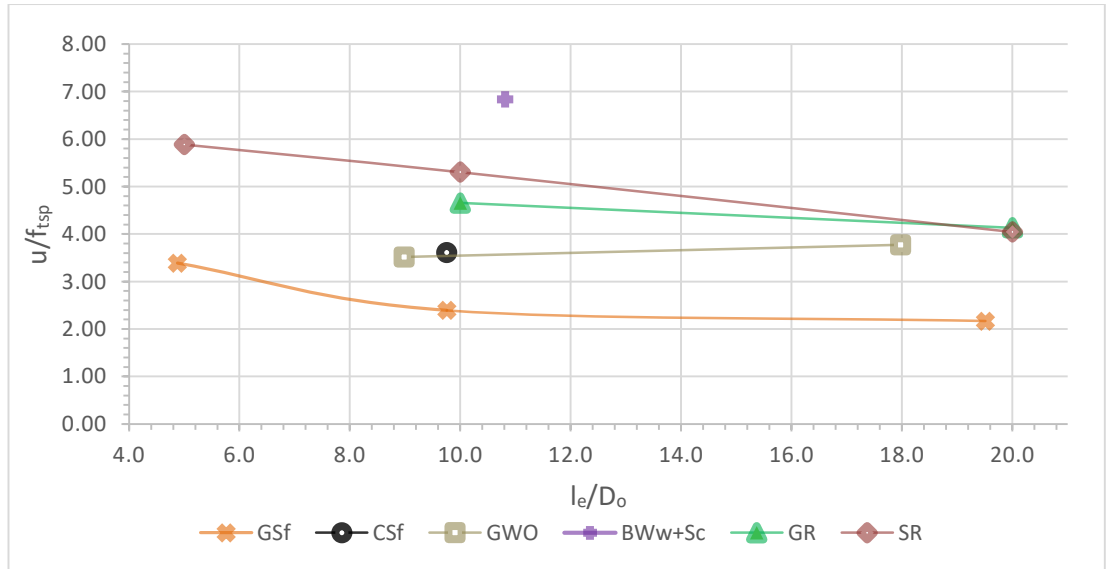
Normalleştirilmiş maksimum aderans gerilme değerleri, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans değerleri ile karşılaştırıldığında ise 5d_b gömülme boyundaki donatılarda 3.05 MPa, 10d_b gömülme boyundaki donatılarda 2.57 MPa ve 20d_b gömülme boyundaki donatılarda 2.07 MPa artış gerçekleşmiştir. Normalleştirilmiş maksimum aderans gerilmeleri sırasıyla 5.89, 5.30 ve 4.04 MPa'dır. Maksimum aderans gerilmeleri ise donatıların gömülme derinliklerinin 5d_b'den 10d_b'ye çıkarılmasıyla %10 azalma, 10d_b'den 20d_b'ye çıkarılması ile %24 azalma göstermiştir. Ancak donatılarda oluşan sıyrılma göçmesi, donatı akmasına dönüştüğü için %10'luk bu azalma sınırlandırılmış bir azalma olduğu düşünülmektedir. 20d_b gömülme boyuna sahip kirişler de ise donatı koptuğu için göçme olmuştur. Ayrıca bu donatılarda aderans gerilmesindeki azalış, gömülme boyunun artmasıyla donatının beton ile ilk

aderans aktarımına başladığı noktadan uzaklaşmasıyla düzgün olmayan aderans dağılımlarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.36. Gömülme boyu değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.5.5. Gömülme boyunun aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması



Şekil 3.37. Gömülme boyu değişimine göre farklı türde donatıların maksimum aderans gerilemlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.37'den de görüleceği üzere gömülme boyunun artırılmasıyla, neredeyse tüm donatılarda, betonun yarmada çekme dayanımı ile normalleştirilmiş maksimum aderans gerilmesi değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma değerleri ise, gömülme boyunun iki kat olacak biçimde artırılmasıyla birlikte ($5d_b$ - $10d_b$ - $20d_b$) maksimum aderans gerilmesi değerlerinin %9'u ile %30'u arasında değişkenlik göstermiştir. Donatılarda aderans gerilmesindeki azalmalar, gömülme boyunun artmasıyla donatının beton ile ilk aderans aktarımına başladığı noktadan uzaklaşmasıyla düzgün olmayan aderans dağılımlarından kaynaklanmaktadır. Bu durum birçok araştırmacı tarafındanda gözlemlenmiştir [41,47,48,55,75,82,83].

Ancak $20d_b$ gömülme boyuna sahip oluklu GFRP donatılı numunenin normalleştirilmiş maksimum aderans gerilme değeri, $10d_b$ gömülme boyuna sahip numuneden yüksek çıkması beklenmedik bir durumdur. Bu durum betonun homojenliğinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

3.6. Donatılar arası mesafenin aderansa etkisi

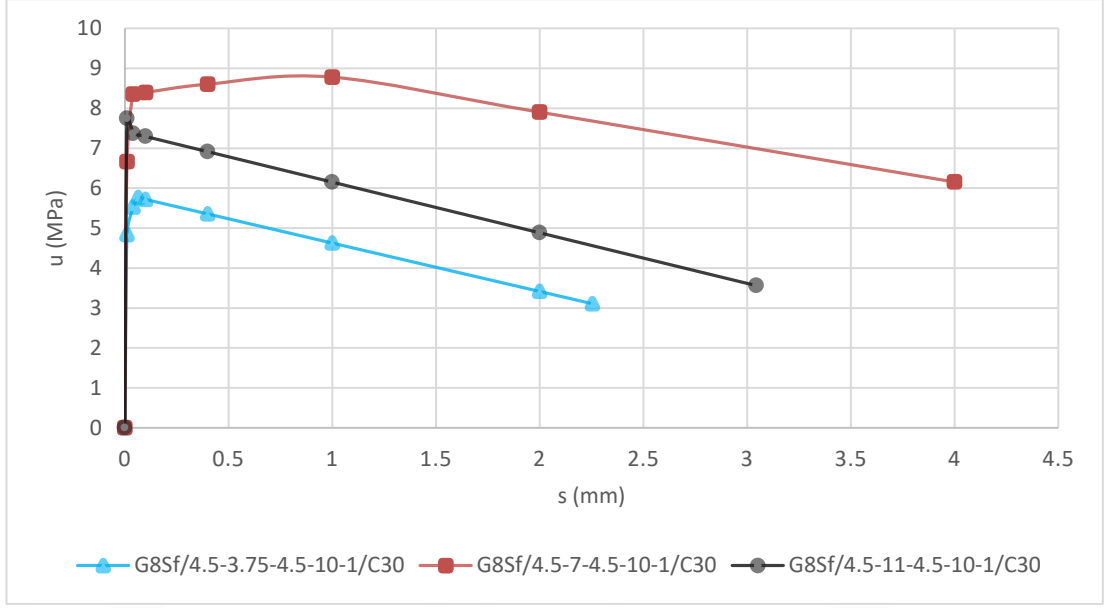
Bu çalışmada donatılar arası mesafenin, FRP donatı-beton arasındaki aderans dayanımına ve donatı-beton arasında oluşacak göçme şekillerine etkisinin araştırılabilmesi maksadıyla 12 adet mafsallı kiriş deneyi yapılmıştır. Bu kapsamda 8 mm anma çapına sahip boyuna donatılar kirişlere, boyuna donatı aralığı (donatı merkezinden-donatı merkezine) $3.75d_b$ (30 mm), $7d_b$ (56 mm) ve $11d_b$ (88 mm) olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu nedenle, kiriş enkesitleri $3.75d_b$ donatı aralığına sahip kirişlerde $102 \times 240 \text{ mm}^2$, $7d_b$ donatı aralığına sahip kirişlerde $128 \times 240 \text{ mm}^2$ ve $11d_b$ donatı aralığına sahip kirişlerde ise $160 \times 240 \text{ mm}^2$ kullanılmıştır.

Ancak bu bölüm kapsamında tüm deney grafiklerinin karşılaştırılmasında gerçek donatı arası mesafeler donatı gerçek dış çaplarına (D_o) bölünerek donatı arası mesafeler donatı çaplarına göre normalleştirilmiştir. Deney kirişlerinin donatı detayları Şekil 2.2'de gösterilmiş olup ölçülendirilmeleri ise Çizelge 2.8'de belirtilmiştir.

Donatılar arası mesafedeki değişimin aderansa etkisi, her donatı türü için ayrı ayrı gruplandırılmış aderans gerilmesi ve sıyrılma grafikleri esas alınarak belirlenmiştir. Ayrıca donatılar arası mesafenin aderansa etkisi donatı türüne göre değil, bölüm sonunda tüm donatı türleri dikkate alınarak yorumlanmıştır.

3.6.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler

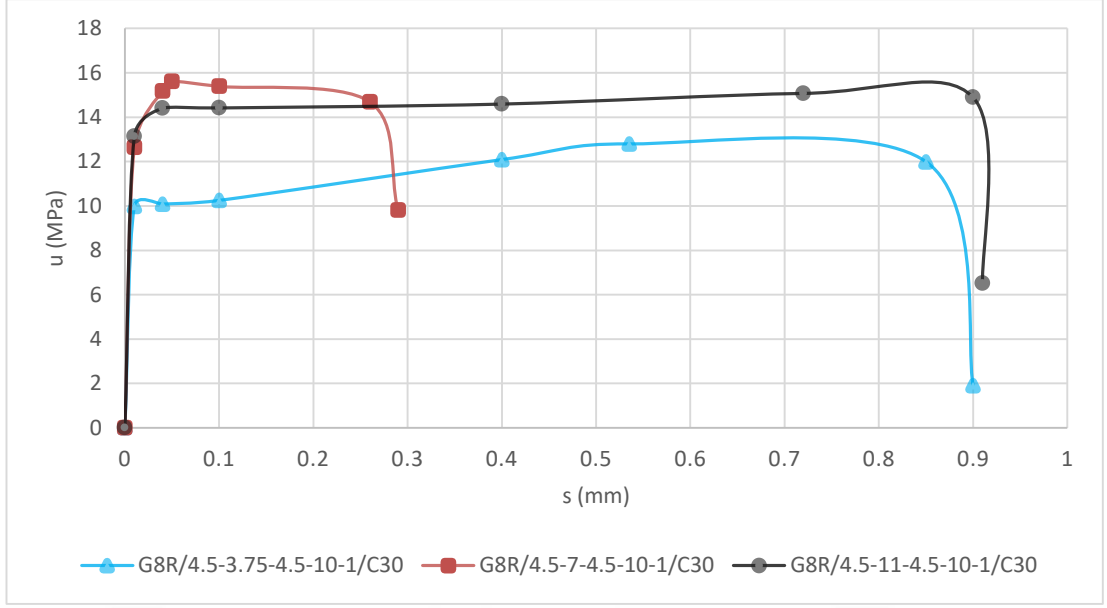
İnce taneli olarak kumlanmış GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde (Şekil 3.38), donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 3.75_{db}, 7_{db} ve 11_{db} donatı ara mesafesine sahip numunelerde sırasıyla 4.84, 6.66 ve 7.75 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.38’den de anlaşılacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında kiriş rijitliklerinin donatı ara mesafesinin artmasıyla arttığı (sırasıyla %38 ve %16) anlaşılmaktadır. Maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise 3.75_{db}, 7_{db} ve 11_{db} donatı ara mesafesine sahip numunelerde sırasıyla maksimum aderans gerilme değerleri 5.76, 8.78 ve 7.75 MPa’dır. Bu sonuçlardan, 7_{db} donatı ara meafesine sahip olan kirişde ilginç bir şekilde maksimum aderans gerilmesi yüksek çıktığı görülmektedir. Bu kirişde donatıların ilk sıyrılmadan sonraki aderans gerilmesi-sıyrılma davranışları diğer iki kirişden farklı olmuştur. Hatta bu kirişdeki donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C40 numunesindeki davranışa çok benzemektedir. Muhtemelen bu durum, betonun tam aderansın sağlandığı noktadaki dağılımı ile alakalıdır. Ancak bu kirişdeki donatıların maksimum aderans gerilmesinden sonraki aderans gerilmesinin azalış eğilimleri diğer kirişlerdeki donatılar ile benzer olmuştur.



Şekil 3.38. Donatılar arası mesafenin değişimine göre ince taneli kumlanmış GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

3.6.2. Nervürlü GFRP donatılı kirişler

Nervürlü GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde (Şekil 3.39), donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 3.75d_b, 7d_b ve 11d_b donatı ara mesafesine sahip numunelerde sırasıyla 9.98, 12.65 ve 13.14 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.39'dan da anlaşılabileceği üzere 0.01 mm sıyrılma anında kirişlerin rijitliklerinin donatı ara mesafesinin 3.75d_b'den 7d_b'ye çıkarılması ile %27 arttığı, 7d_b'den 11d_b'ye çıkarılması ile de %4 arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 12.79, 15.62 ve 15.08 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.39'dan da dikkat edileceği üzere 7d_b donatı ara mesafesine sahip olan numune, ince taneli kumlanmış GFRP donatılarda olduğu gibi beklenmedik bir şekilde 11d_b donatı mesafesine sahip numunelerin aderans gerilmesinden yüksek aderans gerilmesine sahiptir. Bu durum belkide bu seri numunelerdeki (7d_b donatı ara mesafesine sahip) betonun sıkışma koşullarının diğer serilere göre daha iyi olmasından kaynaklanabilir.



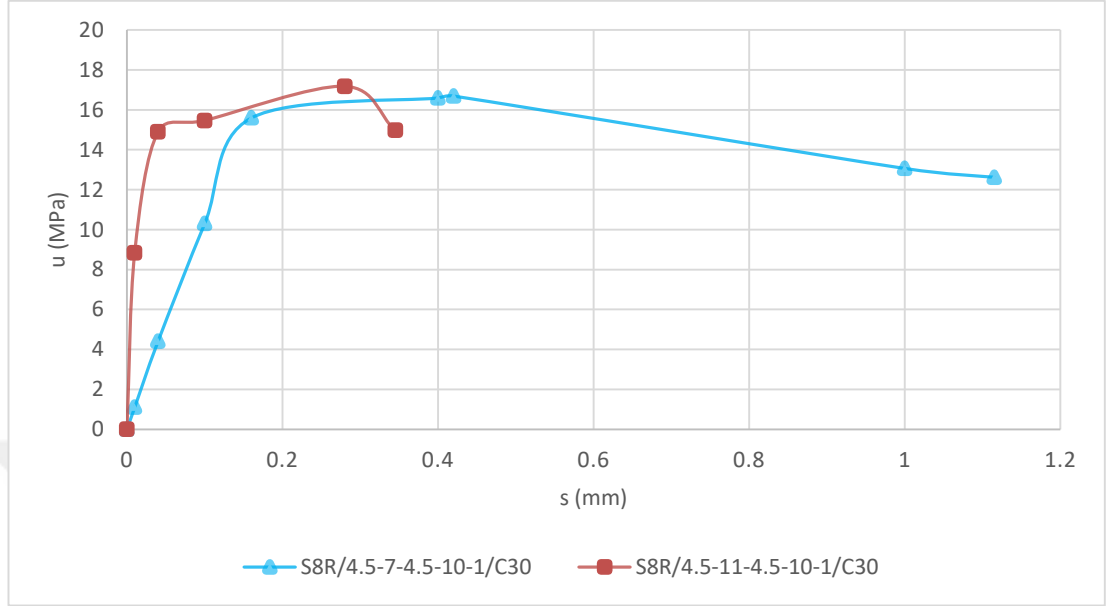
Şekil 3.39. Donatılar arası mesafenin değişimine göre nervürlü GFRP donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Nervürlü GFRP donatılarda aderans göçmesi, donatıyı saran nervürlerin ani bir şekilde kırılması ile ani olarak ortaya çıkmıştır. Ancak aderans gerilmesinin artmasıyla donatılardaki nervürlerin yavaşça ezilmelerinden dolayı sanki sıyrılma olmuş gibi bir davranış sergilemişlerdir.

3.6.3. Çelik donatılı kirişler

Nervürlü çelik donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri 7d_b ve 11d_b donatı ara mesafesine sahip numunelerde sırasıyla 1.10 ve 8.84 MPa olarak ölçülmüştür. Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 16.69 ve 17.18 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.40'dan da görüldüğü üzere 7d_b ve 11d_b pas payına sahip kirişlerde 4d_b lik donatı ara mesafesi artışı maksimum aderans gerilmesinde küçük bir artış sağlamış gibi gözükmemektedir. Ancak iki numunede donatı-beton arasında tam aderansın sağlanmasından dolayı donatılar akma sınırlarına ulaşmıştır. Bu nedenle bu

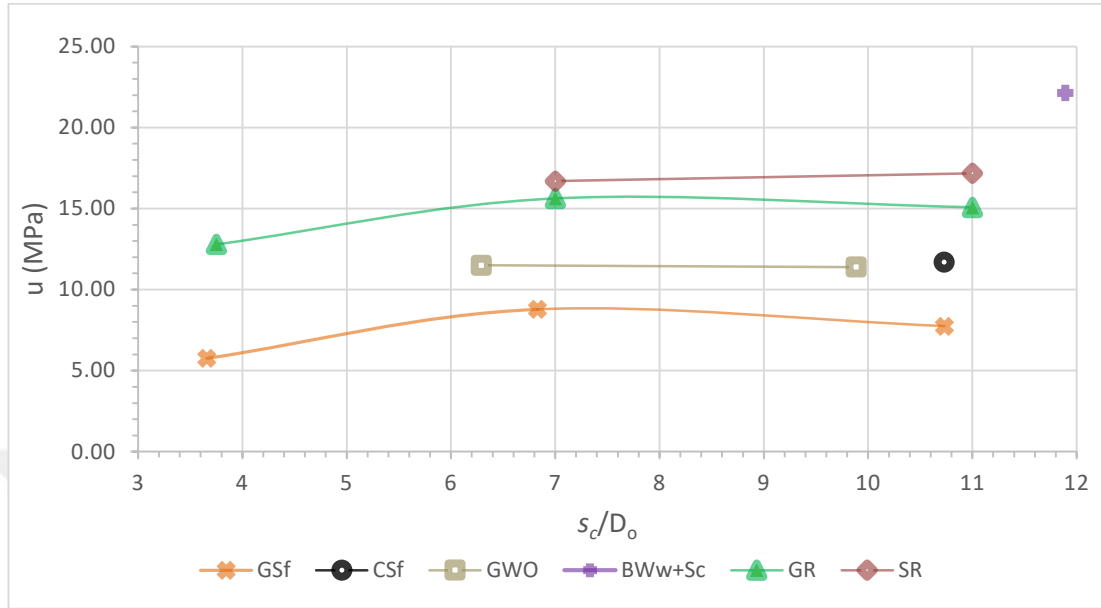
küçük aderans gerilmesi farkı, donatıların akma sınırlarının değişkenliğinden kaynaklı olarak değişebilmektedir.



Şekil 3.40. Donatılar arası mesafenin değişimine göre çelik donatıların aderans gerilmesi-sıyrılma davranışı

Ancak kirişlerin başlangıç rijitlikleri aynı değildir. 7d_b donatı aralığına sahip numunenin donatısının beton içinde oturmasından kaynaklı olduğu düşünülen bir sıyrılma meydana gelmesine rağmen, maksimum aderans gerilmelerinde oluşan sıyrılma miktarları benzerdir.

3.6.4. Donatılar arası mesafenin aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması



Şekil 3.41. Donatılar arası mesafenin değişimine göre donatıların maksimum aderans gerilmelerinin karşılaştırılması

Şekil 3.41'den de görüleceği üzere donatılar arası mesafenin $3.75d_b$ 'den $7d_b$ 'ye çıkarılmasıyla, aderans gerilmeleri, ince taneli kumlanmış GFRP donatılarda %52 ve nervürlü GFRP donatılarda ise %22 artmıştır. Ancak donatılar arası mesafenin $7d_b$ 'den daha büyük olduğu durumlarda FRP donatı-beton aderansına ve çelik donatı-beton aderansına, donatılar arası mesafenin etkisi yok denecek kadar az olduğu Şekil 3.41'den de açıkça görülmektedir.

Donatılar arası mesafenin $3.75d_b$ ve $3.75d_b$ 'den daha fazla olduğu tüm durumlarda FRP donatılı kirişlerin göçmesi donatı sıyrılmalarından dolayı olmuştur.

3.7. Etriye varlığının aderansa etkisi

Bu çalışmada etriye etkisinin aderans gerilmesine etkisi ve aderans davranışını nasıl değiştirdiği incelenmiştir. Bu sebeple, mafsallı kirişler etriyeli ve etriyesiz olmak üzere

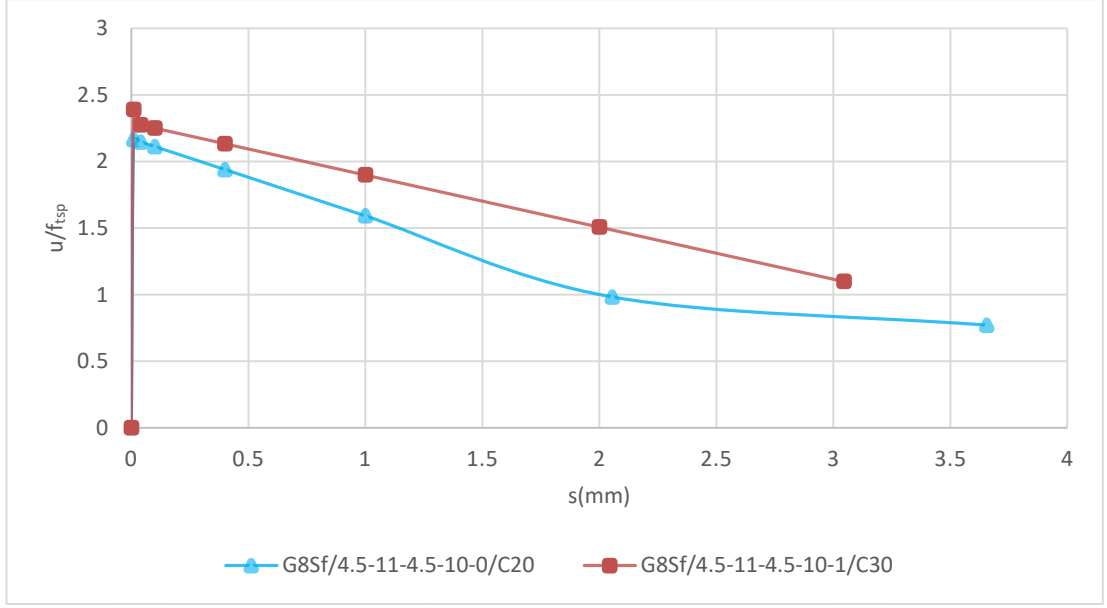
iki şekilde yapılmıştır. Etriyeli kirişlerin donatı detayları Şekil 2.2’de sunulmuştur. Boyuna donatılar ile ilgili detaylar ise Çizelge 2.4’de sunulmuştur. Etriyesiz yapılan kirişlerde, tıpkı etriyeli kirişlerdeki gibi tüm detay ve donatılar aynıdır. Ancak, bu kirişlerde etriyeler kullanılmamıştır. Bu kapsamda 8 mm anma çapına sahip boyuna donatılar $160 \times 240 \text{ mm}^2$ enkesite sahip kirişlere, $10d_b$ (80 mm), gömülme boylarında yan ve alt pas payları $4.5d_b$ (36 mm) olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Kirişlerde kullanılan etriye varlığının aderansa etkisi ve aderans davranışını nasıl değiştirdiği her donatı türü için ayrı ayrı gruplandırılmış aderans gerilmesi ve sıyrılma grafikleri esas alınarak belirlenmiştir. Ayrıca kirişlerde kullanılan etriyenin aderansa etkisi donatı türüne göre değil, bölüm sonunda tüm donatı türleri dikkate alınarak yorumlanmıştır.

3.7.1. İnce taneli kumlanmış GFRP donatılı kirişler

İnce taneli olarak kumlanmış GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde (Şekil 3.42), donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki beton basınç dayanımına göre normalleştirilmiş aderans gerilmeleri etriyeli ve etriyesiz numunelerde sırasıyla 2.16 ve 2.39 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değerler aynı zamanda bu kirişlerin normalleştirilmiş maksimum aderans gerilmeleridir. Şekil 3.42’den de anlaşılabacağı üzere kiriş rijitliklerinin etriyenin varlığı ile %11 arttığı anlaşılmaktadır.

İki kirişde de, donatıların maksimum aderans gerilmesinden sonraki aderans gerilmesinin azalış eğilimleri benzer ve sürtünme mekanizması yoluyla olmuştur.

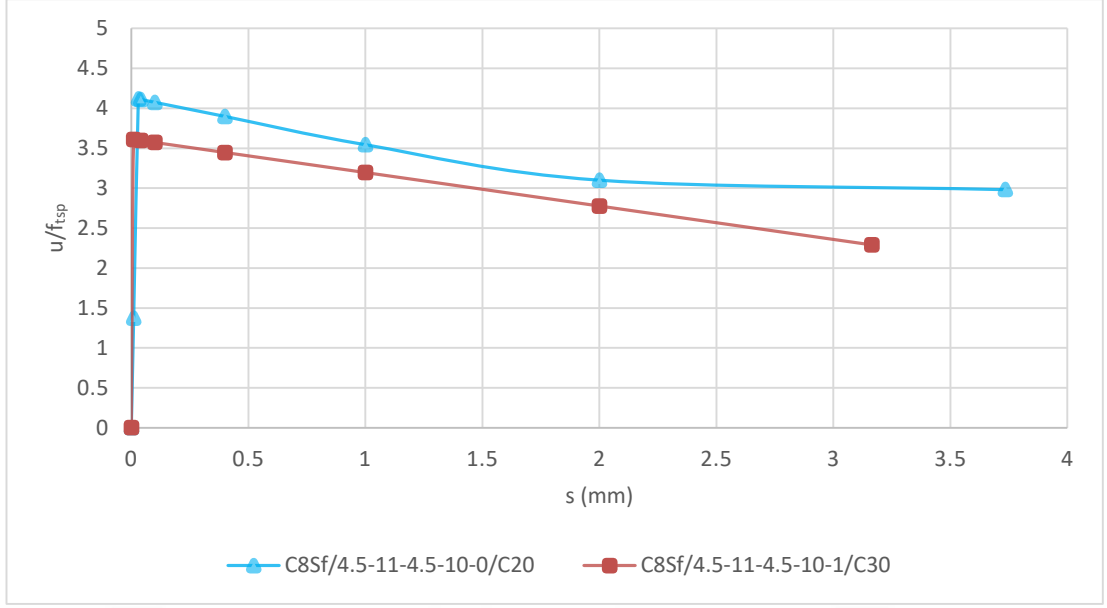


Şekil 3.42. Etriye varlığının, ince taneli kumlanmış GFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi

3.7.2. İnce taneli kumlanmış CFRP donatılı kirişler

İnce taneli olarak kumlanmış GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde (Şekil 3.43), donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki beton basınç dayanımına göre normalleştirilmiş aderans gerilmeleri etriyeli ve etriyesiz numunelerde sırasıyla 1.37 ve 3.59 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 3.43'den de anlaşılacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anındaki normalleştirilmiş aderans gerilmesi değerleri etriye varlığı ile aşırı oranda artmıştır. Ancak bu durum etriyesiz kirişlerde donatıların oturmasından kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü normalleştirilmiş maksimum aderans gerilmeleri karşılaştırıldığında, etriyesiz kirişlerde oluşan gerilmeler (4.12 MPa), etriyeli kirişlerden (3.61 MPa) sadece %14 fazladır. Bu durum ince taneli kumlanmış donatılı numunelerde tespit edilen sonuçların tam tersidir. Bu konuya Bölüm 3.7.1'de açıklık getirilmeye çalışılmıştır.

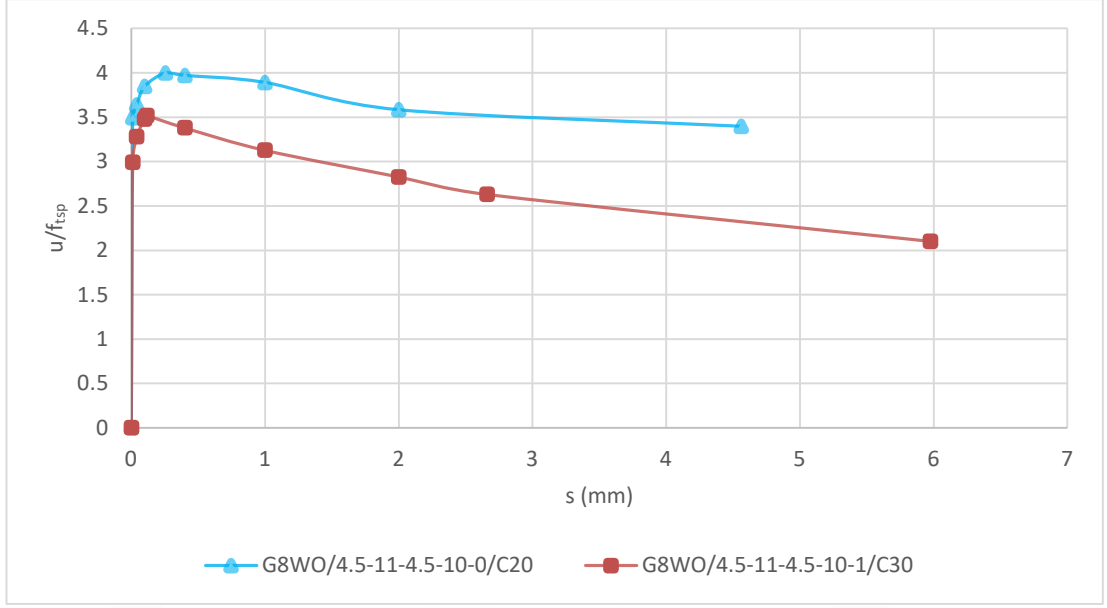
İki kirişde de, donatıların maksimum aderans gerilmesinden sonraki aderans gerilmesinin azalış eğilimleri benzer ve sürtünme mekanizması yoluyla olmuştur.



Şekil 3.43. Etriye varlığının, ince taneli kumlanmış CFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi

3.7.3. Oluklu GFRP donatılı kirişler

Oluklu GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde (Şekil 3.44), donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki beton basınç dayanımına göre normalleştirilmiş aderans gerilmeleri etriyeli ve etriyesiz numunelerde sırasıyla 3.48 ve 2.99 MPa olarak ölçülmüştür. Normalleştirilmiş maksimum aderans gerilmeleri ise sırasıyla 4.00 MPa ve 3.52 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden, tıpkı ince taneli kumlanmış CFRP donatılarda olduğu gibi, etriyesiz kirişlerin maksimum normalleştirilmiş aderans gerilmesi değerleri, etriyeli kirişlere göre %14 fazladır. Ancak, etriyesiz kiriş maksimum aderans değerine ulaşmasından sonra aderans gerilmesi, etriyeli kirişdekinden daha yavaş olmuştur. Şekil 3.44'e dikkat edilirse etriyeli kirişlerin aderans düşüşü diğer etriyeli oluklu GFRP donatılı kirişlerdekine benzer şekilde sürtünme ve mekanik kilitlenme mekanizması ile gerçekleşmiştir. Ancak etriyesiz kirişlerde bu durum, etriyenin yokluğundan kaynaklı olarak, donatı oluğunun içine daha çok betonun temas etmesi sonucu mekanik kilitlenme etkisinin artmasıyla olukların yavaş yavaş ezilmesinden kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir.

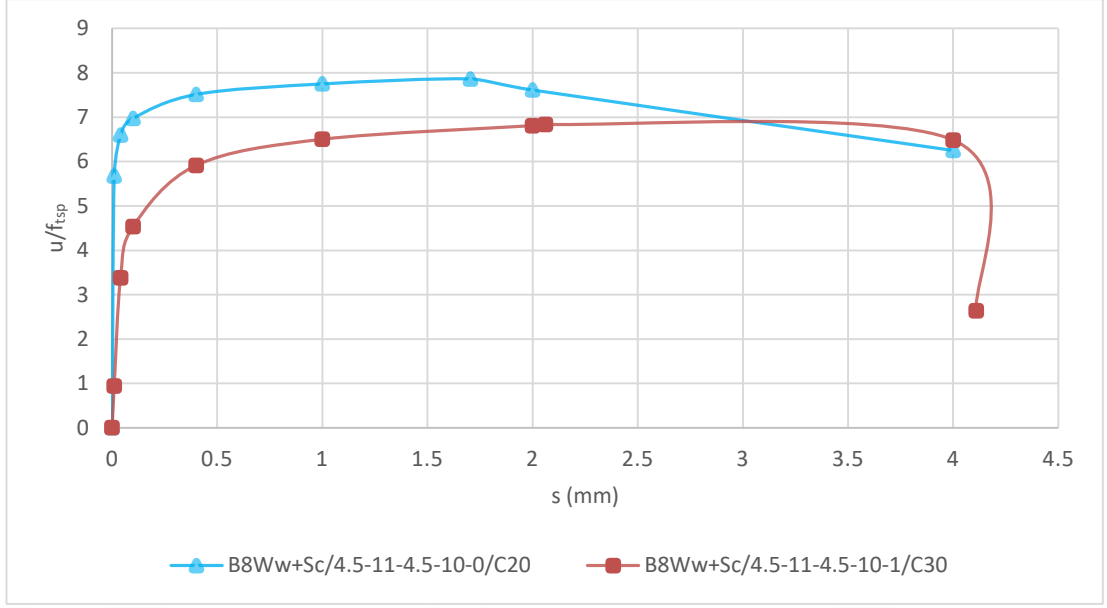


Şekil 3.44. Etriye varlığının, oluklu GFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi

3.7.4. İri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatılı kirişler

İri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde (Şekil 3.45), donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki beton basınç dayanımına göre normalleştirilmiş aderans gerilmeleri etriyeli ve etriyesiz numunelerde sırasıyla 5.68 ve 0.94 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak bu durum etriyeli kirişlerde donatıların oturmasından kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü normalleştirilmiş maksimum aderans gerilmeleri karşılaştırıldığında, etriyesiz kirişlerde oluşan gerilmeler (7.86 MPa), etriyeli kirişlerden (6.84 MPa) %15 fazladır.

Kirişlerdeki donatıların maksimum aderans gerilmelerine ulaşmalarına kadar ki rijitlikler kumlama kalitesine ve donatı bombelenme durumuna göre değişiklik göstermiştir.

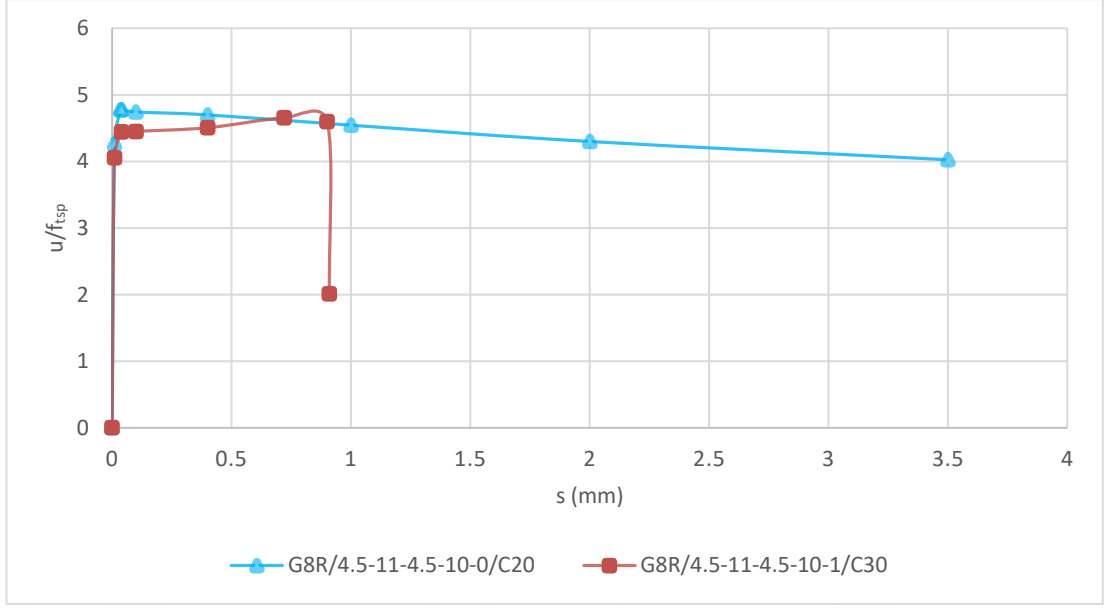


Şekil 3.45. Etriye varlığının, iri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi

3.7.5. Nervürlü GFRP donatılı kirişler

Nervürlü GFRP donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde (Şekil 3.46), donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki normalleştirilmiş aderans gerilmeleri etriyesiz kirişlerde 4.27 MPa, etriyeli kirişlerde ise 4.06 MPa'dır. Şekil 3.46'dan da anlaşılabacağı üzere 0.01 mm sıyrılma anında kiriş rijitliklerinin etriye etkisiyle %5 azaldığı anlaşılmaktadır. Normalleştirilmiş maksimum aderans gerilme değerleri karşılaştırıldığında ise neredeyse diğer tüm FRP donatılarda olduğu gibi etriyesiz kirişte oluşan aderans gerilmesi değeri (4.78 MPa), etriyeli kirişte oluşan aderans gerilmesi değerinden (4.66 MPa) yüksek olarak gözlemlenmiştir.

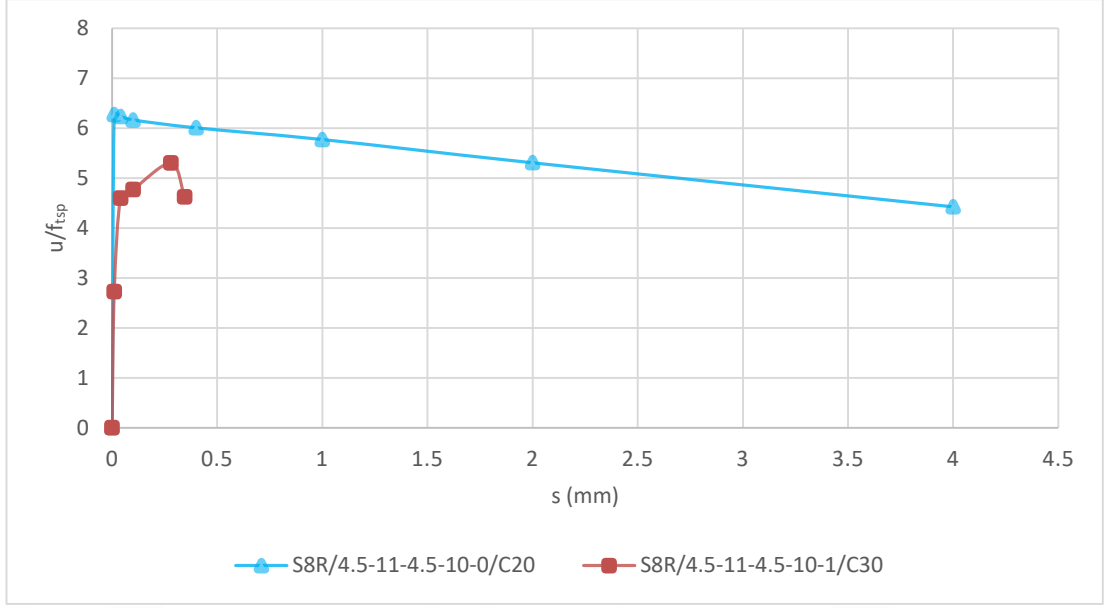
Ancak donatıların maksimum aderans gerilme değerlerinden sonraki azalış eğilimleri karşılaştırıldığında etriyeli kirişteki FRP donatıların dişlerinin kırılması sonucu ani bir aderans düşüşü gerçekleşmesine rağmen, etriyesiz kirişte bu durum dişlerin yavaş yavaş ezilmesi şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.46. Etriye varlığının, nervürlü GFRP donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi

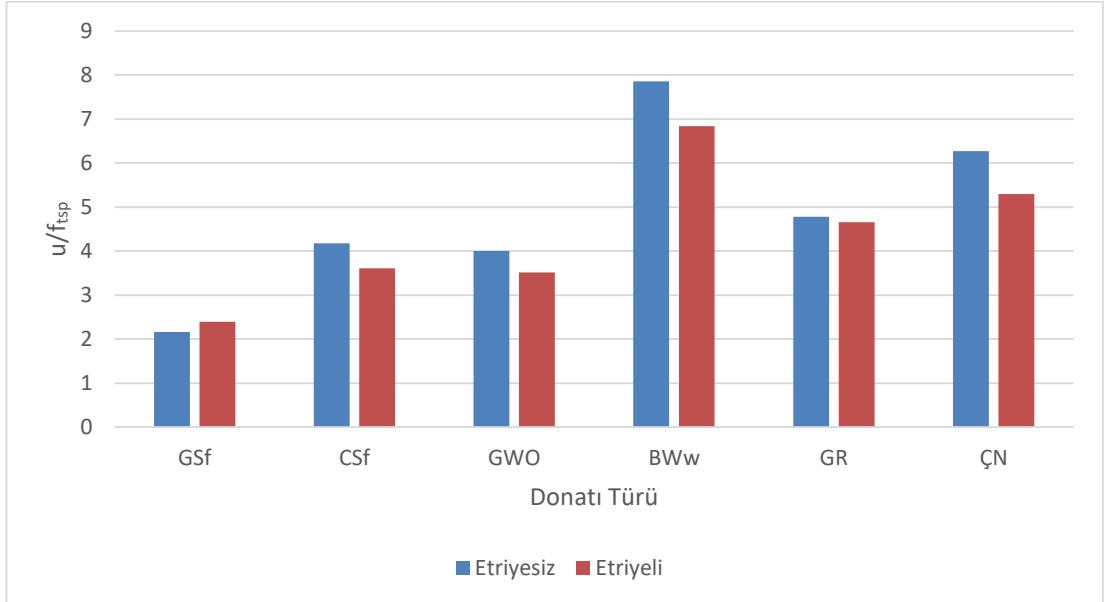
3.7.6. Çelik donatılı kirişler

Nervürlü çelik donatılar ile oluşturulmuş mafsallı kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri incelendiğinde, donatıların 0.01 mm sıyrılma anındaki aderans gerilmeleri etriyesiz ve etriyeli numunelerde sırasıyla 6.27 ve 2.73 MPa olarak ölçülmüştür. Maksimum aderans gerilmesi değerleri ise sırasıyla 6.27 ve 5.30 MPa olarak tespit edilmiştir. Ancak etriyeli kirişde aderansın tam olarak sağlanmasından dolayı donatılar akma sınırlarına aşarak akma gerilmelerine ulaşmışlardır. Ancak etriyesiz kirişdeki donatılar sıyrılmıştır. Normalleştirilmiş maksimum aderans gerilmeleri arasında gözlemlenen 0.97 MPa'lık fark donatıların akma gerilmelerinin değişkenliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.47. Etriye varlığının, çelik donatılarda, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisi

3.7.7. Kirişlerde etriye varlığının aderansa etkisinin donatı türlerine göre karşılaştırılması



Şekil 3.48. Etriye varlığının, normalleştirilmiş aderans gerilmesine etkisinin farklı donatı türlerine göre karşılaştırılması

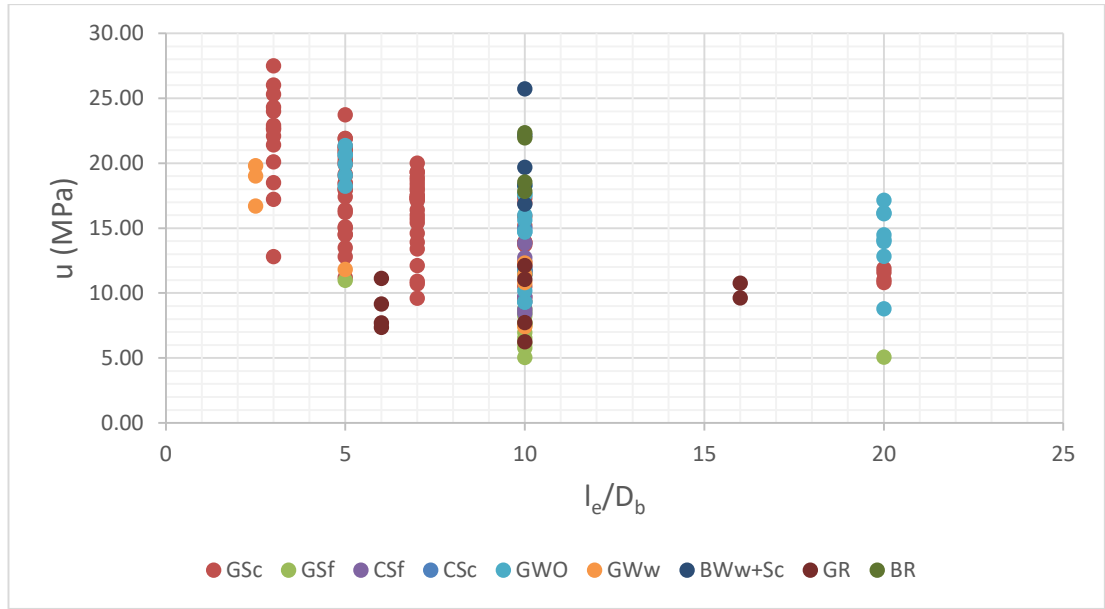
Şekil 3.48’den de görüleceği üzere kirişlerde etriye kullanılmasıyla, donatılarda oluşan aderans gerilmesi (ince taneli kumlanmış GFRP donatılı kiriş numunesi hariç) düşmüştür. Çelik enine donatıların, FRP donatılara göre yüzey sertliğinin fazla olmasından dolayı FRP donatıların yüzeyini soymasıyla aderansın düştüğü gözlemlenmiştir. Bu aderans düşüşü, FRP donatılarda maksimum %15 dolaylarında olmuştur. Ancak literatürdeki çalışmalar bu sonuçların aksi ya da etriye varlığının aderansı etkilemediğinden bahsetmektedir. Bu çalışmalar ya istatistik kökenli [85] ya da çekip çıkarma deneyi kökenlidir [82].

Çelik donatılı numunelerde etriye varlığının aderansa etkisi %18 olmasına karşın, etriyesiz donatılarda sıyrılma göçmesinin, etriyeli donatılarda ise tam aderansın gerçekleşmesinden dolayı kıyaslama yapılamamıştır.

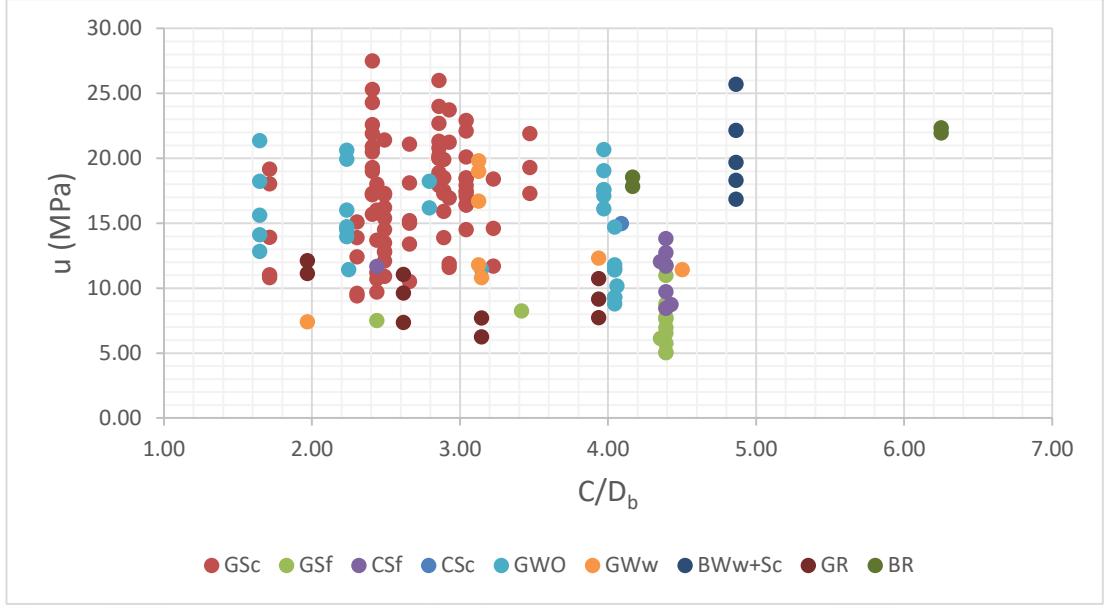
4. FRP DONATI-BETON ARASINDAKİ ADERANS VE KENETLENME BOYU DENKLEMLERİNİN BELİRLENMESİ

4.1. Aderans Gerilmesi ve Kenetlenme Boyu Denklemine Tespiti

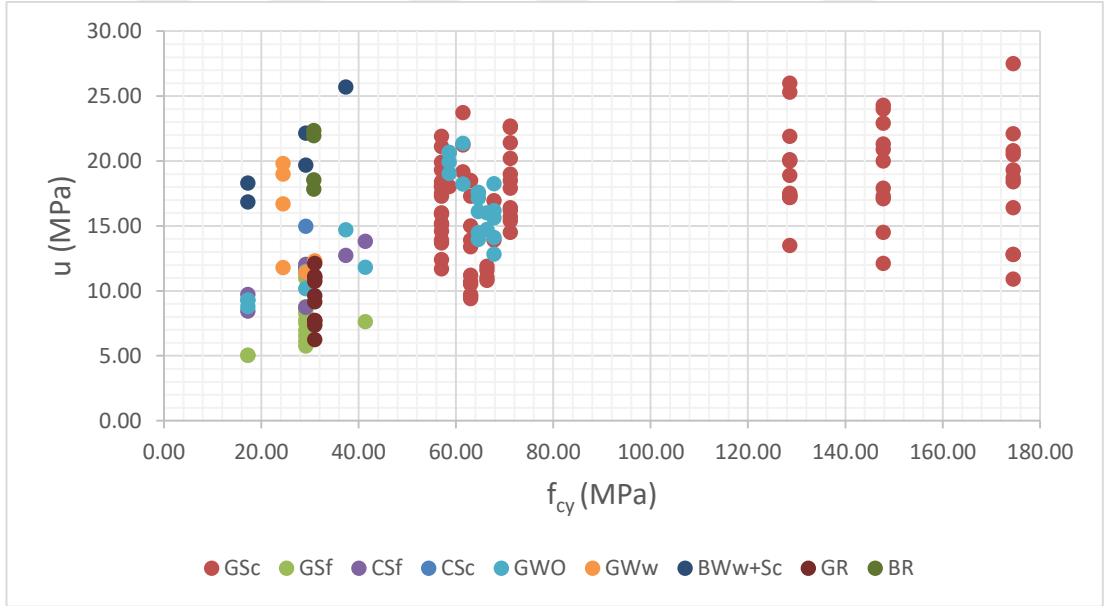
Bu çalışmada, aderans gerilmesi ve kenetlenme boyu bağıntısının tespitinde çoklu doğrusal regresyon analizinden yararlanılmıştır. Bu maksatla yapılan regresyon analizinde kullanılan veri tabanında veriler iki kısımdan oluşmaktadır. Veri tabanında birinci kısım, bu çalışmadan elde edilen 51 adet mafsallı kiriş deney verisinden oluşmaktadır. İkinci kısım ise literatürde FRP donatı-beton aderansını belirlemek için yapılan 134 adet mafsallı kiriş deneyinden derlenmiştir [31,60,64,66,122–125]. Oluşturulan veri tabanı toplam 185 adet mafsallı kiriş deneyi içermektedir. Bu çalışmada kullanılan veri tabanı çalışmanın sonunda Çizelge B.2’de verilmiştir. Veri tabanında kullanılan deney değişkenlerinin, maksimum aderans gerilmesine göre dağılımları Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



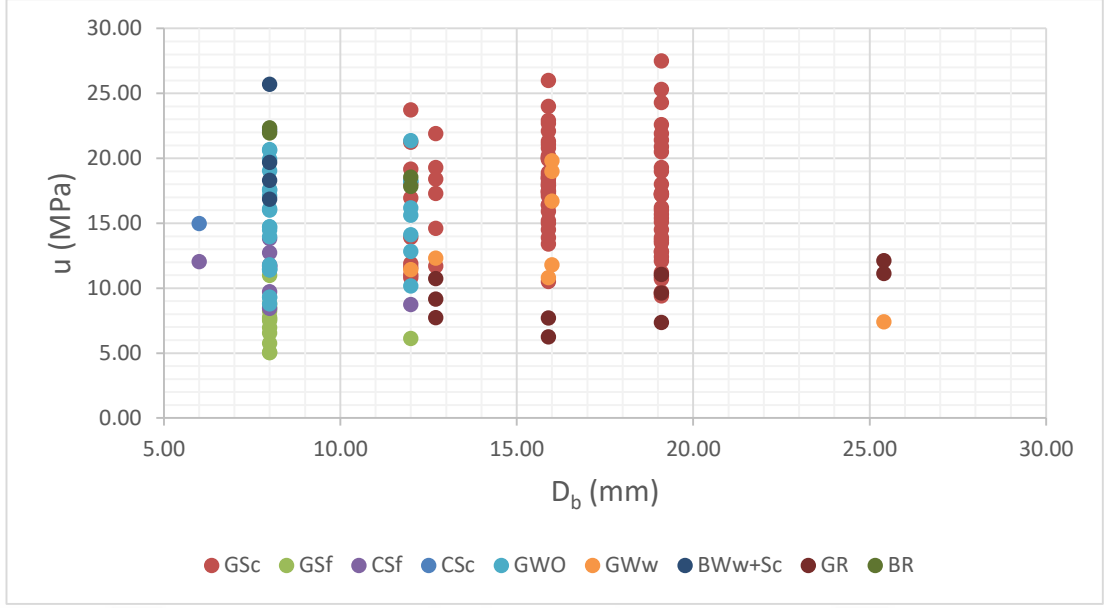
Şekil 4.1. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin gömülme boyuna göre maksimum aderans gerilme dağılımları



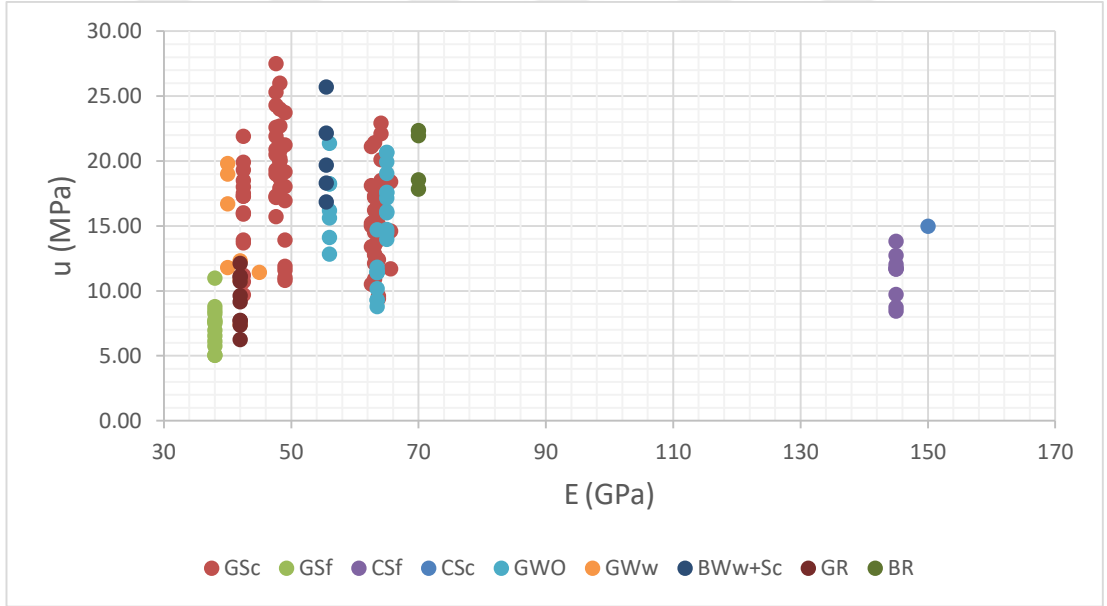
Şekil 4.2. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin alt pas payına göre maksimum aderans gerilme dağılımları



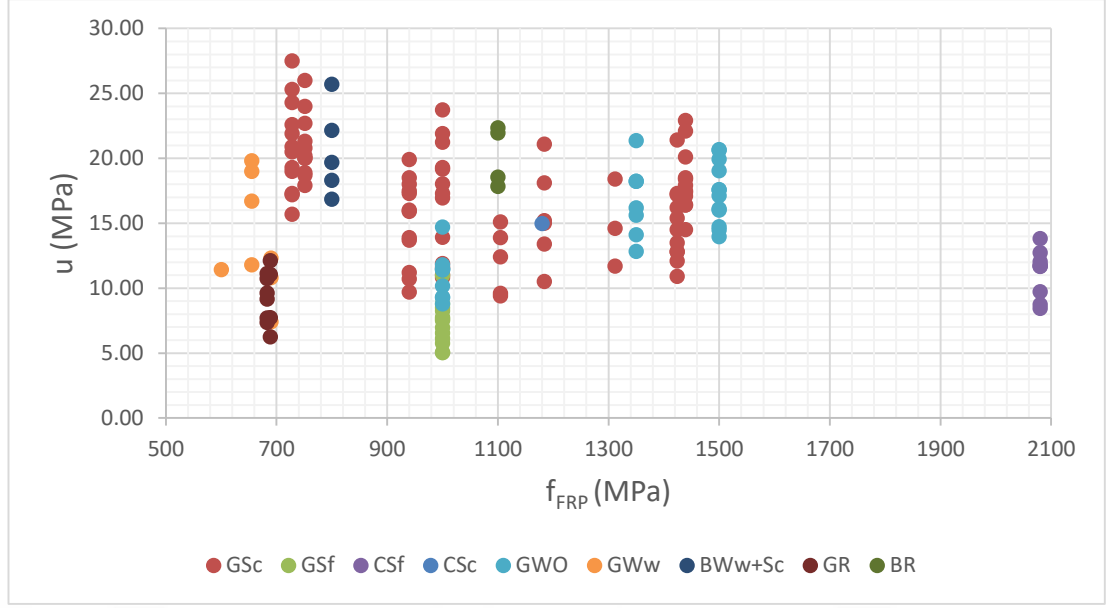
Şekil 4.3. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin beton basınç dayanımına göre maksimum aderans gerilme dağılımları



Şekil 4.4. Veri tabanınındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin donatı çapına göre maksimum aderans gerilme dağılımları



Şekil 4.5. Veri tabanınındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin elastisite modüllerine göre maksimum aderans gerilme dağılımları



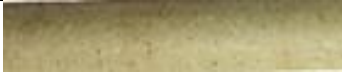
Şekil 4.6. Veri tabanındaki 185 adet mafsallı kiriş deneyinin donatı çekme gerilmelerine göre maksimum aderans gerilme dağılımları

Regresyon analizlerinde, deneylerden elde edilen maksimum aderans gerilmesi değerleri bağımlı değişken olarak tanımlanmıştır. Donatı lif türü ise donatı yüzey özelliğine bağlı bir bağımsız değişken olarak tanımlanmıştır. Ayrıca donatı çapı, donatı gömülme derinliği, betonun yarmada çekme dayanımı da bağımsız değişken olarak tanımlanmıştır. Bu değişkenler ve bu değişkenlerin veri tabanlarındaki aralıkları Çizelge 2.16'da gösterilmiştir. Çoklu regresyon analizi sonucunda tespit edilen aderans gerilmesi denklemi, Eşitlik 4.1'de gösterilmiştir.

$$u_{max} = \left(S - 0.2817f_{tsp} + 6.706 \frac{D_b}{l_e} - 0.1237D_o \right) f_{tsp} \quad (4.1)$$

Burada, u_{max} =maksimum aderans gerilmesi (MPa); f_{tsp} =betonun yarmada çekme dayanımı (MPa); D_b =donatı anma çapı (mm); l_e =donatı gömülme boyu (mm); D_o =donatı dış çapı (mm); S=donatı lif türü ve yüzey özelliği katsayısıdır (Bkz. Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Eşitlik 4.1 için S katsayıları

	Donatı Türü ve Yüzey Özelliği	S
	GSf	3.559
	CSf	4.806
	GSc*	5.457
	CSc	5.683
	GR	5.083
	BR*	7.526
	GWO	4.960
	GW _w	5.854
	BW _w +Sc	8.047

*GSc ve BR donatı görselleri temsilidir.

Regresyon analizinden elde edilen aderans denkleminde bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri tanımlama oranı (R²) %87.94'dür. Ancak alt pas payı, donatı elastisite modülü ve donatı çekme gerilmesi gibi değişkenler kullanılarak bu tanımlayıcılık katsayısı dahada yükseltilebilir. Hatta regresyon analizinde optimizasyon işlemi yapılarak ve ikinci dereceden ifadeler kullanılarak daha büyük katsayılar da elde edilebilir.

Maksimum aderans gerilmesi denkleminin (Eşitlik 4.1) optimizasyonu yapılarak elde edilen denklemin çoklu regresyon analizi yapılarak elde edilen tanımlayıcılık katsayısı %92.28'e çıkarılabilir. Elde edilen Eşitlik 4.2 ve S katsayıları Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

$$u_{max} = \left(S - 0.4476f_{tsp} + 14.11 \frac{D_b}{l_e} - 0.4026D_o + 0.00497D_o^2 - 1.216f_{tsp} \frac{D_b}{l_e} + 0.02615f_{tsp}D_o \right) f_{tsp} \quad (4.2)$$

Çizelge 4.2. Eşitlik 4.2 için S katsayıları

GSf	CSf	GSc	CSc	GR	BR	GWO	GWw	BWw+Sc
5.117	6.360	7.123	7.036	6.912	9.245	6.782	7.437	9.467

Maksimum aderans gerilmesi denkleminde (Eşitlik 4.1) donatı çekme gerilmesi değişkeninin (f_{FRP} (MPa)) eklenmesiyle çoklu regresyon analizi yapılarak elde edilen denklemin tanımlayıcılık katsayısı %89.71 olarak belirlenmiştir. Elde edilen denklemden (Eşitlik 4.3) S katsayıları Çizelge 4.3’de sunulmuştur.

$$u_{max} = \left(S - 0.2455f_{tsp} + 6.709 \frac{D_b}{l_e} - 0.12795D_o - 0.000793f_{FRP} \right) f_{tsp} \quad (4.3)$$

Çizelge 4.3. Eşitlik 4.3 için S katsayıları

GSf	CSf	GSc	CSc	GR	BR	GWO	GWw	BWw+Sc
4.273	6.376	6.111	6.530	5.702	8.320	5.826	6.334	8.604

Maksimum aderans gerilmesi denkleminde (Eşitlik 4.1), donatı çekme gerilmesi değişkeninin (f_{FRP} (MPa)) eklenmesinden sonra optimizasyonlu çoklu regresyon analizi yapılarak elde edilen denklemin tanımlayıcılık katsayısı %93.32’dir. Elde edilen denklemden (Eşitlik 4.4) S katsayıları Çizelge 4.4’de sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
u_{max} = & \left(S - 0.4240f_{tsp} + 15.66 \frac{D_b}{l_e} - 0.3739D_o - 0.000084f_{FRP} \right. \\
& + 0.00456D_o^2 - 1.033f_{tsp} \frac{D_b}{l_e} + 0.02198f_{tsp}D_o \\
& \left. - 0.00260 \frac{D_b}{l_e} f_{FRP} \right) f_{tsp}
\end{aligned} \quad (4.4)$$

Çizelge 4.4. Eşitlik 4.4 için S katsayıları

GSf	CSf	GSc	CSc	GR	BR	GWO	GWw	BWw+Sc
4.978	6.592	6.965	6.972	6.702	9.123	6.673	7.099	9.276

Maksimum aderans gerilmesi denkleminde (Eşitlik 4.1) donatı elastisite modülü değişkeninin (E_{FRP} (GPa)) eklenmesiyle çoklu regresyon analizi yapılarak elde edilen denklemin tanımlayıcılık katsayısı %88.57'dir. Elde edilen denklemden (Eşitlik 4.5) S katsayıları Çizelge 4.5'de sunulmuştur.

$$u_{max} = \left(S - 0.2762f_{tsp} + 6.803 \frac{D_b}{l_e} - 0.1270D_o - 0.01573E_{FRP} \right) f_{tsp} \quad (4.5)$$

Çizelge 4.5. Eşitlik 4.5 için S katsayıları

GSf	CSf	GSc	CSc	GR	BR	GWO	GWw	BWw+Sc
4.157	7.088	6.307	8.037	5.844	8.633	5.932	6.520	8.919

Maksimum aderans gerilmesi denkleminde (Eşitlik 4.1), donatı elastisite modülü değişkeninin (E_{FRP} (GPa)) eklenmesinden sonra optimizasyonlu çoklu regresyon analizi yapılarak elde edilen denklemin tanımlayıcılık katsayısı %93.54'e çıkarılabilir. Elde edilen denklemden (Eşitlik 4.6) S katsayıları Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
u_{max} = & \left(S - 0.4641f_{tsp} + 17.80 \frac{D_b}{l_e} - 0.4051D_o + 0.1871E_{FRP} \right. \\
& + 0.00564D_o^2 - 0.001734E_{FRP}^2 - 0.977f_{tsp} \frac{D_b}{l_e} \\
& \left. + 0.02278f_{tsp}D_o - 0.0964 \frac{D_b}{l_e} E_{FRP} \right) f_{tsp}
\end{aligned} \quad (4.6)$$

Çizelge 4.6. Eşitlik 4.6 için S katsayıları

GSf	CSf	GSc	CSc	GR	BR	GWO	GWw	BWw+Sc
0.45	16.66	2.34	19.00	1.97	4.89	2.05	2.54	4.53

Maksimum aderans gerilmesi denkleminde (Eşitlik 4.1) alt pas payı değişkeninin (C) eklenmesiyle çoklu regresyon analizi yapılarak elde edilen denklemin tanımlayıcılık katsayısı %88.67'dir. Burada, alt pas payı değişkeni olan C, donatı dış çapının katı olarak yazılmalıdır. Elde edilen denklemden (Eşitlik 4.7) S katsayıları Çizelge 4.7'de sunulmuştur.

$$u_{max} = \left(S - 0.2684f_{tsp} + 6.575 \frac{D_b}{l_e} - 0.1020D_o + 0.1836C \right) f_{tsp} \quad (4.7)$$

Çizelge 4.7. Eşitlik 4.7 için S katsayıları

GSf	CSf	GSc	CSc	GR	BR	GWO	GWw	BWw+Sc
2.581	3.829	4.505	4.760	4.152	6.322	4.122	4.892	6.967

Maksimum aderans gerilmesi denkleminde (Eşitlik 4.1), alt pas payı değişkeninin (C) eklenmesinden sonra optimizasyonlu çoklu regresyon analizi yapılarak elde edilen denklemin tanımlayıcılık katsayısı %92.54'tür. Burada, alt pas payı değişkeni olan C, donatı dış çapının katı olarak yazılmalıdır. Elde edilen denklemden (Eşitlik 4.8) S katsayıları Çizelge 4.8'de sunulmuştur.

$$u_{max} = \left(S - 0.4271f_{tsp} + 14.29 \frac{D_b}{l_e} - 0.3695D_o + 0.1188C \right. \\ \left. + 0.00470D_o^2 - 1.252f_{tsp} \frac{D_b}{l_e} + 0.02386f_{tsp}D_o \right) f_{tsp} \quad (4.8)$$

Çizelge 4.8. Eşitlik 4.8 için S katsayıları

GSf	CSf	GSc	CSc	GR	BR	GWO	GWw	BWw+Sc
4.255	5.499	6.249	6.222	6.059	8.225	5.968	6.530	8.552

Bahsedilen değişkenlerin ve optimizasyonun etkisiyle tanımlayıcılık katsayısındaki artışlar ve değerleri Çizelge 4.9’da karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.9. Aderans gerilmesi denklemlerinin karşılaştırılması

Eşitlik	Eşitlik 4.1’e Eklenen Değişken	Optimizasyon	R ² (%)	R ² artışı (%)
4.1	-	-	87.94	0
4.2	-	+	92.28	4.34
4.3	f _{FRP}	-	89.71	1.77
4.4	f _{FRP}	+	93.32	5.38
4.5	E _{FRP}	-	88.57	0.63
4.6	E _{FRP}	+	93.54	5.60
4.7	C	-	88.67	0.73
4.8	C	+	92.54	4.60

Çizelge 4.9’dan da görüleceği üzere, en düşük tanımlayıcılık katsayısı Eşitlik 4.1’e aittir. Optimizasyonsuz çoklu regresyon analizleri arasındaki en büyük tanımlayıcılık katsayısı ile en küçük tanımlayıcılık katsayısı arasındaki fark %1.77’dir. Eşitlik 4.1’e değişken eklenmesi ile tanımlayıcılık katsayısındaki değişimin azlığı sebebiyle Eşitlik

4.1'in kullanılması daha uygun gözükmemektedir. Beton-donatı tutunma özellikleri açısından %1.77 büyüklüğündeki bir fark ihmal edilebilecek düzeydedir.

Optimizasyonlu çoklu regresyon analizleri arasındaki en büyük tanımlayıcılık katsayısı ile en küçük tanımlayıcılık katsayısı arasındaki fark ise %5.60'dır. Tüm optimizasyonlu analizlerde tanımlayıcılık katsayısı en az %4.34'lük bir artış göstermiştir. Optimizasyonlu analizlerde, Eşitlik 4.2'ye değişken eklenmesi ile tanımlayıcılık katsayısındaki değişimin azlığı sebebiyle Eşitlik 4.2'nin kullanılmasının daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Donatı ile beton arasında tam aderans olması durumunda, donatıda oluşacak maksimum çekme kuvveti, donatının beton ile oluşturduğu maksimum aderans kuvvetine eşittir (Eşitlik 4.9). Maksimum optimizasyonsuz ve optimizasyonlu aderans gerilmesi denklemleri (Eşitlik 4.1 ve 4.2), Eşitlik 4.10'da yerine yazılırsa Eşitlik 4.11 ve 4.12'de gösterilen optimizasyonsuz ve optimizasyonlu kenetlenme boyu denklemlerine ulaşılır.

$$u_{max}\pi D_o l_e = f_{FRP} A_{FRP} \quad (4.9)$$

$$l_e = \frac{f_{FRP} D_o}{4u} \quad (4.10)$$

$$L_d = \frac{23.8055 f_{tsp} D_o - 0.887469 f_{FRP} D_o}{f_{tsp}^2 + 0.43912 f_{tsp} D_o - 3.54988 f_{tsp} S} \quad (4.11)$$

$$L_d = \frac{46.501 f_{tsp}^2 D_o - 539.579 f_{tsp} D_o + 9.56023 f_{FRP} D_i}{f_{tspn} (f_{tsp} D_o - 18.2639 f_{tsp} + 0.190057 D_o^2 - 15.3958 D_o + 38.2409 S)} \quad (4.12)$$

Burada, L_d =kenetlenme boyu (mm); u_{max} =maksimum aderans gerilmesi (MPa); f_{tsp} =betonun yarmada çekme dayanımı (MPa); D_o =donatı dış çapı (mm); D_i =donatı iç çapı (mm); l_e =donatı gömülme boyu (mm); f_{FRP} =donatı tasarım çekme gerilmesi (MPa); S=donatı lif türü ve yüzey özelliği katsayısıdır (Bkz. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2).

4.2. Optimizasyonlu ve optimizasyonsuz kenetlenme boyu denklemlerinin karşılaştırılması

Optimizasyonlu ve optimizasyonsuz kenetlenme boyu denklemlerinin karşılaştırılması için rasgele değişkenler kullanılarak toplam 4 050 deneme testi yapılmıştır (Çizelge B.3). Ancak maksimum aderans gerilmesi denklemindeki 2. dereceden ifadelerin kullanılması (Eşitlik 4.2) kenetlenme boyu denkleminde elde edilen sonuçlarda ters etkilere neden olmaktadır. Rasgele değişkenler için Eşitlik 4.2'nin kullanılmasıyla elde edilen aderans gerilmesi değerlerinin pozitif çıkmasına rağmen, bu eşitlik kullanılarak türetilen kenetlenme boyu bağıntısında (Eşitlik 4.12) aynı rasgele değişkenlerde kenetlenme boyu bağıntısı negatif değerler vermektedir.

Ayrıca, optimizasyonlu denklemin kullanılmasıyla elde edilen kenetlenme boyu denkleminin ile yapılan deneme testlerinde, denkleme girilen değişken değerleri, veri tabanı değişken aralıklarından küçük bir sapma dahi gösterse sonuçlar negatif değerler almaktadır. Çünkü denklem eğim çizgisi deney sonuçlarını çok iyi tanımladığı için küçük sapma değerlerinde bile elde edilen tahmini değerler eğim çizginin dışında kalmaktadır.

Örneğin, Eşitlik 4.2'nin deneme testinde (Çizelge B.3), 16 mm çapında ince taneli kumlanmış GFRP donatı kullanılarak oluşturulan bir deneyde, betonun yarmada çekme dayanımı 3.00 MPa, gömülme boyu $20D_b$, donatı tasarım çekme gerilmesi 500 MPa olduğunda, maksimum aderans gerilmesi değeri 5.59 MPa çıkmaktadır. Ancak Eşitlik 4.12 kullanılarak elde edilen kenetlenme boyu denkleminde kenetlenme boyu değeri -5072 mm olarak bulunmaktadır. Bu değer gerçeğe çok uzak olduğu aşikârdır. Dikkat edilirse veri tabanında ince taneli kumlanmış GFRP donatının en büyük donatı çapı 12 mm'dir. Donatı çapındaki 4 mm'lik bir artış bile sonuçların aşırı miktarda değişmesine neden olmuştur.

Yukarıda sayılan nedenlerden dolayı optimizasyonlu kenetlenme boyu bağıntısı olan Eşitlik 4.12 yerine optimizasyonsuz kenetlenme boyu bağıntısı olan Eşitlik 4.11'in kullanılması çok daha uygundur.

4.3. Kenetlenme boyu bağıntısının kullanım sınırları

Optimizasyonsuz kenetlenme boyu bağıntısı (Eşitlik 4.11) kullanılarak yaklaşık 4050 deneme testi yapılmıştır. Deneme testlerinde kullanılan değişkenler ve tahmini sonuçlar Çizelge B.3’de sunulmuştur. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, geliştirilen bir denklemin sınırsız değişken aralığında mantıklı sonuçlar vermesi beklenemez. Bu nedenle denkleme sınır değerler koyulması gerekliliği ortaya çıkar. İstatistik tabanlı analizlerde ise, veri tabanında kullanılan değişken aralıklarında değişkenler ele alındığında doğru sonuçlar elde edilir. Eğer veri tabanı değişken aralığı sınırlarının dışında değerler kullanılırsa, denklemin mantıklı ve tutarlı tahminler sunması olanaksızdır. Bu nedenle, regresyon analizi tabanlı bu kenetlenme boyu denkleminde kullanılacak değişkenlerin de, veri tabanı sınır aralıklarının belirlenmesi gerekir. Bu kapsamda hem literatürdeki hem de deneysel sonuçlardan elde edilen tecrübe ışığında mantıksal çıkarımlar yapılarak bu kenetlenme boyu bağıntısında kullanılabilecek değişken sınırları Çizelge 4.10’da sunulmuştur.

Çizelge 4.10. Kenetlenme boyu bağıntısı için değişken sınırları

	Donatı Türü ve Yüzey Özelliği	f_{cy} (MPa)	f_{isp} (MPa)	$D_b-D_o^{**}$ (mm)	f_{FRP} (MPa)
	GSf	0-58	0-5	$0 < D < 8$	0-2000
		0-41	0-4	$8 \leq D < 12$	
		0-26	0-3	$12 \leq D < 16$	
	CSf	0-99	0-7	$0 < D < 8$	0-2000
		0-78	0-6	$8 \leq D < 12$	
		0-58	0-5	$12 \leq D < 16$	
		0-41	0-4	$16 \leq D < 20$	
	GSc*	0-99	0-7	$0 < D < 8$	0-2000
		0-78	0-6	$8 \leq D < 16$	
		0-58	0-5	$16 \leq D < 24$	
	CSc	0-122	0-8	$0 < D < 8$	0-2000
		0-99	0-7	$8 \leq D < 16$	
		0-78	0-6	$16 \leq D < 20$	
		0-58	0-5	$20 \leq D < 24$	
	GR	0-122	0-8	$0 < D < 8$	0-2000
		0-99	0-7	$8 \leq D < 12$	
		0-78	0-6	$12 \leq D < 16$	
		0-58	0-5	$16 \leq D < 20$	
		0-41	0-4	$20 \leq D < 24$	
	BR*	0-122	0-8	$0 < D < 8$	0-2000
		0-99	0-7	$8 \leq D < 12$	
		0-78	0-6	$12 \leq D < 16$	
		0-58	0-5	$16 \leq D < 20$	
		0-41	0-4	$20 \leq D < 24$	
	GWO	0-99	0-7	$0 < D < 8$	0-2000
		0-78	0-6	$8 \leq D < 12$	
		0-58	0-5	$12 \leq D < 16$	
		0-41	0-4	$16 \leq D < 24$	
	GWw	0-122	0-8	$0 < D < 8$	0-2000
		0-99	0-7	$8 \leq D < 12$	
		0-78	0-6	$12 \leq D < 16$	
		0-58	0-5	$16 \leq D < 20$	
		0-41	0-4	$20 \leq D < 24$	
	BWw+Sc	0-122	0-8	$0 < D < 8$	0-2000
		0-99	0-7	$8 \leq D < 12$	
		0-78	0-6	$12 \leq D < 16$	
		0-58	0-5	$16 \leq D < 20$	
		0-41	0-4	$20 \leq D < 24$	

*GSc ve BR donatı görselleri temsilidir.

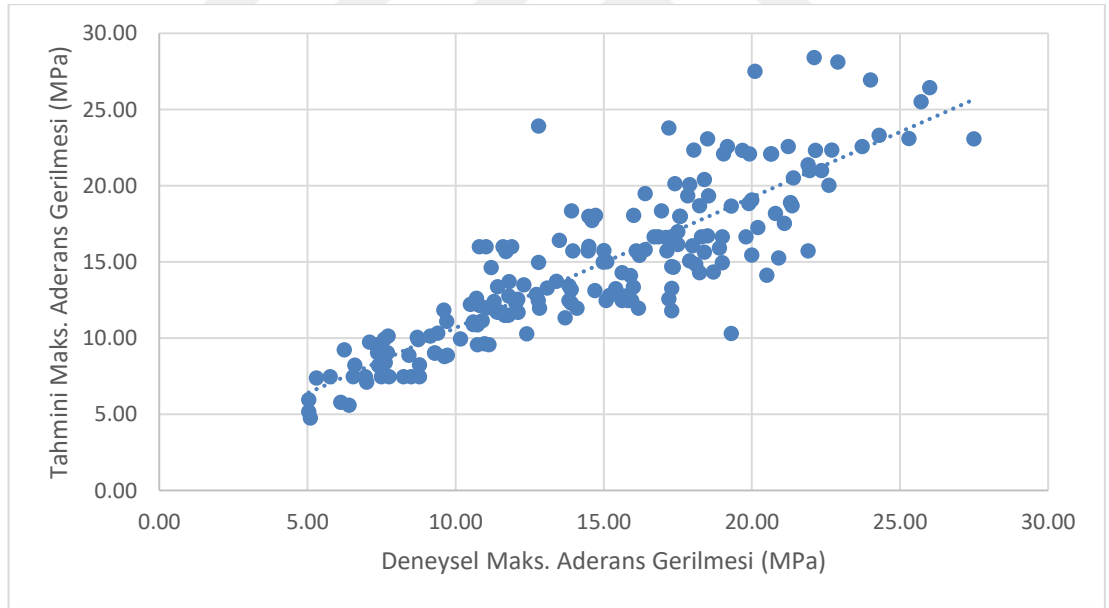
**Donatı anma çapı ya da donatı dış çapından büyük olanı için donatı çapı sınır aralığıdır.

Örneğin, 140 MPa beton basınç dayanımına ve 10 MPa'lık yarmada çekme dayanımına sahip beton içinde 8 mm çapa sahip sargılı GFRP (GWw) donatı için kenetlenme boyu belirlenmek isteniyor. Bunun için kenetlenme boyu bağıntısında kullanılabilecek maksimum yarmada çekme dayanımı 7 MPa alınarak hesap yapılabilir. Beton yarmada çekme dayanımı hesapta 7 MPa sınırını aşamaz. Başka bir örnek olarak ise 55 MPa beton basınç dayanımına ve 5 MPa'lık yarmada çekme dayanımına sahip beton içinde 20 mm çapa sahip oluklu GFRP (GWw) donatı için kenetlenme boyu belirlenmek isteniyor. Bunun için kenetlenme boyu bağıntısında kullanılabilecek maksimum yarmada çekme dayanımı 4 MPa alınarak hesap yapılabilir. Beton yarmada çekme dayanımı hesapta 4 MPa sınırını aşamaz.

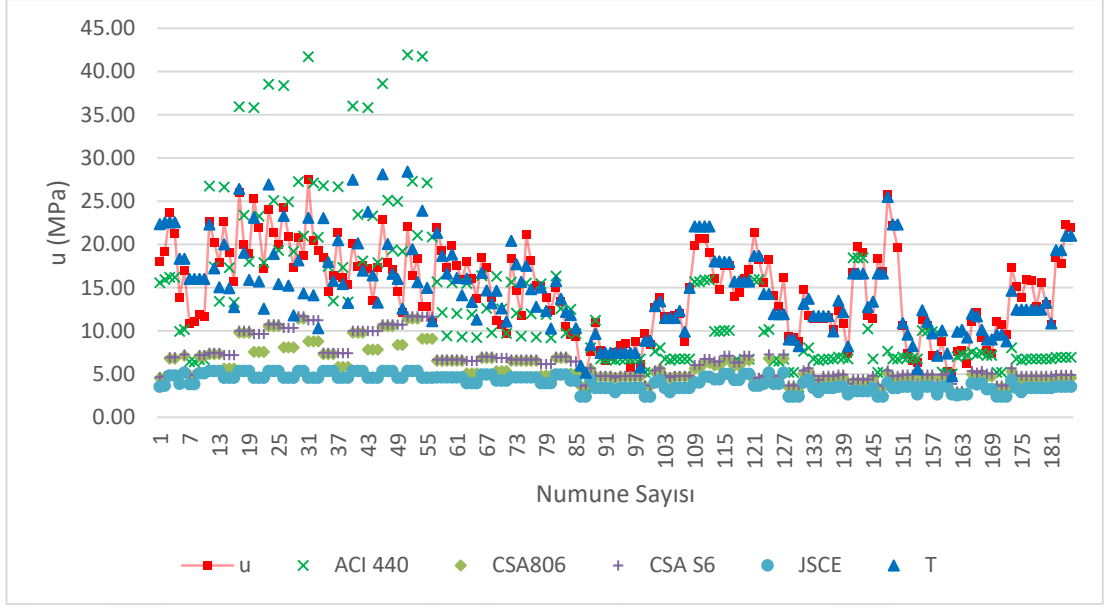
5. ADERANS GERİLMESİ VE KENETLENME BOYU DENKLEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

5.1. FRP donatı-Beton Aderans Bağıntısı ile Tespit Edilen Aderans Gerilmesi Değerlerinin Uluslararası Yönetmelikler ve Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

Deneyisel maksimum aderans dayanımları, aderans gerilmesi denklemi (Eşitlik 4.1) kullanılarak elde edilen tahmini aderans dayanımları ile Şekil 5.1'de karşılaştırılmıştır. Buna ilaveten, uluslararası yönetmelikler olan ACI 440.1R-15 [1], CSA S806 [4], CSA S6 [3] ve JSCE1997 [5]'de önerilen aderans gerilmesi denklemleri kullanılarak tahmin edilen aderans gerilmesi sonuçları da deneyisel değerler ile Şekil 5.2'de karşılaştırılmıştır.



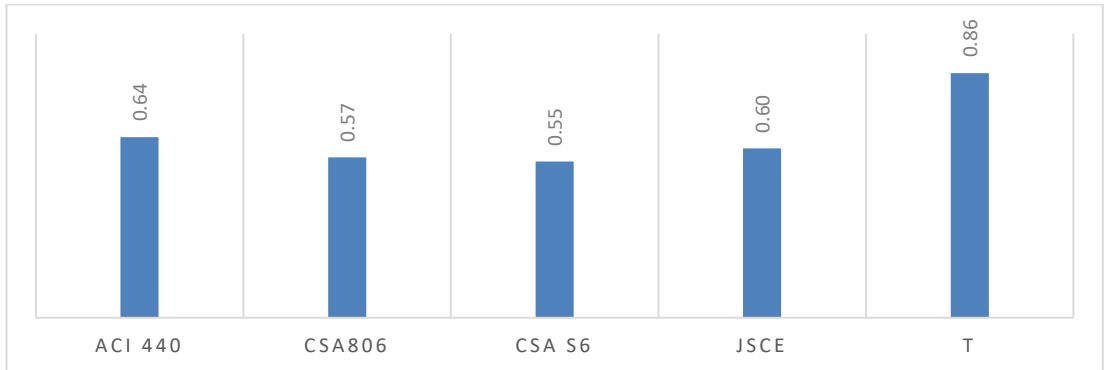
Şekil 5.1. Deneyisel ve tahmini aderans gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.2. Deneysel ve tahmini aderans gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması

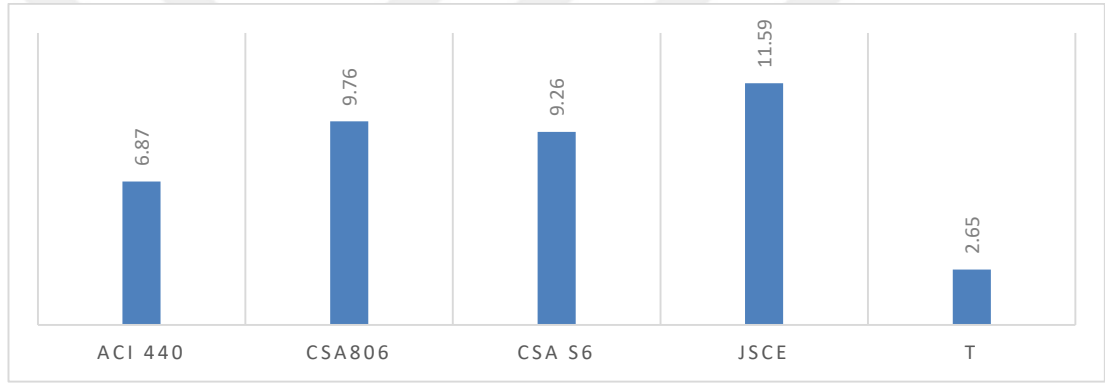
Deneysel aderans gerilmesi değerleri, Eşitlik 4.1 kullanılarak bulunan aderans gerilmesi değerleri ile karşılaştırıldığında, aralarında $r=0.86$ gibi çok yüksek bir doğrusal ilişki bulunduğu (korelasyon) Şekil 5.3’de görülmektedir.

Diğer uluslararası yönetmeliklerdeki aderans denklemlerinden elde edilen aderans gerilmesi değerlerinin, deneyel sonuçlar ile karşılaştırılması, aralarındaki korelasyonunun nispeten daha düşük olduğunu göstermektedir (Şekil 5.3).



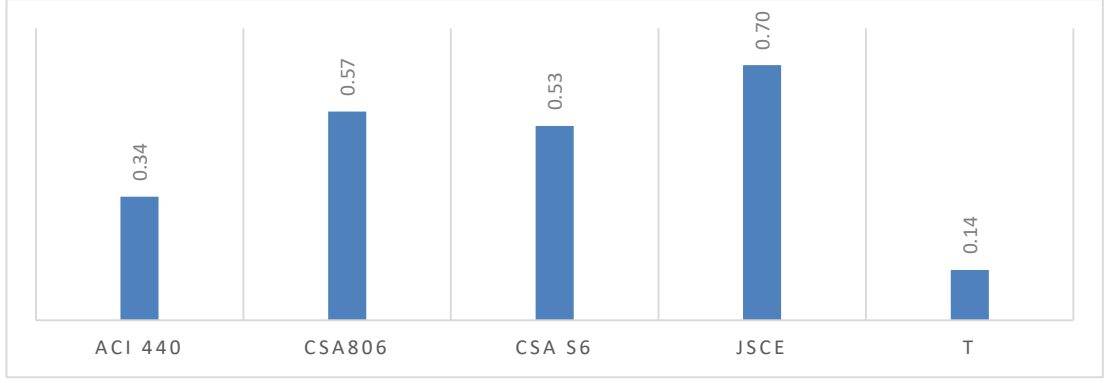
Şekil 5.3. Tahmini aderans gerilmesi değerlerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması

Farklı yönetmeliklerin karşılaştırılması, yönetmelik tahminlerinin uyumlu olduğunu ve en yakın tahminlere ACI 440.1R-15 [1] formülüyle ($r=0.64$) ulaşıldığını göstermektedir. Ancak, ACI 440.1R-15 [1] tahmin edilen sonuçlar deneysel sonuçlara göre ya çok güvenli tarafta kalmakta ya da çok yüksek kalmaktadır. JSCE 1997 [5], CSA S806 [4] ve CSA S6 [3] ile tahmin edilen aderans dayanımları ile deneysel sonuçlar arasında korelasyon değerleri birbirlerine yakın olmakla beraber deneysel sonuçlardan çok uzak ve aşırı emniyetli sonuçlar sunmuşlardır. Bu yönetmelikler ile deneysel sonuçlar arasındaki korelasyonlar sırasıyla 0.60, 0.57 ve 0.55’dir. Ayrıca bu 3 yönetmelik, birçok değişkenin aderansı etkilemesine rağmen, sanki hiç bir değişken aderansı etkilemiyormuş gibi farklı numunler için neredeyse ortalama bir aderans değeri vermektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.4. Deneysel ve tahmini aderans gerilmesi değerleri arasındaki RMSE değerlerinin karşılaştırılması

Deneysel aderans gerilmesi değerleri ile Eşitlik 4.1 kullanılarak bulunan aderans gerilmesi değerleri arasındaki RMSE değerleri (hata kareleri ortalamasının karekökü) incelendiğinde, en düşük ortalama hataya sahip modelin 2.65 MPa ile Eşitlik 4.1 olduğu Şekil 5.4’den anlaşılmaktadır. Eşitlik 4.1’e en yakın RMSE değeri ise ACI 440.1R-15 [1] eşitliğinden elde edilse de, hata değeri önerilen denklem ile bulunan hata değerinden 2.59 kat fazladır ($RMSE=6.87$ MPa). JSCE 1997 [5], CSA S806 [4], CSA S6 [3] yönetmeliklerinde ise RMSE değerleri sırasıyla 11.59, 9.76 ve 9.26 MPa’dır.



Şekil 5.5. Deneysel ve tahmini aderans gerilmesi değerleri arasındaki MAPE oranlarının karşılaştırılması

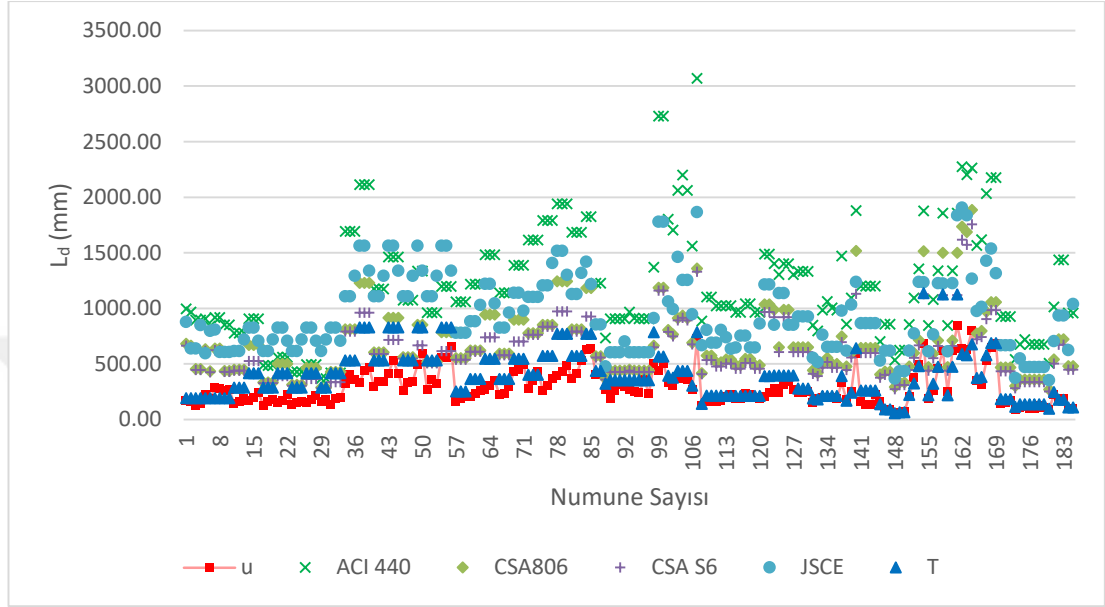
Korelasyon katsayıları ve RMSE değerlerinden elde edilen sonuçlara paralel olarak en küçük ortalama mutlak yüzde hata değeri ($MAPE=0.14$) Eşitlik 4.1'in kullanımıyla ulaşıldığı görülmüştür (Şekil 5.5). Tıpkı RMSE değerlerinde olduğu gibi Eşitlik 4.1'den sonra en düşük hata oranına sahip model ACI 440.1R-15 [1] modelidir ($MAPE=0.34$). JSCE 1997 [5], CSA S806 [4], CSA S6 [3] yönetmelikleri ile deneysel aderans değerleri arasındaki MAPE oranları ise sırasıyla 0.70, 0.57 ve 0.53'dür.

İstatistik verilerinden de anlaşılacağı üzere, Eşitlik 4.1 deneysel aderans verileriyle yüksek korelasyon (0.86) değerlerinin yanısıra düşük MAPE oranı (0.14) ve düşük RMSE değerine (2.65 MPa) sahip olmasından ötürü aderans gerilmesini oldukça yakın bir şekilde tahmin edebilmektedir. Öte yandan yönetmelikler kendi içlerinde değerlerindirildiğinde deney sonuçlarına en yakın sonuçları ACI 440.1R-15 [1] vermesine rağmen, bu eşitlik bile bu çalışmada tavsiye edilen bağıntının çok uzağında aderans gerilmesi tahmini vermektedir.

5.2. FRP donatı-Beton Kenetlenme Boyu Bağıntısı ile Tespit Edilen Kenetlenme Boyu Değerlerinin Uluslararası Yönetmelikler ve Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

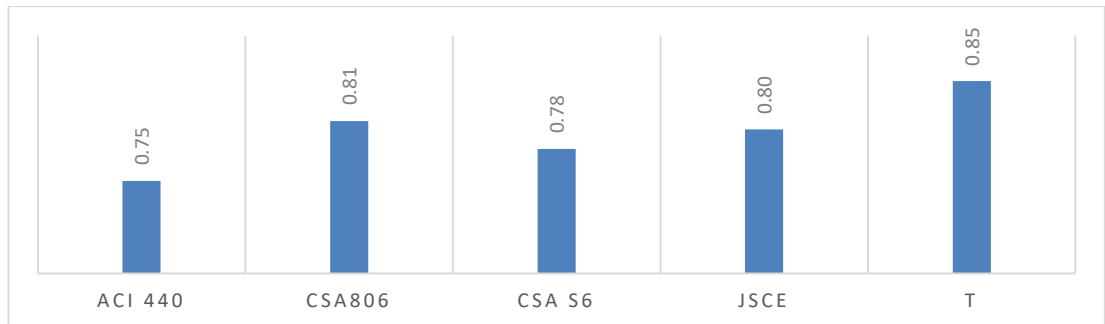
Eşitlik 2.10 ve Eşitlik 4.10 kullanılarak tahmini deneysel kenetlenme boyları tespit edilmiş ve bu çalışmada elde edilen kenetlenme boyu denklemi (Eşitlik 4.11) ile

bulunan sonuçlar (değişken sınır değerleri aşılmaksızın) Şekil 5.6'da karşılaştırılmıştır. Öte yandan, Şekil 5.6'da uluslararası yönetmeliklerdeki (ACI 440.1R-15 [1], CSA S806 [4], CSA S6 [3] ve JSCE 1997 [5]) kenetlenme boyu denklemleri ile bulunan kenetlenme boyu değerlerine de yer verilmiştir.



Şekil 5.6. Deneysel ve tahmini kenetlenme boyu değerlerinin karşılaştırılması

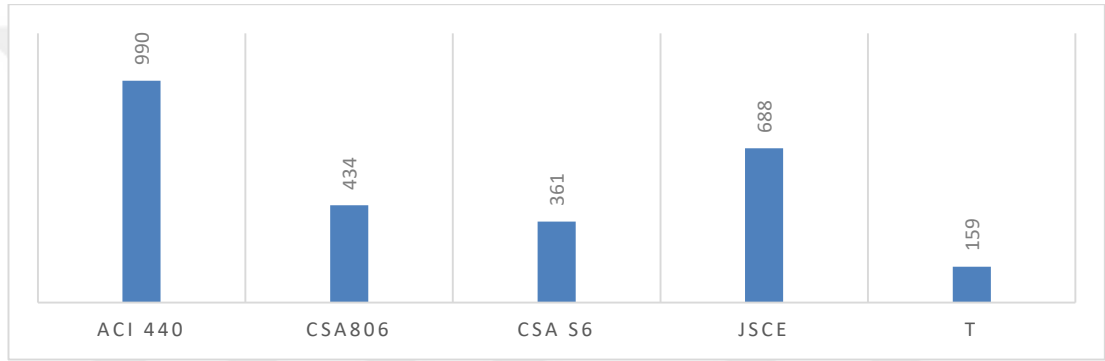
Deneysel aderans gerilmesi değerlerinden bulunan deneysel kenetlenme boyları, Eşitlik 4.11 kullanılarak bulunan kenetlenme boyu değerleri ile karşılaştırıldığında, aralarında $r=0.85$ gibi çok yüksek bir doğrusal ilişki bulunduğu (korelasyon) görülmektedir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Tahmini kenetlenme boyu değerlerinin deney sonuçlarıyla korelasyonlarının karşılaştırılması

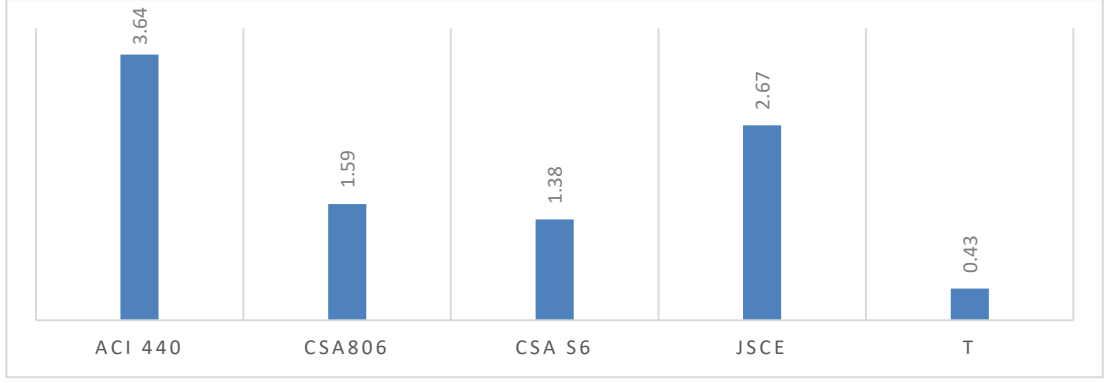
Diğer uluslararası yönetmeliklerdeki aderans denklemlerinden elde edilen kenetlenme boyu değerleri, deneysel sonuçlar ile ilişkilendirildiğinde aralarındaki korelasyonunun nispeten daha düşük olduğu Şekil 5.7’den de anlaşılmaktadır.

Yönetmelikler kendi aralarında incelendiğinde ise birbirlerine yakın korelasyon değerleri göstermelerine rağmen deneysel aderans dayanımı sonuçlarına en yakın sonuçları veren yönetmeliklerin sırasıyla CSA S806 [4], JSCE 1997 [5], CSA S6 [3] ve ACI 440.1R-15 [1] olduğu görülmektedir ($r=0.81, 0.80, 0.78, 0.75$). Bu yüksek doğrusal ilişkiye rağmen, tüm yönetmeliklerin tahmin edilen sonuçların deneysel sonuçlara göre çok güvenli tarafta kaldığı Şekil 5.6’da açıkça görülmektedir.



Şekil 5.8. Deneysel ve tahmini kenetlenme boyu değerleri arasındaki RMSE değerlerinin karşılaştırılması

Deneysel kenetlenme boyu değerleri ile Eşitlik 4.11 kullanılarak bulunan kenetlenme boyu değerleri arasındaki RMSE değerleri (hata kareleri ortalamasının karekökü) incelendiğinde, en düşük ortalama hataya sahip modelin 159 mm hata değeri ile Eşitlik 4.11 olduğu Şekil 5.8’den de anlaşılmaktadır. Yönetmelikler arasında en küçük RMSE değerine sahip yönetmelik 361 mm ile CSA S6 [3] olsa da bu yönetmeliğin bile RMSE değeri Eşitlik 4.11’in ilgili değerinin 2.27 katıdır. CSA S806 [4], JSCE 1997 [5], ACI 440 [1] yönetmeliklerinin RMSE değerleri ise sırasıyla 434, 688 ve 990 mm’dir.



Şekil 5.9. Deneysel ve tahmini kenetlenme boyu değerleri arasındaki MAPE oranlarının karşılaştırılması

RMSE değerlerine benzer şekilde denklemlerden tahmin edilen kenetlenme boylarının, deneysel sonuçlara göre ortalama mutlak yüzde hataları (MAPE) incelendiğinde en küçük hata oranına Eşitlik 4.11'in sahip olduğu Şekil 5.9'dan da görülmektedir (MAPE=0.43). Tıpkı RMSE değerlerinde olduğu gibi Eşitlik 4.11'den sonra en düşük hata oranına sahip model CSA S6'dır [3] (MAPE=1.38). CSA S6 [3] ile Eşitlik 4.11 MAPE değerleri arasında 3.21 kat gibi yüksek fark olduğu için Eşitlik 4.11 kenetlenme boyunu tahmin etmede çok daha iyi sonuçlar vermektedir. CSA S806 [4], JSCE 1997 [5], ACI 440 [1] yönetmelikleri ile deneysel kenetlenme boyu değerleri arasındaki MAPE oranları ise sırasıyla 1.59, 2.67 ve 3.64'dür.

İstatistik verilerinden de anlaşılacağı üzere, Eşitlik 4.11 deneysel kenetlenme boyu verileriyle yüksek korelasyon (0.85) değerlerinin yanısıra nispeten düşük hata oranı (MAPE=0.43) ve düşük ortalama hata değerine (RMSE=159 mm) sahip olmasından ötürü kenetlenme boyunu oldukça iyi bir şekilde tahmin edebilmektedir. Öte yandan yönetmelikler kendi içlerinde değerlendirildiğinde deney sonuçlarıyla en yakın korelasyona sahip modelin CSA S806 [4] olmasına rağmen ($r=0.81$), MAPE ve RMSE değerlerine göre en yakın modelin CSA S6 [3] olduğu görülmektedir (MAPE=1.38, RMSE=361 mm). JSCE 1997 [5] ve ACI 440 [1] ise yüksek korelasyon değerlerine sahip olmalarına rağmen (0.80, 0.75), hem RMSE değerleri, hem MAPE oranlarına göre aşırı hatalı sonuçlar üretmektedirler.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, geçmişte yapılmış çalışmaların aksine, FRP donatı-beton aderansına etki eden deney değişkenleri, aynı deney koşulları ve aynı deney düzeneği altında, aderansı etkileyen parametrelerden biri hariç tümü sabit tutularak yalnızca bir değişken üzerinde yoğunlaşarak incelenmiştir. Bu sayede, her değişkenin aderans üzerindeki etkisi net olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda FRP donatıların beton ile olan aderanslarını incelemek maksadı ile 90 adet mafsallı kiriş deney numunesi düşey yükler altında test edilerek donatı lif türü (bazalt, cam, karbon), donatı yüzey özellikleri (nervürlü, sargılı, oluklu, kumlanmış), donatılar arası mesafe, donatı alt ve yan pas payı, donatı çapı, donatı gömülme boyu, etriye varlığı, beton basınç dayanımı gibi değişkenlerin FRP-beton aderansına etkisi kirişlerde sıyrılma göçmesi olacak şekilde incelenmiştir.

Bu çalışmada ayrıca hem modifiye mafsallı kiriş deneyleri yapılarak hem de literatürde daha önce yapılmış mafsallı kiriş deneyi çalışmaları derlenerek 185 adet deney içeren deneysel veri tabanı oluşturulmuş ve bu veritabanından yararlanılarak doğrusal çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Bu analizlere dayalı olarak FRP donatı ile beton arasındaki aderans gerilmesi ve kenetlenme boyu bağıntıları geliştirilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. FRP donatı yüzey deformasyon şekli, FRP donatı-beton aderansını etkileyen en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Beton ile donatı arasındaki aderans gerilmesi, aderans aktarım mekanizmalarına göre değişmektedir. Çalışmada, mekanik kilitlenme ile yük aktaran donatıların, sürtünme yolu ile yük aktaran donatılardan çok daha iyi bir aderans performansına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu kapsamda en iyi aderans performansını iri taneli kumlanmış sargılı BFRP donatı sergilemiş ve bu donatının aderans dayanımı çelik donatının %105 ile %149 arasında değişmiştir. BFRP donatının aderansının bu denli yüksek çıkması iki sebepten kaynaklanmıştır. Bu sebeplerden ilki, iri taneli kumlama yüzeyinin aderans aktarımının

sürtünmeden ziyade mekanik kilitlenmeyle ortaya çıkmasını sağlamasıdır. İkinci sebep ise, yüzey sargısının üzerindeki bombeleşmelerin hem mekanik kilitlenme hem de sürtünme kuvvetlerini arttırmasıdır. Aynı durum sargılı GFRP donatılar için de geçerli olmakla beraber bu donatıların beton ile olan aderans performansları çelik donatı-beton aderansının %109'u olarak tespit edilmiştir. Nervürlü GFRP donatı-beton aderansı mekanik kilitlenmeden dolayı çelik donatı-beton aderansına benzerdir ve GFRP donatılar, çelik donatı-beton aderans dayanımının %67'si ile %128'i aralığında değişen dayanımlar göstermişlerdir. Oluklu GFRP donatılarda ise hem mekanik kilitlenme ile hem de sürtünme ile yük aktarımı yapılmaktadır. Bu donatıların beton ile olan aderans performansları çelik donatı-beton aderansının %58'i ile %101'i aralığında değişmektedir. Diğer donatılarda ise neredeyse sadece sürtünme mekanizması ile aderans gerilmesi aktarıldığı için ince taneli kumlanmış CFRP donatılar, çelik donatı-beton aderansının %52'si ve %85'i, ince taneli kumlanmış GFRP donatılar ise %34'ü ve %68'i aralığında dayanımlara sahiptir.

2. Kumlama kalitesi ve kumlamada kullanılan kum çapı arttıkça aderans mekanizması sürtünmeden, mekanik kilitlenmeye doğru değişmektedir. Bu nedenle, iri taneli kumlanmış CFRP donatıda, ince taneli kumlanmış CFRP donatıya göre %25 aderans artışı gerçekleşmiştir.
3. Elastisite modülü yükseldikçe aderans gerilmesi artmıştır. Çünkü aynı kumlama kalitesi, kumlama çapı ve kumlama yoğunluğu bulunan donatılar arasında, ince taneli kumlanmış CFRP donatıların aderans gerilmesi genellikle ince taneli GFRP donatıların aderansından yüksek olarak bulunmuştur. Ancak artış miktarının deney değişkenlerine göre farklılık göstermesinden dolayı net bir oran verilememektedir.
4. Donatı çapının 2.5 katı ($2.5d_b$) alt pas payı kalınlığından büyük alt pas payı kalınlıklarında alt pas payının FRP donatı-beton aderansına etkisi çok sınırlı kaldığından $2.5d_b$ pas payı kalınlıklarından sonra hem göçme tipi hem de aderans gerilmesi değerlerinin etkilenmediğini söylemek mümkündür.

5. Alt pas payının etkisinde olduğu gibi, $2.5d_b$ yan pas payı kalınlığından büyük yan pas payı kalınlıklarından sonra hem göçme tipi hemde aderans gerilmesi değerlerinin etkilenmediğini söylemek mümkündür. Ancak aderansın, nervürlü çelik donatıdan daha iyi olduğu FRP donatılı numunelerde (iri taneli olarak kumlanmış sargılı BFRP donatı gibi) $4.5d_b$ yan pas payına kadar beton ayrışma göçmesi oluşabilmektedir.
6. Donatı çapının artmasıyla aderans gerilmesi düşmektedir. Ancak, mekanik kilitlenme yoluyla aderans aktaran donatılardaki aderans azalışı, sürtünme yoluyla yük aktaran donatılardan daha fazladır. Çünkü mekanik kilitlenme mekanizması ile yük aktaran donatılarda, donatı dış çaplarında artış olmasına rağmen donatı nervür derinliklerinin aynı kalmasından dolayı, donatı nervür derinliğinin donatı dış çapına oranı düşmekte dolayısıyla donatıların aderans mekanizmasının donatı çapının artışıyla sürtünme ile yük aktaran mekanizmaya benzediği düşünülmektedir. BFRP donatıların (8 mm'den 12 mm'ye) çap artışı ile ortaya çıkan aderans düşüş oranı (%21) ile çelik donatıların aynı çap artışına karşılık gelen aderans düşüş oranı (%24) benzerdir. Ancak bu oran nervürlü donatılarda %11, ince taneli kumlanmış CFRP donatılarda %7 ve ince taneli kumlanmış donatılarda ise 1% dolaylarındadır.
7. Beton basınç dayanımının 20 MPa'dan 35 MPa'ya çıkarılmasıyla neredeyse tüm FRP donatıların aderans gerilme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak beton basınç dayanımının 40 MPa'a çıkarılmasıyla maksimum aderans gerilmesi değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, beton basınç dayanımının artmasıyla beton sertliğinin artması sonucu, donatı yüzeyindeki soyulmadan dolayı gerçekteleşmiştir. Ancak ince taneli kumlanmış donatılarda (GSf ve CSf) oluşan aderans gerilme değerleri, beton basınç dayanımlarının 30 MPa'dan 40 MPa çıkarılmasıyla düşüş göstermemişlerdir. Bu durumun, donatı birim yüzeyine düşen ince taneli kumların, donatıyla çok sayıda birleşim yapmalarından kaynaklı soyulmaların azalmasından dolayı ortaya çıktığı

düşünülmektedir. Ayrıca mekanik kilitlenme ile aderans yükü aktaran donatılar beton basınç değişimlerinden daha fazla etkilenmektedirler.

8. Donatılar arası mesafenin 3.75db'den 7db'ye çıkarılmasıyla maksimum aderans gerilmesi %22 ila %52 arasında artmıştır. Bu mesafenin 7db'den daha büyük olduğu durumlarda ise FRP donatı-beton aderansına ve çelik donatı-beton aderansına, donatılar arası mesafenin etkisi yok denecek kadar az olmuştur.
9. Çelik enine donatıların, FRP donatılara göre yüzey sertliğinin fazla olmasından dolayı FRP donatıların yüzeyini soymasıyla aderansın düştüğü gözlemlenmiştir. Bu aderans düşüşü, FRP donatılarda maksimum %15 dolaylarında olmuştur.
10. Gömülme boyunun artmasıyla donatının beton ile ilk aderans aktarımına başladığı noktadan uzaklaştığında düzgün olmayan gerilme dağılımları ortaya çıkmış ve bu dağılımlar sonucu neredeyse tüm donatılarda, maksimum aderans gerilmesi değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma değerleri ise, gömülme boyunun iki kat olacak biçimde artırılmasıyla (5db-10db-20db) maksimum aderans gerilmesi değerlerinin %9'u ile %30'u arasında değişmiştir.
11. FRP donatı-beton aderansını tahmin etmek için önerilen aderans bağıntısı verilen ACI 440.1R-15, CSA S806-12, CSA S6-14 ve JSCE 1997 yönetmeliklerindeki aderans bağıntıları istatistiksel olarak karşılaştırıldığında, önerilen aderans gerilmesi bağıntısının aderansı tahmin etmede çok daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen bağıntı ile bulunan aderans gerilmesi ile deney sonuçları arasında yüksek bir ilişki ($r=0.86$) bulunmuştur. Ayrıca önerilen bağıntının, hem ortalama hata değerlerine (RMSE=2.65 MPa) hem de ortalama mutlak yüzde hata değerlerine (MAPE=0.14) göre diğer bağıntılara kıyasla, deneysel sonuçlara çok daha yakın değerler verdiği görülmüştür. Yönetmelikler kendi aralarında incelendiğinde ise birbirlerine yakın korelasyon değerleri göstermelerine rağmen deneysel aderans dayanımı

sonuçlarına en yakın sonuçları veren yönetmelik ACI 440.1R-15'dir ($r=0.64$, $RMSE=6.87$ MPa, $MAPE=0.34$). Ancak, ACI 440.1R-15 bağıntısından elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlara göre ya çok güvenli tarafta kalmakta veya çok yüksek kalmaktadır. JSCE 1997, CSA S806 ve CSA S6 ile tahmin edilen aderans dayanımları ile deneysel sonuçlar arasında yakın korelasyon değerleri olmasının yanında bu bağıntılar deneysel sonuçlardan çok uzak ve aşırı emniyetli sonuçlar sunmuşlardır. Bu yönetmelikler ile deneysel sonuçlar arasındaki korelasyonlar sırasıyla 0.60, 0.57 ve 0.55'dir. Ayrıca bu 3 yönetmelik, birçok değişkenin aderansı etkilemesine rağmen, sanki hiç bir değişken aderansı etkilemiyormuş gibi neredeyse ortalama bir aderans değeri tahmini göstermişlerdir.

12. FRP donatı-beton arasındaki kenetlenme boyunu tahmin etmek için önerilen, kenetlenme boyu bağıntısı da, tıpkı önerilen aderans gerilmesi bağıntısı gibi, deneysel sonuçlar ile yüksek bir korelasyona sahip olmasının yanında ($r=0.85$), düşük hata değerine ($RMSE=159$ mm) sahiptir. Ancak hata oranı ($MAPE=0.43$) biraz yüksek olmasına rağmen uluslararası yönetmelikler ile karşılaştırıldığında bu değer çok daha düşük olduğu görülmektedir. ACI 440.1R-15, JSCE 1997, CSA S806 ve CSA S6 yönetmeliklerinde deneysel sonuçlar ile korelasyonları sırasıyla 0.75, 0.81, 0.78 ve 0.80, $RMSE$ değerleri ise sırasıyla 990, 434, 361 ve 688 mm'dir. $MAPE$ oranları ise sırasıyla, 3.64, 1.59, 1.38 ve 2.67'dir. Buna ilaveten deney sonuçlarıyla en yakın korelasyona sahip modelin CSA S806 olmasına rağmen ($r=0.81$), $MAPE$ ve $RMSE$ değerlerine göre en yakın modelin CSA S6 olduğu görülmektedir ($MAPE=1.38$, $RMSE=361$ mm). JSCE 1997 ve ACI 440 ise yüksek korelasyon değerlerine sahip olmalarına rağmen (0.80, 0.75), hem $RMSE$ değerleri, hem $MAPE$ oranlarına göre aşırı hatalı sonuçlar üretmektedirler.

GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, hem modifiye mafsallı kiriş deneyleri yapılarak hem de literatürde daha önce yapılmış mafsallı kiriş deneylerinden elde edilmiş veriler derlenerek bir deneysel veri tabanı oluşturulmuştur (Çizelge B.2). Bu kapsamda oluşturulan mafsallı kiriş veri tabanı 185 adet deneysel veri içermektedir. Bu veri tabanı, yapılan deneylerle ilgili birçok değişken barındırmaktadır. Bu değişkenler, beton silindir basınç dayanımı (f_{cy}), betonun yarmada çekme dayanımı (f_{tsp}), donatı gömülme derinliği (l_e), donatı lif türü (bazalt, cam, karbon), donatı yüzey özelliği (nervürlü, sargılı, oluklu, kumlanmış, sargılı+kumlanmış), donatı anma ve dış çapı (d_b , d_{bo}), donatı elastisite modülü (E_{FRP}), donatı çekme dayanımı (f_{FRP}), donatı alt ve yan pas payı (C , C_s), donatı aralığı (C_{ccsb}), kirişlerdeki etriye varlığı (T), maksimum aderans gerilmesi (u_{max}) ve kiriş göçme şeklidir (F_{mode}). Oluşturulan veritabanından yararlanılarak doğrusal çoklu regresyon analizi yapılmış ve FRP donatı ile beton arasındaki aderans gerilmesi ve kenetlenme boyu bağıntıları geliştirilmiştir.

Bu geliştirilen bağıntılar deneysel sonuçlar ile yüksek bir uyum göstermiştir. Ancak, bu bağıntıların geçerlilikleri veri tabanında kullanılan donatı türleri ile sınırlıdır. Her ne kadar veri tabanı birçok FRP donatı türünü içerse de, FRP donatıların yüzey özelliklerinin ve lif türlerinin çok çeşitli olmasından dolayı bu veri tabanının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu veri tabanının ileride yapılacak FRP donatılı mafsallı kiriş deneyleri ile geliştirilebilmesi, FRP donatı-beton arasındaki aderans gerilmesi ve kenetlenme boyu bağıntılarının çok daha güvenilir sonuçlar vermesini sağlayacaktır.

Bu nedenle gelecekte yapılacak FRP donatılı mafsallı kiriş deneylerinin, veri tabanında deney sayısı az olan donatı türlerine göre yapılması konunun gelişmesine katkı sağlayacaktır. Bu kapsamda kullanılacak veri tabanı tanımlamaları ve parametre aralıklarının detaylı içeriği için Bölüm 2.8.3'e, veri tabanında kullanılan deneylerin FRP donatıların lif türüne ve yüzey özelliğine göre sayıları için ise Şekil 2.18'e bakılabilir. Ayrıca gelecekte yapılacak deneylerde farklı türde beton kullanılması durumunda ihtiyaç duyulacak beton dönüşüm bağıntılarına Bölüm 2.8.4'den ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2015.
- [2] CNR-DT 203/2006 Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. National Research Council, Rome, Italy, 2007.
- [3] CSA S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association, Ontario, Canada, 2014.
- [4] CSA S806-12 Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association, Canada, 2012.
- [5] JSCE 1997 Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Japan Society of Civil Engineers, Japan, 1997.
- [6] ACI 440R-96 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2002.
- [7] Design Manual No.3 Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. ISIS Canada Research Network, Manitoba, Canada, 2007.
- [8] ACI 440.3R-12 Guide Test Methods for Fiber- Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures. American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2012.
- [9] ACI 440.1R-03 Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2003.
- [10] Nanni, A., De Luca, A., Zadeh, H., Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design. CRC Press, 2014.
- [11] V.S. GangaRao, Hota, Taly Narendra, V. Vijay, P., Reinforced Concrete Design with FRP Composites. Igarss 2014, CRC Press, 2006.
- [12] Ametrano, D., Bond Characteristics of Glass Fibre Reinforced Polymer Bars Embedded in High Performance and Ultra-High Performance Concrete. Master Thesis. Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada, 2011.

- [13] ACI 440R-07 Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2007.
- [14] Fib Bulletin 40 FRP Reinforcement in RC Structures. International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2007.
- [15] Anonim, Pultrüsyon işlemi, <https://fiberline.com/pultrusion> (Erişim tarihi:9 Ekim, 2018) <https://fiberline.com/pultrusion> (last time accessed: October 9, 2018).
- [16] CSA S6-00 Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association, Ontario, Canada, 2000.
- [17] Design Manual No.3 Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. ISIS Canada Research Network, Manitoba, Canada, 2001.
- [18] ACI 440.1R-01 Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2001.
- [19] CSA S806-02 Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association, Canada, 2002.
- [20] ECP 208-2005 Egyptian Code of Practice For the Use of Fiber Reinforced Polymer (FRP) in Construction Fields. Egyptian Standing Code Committee for the Use of Fiber Reinforced Polymer (FRP) in the Construction Fields, 2005.
- [21] CSA S6-06 Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association, Ontario, Canada, 2006.
- [22] ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2006.
- [23] ACI 408R-03 Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension. American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2003.
- [24] Fib Bulletin 10 Bond of Reinforcement in Concrete. International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2000.
- [25] Thompson, M. K., Jirsa, J. O., Breen, J. E., Klingner, R. E., Anchorage Behavior of Headed Reinforcement: Literature Review by Research Report 1855-1. Texas Department of Transportation, 2002.
- [26] Eligehausen, R., Popov, E. P., Bertero, V. V., Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations. Earthquake Engrg. Res. Ctr. (EERC), Berkeley, Calif., 1983.
- [27] Malvar, L. J., Bond Stress-Slip Characteristics of FRP Rebars. Naval Facilities

- Engineering Service Center, Port Hueneme, California, 1994.
- [28] Cosenza, E., Manfredi, G., Realfonzo, R., Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete. *J. Compos. Constr.*, 1(2), 40–51, 1997.
 - [29] Cosenza, E., Manfredi, G., Realfonzo, R., Bond characteristics and anchorage length of FRP rebars. *Proc., 2nd Int. Conf. on Advanced Compos. Mat. in Bridge Struct*, M. EI-Badry, 1996.
 - [30] Cosenza, E., Manfredi, G., Realfonzo, R., Analytical modelling of bond between FRP reinforcing bars and concrete. *Proc., 2nd Int. RILEM Symp. (FRPRCS-2)*, 1995.
 - [31] Tighiouart, B., Benmokrane, B., Gao, D., Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Constr. Build. Mater.*, 12(8), 453–462, 1998.
 - [32] RC 5 Bond Test for Reinforcement Steel. 1. Beam Test, 1982. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, Paris, France, 1982.
 - [33] RC 6 Bond Test for Reinforcement Steel. Part 2. Pull-out Test. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, Paris, France, 1983.
 - [34] ASTM A944-10 Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens. ASTM International, USA, 2015.
 - [35] EN 10080 Steel for the Reinforcement of Concrete - Weldable Reinforcing Steel - General. European Committee For Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
 - [36] ASTM D7913 / D7913M - 14. Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing. ASTM International, 2014.
 - [37] JSCE-E 539-1995 Test Method For Bond Strength of Continuous Fiber Reinforcing Materials By Pull-Out Testing. Japan Society of Civil Engineers, Japan, 1995.
 - [38] ISO 10406-1 Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Methods — Reinforcement of Concrete-Test Part 1: FRP Bars and Grids. International Organization for Standardization (ISO), Switzerland, 2015.

- [39] Okelo, R., Yuan, R. L., Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete. *J. Compos. Constr.*, 9(3), 203–213, 2005.
- [40] Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., Tao, S., Bond Behavior of Deformed GFRP Rebars. *J. Compos. Mater.*, 31(14), 1413–1430, 1997.
- [41] Bi, Q., Wang, H., Bond Strength of BFRP Bars to Basalt Fiber Reinforced High-Strength Concrete. *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 576–580, 2011.
- [42] Bi, Q. W., Wang, Q. X., Wang, H., Study on Bond Properties of BFRP Bars to Basalt Fiber Reinforced Concrete. *Adv. Mater. Res.*, 163–167, 1251–1256, 2010.
- [43] Moallemi Pour, S., Investigation of Compressive Bond Behavior of Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars Embedded in Recycled Aggregate Concrete. Master Thesis. The University of British Columbia, 2016.
- [44] Okelo, R., Realistic Bond Strength of FRP Rebars in NSC from Beam Specimens. *J. Aerosp. Eng.*, 20(3), 133–140, 2007.
- [45] Quayyum, S., Bond Behaviour of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Rebars in Concrete. Master Thesis. The University of British Columbia, 2010.
- [46] Rolland, A., Benzarti, K., Quiertant, M., Chataigner, S., Argoul, P., Characterization of Aramid FRP rebars and study of their bond behaviour with concrete. *Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2014*, Vancouver, Canada, 2014.
- [47] Xue, W., Zheng, Q., Yang, Y., Fang, Z., Bond behavior of sand-coated deformed glass fiber reinforced polymer rebars. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 33(10), 895–910, 2014.
- [48] Yu, N. H., Fan, J. J., Experimental Study of Bond Stress between Concrete and FRP Rebars. *Appl. Mech. Mater.*, 488–489, 774–777, 2014.
- [49] Rolland, A., Chataigner, S., Benzarti, K., Quiertant, M., Argoul, P., Paul, J., Mechanical behaviour of aramid fiber reinforced polymer (AFRP) rebar/concrete interfaces. *Transport Research Arena*, Paris, France, 2014.
- [50] Islam, S., Afefy, H. M., Sennah, K., Azimi, H., Bond characteristics of straight-and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedded in high-strength concrete. *Constr. Build. Mater.*, 83(2), 283–298, 2015.
- [51] Tepfers, R., Bond Clause Proposal for FRP-Bars/Rods in Concrete Based on

- CEB/FIP Model Code 90 with Discussion of Needed Tests. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2004.
- [52] Vint, L., Investigation of Bond Properties of Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) Bars in Concrete under Direct Tension. Master Thesis, 213, 2012.
 - [53] Shen, D., Ojha, B., Shi, X., Zhang, H., Shen, J., Bond stress–slip relationship between basalt fiber-reinforced polymer bars and concrete using a pull-out test. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 35(9), 747–763, 2016.
 - [54] Benmokrane, B., Tighiouart, B., Chaallal, O., Bond Strength and Load Distribution of Composite GFRP Reinforcing Bars in Concrete. *Mater. J.*, 93(3), 254–259, 1996.
 - [55] Lee, Y. H., Kim, M. S., Kim, H., Lee, J., Kim, D.-J., Experimental study on bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 27(5–6), 508–522, 2013.
 - [56] Mosley, C. P., Tureyen, A. K., Frosch, R. J., Bond Strength of Nonmetallic Reinforcing Bars. *ACI Struct. J.*, 105(5), 634–642, 2008.
 - [57] El Refai, A., Ammar, M.-A., Masmoudi, R., Bond Performance of Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars to Concrete. *J. Compos. Constr.*, 19(3), 04014050, 2015.
 - [58] Ge, W., Zhang, J., Cao, D., Tu, Y., Flexural behaviors of hybrid concrete beams reinforced with BFRP bars and steel bars. *Constr. Build. Mater.*, 87, 28–37, 2015.
 - [59] Veljkovic, A., Carvelli, V., Haffke, M. M., Pahn, M., Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading. *Compos. Part B Eng.*, 124, 40–53, 2017.
 - [60] Chaallal, O., Benmokrane, B., Fiber-reinforced plastic rebars for concrete applications. *Compos. Part B Eng.*, 27(3–4), 245–252, 1996.
 - [61] Gu, X., Yu, B., Wu, M., Experimental study of the bond performance and mechanical response of GFRP reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.*, 114, 407–415, 2016.
 - [62] Krem, S., Soudki, K., Development Length of Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Bars in Self-Consolidating Concrete. *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 379–391, 2010.

- [63] Sepeda, G. P., Tension Lap Splice Lengths of Carbon Fiber Reinforced Polymer Bars. Thesis Master. Louisiana State University, 2002.
- [64] Hossain, K. M. A., Ametrano, D., Lachemi, M., Bond strength of GFRP bars in ultra-high strength concrete using RILEM beam tests. *J. Build. Eng.*, 10(February), 69–79, 2017.
- [65] Arias, J. P. M., Vazquez, A., Escobar, M. M., Use of sand coating to improve bonding between GFRP bars and concrete. *J. Compos. Mater.*, 46(18), 2271–2278, 2012.
- [66] Mazaheripour, H., Barros, J. A. O., Sena-Cruz, J. M., Pepe, M., Martinelli, E., Experimental study on bond performance of GFRP bars in self-compacting steel fiber reinforced concrete. *Compos. Struct.*, 95, 202–212, 2013.
- [67] Fava, G., Carvelli, V., Pisani, M. A., Remarks on bond of GFRP rebars and concrete. *Compos. Part B Eng.*, 93, 210–220, 2016.
- [68] Kanakubo, T., Yonemaru, K., Fukuyama, H., Fujisawa, M., Sonobe, Y., Bond Performance of Concrete Members Reinforced with FRP Bars. *Proc. Intl. Symp. Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, pp. 767–788, 1993.
- [69] He, Z., Tian, G.-W., Probabilistic evaluation of the design development length of a GFRP rod pull-out from concrete. *Eng. Struct.*, 33(10), 2943–2952, 2011.
- [70] Aly, R., Benmokrane, B., Ebead, U., Tensile Lap Splicing of Bundled CFRP Reinforcing Bars in Concrete. *J. Compos. Constr.*, 10(4), 287–294, 2006.
- [71] Antonietta Aiello, M., Leone, M., Pecce, M., Bond Performances of FRP Rebars-Reinforced Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19(3), 205–213, 2007.
- [72] Wambeke, B. W., Shield, C. K., Development length of glass fiber-reinforced polymer bars in concrete. *ACI Struct. J.*, 103(1), 11–17, 2006.
- [73] Lee, J. Y., Kim, B., Kang, J. E., Choi, H. Y., Behavior of GFRP bars embedded in fiber reinforced concrete. *15th European Conference on Composite Materials (ECCM15)*, Venice, Italy, pp. 1–8, 2012.
- [74] Park, J.-S., Lim, A.-R., Kim, J., Lee, J.-Y., Bond performance of fiber reinforced polymer rebars in different casting positions. *Polym. Compos.*, 37(7), 2098–2108, 2016.
- [75] Yan, F., Lin, Z., Yang, M., Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review. *Compos. Part B Eng.*, 98, 56–69, 2016.

- [76] Arias, J. M., Escobar, M., Vazquez, A., Ribbed glass fiber reinforced plastic rebar embedded in concrete – an experimental study. *J. Compos. Mater.*, 47(17), 2125–2132, 2013.
- [77] Zhang, H. X., Li, J., Bond behavior and modeling of fiber reinforced polymer bars to concrete under direct pullout. *Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007)*, Hong Kong, China, pp. 739–744, 2007.
- [78] Won, J.-P., Park, C.-G., Kim, H.-H., Lee, S.-W., Won, C., Bond Behaviour of Frp Reinforcing Bars in High-Strength Steel Fibre-Reinforced Concrete. *Polym. Polym. Compos.*, 15(7), 569–578, 2007.
- [79] Ha, S.-S., Yoon, J.-S., Comparison of Development Length Equation of Bottom and Top GFRP Bars with Splitting Failure. *J. Korea Inst. Build. Constr.*, 9(6), 141–149, 2009.
- [80] Choi, D.-U., Chun, S.-C., Ha, S.-S., Splice Length of GFRP Rebars Based on Flexural Tests of Unconfined RC Members. *J. Korea Concr. Inst.*, 21(1), 65–74, 2009.
- [81] Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., Tao, S., Design Recommendations for Bond of GFRP Rebars to Concrete. *J. Struct. Eng.*, 122(3), 247–254, 1996.
- [82] Jiang, S. Y., Ye, Y., Fei, W., Experiment on the Bonding Performance of BFRP Bars Reinforced Concrete. *Appl. Mech. Mater.*, 174–177, 993–998, 2012.
- [83] Akbas, T. T., Celik, O. C., Yalcin, C., Experimental Bond Behaviour of Deformed CFRP Rebars in High Strength Concrete. *Concrete – Innovation and Design*, fib Symposium, Copenhagen, Denmark, pp. 1–9, 2015.
- [84] Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., Tao, S., Bond Behavior of Deformed GFRP Rebars. *J. Compos. Mater.*, 31(14), 1413–1430, 1997.
- [85] Quayyum, S., Rteil, A., Bond Strength of FRP Rebar to Concrete : Effect of Concrete Confinement. *Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010)*, Beijing, China, pp. 581–584, 2010.
- [86] Mehr, M. R., Esfahani, M. R., Mousavi, S. R., A Modification to ACI 440.1R-06 Equation for Determining the Bond Strength of GFRP Bars Using Reliability Analysis. *Amirkabir J. Sci. Res. (Civil Environ. Eng. (AJSR - CEE))*, 45(2), 25–28, 2013.
- [87] Thamrin, R., Effect of End Anchorage Length and Stirrup Ratio on Bond and

- Shear Capacity of Concrete Beams with Nonmetallic Reinforcement. *J. Eng. Sci. Technol.*, 11(6), 768–787, 2016.
- [88] Baena, M., Torres, L., Turon, A., Barris, C., Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Compos. Part B Eng.*, 40(8), 784–797, 2009.
- [89] Achillides, Z., Pilakoutas, K., Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars under Direct Pullout Conditions. *J. Compos. Constr.*, 8(2), 173–181, 2004.
- [90] Khederzadeh, H. R., Sennah, K., Pullout Strength of Pre-installed Sand-coated GFRP Bars for Bridge Barrier Construction. 4th International Structural Specialty Conference (CSCE 2014), Halifax, NS, pp. 1–10, 2014.
- [91] Lee, J.-Y., Kim, T.-Y., Kim, T.-J., Yi, C.-K., Park, J.-S., You, Y.-C., Park, Y.-H., Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete. *Compos. Part B Eng.*, 39(2), 258–270, 2008.
- [92] Borosnyói, A., Influence of service temperature and strain rate on the bond performance of CFRP reinforcement in concrete. *Compos. Struct.*, 127, 18–27, 2015.
- [93] Erdem, S., Kağrı, T., Blankson, M. A., Investigation of Bond between Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites Rebar and Aramid Fibre-Reinforced Concrete. *Int. J. Compos. Mater.*, 5(6), 148–154, 2015.
- [94] Park, C., Won, J., Cha, S., Bond Properties of CFRP Rebar in Fiber Reinforced High Strength Concrete with Surface Treatment Methods of Reinforcing Fibers. *J. Korea Concr. Inst.*, 21(3), 275–282, 2009.
- [95] Kang, J., Kim, B., Park, J., Lee, J., Influence Evaluation of Fiber on the Bond Behavior of GFRP Bars Embedded in Fiber Reinforced Concrete. *J. Korea Concr. Inst.*, 24(1), 79–86, 2012.
- [96] Won, J.-P., Park, C.-G., Kim, H.-H., Lee, S.-W., Jang, C.-I., Effect of fibers on the bonds between FRP reinforcing bars and high-strength concrete. *Compos. Part B Eng.*, 39(5), 747–755, 2008.
- [97] Dancygier, A. N., Katz, A., Wexler, U., Bond between deformed reinforcement and normal and high-strength concrete with and without fibers. *Mater. Struct.*, 43(6), 839–856, 2010.
- [98] Esfahani, M. R., Kianoush, M. R., Lachemi, M., Bond strength of glass fibre reinforced polymer reinforcing bars in normal and self-consolidating concrete.

- Can. J. Civ. Eng., 32(3), 553–560, 2005.
- [99] Hossain, K. M. A., Lachemi, M., Bond Behavior of Self-Consolidating Concrete with Mineral and Chemical Admixtures. *J. Mater. Civ. Eng.*, 20(9), 608–616, 2008.
 - [100] Golafshani, E. M., Rahai, A., Sebt, M. H., Bond behavior of steel and GFRP bars in self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.*, 61, 230–240, 2014.
 - [101] Gudonis, E., Kacianauskas, R., Gribniak, V., Weber, A., Jakubovskis, R., Kaklauskas, G., Mechanical Properties of the Bond Between GFRP Reinforcing Bars and Concrete. *Mech. Compos. Mater.*, 50(4), 457–466, 2014.
 - [102] Khederzadeh, H. R., Sennah, K., Pullout Strength of Pre-installed GFRP Bars in Concrete. CSCE 2013 General Conference - Congrès général 2013 de la SCGC, Montreal, Canada, pp. 1–10, 2013.
 - [103] CSA S6-10 Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association, Ontario, Canada, 2010.
 - [104] Newman, N., Ayoub, A., Belarbi, A., Development Length of Straight FRP Composite Bars Embedded in Concrete. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 29(4), 571–589, 2010.
 - [105] Thamrin, R., Kaku, T., Development Length Evaluation of Reinforced Concrete Beam with CFRP Bars. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)*, Hong Kong, pp. 385–392, 2005.
 - [106] Hossain, K. M. a., Ametrano, D., Lachemi, M., Bond Strength of Standard and High-Modulus GFRP Bars in High-Strength Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(3), 449–456, 2014.
 - [107] Krem, S., Bond and Flexural Behaviour of Self Consolidating Concrete Beams Reinforced and Prestressed with FRP Bars. PhD Thesis. University of Waterloo, 2013.
 - [108] Makhmalbaf, E., A Gfrp Bar Bond Stress And Strength: Comparison of Beam-Bond and Pullout Tests Results. Master Thesis. McMaster University, 2015.
 - [109] Pour, S., Alam, M., Milani, A., Improved Bond Equations for Fiber-Reinforced Polymer Bars in Concrete. *Materials (Basel)*, 9(12), 737, 2016.
 - [110] ACI 440 1R-03. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute (ACI), 2003.

- [111] Yan, F., Lin, Z., Wang, X., Azarmi, F., Sobolev, K., Evaluation and prediction of bond strength of GFRP-bar reinforced concrete using artificial neural network optimized with genetic algorithm. *Compos. Struct.*, 161, 441–452, 2017.
- [112] Mousavi, S., Dehestani, M., Mousavi, S., Bond strength and development length of glass fiber-reinforced polymer bar in unconfined self-consolidating concrete. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 35(11), 924–941, 2016.
- [113] EN 12390-1:2012 Testing Hardened Concrete - Part 1: Shape, Dimensions and Other Requirements for Specimens and Moulds. European Committee For Standardization, 2012.
- [114] EN 12350-1:2009 Testing Fresh Concrete - Part 1: Sampling. European Committee For Standardization, 2009.
- [115] EN 12390-2:2009 Testing Hardened Concrete - Part 2: Making and Curing Specimens for Strength Tests. European Committee For Standardization, 2009.
- [116] EN 12390-3:2009 Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens. European Committee For Standardization, 2009.
- [117] EN 12350-2:2009 Testing Fresh Concrete - Part 2: Slump Test. European Committee For Standardization, 2009.
- [118] EN 12390-7:2009 Testing Hardened Concrete - Part 7: Density of Hardened Concrete. European Committee For Standardization, 2009.
- [119] EN ISO 15630-1:2010 Steel for the Reinforcement and Prestressing of Concrete - Test Methods - Part 1: Reinforcing Bars, Wire Rod and Wire (ISO 15630-1:2010). European Committee For Standardization, 2010.
- [120] EN ISO 6892-1:2016 Metallic Materials - Tensile Testing - Part 1: Method of Test at Room Temperature (ISO 6892-1:2016). European Committee For Standardization, 2016.
- [121] ASTM D7205-D7205M-16 Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. ASTM International, 2016.
- [122] Hossain, K. M. A., Bond Strength of GFRP Bars Embedded in Engineered Cementitious Composite using RILEM Beam Testing. *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 12(1), 2018.
- [123] Kotynia, R., Szczech, D., Kaszubska, M., Bond Behavior of GRFP Bars to Concrete in Beam Test. *Procedia Eng.*, 193(December), 401–408, 2017.

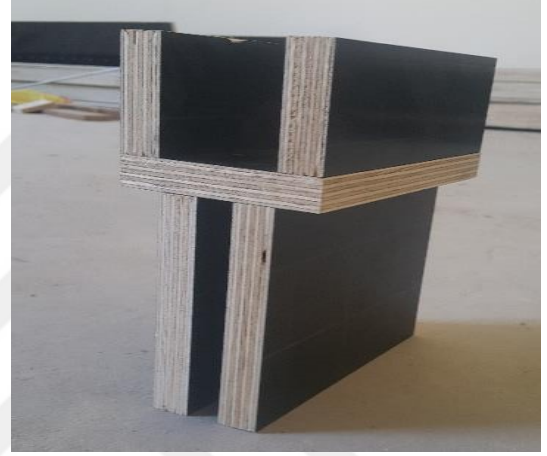
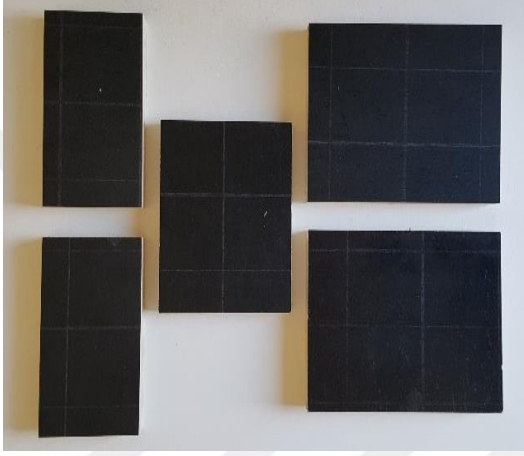
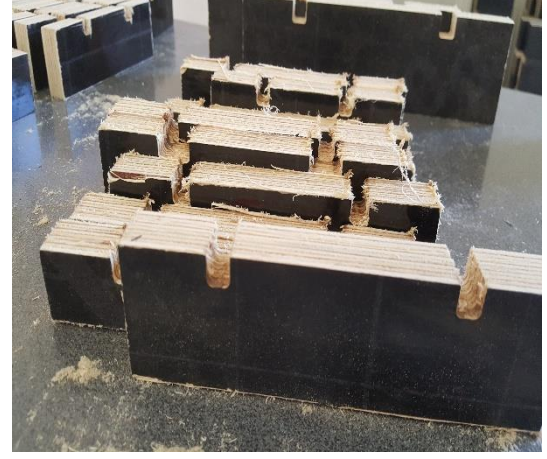
- [124] Seis, M., Beycioğlu, A., Bond performance of basalt fiber-reinforced polymer bars in conventional Portland cement concrete: A relative comparison with steel rebar using the hinged beam approach. *Sci. Eng. Compos. Mater.*, 24(6), 909–918, 2017.
- [125] Xue, W., Yang, Y., Zheng, Q., Fang, Z., Modeling of Bond of Sand-coated Deformed Glass Fibre-reinforced Polymer Rebars in Concrete. 24(1), 45–57, 2016.
- [126] Arioglu, N., Canan Girgin, Z., Arioglu, E., Evaluation of Ratio between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength for Concretes up to 120 MPa and its Application in Strength Criterion. *ACI Mater. J.*, 103(1), 18–24, 2006.
- [127] EN 206:2013+A1:2016 Concrete - Specification, Performance, Production and Conformity. European Committee For Standardization, 2017.
- [128] Öztekin, E., Eker, Ç., Derin, E., Betonun Basınç Dayanımının Ölçülmesinde 150/300 veya 100/200 mm Silindir Numune Kullanımı. *THBB Hazır Bet. Derg.*, 75–78, 2012.
- [129] Arioğlu, E., Arioğlu, N., Girgin, C., Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Numune Şekil-Boyut Etkisi. *THBB Hazır Bet. Derg.*, 40–50, 1999.
- [130] Akinpelu, M. A., Odeyemi, S. O., Olafusi, O. S., Muhammed, F. Z., Evaluation of splitting tensile and compressive strength relationship of self-compacting concrete. *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, 2017.
- [131] Thomas, J., Ramaswamy, A., Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19(5), 385–392, 2007.

EKLER

A. DENEY FOTOĞRAFLARI



Şekil A.1. Deney düzeneği mafsallarının hazırlanması



Şekil A.2. Deney kiriş kalıplarının hazırlanması



Şekil A.3. Deney kiriş donatılarının hazırlanması



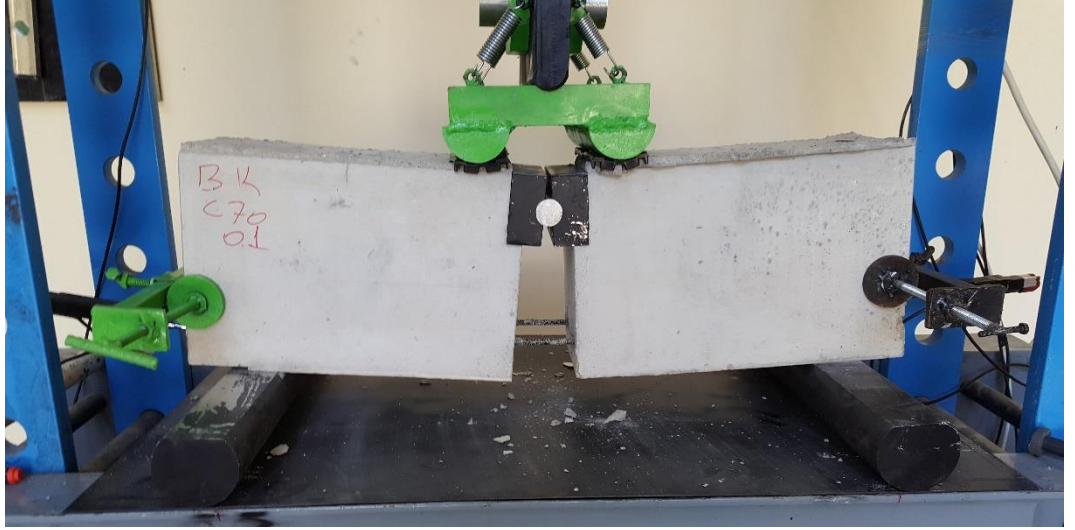
Şekil A.4. Deney kiriş donatılarının kalıplara yerleştirilmesi ve beton dökümü



Şekil A.5. Deney kirişlerinin kalıplardan çıkarılması



Şekil A.6. Deney kirişinin deney yükleme düzeneğine yerleştirilmesi



Şekil A.7. Sıyrılma göçmesiyle sonuçlanmış bir deney kirişi



Şekil A.8. İnce taneli kumlanmış GFRP (GSf) donatının betondan sıyrılması sonrası yüzeyindeki deformasyon



Şekil A.9. İnce taneli kumlanmış CFRP (CSf) donatının betondan sıyrılması sonrası yüzeyindeki deformasyon



Şekil A.10. Nervürlü GFRP (GR) donatının betondan sıyrılması sonrası yüzeyindeki deformasyon



Şekil A.11. Oluklu GFRP (GWO) donatının betondan sıyrılması sonrası yüzeyindeki deformasyon



Şekil A.12. İri taneli kumlanmış ve sargılı BFRP (BWw+Sc) donatının betondan sıyrılması sonrası yüzeyindeki deformasyon



Şekil A.13. Nervürlü betonarme çelik (SR) donatının betondan sıyrılma sonrası yüzeyindeki deformasyon



Şekil A.14. Donatı kopması ile sonuçlanmış kiriş numunesi



Şekil A.15. Kaldıraç etkisinden dolayı göçmüş bir kiriş numunesi



Şekil A.16. Beton ayrışma göçmesi ile sonuçlanmış bir deney kirişi



Şekil A.17. Deney kirişlerinde oluşan segregasyon



Şekil A.18. Deneyi tamamlanan kiriş numuneleri

B. MAFSALLI KİRİŞ DENEYLERİ

Çizelge B.1. Bu çalışmada deneyi yapılan mafsallı kiriş deneyleri

Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F_{mode}	Beton Türü
G8Sf/4.5-11-4.5-5-1/C30	29.14	3.24	5	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	10.97	P	VC
G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	7.75	P	VC
G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30*	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	6.96	P	VC
G8Sf-4.5-11-4.5-10-1/C30*	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	6.54	P	VC
G8Sf/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26	2.33	20	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	5.05	P	VC
G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	-	A	VC
G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34	3.79	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	-	A	VC
G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	7.63	P	VC
G8Sf/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	0	5.04	P	VC
G8Sf/2.5-15-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	2.44	14.63	1	8.50	P	VC
G8Sf/3.5-13-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	3.41	12.68	1	-	A	VC
G8Sf/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	2.44	4.39	10.73	1	7.50	P	VC
G8Sf/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	3.41	4.39	10.73	1	8.24	P	VC
G6Sf/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	6	6.25	38	1000	4.32	4.32	16.96	1	13.59	P	VC
G12Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	12.00	12.40	38	1000	4.35	4.35	10.65	1	6.12	P	VC
G8Sf/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	3.66	1	5.76	P	VC
G8Sf/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	6.83	1	8.78	P	VC

Deney İsmi	f _{cy} (MPa)	f _{tsp} (MPa)	l _e (db)	FRP _{type}	d _b (mm)	d _{b,o} (mm)	E _{FRP} (GPa)	f _{FRP} (MPa)	C (d _{b,o})	C _s (d _{b,o})	C _{ccsb} (d _{b,o})	T	u (MPa)	F _{mode}	Beton Türü
C8Sf/4.5-11-4.5-5-1/C30	29.14	3.24	5	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	-	A	VC
C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	11.69	P	VC
C8Sf/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26	2.33	20	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	-	A	VC
C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	8.43	P	VC
C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34	3.79	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	12.72	P	VC
C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	13.82	P	VC
C8Sf/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	0	9.72	P	VC
C8Sf/2.5-15-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	2.44	14.63	1	6.49	P	VC
C8Sf/3.5-13-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	3.41	12.68	1	11.78	P	VC
C8Sf/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	2.44	4.39	10.73	1	11.66	P	VC
C8Sf/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	3.41	4.39	10.73	1	-	A	VC
C6Sf/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	6.00	6.20	145	2080	4.35	4.35	17.09	1	12.03	P	VC
C12Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	12.00	12.20	145	2080	4.43	4.43	10.82	1	8.74	P	VC
C8Sf/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	3.66	1	-	A	VC
C8Sf/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	6.83	1	-	A	VC
C6Sc/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSc	6.00	6.60	150	1180	4.09	4.09	16.06	1	14.98	P	VC
G8WO/4.5-11-4.5-5-1/C30	29.14	3.24	5	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89		-	A	VC
G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	11.39	P	VC
G8WO/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26	2.33	20	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	8.78	P	VC
G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	9.29	P	VC
G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34	3.79	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	14.70	P	VC
G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	11.81	P	VC
G8WO/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	0	9.31	P	VC
G8WO/2.5-15-4.5-10-1/C30	17.26	2.33	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	2.25	13.48	1	-	A	VC

Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F _{mode}	Beton Türü
G8WO/3.5-13-4.5-10-1/C30	17.26	2.33	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	3.15	11.69	1	-	A	VC
G8WO/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	2.25	4.04	9.89	1	11.43	P	VC
G8WO/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	3.15	4.04	9.89	1	11.47	P	VC
G12WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	12.00	13.30	63.5	1000	4.06	4.06	9.92	1	10.17	P	VC
G8WO/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	3.37	1	-	A	VC
G8WO/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	6.29	1	11.50	P	VC
G12Ww/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWw	12.00	12.00	45	600	4.50	4.50	11.00	1	11.42	P	VC
B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-5-1/C30	29.14	3.24	5	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	1	-	A	VC
B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	1	22.15	P	VC
B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26	2.33	20	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	1	-	A	VC
B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	1	16.85	P	VC
B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34	3.79	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	1	25.71	S	VC
B8Ww+Sc /4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	1	20.73	P	VC
B8Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	0	18.30	P	VC
B8Ww+Sc /2.5-15-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	2.70	16.22	1	10.72	S	VC
B8Ww+Sc/3.5-13-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	3.78	14.05	1	19.69	P+S	VC
B8Ww+Sc /4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	2.70	4.86	11.89	1	-	A	VC
B8Ww+Sc/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	3.78	4.86	11.89	1	-	A	VC
B6Ww+Sc/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BWw	6.00	5.40	55.5	800	5	5	19.63	1	-	A	VC
B12Ww+Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BWw	12.00	12.00	55.5	800	4.50	4.50	11.00	1	13.93	P+Sh	VC
B8Ww+Sc/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	4.17	1	-	A	VC
B8Ww+Sc/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BWw	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	7.57	1	-	A	VC
G8R/4.5-11-4.5-5-1/C30	29.14	3.24	5	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	-	A	VC
G8R/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	15.08	P	VC

Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F _{mode}	Beton Türü
G8R/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26	2.33	20	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	9.62	P	VC
G8R/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	10.74	P	VC
G8R/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34	3.79	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	22.11	P	VC
G8R/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	17.35	P	VC
G8R/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	0	11.13	P	VC
G8R/2.5-15-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	2.50	15.00	1	15.83	P	VC
G8R/3.5-13-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	3.50	13.00	1	-	A	VC
G8R/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	2.50	4.50	11.00	1	13.82	P	VC
G8R/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	3.50	4.50	11.00	1	15.95	P	VC
G8R/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	3.75	1	12.79	P	VC
G8R/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	7.00	1	15.62	P	VC
G6R/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	6.00	6.00	50	800	4.50	4.50	17.67	1	13.10	P	VC
G12R/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	12.00	12.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	10.74	P	VC
S8R/4.5-11-4.5-5-1/C30	29.14	3.24	5	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	4.93	12.05	1	19.06	P	VC
S8R/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	4.93	12.05	1	17.18	RY	VC
S8R/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26	2.33	20	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	4.93	12.05	1	9.41	RR	VC
S8R/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	4.93	12.05	1	16.11	RY	VC
S8R/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34	3.79	10	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	4.93	12.05	1	17.27	RY	VC
S8R/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	4.93	12.05	1	16.17	RR	VC
S8R/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	4.93	12.05	0	14.60	P	VC
S8R/2.5-15-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	2.74	16.92	1	-	A	VC
S8R/3.5-13-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	3.84	14.92	1	16.97	RY	VC
S8R/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	SR	8.00	7.30	200	696	2.74	4.93	12.05	1	15.28	P	VC
S8R/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	SR	8.00	7.30	200	696	3.84	4.93	12.05	1	-	A	VC

Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F_{mode}	Beton Türü
S12R/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	SR	12.00	11.50	200	582	4.70	4.70	11.48	1	13.12	RY	VC
S8R/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	4.93	4.11	1	-	A	VC
S8R/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	SR	8.00	7.30	200	696	4.93	4.93	7.67	1	16.69	RY	VC

Çizelge B.2. Mafsallı kiriş deneyleri veri tabanı

Deneyi Yapan	Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{fsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F_{mode}	Beton Türü
Mazaheripour vd. (2013)	B-Ø12-L5Ø-C15-25	58.58	6.49	5	GSc	12.00	12.36	49	1000	1.71	-	-	-	18.04	P	SFSCC (%0.76)
"	B-Ø12-L5Ø-C15-26	61.45	6.64	5	GSc	12.00	12.36	49	1000	1.71	-	-	-	19.17	P	SFSCC (%0.76)
"	B-Ø12-L5Ø-C30-27	61.45	6.64	5	GSc	12.00	12.36	49	1000	2.93	-	-	-	23.72	P	SFSCC (%0.76)
"	B-Ø12-L5Ø-C30-28	61.45	6.64	5	GSc	12.00	12.36	49	1000	2.93	-	-	-	21.23	P	SFSCC (%0.76)
"	B-Ø12-L10Ø-C15-30	67.85	6.95	10	GSc	12.00	12.36	49	1000	1.71	-	-	-	13.91	P	SFSCC (%0.76)
"	B-Ø12-L10Ø-C30-32	67.85	6.95	10	GSc	12.00	12.36	49	1000	2.93	-	-	-	16.95	P	SFSCC (%0.76)
"	B-Ø12-L20Ø-C15-33	66.38	6.88	20	GSc	12.00	12.36	49	1000	1.71	-	-	-	10.80	P	SFSCC (%0.76)
"	B-Ø12-L20Ø-C15-34	66.38	6.88	20	GSc	12.00	12.36	49	1000	1.71	-	-	-	11.03	P	SFSCC (%0.76)
"	B-Ø12-L20Ø-C30-35	66.38	6.88	20	GSc	12.00	12.36	49	1000	2.93	-	-	-	11.89	P	SFSCC (%0.76)
"	B-Ø12-L20Ø-C30-36	66.38	6.88	20	GSc	12.00	12.36	49	1000	2.93	-	-	-	11.60	P	SFSCC (%0.76)
Hossain vd. (2017)	HSC-LM-1	71.20	5.69	3	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	22.70	P	VC
"	HSC-LM-2	71.20	5.69	5	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	20.20	P	VC
"	HSC-LM-3	71.20	5.69	7	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	17.90	P	VC
"	HSC-LM-4	71.20	5.69	3	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	22.60	P	VC
"	HSC-LM-5	71.20	5.69	5	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	19.00	P	VC
"	HSC-LM-6	71.20	5.69	7	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	15.70	P	VC
"	UHSC1-LM-1	128.60	8.25	3	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	26.00	P	VC
"	UHSC1-LM-2	128.60	8.25	5	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	20.00	P	VC
"	UHSC1-LM-3	128.60	8.25	7	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	18.90	P	VC
"	UHSC1-LM-4	128.60	8.25	3	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	25.30	P	VC
"	UHSC1-LM-5	128.60	8.25	5	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	21.90	P	VC

Deneyi Yapan	Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F_{mode}	Beton Türü
"	UHSC1-LM-6	128.60	8.25	7	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	17.20	P	VC
"	UHSC2-LM-1	147.80	9.01	3	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	24.00	P	VC
"	UHSC2-LM-2	147.80	9.01	5	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	21.30	P	VC
"	UHSC2-LM-3	147.80	9.01	7	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	20.00	P	VC
"	UHSC2-LM-4	147.80	9.01	3	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	24.30	P	VC
"	UHSC2-LM-5	147.80	9.01	5	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	20.90	P	VC
"	UHSC2-LM-6	147.80	9.01	7	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	17.30	P	VC
"	UHSC3-LM-2	174.50	10.00	5	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	20.80	P	VC
"	UHSC3-LM-3	174.50	10.00	7	GSc	15.90	17.49	48.2	751	2.86	-	-	-	18.70	P	VC
"	UHSC3-LM-4	174.50	10.00	3	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	27.50	P	VC
"	UHSC3-LM-5	174.50	10.00	5	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	20.50	P	VC
"	UHSC3-LM-6	174.50	10.00	7	GSc	19.10	20.76	47.6	728	2.41	-	-	-	19.30	P	VC
"	HSC-HM-1	71.20	5.69	3	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	18.50	P	VC
"	HSC-HM-2	71.20	5.69	5	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	14.50	P	VC
"	HSC-HM-3	71.20	5.69	7	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	16.40	P	VC
"	HSC-HM-4	71.20	5.69	3	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	21.40	P	VC
"	HSC-HM-5	71.20	5.69	5	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	16.20	P	VC
"	HSC-HM-6	71.20	5.69	7	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	15.40	P	VC
"	UHSC1-HM-1	128.60	8.25	3	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	20.10	P	VC
"	UHSC1-HM-2	128.60	8.25	5	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	17.40	P	VC
"	UHSC1-HM-3	128.60	8.25	7	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	17.50	P	VC
"	UHSC1-HM-4	128.60	8.25	3	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	17.20	P	VC
"	UHSC1-HM-5	128.60	8.25	5	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	13.50	P	VC
"	UHSC1-HM-6	128.60	8.25	7	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	17.30	P	VC

Deneyi Yapan	Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F_{mode}	Beton Türü
"	UHSC2-HM-1	147.80	9.01	3	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	22.90	P	VC
"	UHSC2-HM-2	147.80	9.01	5	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	17.90	P	VC
"	UHSC2-HM-3	147.80	9.01	7	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	17.10	P	VC
"	UHSC2-HM-5	147.80	9.01	5	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	14.50	P	VC
"	UHSC2-HM-6	147.80	9.01	7	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	12.10	P	VC
"	UHSC3-HM-1	174.50	10.00	3	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	22.10	P	VC
"	UHSC3-HM-2	174.50	10.00	5	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	16.40	P	VC
"	UHSC3-HM-3	174.50	10.00	7	GSc	15.90	16.44	64.1	1439	3.04	-	-	-	18.40	P	VC
"	UHSC3-HM-4	174.50	10.00	3	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	12.80	P	VC
"	UHSC3-HM-5	174.50	10.00	5	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	12.80	P	VC
"	UHSC3-HM-6	174.50	10.00	7	GSc	19.10	20.08	63.1	1424	2.49	-	-	-	10.90	P	VC
Hossain (2018)	ECC-12.7-5D-LM	57.00	7.05	5	GSc	12.70	14.40	42.5	1000	3.47	-	-	-	21.90	P	ECC (%2.6)
"	ECC-12.7-7D-LM	57.00	7.05	7	GSc	12.70	14.40	42.5	1000	3.47	-	-	-	19.30	P	ECC (%2.6)
"	ECC-12.7-10D-LM	57.00	7.05	10	GSc	12.70	14.40	42.5	1000	3.47	-	-	-	17.30	P	ECC (%2.6)
"	ECC-15.9-5D-LM	57.00	7.05	5	GSc	15.90	17.30	42.5	940	2.89	-	-	-	19.90	P	ECC (%2.6)
"	ECC-15.9-7D-LM	57.00	7.05	7	GSc	15.90	17.30	42.5	940	2.89	-	-	-	17.50	P	ECC (%2.6)
"	ECC-15.9-10D-LM	57.00	7.05	10	GSc	15.90	17.30	42.5	940	2.89	-	-	-	15.90	P	ECC (%2.6)
"	ECC-19.1-5D-LM	57.00	7.05	5	GSc	19.10	20.50	42.5	940	2.44	-	-	-	18.00	P	ECC (%2.6)
"	ECC-19.1-7D-LM	57.00	7.05	7	GSc	19.10	20.50	42.5	940	2.44	-	-	-	16.00	P	ECC (%2.6)
"	ECC-19.1-10D-LM	57.00	7.05	10	GSc	19.10	20.50	42.5	940	2.44	-	-	-	13.70	P	ECC (%2.6)
"	NC-15.9-5D-LM	63.00	5.26	5	GSc	15.90	17.30	42.5	940	2.89	-	-	-	18.50	P	VC
"	NC-15.9-7D-LM	63.00	5.26	7	GSc	15.90	17.30	42.5	940	2.89	-	-	-	17.30	P	VC
"	NC-15.9-10D-LM	63.00	5.26	10	GSc	15.90	17.30	42.5	940	2.89	-	-	-	13.90	P	VC
"	NC-19.1-5D-LM	63.00	5.26	5	GSc	19.10	20.50	42.5	940	2.44	-	-	-	11.20	P	VC

Deneyi Yapan	Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F_{mode}	Beton Türü
"	NC-19.1-7D-LM	63.00	5.26	7	GSc	19.10	20.50	42.5	940	2.44	-	-	-	10.70	P	VC
"	NC-19.1-10D-LM	63.00	5.26	10	GSc	19.10	20.50	42.5	940	2.44	-	-	-	9.70	P	VC
"	ECC-12.7-5D-HM	57.00	7.05	5	GSc	12.70	15.50	65.6	1312	3.23	-	-	-	18.40	P	ECC (%2.6)
"	ECC-12.7-7D-HM	57.00	7.05	7	GSc	12.70	15.50	65.6	1312	3.23	-	-	-	14.60	P	ECC (%2.6)
"	ECC-12.7-10D-HM	57.00	7.05	10	GSc	12.70	15.50	65.6	1312	3.23	-	-	-	11.70	P	ECC (%2.6)
"	ECC-15.9-5D-HM	57.00	7.05	5	GSc	15.90	18.80	62.6	1184	2.66	-	-	-	21.10	P	ECC (%2.6)
"	ECC-15.9-7D-HM	57.00	7.05	7	GSc	15.90	18.80	62.6	1184	2.66	-	-	-	18.10	P	ECC (%2.6)
"	ECC-15.9-10D-HM	57.00	7.05	10	GSc	15.90	18.80	62.6	1184	2.66	-	-	-	15.20	P	ECC (%2.6)
"	ECC-19.1-5D-HM	57.00	7.05	5	GSc	19.10	21.70	63.7	1105	2.30	-	-	-	15.10	P	ECC (%2.6)
"	ECC-19.1-7D-HM	57.00	7.05	7	GSc	19.10	21.70	63.7	1105	2.30	-	-	-	13.90	P	ECC (%2.6)
"	ECC-19.1-10D-HM	57.00	7.05	10	GSc	19.10	21.70	63.7	1105	2.30	-	-	-	12.40	P	ECC (%2.6)
"	NC-15.9-5D-HM	63.00	5.26	5	GSc	15.90	18.80	62.6	1184	2.66	-	-	-	15.00	P	VC
"	NC-15.9-7D-HM	63.00	5.26	7	GSc	15.90	18.80	62.6	1184	2.66	-	-	-	13.40	P	VC
"	NC-15.9-10D-HM	63.00	5.26	10	GSc	15.90	18.80	62.6	1184	2.66	-	-	-	10.50	P	VC
"	NC-19.1-7D-HM	63.00	5.26	7	GSc	19.10	21.70	63.7	1105	2.30	-	-	-	9.60	P	VC
"	NC-19.1-10D-HM	63.00	5.26	10	GSc	19.10	21.70	63.7	1105	2.30	-	-	-	9.40	P	VC
Bu çalışma	G8Sf/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	0	5.04	P	VC
"	G8Sf/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26	2.33	20	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	5.05	P	VC
"	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	7.63	P	VC
"	G8Sf/4.5-11-4.5-5-1/C30	29.14	3.24	5	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	10.97	P	VC
"	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	7.75	P	VC
"	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	6.54	P	VC
"	G8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	10.73	1	6.96	P	VC
"	G8Sf/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	2.44	4.39	10.73	1	7.50	P	VC

Deneyi Yapan	Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F_{mode}	Beton Türü
"	G8Sf/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	3.41	4.39	10.73	1	8.24	P	VC
"	G8Sf/2.5-15-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	2.44	14.63	1	8.50	P	VC
"	G8Sf/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	3.66	1	5.76	P	VC
"	G8Sf/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	8.00	8.20	38	1000	4.39	4.39	6.83	1	8.78	P	VC
"	G12Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GSf	12.00	12.40	38	1000	4.35	4.35	10.65	1	6.12	P	VC
"	C8Sf/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	0	9.72	P	VC
"	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	8.43	P	VC
"	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34	3.79	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	12.72	P	VC
"	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	13.82	P	VC
"	C8Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	4.39	10.73	1	11.69	P	VC
"	C8Sf/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	2.44	4.39	10.73	1	11.66	P	VC
"	C8Sf/3.5-13-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	8.00	8.20	145	2080	4.39	3.41	12.68	1	11.78	P	VC
"	C6Sf/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	6.00	6.20	145	2080	4.35	4.35	17.13	1	12.03	P	VC
"	C12Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSf	12.00	12.20	145	2080	4.43	4.43	10.65	1	8.74	P	VC
"	C6Sc/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	CSc	6.00	6.60	150	1180	4.09	4.09	16.09	1	14.98	P	VC
Mazaheripour vd. (2013)	A-Ø8-L5Ø-C15-01	58.58	6.49	5	GWO	8.00	8.64	65	1500	2.24	-	-	-	19.92	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L5Ø-C15-02	58.58	6.49	5	GWO	8.00	8.64	65	1500	2.24	-	-	-	20.63	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L5Ø-C30-03	58.58	6.49	5	GWO	8.00	8.64	65	1500	3.97	-	-	-	20.67	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L5Ø-C30-04	58.58	6.49	5	GWO	8.00	8.64	65	1500	3.97	-	-	-	19.05	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L 10Ø-C15-05	66.38	6.88	10	GWO	8.00	8.64	65	1500	2.24	-	-	-	16.01	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L 10Ø-C15-06	66.38	6.88	10	GWO	8.00	8.64	65	1500	2.24	-	-	-	14.72	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L 10Ø-C30-07	64.58	6.80	10	GWO	8.00	8.64	65	1500	3.97	-	-	-	17.59	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L 10Ø-C30-08	64.58	6.80	10	GWO	8.00	8.64	65	1500	3.97	-	-	-	17.57	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L20Ø-C15-09	64.58	6.80	20	GWO	8.00	8.64	65	1500	2.24	-	-	-	13.96	P	SFSCC (%0.76)

Deneyi Yapan	Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F _{mode}	Beton Türü
"	A-Ø8-L20Ø-C15-10	64.58	6.80	20	GWO	8.00	8.64	65	1500	2.24	-	-	-	14.47	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L20Ø-C30-11	64.58	6.80	20	GWO	8.00	8.64	65	1500	3.97	-	-	-	16.10	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø8-L20Ø-C30-12	64.58	6.80	20	GWO	8.00	8.64	65	1500	3.97	-	-	-	17.13	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø12-L5Ø-C15-13	61.45	6.64	5	GWO	12.00	13.08	56	1350	1.65	-	-	-	21.36	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø12-L5Ø-C15-14	61.45	6.64	5	GWO	12.00	13.08	56	1350	1.65	-	-	-	18.23	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø12-L10Ø-C15-18	67.85	6.95	10	GWO	12.00	13.08	56	1350	1.65	-	-	-	15.62	PS	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø12-L10Ø-C30-19	67.85	6.95	10	GWO	12.00	13.08	56	1350	2.79	-	-	-	18.24	P	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø12-L20Ø-C15-21	67.85	6.95	20	GWO	12.00	13.08	56	1350	1.65	-	-	-	14.10	PS	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø12-L20Ø-C15-22	67.85	6.95	20	GWO	12.00	13.08	56	1350	1.65	-	-	-	12.83	PS	SFSCC (%0.76)
"	A-Ø12-L20Ø-C30-23	67.85	6.95	20	GWO	12.00	13.08	56	1350	2.79	-	-	-	16.17	P	SFSCC (%0.76)
Bu çalışma	G8WO/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	0	9.31	P	VC
"	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	9.29	P	VC
"	G8WO/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26	2.33	20	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	8.78	P	VC
"	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34	3.79	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	14.70	P	VC
"	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	11.81	P	VC
"	G8WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	9.89	1	11.39	P	VC
"	G8WO/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	2.25	4.04	9.89	1	11.43	P	VC
"	G8WO/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	3.15	4.04	9.89	1	11.47	P	VC
"	G8WO/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	8.00	8.90	63.5	1000	4.04	4.04	6.29	1	11.50	P	VC
"	G12WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GWO	12.00	13.30	63.5	1000	4.06	4.06	9.92	1	10.17	P	VC
Tighiouart vd. (1998)	Type B-L10-12.7	31.00	3.37	10	GW _w	12.70	12.70	42	690	3.94	-	-	-	12.30	P	VC
"	Type B-L10-15.9	31.00	3.37	10	GW _w	15.90	15.90	42	690	3.14	-	-	-	10.80	P	VC
"	Type B-L10-25.4	31.00	3.37	10	GW _w	25.40	25.40	42	690	1.97	-	-	-	7.40	P	VC
Xue vd.	B-G-16-2.5-30	24.45	2.90	2.5	GW _w	16.00	16.00	40	655	3.13	-	-	-	16.70	P	VC

Deneyi Yapan	Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F_{mode}	Beton Türü
(2016)																
"	B-G-16-2.5-30	24.45	2.90	2.5	GW _w	16.00	16.00	40	655	3.13	-	-	-	19.80	P	VC
"	B-G-16-2.5-30	24.45	2.90	2.5	GW _w	16.00	16.00	40	655	3.13	-	-	-	19.00	P	VC
"	B-G-16-5-30	24.45	2.90	5	GW _w	16.00	16.00	40	655	3.13	-	-	-	11.80	P	VC
Bu çalışma	G12W _w /4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GW _w	12.00	12.00	45	600	4.50	4.50	11.00	1	11.42	P	VC
"	B8W _w +Sc/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	BW _w	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	0	18.30	P	VC
"	B8W _w +Sc/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	BW _w	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	1	16.85	P	VC
"	B8W _w +Sc/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.34	3.79	10	BW _w	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	1	25.71	S	VC
"	B8W _w +Sc/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BW _w	8.00	7.40	55.5	800	4.86	4.86	11.89	1	22.15	P	VC
"	B8W _w +Sc/3.5-13-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	BW _w	8.00	7.40	55.5	800	4.86	3.78	14.05	1	19.69	P	VC
Chaallal ve Benmokrane (1996)	B-12.7	31.00	3.37	10	GR	12.70	12.70	42	689	3.94	-	-	-	10.60	P	VC
"	B-15.9	31.00	3.37	10	GR	15.90	15.90	42	689	3.14	-	-	-	7.30	P	VC
"	B-19.1	31.00	3.37	10	GR	19.10	19.10	42	689	2.62	-	-	-	6.60	P	VC
"	B-25.4	31.00	3.37	10	GR	25.40	25.40	42	689	1.97	-	-	-	6.40	P	VC
Tighiouart vd. (1998)	Type A-L6-12.7	31.00	3.37	6	GR	12.70	12.70	42	683	3.94	-	-	-	11.30	P	VC
"	Type A-L6-15.9	31.00	3.37	6	GR	15.90	15.90	42	683	3.14	-	-	-	10.60	P	VC
"	Type A-L6-19.1	31.00	3.37	6	GR	19.10	19.10	42	683	2.62	-	-	-	7.10	P	VC
"	Type A-L6-25.4	31.00	3.37	6	GR	25.40	25.40	42	683	1.97	-	-	-	7.00	P	VC
"	Type A-L16-12.7	31.00	3.37	16	GR	12.70	12.70	42	683	3.94	-	-	-	8.70	S	VC
"	Type A-L16-19.1	31.00	3.37	16	GR	19.10	19.10	42	683	2.62	-	-	-	5.30	P	VC
"	Type A-L16-25.4	31.00	3.37	16	GR	25.40	25.40	42	683	1.97	-	-	-	5.10	P	VC
Kotynia vd. (2017)	16-L160-15.1	34.30	3.59	10	GR	16.00	16.00	50.5	1205	1.44	-	-	-	7.59	P	VC
"	16-L160-15.2	36.30	3.72	10	GR	16.00	16.00	50.5	1205	1.44	-	-	-	7.72	P	VC

Deneyi Yapan	Deney İsmi	f_{cy} (MPa)	f_{tsp} (MPa)	l_e (db)	FRP _{type}	d_b (mm)	$d_{b,o}$ (mm)	E_{FRP} (GPa)	f_{FRP} (MPa)	C ($d_{b,o}$)	C_s ($d_{b,o}$)	C_{ccsb} ($d_{b,o}$)	T	u (MPa)	F_{mode}	Beton Türü
"	18-L180-15.2	36.30	3.72	10	GR	18.00	18.00	50.5	1109	1.33	-	-	-	6.24	P	VC
"	12-L120-35.1	36.30	3.72	10	GR	12.00	12.00	50.5	1281	3.42	-	-	-	11.05	P	VC
"	12-L1 20-35.2	34.30	3.59	10	GR	12.00	12.00	50.5	1281	3.42	-	-	-	12.11	P	VC
"	16-L160-35.1	36.30	3.72	10	GR	16.00	16.00	50.5	1205	2.69	-	-	-	9.15	P	VC
"	18-L180-35.1	34.30	3.59	10	GR	18.00	18.00	50.5	1109	2.44	-	-	-	7.70	P	VC
"	18-L180-35.2	34.30	3.59	10	GR	18.00	18.00	50.5	1109	2.44	-	-	-	7.36	P	VC
Bu çalışma	G8R/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.26	2.33	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	0	11.13	P	VC
"	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.26	2.33	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	10.74	P	VC
"	G8R/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.26	2.33	20	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	9.62	P	VC
"	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.37	4.04	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	17.35	P	VC
"	G8R/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	15.08	P	VC
"	G8R/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	2.50	4.50	11.00	1	13.82	P	VC
"	G8R/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	3.50	4.50	11.00	1	15.95	P	VC
"	G8R/2.5-15-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	2.50	15.00	1	15.83	P	VC
"	G8R/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	3.75	1	12.79	P	VC
"	G8R/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	8.00	8.00	50	800	4.50	4.50	7.00	1	15.62	P	VC
"	G6R/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	6.00	6.00	50	800	4.50	4.50	17.67	1	13.10	P	VC
"	G12R/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.14	3.24	10	GR	12.00	12.00	50	800	4.50	4.50	11.00	1	10.74	P	VC
Seis ve Beycioğlu (2017)	B-10-12-1	30.79	3.35	10	BR	12.00	12.00	70	1100	4.17	-	-	-	18.54	P	VC
"	B-10-12-2	30.79	3.35	10	BR	12.00	12.00	70	1100	4.17	-	-	-	17.83	P	VC
"	B-10-08-1	30.79	3.35	10	BR	8.00	8.00	70	1100	6.25	-	-	-	22.35	P	VC
"	B-10-08-2	30.79	3.35	10	BR	8.00	8.00	70	1100	6.25	-	-	-	21.95	P	VC

Çizelge B.3. Deneme testleri veri tabanı

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
1	5	8	500	1168	461	414	281	268	227	226	232	215	240	248	148	151	248	257	210	207	142	140
2	5	8	500	606	242	223	139	137	110	114	113	108	117	126	70	75	122	131	102	104	67	69
3	5	8	500	396	177	162	94	94	73	77	75	73	78	86	45	49	81	89	67	70	43	45
4	5	8	500	282	154	136	74	73	56	59	58	55	60	66	33	36	63	69	51	53	32	33
5	5	8	500	211	156	126	64	61	47	48	49	45	51	55	27	29	54	57	43	42	26	26
6	5	8	500	161	186	129	61	53	43	41	44	38	47	47	24	23	49	50	38	36	23	21
7	5	8	500	124	292	149	62	48	42	36	44	33	46	42	22	20	49	45	37	31	21	18
8	5	8	500	96	1341	226	69	46	43	32	45	29	48	39	21	17	52	42	38	27	20	15
9	5	8	500	73	-426	1685	82	45	48	30	50	27	54	37	22	14	59	40	40	25	21	13
10	5	8	500	54	-180	-187	109	46	55	28	58	25	64	36	23	12	71	40	46	23	22	11
1	10	8	500	1168	461	414	281	268	227	226	232	215	240	248	148	151	248	257	210	207	142	140
2	10	8	500	606	242	223	139	137	110	114	113	108	117	126	70	75	122	131	102	104	67	69
3	10	8	500	396	177	162	94	94	73	77	75	73	78	86	45	49	81	89	67	70	43	45
4	10	8	500	282	154	136	74	73	56	59	58	55	60	66	33	36	63	69	51	53	32	33
5	10	8	500	211	156	126	64	61	47	48	49	45	51	55	27	29	54	57	43	42	26	26
6	10	8	500	161	186	129	61	53	43	41	44	38	47	47	24	23	49	50	38	36	23	21
7	10	8	500	124	292	149	62	48	42	36	44	33	46	42	22	20	49	45	37	31	21	18
8	10	8	500	96	1341	226	69	46	43	32	45	29	48	39	21	17	52	42	38	27	20	15

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
9	10	8	500	73	-426	1685	82	45	48	30	50	27	54	37	22	14	59	40	40	25	21	13
10	10	8	500	54	-180	-187	109	46	55	28	58	25	64	36	23	12	71	40	46	23	22	11
1	20	8	500	1168	461	414	281	268	227	226	232	215	240	248	148	151	248	257	210	207	142	140
2	20	8	500	606	242	223	139	137	110	114	113	108	117	126	70	75	122	131	102	104	67	69
3	20	8	500	396	177	162	94	94	73	77	75	73	78	86	45	49	81	89	67	70	43	45
4	20	8	500	282	154	136	74	73	56	59	58	55	60	66	33	36	63	69	51	53	32	33
5	20	8	500	211	156	126	64	61	47	48	49	45	51	55	27	29	54	57	43	42	26	26
6	20	8	500	161	186	129	61	53	43	41	44	38	47	47	24	23	49	50	38	36	23	21
7	20	8	500	124	292	149	62	48	42	36	44	33	46	42	22	20	49	45	37	31	21	18
8	20	8	500	96	1341	226	69	46	43	32	45	29	48	39	21	17	52	42	38	27	20	15
9	20	8	500	73	-426	1685	82	45	48	30	50	27	54	37	22	14	59	40	40	25	21	13
10	20	8	500	54	-180	-187	109	46	55	28	58	25	64	36	23	12	71	40	46	23	22	11
1	40	8	500	1168	461	414	281	268	227	226	232	215	240	248	148	151	248	257	210	207	142	140
2	40	8	500	606	242	223	139	137	110	114	113	108	117	126	70	75	122	131	102	104	67	69
3	40	8	500	396	177	162	94	94	73	77	75	73	78	86	45	49	81	89	67	70	43	45
4	40	8	500	282	154	136	74	73	56	59	58	55	60	66	33	36	63	69	51	53	32	33
5	40	8	500	211	156	126	64	61	47	48	49	45	51	55	27	29	54	57	43	42	26	26
6	40	8	500	161	186	129	61	53	43	41	44	38	47	47	24	23	49	50	38	36	23	21
7	40	8	500	124	292	149	62	48	42	36	44	33	46	42	22	20	49	45	37	31	21	18
8	40	8	500	96	1341	226	69	46	43	32	45	29	48	39	21	17	52	42	38	27	20	15

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
9	40	8	500	73	-426	1685	82	45	48	30	50	27	54	37	22	14	59	40	40	25	21	13
10	40	8	500	54	-180	-187	109	46	55	28	58	25	64	36	23	12	71	40	46	23	22	11
1	60	8	500	1168	461	414	281	268	227	226	232	215	240	248	148	151	248	257	210	207	142	140
2	60	8	500	606	242	223	139	137	110	114	113	108	117	126	70	75	122	131	102	104	67	69
3	60	8	500	396	177	162	94	94	73	77	75	73	78	86	45	49	81	89	67	70	43	45
4	60	8	500	282	154	136	74	73	56	59	58	55	60	66	33	36	63	69	51	53	32	33
5	60	8	500	211	156	126	64	61	47	48	49	45	51	55	27	29	54	57	43	42	26	26
6	60	8	500	161	186	129	61	53	43	41	44	38	47	47	24	23	49	50	38	36	23	21
7	60	8	500	124	292	149	62	48	42	36	44	33	46	42	22	20	49	45	37	31	21	18
8	60	8	500	96	1341	226	69	46	43	32	45	29	48	39	21	17	52	42	38	27	20	15
9	60	8	500	73	-426	1685	82	45	48	30	50	27	54	37	22	14	59	40	40	25	21	13
10	60	8	500	54	-180	-187	109	46	55	28	58	25	64	36	23	12	71	40	46	23	22	11
1	5	16	500	2335	-16089	1458	1585	744	947	592	992	553	1065	671	447	359	1155	701	812	527	423	327
2	5	16	500	1213	-4764	878	758	394	443	306	465	284	501	351	205	179	544	369	378	270	195	162
3	5	16	500	791	-2172	761	493	282	281	212	296	196	319	248	128	119	348	262	239	185	121	107
4	5	16	500	565	-1218	867	369	231	205	167	216	152	234	199	92	89	256	212	173	143	87	79
5	5	16	500	422	-780	1709	303	206	164	141	173	128	188	173	72	71	206	186	138	119	68	63
6	5	16	500	322	-550	-2047	268	199	140	126	148	112	162	160	60	59	178	175	117	103	57	52
7	5	16	500	248	-420	-455	253	209	127	118	135	103	148	158	54	50	164	177	106	94	51	44
8	5	16	500	191	-342	-212	251	249	122	117	129	98	142	168	50	43	158	196	100	88	47	37
9	5	16	500	146	-293	-120	261	394	121	122	129	98	142	202	48	38	159	258	99	86	46	33
10	5	16	500	109	-262	-75	282	9456	124	140	132	105	147	323	48	34	165	566	101	88	46	29

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
1	10	16	500	2335	-16089	1458	1585	744	947	592	992	553	1065	671	447	359	1155	701	812	527	423	327
2	10	16	500	1213	-4764	878	758	394	443	306	465	284	501	351	205	179	544	369	378	270	195	162
3	10	16	500	791	-2172	761	493	282	281	212	296	196	319	248	128	119	348	262	239	185	121	107
4	10	16	500	565	-1218	867	369	231	205	167	216	152	234	199	92	89	256	212	173	143	87	79
5	10	16	500	422	-780	1709	303	206	164	141	173	128	188	173	72	71	206	186	138	119	68	63
6	10	16	500	322	-550	-2047	268	199	140	126	148	112	162	160	60	59	178	175	117	103	57	52
7	10	16	500	248	-420	-455	253	209	127	118	135	103	148	158	54	50	164	177	106	94	51	44
8	10	16	500	191	-342	-212	251	249	122	117	129	98	142	168	50	43	158	196	100	88	47	37
9	10	16	500	146	-293	-120	261	394	121	122	129	98	142	202	48	38	159	258	99	86	46	33
10	10	16	500	109	-262	-75	282	9456	124	140	132	105	147	323	48	34	165	566	101	88	46	29
1	20	16	500	2335	-16089	1458	1585	744	947	592	992	553	1065	671	447	359	1155	701	812	527	423	327
2	20	16	500	1213	-4764	878	758	394	443	306	465	284	501	351	205	179	544	369	378	270	195	162
3	20	16	500	791	-2172	761	493	282	281	212	296	196	319	248	128	119	348	262	239	185	121	107
4	20	16	500	565	-1218	867	369	231	205	167	216	152	234	199	92	89	256	212	173	143	87	79
5	20	16	500	422	-780	1709	303	206	164	141	173	128	188	173	72	71	206	186	138	119	68	63
6	20	16	500	322	-550	-2047	268	199	140	126	148	112	162	160	60	59	178	175	117	103	57	52
7	20	16	500	248	-420	-455	253	209	127	118	135	103	148	158	54	50	164	177	106	94	51	44
8	20	16	500	191	-342	-212	251	249	122	117	129	98	142	168	50	43	158	196	100	88	47	37
9	20	16	500	146	-293	-120	261	394	121	122	129	98	142	202	48	38	159	258	99	86	46	33
10	20	16	500	109	-262	-75	282	9456	124	140	132	105	147	323	48	34	165	566	101	88	46	29
1	40	16	500	2335	-16089	1458	1585	744	947	592	992	553	1065	671	447	359	1155	701	812	527	423	327
2	40	16	500	1213	-4764	878	758	394	443	306	465	284	501	351	205	179	544	369	378	270	195	162

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
3	40	16	500	791	-2172	761	493	282	281	212	296	196	319	248	128	119	348	262	239	185	121	107
4	40	16	500	565	-1218	867	369	231	205	167	216	152	234	199	92	89	256	212	173	143	87	79
5	40	16	500	422	-780	1709	303	206	164	141	173	128	188	173	72	71	206	186	138	119	68	63
6	40	16	500	322	-550	-2047	268	199	140	126	148	112	162	160	60	59	178	175	117	103	57	52
7	40	16	500	248	-420	-455	253	209	127	118	135	103	148	158	54	50	164	177	106	94	51	44
8	40	16	500	191	-342	-212	251	249	122	117	129	98	142	168	50	43	158	196	100	88	47	37
9	40	16	500	146	-293	-120	261	394	121	122	129	98	142	202	48	38	159	258	99	86	46	33
10	40	16	500	109	-262	-75	282	9456	124	140	132	105	147	323	48	34	165	566	101	88	46	29
1	60	16	500	2335	-16089	1458	1585	744	947	592	992	553	1065	671	447	359	1155	701	812	527	423	327
2	60	16	500	1213	-4764	878	758	394	443	306	465	284	501	351	205	179	544	369	378	270	195	162
3	60	16	500	791	-2172	761	493	282	281	212	296	196	319	248	128	119	348	262	239	185	121	107
4	60	16	500	565	-1218	867	369	231	205	167	216	152	234	199	92	89	256	212	173	143	87	79
5	60	16	500	422	-780	1709	303	206	164	141	173	128	188	173	72	71	206	186	138	119	68	63
6	60	16	500	322	-550	-2047	268	199	140	126	148	112	162	160	60	59	178	175	117	103	57	52
7	60	16	500	248	-420	-455	253	209	127	118	135	103	148	158	54	50	164	177	106	94	51	44
8	60	16	500	191	-342	-212	251	249	122	117	129	98	142	168	50	43	158	196	100	88	47	37
9	60	16	500	146	-293	-120	261	394	121	122	129	98	142	202	48	38	159	258	99	86	46	33
10	60	16	500	109	-262	-75	282	9456	124	140	132	105	147	323	48	34	165	566	101	88	46	29
1	5	24	500	3503	-1755	9203	-9288	1825	5685	1287	6965	1167	10257	1549	1037	664	20336	1661	3417	1090	955	592
2	5	24	500	1819	-882	49961	-8731	1051	1957	696	2274	623	2958	863	444	335	4321	938	1301	577	411	297
3	5	24	500	1187	-608	-3292	72678	846	968	511	1091	449	1332	661	259	226	1732	732	689	411	240	198
4	5	24	500	847	-488	-1098	3294	829	572	433	631	371	741	597	173	172	907	681	427	335	162	149

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
5	5	24	500	632	-437	-537	1313	1024	379	407	413	336	472	622	127	139	556	753	294	297	119	120
6	5	24	500	483	-430	-308	731	2306	275	425	296	331	332	800	101	118	381	1126	219	284	94	100
7	5	24	500	372	-465	-194	482	-1987	214	518	229	361	253	1881	84	104	285	13864	174	293	79	86
8	5	24	500	287	-559	-129	355	-514	177	912	188	465	206	-1536	74	93	228	-816	147	339	70	76
9	5	24	500	219	-774	-89	283	-247	154	-3660	162	964	176	-409	68	85	193	-317	129	493	64	68
10	5	24	500	163	-1386	-62	239	-142	139	-423	146	-1353	157	-198	64	80	171	-168	118	2039	61	61
1	10	24	500	3503	-1755	9203	-9288	1825	5685	1287	6965	1167	10257	1549	1037	664	20336	1661	3417	1090	955	592
2	10	24	500	1819	-882	49961	-8731	1051	1957	696	2274	623	2958	863	444	335	4321	938	1301	577	411	297
3	10	24	500	1187	-608	-3292	72678	846	968	511	1091	449	1332	661	259	226	1732	732	689	411	240	198
4	10	24	500	847	-488	-1098	3294	829	572	433	631	371	741	597	173	172	907	681	427	335	162	149
5	10	24	500	632	-437	-537	1313	1024	379	407	413	336	472	622	127	139	556	753	294	297	119	120
6	10	24	500	483	-430	-308	731	2306	275	425	296	331	332	800	101	118	381	1126	219	284	94	100
7	10	24	500	372	-465	-194	482	-1987	214	518	229	361	253	1881	84	104	285	13864	174	293	79	86
8	10	24	500	287	-559	-129	355	-514	177	912	188	465	206	-1536	74	93	228	-816	147	339	70	76
9	10	24	500	219	-774	-89	283	-247	154	-3660	162	964	176	-409	68	85	193	-317	129	493	64	68
10	10	24	500	163	-1386	-62	239	-142	139	-423	146	-1353	157	-198	64	80	171	-168	118	2039	61	61
1	20	24	500	3503	-1755	9203	-9288	1825	5685	1287	6965	1167	10257	1549	1037	664	20336	1661	3417	1090	955	592
2	20	24	500	1819	-882	49961	-8731	1051	1957	696	2274	623	2958	863	444	335	4321	938	1301	577	411	297
3	20	24	500	1187	-608	-3292	72678	846	968	511	1091	449	1332	661	259	226	1732	732	689	411	240	198
4	20	24	500	847	-488	-1098	3294	829	572	433	631	371	741	597	173	172	907	681	427	335	162	149
5	20	24	500	632	-437	-537	1313	1024	379	407	413	336	472	622	127	139	556	753	294	297	119	120
6	20	24	500	483	-430	-308	731	2306	275	425	296	331	332	800	101	118	381	1126	219	284	94	100

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
7	20	24	500	372	-465	-194	482	-1987	214	518	229	361	253	1881	84	104	285	13864	174	293	79	86
8	20	24	500	287	-559	-129	355	-514	177	912	188	465	206	-1536	74	93	228	-816	147	339	70	76
9	20	24	500	219	-774	-89	283	-247	154	-3660	162	964	176	-409	68	85	193	-317	129	493	64	68
10	20	24	500	163	-1386	-62	239	-142	139	-423	146	-1353	157	-198	64	80	171	-168	118	2039	61	61
1	40	24	500	3503	-1755	9203	-9288	1825	5685	1287	6965	1167	10257	1549	1037	664	20336	1661	3417	1090	955	592
2	40	24	500	1819	-882	49961	-8731	1051	1957	696	2274	623	2958	863	444	335	4321	938	1301	577	411	297
3	40	24	500	1187	-608	-3292	72678	846	968	511	1091	449	1332	661	259	226	1732	732	689	411	240	198
4	40	24	500	847	-488	-1098	3294	829	572	433	631	371	741	597	173	172	907	681	427	335	162	149
5	40	24	500	632	-437	-537	1313	1024	379	407	413	336	472	622	127	139	556	753	294	297	119	120
6	40	24	500	483	-430	-308	731	2306	275	425	296	331	332	800	101	118	381	1126	219	284	94	100
7	40	24	500	372	-465	-194	482	-1987	214	518	229	361	253	1881	84	104	285	13864	174	293	79	86
8	40	24	500	287	-559	-129	355	-514	177	912	188	465	206	-1536	74	93	228	-816	147	339	70	76
9	40	24	500	219	-774	-89	283	-247	154	-3660	162	964	176	-409	68	85	193	-317	129	493	64	68
10	40	24	500	163	-1386	-62	239	-142	139	-423	146	-1353	157	-198	64	80	171	-168	118	2039	61	61
1	60	24	500	3503	-1755	9203	-9288	1825	5685	1287	6965	1167	10257	1549	1037	664	20336	1661	3417	1090	955	592
2	60	24	500	1819	-882	49961	-8731	1051	1957	696	2274	623	2958	863	444	335	4321	938	1301	577	411	297
3	60	24	500	1187	-608	-3292	72678	846	968	511	1091	449	1332	661	259	226	1732	732	689	411	240	198
4	60	24	500	847	-488	-1098	3294	829	572	433	631	371	741	597	173	172	907	681	427	335	162	149
5	60	24	500	632	-437	-537	1313	1024	379	407	413	336	472	622	127	139	556	753	294	297	119	120
6	60	24	500	483	-430	-308	731	2306	275	425	296	331	332	800	101	118	381	1126	219	284	94	100
7	60	24	500	372	-465	-194	482	-1987	214	518	229	361	253	1881	84	104	285	13864	174	293	79	86
8	60	24	500	287	-559	-129	355	-514	177	912	188	465	206	-1536	74	93	228	-816	147	339	70	76

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
9	60	24	500	219	-774	-89	283	-247	154	-3660	162	964	176	-409	68	85	193	-317	129	493	64	68
10	60	24	500	163	-1386	-62	239	-142	139	-423	146	-1353	157	-198	64	80	171	-168	118	2039	61	61
1	5	8	1000	2494	975	851	595	551	480	465	491	441	507	511	312	311	525	528	445	425	301	287
2	5	8	1000	1372	540	472	310	291	246	242	252	229	261	268	156	158	271	278	227	220	150	146
3	5	8	1000	950	414	356	220	206	171	169	175	159	182	189	105	108	190	196	156	153	101	99
4	5	8	1000	724	373	309	179	166	135	134	139	125	145	150	81	83	152	157	123	119	78	75
5	5	8	1000	581	385	298	159	144	117	113	120	105	126	129	67	68	132	135	105	100	64	61
6	5	8	1000	481	462	318	151	132	107	101	111	93	116	116	59	58	123	123	95	88	56	52
7	5	8	1000	407	718	388	153	126	103	93	107	85	113	109	54	51	120	116	91	80	51	46
8	5	8	1000	350	3205	622	164	126	104	89	108	80	115	107	51	46	124	114	90	75	49	41
9	5	8	1000	305	-978	4943	189	132	109	87	115	78	124	108	50	42	135	117	93	72	47	37
10	5	8	1000	268	-393	-591	238	146	120	89	127	78	139	115	50	39	154	127	100	71	48	35
1	10	8	1000	2494	975	851	595	551	480	465	491	441	507	511	312	311	525	528	445	425	301	287
2	10	8	1000	1372	540	472	310	291	246	242	252	229	261	268	156	158	271	278	227	220	150	146
3	10	8	1000	950	414	356	220	206	171	169	175	159	182	189	105	108	190	196	156	153	101	99
4	10	8	1000	724	373	309	179	166	135	134	139	125	145	150	81	83	152	157	123	119	78	75
5	10	8	1000	581	385	298	159	144	117	113	120	105	126	129	67	68	132	135	105	100	64	61
6	10	8	1000	481	462	318	151	132	107	101	111	93	116	116	59	58	123	123	95	88	56	52
7	10	8	1000	407	718	388	153	126	103	93	107	85	113	109	54	51	120	116	91	80	51	46
8	10	8	1000	350	3205	622	164	126	104	89	108	80	115	107	51	46	124	114	90	75	49	41
9	10	8	1000	305	-978	4943	189	132	109	87	115	78	124	108	50	42	135	117	93	72	47	37
10	10	8	1000	268	-393	-591	238	146	120	89	127	78	139	115	50	39	154	127	100	71	48	35

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
1	20	8	1000	2494	975	851	595	551	480	465	491	441	507	511	312	311	525	528	445	425	301	287
2	20	8	1000	1372	540	472	310	291	246	242	252	229	261	268	156	158	271	278	227	220	150	146
3	20	8	1000	950	414	356	220	206	171	169	175	159	182	189	105	108	190	196	156	153	101	99
4	20	8	1000	724	373	309	179	166	135	134	139	125	145	150	81	83	152	157	123	119	78	75
5	20	8	1000	581	385	298	159	144	117	113	120	105	126	129	67	68	132	135	105	100	64	61
6	20	8	1000	481	462	318	151	132	107	101	111	93	116	116	59	58	123	123	95	88	56	52
7	20	8	1000	407	718	388	153	126	103	93	107	85	113	109	54	51	120	116	91	80	51	46
8	20	8	1000	350	3205	622	164	126	104	89	108	80	115	107	51	46	124	114	90	75	49	41
9	20	8	1000	305	-978	4943	189	132	109	87	115	78	124	108	50	42	135	117	93	72	47	37
10	20	8	1000	268	-393	-591	238	146	120	89	127	78	139	115	50	39	154	127	100	71	48	35
1	40	8	1000	2494	975	851	595	551	480	465	491	441	507	511	312	311	525	528	445	425	301	287
2	40	8	1000	1372	540	472	310	291	246	242	252	229	261	268	156	158	271	278	227	220	150	146
3	40	8	1000	950	414	356	220	206	171	169	175	159	182	189	105	108	190	196	156	153	101	99
4	40	8	1000	724	373	309	179	166	135	134	139	125	145	150	81	83	152	157	123	119	78	75
5	40	8	1000	581	385	298	159	144	117	113	120	105	126	129	67	68	132	135	105	100	64	61
6	40	8	1000	481	462	318	151	132	107	101	111	93	116	116	59	58	123	123	95	88	56	52
7	40	8	1000	407	718	388	153	126	103	93	107	85	113	109	54	51	120	116	91	80	51	46
8	40	8	1000	350	3205	622	164	126	104	89	108	80	115	107	51	46	124	114	90	75	49	41
9	40	8	1000	305	-978	4943	189	132	109	87	115	78	124	108	50	42	135	117	93	72	47	37
10	40	8	1000	268	-393	-591	238	146	120	89	127	78	139	115	50	39	154	127	100	71	48	35
1	60	8	1000	2494	975	851	595	551	480	465	491	441	507	511	312	311	525	528	445	425	301	287
2	60	8	1000	1372	540	472	310	291	246	242	252	229	261	268	156	158	271	278	227	220	150	146

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
3	60	8	1000	950	414	356	220	206	171	169	175	159	182	189	105	108	190	196	156	153	101	99
4	60	8	1000	724	373	309	179	166	135	134	139	125	145	150	81	83	152	157	123	119	78	75
5	60	8	1000	581	385	298	159	144	117	113	120	105	126	129	67	68	132	135	105	100	64	61
6	60	8	1000	481	462	318	151	132	107	101	111	93	116	116	59	58	123	123	95	88	56	52
7	60	8	1000	407	718	388	153	126	103	93	107	85	113	109	54	51	120	116	91	80	51	46
8	60	8	1000	350	3205	622	164	126	104	89	108	80	115	107	51	46	124	114	90	75	49	41
9	60	8	1000	305	-978	4943	189	132	109	87	115	78	124	108	50	42	135	117	93	72	47	37
10	60	8	1000	268	-393	-591	238	146	120	89	127	78	139	115	50	39	154	127	100	71	48	35
1	5	16	1000	4989	-34028	2999	3353	1529	2002	1218	2099	1138	2253	1379	945	739	2442	1442	1718	1083	895	673
2	5	16	1000	2743	-10623	1862	1691	836	988	649	1037	603	1116	745	458	380	1213	783	844	572	434	344
3	5	16	1000	1901	-5072	1669	1151	619	656	466	690	429	745	543	299	261	812	574	558	405	283	235
4	5	16	1000	1448	-2947	1971	893	525	496	380	523	346	566	452	222	202	619	482	420	325	210	181
5	5	16	1000	1161	-1928	4044	751	488	405	335	428	302	464	409	178	167	510	441	341	281	168	149
6	5	16	1000	962	-1368	-5067	667	492	349	313	369	278	402	396	150	145	443	433	292	256	141	128
7	5	16	1000	815	-1032	-1184	621	543	313	308	332	268	363	410	132	130	402	460	260	244	124	113
8	5	16	1000	701	-817	-583	599	685	290	321	309	271	339	462	119	119	377	540	240	242	112	103
9	5	16	1000	610	-673	-353	599	1157	277	358	295	289	325	593	111	112	365	757	227	252	105	95
10	5	16	1000	535	-572	-237	616	29855	271	443	289	330	321	1021	106	107	361	1787	220	277	100	90
1	10	16	1000	4989	-34028	2999	3353	1529	2002	1218	2099	1138	2253	1379	945	739	2442	1442	1718	1083	895	673
2	10	16	1000	2743	-10623	1862	1691	836	988	649	1037	603	1116	745	458	380	1213	783	844	572	434	344
3	10	16	1000	1901	-5072	1669	1151	619	656	466	690	429	745	543	299	261	812	574	558	405	283	235
4	10	16	1000	1448	-2947	1971	893	525	496	380	523	346	566	452	222	202	619	482	420	325	210	181

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
5	10	16	1000	1161	-1928	4044	751	488	405	335	428	302	464	409	178	167	510	441	341	281	168	149
6	10	16	1000	962	-1368	-5067	667	492	349	313	369	278	402	396	150	145	443	433	292	256	141	128
7	10	16	1000	815	-1032	-1184	621	543	313	308	332	268	363	410	132	130	402	460	260	244	124	113
8	10	16	1000	701	-817	-583	599	685	290	321	309	271	339	462	119	119	377	540	240	242	112	103
9	10	16	1000	610	-673	-353	599	1157	277	358	295	289	325	593	111	112	365	757	227	252	105	95
10	10	16	1000	535	-572	-237	616	29855	271	443	289	330	321	1021	106	107	361	1787	220	277	100	90
1	20	16	1000	4989	-34028	2999	3353	1529	2002	1218	2099	1138	2253	1379	945	739	2442	1442	1718	1083	895	673
2	20	16	1000	2743	-10623	1862	1691	836	988	649	1037	603	1116	745	458	380	1213	783	844	572	434	344
3	20	16	1000	1901	-5072	1669	1151	619	656	466	690	429	745	543	299	261	812	574	558	405	283	235
4	20	16	1000	1448	-2947	1971	893	525	496	380	523	346	566	452	222	202	619	482	420	325	210	181
5	20	16	1000	1161	-1928	4044	751	488	405	335	428	302	464	409	178	167	510	441	341	281	168	149
6	20	16	1000	962	-1368	-5067	667	492	349	313	369	278	402	396	150	145	443	433	292	256	141	128
7	20	16	1000	815	-1032	-1184	621	543	313	308	332	268	363	410	132	130	402	460	260	244	124	113
8	20	16	1000	701	-817	-583	599	685	290	321	309	271	339	462	119	119	377	540	240	242	112	103
9	20	16	1000	610	-673	-353	599	1157	277	358	295	289	325	593	111	112	365	757	227	252	105	95
10	20	16	1000	535	-572	-237	616	29855	271	443	289	330	321	1021	106	107	361	1787	220	277	100	90
1	40	16	1000	4989	-34028	2999	3353	1529	2002	1218	2099	1138	2253	1379	945	739	2442	1442	1718	1083	895	673
2	40	16	1000	2743	-10623	1862	1691	836	988	649	1037	603	1116	745	458	380	1213	783	844	572	434	344
3	40	16	1000	1901	-5072	1669	1151	619	656	466	690	429	745	543	299	261	812	574	558	405	283	235
4	40	16	1000	1448	-2947	1971	893	525	496	380	523	346	566	452	222	202	619	482	420	325	210	181
5	40	16	1000	1161	-1928	4044	751	488	405	335	428	302	464	409	178	167	510	441	341	281	168	149
6	40	16	1000	962	-1368	-5067	667	492	349	313	369	278	402	396	150	145	443	433	292	256	141	128

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
7	40	16	1000	815	-1032	-1184	621	543	313	308	332	268	363	410	132	130	402	460	260	244	124	113
8	40	16	1000	701	-817	-583	599	685	290	321	309	271	339	462	119	119	377	540	240	242	112	103
9	40	16	1000	610	-673	-353	599	1157	277	358	295	289	325	593	111	112	365	757	227	252	105	95
10	40	16	1000	535	-572	-237	616	29855	271	443	289	330	321	1021	106	107	361	1787	220	277	100	90
1	60	16	1000	4989	-34028	2999	3353	1529	2002	1218	2099	1138	2253	1379	945	739	2442	1442	1718	1083	895	673
2	60	16	1000	2743	-10623	1862	1691	836	988	649	1037	603	1116	745	458	380	1213	783	844	572	434	344
3	60	16	1000	1901	-5072	1669	1151	619	656	466	690	429	745	543	299	261	812	574	558	405	283	235
4	60	16	1000	1448	-2947	1971	893	525	496	380	523	346	566	452	222	202	619	482	420	325	210	181
5	60	16	1000	1161	-1928	4044	751	488	405	335	428	302	464	409	178	167	510	441	341	281	168	149
6	60	16	1000	962	-1368	-5067	667	492	349	313	369	278	402	396	150	145	443	433	292	256	141	128
7	60	16	1000	815	-1032	-1184	621	543	313	308	332	268	363	410	132	130	402	460	260	244	124	113
8	60	16	1000	701	-817	-583	599	685	290	321	309	271	339	462	119	119	377	540	240	242	112	103
9	60	16	1000	610	-673	-353	599	1157	277	358	295	289	325	593	111	112	365	757	227	252	105	95
10	60	16	1000	535	-572	-237	616	29855	271	443	289	330	321	1021	106	107	361	1787	220	277	100	90
1	5	24	1000	7483	-3713	18927	-19643	3754	12023	2646	14731	2400	21694	3186	2193	1366	43010	3416	7228	2243	2020	1217
2	5	24	1000	4115	-1967	105928	-19469	2229	4363	1475	5071	1320	6596	1831	991	711	9634	1988	2902	1223	917	629
3	5	24	1000	2851	-1419	-7215	169722	1854	2262	1119	2548	984	3110	1449	604	495	4046	1605	1608	901	561	434
4	5	24	1000	2172	-1180	-2495	7973	1885	1384	984	1528	844	1794	1356	420	390	2195	1549	1033	762	391	339
5	5	24	1000	1742	-1080	-1270	3246	2424	938	962	1021	796	1168	1472	315	330	1375	1783	726	704	295	283
6	5	24	1000	1443	-1069	-763	1817	5708	684	1051	736	819	826	1979	250	293	948	2788	544	702	234	248
7	5	24	1000	1222	-1142	-504	1184	-5169	526	1348	562	938	622	4892	207	269	700	36066	428	762	194	224
8	5	24	1000	1051	-1336	-354	848	-1415	423	2511	449	1279	491	-4226	177	256	545	-2245	351	933	167	209

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
9	5	24	1000	915	-1775	-260	649	-724	353	-10738	372	2827	404	-1201	156	250	443	-929	297	1445	147	199
10	5	24	1000	803	-3028	-197	522	-448	303	-1335	319	-4271	343	-625	140	252	373	-532	259	6437	133	194
1	10	24	1000	7483	-3713	18927	-19643	3754	12023	2646	14731	2400	21694	3186	2193	1366	43010	3416	7228	2243	2020	1217
2	10	24	1000	4115	-1967	105928	-19469	2229	4363	1475	5071	1320	6596	1831	991	711	9634	1988	2902	1223	917	629
3	10	24	1000	2851	-1419	-7215	169722	1854	2262	1119	2548	984	3110	1449	604	495	4046	1605	1608	901	561	434
4	10	24	1000	2172	-1180	-2495	7973	1885	1384	984	1528	844	1794	1356	420	390	2195	1549	1033	762	391	339
5	10	24	1000	1742	-1080	-1270	3246	2424	938	962	1021	796	1168	1472	315	330	1375	1783	726	704	295	283
6	10	24	1000	1443	-1069	-763	1817	5708	684	1051	736	819	826	1979	250	293	948	2788	544	702	234	248
7	10	24	1000	1222	-1142	-504	1184	-5169	526	1348	562	938	622	4892	207	269	700	36066	428	762	194	224
8	10	24	1000	1051	-1336	-354	848	-1415	423	2511	449	1279	491	-4226	177	256	545	-2245	351	933	167	209
9	10	24	1000	915	-1775	-260	649	-724	353	-10738	372	2827	404	-1201	156	250	443	-929	297	1445	147	199
10	10	24	1000	803	-3028	-197	522	-448	303	-1335	319	-4271	343	-625	140	252	373	-532	259	6437	133	194
1	20	24	1000	7483	-3713	18927	-19643	3754	12023	2646	14731	2400	21694	3186	2193	1366	43010	3416	7228	2243	2020	1217
2	20	24	1000	4115	-1967	105928	-19469	2229	4363	1475	5071	1320	6596	1831	991	711	9634	1988	2902	1223	917	629
3	20	24	1000	2851	-1419	-7215	169722	1854	2262	1119	2548	984	3110	1449	604	495	4046	1605	1608	901	561	434
4	20	24	1000	2172	-1180	-2495	7973	1885	1384	984	1528	844	1794	1356	420	390	2195	1549	1033	762	391	339
5	20	24	1000	1742	-1080	-1270	3246	2424	938	962	1021	796	1168	1472	315	330	1375	1783	726	704	295	283
6	20	24	1000	1443	-1069	-763	1817	5708	684	1051	736	819	826	1979	250	293	948	2788	544	702	234	248
7	20	24	1000	1222	-1142	-504	1184	-5169	526	1348	562	938	622	4892	207	269	700	36066	428	762	194	224
8	20	24	1000	1051	-1336	-354	848	-1415	423	2511	449	1279	491	-4226	177	256	545	-2245	351	933	167	209
9	20	24	1000	915	-1775	-260	649	-724	353	-10738	372	2827	404	-1201	156	250	443	-929	297	1445	147	199
10	20	24	1000	803	-3028	-197	522	-448	303	-1335	319	-4271	343	-625	140	252	373	-532	259	6437	133	194

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
1	40	24	1000	7483	-3713	18927	-19643	3754	12023	2646	14731	2400	21694	3186	2193	1366	43010	3416	7228	2243	2020	1217
2	40	24	1000	4115	-1967	105928	-19469	2229	4363	1475	5071	1320	6596	1831	991	711	9634	1988	2902	1223	917	629
3	40	24	1000	2851	-1419	-7215	169722	1854	2262	1119	2548	984	3110	1449	604	495	4046	1605	1608	901	561	434
4	40	24	1000	2172	-1180	-2495	7973	1885	1384	984	1528	844	1794	1356	420	390	2195	1549	1033	762	391	339
5	40	24	1000	1742	-1080	-1270	3246	2424	938	962	1021	796	1168	1472	315	330	1375	1783	726	704	295	283
6	40	24	1000	1443	-1069	-763	1817	5708	684	1051	736	819	826	1979	250	293	948	2788	544	702	234	248
7	40	24	1000	1222	-1142	-504	1184	-5169	526	1348	562	938	622	4892	207	269	700	36066	428	762	194	224
8	40	24	1000	1051	-1336	-354	848	-1415	423	2511	449	1279	491	-4226	177	256	545	-2245	351	933	167	209
9	40	24	1000	915	-1775	-260	649	-724	353	-10738	372	2827	404	-1201	156	250	443	-929	297	1445	147	199
10	40	24	1000	803	-3028	-197	522	-448	303	-1335	319	-4271	343	-625	140	252	373	-532	259	6437	133	194
1	60	24	1000	7483	-3713	18927	-19643	3754	12023	2646	14731	2400	21694	3186	2193	1366	43010	3416	7228	2243	2020	1217
2	60	24	1000	4115	-1967	105928	-19469	2229	4363	1475	5071	1320	6596	1831	991	711	9634	1988	2902	1223	917	629
3	60	24	1000	2851	-1419	-7215	169722	1854	2262	1119	2548	984	3110	1449	604	495	4046	1605	1608	901	561	434
4	60	24	1000	2172	-1180	-2495	7973	1885	1384	984	1528	844	1794	1356	420	390	2195	1549	1033	762	391	339
5	60	24	1000	1742	-1080	-1270	3246	2424	938	962	1021	796	1168	1472	315	330	1375	1783	726	704	295	283
6	60	24	1000	1443	-1069	-763	1817	5708	684	1051	736	819	826	1979	250	293	948	2788	544	702	234	248
7	60	24	1000	1222	-1142	-504	1184	-5169	526	1348	562	938	622	4892	207	269	700	36066	428	762	194	224
8	60	24	1000	1051	-1336	-354	848	-1415	423	2511	449	1279	491	-4226	177	256	545	-2245	351	933	167	209
9	60	24	1000	915	-1775	-260	649	-724	353	-10738	372	2827	404	-1201	156	250	443	-929	297	1445	147	199
10	60	24	1000	803	-3028	-197	522	-448	303	-1335	319	-4271	343	-625	140	252	373	-532	259	6437	133	194
1	5	8	2000	5148	2003	1725	1222	1116	986	943	1008	895	1042	1035	642	631	1079	1070	913	861	619	582
2	5	8	2000	2902	1137	970	653	598	518	499	530	471	549	551	328	326	570	571	477	453	316	300

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
3	5	8	2000	2060	887	742	471	431	366	353	375	333	390	394	226	225	407	409	335	318	217	206
4	5	8	2000	1607	812	656	388	352	294	283	303	265	315	319	176	175	330	333	268	253	169	160
5	5	8	2000	1320	843	643	348	310	256	244	264	227	276	278	147	146	290	291	230	216	141	132
6	5	8	2000	1121	1014	697	331	288	235	221	243	204	255	255	129	126	270	269	209	193	124	114
7	5	8	2000	974	1570	867	334	281	225	207	234	190	247	244	118	113	263	259	198	179	112	102
8	5	8	2000	860	6932	1413	355	286	224	202	234	183	250	243	111	104	268	260	195	171	105	93
9	5	8	2000	769	-2082	11459	402	305	232	202	244	181	263	251	107	98	286	272	198	168	101	86
10	5	8	2000	694	-818	-1399	497	347	250	210	265	185	290	271	105	93	322	300	208	169	99	82
1	10	8	2000	5148	2003	1725	1222	1116	986	943	1008	895	1042	1035	642	631	1079	1070	913	861	619	582
2	10	8	2000	2902	1137	970	653	598	518	499	530	471	549	551	328	326	570	571	477	453	316	300
3	10	8	2000	2060	887	742	471	431	366	353	375	333	390	394	226	225	407	409	335	318	217	206
4	10	8	2000	1607	812	656	388	352	294	283	303	265	315	319	176	175	330	333	268	253	169	160
5	10	8	2000	1320	843	643	348	310	256	244	264	227	276	278	147	146	290	291	230	216	141	132
6	10	8	2000	1121	1014	697	331	288	235	221	243	204	255	255	129	126	270	269	209	193	124	114
7	10	8	2000	974	1570	867	334	281	225	207	234	190	247	244	118	113	263	259	198	179	112	102
8	10	8	2000	860	6932	1413	355	286	224	202	234	183	250	243	111	104	268	260	195	171	105	93
9	10	8	2000	769	-2082	11459	402	305	232	202	244	181	263	251	107	98	286	272	198	168	101	86
10	10	8	2000	694	-818	-1399	497	347	250	210	265	185	290	271	105	93	322	300	208	169	99	82
1	20	8	2000	5148	2003	1725	1222	1116	986	943	1008	895	1042	1035	642	631	1079	1070	913	861	619	582
2	20	8	2000	2902	1137	970	653	598	518	499	530	471	549	551	328	326	570	571	477	453	316	300
3	20	8	2000	2060	887	742	471	431	366	353	375	333	390	394	226	225	407	409	335	318	217	206
4	20	8	2000	1607	812	656	388	352	294	283	303	265	315	319	176	175	330	333	268	253	169	160

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
5	20	8	2000	1320	843	643	348	310	256	244	264	227	276	278	147	146	290	291	230	216	141	132
6	20	8	2000	1121	1014	697	331	288	235	221	243	204	255	255	129	126	270	269	209	193	124	114
7	20	8	2000	974	1570	867	334	281	225	207	234	190	247	244	118	113	263	259	198	179	112	102
8	20	8	2000	860	6932	1413	355	286	224	202	234	183	250	243	111	104	268	260	195	171	105	93
9	20	8	2000	769	-2082	11459	402	305	232	202	244	181	263	251	107	98	286	272	198	168	101	86
10	20	8	2000	694	-818	-1399	497	347	250	210	265	185	290	271	105	93	322	300	208	169	99	82
1	40	8	2000	5148	2003	1725	1222	1116	986	943	1008	895	1042	1035	642	631	1079	1070	913	861	619	582
2	40	8	2000	2902	1137	970	653	598	518	499	530	471	549	551	328	326	570	571	477	453	316	300
3	40	8	2000	2060	887	742	471	431	366	353	375	333	390	394	226	225	407	409	335	318	217	206
4	40	8	2000	1607	812	656	388	352	294	283	303	265	315	319	176	175	330	333	268	253	169	160
5	40	8	2000	1320	843	643	348	310	256	244	264	227	276	278	147	146	290	291	230	216	141	132
6	40	8	2000	1121	1014	697	331	288	235	221	243	204	255	255	129	126	270	269	209	193	124	114
7	40	8	2000	974	1570	867	334	281	225	207	234	190	247	244	118	113	263	259	198	179	112	102
8	40	8	2000	860	6932	1413	355	286	224	202	234	183	250	243	111	104	268	260	195	171	105	93
9	40	8	2000	769	-2082	11459	402	305	232	202	244	181	263	251	107	98	286	272	198	168	101	86
10	40	8	2000	694	-818	-1399	497	347	250	210	265	185	290	271	105	93	322	300	208	169	99	82
1	60	8	2000	5148	2003	1725	1222	1116	986	943	1008	895	1042	1035	642	631	1079	1070	913	861	619	582
2	60	8	2000	2902	1137	970	653	598	518	499	530	471	549	551	328	326	570	571	477	453	316	300
3	60	8	2000	2060	887	742	471	431	366	353	375	333	390	394	226	225	407	409	335	318	217	206
4	60	8	2000	1607	812	656	388	352	294	283	303	265	315	319	176	175	330	333	268	253	169	160
5	60	8	2000	1320	843	643	348	310	256	244	264	227	276	278	147	146	290	291	230	216	141	132
6	60	8	2000	1121	1014	697	331	288	235	221	243	204	255	255	129	126	270	269	209	193	124	114

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
7	60	8	2000	974	1570	867	334	281	225	207	234	190	247	244	118	113	263	259	198	179	112	102
8	60	8	2000	860	6932	1413	355	286	224	202	234	183	250	243	111	104	268	260	195	171	105	93
9	60	8	2000	769	-2082	11459	402	305	232	202	244	181	263	251	107	98	286	272	198	168	101	86
10	60	8	2000	694	-818	-1399	497	347	250	210	265	185	290	271	105	93	322	300	208	169	99	82
1	5	16	2000	10295	-69906	6080	6888	3101	4114	2469	4312	2306	4629	2797	1940	1499	5017	2924	3529	2197	1839	1364
2	5	16	2000	5805	-22340	3830	3556	1720	2078	1336	2181	1240	2348	1532	964	781	2552	1610	1774	1176	912	707
3	5	16	2000	4120	-10872	3484	2467	1291	1407	972	1480	895	1597	1133	641	544	1742	1198	1196	845	607	490
4	5	16	2000	3214	-6406	4178	1942	1113	1079	805	1136	734	1230	957	482	428	1346	1021	912	689	456	383
5	5	16	2000	2641	-4225	8714	1645	1052	888	721	937	650	1017	880	389	361	1118	949	746	605	368	320
6	5	16	2000	2242	-3004	-11106	1465	1079	766	686	810	609	882	867	329	318	974	950	640	561	311	280
7	5	16	2000	1947	-2257	-2641	1357	1211	684	688	725	598	793	915	288	290	879	1026	568	544	271	253
8	5	16	2000	1719	-1768	-1325	1297	1557	628	729	667	616	733	1050	258	271	816	1228	518	551	243	234
9	5	16	2000	1538	-1433	-818	1274	2681	590	829	628	669	693	1375	237	260	776	1754	483	583	223	221
10	5	16	2000	1389	-1193	-560	1284	70655	565	1048	603	781	668	2415	221	254	753	4229	459	655	207	213
1	10	16	2000	10295	-69906	6080	6888	3101	4114	2469	4312	2306	4629	2797	1940	1499	5017	2924	3529	2197	1839	1364
2	10	16	2000	5805	-22340	3830	3556	1720	2078	1336	2181	1240	2348	1532	964	781	2552	1610	1774	1176	912	707
3	10	16	2000	4120	-10872	3484	2467	1291	1407	972	1480	895	1597	1133	641	544	1742	1198	1196	845	607	490
4	10	16	2000	3214	-6406	4178	1942	1113	1079	805	1136	734	1230	957	482	428	1346	1021	912	689	456	383
5	10	16	2000	2641	-4225	8714	1645	1052	888	721	937	650	1017	880	389	361	1118	949	746	605	368	320
6	10	16	2000	2242	-3004	-11106	1465	1079	766	686	810	609	882	867	329	318	974	950	640	561	311	280
7	10	16	2000	1947	-2257	-2641	1357	1211	684	688	725	598	793	915	288	290	879	1026	568	544	271	253
8	10	16	2000	1719	-1768	-1325	1297	1557	628	729	667	616	733	1050	258	271	816	1228	518	551	243	234

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
9	10	16	2000	1538	-1433	-818	1274	2681	590	829	628	669	693	1375	237	260	776	1754	483	583	223	221
10	10	16	2000	1389	-1193	-560	1284	70655	565	1048	603	781	668	2415	221	254	753	4229	459	655	207	213
1	20	16	2000	10295	-69906	6080	6888	3101	4114	2469	4312	2306	4629	2797	1940	1499	5017	2924	3529	2197	1839	1364
2	20	16	2000	5805	-22340	3830	3556	1720	2078	1336	2181	1240	2348	1532	964	781	2552	1610	1774	1176	912	707
3	20	16	2000	4120	-10872	3484	2467	1291	1407	972	1480	895	1597	1133	641	544	1742	1198	1196	845	607	490
4	20	16	2000	3214	-6406	4178	1942	1113	1079	805	1136	734	1230	957	482	428	1346	1021	912	689	456	383
5	20	16	2000	2641	-4225	8714	1645	1052	888	721	937	650	1017	880	389	361	1118	949	746	605	368	320
6	20	16	2000	2242	-3004	-11106	1465	1079	766	686	810	609	882	867	329	318	974	950	640	561	311	280
7	20	16	2000	1947	-2257	-2641	1357	1211	684	688	725	598	793	915	288	290	879	1026	568	544	271	253
8	20	16	2000	1719	-1768	-1325	1297	1557	628	729	667	616	733	1050	258	271	816	1228	518	551	243	234
9	20	16	2000	1538	-1433	-818	1274	2681	590	829	628	669	693	1375	237	260	776	1754	483	583	223	221
10	20	16	2000	1389	-1193	-560	1284	70655	565	1048	603	781	668	2415	221	254	753	4229	459	655	207	213
1	40	16	2000	10295	-69906	6080	6888	3101	4114	2469	4312	2306	4629	2797	1940	1499	5017	2924	3529	2197	1839	1364
2	40	16	2000	5805	-22340	3830	3556	1720	2078	1336	2181	1240	2348	1532	964	781	2552	1610	1774	1176	912	707
3	40	16	2000	4120	-10872	3484	2467	1291	1407	972	1480	895	1597	1133	641	544	1742	1198	1196	845	607	490
4	40	16	2000	3214	-6406	4178	1942	1113	1079	805	1136	734	1230	957	482	428	1346	1021	912	689	456	383
5	40	16	2000	2641	-4225	8714	1645	1052	888	721	937	650	1017	880	389	361	1118	949	746	605	368	320
6	40	16	2000	2242	-3004	-11106	1465	1079	766	686	810	609	882	867	329	318	974	950	640	561	311	280
7	40	16	2000	1947	-2257	-2641	1357	1211	684	688	725	598	793	915	288	290	879	1026	568	544	271	253
8	40	16	2000	1719	-1768	-1325	1297	1557	628	729	667	616	733	1050	258	271	816	1228	518	551	243	234
9	40	16	2000	1538	-1433	-818	1274	2681	590	829	628	669	693	1375	237	260	776	1754	483	583	223	221
10	40	16	2000	1389	-1193	-560	1284	70655	565	1048	603	781	668	2415	221	254	753	4229	459	655	207	213

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
1	60	16	2000	10295	-69906	6080	6888	3101	4114	2469	4312	2306	4629	2797	1940	1499	5017	2924	3529	2197	1839	1364
2	60	16	2000	5805	-22340	3830	3556	1720	2078	1336	2181	1240	2348	1532	964	781	2552	1610	1774	1176	912	707
3	60	16	2000	4120	-10872	3484	2467	1291	1407	972	1480	895	1597	1133	641	544	1742	1198	1196	845	607	490
4	60	16	2000	3214	-6406	4178	1942	1113	1079	805	1136	734	1230	957	482	428	1346	1021	912	689	456	383
5	60	16	2000	2641	-4225	8714	1645	1052	888	721	937	650	1017	880	389	361	1118	949	746	605	368	320
6	60	16	2000	2242	-3004	-11106	1465	1079	766	686	810	609	882	867	329	318	974	950	640	561	311	280
7	60	16	2000	1947	-2257	-2641	1357	1211	684	688	725	598	793	915	288	290	879	1026	568	544	271	253
8	60	16	2000	1719	-1768	-1325	1297	1557	628	729	667	616	733	1050	258	271	816	1228	518	551	243	234
9	60	16	2000	1538	-1433	-818	1274	2681	590	829	628	669	693	1375	237	260	776	1754	483	583	223	221
10	60	16	2000	1389	-1193	-560	1284	70655	565	1048	603	781	668	2415	221	254	753	4229	459	655	207	213
1	5	24	2000	15443	-7627	38376	-40355	7611	24700	5366	30262	4867	44568	6461	4504	2769	88360	6925	14849	4547	4150	2468
2	5	24	2000	8707	-4137	217861	-40945	4584	9176	3034	10665	2715	13873	3765	2083	1462	20261	4090	6102	2515	1928	1293
3	5	24	2000	6180	-3041	-15061	363811	3870	4848	2336	5462	2054	6667	3025	1295	1034	8672	3350	3448	1882	1203	907
4	5	24	2000	4821	-2566	-5291	17330	3996	3009	2085	3322	1788	3900	2875	912	828	4771	3284	2245	1615	850	718
5	5	24	2000	3961	-2367	-2736	7113	5223	2057	2074	2238	1715	2560	3173	691	711	3014	3843	1591	1516	646	610
6	5	24	2000	3363	-2346	-1672	3990	12510	1501	2305	1616	1796	1814	4337	549	641	2081	6110	1195	1539	515	543
7	5	24	2000	2921	-2497	-1124	2589	-11532	1150	3009	1228	2093	1359	10916	452	601	1530	80470	936	1701	425	500
8	5	24	2000	2579	-2890	-805	1835	-3216	916	5708	971	2907	1063	-9606	383	581	1180	-5103	759	2120	361	474
9	5	24	2000	2306	-3779	-603	1381	-1679	751	-24894	793	6553	860	-2784	331	580	944	-2155	633	3351	313	461
10	5	24	2000	2083	-6312	-467	1088	-1060	632	-3160	664	-10108	715	-1478	292	597	778	-1258	540	15234	277	460
1	10	24	2000	15443	-7627	38376	-40355	7611	24700	5366	30262	4867	44568	6461	4504	2769	88360	6925	14849	4547	4150	2468
2	10	24	2000	8707	-4137	217861	-40945	4584	9176	3034	10665	2715	13873	3765	2083	1462	20261	4090	6102	2515	1928	1293

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
3	10	24	2000	6180	-3041	-15061	363811	3870	4848	2336	5462	2054	6667	3025	1295	1034	8672	3350	3448	1882	1203	907
4	10	24	2000	4821	-2566	-5291	17330	3996	3009	2085	3322	1788	3900	2875	912	828	4771	3284	2245	1615	850	718
5	10	24	2000	3961	-2367	-2736	7113	5223	2057	2074	2238	1715	2560	3173	691	711	3014	3843	1591	1516	646	610
6	10	24	2000	3363	-2346	-1672	3990	12510	1501	2305	1616	1796	1814	4337	549	641	2081	6110	1195	1539	515	543
7	10	24	2000	2921	-2497	-1124	2589	-11532	1150	3009	1228	2093	1359	10916	452	601	1530	80470	936	1701	425	500
8	10	24	2000	2579	-2890	-805	1835	-3216	916	5708	971	2907	1063	-9606	383	581	1180	-5103	759	2120	361	474
9	10	24	2000	2306	-3779	-603	1381	-1679	751	-24894	793	6553	860	-2784	331	580	944	-2155	633	3351	313	461
10	10	24	2000	2083	-6312	-467	1088	-1060	632	-3160	664	-10108	715	-1478	292	597	778	-1258	540	15234	277	460
1	20	24	2000	15443	-7627	38376	-40355	7611	24700	5366	30262	4867	44568	6461	4504	2769	88360	6925	14849	4547	4150	2468
2	20	24	2000	8707	-4137	217861	-40945	4584	9176	3034	10665	2715	13873	3765	2083	1462	20261	4090	6102	2515	1928	1293
3	20	24	2000	6180	-3041	-15061	363811	3870	4848	2336	5462	2054	6667	3025	1295	1034	8672	3350	3448	1882	1203	907
4	20	24	2000	4821	-2566	-5291	17330	3996	3009	2085	3322	1788	3900	2875	912	828	4771	3284	2245	1615	850	718
5	20	24	2000	3961	-2367	-2736	7113	5223	2057	2074	2238	1715	2560	3173	691	711	3014	3843	1591	1516	646	610
6	20	24	2000	3363	-2346	-1672	3990	12510	1501	2305	1616	1796	1814	4337	549	641	2081	6110	1195	1539	515	543
7	20	24	2000	2921	-2497	-1124	2589	-11532	1150	3009	1228	2093	1359	10916	452	601	1530	80470	936	1701	425	500
8	20	24	2000	2579	-2890	-805	1835	-3216	916	5708	971	2907	1063	-9606	383	581	1180	-5103	759	2120	361	474
9	20	24	2000	2306	-3779	-603	1381	-1679	751	-24894	793	6553	860	-2784	331	580	944	-2155	633	3351	313	461
10	20	24	2000	2083	-6312	-467	1088	-1060	632	-3160	664	-10108	715	-1478	292	597	778	-1258	540	15234	277	460
1	40	24	2000	15443	-7627	38376	-40355	7611	24700	5366	30262	4867	44568	6461	4504	2769	88360	6925	14849	4547	4150	2468
2	40	24	2000	8707	-4137	217861	-40945	4584	9176	3034	10665	2715	13873	3765	2083	1462	20261	4090	6102	2515	1928	1293
3	40	24	2000	6180	-3041	-15061	363811	3870	4848	2336	5462	2054	6667	3025	1295	1034	8672	3350	3448	1882	1203	907
4	40	24	2000	4821	-2566	-5291	17330	3996	3009	2085	3322	1788	3900	2875	912	828	4771	3284	2245	1615	850	718

Varsayılan Değerler					GSf		CSf		GSc		CSc		GR		BR		GWO		GWw		BWw+Sc	
f _{st} (MPa)	l _e (mm)	d _{b,o} (mm)	f _{FRP} (MPa)	ACI 440 1R.15 (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)	L _{d,Opt.} (mm)	L _d (mm)
5	40	24	2000	3961	-2367	-2736	7113	5223	2057	2074	2238	1715	2560	3173	691	711	3014	3843	1591	1516	646	610
6	40	24	2000	3363	-2346	-1672	3990	12510	1501	2305	1616	1796	1814	4337	549	641	2081	6110	1195	1539	515	543
7	40	24	2000	2921	-2497	-1124	2589	-11532	1150	3009	1228	2093	1359	10916	452	601	1530	80470	936	1701	425	500
8	40	24	2000	2579	-2890	-805	1835	-3216	916	5708	971	2907	1063	-9606	383	581	1180	-5103	759	2120	361	474
9	40	24	2000	2306	-3779	-603	1381	-1679	751	-24894	793	6553	860	-2784	331	580	944	-2155	633	3351	313	461
10	40	24	2000	2083	-6312	-467	1088	-1060	632	-3160	664	-10108	715	-1478	292	597	778	-1258	540	15234	277	460
1	60	24	2000	15443	-7627	38376	-40355	7611	24700	5366	30262	4867	44568	6461	4504	2769	88360	6925	14849	4547	4150	2468
2	60	24	2000	8707	-4137	217861	-40945	4584	9176	3034	10665	2715	13873	3765	2083	1462	20261	4090	6102	2515	1928	1293
3	60	24	2000	6180	-3041	-15061	363811	3870	4848	2336	5462	2054	6667	3025	1295	1034	8672	3350	3448	1882	1203	907
4	60	24	2000	4821	-2566	-5291	17330	3996	3009	2085	3322	1788	3900	2875	912	828	4771	3284	2245	1615	850	718
5	60	24	2000	3961	-2367	-2736	7113	5223	2057	2074	2238	1715	2560	3173	691	711	3014	3843	1591	1516	646	610
6	60	24	2000	3363	-2346	-1672	3990	12510	1501	2305	1616	1796	1814	4337	549	641	2081	6110	1195	1539	515	543
7	60	24	2000	2921	-2497	-1124	2589	-11532	1150	3009	1228	2093	1359	10916	452	601	1530	80470	936	1701	425	500
8	60	24	2000	2579	-2890	-805	1835	-3216	916	5708	971	2907	1063	-9606	383	581	1180	-5103	759	2120	361	474
9	60	24	2000	2306	-3779	-603	1381	-1679	751	-24894	793	6553	860	-2784	331	580	944	-2155	633	3351	313	461
10	60	24	2000	2083	-6312	-467	1088	-1060	632	-3160	664	-10108	715	-1478	292	597	778	-1258	540	15234	277	460

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Boğaçhan BAŞARAN

Doğum Tarihi :1987

Yabancı Dil :İngilizce

Eğitim Durumu :

Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği 2010

Yüksek Lisans: Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği 2013

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

Amasya Üniversitesi Öğretim Görevlisi 2013-Halen

Yayınları (Diğer) :

Ay, Z., Çelik, İ. D., Başaran, B., NPI Kiriş ve Kiriş-Kolonların Mevcut Dönme Kapasitesi. İnşaat Mühendisliğinde 100.Yıl Teknik Kongresi, İstanbul, 2012.

Ay, Z., Çelik, İ. D., Başaran, B., Sivri, M., Kutu Kesitli Kolon-Kirişlerin Kaynaklı Birleşiminin Moment Etkisi Altında İncelenmesi. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay, 2013.

Başaran, B., Ertenli, M. F., Baş, S., Kalkan, İ., Polimer (FRP) Beton Donatısının Aderansını ve Kenetlenme Boyunu Etkileyen Faktörler. Ulusal Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı - 2017, Trabzon, 2017.

Başaran, B., Kalkan, İ., Evaluation of the Parameters Affecting the FRP Reinforcement- Reinforcement -Concrete Bond and the Existing Equations in the

FRP-Reinforced FRP Reinforced Concrete Codes. International Congress on Engineering and Life Science (ICELIS), Kastamonu, 2018.

Başaran, B., Kalkan, İ., Comparison of the Machine Learning Algorithms with the Existing Experimental Data and Code Formulations in Estimating the FRP Bar Concrete Bond Properties. International Congress on Engineering and Life Science (ICELIS), Kastamonu, 2018.

Başaran, B., Levent, U., Kalkan, İ., Effect of Lap Splice of GFRP Reinforcements on Development Length. J. Eng. Res. Appl. Sci., 7(2), 924–929, 2018.

Araştırma Alanları : FRP Donatılı Beton Elemanlar, Hibrit Donatılar, Yapı Malzemeleri, Betonarme Yapılar, Makine Öğrenmesi Yöntemleri, Sonlu Eleman Analizleri