

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BETONA EKİLEN NERVÜRLÜ ÇELİK VE GFRP DONATILARIN EKSENEL
ÇEKME DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALPER CAN HASBEK

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2026

10592580

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BETONA EKİLEN NERVÜRLÜ ÇELİK VE GFRP DONATILARIN EKSENEL
ÇEKME DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALPER CAN HASBEK

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2026

10592580

BEYAN

Betona Ekilen Nervürlü Çelik ve GFRP Donatıların Eksenel Çekme Davranışının Deneysel İncelenmesi adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	<input type="checkbox"/>	DESTEK ALINMAMIŞTIR	<input checked="" type="checkbox"/>
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Alper Can HASBEK

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması ile, yapısal alanda standart inşaat çeliğine alternatif bir malzeme olarak cam elyaf takviyeli polimer donatıların kullanımına ilişkin literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmamın her aşamasında engin bilgi birikimi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, karşılaştığım problemlerde çözüm odaklı yaklaşımlarıyla ufkumu açan, çalışmamın sonuca ulaşmasında emeğini ve sabrını benden esirgemeyen çok değerli Sayın Doç. Dr. Özlem ÇALIŞKAN'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Deneyisel çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen Sayın Öğr. Gör. Ahmet Ferdi ŞENOL'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışma kapsamında ihtiyaç duyulan malzemelerin temininde göstermiş oldukları iş birliği ve destekten dolayı Forta İnşaat Taah. A. Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, zor zamanlarımda varlıklarıyla bana güç veren ve bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan kıymetli aileme minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu yoğun süreçte anlayışını ve desteğini her zaman hissettiğim kıymetli eşim Tansu HASBEK'e ve bana her daim motivasyon kaynağı olan kızım Zeynep HASBEK'e teşekkür ederim.

ALPER CAN HASBEK

2025

ÖZET

BETONA EKİLEN NERVÜRLÜ ÇELİK VE GFRP DONATILARIN EKSENEL ÇEKME DAVRANIŞININ DENEYSSEL İNCELENMESİ

Betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesinde kimyasal ankraj uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda sıklıkla kullanılan nervürlü çelik donatılar, korozyona karşı duyarlılıkları nedeniyle uzun vadede performans kayıplarına yol açabilmektedir. Bu durum, alternatif donatı malzemelerinin kullanımını gündeme getirmiştir. Polimer teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda lif takviyeli polimer (FRP) donatılar; yüksek çekme dayanımı, korozyona karşı üstün direnç ve hafiflik gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, nervürlü çelik ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) donatıların kimyasal ankraj uygulamalarındaki aksenel çekme davranışına etki eden parametreler deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen parametreler; donatı türü, donatı çapı, ankraj derinliği, kenar mesafesi ve donatıların yerleştirildiği delik çapıdır. Deneylerde 12 mm ve 16 mm çaplarında nervürlü çelik ve GFRP donatılar, C20/25 sınıfı donatısız beton numunelere; donatı çapından 2 mm ve 4 mm daha büyük deliklere, donatı çapının 10, 15 ve 20 katı ankraj derinliklerinde ve çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerinde kimyasal dübel kullanılarak yerleştirilmiştir. Numunelere aksenel çekme kuvveti uygulanmış ve toplam 96 adet çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda yük–deplasman eğrileri elde edilmiş ve göçme modları belirlenmiştir. (ACI 318, 2019)’a göre güvenlik düzeyleri belirlenmiştir.

Deneysel sonuçlar, bu çalışma için kimyasal ankrajların çekme kapasitesini belirleyen en etkin parametrenin donatı çapı olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, ankraj derinliği, kenar mesafesi ve delik çapının, minimum gereklilikler sağlandıktan sonra çekme kapasitesi üzerindeki etkilerinin sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, GFRP donatıların yüksek çekme dayanımı, korozyona karşı üstün dirençleri ve hafiflik avantajları sayesinde kimyasal ankraj uygulamalarında nervürlü çelik donatılara güvenilir bir alternatif oluşturabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, GFRP donatıların akma davranışı göstermeyen ve gevrek karakterli malzemeler olması nedeniyle, tasarım aşamasında donatı çapı seçimi, göçme modu ve güvenlik yaklaşımının dikkatle değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kimyasal Ankraj, GFRP donatı, Nervürlü Çelik Donatı, Aksenel Çekme Davranışı, Onarım ve Güçlendirme

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE AXIAL TENSILE PERFORMANCE OF POST-INSTALLED RIBBED STEEL AND GFRP BARS EMBEDDED IN CONCRETE

Chemical anchorage applications are widely used in the repair and strengthening of reinforced concrete structures. Ribbed steel reinforcing bars, which are commonly employed in these applications, may suffer from long-term performance degradation due to their susceptibility to corrosion. This has led to increased interest in the use of alternative reinforcing materials. With advances in polymer technologies, fiber-reinforced polymer (FRP) bars have emerged as promising alternatives owing to their high tensile strength, superior corrosion resistance, and lightweight characteristics.

In this study, the parameters affecting the axial tensile behavior of ribbed steel and glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars used in chemical anchorage applications were experimentally investigated. The examined parameters included reinforcement type, bar diameter, embedment depth, edge distance, and the diameter of the drilled hole. Ribbed steel and GFRP bars with diameters of 12 mm and 16 mm were installed in plain concrete specimens of strength class C20/25 using chemical anchors. The bars were embedded in holes drilled to diameters 2 mm and 4 mm larger than the bar diameter, with embedment depths equal to 10, 15, and 20 times the bar diameter and edge distances equal to 10, 15, 20, and 25 times the bar diameter. Axial tensile loads were applied to the specimens, and a total of 96 pull-out tests were conducted. Load-displacement curves were obtained, and failure modes were identified. Safety levels were evaluated in accordance with ACI 318 (2019).

The experimental results revealed that the bar diameter was the most influential parameter governing the tensile capacity of the chemical anchors in this study. In contrast, embedment depth, edge distance, and hole diameter exhibited limited influence on tensile capacity once the minimum design requirements were satisfied.

In conclusion, GFRP bars were found to provide a reliable alternative to ribbed steel bars in chemical anchorage applications due to their high tensile strength, superior corrosion resistance, and lightweight advantages. However, since GFRP reinforcements do not exhibit yielding behavior and possess a brittle nature, it has been concluded that reinforcement diameter selection, failure mode, and safety approach should be carefully considered at the design stage.

Keywords: Chemical Anchorage, GFRP Rebar, Ribbed Steel Rebar, Axial Tensile Behavior, Repair and strengthening

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1. Nervürlü Çelik Donatılar ile Yapılan Çalışmalar	3
2.2. GFRP Donatılar ile Yapılan Çalışmalar	7
3. KİMYASAL ANKRAJLAR.....	11
3.1 Eksenel Çekme Yüğü Etkisinde Kimyasal Ankrajların Göçme Şekilleri.....	15
3.1.1 Ankraj Donatısının Akması, Kopması.....	15
3.1.2 Ankraj Donatısının Sıyırılması.....	15
3.1.3 Betonun Konik Kopması.....	16
3.1.4 Konik Kopma ile Donatı Sıyırılmasının Birlikte Görülmesi.....	16
3.1.5 Betonun Yarıılması	17
3.2 ACI 318'e Göre Ankraj Çekme Kapasitesinin Belirlenmesi	17
3.2.1. Donatı Dayanım Kapasitesi.....	18
3.2.2 Beton Kopma Dayanımı Kapasitesi	18
3.2.3 Sıyırılma Dayanımı Kapasitesi	19
4. MALZEMELER ve METOT	21
4.1 Malzeme.....	21
4.1.1 Nervürlü Donatı	21
4.1.2 GFRP Donatı	22
4.1.3 Beton.....	23
4.1.4 Kimyasal Yapıştırıcı	24
4.2 Ankrajların Ekilme Geometrisi ve İsimlendirme.....	24
4.3 Deney Düzenegi.....	27
4.3.1 Nervürlü Donatılar İçin Hazırlanan Deney Düzenegi.....	27

4.3.2 GFRP Donatılar İçin Hazırlanan Deney Düzenegi.....	28
5. DENEY SONUÇLARI.....	30
5.1. Kenar Mesafesinin Çekme Kuvvetine Etkisi	30
5.1.1. Nervürlü Donatılarda Kenar Mesafesinin Etkisi.....	30
5.1.2. GFRP Donatılarda Kenar Mesafesinin Etkisi.....	33
5.1.3. Değerlendirme: Kenar Mesafesi.....	35
5.2. Ekme Derinliğinin Çekme Kuvvetine Etkisi	36
5.2.1. Nervürlü Donatılarda Ekme Derinliğinin Etkisi	36
5.2.2. GFRP Donatılarda Ekme Derinliğinin Etkisi	38
5.2.3. Değerlendirme: Ekme Derinliği.....	40
5.3. Ankraj Çapının Çekme Kuvvetine Etkisi	41
5.3.1. Nervürlü Donatılarda Çapın Çekme Kuvvetine Etkisi	41
5.3.2. GFRP Donatılarda Çapın Çekme Kuvvetine Etkisi.....	42
5.3.3. Değerlendirme: Ankraj Çapı.....	44
5.4. Delik Çapının Çekme Kuvvetine Etkisi.....	44
5.4.1. Nervürlü Donatılarda Delik Çapının Çekme Kuvvetine Etkisi.....	44
5.4.2. GFRP Donatılarda Delik Çapının Çekme Kuvvetine Etkisi.....	46
5.4.3. Değerlendirme: Delik Çapı	48
5.5. Donatı Cinsinin Çekme Kuvvetine Etkisi.....	49
5.5.1. Değerlendirme: Donatı Cinsi	50
5.6. Dayanım Değerleri.....	51
5.6.1. Nervürlü Çubuklarda Dayanım Değerleri	51
5.6.2. GFRP Çubuklarda Dayanım Değerleri	52
5.6.3. Değerlendirme: Dayanım Değerleri	54
5.7. Yük-Zaman Grafikleri	54
5.8. Göçme Modları	55
5.9. Tüm Deney Sonuçları.....	56
5.9.1. Nervürlü Donatıların Deney Sonuçları.....	56
5.9.2. GFRP Donatıların Deney Sonuçları.....	57
5.9.3. Genel Değerlendirme: Tüm Deney Sonuçları	57
5.10. ACI 318'e Göre Güvenlik Düzeyleri.....	58
5.10.1. Nervürlü Donatılarda Güvenlik Düzeyleri.....	58
5.10.2. GFRP Donatılarda Güvenlik Düzeyleri.....	59
5.10.3 Değerlendirme: Güvenlik Düzeyleri	60

6. SONUÇLAR	61
KAYNAKÇA	64
EKLER.....	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 3.1. Sertleşmiş Betona Yapılan Ankraj Uygulamaları.....	11
Şekil 3.2. FRP Çubuk Çeşitleri	12
Şekil 3.3. Ankraj Donatısının Kopması	15
Şekil 3.4. Ankraj Donatısının Sıyrılması	16
Şekil 3.5. Betonun Konik Kopması	16
Şekil 3.6. Konik Kopma ile Donatı Sıyrılmasının Birlikte Görülmesi	17
Şekil 3.7. Betonun Yarılması	17
Şekil 3.8. Tekil Ankraj İçin Maksimum Göçme Alanı	19
Şekil 4.1. Çekme Testi Uygulaması.....	22
Şekil 4.2. Çekme Testi Yapılan GFRP Donatılar	23
Şekil 4.3. Ankrajların Ekildiği Beton Bloklar.....	24
Şekil 4.4. Nervürlü Donatılar İçin Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi ve Görseli	28
Şekil 4.5. GFRP Donatılar İçin Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi ve Görseli.....	28
Şekil 4.6. Çalışma Kapsamında Ekilen Nervürlü ve GFRP Çubuklar.....	29
Şekil 5.1. Kenar Mesafesi 10D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	30
Şekil 5.2. Kenar Mesafesi 15D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	31
Şekil 5.3. Kenar Mesafesi 20D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	32
Şekil 5.4. Kenar Mesafesi 25D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	32
Şekil 5.5. Kenar Mesafesi 10D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	33
Şekil 5.6. Kenar Mesafesi 15D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	34
Şekil 5.7. Kenar Mesafesi 20D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	34
Şekil 5.8. Kenar Mesafesi 25D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	35
Şekil 5.9. Ekme Derinliği 10D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	37
Şekil 5.10. Ekme Derinliği 15D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	37

Şekil 5.11. Ekme Derinliği 20D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	38
Şekil 5.12. Ekme Derinliği 10D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	39
Şekil 5.13. Ekme Derinliği 15D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	39
Şekil 5.14. Ekme Derinliği 20D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	40
Şekil 5.15. 12 mm – 16 mm Çapa Sahip Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	42
Şekil 5.16. 12 mm – 16 mm Çapa Sahip GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	43
Şekil 5.17. 12 mm Çapa Sahip Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	45
Şekil 5.18. 16 mm Çapa Sahip Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri	46
Şekil 5.19. 12 mm Çapa Sahip GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	47
Şekil 5.20. 16 mm Çapa Sahip GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	48
Şekil 5.21. 12 mm Çapa Sahip Nervürlü-GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	49
Şekil 5.22. 16 mm Çapa Sahip Nervürlü-GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri.....	50
Şekil 5.23. 12 mm Çaplı Nervürlü Çubuklar İçin Çekme Dayanımı Değerleri.....	51
Şekil 5.24. 16 mm Çaplı Nervürlü Çubuklar İçin Çekme Dayanımı Değerleri.....	52
Şekil 5.25. 12 mm Çaplı GFRP Çubuklar İçin Çekme Dayanımı Değerleri	53
Şekil 5.26. 16 mm Çaplı Nervürlü Çubuklar İçin Çekme Dayanımı Değerleri.....	53
Şekil 5.27. Nervürlü Donatıların Çekme Kuvveti Değerleri	56
Şekil 5.28. GFRP Donatıların Çekme Kuvveti Değerleri.....	57
Şekil 5.29. Nervürlü Çubukların ACI 318'e Göre Güvenlik Düzeyleri	59
Şekil 5.30. GFRP Çubukların ACI 318'e Göre Güvenlik Düzeyleri.....	59

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa No.
Tablo 3.1. Takviye Çubuklarının Tipik Çekme Özellikleri.....	13
Tablo 3.2. Ankraj Dayanım Azaltma Katsayıları	20
Tablo 4.1. Çalışmada Kullanılan Parametreler.....	21
Tablo 4.2. 12 ve 16 mm Çaplı Nervürlü Donatıların Mekanik Özellikleri	22
Tablo 4.3. 12 ve 16 mm Çaplı GFRP Donatıların Mekanik Özellikleri.....	23
Tablo 4.4. 1 m ³ Beton İçin Ağırlıkça Karışım Oranları	24
Tablo 4.5. 28 Günlük Beton Basınç Dayanımları	24
Tablo 4.6. Nervürlü Çelik Donatıların İsim ve Parametreleri	25
Tablo 4.7. GFRP Donatıların İsim ve Parametreleri	26
Tablo 4.8. Ankraj Ekme Aralıkları ve Kenar Uzunlukları	27
Tablo 5.1. Deney Sonuçları için Genel Değerlendirme.....	58

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
AFRP	: Aramid Lif Takviyeli Polimer
A_{Nc}	: Betonda Öngörülen Göçme Alanı, mm ²
A_{Nco}	: 1.5 h _{ef} Kenar Mesafesi Olan Ankrajın Öngörülen Göçme Alanı, mm
A_{se}	: Ankraj Donatısının Kesit Alanı, mm ²
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
B420C	: Betonarme Yapılarda Kullanılan Donatı Çeliği
BFRP	: Bazalt Lif Takviyeli Polimer
C	: Beton Dayanım Sınıfı
c_{a,min}	: Ankrajın Kenara En Yakın Olan Mesafesi, mm
c_{a,c}	: Ankrajın Kritik Kenar Mesafesi, mm
CFRP	: Karbon Lif Takviyeli Polimer
d₀	: Donatı Çapı, mm
e_h	: Ankraj Çubuğunun Şekli ile İlgili Katsayı
f'_c	: Betonun Basınç Dayanımı, MPa
FRP	: Fiber Takviyeli Polimer
f_{uta}	: Nihai Ankraj Dayanımı, MPa
f_{ya}	: Ankraj Donatısının Akma Dayanımı, MPa
GFRP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
h_f	: Gömülme Derinliği
K	: Kenar Mesafesi
L	: Ankraj Gömülme Derinliği
Ld	: Ekme Boyu
N	: Ankraj Sayısı
N_b	: Temel Beton Konik Göçme Kapasitesi

N_{cb}	: Beton Konik Göçme Kapasitesi
N_p	: Esas Sıyırılma Kapasitesi
N_{pn}	: Nominal Sıyırılma Kapasitesi
N_{sa}	: Donatı Kapasitesi
n_t	: 1 İnç Uzunluğundaki Nervür Sayısı
R_e	: Nervürlü Çelik Akma Dayanımı (MPa)
R_m	: Nervürlü Çelik Çekme (Kopma) Dayanımı (MPa)
S420	: Minimum Akma Kapasitesi 420 MPa Olan Yapı Çeliği
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	: Türk Standardı
u	: Aderans Gerilmesi (MPa)
$\Psi_{ed,N}$: Serbest Kenara Olan Uzaklıkla İlgili Azaltma Katsayısı
$\Psi_{c,N}$: Betonda Çatlak Bulunması ile İlgili Azaltma Katsayısı
$\Psi_{c,p}$: Sonradan Yerleştirilen Ankrajların Çekme Dayanımı İçin Katsayı
$\Psi_{cp,N}$: İlave Donatı Etkilerine Bağlı Düzeltme Faktörü

1. GİRİŞ

Türkiye jeolojik konumu itibarıyla Doğu Anadolu, Batı Anadolu ve Kuzey Anadolu Fay Hatları olmak üzere üç büyük fay hattının üzerinde yer almaktadır. Bu büyük fay hatlarının etkisi altında bulunan ülkemizde tarih boyunca yıkıcı depremler meydana gelmiş ve bu depremler ciddi can ve mal kayıplarına yol açmıştır. Özellikle son yıllarda yaşanan depremler ülkemizdeki mevcut yapı stoğunun önemli bir kısmının deprem güvenliği açısından yetersiz olduğunu göstermiştir (Aras, 2015). Bu durum onarım ve güçlendirme uygulamalarının inşaat mühendisliği alanında önemli bir konu haline gelmesine sebep olmuştur.

Onarım ve güçlendirme işlemlerinde mevcut taşıyıcı sisteme yeni betonarme elemanların eklenmesi yöntemi yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte mevcut taşıyıcı sistem ile yeni betonarme elemanın arasındaki yük aktarımının uygun bir şekilde sağlanması hedeflenmektedir. Sertleşmiş betonda bu yük aktarımını sağlayarak betonarme elemanların birlikte çalışması donatıların ankraj olarak ekilmesi ile mümkün olmaktadır. Yapıların ömrünü uzatmak ve kullanım performansını artırmak amacıyla yapılan onarım ve güçlendirme işlemlerinde; yüksek yapışma dayanımı, hızlı priz alması, pratik olarak uygulanabilmesi gibi özellikleri sayesinde kimyasal ankraj uygulamaları sıkça karşılaşılan bir teknik haline gelmiştir (Seyhan, 2006).

Kimyasal ankrajların çalışma prensibi sertleşmiş betona açılan deliklerin epoksi veya reçine esaslı kimyasal yapıştırıcılar ile doldurularak donatının sabitlemesi şeklindedir. Yük aktarımı kimyasal yapıştırıcı, beton ve donatının oluşturdukları aderans kuvvetleri ile sağlanmaktadır (Aydoğan, 2015). Kimyasal ankraj işlemlerinde mekanik özellikleri ve temin edebilme kolaylığı sebebi ile ağırlıklı olarak nervürlü çelik donatılar kullanılmaktadır. Ancak çelik donatılar güçlendirme yapılan ortam koşullarına bağlı olarak zamanla korozyona uğrama riski taşımaktadır. Korozyon; donatının kimyasal özelliklerini bozarak donatının kesit alanının azalmasına ve hacimsel genleşme sebebiyle betonda çatlamlar oluşmasına sebep olmaktadır. Donatının korozyona uğraması aderans kaybına neden olmaktadır ve onarım-güçlendirme uygulamalarının uzun ömürlü olmasını engellemektedir. Ortam koşullarının çok etkin olduğu köprüler, deniz yapıları, endüstriyel tesisler gibi yapıların kullanım ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden birisi olarak çelik donatının korozyona uğraması karşımıza çıkmaktadır (Nkurunziza vd., 2005). Bu dezavantaj araştırmacıları ve mühendisleri alternatif malzeme arayışına yöneltmiştir.

Son yıllarda polimer teknolojisindeki gelişmeler ve yapılan çalışmalar ışığında lif takviyeli polimer kompozit donatıların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Cam, bazalt, aramid, karbon liflerin polimer bir matris ile birleştirilmesiyle lif takviyeli polimer donatılar elde edilmektedir. Korozyona karşı dayanıklı, hafif, yüksek çekme mukavemeti göstermeleri gibi avantajları lif takviyeli polimer donatıları güçlü bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır (Arslan, 2020). Fiber takviyeli polimer donatıların fiziksel ve mekanik özelliklerinin çelikten farklı olması ankrajın aderans davranışlarının da farklı özellikler göstermesine neden olmaktadır (Başaran vd., 2019). Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) çubuklara göre düşük maliyeti olan Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) donatılar çelik donatılara göre güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Nkurunziza vd., 2005). Cam fiber takviyeli polimerler (GFRP); yüksek mukavemet, düşük özgül ağırlık özellikleri ve çeşitli kombinasyonlarda üretilebilir olmaları, ayrıca yüksek yorulma direnci, yüksek sıcaklıkta aşınma ve oksidasyon direnci gibi yetenekleri, bu polimer malzemelerin mühendislik uygulamalarında iyi bir alternatif olmasını sağlamaktadır. (Karataş ve Gökkaya, 2018). Fiber takviyeli polimer çubukların gevrek yapısı ve akma davranışı göstermemesi, kimyasal ankraj performanslarının deneysel verilerle incelenmesi ve tasarım kriterlerinin belirlenmesini gerektirmektedir.

Bu çalışmada; onarım ve güçlendirme uygulamalarında yenilikçi bir alternatif olan GFRP donatıların kimyasal ankraj performansı deneysel olarak incelenmiş ve nervürlü çelik donatı ile performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada toplam 96 adet 12 ve 16 mm çaplarındaki nervürlü ve GFRP donatılar, farklı kenar mesafeleri (çapın 10, 15, 20 ve 25 katı), farklı ekme derinlikleri (çapın 10, 15 ve 20 katı) ve farklı ankraj delik çapları (çap+2 ve çap+4 mm) seçilerek, 28 günlük küp beton basınç dayanımı 25.4 MPa olan donatısız beton bloklara kimyasal dübel kullanılarak ekilmiştir. Ekilen ankraj donatılarına aksel çekme kuvveti uygulanmış, çekme kuvveti değerleri, yük-zaman grafikleri ve göçme modları belirlenmiştir. Donatılara çekme testi uygulanmış ve kimyasal ankraj olarak ekildikten sonra elde edilen çekme dayanımları, çekme testi sonucu elde edilen dayanımlarla karşılaştırılmıştır. Donatıların akma ve kopma sınırları tespit edilip ankraj donatılarının davranışları değerlendirilmiştir. Nervürlü ve GFRP çubuklarda donatı çapı, ekme derinliği, kenar mesafesi ve delik çapının etkileri değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen çekme kuvveti değerleri; American Concrete Institute (ACI 318-19) Appendix-D (2019) Standardı ile hesaplanan tasarım değerleri ile oranlanarak güvenlik düzeyleri bulunmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Nervürlü Çelik Donatılar ile Yapılan Çalışmalar

Seyhan (2006), betonarme elemanlarda sıklıkla kullanılan ankrajların iki farklı grupta incelendiğini; bu grupların mekanik ve kimyasal ankrajlar olduğunu belirtmiştir. Polimer teknolojisindeki gelişmelerin daha yüksek performanslı yapıştırıcıların üretimine olanak sağlaması, işlemin hızlı ve pratik olması gibi sebeplerin kimyasal ankraj işlemini cazip kıldığını ifade etmiştir. Kimyasal ankrajlara etkiyen dış yüklerin kimyasal yapıştırıcı ile beton arasındaki aderans kuvveti ile taşındığını belirtmektedir. Çalışmasında kimyasal ankrajların davranışları hakkında; Türkiye’deki mevcut yapıları temsil etmek üzere seçtiği düşük dayanımlı bir beton içerisine 5 farklı kimyasal yapıştırıcı kullanıp, ankraj çapını, ankraj derinliğini, donatı çapını ve ankraj deliklerinin özelliklerini değişken olarak incelediği 80 adet kimyasal ankraj içeren bir deney yapmıştır. Ankraj donatısı olarak 100 cm uzunluğunda, S420 sınıfında, 16 ve 20 mm çaplarında donatılar seçmiştir. Ankraj göçme tipine bağlı olarak ankraj deliği çapındaki değişimin ankraj davranışını etkilediğini, sıyrıлма şeklinde göçen ankrajlarda ankraj deliği çapının artmasının ankraj dayanımının artmasını sağladığını, ankraj derinliğindeki değişimin ankraj davranışını doğrudan etkilediğini, farklı değişkenlere bağlı olarak ankraj derinliğinin etkisinin de farklılaştığını, beton yüzeyle yeterli yapışma dayanımına sahip olmayan malzemelerle yapılan ankrajlarda; ankraj derinliğinin artmasının ankraj dayanımını artırdığını, ankraj imalatında kullanılan yapıştırıcı malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ankraj dayanımını ve göçme tipini belirleyen önemli etkenlerden biri olduğunu belirtmiştir.

Gürbüz (2007), kimyasal ankrajların yüksek yapışma dayanımı, kolay ve hızlı uygulanabilir olmaları gibi avantajları sebebiyle betonarme yapıların güçlendirme çalışmalarında mevcut taşıyıcı sisteme yeni betonarme elemanlar eklenmesi esnasında sıklıkla kullanıldığını belirtmiştir. Çalışmasında eksenel çekme etkisi altındaki tam ve kısmi bağlı kimyasal ankrajların farklı derinliklerde ve ankraj deliğinin farklı yüzey koşulları altında davranışlarını incelemiştir. Ankrajların uygulandığı betonun sınıfını düşük dayanımlı olarak seçmiş ve çekip çıkarma deneyleri yapmış, numunelerin yük – yer değiştirme ilişkileri, eksenel yük kapasiteleri ve göçme modlarını tespit etmiştir. Düşük dayanımlı betona uygulanan tam bağlı kimyasal ankrajların deney sonuçlarından elde edilen verilere göre; uygulama esnasında sıkça kullanılan 10Ø ankraj derinliklerinde ankraj donatısının akma dayanımına ulaşmadan betonun hasarı sonucunda erken ve gevrek göçme meydana geldiğini gözlemlemiştir. Sonuç olarak düşük dayanımlı betona yapılan kısmi bağlı ankrajların, aynı ankraj derinliğine sahip tam bağlı ankrajlara kıyasla daha yüksek performans sergilediğini belirtmiştir.

Özen (2010), çalışmasında düşük ve normal dayanımlı betonlara uygulanan kimyasal ankrajların beton dayanımı, donatı çapı ve tipi, kenar mesafeleri ve gömülme derinliği gibi farklı parametreler belirleyerek çekme davranışları üzerine çalışmıştır. 337 adet S420a ve S420b ankraj numunesini 5-25 MPa beton basınç dayanımına sahip taban betonarme elemanlarına ekmiş ve çekme testine tabi tutmuştur. Çalışmasının sonucunda özellikle kenara yakın ekilen ankrajlarda donatının akma ve/veya çekme dayanımlarına ulaşmadan gevrek beton hasarları gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Sağlıklı bir kimyasal ankraj uygulaması için kenar mesafesinin donatı çapının en az 15 katı olması gerektiğini belirlemiştir. S420a çeliği kullanılarak yapılan kimyasal ankrajların çekme dayanımlarının tahmini ve tasarımı için ACI 318 standartlarının daha büyük dayanım azaltma katsayıları ile kullanılabileceğini gözlemlemiştir. S420b donatı ile yapılan ankrajlar için ise ACI 318 yönteminin kullanılmasını önermemektedir.

Aydoğan (2015), çalışmasında mevcut yapıların onarım ve güçlendirilmesinde, yeni elemanların eklenmesinde kimyasal ankrajların sıklıkla kullanıldığını belirtmiştir. Kimyasal ankrajların çekme kuvvetinin ankraj çapı, kenar mesafesi, ankraj ekme derinliği, kullanılan kimyasal yapıştırıcı türü, ankrajların ekileceği deliğin temizlik ve nem durumu gibi birçok parametreden etkilendiğinden söz etmiştir. Epoksi bazlı kimyasal yapıştırıcı kullanarak 27 MPa ortalama beton basınç dayanımına sahip beton temellere S420a donatıdan oluşan 80 adet ankraj ekmiş ve çekme deneyine tabi tutmuştur. Bu ankrajları çapın 5, 10, 15 ve 20 katı derinliklerde ve çapın 5, 7.5, 10, 15 ve 20 katı kenardan uzaklığa ekmiştir. Deneyler sırasında yük ve deplasman değerlerini ölçerek numunelere ait yük – deplasman grafiklerini çizmiş, göçme modlarını belirlemiştir. Ankraj çapına, ekme derinliğine ve kenar mesafelerine göre değerlendirmeler yapmıştır. American Concrete Institute (ACI 318) Ek-D'nin öngördüğü kapasite ve tasarım dayanım değerleriyle deney sonuçlarını karşılaştırmış ve güvenlik katsayılarını bulmuştur. Bu deneysel çalışma sonucunda ankraj çapı ve kenar mesafesi arttıkça çekme kuvvetinin arttığını, ankraj ekme derinliği açısından da çapın 15 katına kadar arttığını, sonrasında ise çekme kuvvetinde azalma olduğunu ve çap arttıkça da güvenlik katsayısının azaldığını belirlemiştir.

Aras, M. (2015), tez çalışmasında ülkemizdeki mevcut betonarme yapıların büyük çoğunluğunun Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007)'in öngördüğü deprem güvenliğine sahip olmadığını ve büyük çoğunluğunda da güçlendirme gerektiğini vurgulamıştır. Güçlendirme uygulamalarında taşıyıcı sisteme yeni yapısal eleman eklenmesi yönteminde kimyasal ankrajların sıkça kullanıldığını belirtmiştir.

Kimyasal ankrajların tercih edilme nedenlerinden bahsetmiştir. Kimyasal ankrajların güvenli tasarımı için aksenal çekme etkisi altında davranışlarının bilinmesi gerektiğini belirtmiştir. 10 farklı kimyasal yapıştırıcı ile farklı çaplarda (12, 16, 20 ve 24 mm), farklı derinliklerde (çapın 5, 10, 15 ve 20 katı), donatısız beton bloklara nervürlü çubuklar ekerek aksenal çekme deneyine tabi tutmuştur. Yapılan deneyler sonucunda yük-deplasman eğrileri, aksenal yük kapasiteleri ve göçme modlarını elde etmiştir. Deney sonuçlarını ACI 318'in öngördüğü kapasite ve tasarım dayanım değerleri ile karşılaştırmış ve güvenlik katsayılarını belirlemiştir. Kimyasal ankrajların aksenal çekme davranışları için deneysel çalışma yapmış, ACI 318 ve sonlu elemanlar programı ile karşılaştırmıştır. Çalışmasının sonucunda kimyasal ankraj elemanlarında aksenal çekme kapasitesine kimyasal yapıştırıcının etkisinin derin ankrajlarda ortaya çıktığını gözlemlemiştir. ANSYS programıyla tasarladığı modelde büyük çaplarda ve derin ankrajlarda sağlıklı sonuçlar elde edildiğini belirtmiştir.

Arslan (2016), tez çalışmasında 5.8-16.4 MPa arası basınç dayanımına sahip olan beton bloklara toplam 100 adet S420a ve S420b çelik donatıları epoksi kullanarak ankraj işlemini gerçekleştirmiştir. Deneylerde gömülme derinliği, kenar ve köşe mesafeleri değiştirerek, ankrajların farklı koşullar altındaki davranışlarını incelemiştir. Gerilme yığılmasının, öngörülen göçme alanında büyük donatı çapları için daha önemli olduğunu tespit etmiştir. Gerilme yığılması ile ilgili bulguların ACI 318 formülünün küçük çaplı ankrajlarda büyük çaplı ankrajlara göre daha güvenli değerler verdiğini gözlemlemiştir. ACI 318'e göre öngörülen göçme alanı hesabı için bazı düzeltme faktörleri önermiştir.

Delhomme ve Brun (2018), çekme kuvveti altındaki ankrajların göçme tiplerini analiz etmek ve tasarım aşamasında kullanılacak sayısal bir model önermek amacıyla deneysel ve sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Ultra yüksek performanslı lif takviyeli ve 130 MPa'dan yüksek basınç dayanımı gösteren betona ekilen kimyasal ankrajların mekanik davranışını incelemiştir. 40 mm gömme derinliğindeki kimyasal ankrajlarda betonun konik göçmesi, 100 mm gömme derinliğindeki kimyasal ankrajlarda çelik ankraj donatısının kopması göçme tiplerini gözlemlemiştir. Sayısal modeli beton – ankraj ara yüzeyi için kohezif davranış ve beton göçme modeli davranışı gözetilerek Abaqus yazılımını kullanarak oluşturduklarını belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlardan elde ettikleri verilerin göçme modları ve nihai yükler karşılaştırıldığında oldukça uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ankrajların sıyrılma göçme tipi göstermemesi için minimum 50 mm gömme derinliği olması gerektiğini bildirmişlerdir.

Ağdağ (2019), çalışmasında farklı ankraj çapı, farklı gömme derinliği ve farklı ortam koşullarında kimyasal ankrajların çekme kuvvetlerini incelemiştir. 12, 16 ve 20 mm çaplarına

sahip B420C sınıftaki nervürlü çelik ankraj donatılarını; çaplarının 5, 10, 15 ve 20 katı derinliklere, ankraj deliklerinin temizliği, nem ve sıcaklık durumu değişken parametrelerine göre ekmiştir. Çekip çıkarma deneyleri sonucunda ankrajların yük-deplasman eğrilerini, eksenel yük kapasitelerini, göçme modlarını, rijitliklerini, deplasman süneklik oranlarını ve enerji yutma kapasitelerini belirlemiştir. ACI 318 Ek-D'nin ankrajlar için öngördüğü kapasite ve tasarım dayanım değerleri ile deney sonuçlarını karşılaştırılarak güvenlik katsayılarını bulmuştur. Çalışma sonucunda kimyasal ankrajların dayanımlarının ankrajların ekileceği deliklerin temizliğinden, neminden ve sıcaklığından etkilendiğini tespit etmiştir.

Tóth vd. (2019), çalışmalarında beton karışımına çelik lif takviyelerin eklenmesinin daha düşük kırılma enerjisi, daha düşük çatlak genişlikleri, daha yüksek aşınma ve darbe direnci gibi olumlu özelliklerinden bahsetmiştir. Çelik lif takviyeli betonlarda ankraj kullanımının giderek yaygınlaşması nedeniyle çelik lif takviyeli betonlara uygulanan ankrajların davranışını gözlemlemek ve betonda ankraj tasarımına ilişkin mevcut hükümlerin uygulanabilirliğini doğrulamak gerektiğinden bahsetmiştir. Normal ve çelik lif takviyeli betona ekilen çelik ankrajlara çekme ve kesme yüklemesi yapmışlardır. Betona takviye edilen lif içeriğinin ankrajların yük-deplasman davranışı üzerinde olumlu etkilerinden bahsetmişlerdir. Çelik lif takviyeli betonun daha sünek davranış gösterdiğini, betondaki çatlakları önlemesi sayesinde yapı elemanlarının daha sağlıklı şekilde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Özdemir, Ö. (2022), kimyasal ankrajlarda grup etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Deneysel çalışma bölümünde 8, 10, 12 ve 14 mm olmak üzere dört farklı ankraj çubuk çapı, 40, 80 ve 120 mm olmak üzere üç farklı ankraj gömülme derinliği, B420C ve 4.6 kalitesinde sonsuz dişli çelik olmak üzere iki farklı ankraj çubuk türü kullanmıştır. Çekme deneyi sonucu yük-deplasman eğrilerini oluşturmuş, yük-deplasman eğrilerinden çekme dayanımı, başlangıç rijitlik katsayısı, deplasman süneklik oranı ve enerji yutma kapasitelerini belirlemiştir. Teorik çalışma bölümünde ise ikili, üçlü, dördü, beşli ve altılı ankraj gruplarının ekilme derinliğini çapın 5, 10, 15, 20 katı olarak, donatı çapını 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24 mm olarak ve işçilik kalitesi-ortam koşulları ile ilişkisini incelemiştir. ACI 318'e göre tasarım dayanımlarını hesaplamıştır. Tasarım dayanımlarının, işçilik kalitesi ve ankraj grubundaki çubuk sayısı ile ilişkisini değerlendirmiştir.

2.2. GFRP Donatılar ile Yapılan Çalışmalar

Nkurunziza vd. (2005), son yirmi yılda gerçekleştirilen araştırmaların betondaki çelik korozyonuna bağlı sorunlara yönelik potansiyel çözümlerden biri olarak yaygın kullanıma sahip olan çelik çubukların yerine fiber takviyeli kompozit (FRP) takviyesi kullanılması olduğunu öne sürmüşlerdir. Cam fiber takviyeli polimer (GFRP) takviyesinin, karbon fiber takviyeli polimer takviyesine kıyasla düşük maliyeti nedeniyle köprülerin yapımında ve diğer beton yapılarda daha fazla popülerlik kazandığını belirtmişlerdir. GFRP takviyelerinin dayanıklılığına ilişkin veri eksikliğinin, bunların inşaat mühendisliğinde daha geniş ölçekte kabul edilmesinin önünde büyük bir engel olduğunu dile getirmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda tasarım limitlerinden daha yüksek gerilimlere maruz kalan GFRP çubuklar üzerinde gerçekleştirilen dayanıklılık testleri, mevcut yönergeler tarafından benimsenen mukavemet azaltma faktörlerinin tutarlı olduğu sonucuna varmışlardır. Yaptıkları hesaplamalar sonucunda GFRP çubuklarının mekanik özelliklerinin saha koşullarında 80 yıla yakın bir süre korunduğunu tespit etmişlerdir.

Genç (2006), çalışmasında kompozit malzemelerin hemen hemen her sektörde karşımıza çıktığından bahsetmiş ve cam elyaf takviyeli polimerlere değinmiştir. İmalat yöntemleri olarak infüzyon, vakum ve el yatırması yöntemleri hakkında bilgiler vermiştir. Kalınlığı sabit tutup reçine ve elyaf oranlarını değiştirerek cam elyaf takviyeli polimerlere çekme, darbe ve eğme deneyleri yapmıştır. Kırılma yüzeylerini incelemiştir. İnfüzyon yöntemiyle imal edilen cam elyaf takviyeli polimerlerin en iyi sonucu verdiğini tespit etmiştir. Elyaf oranı arttıkça malzemenin çekme mukavemetinde artış olduğunu fakat darbe dayanımı ve yüzey kalitesinde belli noktalardan sonra azalmalar gözlemlemiştir. Bu azalmanın sebebini ise reçinenin bağlayıcı özelliğinin azalması olarak belirtmiştir.

Ahmed vd. (2008), betona gömülü cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) donatı ankrajların çekme kapasitesi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Toplam 90 adet GFRP ankraj çubukları yerleştirmiş ve American Society for Testing and Materials (ASTM) E-488-96'ya uygun olarak çekme yükü altında test etmişlerdir. Test parametreleri olarak çubuk çapları, gömme derinlikleri, yapıştırıcı tipleri ve ankraj deliklerinin kuruluk oranlarını kullanmışlardır. Test numunelerini donma-çözünme döngüleri, ıslak ve kuru döngüler ve sıcaklık değişimleri dahil olmak üzere gerçek çevresel koşullara 7 ay boyunca maruz bırakmışlardır. Deney düzeneğinde; epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılan delikleri kısmen ıslak veya ıslak durumda, çimento esaslı yapıştırıcı kullanılan delikleri ise tamamen kuru olarak denemişlerdir. Her iki

durumda da 10-15Ø arasında değişen derinliklerde elde edilen ankraj sonuçlarının yeterli performans gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Zhou vd. (2011), çalışmalarında son yıllarda cam elyaf takviyeli polimer donatıların beton yapılarda geleneksel çelik donatılara alternatif olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmanın amacının asidik ortamda GFRP ve çelik donatıların beton ile aderansının karşılaştırılması üzerine bir deneysel çalışma olduğunu belirtmektedirler. Numuneleri farklı pH değerlerindeki asit çözeltilerine daldırarak korozyona maruz bırakmışlar ve 120 adet numune üzerine çekme testi uygulamışlardır. 75 günlük maruz bırakma sonucunda GFRP çubuklar için pH = 2 ortamında %22, pH = 3 ortamında %17.2 dayanım kaybı olduğunu, çelik çubuklar için ise aynı sürede pH = 2 ortamında %19.6, pH = 3 ortamında %12.3 dayanım kaybı gözlemlemişlerdir. Her iki donatı tipinde de dayanımın asit çözeltilerindeki pH değerinin artmasıyla azaldığını fakat çelik donatıların asit ortamında daha yüksek çekme değerleri sunduğunu gözlemlemişlerdir.

Al-Salloum vd. (2013), bu çalışmada GFRP donatıları 6, 12 ve 18 ay boyunca farklı ortam koşullarında bıraktıktan sonra çekme testleri yaparak deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Farklı ortam koşullarını oluşturmak için oda sıcaklığı ve 50°C, deniz suyu, musluk suyu ve alkali çözelti, ıslak ve kuru durumlarını ele almışlardır. Çubukların bozunma biçimlerini gözlemek için SEM (Scanning Electron Microscope) yöntemi kullanmışlardır. 18 ay boyunca 50°C musluk suyu ve alkali çözeltilerde bekletilen numunelerin çekme dayanımlarında başlangıç dayanımlarına göre yaklaşık %24 oranında azalma gözlemlemişlerdir. SEM sonuçlarına göre cam elyafların etrafındaki matrislerin önemli ölçüde bozulduğunu, ancak cam elyaflarda neredeyse hiç bozulma görülmediğini belirtmişlerdir.

Abolghasem vd. (2013), çevresel etkilerden dolayı çelik donatılarda meydana gelen korozyonun beton köprülerdeki bozunma sorunlarının önemli bir nedeni olduğunu; GFRP çubukların uygulamada kullanılmasının yalnızca bu dayanıklılık sorununu çözmekle kalmayacağını, aynı zamanda yüksek mukavemet-ağırlık oranını, yüksek çekme mukavemeti sağlayacağını ve kimyasal etkenlere karşı direnç kazanacağını ifade etmişlerdir. Çalışma; farklı çubuk aralıkları ve 200 mm gömme uzunluğuna sahip iki veya üç GFRP çubuktan oluşan grubun çekme kapasitesi üzerinedir. Kullanılan çubuk çapını nervürlü yüzeyle birlikte 16 mm olarak belirlemişlerdir. Yatay aralıkları 150, 225 ve 300 mm olan iki çubuklu grup ve üç çubuklu grup olarak adlandırılan iki tür grup davranışını incelemişlerdir. Her durum için beş özdeş örnek oluşturmuşlardır. Böylece iki çubuklu 15, üçlü çubuklu 15 olmak üzere toplam 30 adet numune dikmişlerdir. 300 mm kalınlığında dört adet betonarme döşemeyi aynı anda döküp

GFRP çubukları birbirlerine olan etkiyi en aza indirmek için ikili veya üçlü çubuklar arasında 1 m'lik boşluk bırakılarak önceden yerleştirip deney düzeneğini kurmuşlardır. Genel olarak, daha küçük çubuk aralıklarında üst üste binen göçme konilerinden dolayı kopma gerilme dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Başaran vd. (2019), lif takviyeli polimer donatıların (FRP) özellikle korozyona uğramama ve yüksek çekme dayanımları nedeniyle betonarme yapılarda çelik donatıya alternatif olarak kullanılmaya başlandığından bahsetmişlerdir. Mekanik ve fiziksel özelliklerinin çelik donatıya göre farklı olmasından dolayı, FRP donatıların beton ile olan aderans davranışlarının çelikten farklı olduğunu, FRP donatının beton ile olan aderans davranışının, beton basınç dayanımına, pas payına, donatı gömülme boyuna, donatı çapına, donatının konumuna ve donatı yüzey özelliği gibi daha birçok değişkene bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Farklı uluslararası FRP donatılı beton yönetmeliklerinin, donatı aderansının tahmininde kullanılacak çeşitli bağıntılar önerdiğini ve bu bağıntıların, donatının betondan ayrışması ile sonuçlanan deneylerin sonuçları kullanılarak oluşturulduğuna değinmişlerdir. Ayrışma ile sonuçlanan numunelerde, betonun çatlamasından doğan aderans kaybı neticesinde maksimum aderans belirlenemeyeceği için aderansı etkileyen değişkenlerin tam olarak tespit edilemeyeceğini aktarmışlardır. Bu nedenle ayrışma göçme tipi ile sonuçlanan deneyler ile ortaya konan bağıntıların geçerliliğinin tartışmalı olduğundan bahsetmiştir. Çalışmasında, literatürde mevcut donatı sıyrılması ile sonuçlanan 243 adet çekip çıkarma deneyinden yararlanarak, çoklu doğrusal regresyon analizi ile GFRP donatıların beton ile aralarındaki aderans bağıntısının belirlenmesini amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda önerilen bağıntı kullanılarak tahmin edilen aderans gerilmesi değerlerinin, uluslararası yönetmeliklerde geçen bağıntılar ile elde edilen değerlerden daha tutarlı sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir.

Türkay (2020), çalışmasında cam elyaftan imal edilmiş farklı çaplardaki polimer donatıların, inşaat çeliği ve bazalt donatıları ile ankraj ve aderans dayanımlarını karşılaştırmıştır. Düşük dayanımlı betonlar üzerinde 6, 8, 10, 14 ve 20 mm çaplarındaki donatılar ve 100, 150 ve 200 mm derinliklerdeki deney numuneleri üzerinde aksel çekip çıkarma deneyi ile performans araştırması yapmıştır. Ankraj donatısı kenetlenme boyu arttıkça aderans dayanımının azaldığını görmüştür. Ayrıca polimer donatıların inşaat demirine göre daha iyi ankraj dayanımına sahip olduğunu tespit etmiştir. Çelik donatılarda olduğu gibi polimer donatıların da betondan çıkarmak için gerekli yük miktarının donatı çapı, beton sınıfı ve gömme derinliğine bağlı olarak değiştiğini gözlemlemiştir. Düşük dayanımlı betonlar üzerinde 14 mm çaplı donatıları betondan çıkarmak için gerekli yük miktarının polimer

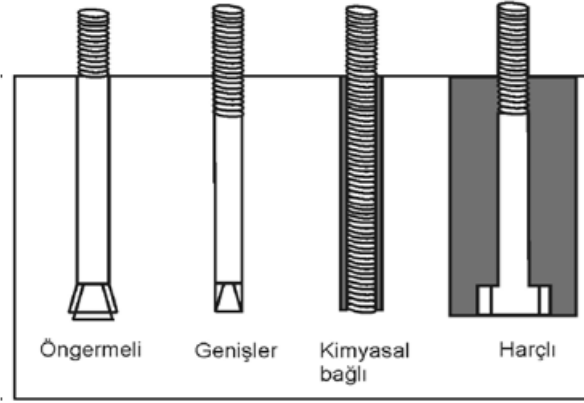
donatılarda, çelik donatılardan yaklaşık %11 daha az, bu oranın 20 mm çaplı donatılarda ise %6.4 daha fazla olduğu sonucuna varmıştır. Normal dayanımlı betonlar üzerinde ise benzer özellik gösterdiğini bildirmiştir.

Çakıroğlu (2023), çelik donatının betona aderansının donatı yüzeyinde üretim aşamasında oluşturulan nervür ve profiller sayesinde; GFRP donatıların betona aderansının ise üretim aşamasında donatı etrafına sarılan iplik ile oluşturulan nervürleme ve/veya donatı etrafına epoksili kum kaplama ile sağlandığını, ayrıca GFRP ile beton arasındaki aderansın nervürleme ve kumlamanın niteliğine bağlı olarak değiştiğini belirtmektedir. Nervürlü ve kumlu yüzeye sahip cam elyaf takviyeli polimer donatıların betona aderansına; sıcaklığın, donatı çapının, donatı yüzey özelliğinin, beton dayanımı parametrelerinin etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre nervürlü GFRP donatılarda çap arttıkça ve beton dayanımı yükseldikçe GFRP-beton aderansının iyileştiğini, kumlu GFRP donatılarda ise çap yükseldikçe aderansın azaldığını, beton dayanımı yükseldikçe aderansın arttığını tespit etmiştir.

Aybar vd. (2023), çalışmalarında çekme testinin GFRP donatıların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynadığını ifade etmişlerdir. Çelik donatıların çekme testlerine kıyasla GFRP donatıların çekme testlerinin daha çok sayıda numune ve özel ekipmanlar gerektirdiğini belirtmişler, pratik ve ekonomik bir çözüm olarak çelik donatılar için kullanılan mevcut deney ekipmanlarının kullanıldığı yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu önerme ile birlikte GFRP çubukların betonarme yapılarda kullanımının yaygınlaşmasını, verimliliği artırmayı ve inşaat uygulamalarının ilerlemesine katkıda bulunmayı hedeflemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda çelik donatılar için uygulanan çekme testinin GFRP donatılar için de etkin olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

3. KİMYASAL ANKRAJLAR

Betonda ankraj uygulaması taze ve sertleşmiş betona yapılan ankrajlar olmak üzere iki şekilde görülür (ACI 318, 2019). Taze betona yapılan ankrajlar; beton prizini almamış haldeyken donatı ile betonun birlikte çalışmasını sağlamak amacı ile yapılan ankraj uygulamalarıdır. Sertleşmiş betona yapılan ankraj uygulamaları ise mevcut taşıyıcı sisteme tasarım gereksinimlerinden dolayı yeni betonarme elemanların eklenmesi amacıyla yapılır. Bu tür ankraj uygulamaları betona açılan ankraj deliklerine yerleştirilen ankraj çubuklarının mekanik ve kimyasal yöntemlerle yükü betona aktarması şeklinde çalışır. Sertleşmiş betona yapılan ankrajlar; mekanik ve bağ tipi ankrajlar olmak üzere iki kısımda incelenir (Özkul vd., 2001). Öngermeli ve genişler ankrajlar mekanik ankrajlar grubunda yer alırken kimyasal bağlı ve harçlı ankrajlar bağ tipi ankrajlar sınıfında yer almaktadır. Şekil 3.1’de sertleşmiş betona yapılan ankraj çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sertleşmiş Betona Yapılan Ankraj Uygulamaları

Kaynak: (Çalışkan Değirmenci vd., 2015)

Harçlı ankrajlar; ankraj deliğine ankraj elemanı yerleştirilip deliğin çimento esaslı harç ile doldurulması sonucu ankraj elemanını sabitlemeye yarayan ankraj yöntemidir. Yük aktarma prensibi kimyasal ankrajdakine benzer bir şekilde ankraj donatısının harç sertleştikten sonra yükü betona aktarması sonucu gerçekleşir (Ceroni vd., 2020).

Kimyasal ankraj; ankraj elemanlarını sabitlemek amacı ile beton üzerinde bir delik açılıp, epoksi, polyester, vinilester reçineler gibi özel yapıştırıcıların açılan ankraj deliğinin içine doldurulup ankraj elemanının ankraj deliğine yerleştirilmesi şeklinde uygulanan ankraj sistemidir. Çalışma prensibi ankraj için belirlenen donatı çubuğunun maruz kaldığı yükleri yapıştırıcı ve doldurulan beton deliğin yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvvetinin karşılaması şeklindedir. Polimer teknolojisindeki gelişmeler ışığında daha yüksek performanslı

yapıştırıcıların üretilmesi ile birlikte onarım ve güçlendirme işlemlerinde kimyasal ankraj uygulamaları yaygın bir kullanıma ulaşmıştır (Seyhan, 2006). Epoksi ile çelik ve beton arasındaki kimyasal bağlanma ve sürtünme kuvvetleri kimyasal ankrajlarda aderansın oluşmasını sağlayan faktörlerdir (Gürbüz, 2007).

Son yıllarda yapılan araştırmalar ve gelişen teknoloji ile birlikte kimyasal ankrajlarda kullanılan malzeme çeşitliliği de artmıştır. Çelik donatılara alternatif olarak yüksek çekme dayanımı, korozyona karşı dayanıklı olmaları ve çelik donatılara göre daha hafif malzeme olmaları gibi avantajlarından dolayı FRP donatılar önemli bir alternatif haline gelmiştir (Arslan, 2020). FRP donatılar genellikle organik bir reçine olan matris ve bu matrise gömülü lifler olmak üzere iki bileşene sahip kompozit malzemelerdir. Aramid (AFRP), bazalt (BFRP), karbon (CFRP) ve cam fiber takviyeli (GFRP) polimerler şeklinde çeşitleri bulunmaktadır. Dört çeşit FRP çubuk çeşidi Şekil 3.2’de ve bu çubukların tipik çekme özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2. FRP Çubuk Çeşitleri

Kaynak: (Ahmed vd., 2020)

Aramid lif takviyeli polimerler (AFRP) 1960’ların başında endüstriyel olarak bilim mühendislik ve uygulama araştırmalarının konusu olmaya başlamıştır. Aramid lifleri, düşük yoğunluk, yüksek uzama ve yüksek mukavemet kombinasyonuna sahiptir. Bu kombinasyon aramidlerin darbeye dayanıklı bir lif türü olmasını sağlamaktadır. Öte yandan, aramidin basınç dayanımının zayıf olması ve neme karşı cam ve karbon liflere göre daha duyarlı olması dezavantajlarıdır (Chinaka vd., 2019).

Tablo 3.1. Takviye Çubuklarının Tipik Çekme Özellikleri

	Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
Nominal akma dayanımı (MPa)	279 - 517	-----	-----	-----
Çekme dayanımı (MPa)	483 - 1600	483 - 690	600 - 3690	1720 - 2540
Elastisite Modülü (GPa)	200.0	35.0 – 51.0	120.0 – 580.0	41.0 – 125.0
Akma uzaması (%)	0.14 – 0.25	-----	-----	-----
Kopma uzaması (%)	6.0 - 12.0	1.2 – 3.1	0.5 – 1.7	1.9 – 4.4

Kaynak: (ACI 440.1R-15)

Bazalt lif takviyeli polimerler (BFRP) yaklaşık 1400°C sıcaklıkta eritilen doğal volkanik bazalt kayaları kullanılarak üretilmektedir. BFRP donatılar genellikle bazalt elyafların donatı şeklinde ve reçine içeren bir kalıptan çekilerek üretilir. BFRP'lerin çekme mukavemeti ve sertliği elyaf hacmi arttıkça artar (Mohamed vd., 2021). BFRP'ler doğal bir malzeme olan bazalt lifleri ile oluşturulduğundan çevre dostu bir malzeme olarak akademik ve endüstriyel çalışmalarda giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bazalt lifinin yüksek çekme dayanımı sunması, toksik olmaması ve yanmaması BFRP'lerin kimyasal ankrajlarda önemli bir alternatif olmasını sağlamaktadır (Lu vd., 2020). BFRP'ler karbon lif takviyeli polimerlere göre daha ucuz ve cam fiber takviyeli polimerlere göre daha sürdürülebilir bir alternatif olarak yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra yüksek sıcaklık ve alkali, tuzlu ortamlarda da avantajlar sunmaktadır (Selcuk vd., 2023).

Karbon lif takviyeli polimerlerin (CFRP) çekme dayanımları yüksektir ve taşıdığı yüke oranla kesit olarak daha az yer kaplarlar. CFRP donatıların hafif, manyetik olmama ve korozyona karşı dayanıklı olma özellikleri betonarme yapıların rijitliğini ve sürekliliğini korumada fayda sağlamaktadır (Akbaş, 2018). Karbon lif takviyeli polimer donatılar akma davranışı göstermemektedir. Kopma dayanımına geldiğinde ani kırılma davranışı gösterirler. CFRP'lerin ani kırılma davranışı geleneksel çelik donatılara göre dezavantajı olarak değerlendirilebilir (Ghafoori, 2021). CFRP'lerin gerçek dayanımı ile teorik hesaplamalar arasında hala büyük farklar mevcuttur. Bu temel sorunun çözümü için en önemli faktör uygun ara yüzey optimizasyonu olarak belirtilmiştir. Ara yüzey, matris ve lif arasındaki yük transferini ve yayılımını doğrudan etkiler ve kompozitlerin mukavemetini belirler (Anand ve Patra, 2017). Karbon fiberler düzensiz bir iç yapıya ve düşük yüzey enerjisine sahiptir. Dolayısıyla karbon

fiberlerin reçine ile arasındaki ara yüzey performansı zayıftır. Bu durum CFRP'nin kullanım alanlarını önemli ölçüde kısıtlamaktadır (Brinksmeier vd., 2011).

Cam fiber takviyeli polimerler (GFRP) yüksek mukavemet ve düşük özgül ağırlık özellikleri ile geleneksel malzemelerin yerini giderek daha fazla almaktadır. Özelleştirilmiş mukavemet özellikleri ve çeşitli kombinasyonlarda üretilebilir olmaları, ayrıca yüksek yorulma direnci, yüksek sıcaklıkta aşınma ve oksidasyon direnci gibi yetenekleri, bu malzemeleri mühendislik uygulamalarında iyi bir seçenek haline getirmektedir (Karataş ve Gökkaya, 2018). GFRP'ler korozyon riskinin yüksek olduğu köprü, tünel ve deniz yapılarında, toprak ve su ile temasın yoğun olduğu istinat yapılarında, kimyasal maddelere yoğun şekilde maruz kalan endüstriyel yapılarda, onarım ve güçlendirme elemanı olarak betonarme yapılarda kullanılabilir (Toplu vd., 2023). Lif takviyeli polimerlerin betonun içinde donatı olarak kullanılmasındaki en kritik sorunlardan biri de aderans dayanımıdır. GFRP donatı çapı arttıkça aderans dayanımının arttığı, betonun basınç dayanımındaki artışın da aderans dayanımını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Ayrıca sıcaklık artışının GFRP donatı ile beton arasındaki aderansı olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir (Algın vd., 2019). Cam lif takviyeli polimerler kesme kuvvetlerini karşılamak amacı ile etriye olarak da kullanılabilir. Betonarme kirişlerde etriye olarak kullanımı üzerine yapılan deneysel çalışmada GFRP etriyelerin kesme dayanımı takviyesinde etkili bir fayda sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca nervürlü-kumlu yüzey özelliklere sahip GFRP donatı kullanılarak elde edilen etriyeli kirişlerin, kumlanmamış GFRP nervürlü kirişlere kıyasla beton ile daha iyi bir aderans sağladığı ve kesme dayanımında %10 civarında ilave iyileşme sağladığı tespit edilmiştir (Kadı, 2019).

FRP donatıların mühendislik hizmetlerindeki kullanım amacı geleneksel inşaat malzemelerine göre daha yüksek performans elde ederek yapının ömrünün uzamasını sağlamaktır. Lif takviyeli polimer donatıların;

- Korozyona karşı dayanıklı olmaları,
- Düşük elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olmaları,
- Yüksek çekme mukavemeti performansları,
- Hafif bir malzeme olmaları gibi özellikleri bu donatıları kimyasal ankrajlarda çelik donatı yerine önemli bir alternatif haline getirmektedir (Yavuz, 2011).

Lif takviyeli polimer donatıların çelik donatılara göre dezavantajları ise;

- Çekme gerilmesi altında kopmadan önce akma yapmaması,
- Düşük elastisite modülü,

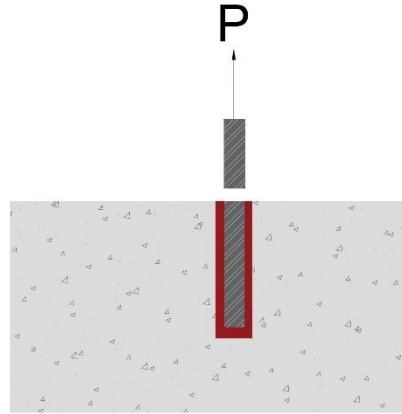
- Dayanımlarının lif doğrultusuna göre değişim göstermesi,
- Yüksek maliyet,
- Geri dönüşüm problemleri olarak öne çıkmaktadır (Özşahin vd., 2015).

3.1 Eksenel Çekme Yüğü Etkisinde Kimyasal Ankrajların Göçme Şekilleri

Kimyasal ankrajlarda beton sınıfı ve kalitesine, kimyasal yapıştırıcının niteliklerine, ankraj donatısının dayanımına ve ankrajların ekilme geometrisine bağlı olarak beş farklı göçme tipi gözlenmektedir.

3.1.1 Ankraj Donatısının Akması, Kopması

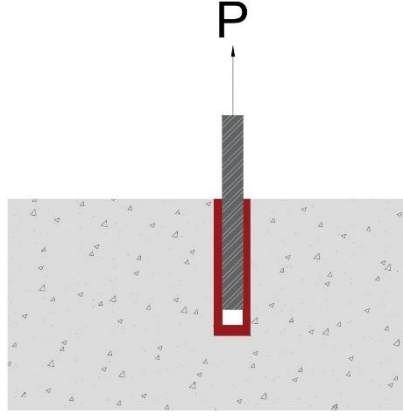
Bu göçme türü beton dayanımı yüksek ve kimyasal yapıştırıcı kalitesi iyi olan derin ankrajlarda görülmektedir. Ankraj çubuğunun akması tasarımcı tarafından istenilen davranıştır. Ankraj çubuğunun kopması ise ankrajın taşıyabileceği maksimum yüğe karşılık geldiğini gösterir. Bu göçme tiplerinde ankrajlar oldukça sünek davranış göstermektedir (Gürbüz, 2007). Şekil 3.3'te ankraj donatısının kopması göçme tipine örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Ankraj Donatısının Kopması

3.1.2 Ankraj Donatısının Sıyrılması

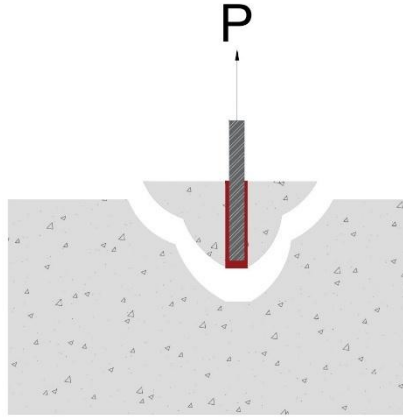
Kimyasal ankrajların yapışma dayanımının sona ermesi ile birlikte donatının sıyrılması sonucu ortaya çıkan göçme tipidir. Bu göçme tipinin sebepleri arasında yapışma dayanımı düşük olan kimyasal yapıştırıcılar, yetersiz miktarda kimyasal yapıştırıcı kullanımı veya ankraj deliğinin yeterince temiz olmaması gösterilebilir (Cook vd., 1992). Şekil 3.4'te ankraj donatısının sıyrılması göçme tipine örnek verilmiştir.



Şekil 3.4. Ankraj Donatısının Sıyırılması

3.1.3 Betonun Konik Kopması

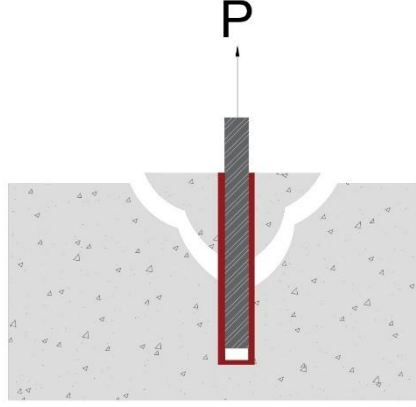
Çekme kuvveti etkisi sonucu betonda oluşan çekme gerilmelerinin betonun çekme dayanımını aşması sonucu ankraj bölgesinde konik kırılmaların görüldüğü göçme tipidir. Betonun konik olarak kopması beton dayanımına bağlıdır. Beton dayanımı azaldıkça koni derinliği artar (Cook vd., 1993). Şekil 3.5'te betonun konik kopması göçme tipine örnek verilmiştir.



Şekil 3.5. Betonun Konik Kopması

3.1.4 Konik Kopma ile Donatı Sıyırılmasının Birlikte Görülmesi

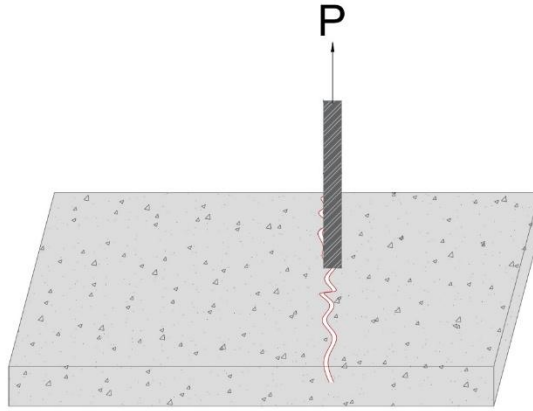
Yeteri kadar derin olmayan ankrajlarda, betonun çekme gerilmelerini karşılayamadığı durumlarda konik kopma biçiminde göçme tipine rastlanmaktadır. Daha derin ankrajlarda ise sıyırılma ve beraberinde konik kopma biçiminde göçme görülmektedir (Cook vd., 1992). Şekil 3.6'da konik kopma ile donatı sıyırılmasının birlikte görülmesi göçme tipine örnek verilmiştir.



Şekil 3.6. Konik Kopma ile Donatı Sıyrılmalarının Birlikte Görülmesi

3.1.5 Betonun Yarılması

Beton derinliğinin yetersiz olduğu, ankrajların birbirlerine ya da serbest kenarlara yakın ekildiği durumlarda; aksenal çekme yüküne maruz kalan betonda oluşan kılcal çatlakların yük arttıkça genişleyerek serbest kenarlara doğru ilerlemesi ve betonda yarılmalar oluşması sonucu oluşan göçme tipidir (Kaya, 2007). Şekil 3.7’de betonun yarılması göçme tipine örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Betonun Yarılması

3.2 ACI 318’e Göre Ankraj Çekme Kapasitesinin Belirlenmesi

Ankraj sisteminin maruz kaldığı çekme yüklerini karşılayabilmek için gereken dayanım belirlenirken ankraj çekme kapasitelerinin analitik olarak belirlenmesi önemli bir kılavuz görevi görmektedir. Çekme dayanımlarını analitik olarak belirleyebilmek için ACI 318 (2019) standardı kullanılabilir. ACI 318’de ankrajların çekme kuvvetleri karşısındaki dayanımlarını elde etmek için üç farklı kapasite hesabı verilmiştir. Bunlar donatı, beton kopma ve sıyrılmaya kapasiteleridir.

Ankraj kapasitesini; ankraj elemanlarının kapasitesi en küçük olan belirlemektedir. Bu kapasite değeri işçilik kalitesi ve ortam koşullarına bağlı olan ve ACI 318'de verilen azaltma katsayıları ile çarpılarak ankraj tasarım dayanımı elde edilmektedir (Ağdağ, 2019).

3.2.1. Donatı Dayanım Kapasitesi

Ankrajların donatı dayanımı ACI 318 (2019)'da verilen Denklem 3.1 kullanılarak belirlenir.

$$N_{sa} = A_{se,N} * f_{uta} \quad (3.1)$$

N: Ankraj sayısı, f_{uta} : Ankraj donatısının öngörülen çekme dayanımıdır. 861.85 MPa veya $1.9f_{ya}$ 'dan küçük olan değer, f_{ya} : Ankraj donatısının akma dayanımıdır. A_{se} : Ankraj donatısının kesit alanıdır. Denklem (3.2) ile hesaplanır.

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0,9743}{n_t} \right)^2 \quad (3.2)$$

d_a : Donatı çapı, n_t : 1 inç uzunluğundaki nervür sayısıdır.

3.2.2 Beton Kopma Dayanımı Kapasitesi

Ankrajlarda betonun konik kopması durumunda ACI 318 (2019)'da verilen tekil ankrajlar için Denklem 3.3 kullanılır.

Tekil ankrajlar için:

$$N_{cb} = (A_{Nc}/A_{Nco}) * \Psi_{ed,N} * \Psi_{c,N} * \Psi_{cp,N} * N_b \quad (3.3)$$

$\Psi_{ed,N}$: Kenar mesafesi düzeltme faktörüdür. Denklem 3.4 veya Denklem 3.5 ile belirlenir.

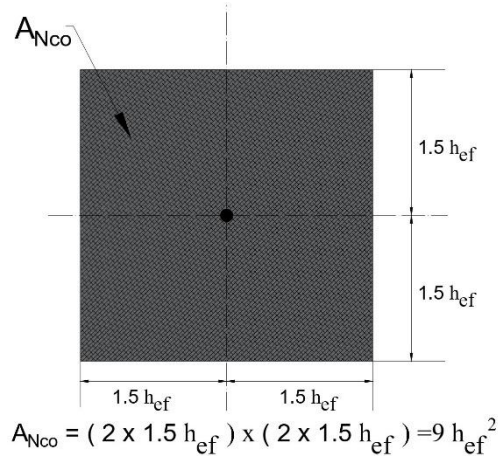
$$c_{a,min} \geq 1.5 * h_{ef} \Rightarrow \Psi_{ed,N} = 1 \quad (3.4)$$

$$c_{a,min} \leq 1.5 * h_{ef} \Rightarrow \Psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 * ((c_{a,min}/(1.5 * h_{ef})) \quad (3.5)$$

$\Psi_{c,N}$: Betonun çatlaklı olmasına bağlı düzeltme faktörü, $\Psi_{cp,N}$: İlave donatı etkilerine bağlı düzeltme faktörü, A_{Nco} : Kenar etkilerinin olmadığı varsayılan referans kopma alanıdır. (Denklem 3.6) (Şekil 3.8). A_{Nc} : Betonda etkili kopma alanıdır.

N_{cb} : Beton göçme kapasitesidir. N_b : Çatlak betonda tek bir ankrajın gerilim altında temel beton kopma dayanımıdır. Denklem 3.7 ile hesaplanacaktır. h_{ef} : Ankrajın etkin gömülme derinliğidir. Birbirine $3 h_{ef}$ 'den daha yakın mesafede ekilen ankrajların grup olarak çalıştığı kabul edilmektedir.

$$A_{Nco} = 9 * h_{ef}^2 \quad (3.6)$$



Şekil 3.8. Tekil Ankraj İçin Maksimum Göçme Alanı

Beton göçme kapasitesi denklemi kırılma mekaniği göz önünde bulundurularak, betonun yaklaşık 35° açıyla koştığı varsayılarak türetilmiştir.

$$N_b = k_c * \lambda a * \sqrt{f_c'} * h_{ef}^{1.5} \quad (3.7)$$

k_c : Yerinde dökme ankrajlar için 24, kimyasal ankrajlar için 17 olarak alınır. f_c' : Betonun basınç dayanımı, $\Psi_{c,N}$: Yerinde dökme beton için 1.25, kimyasal ankrajlarda 1.4 alınır. $c_{a,min}$: Ankrajın kenara en yakın olan mesafesi, $c_{a,c}$: Ankrajın kritik kenar mesafesi, $\Psi_{cp,N}$: Betona sonradan ekilen ankrajlarda Denklem 3.8 veya Denklem 3.9'a göre hesaplanır.

$$c_{a,min} \geq c_{a,c} \Rightarrow \Psi_{cp,N} = 1 \quad (3.8)$$

$$c_{a,min} \leq c_{a,c} \Rightarrow \Psi_{cp,N} \geq 1.5 * h_{ef} \quad (3.9)$$

3.2.3 Sıyırılma Dayanımı Kapasitesi

Ankraj derinliğinin düşük olduğunda veya beton dayanımı düşük olduğunda ankraj donatısının betondan sıyırılması sonucunda önem kazanan tasarım değeridir. Sıyırılma kapasitesi ACI 318 (2019)'da Denklem 3.10 ile hesaplanmaktadır.

$$N_p = 0,9 * f_c' * e_h * d_0 \quad (3.10)$$

N_p : Esas sıyırılma kapasitesi, N_{pn} : Nominal sıyırılma kapasitesidir. Denklem 3.11 ile hesaplanır.

f_c' : Beton basınç dayanımı, d_0 : Ankraj donatı çapı, e_h : Ankraj donatısının şekline göre değişen katsayıdır.

$$N_{pn} = \Psi_{c,p} * N_p \quad (3.11)$$

Hesaplanan donatı, beton koni ve sıyrılma dayanım kapasitelerinden küçük olan değer dayanım kapasitesi olarak ele alınır. Tasarım dayanımı ise dayanım azaltma katsayısı ile dayanım kapasitesi değerinin çarpılması sonucu elde edilir. Dayanım azaltma katsayısı ankraj betonunun donatılı/donatısız olmasına, ortam koşullarına ve işçilik kalitesine göre belirlenmektedir. Dayanım azaltma katsayısının ACI 318 (2019)'a göre nasıl belirleneceği Tablo 3.2'de belirtilmiştir.

Tablo 3.2. Ankraj Dayanım Azaltma Katsayıları

Göçme Şekli	Diğer Parametreler	Etkin	Dayanım Azaltma Katsayısı	
			ACI 318, 9.2'ye göre yükleme	ACI 318, EK-C'ye göre yükleme
Çelik Hasarı	Sünek Çelik		0.75	0.80
	Gevrek Çelik		0.65	0.70
Sıyrılma Hasarı Konik	(DURUM A) Donatılı Beton	C1	0.75	0.85
		C2	0.65	0.75
		C3	0.55	0.65
Kopma Beton Hasarı	(DURUM B) Donatısız Beton	C1	0.65	0.75
		C2	0.55	0.65
		C3	0.45	0.55
C1: işçilik kalitesi ve ortam koşullarından az etkilenen, güvenilirliği yüksek				
C2: işçilik kalitesi ve ortam koşullarından orta derecede etkilenen, güvenilirliği orta				
C3: işçilik kalitesi ve ortam koşullarından çok etkilenen, güvenilirliği düşük				

Kaynak: (ACI 318, 2019)

4. MALZEMELER ve METOT

Bu çalışmada nervürlü ve GFRP donatıların farklı parametrelerde kimyasal ankraj olarak kullanımı araştırılmıştır. Çalışmada değişken olarak donatı cinsi, ankraj çubuk çapı, ekme derinliği, kenar mesafesi ve ankrajların ekileceği delik çapı değişken olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan parametreler ve kısaltmalar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Çalışmada Kullanılan Parametreler

Beton basınç dayanımı türü	Donatı cinsi	D- Donatı çapı (mm)	L- Ankraj derinliği (xD)	H- Delik çapı boyutu (+D)	K- Kenar mesafesi (xD)
Normal Dayanımlı (25.4 MPa)	N- Nervürlü	12	10 15	2	10 15
	G- GFRP	16	20	4	20 25
1 Farklı	2 Farklı	2 Farklı	3 Farklı	2 Farklı	4 Farklı
Toplam: 96 farklı test					

12 ve 16 mm çaplara sahip nervürlü ve GFRP donatılar, çapların 10, 15 ve 20 katı derinliklere, çapların 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerine, çap +2 ve çap +4 mm olacak şekilde 25.4 MPa beton dayanımına sahip donatısız beton bloklara ekilmişlerdir.

4.1 Malzeme

Çalışma, 12 ve 16 mm çaplarında nervürlü çelik ve cam elyaf takviyeli polimer donatı, iki bileşenli kimyasal yapıştırıcı (epoksi) ve donatısız betonu içermektedir.

4.1.1 Nervürlü Donatı

Çalışmada 12 ve 16 mm çaplarında, B420C sınıfında, TS 708 (2016) Standardına uygun nervürlü çelik çubuklar kullanılmıştır. Kullanılan nervürlü çelik çubuklara çekme testi uygulanmıştır (Şekil 4.1). Çubukların mekanik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çekme Testi Uygulaması

Tablo 4.2. 12 ve 16 mm Çaplı Nervürlü Donatıların Mekanik Özellikleri

TS 708 Standart Sınır Değerler					
		Akma min. (N/mm ²)	Çekme min. (N/mm ²)	Kopma Uzaması (%)	
		420	500	12	
Deney Sonucu Bulunan Değerler					
Çap (mm)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Ortalama Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Ortalama Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Kopma Uzaması (%)
12	493	495	593	594	21
	498		593		20
	494		596		24
16	449	435	556	547	15
	429		542		17
	429		543		16

4.1.2 GFRP Donatı

Çalışmada 12 ve 16 mm çaplarında cam elyaf takviyeli polimer donatılar kullanılmıştır. Kullanılan GFRP donatılara çekme testi uygulanmıştır (Şekil 4.2). Çubukların mekanik özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.2. Çekme testi yapılan GFRP donatılar

Tablo 4.3. 12 ve 16 mm Çaplı GFRP Donatıların Mekanik Özellikleri

ISO 10406-1 ve ASTM D7205						
Çekme Dayanımı (MPa)		Kopma Uzaması (%)		Elastisite Modülü (MPa)		
800		2.0		40000		
Deney Sonucu Bulunan Değerler						
Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Ortalama Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (MPa)	Ortalama Elastisite Modülü (MPa)
12	1015	1013.7	3.08	3.01	50550	50730
	990		2.92		50900	
	1036		3.02		50750	
16	1027	1015.3	3.16	3.13	51350	51420
	1014		3.10		51100	
	1005		3.14		51800	

4.1.3 Beton

Ankrajların ekimi için 4 adet 1500 x 1500 x 500 mm boyutlarında ve 2 adet 1500 x 1500 x 300 mm boyutlarında, yerinde ve tek seferde dökülen, çatlaksız, donatısız hazır beton bloklar kullanılmıştır (Şekil 4.3). 1 m³ betonun ağırlıkça karışım oranları Tablo 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Ankrajların Ekildiği Beton Bloklar

Tablo 4.4. 1 m³ Beton İçin Ağırlıkça Karışım Oranları

Malzeme	Miktar (kg)
0-5 mm taş tozu	1170
5-12 mm kırmataş	350
12-22 mm kırmataş	450
CEM I 42.5 R	220
Su	175

Beton dökümü sırasında alınan küp (150x150x150 mm) numunelere 28. günde TS EN 12390-3'e göre beton basınç deneyi yapılmıştır. 28 günlük üç numuneye yapılan basınç testi sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir. TS 802 (2016)'ya göre C20/25 sınıfına denk gelmektedir.

Tablo 4.5. 28 Günlük Beton Basınç Dayanımları (MPa)

I	II	III	Ortalama
25.1	25.7	25.5	25.4

4.1.4 Kimyasal Yapıştırıcı

Kimyasal ankraj uygulamasında epoksi akrilat reçine bazlı 2 bileşenli, kartuşlu kimyasal dübel kullanılmıştır. Ürünün teknik föyündeki bilgilere göre; basınç dayanımı 120-122 N/mm², eğilme mukavemeti 58-60 N/mm², yoğunluğu ise 1.68-1.70 kg/dm³ olup inşaat demirleri, manşonlar ve takviye çubuklarının sabitlenmesinde kullanılmaktadır.

4.2 Ankrajların Ekilme Geometrisi ve İsimlendirme

Çalışmada kullanılan nervürlü çubuklara ait isimlendirme ve detaylar Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Nervürlü Çelik Donatıların İsim ve Parametreleri

Deney No	Numune Adı	Delik çapı H (mm)	Ankraj çapı D (mm)	Derinlik L (mm)	Kenar mesafesi K (mm)
1	N1	14	12	120	120
2	N2				180
3	N3				240
4	N4				300
5	N5			180	120
6	N6				180
7	N7				240
8	N8				300
9	N9			240	120
10	N10				180
11	N11				240
12	N12				300
13	N13	16	12	120	120
14	N14				180
15	N15				240
16	N16				300
17	N17			180	120
18	N18				180
19	N19				240
20	N20				300
21	N21			240	120
22	N22				180
23	N23				240
24	N24				300
25	N25	18	16	160	160
26	N26				240
27	N27				320
28	N28				400
29	N29			240	160
30	N30				240
31	N31				320
32	N32				400
33	N33			320	160
34	N34				240
35	N35				320
36	N36				400
37	N37	20	16	160	160
38	N38				240
39	N39				320
40	N40				400
41	N41			240	160
42	N42				240
43	N43				320
44	N44				400
45	N45			320	160
46	N46				240
47	N47				320
48	N48				400

Çalışmada kullanılan GFRP çubuklara ait isimlendirme ve detaylar Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7. GFRP Donatıların İsim ve Parametreleri

Deney No	Numune Adı	Delik çapı H (mm)	Ankraj çapı D (mm)	Derinlik L (mm)	Kenar mesafesi K (mm)
49	G1	14	12	120	120
50	G2				180
51	G3				240
52	G4				300
53	G5			180	120
54	G6				180
55	G7				240
56	G8				300
57	G9			240	120
58	G10				180
59	G11				240
60	G12				300
61	G13	16	12	120	120
62	G14				180
63	G15				240
64	G16				300
65	G17			180	120
66	G18				180
67	G19				240
68	G20				300
69	G21			240	120
70	G22				180
71	G23				240
72	G24				300
73	G25	18	16	160	160
74	G26				240
75	G27				320
76	G28				400
77	G29			240	160
78	G30				240
79	G31				320
80	G32				400
81	G33			320	160
82	G34				240
83	G35				320
84	G36				400
85	G37	20	16	160	160
86	G38				240
87	G39				320
88	G40				400
89	G41			240	160
90	G42				240
91	G43				320
92	G44				400
93	G45			320	160
94	G46				240
95	G47				320
96	G48				400

Bu çalışmada ankrajların birbirlerinden etkilenmelerini engellemek amacıyla ASTM E488-84 Standardında (Tablo 4.8) verilen iki ankraj arası uzaklık değerleri göz önünde bulundurulmuş olup kenar mesafesi çalışmada değişken olarak seçildiği için bu değerler dikkate alınmamıştır.

Tablo 4.8. Ankraj Ekme Aralıkları ve Kenar Uzunlukları

Ekme boyu (l_d)	Kimyasal Ankrajlar	
	İki ankraj arası uzaklık	Kenara ve yükleme çerçevesine olan
$<6d_0$ (sığ)	$2 l_d$	$1 l_d$
$6d_0 - 8d_0$ (standart)	$1,5 l_d$	$1 l_d$
$> 8d_0$ (derin)	$1 l_d$	$0,75 l_d$

d_0 : ankraj çapı, l_d : ekme boyu

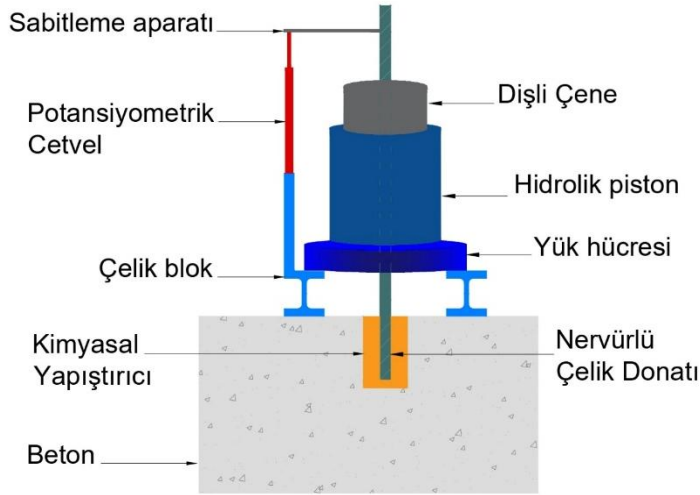
Kaynak: (ASTM E488-84)

4.3 Deney Düzenegi

Nervürlü ve GFRP donatıların aksenal çekme kuvveti etkisinde performanslarını incelemek amacıyla; donatı çapı, ankraj delik çapı, ankrajın kenar mesafesi ve gömme derinliği değişkenleri göz önünde bulundurularak beton bloklara kimyasal yapıştırıcı ile ankraj işlemi yapılmıştır.

4.3.1 Nervürlü Donatılar İçin Hazırlanan Deney Düzenegi

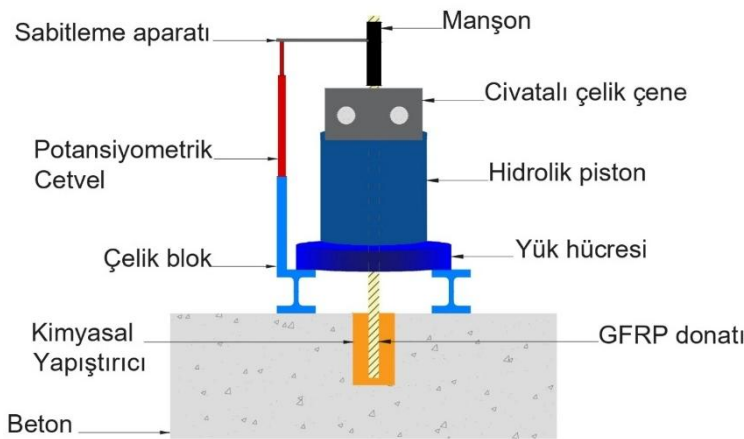
Nervürlü donatılar beton bloklara kimyasal ankraj yöntemiyle ekilip hidrolik piston yardımıyla aksenal çekme testi uygulanmıştır. Nervürlü donatıları tutabilmek için dişli çeneler kullanılmıştır. Nervürlü donatılar için hazırlanan deney düzeneginin şematik gösterimi ve görseli Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Nervürlü Donatılar İçin Deneş Düzeneginin Şematik Gösterimi ve Görseli

4.3.2 GFRP Donatılar İçin Hazırlanan Deneş Düzenegi

GFRP donatılar beton bloklara kimyasal ankraj yöntemiyle ekilip hidrolik piston yardımıyla aksel çekme testi uygulanmıştır. GFRP donatıların ezilmesini engellemek amacıyla donatıların üst uçlarına tutunmayı artırması amacıyla iç tarafı dişli manşonlar epoksi ile sabitlenmiştir. Civatalı çelik çene ile manşon tutularak aksel çekme kuvveti uygulanmıştır. GFRP donatılar için hazırlanan deneş düzeneginin şematik gösterimi ve görseli Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. GFRP Donatılar İçin Deneş Düzeneginin Şematik Gösterimi ve Görseli

Çalışma kapsamında farklı parametrelerde ekilen 48 adet nervürlü ve 48 adet GFRP çubuk Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Çalışma Kapsamında Ekilen Nervürlü ve GFRP Çubuklar

5. DENEY SONUÇLARI

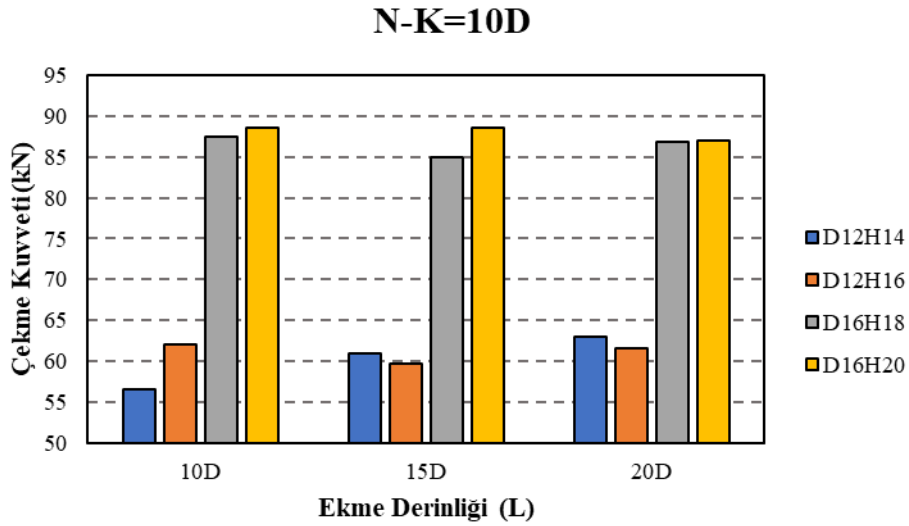
Çalışmada 96 adet ankraj ekilmiş ve eksenel çekme testine tabi tutulmuştur. Değişkenler; donatı cinsi (nervürlü (N) -GFRP (G)), ankraj çapı (D, 12 mm-16 mm), ankraj ekme derinliği (L, çapın 10, 15 ve 20 katı), kenar mesafesi (K, çapın 10, 15, 20 ve 25 katı) ve ankrajların ekildiği delik çapıdır (H, D+2 mm ve D+4 mm). Çekme testi uygulanan 96 adet ankraj çubuğuna ait çekme yükü-zaman grafikleri elde edilmiş ve göçme modları belirlenmiştir.

5.1. Kenar Mesafesinin Çekme Kuvvetine Etkisi

Çalışmada nervürlü ve GFRP çubuklar için çapın 10, 15, 20 ve 25 katı olmak üzere 4 farklı kenar mesafesi seçilmiştir. 12 mm çapa sahip ankraj çubukları için kenar mesafeleri; 120, 180, 240 ve 300 mm; 16 mm çapa sahip olan ankraj çubukları için ise 160, 240, 320 ve 400 mm'dir.

5.1.1. Nervürlü Donatılarda Kenar Mesafesinin Etkisi

Çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerine sahip 48 adet nervürlü çubuğa eksenel çekme kuvveti uygulanmıştır. 12 mm çaplı çubuklar için kenardan 120 (10D) mm ve 16 mm çubuklar için 160 (10D) mm kenar mesafesinde, çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine ekilen nervürlü çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.1'de verilmiştir.

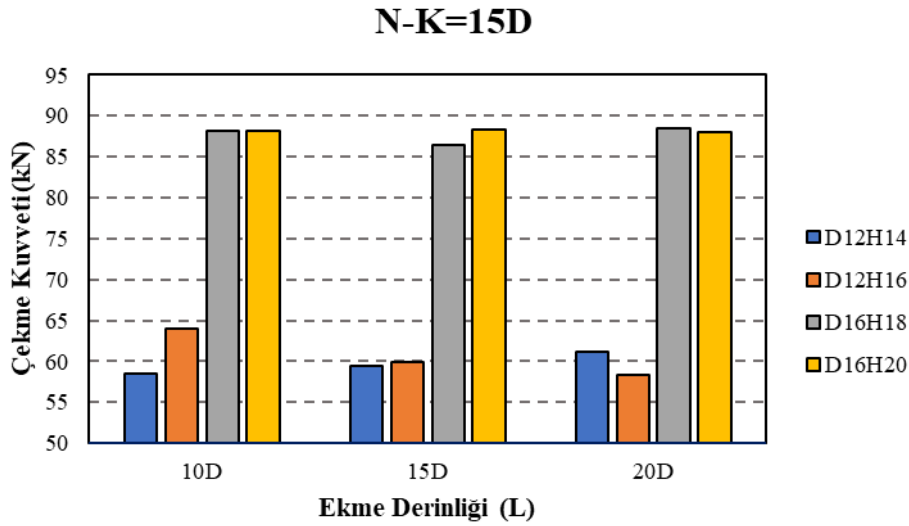


Şekil 5.1. Kenar Mesafesi 10D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

Çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 12 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 56.5 kN ile 62.1 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 60.6 kN'dur. Çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 16 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 84.9 kN ile 88.5 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 87.2

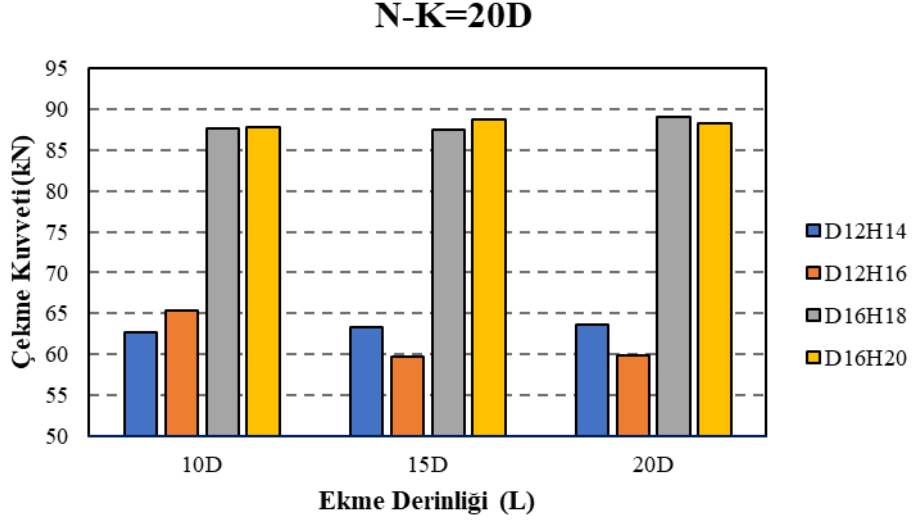
kN'dur. 10D kenar mesafesine ekilen 12 adet nervürlü çubuğun çekme yükü ortalaması 73.9 kN'dur.

12 mm çaplı çubuklar için kenardan 180 (15D) mm ve 16 mm çubuklar için 240 (15D) mm kenar mesafesine, çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine ekilen nervürlü çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.2'de verilmiştir. Buna göre; çapın 15 katı kenar mesafesine ekilen 12 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 58.5 kN ile 64.0 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 60.2 kN'dur. Çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 16 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 86.4 kN ile 88.5 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 87.9 kN'dur. 15D kenar mesafesine ekilen 12 adet nervürlü çubuğun çekme yükü ortalaması 74.1 kN'dur.



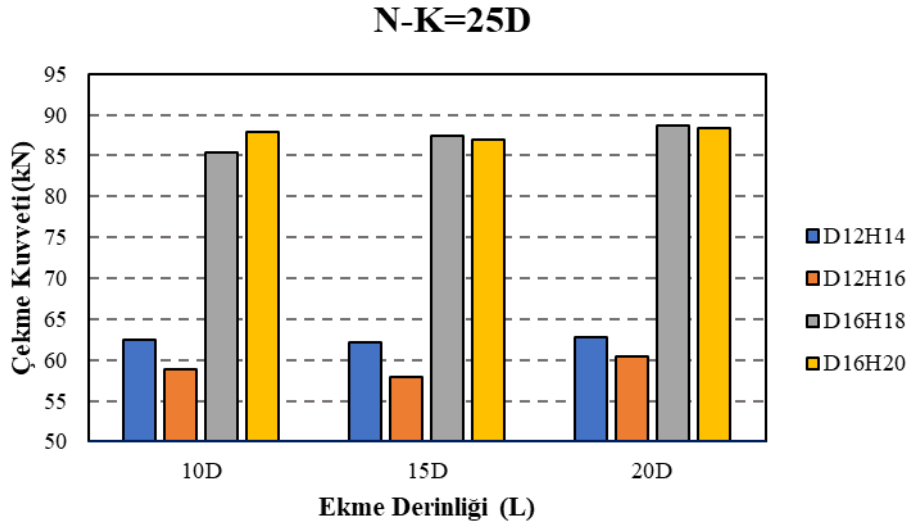
Şekil 5.2. Kenar Mesafesi 15D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

12 mm çaplı çubuklar için kenardan 240 (20D) mm ve 16 mm çubuklar için 320 (20D) mm kenar mesafesine, çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine ekilen nervürlü çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Buna göre; çapın 20 katı kenar mesafesine ekilen 12 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 59.7 kN ile 65.3 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 62.4 kN'dur. Çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 16 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 87.5 kN ile 89.0 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 88.2 kN'dur. 20D kenar mesafesine ekilen 12 adet nervürlü çubuğun çekme yükü ortalaması 75.1 kN'dur.



Şekil 5.3. Kenar Mesafesi 20D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

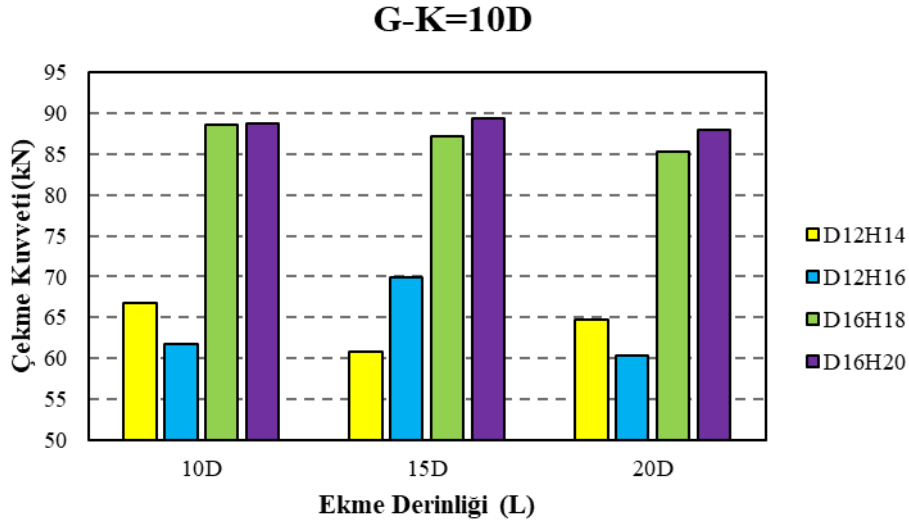
12 mm çaplı çubuklar için kenardan 300 (25D) mm ve 16 mm çubuklar için 400 (25D) mm kenar mesafesine, çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine ekilen nervürlü çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Buna göre; çapın 25 katı kenar mesafesine ekilen 12 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 57.9 kN ile 62.4 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 60.8 kN'dur. Çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 16 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 85.3 kN ile 88.6 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 87.4 kN'dur. 25D kenar mesafesine ekilen 12 adet nervürlü çubuğun ortalama çekme kuvveti 74.1 kN'dur.



Şekil 5.4. Kenar Mesafesi 25D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

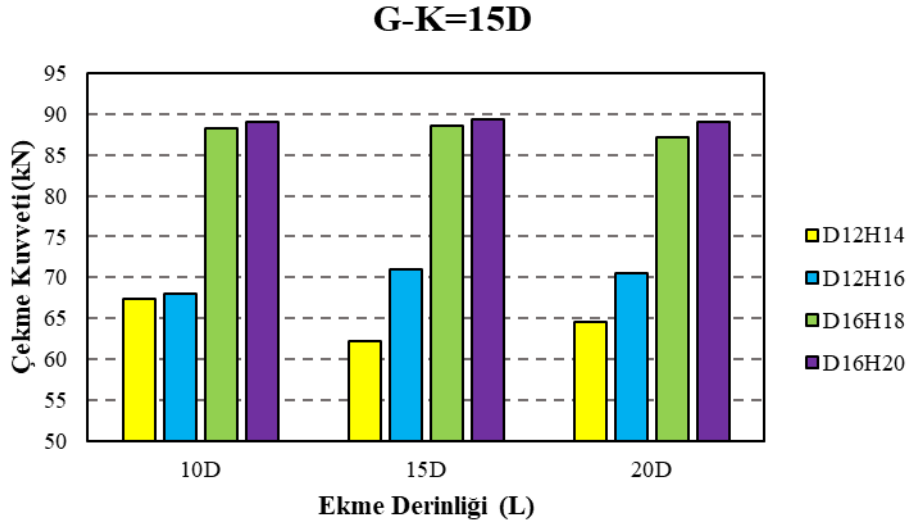
5.1.2. GFRP Donatılarda Kenar Mesafesinin Etkisi

Çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerine sahip 48 adet GFRP çubuğa aksel çekme kuvveti uygulanmıştır. 12 mm çaplı çubuklar için kenardan 120 (10D) mm ve 16 mm çubuklar için 160 (10D) mm kenar mesafesinde, çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine ekilen GFRP çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.5'te verilmiştir. Buna göre; çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 12 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 60.3 kN ile 69.9 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 64.0 kN'dur. Çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 16 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 85.3 kN ile 89.4 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 87.9 kN'dur. 10D kenar mesafesine ekilen 12 adet GFRP çubukların ortalama çekme kuvveti değeri 76.0 kN'dur.



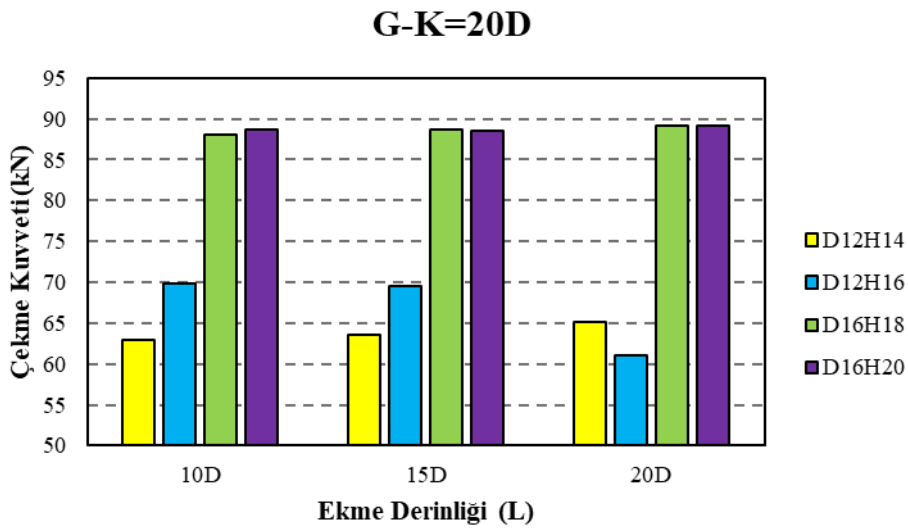
Şekil 5.5. Kenar Mesafesi 10D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

12 mm çaplı çubuklar için kenardan 180 (15D) mm ve 16 mm çubuklar için 240 (15D) mm kenar mesafesinde, çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine ekilen GFRP çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Buna göre; çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 12 mm çaplı GFRP çubuklar için çekme kuvveti değerleri 62.2 kN ile 71.3 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 67.9 kN'dur. Çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 16 mm çaplı GFRP çubuklar için çekme kuvveti değerleri 88.3 kN ile 89.3 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 88.6 kN'dur. 15D kenar mesafesine ekilen 12 adet GFRP çubukların ortalama çekme kuvveti değeri 77.9 kN'dur.



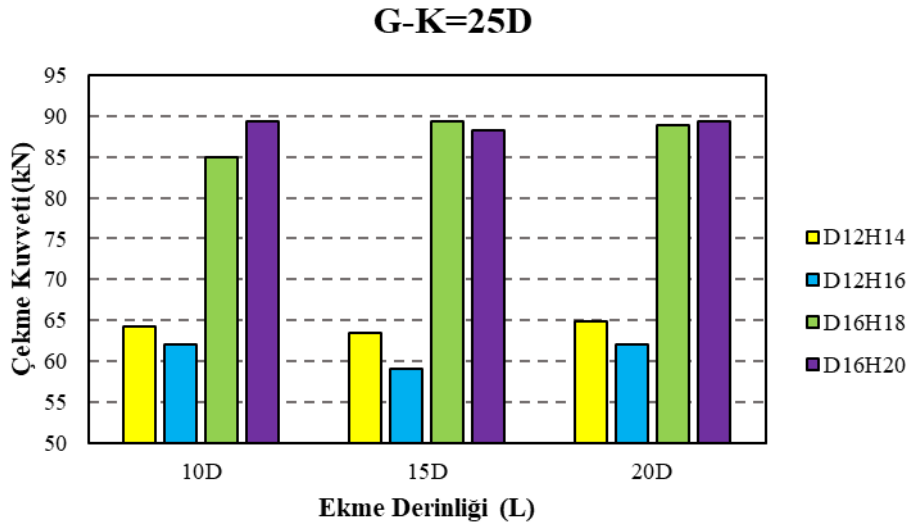
Şekil 5.6. Kenar Mesafesi 15D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

12 mm çaplı çubuklar için kenardan 240 (20D) mm ve 16 mm çubuklar için 320 (20D) mm kenar mesafesinde, çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine ekilen GFRP çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.7’de verilmiştir. Buna göre; çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 12 mm çaplı GFRP çubuklar için çekme kuvveti değerleri 61.0 kN ile 79.7 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 67.0 kN’dur. Çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 16 mm çaplı GFRP çubuklar için çekme kuvveti değerleri 88.0 kN ile 89.1 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 88.7 kN’dur. 20D kenar mesafesine ekilen 12 adet GFRP çubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 77.0 kN’dur.



Şekil 5.7. Kenar Mesafesi 20D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

12 mm çaplı çubuklar için kenardan 300 (25D) mm ve 16 mm çubuklar için 400 (25D) mm kenar mesafesinde, çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine ekilen GFRP çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.8’de verilmiştir. Buna göre; çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 12 mm çaplı GFRP çubuklar için çekme kuvveti değerleri 59.0 kN ile 64.9 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 62.6 kN’dur. Çapın 10 katı kenar mesafesine ekilen 16 mm çaplı GFRP çubuklar için çekme kuvveti değerleri 85.0 kN ile 89.3 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 88.3 kN’dur. 25D kenar mesafesine ekilen 12 adet GFRP çubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 75.5 kN’dur.



Şekil 5.8. Kenar Mesafesi 25D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

5.1.3. Değerlendirme: Kenar Mesafesi

10D kenar mesafesine ekilen 12 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti 60.6 kN, GFRP çubuklarda ise ortalama çekme kuvveti değeri 64.0 kN’dur. Kenar mesafesi 10D için nervürlü ve GFRP çubuklar karşılaştırıldığında GFRP çubukların ortalama %5.7 daha fazla çekme kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir. 10D kenar mesafesine ekilen 16 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti değeri 87.2 kN, GFRP çubuklarda ise 87.9 kN’dur. Kenar mesafesi 10D için GFRP çubukların nervürlü çubuklara göre %0.8 daha fazla çekme kuvveti değerine sahip olduğu görülmektedir.

15D kenar mesafesine ekilen 12 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti 60.2 kN, GFRP çubuklarda ise 67.3 kN’dur. 15D kenar mesafesinde GFRP çubuklar nervürlü çubuklardan %11.8 daha fazla çekme kuvveti değerine ulaşmıştır. 16 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti 87.9 kN, GFRP çubuklarda ise 88.6 kN olup GFRP çubuklar %0.8 daha fazla çekme kuvveti değerine sahiptir.

20D kenar mesafesine ekilen 12 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti 62.4 kN, GFRP çubuklarda ise 65.3 kN'dur. GFRP çubukların çekme kuvveti ortalama %4.6 daha fazla çıkmıştır. 16 mm çaplı nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti değeri 87.8 kN, GFRP çubuklarda ortalama %1 artışla 88.7 kN'dur.

25D kenar mesafesinde ekilen 12 mm çaplı nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti 60.8 kN, GFRP çubuklarda ise 62.6 kN'dur. GFRP çubukların nervürlü çubuklara göre ortalama %3 daha fazla çekme kuvveti değerine sahip olduğu görülmektedir. 16 mm çaplı nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti değeri 87.4 kN, GFRP çubuklarda ise 88.3 kN'dur. GFRP çubuklardaki artış %1'dir.

10D, 15D, 20D ve 25D kenar mesafesinde ekilen nervürlü çubuklarda elde edilen çekme kuvveti değerleri sırasıyla ortalama 73.9 kN, 74.1 kN, 75.1 kN ve 74.1 kN'dur. Kenar mesafesi değişikçe çekme kuvveti %0.3 ile %1.6 arasında değişmiştir. GFRP çubuklarda ise sırasıyla ortalama 76.0 kN, 77.9 kN, 77.0 kN ve 75.5 kN olarak bulunmuştur. Kenar mesafesi değişikçe çekme kuvveti ortalama %0.7 ile %3.2 arasında değişmiştir.

Deney sonuçları hem nervürlü hem de GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankrajlarda kenar mesafesinin 10D seviyesine ulaştıktan sonra artırılmasının çekme kapasitesi üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını göstermiştir.

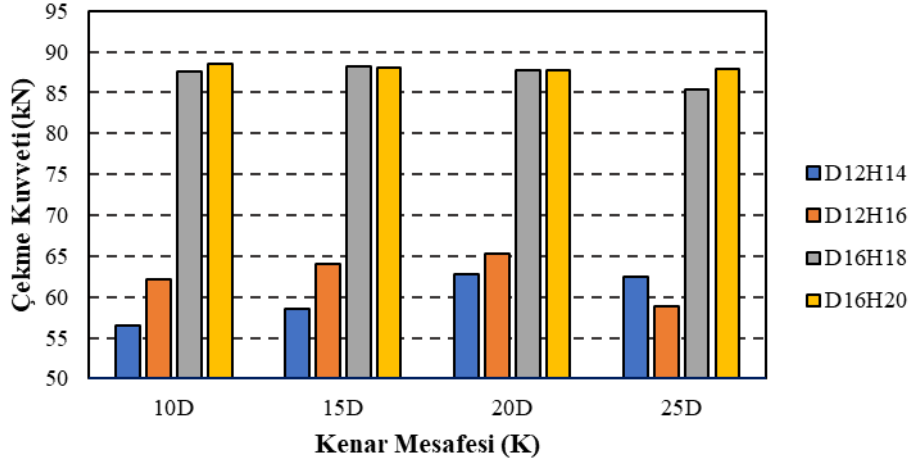
5.2. Ekme Derinliğinin Çekme Kuvvetine Etkisi

Çalışmada nervürlü ve GFRP çubuklar için çapın 10, 15 ve 20 katı olmak üzere 3 farklı ekme derinliği seçilmiştir. 12 mm çapa sahip ankraj çubukları için ekme derinlikleri; 120, 180 ve 240; 16 mm çapa sahip olan ankraj çubukları için ise 160, 240 ve 320 mm'dir.

5.2.1. Nervürlü Donatılarda Ekme Derinliğinin Etkisi

Çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine sahip 48 adet nervürlü çubuğa eksenel çekme kuvveti uygulanmıştır. 12 mm çaplı çubuklar için 120 (10D) mm ve 16 mm çubuklar için 160 (10D) mm ekme derinliklerinde, çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerine ekilen nervürlü çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.9'da verilmiştir. Buna göre; çapın 10 katı ekme derinliğine ekilen 12 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 56.5 kN ile 65.3 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 61.3 kN'dur. Çapın 10 katı ekme derinliğine ekilen 16 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 85.3 kN ile 88.5 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 87.6 kN'dur. 10D ekme derinliğinde ekilen 12 adet nervürlü çubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 74.5 kN'dur.

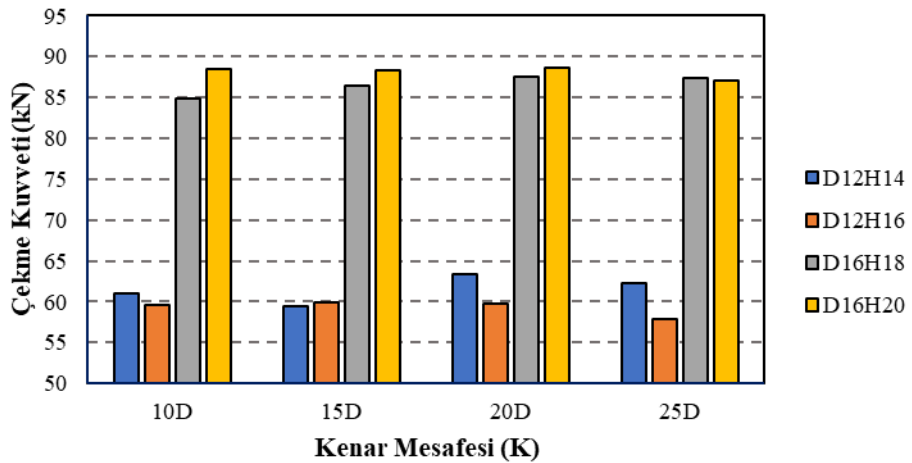
N-L=10D



Şekil 5.9. Ekme Derinliği 10D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

12 mm çaplı çubuklar için 180 (15D) mm ve 16 mm çubuklar için 240 (15D) mm ekme derinliklerinde, çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerine ekilen nervürlü çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.10'da verilmiştir. Buna göre; çapın 15 katı ekme derinliğine ekilen 12 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 57.9 kN ile 63.3 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 60.4 kN'dur. Çapın 15 katı ekme derinliğine ekilen 16 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 84.9 kN ile 88.7 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 87.3 kN'dur. 15D ekme derinliğinde ekilen 12 adet nervürlü çubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 73.9 kN'dur.

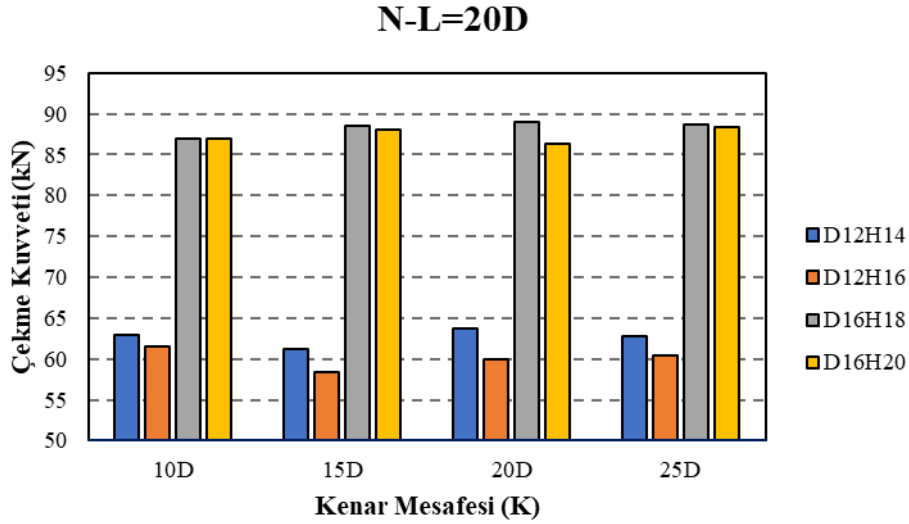
N-L=15D



Şekil 5.10. Ekme Derinliği 15D Olan Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

12 mm çaplı çubuklar için 240 (20D) mm ve 16 mm çubuklar için 320 (20D) mm ekme derinliklerinde, çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerine ekilen nervürlü çubukların çekme

kuvveti değerleri Şekil 5.11’de verilmiştir. Buna göre; çapın 20 katı ekme derinliğine ekilen 12 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 58.4 kN ile 63.7 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 61.4 kN’dur. Çapın 20 katı ekme derinliğine ekilen 16 mm çaplı nervürlü çubuklar için çekme kuvveti değerleri 86.3 kN ile 89.0 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 87.8 kN’dur. 20D ekme derinliğinde ekilen 12 adet nervürlü çubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 74.6 kN’dur.

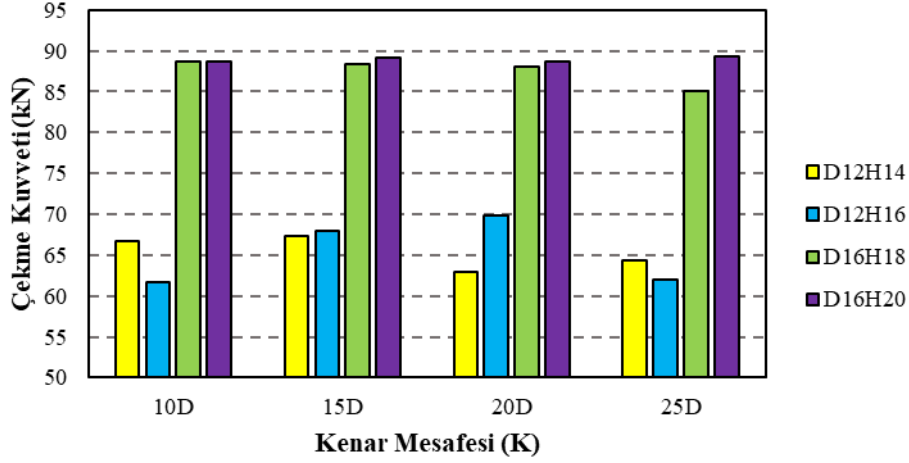


Şekil 5.11. Ekme Derinliği 20D Olan Nervürlü ubukların ekme Kuvveti Değerleri

5.2.2. GFRP Donatılarda Ekme Derinliğinin Etkisi

Çapın 10, 15 ve 20 katı ekme derinliklerine sahip 48 adet GFRP ubuğa eksenel çekme kuvveti uygulanmıştır. 12 mm çaplı çubuklar için 120 (10D) mm ve 16 mm çubuklar için 160 (10D) mm ekme derinliklerinde, çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerine ekilen GFRP ubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.12’de verilmiştir. Buna göre; çapın 10 katı ekme derinliğine ekilen 12 mm çaplı GFRP ubuklar için çekme kuvveti değerleri 61.7 kN ile 69.9 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 65.4 kN’dur. Çapın 10 katı ekme derinliğine ekilen 16 mm çaplı GFRP ubuklar için çekme kuvveti değerleri 85.0 kN ile 89.3 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 88.2 kN’dur. 10D ekme derinliğinde ekilen 12 adet GFRP ubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 76.8 kN’dur.

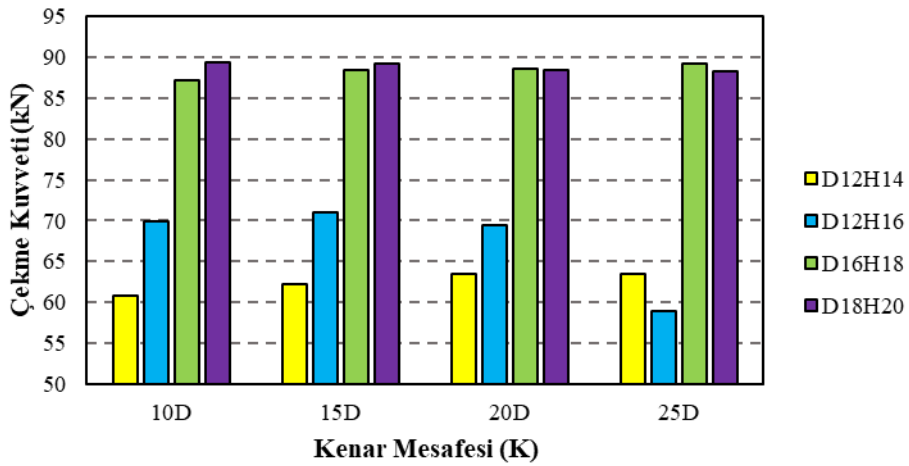
G-L=10D



Şekil 5.12. Ekme Derinliği 10D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

12 mm çaplı çubuklar için 180 (15D) mm ve 16 mm çubuklar için 240 (15D) mm ekme derinliklerinde, çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerine ekilen GFRP çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.13'te verilmiştir. Buna göre; çapın 15 katı ekme derinliğine ekilen 12 mm çaplı GFRP çubuklar için çekme kuvveti değerleri 59.0 kN ile 71.0 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 64.9 kN'dur. Çapın 15 katı ekme derinliğine ekilen 16 mm çaplı GFRP çubuklar için çekme kuvveti değerleri 87.2 kN ile 89.4 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 88.6 kN'dur. 15D ekme derinliğinde ekilen 12 adet GFRP çubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 76.8 kN'dur.

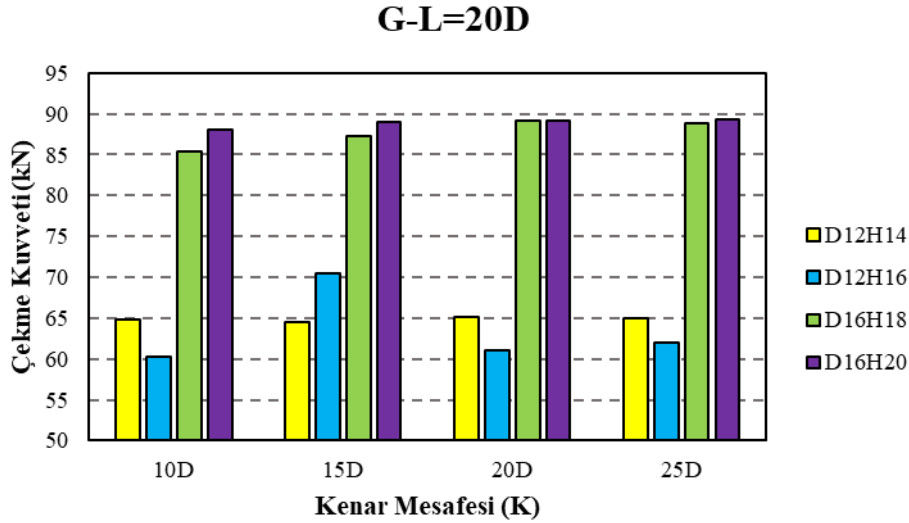
G-L=15D



Şekil 5.13. Ekme Derinliği 15D Olan GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

12 mm çaplı çubuklar için 240 (20D) mm ve 16 mm çubuklar için 320 (20D) mm ekme derinliklerinde, çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerine ekilen GFRP çubukların çekme

kuvveti değerleri Şekil 5.14'te verilmiştir. Buna göre; çapın 20 katı ekme derinliğine ekilen 12 mm çaplı GFRP ubuklar için çekme kuvveti değerleri 60.3 kN ile 70.5 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 64.1 kN'dur. Çapın 20 katı ekme derinliğine ekilen 16 mm çaplı GFRP ubuklar için çekme kuvveti değerleri 85.3 kN ile 89.3 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 88.2 kN'dur. 20D ekme derinliğinde ekilen 12 adet GFRP ubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 76.2 kN'dur.



Şekil 5.14. Ekme Derinliği 20D Olan GFRP ubukların ekme Kuvveti Değerleri

5.2.3. Değerlendirme: Ekme Derinliği

10D ekme derinliğinde ekilen 12 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti 61.3 kN, GFRP çubuklarda ise ortalama çekme kuvveti değeri 65.4 kN'dur. Ekme derinliği 10D için nervürlü ve GFRP ubuklar karşılaştırıldığında GFRP ubukların ortalama %6.7 daha fazla çekme kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir. 10D ekme derinliğinde ekilen 16 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti değeri 87.6 kN, GFRP çubuklarda ise 88.2 kN'dur. Ekme derinliği 10D için GFRP ubukların nervürlü çubuklara göre %0.6 daha fazla çekme kuvveti değerine sahip olduğu görülmektedir.

15D ekme derinliğinde ekilen 12 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti 60.4 kN, GFRP çubuklarda ise 64.9 kN'dur. 15D ekme derinliğinde GFRP ubuklar nervürlü çubuklardan %7.5 daha fazla çekme kuvveti değerine ulaşmıştır. 16 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti 87.3 kN, GFRP çubuklarda ise 88.6 kN olup GFRP ubuklar %1.5 daha fazla çekme kuvveti değerine sahiptir.

20D ekme derinliğine ekilen 12 mm çapa sahip nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti 61.4 kN, GFRP çubuklarda ise 64.1 kN'dur. GFRP ubukların çekme kuvveti ortalama

%4.4 daha fazla çıkmıştır. 16 mm çaplı nervürlü çubuklarda ortalama çekme kuvveti değeri 87.8 kN, GFRP çubuklarda ortalama %0.5 artışla 88.2 kN'dur.

10D, 15D ve 20D ekme derinliklerinde ekilen nervürlü çubuklarda elde edilen çekme kuvveti değerleri sırasıyla ortalama 74.5 kN, 73.9 kN ve 74.6 kN'dur. Ekme derinliği değıştikçe çekme kuvveti %0.8 ile %0.9 arasında değışmiştir. GFRP çubuklarda ise sırasıyla ortalama 76.7 kN, 76.8 kN ve 76.2 kN olarak bulunmuştur. Kenar mesafesi değıştikçe çekme kuvveti ortalama %0.6 ile %0.8 arasında değışmiştir.

Nervürlü ve GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankraj deneyleri birlikte değerlendirildiğinde, her iki çubuk türünde de ekme derinliğinin 10D'den 20D'ye artırılmasının çekme kapasitesi üzerinde belirgin ve sistematik bir artış oluşturmadığı görülmüştür. Ortalama çekme kuvvetleri hem nervürlü hem de GFRP çubuklar için dar bir aralıkta değışmiş, ekme derinliği artışıyla birlikte anlamlı bir kapasite kazanımı sağlanmamıştır.

Bununla birlikte, iki çubuk türü arasında davranış biçimi açısından belirgin farklar bulunmaktadır. Nervürlü çubuklar sünek karakterleri nedeniyle yük altında akma davranışına yaklaşan veya sınırlı plastik deformasyonlar gösterebilmekte, bu durum sistemin daha kontrollü bir göçme davranışı sergilemesini sağlamaktadır. Buna karşılık, GFRP çubuklar akma davranışı göstermeyen, lineer-elastik ve gevrek bir malzeme yapısına sahip olup, kapasiteye ulaşıldığında ani göçme potansiyeli taşımaktadır.

Sonuç olarak, ekme derinliği artışına verilen kapasite tepkisi açısından nervürlü ve GFRP çubuklar benzer bir eğilim sergilemiş olsa da malzeme davranışı ve göçme mekanizmaları bakımından iki sistem arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu nedenle, GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankrajların tasarımında, nervürlü çubuklara kıyasla daha muhafazakâr bir yaklaşım benimsenmesi ve gevrek göçme riskinin dikkate alınması gerekmektedir.

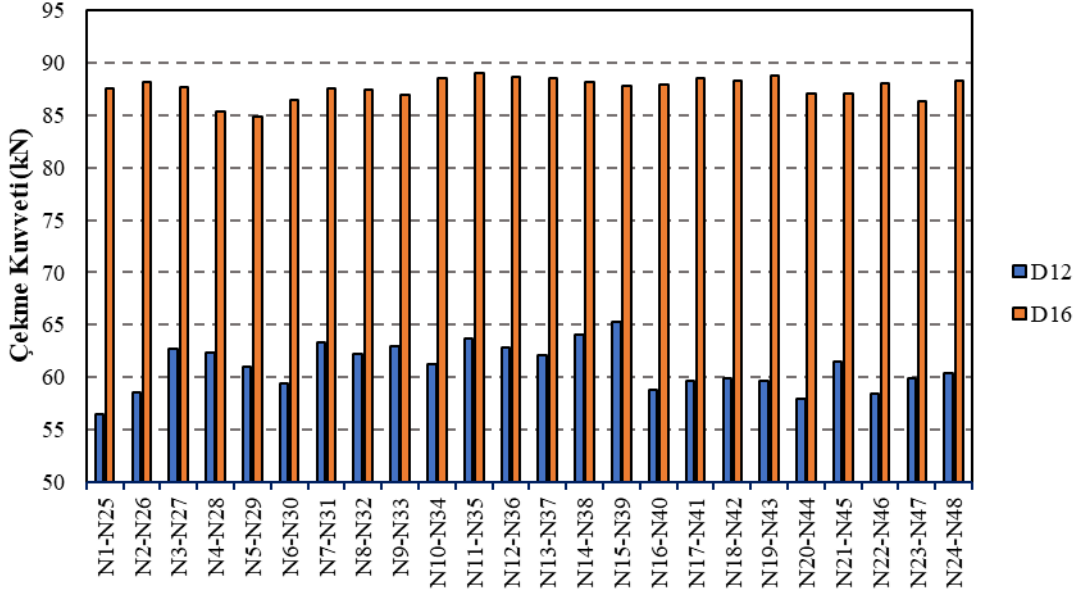
5.3. Ankraj Çapının Çekme Kuvvetine Etkisi

Çalışmada ankraj çubukları olarak 12 mm ve 16 mm çapa sahip nervürlü ve GFRP çubuklar kullanılmıştır.

5.3.1. Nervürlü Donatılarda Çapın Çekme Kuvvetine Etkisi

Farklı derinlik, kenar mesafesi ve delik çapına sahip 12 mm ve 16 mm çapa sahip 24'er adet nervürlü çubuğa aksenal çekme kuvveti uygulanmıştır. Toplamda 48 adet nervürlü çubuğa uygulanan çekme kuvveti sonucunda elde edilen çekme yükü değerleri Şekil 5.15'te verilmiştir.

N-D12/D16



Şekil 5.15. 12 mm – 16 mm Çapa Sahip Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

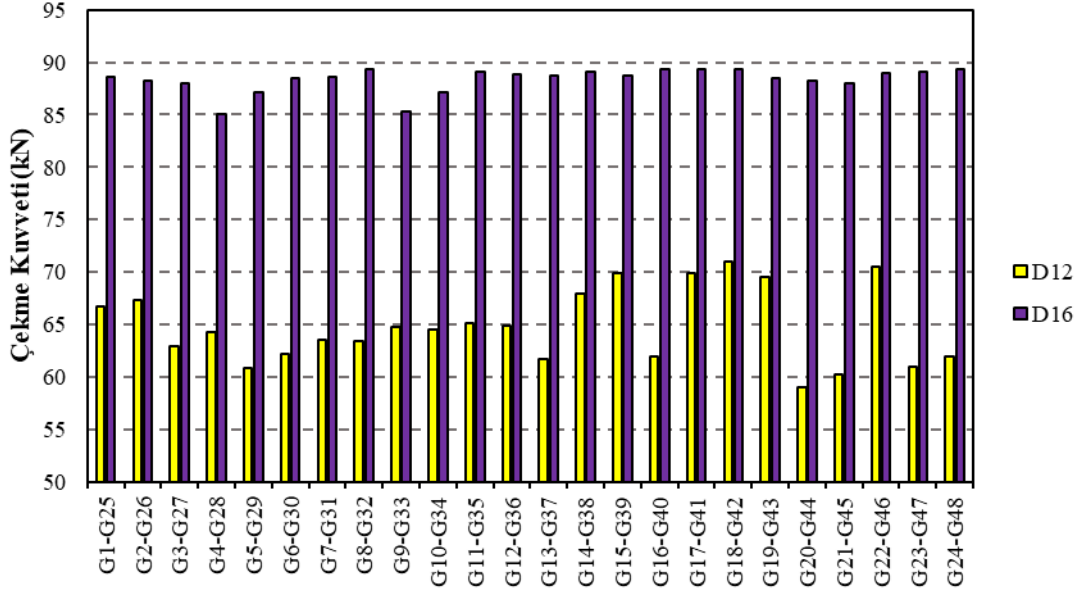
Farklı ekme derinliği, kenar mesafesi ve delik çapına sahip toplam 48 adet nervürlü çubuk üzerinde gerçekleştirilen aksenal çekme deneyleri sonucunda, çekme kapasitesi üzerinde çubuk çapının belirleyici bir parametre olduğu görülmüştür. 12 mm çaplı nervürlü çubuklarda çekme kuvveti değerleri 56.5–65.3 kN aralığında değişmiş ve ortalama çekme kuvveti 61.0 kN olarak elde edilmiştir. Buna karşılık 16 mm çaplı nervürlü çubuklarda çekme kuvveti değerleri 84.9–89.0 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti 87.6 kN seviyesinde gerçekleşmiştir.

Sonuçlar, 16 mm çaplı çubukların ortalama çekme kapasitesinin 12 mm çaplı çubuklara göre yaklaşık %44 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu artış, daha büyük çaplı çubukların hem kesit alanının artması hem de ankraj–beton ara yüzeyinde daha geniş bir aderans yüzeyi oluşturması ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca 16 mm çaplı numunelerde ölçülen çekme kuvvetlerinin daha dar bir aralıkta toplanması, bu çubukların deney koşullarında daha kararlı ve tekrarlanabilir bir davranış sergilediğini göstermektedir.

5.3.2. GFRP Donatılarda Çapın Çekme Kuvvetine Etkisi

Çalışmada ankraj çubukları olarak 12 mm ve 16 mm çapa sahip GFRP çubuklar kullanılmıştır. Farklı derinlik, kenar mesafesi ve delik çapına sahip 12 mm ve 16 mm çapa sahip 24'er adet GFRP çubuğa aksenal çekme kuvveti uygulanmıştır. Toplamda 48 adet GFRP çubuğa uygulanan çekme kuvveti sonucunda elde edilen çekme yükü değerleri Şekil 5.16'da verilmiştir.

G-D12/D16



Şekil 5.16. 12 mm – 16 mm Çapa Sahip GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

Farklı ekme derinliği, kenar mesafesi ve delik çapına sahip toplam 48 adet GFRP çubuk üzerinde gerçekleştirilen aksenal çekme deneyleri sonucunda, çubuk çapının çekme kapasitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. 12 mm çaplı GFRP çubuklarda çekme kuvveti değerleri 59.0–71.0 kN aralığında değişmiş ve ortalama çekme kuvveti 64.8 kN olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, 16 mm çaplı GFRP çubuklarda çekme kuvveti değerleri 85.0–89.4 kN aralığında gerçekleşmiş ve ortalama çekme kuvveti 88.4 kN seviyesinde bulunmuştur.

Elde edilen sonuçlar, 16 mm çaplı GFRP çubukların ortalama çekme kapasitesinin 12 mm çaplı çubuklara göre yaklaşık %36 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu fark, daha büyük çaplı GFRP çubukların hem daha geniş aderans yüzeyi oluşturması hem de daha yüksek aksenal rijitlik sunması ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, her iki çap grubunda da çekme kuvveti değerlerinin belirli bir aralıkta sınırlı kalması, taşıma kapasitesinin çubuğun nominal çekme dayanımından ziyade ankraj–beton veya ankraj–epoksi ara yüzeyindeki aderans mekanizması tarafından kontrol edildiğini göstermektedir.

GFRP çubukların akma davranışı göstermeyen, lineer-elastik ve gevrek malzeme karakteri dikkate alındığında, deneyler sırasında çubuk kopması oluşmadan sistem kapasitesine ulaşıldığı ve göçmenin genellikle aderans sıyrılması şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum, GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankrajların davranışının, nervürlü çelik çubuklara kıyasla daha ani ve uyarı vermeyen bir göçme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

5.3.3. Değerlendirme: Ankraj Çapı

Nervürlü çubuklarda 12 mm ve 16 mm çaplı çubukların çekme kuvveti değerleri karşılaştırıldığında 16 mm çaplı çubukların 12 mm çaplı çubuklara göre %34.5 ile %54.9 oranlarında daha fazla çekme kuvveti değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

GFRP çubuklarda 12 mm ve 16 mm çaplı çubukların çekme kuvveti değerleri karşılaştırıldığında 16 mm çaplı çubukların 12 mm çaplı çubuklara göre %11.3 ile %49.7 oranlarında daha fazla çekme kuvveti değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

12 mm çapa sahip 24 adet nervürlü çubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 61.0 kN, GFRP çubuklarda ise 64.8 kN'dur. Nervürlü çubuklar ile GFRP çubuklar karşılaştırıldığında GFRP çubukların %0.3 ile %20.7 aralığında daha fazla çekme kuvveti değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

16 mm çapa sahip 24 adet nervürlü çubuğun ortalama çekme kuvveti değeri 87.6 kN, GFRP çubuklarda ise 88.4 kN'dur. Nervürlü çubuklar ile GFRP çubuklar karşılaştırıldığında GFRP çubukların %0.1 ile %3.2 aralığında daha fazla çekme kuvveti değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Nervürlü çelik ve GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankrajlarda, çubuk çapı arttıkça çekme kapasitesi belirgin şekilde artmıştır. 12 mm çaplı GFRP çubuklar çeliğe göre yaklaşık %6 daha yüksek ortalama kapasite verirken, 16 mm çapta nervürlü ve GFRP çubuklar neredeyse aynı kapasite seviyesine ulaşmıştır. Buna karşın çelik daha sünek davranış potansiyeli taşırken, GFRP'nin gevrek karakteri nedeniyle göçme daha ani olduğundan tasarım değerlendirmesinde kapasite kadar göçme modu da dikkate alınmalıdır.

5.4. Delik Çapının Çekme Kuvvetine Etkisi

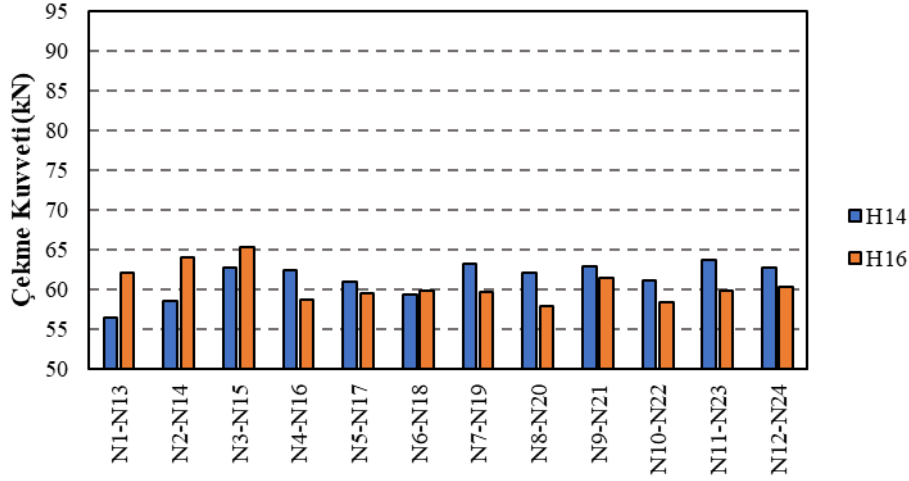
Çalışmada ankraj çubuklarının ekileceği delik çapları kullanılan ankraj çubuklarından +2 ve +4 mm olacak şekilde seçilmiştir. 12 mm çapa sahip çubuklar için 14 mm ve 16 mm; 16 mm çapa sahip çubuklar için ise 18 mm ve 20 mm çapa sahip delikler açılmıştır.

5.4.1. Nervürlü Donatılarda Delik Çapının Çekme Kuvvetine Etkisi

Farklı derinlik, kenar mesafesi ve ankraj çapına sahip D+2 mm ve D+4 mm olacak şekilde açılan deliklere nervürlü çubuklar ekilmiş ve aksenal çekme kuvveti uygulanmıştır. 12 mm çapa sahip nervürlü çubuklar için 14 mm ve 16 mm delikler açılarak ekilen çubuklar için aksenal çekme kuvveti değerleri Şekil 5.17'de verilmiştir. 14 (D+2) mm delik açılarak ekilen çubukların çekme kuvveti değerleri 56.5 kN ile 63.7 kN arasında olup ortalama çekme kuvveti

değeri ise 61.4 kN'dur. 16 (D+4) mm delik açılarak ekilen çubukların çekme kuvveti değerleri 57.9 kN ile 65.3 kN arasında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 60.6 kN'dur.

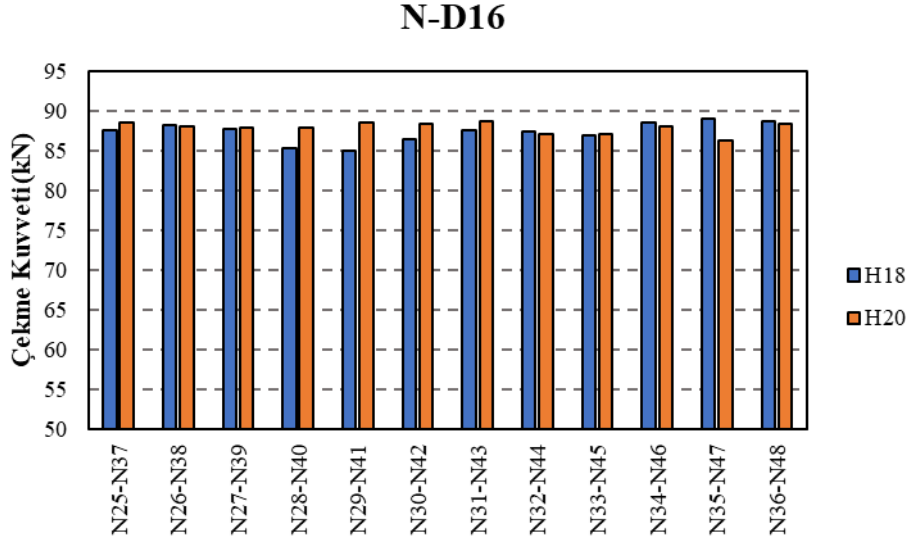
N-D12



Şekil 5.17. 12 mm Çapa Sahip Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

16 mm çapa sahip nervürlü çubuklar için 18 mm ve 20 mm delikler açılarak ekilen çubuklar için aksenal çekme kuvveti değerleri Şekil 5.18'de verilmiştir. Nervürlü çubuklarla yapılan kimyasal ankraj deneylerinde delik çapının D+2 mm ve D+4 mm olarak seçilmesinin çekme kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. 12 mm çaplı çubuklarda 14 mm (D+2) delik için ortalama çekme kuvveti 61.4 kN, 16 mm (D+4) delik için ise 60.6 kN olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, delik çapının D+2'den D+4'e artırılmasının 12 mm çubuklarda çekme kapasitesini yaklaşık 0.8 kN (~%1.3) azalttığını göstermektedir. 16 mm çaplı çubuklarda ise 18 mm (D+2) delik için ortalama çekme kuvveti 87.3 kN, 20 mm (D+4) delik için ortalama çekme kuvveti 87.9 kN olarak bulunmuştur. Bu durumda delik çapının artmasıyla çekme kapasitesinde çok küçük bir artış (~0.6 kN, ~%0.7) görülmekle birlikte farkın genel eğilimi değiştirecek düzeyde olmadığı görülmüştür. Genel olarak her iki çap grubunda da D+2 ve D+4 delik çapları arasında kapasite farkı oldukça sınırlıdır. Bu durum, incelenen aralıkta delik çapının tek başına belirleyici bir parametre olmadığını; taşıma kapasitesinin daha çok ekme derinliği, kenar mesafesi ve ankraj-epoksi-beton ara yüzeyindeki aderans mekanizması tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Ayrıca delik çapı büyüdükçe epoksi kalınlığı artsa da bu artışın deney koşullarında çekme kapasitesine doğrudan ve anlamlı bir kazanım olarak yansımadağı görülmüştür.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında nervürlü çubuklarla yapılan kimyasal ankrajlarda delik çapının D+2–D+4 aralığında seçilmesinin çekme kapasitesi üzerinde ihmal edilebilir düzeyde bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmektedir.

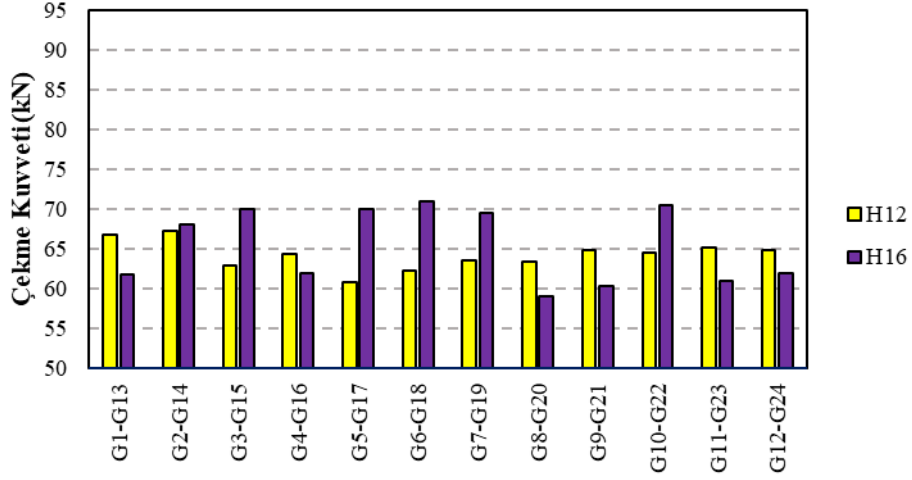


Şekil 5.18. 16 mm Çapa Sahip Nervürlü Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

5.4.2. GFRP Donatılarda Delik Çapının Çekme Kuvvetine Etkisi

Farklı derinlik, kenar mesafesi ve ankraj çapına sahip D+2 mm ve D+4 mm olacak şekilde açılan deliklere GFRP çubuklar ekilmiş ve eksenel çekme kuvveti uygulanmıştır. 12 mm çapa sahip GFRP çubuklar için 14 mm ve 16 mm delikler açılarak ekilen çubuklar için eksenel çekme kuvveti değerleri Şekil 5.19’da verilmiştir. 14 (D+2) mm delik açılarak ekilen çubukların çekme kuvveti değerleri 60.8 kN ile 67.3 kN arasında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 64.2 kN’dur. 16 (D+4) mm delik açılarak ekilen çubukların çekme kuvveti değerleri 59.0 kN ile 71.0 kN arasında olup ortalama çekme kuvveti değeri ise 65.4 kN’dur.

G-D12



Şekil 5.19. 12 mm Çapa Sahip GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

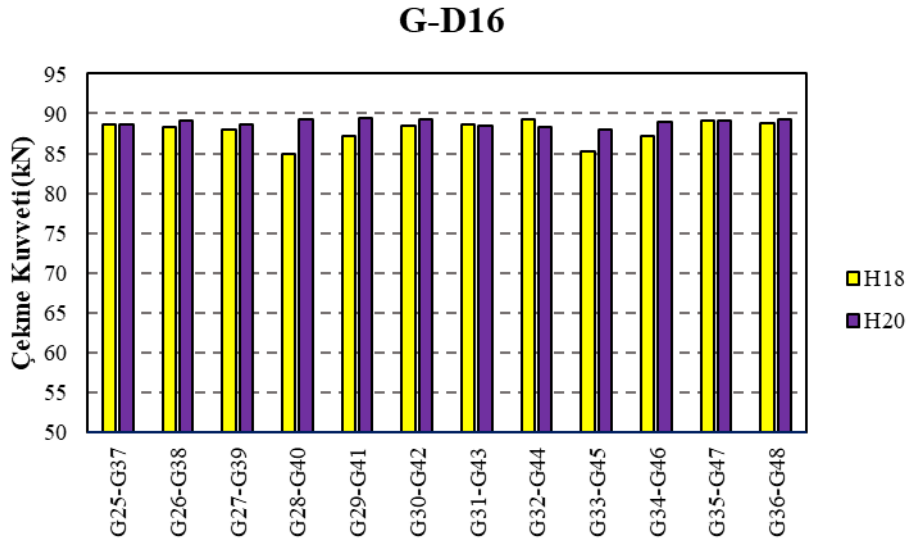
16 mm çapa sahip GFRP çubuklar için 18 mm ve 20 mm delikler açılarak ekilen çubuklar için aksenal çekme kuvveti değerleri Şekil 5.20’de verilmiştir. 12 mm çaplı GFRP çubuklarda 14 mm (D+2) delik için ortalama çekme kuvveti 64.2 kN, 16 mm (D+4) delik için ise 65.4 kN olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, delik çapının artırılmasının 12 mm çubuklarda çekme kapasitesini yaklaşık 1.2 kN (~%1.9) düzeyinde artırdığını göstermektedir. Ancak bu artışın sınırlı olduğu ve deneysel saçılma aralığı içinde kalabileceği değerlendirilmektedir.

16 mm çaplı GFRP çubuklarda ise 18 mm (D+2) delik için ortalama çekme kuvveti 87.8 kN, 20 mm (D+4) delik için ortalama çekme kuvveti 88.9 kN olarak bulunmuştur. Buna göre delik çapının D+2’den D+4’e çıkarılması, 16 mm çaplı çubuklarda çekme kapasitesini yaklaşık 1.1 kN (~%1.3) artırmıştır. Ayrıca D+4 grubunda ölçülen değer aralığının daha dar olması, bu çapta daha tutarlı/az saçılmalı bir davranışa işaret etmektedir.

Genel olarak sonuçlar, incelenen aralıkta delik çapının çekme kapasitesine etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Delik çapı arttıkça epoksi tabakasının kalınlığı artmakta ve bu durum ara yüzey gerilmelerinin daha dengeli yayılmasına katkı sağlayabilmektedir; ancak elde edilen deney verileri, bu etkinin kapasiteye belirgin bir artış olarak yansımadığını ortaya koymaktadır. Taşıma kapasitesinin büyük ölçüde ankraj–epoksi–beton ara yüzeyindeki aderans mekanizması ve diğer parametreler (ekme derinliği, kenar mesafesi, delik temizliği vb.) tarafından kontrol edildiği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankrajlarda delik çapının D+2–D+4 aralığında seçilmesinin çekme kapasitesi üzerindeki etkisi ihmal

edilebilir düzeyde ($\approx\%1-2$) olup, tasarım açısından delik çapı seçiminde esas belirleyici unsurun uygulama kalitesi ve aderans koşulları olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 5.20. 16 mm Çapa Sahip GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

5.4.3. Değerlendirme: Delik Çapı

Nervürlü ve GFRP çubuklarla yapılan deneyler birlikte değerlendirildiğinde, delik çapının D+2 mm'den D+4 mm'ye çıkarılmasının her iki çubuk türünde de çekme kapasitesi üzerinde sınırlı ve ihmal edilebilir düzeyde bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

12 mm çaplı çubuklarda, nervürlü donatılar için delik çapının artırılması ortalama çekme kapasitesini 61.4 kN'dan 60.6 kN'a düşürerek yaklaşık %1.3'lük bir azalma oluştururken; GFRP çubuklarda aynı çap aralığında ortalama çekme kapasitesi 64.2 kN'dan 65.4 kN'a çıkarak yaklaşık %1.9'lük bir artış göstermiştir. Bu zıt eğilimlere rağmen, her iki durumda da farkların deneysel saçılma aralığı içinde kaldığı ve belirleyici olmadığı anlaşılmaktadır.

16 mm çaplı çubuklarda ise nervürlü donatılar için delik çapının D+2'den D+4'e artırılması ortalama çekme kapasitesini 87.3 kN'dan 87.9 kN'a yükselterek yaklaşık %0.7'lik, GFRP çubuklarda ise 87.8 kN'dan 88.9 kN'a çıkararak yaklaşık %1.3'lük sınırlı bir artış sağlamıştır. Bu sonuçlar, her iki malzeme için de delik çapı değişiminin kapasite üzerinde ikincil bir parametre olduğunu göstermektedir.

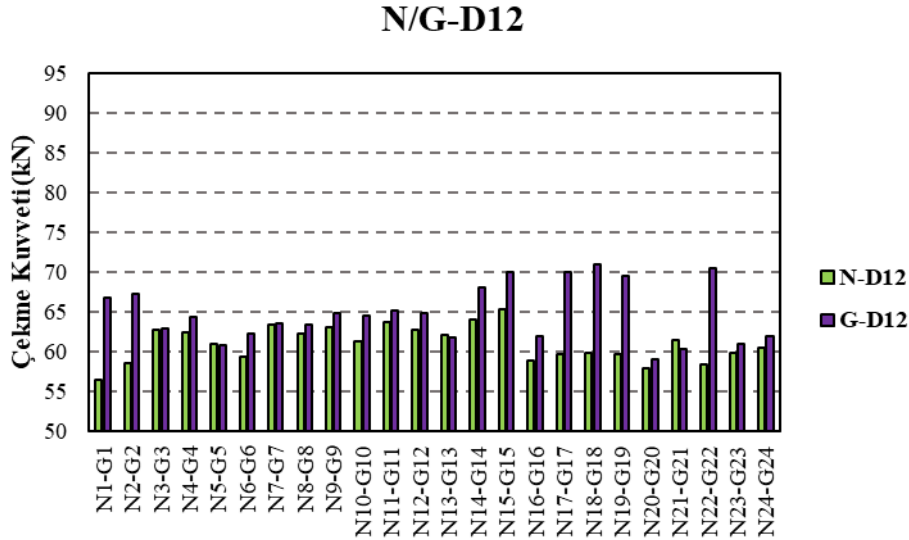
Genel olarak, nervürlü çubuklarda delik çapının artması epoksi tabakasının kalınlaşmasına bağlı olarak aderans koşullarını sınırlı ölçüde etkilerken, GFRP çubuklarda ara yüzey gerilmelerinin daha homojen dağılmasına katkı sağlayabilmektedir. Ancak her iki çubuk

türünde de taşıma kapasitesi esas olarak ekme derinliği ve ankraj-epoksi-beton etkileşimi tarafından kontrol edilmekte; delik çapının D+2-D+4 aralığında değiştirilmesi kapasiteyi anlamlı ölçüde değiştirmemektedir.

5.5. Donatı Cinsinin Çekme Kuvvetine Etkisi

Çalışmada 12 mm ve 16 mm çaplarına sahip nervürlü ve cam elyaf takviyeli polimer donatılar farklı derinlik, kenar mesafesi ve delik çaplarında ekilmişlerdir.

12 mm çapa sahip nervürlü ve GFRP çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.21’de verilmiştir. 12 mm çapa sahip nervürlü çubukların çekme kuvveti değerleri 56.5 kN ile 65.3 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri 61.0 kN’dur. 12 mm çapa sahip GFRP çubukların çekme kuvveti değerleri ise 59.0 kN ile 71.0 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri 64.8 kN’dur.

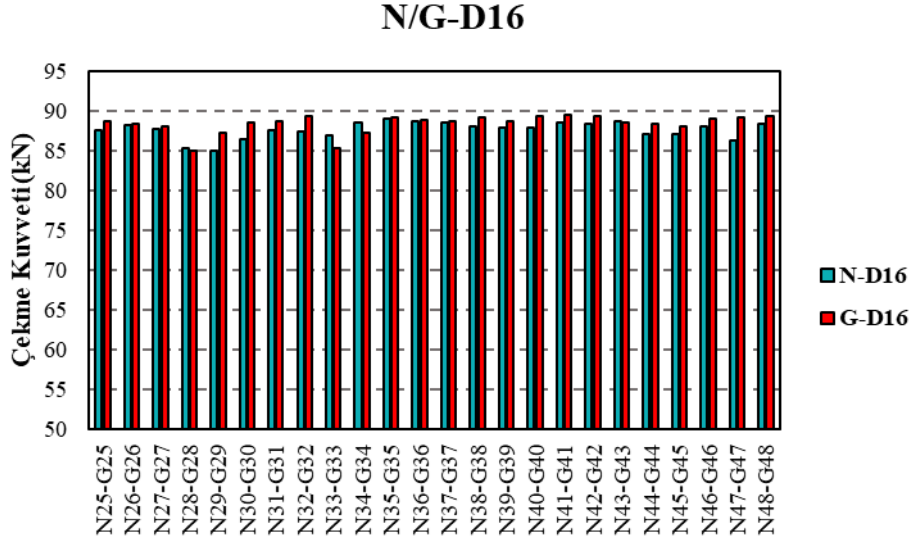


Şekil 5.21. 12 mm Çapa Sahip Nervürlü-GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

Çalışmada 12 mm ve 16 mm çaplarında nervürlü (çelik) ve GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankraj deneyleri incelendiğinde, her iki çap grubunda da ortalama çekme kapasitelerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. 12 mm çaplı numunelerde nervürlü çubukların ortalama çekme kuvveti 61.0 kN, GFRP çubukların ortalama çekme kuvveti ise 64.8 kN olarak belirlenmiştir. Buna göre GFRP çubuklar, 12 mm çapta nervürlü çubuklara göre ortalama olarak yaklaşık 3.8 kN ($\approx 6\%$) daha yüksek çekme kapasitesi göstermiştir. Bununla birlikte, 12 mm GFRP grubunda ölçülen değer aralığının daha geniş olması (59.0–71.0 kN), bu grupta deneysel saçılmanın daha yüksek olduğuna işaret etmektedir.

16 mm çapa sahip nervürlü ve GFRP çubukların çekme kuvveti değerleri Şekil 5.22’de verilmiştir. 16 mm çapa sahip nervürlü çubukların çekme kuvveti değerleri 84.9 kN ile 89.0 kN

aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri 87.6 kN'dur. 16 mm çapa sahip GFRP çubukların çekme kuvveti değerleri ise 85.0 kN ile 89.4 kN aralığında olup ortalama çekme kuvveti değeri 88.4 kN'dur.



Şekil 5.22. 16 mm Çapa Sahip Nervürlü-GFRP Çubukların Çekme Kuvveti Değerleri

16 mm çaplı numunelerde ise nervürlü çubukların ortalama çekme kuvveti 87.6 kN, GFRP çubukların ortalama çekme kuvveti 88.4 kN olarak elde edilmiş ve iki malzeme arasındaki fark 0.8 kN (\approx %1) seviyesinde kalmıştır. Bu sonuç, 16 mm çap için nervürlü ve GFRP çubukların benzer çekme kapasitesi sergilediğini göstermektedir. Ayrıca her iki malzeme için ölçülen min–maks aralıklarının birbirine yakın olması, 16 mm çapta sonuçların daha tutarlı olduğunu düşündürmektedir.

5.5.1. Değerlendirme: Donatı Cinsi

Farklı derinlik, ankraj deliği ve kenar mesafelerinde ekilen 24 adet 12 mm çapa sahip nervürlü çubukların ortalama çekme kuvveti değeri 61.0 kN'dur. Farklı derinlik, ankraj deliği ve kenar mesafelerinde ekilen 24 adet 12 mm çapa sahip GFRP çubukların ortalama çekme kuvveti değeri 64.8 kN'dur. 12 mm çaplı donatılar için GFRP çubukların nervürlü donatılara göre %0.3 ile %20.7 daha fazla çekme kuvveti değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Farklı derinlik, ankraj deliği ve kenar mesafelerinde ekilen 24 adet 16 mm çapa sahip nervürlü çubukların ortalama çekme kuvveti değeri 87.6 kN'dur. Farklı derinlik, ankraj deliği ve kenar mesafelerinde ekilen 24 adet 16 mm çapa sahip GFRP çubukların ortalama çekme kuvveti değeri 88.4 kN'dur. 16 mm çaplı donatılar için GFRP çubukların nervürlü donatılara göre %0.1 ile %0.3 daha fazla çekme kuvveti değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

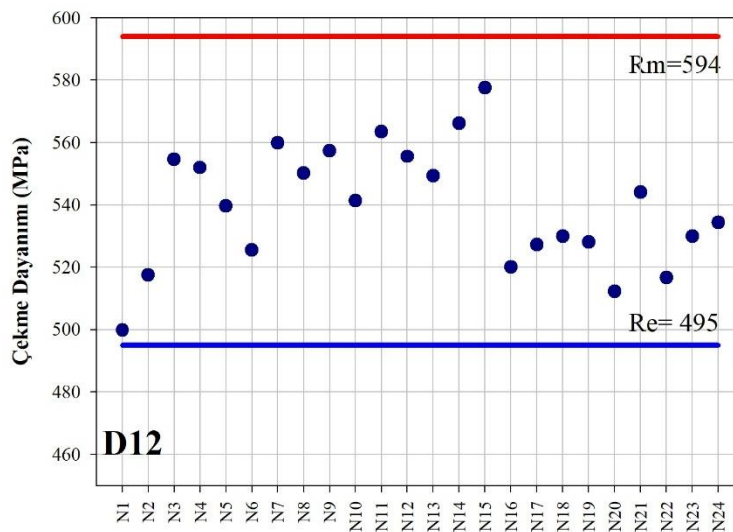
Genel olarak kapasite değerleri benzer olsa da, malzeme davranışları açısından önemli bir ayrım bulunmaktadır: Nervürlü çubuklar sünek karakterleri nedeniyle yük altında akma/plastik deformasyon geliştirme potansiyeline sahipken, GFRP çubuklar akma davranışı göstermeyen, lineer-elastik ve gevrek karakterdedir. Bu nedenle, çekme kapasitesi bakımından yakın sonuçlar elde edilse bile, GFRP ankrajların göçme davranışı daha ani ve uyarı vermeyen bir karakter gösterebileceğinden tasarım ve uygulamada göçme modu ve güvenlik yaklaşımı mutlaka dikkate alınmalıdır.

5.6. Dayanım Değerleri

Eksenel çekme testi sonucunda elde edilen çekme kuvveti değerleri çubuk çapı alanına bölünerek çekme dayanımı değerleri bulunmuş ve çubukların akma (R_e) ve çekme (R_m) değerleri ile karşılaştırılmıştır.

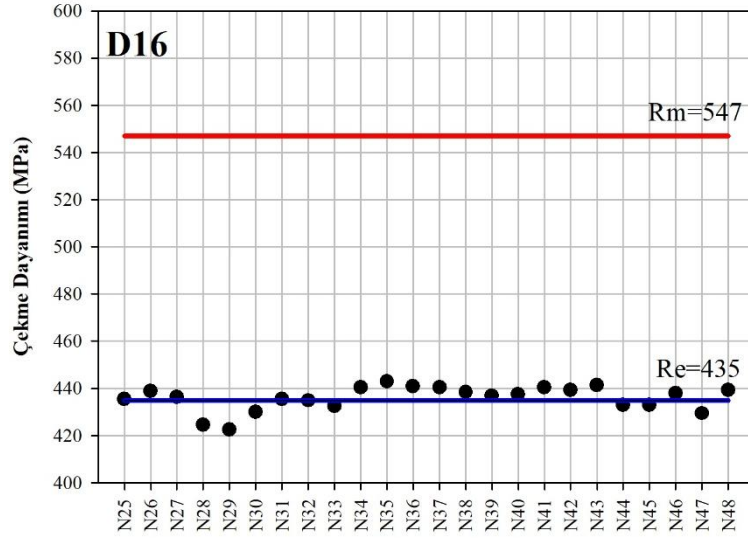
5.6.1. Nervürlü Çubuklarda Dayanım Değerleri

24 adet 12 mm çaplı nervürlü çubuk için belirlenen çekme dayanımı değerleri Şekil 5.23'te verilmiştir. Çalışmada kullanılan 12 mm çaplı nervürlü çubuklar için yapılan çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı (R_e) değeri 495 MPa ve çekme dayanımı (R_m) değeri ise 594 MPa'dır. Yapılan deneylerde nervürlü çubuklarda akma dayanımının aşıldığı, ancak çekme (kopma) dayanımına ulaşılmadan deneyin sonlandığı gözlenmiştir. Bu durum, ankraj sisteminin çeliğın kopma kapasitesinden önce ankraj–beton veya ankraj–epoksi etkileşimi tarafından sınırlandırıldığını göstermektedir. Ankrajlar, sünek davranış sergileyerek akma sonrası deformasyon yapmış, ancak çelik kopması meydana gelmemiştir.



Şekil 5.23. 12 mm Çaplı Nervürlü Çubuklar İçin Çekme Dayanımı Değerleri

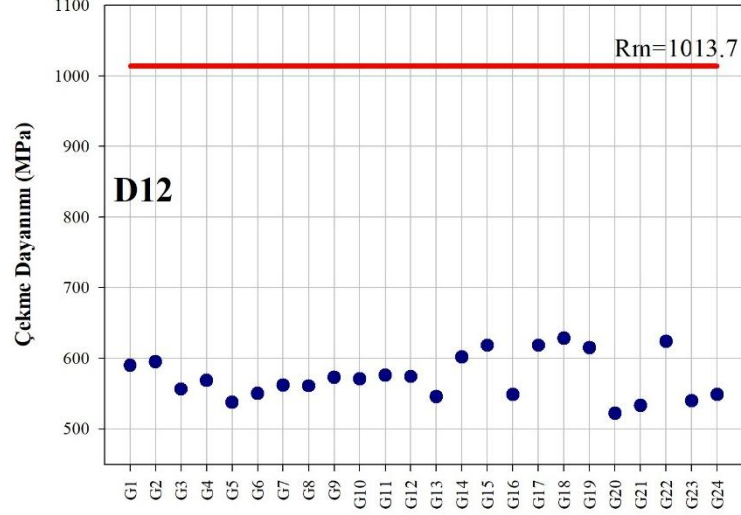
24 adet 16 mm çaplı nervürlü çubuk için belirlenen çekme dayanımı değerleri Şekil 5.24'te verilmiştir. Çalışmada kullanılan 16 mm çaplı nervürlü çubuklar için yapılan çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı (R_e) değeri 435 MPa ve çekme dayanımı (R_m) değeri ise 547 MPa'dır. Nervürlü çubuklarda akma dayanımına ulaşılmamış veya akma dayanımının hemen üzerinde kalınmıştır. Sistem kapasitesinin çelik akması tam gelişmeden önce sınırlandığı gözlenmiştir. Bu durum, taşıma kapasitesinin ankraj-beton veya ankraj-epoksi etkileşimi tarafından kontrol edildiğini göstermektedir.



Şekil 5.24. 16 mm Çaplı Nervürlü Çubuklar İçin Çekme Dayanımı Değerleri

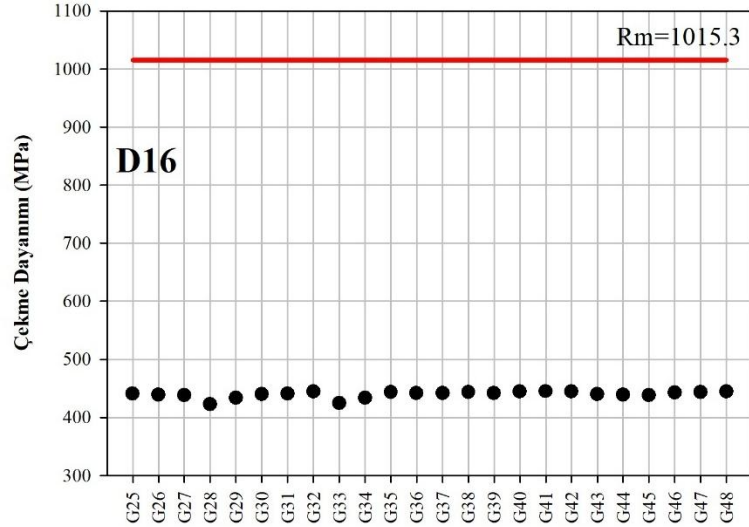
5.6.2. GFRP Çubuklarda Dayanım Değerleri

24 adet 12 mm çaplı GFRP çubuk için belirlenen çekme dayanımı değerleri Şekil 5.25'te verilmiştir. Çalışmada kullanılan 12 mm çaplı GFRP çubuklar için yapılan çekme testi sonucunda elde edilen çekme dayanımı (R_m) değeri ise 1013.7 MPa'dır. GFRP çubuklarda akma olmadığından akma dayanımı değeri gösterilmemiştir.



Şekil 5.25. 12 mm Çaplı GFRP Çubuklar İçin Çekme Dayanımı Değerleri

24 adet 16 mm çaplı GFRP çubuk için belirlenen çekme dayanımı değerleri Şekil 5.26’da verilmiştir. Çalışmada kullanılan 16 mm çaplı GFRP çubuklar için yapılan çekme testi sonucunda elde edilen çekme dayanımı (R_m) değeri ise 1015.3 MPa’dır. GFRP çubuklarda akma olmadığından akma dayanımı değeri belirlenememiştir.



Şekil 5.26. 16 mm Çaplı Nervürlü Çubuklar İçin Çekme Dayanımı Değerleri

Yapılan deneylerde; 12 ve 16 mm çaplı GFRP çubuklardan yapılan kimyasal ankrajlarda çekme (kopma) dayanımına ulaşılmadan taşıma kapasitesi sınırına gelinmiştir. Bu durum, ankraj sisteminin kapasitesinin GFRP çubuğun malzeme dayanımından önce ankraj–beton veya ankraj–epoksi etkileşimi tarafından kontrol edildiğini göstermektedir.

5.6.3. Değerlendirme: Dayanım Değerleri

Çalışmada 12 mm çaplı nervürlü çubuklarda akma dayanımı aşılmış ancak çekme dayanımına ulaşılamamıştır. 16 mm çaplı nervürlü çubuklarda ise bazı çubuklar akma dayanımına ulaşamamış veya akma dayanımının hemen üzerinde kalmıştır. GFRP çubuklarda akma olmadığından dolayı karşılaştırma çekme dayanımı üzerinden yapılmıştır. 12 ve 16 mm çaplı GFRP çubuklardan yapılan kimyasal ankrajlarda çekme (kopma) dayanımına ulaşılmadan taşıma kapasitesi sınırına gelinmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; ankraj sisteminin kapasitesinin hem nervürlü hem de GFRP çubuklarda malzeme dayanımından önce ankraj–beton veya ankraj–epoksi etkileşimi tarafından kontrol edildiğini göstermektedir.

5.7. Yük-Zaman Grafikleri

Çalışmada farklı çap, derinlik, kenar mesafesi ve delik çapına sahip 48 adet nervürlü, 48 adet de GFRP çubuk hazırlanmış ve test edilmiştir. Nervürlü donatılar için dişli çenelerle, GFRP donatılar için de manşonlarla oluşturulan başlıklar sayesinde çekme kuvveti uygulanmıştır. Dişli çeneler ve manşonlarla tutulan ankraj çubukları hidrolik piston yardımıyla çekilmiş ve yük hücresi ile uygulanan yük ölçülmüştür. Veri toplama sistemi ile alınan ölçümler sonucunda yük-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Nervürlü çubuklar için elde edilen yük-zaman grafikleri EK-1 ve EK-2, GFRP çubuklar için elde edilen yük-zaman grafikleri ise EK-3 ve EK-4’te verilmiştir.

EK-1 ve EK-2’de sunulan N1–N48 nervürlü çubuklara ait yük–zaman grafikleri incelendiğinde, yükün zamana bağlı olarak kademeli ve kontrollü biçimde arttığı, maksimum yüke yaklaşıldıktan sonra ise bazı numunelerde yük artış hızının azaldığı veya plato benzeri bir davranışın olduğu görülmektedir. Bu davranış, nervürlü çubukların sünek karakteri ile uyumlu olup, ankraj sisteminde akma ve aderans mobilizasyonunun zamana yayılı olarak geliştiğini göstermektedir. Bazı numunelerde maksimum yük sonrası sınırlı yük düşüşleri gözlenmiş olup, bu durum sıyrıma veya beton hasarı ile birlikte kontrollü göçmeye işaret etmektedir.

EK-3 ve EK-4’te verilen G1–G48 GFRP çubuklara ait yük–zaman grafikleri ise nervürlü çubuklardan farklı bir davranış sergilemektedir. GFRP numunelerde yük–zaman eğrilerinin genel olarak daha doğrusal (lineer) bir karaktere sahip olduğu, maksimum yüke ulaşıldığında ise ani ve belirgin bir yük düşüşü meydana geldiği görülmektedir. Bu davranış, GFRP çubukların akma davranışı göstermeyen, lineer-elastik ve gevrek malzeme karakteri ile uyumludur ve göçmenin çoğunlukla ani sıyrıma şeklinde gerçekleştiğini doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, yük–zaman grafikleri nervürlü donatıların daha uyarı veren ve kontrollü, GFRP donatıların ise daha ani ve gevrek göçme davranışı sergilediğini açık biçimde ortaya koymakta; bu bulgu, çalışmanın ana sonuçları ve göçme modu değerlendirmeleri ile tam uyum göstermektedir.

5.8. Göçme Modları

Kenar mesafesi, delik çapı, ekme derinliği, ankraj çapı ve donatı cinsinin değişken olduğu bu çalışma kapsamında ekilen 96 adet çubuğa aksel çekme kuvveti uygulanmıştır. Deney düzeneklerine çelik profil konularak göçme modları gözlenmiştir. Deney sonrası görüntüler EK 5- EK 12’de sunulmuştur. Gözlemlenen göçme modları da EK-13’te verilmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde, nervürlü ve GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankrajların farklı göçme mekanizmaları sergilediği açıkça görülmektedir. GFRP çubuklara ait tüm numunelerde (G1–G48) göçme modu sıyrılma olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, GFRP çubuklarla yapılan ankrajlarda taşıma kapasitesinin tamamen ankraj–epoksi–beton ara yüzeyindeki aderans tarafından kontrol edildiğini ve beton konisi veya beton çatlağına dayalı bir göçmenin gelişmediğini göstermektedir.

Buna karşılık nervürlü çubuklarda (N1–N48) göçme modlarının daha çeşitli olduğu görülmüştür. Nervürlü numunelerde baskın göçme modu sıyrılma olmakla birlikte, çok sayıda numunede koni + sıyrılma şeklinde birleşik göçme gözlenmiş, sınırlı sayıda numunede ise yalnız beton konisi veya beton yarılmaması + sıyrılma şeklinde göçmeler meydana gelmiştir. Bu durum, nervürlü donatıların daha yüksek aderans kapasitesi geliştirebildiğini ve bazı durumlarda yük aktarımının beton kütlesi içerisine yayılabildiğini göstermektedir.

Nervürlü çubuklarda beton konisi ve birleşik göçme modlarının gözlenmesi, ankraj sisteminin yalnızca aderansla değil, aynı zamanda beton dayanımı ve kenar mesafesi gibi parametrelerle birlikte çalıştığını ortaya koymaktadır. Buna karşın GFRP çubuklarda göçmenin tamamen sıyrılma şeklinde gerçekleşmesi, GFRP’nin akma göstermeyen, lineer-elastik ve gevrek karakteri ile uyumlu olup, sistem kapasitesinin çubuğun malzeme dayanımına ulaşılmadan önce ara yüzeyde sınırlandığını göstermektedir.

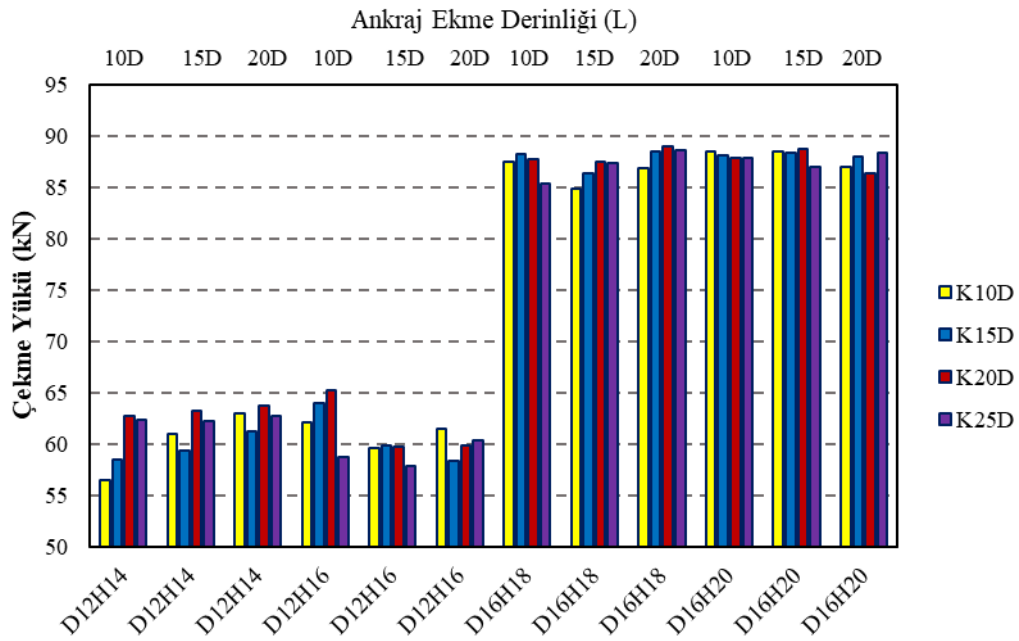
Sonuç olarak, nervürlü çubuklar daha karmaşık ve dağıtılmış göçme mekanizmaları sergileyerek daha kontrollü ve uyarı veren bir davranış ortaya koyarken, GFRP çubuklar tek tip ve ani bir göçme davranışı göstermiştir. Bu farklılık, her iki donatı türü için tasarım yaklaşımının da farklı ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır

5.9. Tüm Deney Sonuçları

Çapın 10, 15 ve 20 katı derinliklerde, çapın 10, 15, 20 ve 25 katı kenar mesafelerinde, +2D ve +4D delik çaplarına 12 mm ve 16 mm çaplı nervürlü ve GFRP çubukların ekildiği bu çalışmada 96 adet çekme kuvveti değeri elde edilmiştir.

5.9.1. Nervürlü Donatıların Deney Sonuçları

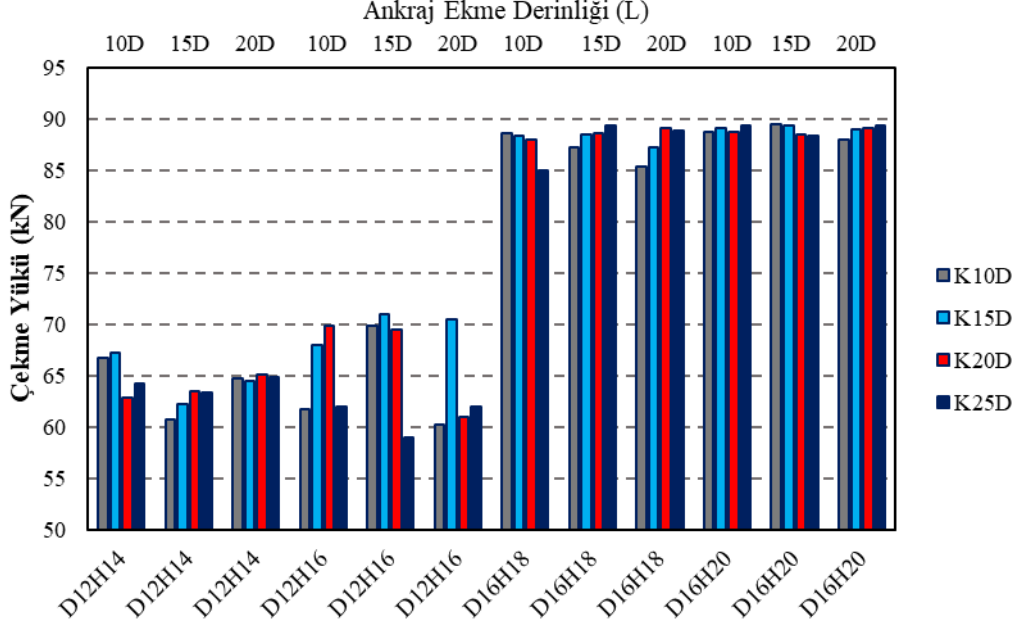
Farklı derinlik, kenar mesafesi, delik çapı ve ankraj çapına sahip 48 adet nervürlü çubuğun çekme kuvveti değerleri Şekil 5.27'de verilmiştir.



Şekil 5.27. Nervürlü Donatıların Çekme Kuvveti Değerleri

5.9.2. GFRP Donatılarının Deney Sonuçları

Farklı derinlik, kenar mesafesi, delik çapı ve ankraj çapına sahip 48 adet GFRP çubuğun çekme kuvveti değerleri Şekil 5.28’de verilmiştir.



Şekil 5.28. GFRP Donatılarının Çekme Kuvveti Değerleri

5.9.3. Genel Değerlendirme: Tüm Deney Sonuçları

Bu çalışma kapsamında, nervürlü ve GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankrajlarda çekme kapasitesini belirleyen en etkili parametrenin donatı çapı olduğu; kenar mesafesi, ekme derinliği ve delik çapının ise minimum gereklilikler sağlandıktan sonra ikincil rol oynadığı belirlenmiştir. Nervürlü ve GFRP çubuklar benzer kapasite seviyelerine ulaşabilmekle birlikte, sünek–gevrek davranış farkı, tasarım ve uygulamada tercih kriterlerini belirleyen temel unsur olmuştur.

Tablo 5.1. Deney Sonuçları için Genel Değerlendirme

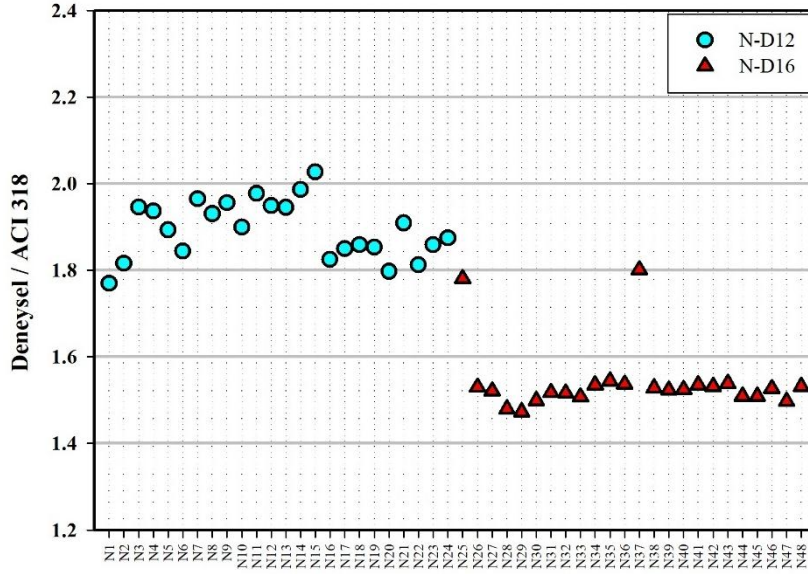
Parametre	Nervürlü Çubuk	GFRP Çubuk	Değerlendirme
Kenar Mesafesi	10D'den sonra kapasite artışı sınırlı	10D'den sonra kapasite artışı sınırlı	Minimum 10D yeterli, daha büyük değerler ikincil olarak etkili
Ekme Derinliği	10D–20D aralığında belirgin fark yok	10D–20D aralığında belirgin fark yok	10D kritik eşik, artış azalan getiri sağlıyor
Donatı Çapı	16 mm, 12 mm'ye göre ~%34.5–54.9 daha yüksek	16 mm, 12 mm'ye göre ~%25.8–49.7 daha yüksek	Bu çalışmada en etkili parametre
Delik Çapı	Kapasite farkı ~%1	Kapasite farkı ~%1–2	Kapasite açısından ikincil parametre
12 mm çap için Ortalama Kapasite	~61 kN	~65 kN	GFRP ≈ %6 daha yüksek
16 mm çap için Ortalama Kapasite	~88 kN	~88 kN	Kapasiteler neredeyse eşit
Davranış biçimi	Sünek	Gevrek	Davranış biçimleri farklı
Göçme Modu	Kontrollü, uyarı veren	Ani, uyarı vermeyen	Güvenlik yaklaşımı farklı

5.10. ACI 318'e Göre Güvenlik Düzeyleri

Deney sonuçları, ACI 318'e göre beklenen ankraj tasarım kapasitesi değerleri ile oranlanarak güvenlik düzeyleri belirlenmiştir. ACI 318'e göre beklenen kapasite ve tasarım dayanımı değerleri nervürlü çubuklar için EK-14'de ve GFRP çubuklar için de EK-15'te verilmiştir. Bu çalışmada dayanım azaltma katsayısı olarak donatısız beton, işçilik kalitesi ve ortam koşullarından orta derecede etkilenen, güvenilirliği orta olacak şekilde ortalama 0.6 katsayısı kullanılmıştır.

5.10.1. Nervürlü Donatılarda Güvenlik Düzeyleri

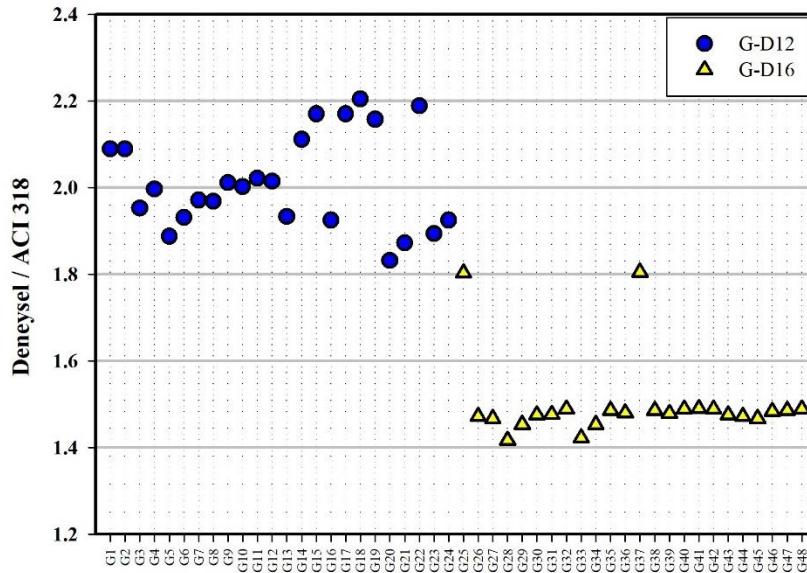
Farklı parametrelere sahip 48 adet nervürlü çubuğun ACI 318'e göre kapasite ve tasarım çekme kuvveti değerleri hesaplanmıştır. Nervürlü çubuklar için belirlenen güvenlik düzeyleri değerleri Şekil 5.29'da verilmiştir. 12 mm çapa sahip nervürlü çubukların güvenlik düzeyleri 1.8 ile 2.0 aralığında olup ortalama güvenlik düzeyi 1.9'dur. 16 mm çapa sahip çubukların güvenlik düzeyleri 1.5 ile 1.8 aralığında olup ortalama güvenlik düzeyi 1.5'tir.



Şekil 5.29. Nervürlü Çubukların ACI 318'e Göre Güvenlik Düzeyleri

5.10.2. GFRP Donatılarda Güvenlik Düzeyleri

Farklı parametrelere sahip 48 adet GFRP çubuğun ACI 318'e göre kapasite ve tasarım çekme kuvveti değerleri hesaplanmıştır. GFRP çubuklar için belirlenen güvenlik düzeyleri değerleri Şekil 5.30'da verilmiştir. 12 mm çapa sahip GFRP çubukların güvenlik düzeyleri 1.8 ile 2.2 aralığında olup ortalama güvenlik düzeyi 2.0'dır. 16 mm çapa sahip çubukların güvenlik düzeyleri 1.4 ile 1.8 aralığında olup ortalama güvenlik düzeyi 1.5'tir.



Şekil 5.30. GFRP Çubukların ACI 318'e Göre Güvenlik Düzeyleri

5.10.3 Değerlendirme: Güvenlik Düzeyleri

Nervürlü donatılarda, 12 mm çaplı çubuklar için güvenlik düzeyleri 1.8–2.0 aralığında değişmiş ve ortalama güvenlik düzeyi 1.9 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık 16 mm çaplı nervürlü çubuklarda güvenlik düzeyleri 1.5–1.8 aralığında olup ortalama değer 1.5 seviyesinde kalmıştır. Benzer bir eğilim GFRP donatılarda da gözlenmiş; 12 mm çaplı GFRP çubukların güvenlik düzeyleri 1.8–2.2 aralığında ve ortalama 2.0, 16 mm çaplı GFRP çubukların güvenlik düzeyleri ise 1.4–1.8 aralığında ve ortalama 1.5 olarak belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar hem nervürlü hem de GFRP donatılarda çap arttıkça güvenlik düzeyinin azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, daha büyük çaplı çubuklarda deneysel olarak ulaşılan çekme kapasitelerinin, ACI 318 tarafından öngörülen tasarım kapasitelerine daha fazla yaklaşması ile açıklanabilir. Küçük çaplı donatılarda ise deneysel kapasitenin, yönetmelikte öngörülen tasarım kapasitesine göre daha yüksek bir emniyet payı sunduğu görülmektedir.

Donatı cinsi açısından değerlendirildiğinde, aynı çap için nervürlü ve GFRP çubukların ortalama güvenlik düzeylerinin birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Ancak GFRP çubukların akma davranışı göstermeyen ve gevrek karakteri dikkate alındığında, 12 mm çapta elde edilen daha yüksek güvenlik düzeyleri (≈ 2.0), bu donatı türü için olumlu ve gerekli bir emniyet payı olarak değerlendirilebilir. 16 mm çaplı her iki donatı türünde de güvenlik düzeyinin ≈ 1.5 seviyesine düşmesi, tasarım açısından hâlâ kabul edilebilir olmakla birlikte, özellikle GFRP donatılar için daha dikkatli bir tasarım yaklaşımını gerektirmektedir.

Sonuç olarak, ACI 318'e göre hesaplanan güvenlik düzeyleri, bu çalışmada incelenen tüm nervürlü ve GFRP ankrajların güvenli tarafta kaldığını, ancak donatı çapı büyüdükçe emniyet payının azaldığını göstermektedir. Bu bulgu, özellikle büyük çaplı ankrajlarda tasarım parametrelerinin ve göçme modlarının daha titizlikle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada C20/25 sınıfı donatısız betona 12 mm ve 16 mm çaplarında GFRP ve nervürlü çelik donatılar kimyasal yapıştırıcı kullanılarak ekilmiş ve ankraj donatılarına aksel çekme kuvveti uygulanmıştır. Ankraj çapı, ankraj deliğinin çapı, donatı cinsi, ekme derinliği ve kenar mesafesi parametreleri değişken olarak ele alınarak toplam 96 adet donatının performansları incelenmiştir. Ankraj donatılarının aksel çekme kuvveti etkisinde yük-zaman grafikleri elde edilmiştir. Yük-zaman grafiklerinden elde edilen veriler doğrultusunda çekme kuvveti değerleri ve göçme modları tespit edilmiştir. ACI 318'e göre beklenen çekme kapasitesi değerleri ile karşılaştırılmış ve güvenlik katsayıları belirlenmiştir. Toplamda 96 adet ankraj numunesi üzerinde gerçekleştirilen aksel çekme deneyleri sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.:

- **Kenar Mesafesinin Etkisi:** Hem nervürlü hem de GFRP donatılarda, kenar mesafesinin 10D seviyesine ulaştıktan sonra 15D, 20D ve 25D'ye artırılmasının çekme kapasitesi üzerinde belirgin ve sistematik bir artış sağlamadığı görülmüştür. Ortalama çekme kuvvetleri tüm kenar mesafeleri için birbirine yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Bu sonuç, kenar mesafesinin minimum gereklilikler sağlandıktan sonra kapasite üzerinde ikincil bir parametre haline geldiğini göstermektedir.
- **Ekme Derinliğinin Etkisi:** Ekme derinliğinin 10D'den 20D'ye çıkarılması hem nervürlü hem de GFRP donatılarda çekme kapasitesini anlamlı düzeyde artırmamıştır. Tüm ekme derinlikleri için elde edilen ortalama çekme kuvvetleri benzer seviyelerde kalmıştır. Bu durum, ankraj kapasitesinin ekme derinliği arttıkça azalan getiri gösterdiğini ve 10D ekme derinliğinin kritik bir eşik oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Her iki sistemde de kapasite ankraj mekanizması tarafından kontrol edilmiştir. Ancak nervürlü çubuklar sünek, GFRP çubuklar ise gevrek davranış sergilemiştir.
- **Donatı Çapının Etkisi:** İncelenen tüm parametreler arasında çekme kapasitesi üzerinde en belirleyici etken donatı çapı olmuştur. 16 mm çaplı donatılar, 12 mm çaplı donatılara kıyasla:
 - Nervürlü donatılarda yaklaşık %40–45,
 - GFRP donatılarda yaklaşık %35–40 oranında daha yüksek çekme kapasitesi sağlamıştır. Bu artış, daha büyük çaplı donatıların hem daha yüksek kesit alanına hem de daha geniş aderans yüzeyine sahip olmasıyla ilişkilidir.
 - Nervürlü çelik ve GFRP çubuklarla yapılan kimyasal ankrajlarda, çubuk çapı arttıkça çekme kapasitesi belirgin şekilde artmıştır. 12 mm çapa sahip GFRP çubuklar nervürlü

çubuklara göre yaklaşık %6 daha yüksek ortalama kapasite verirken, 16 mm çaplı olanlarda iki malzeme neredeyse aynı kapasite seviyesine ulaşmıştır. Buna karşın çelik daha sünek davranış potansiyeli taşırken, GFRP'nin gevrek karakteri nedeniyle göçme daha ani olabileceğinden tasarım değerlendirmesinde kapasite kadar göçme modu da dikkate alınmalıdır.

- **Delik Çapının Etkisi:** Delik çapının D+2 mm'den D+4 mm'ye çıkarılması hem nervürlü hem de GFRP donatılarda çekme kapasitesini yalnızca %1–2 mertebesinde etkilemiştir. Bu farklar deneysel saçılma aralığı içinde kalmış olup, delik çapının incelenen aralıkta kapasiteyi belirleyen temel bir parametre olmadığı belirlenmiştir. Delik çapı seçiminin kapasite artışından ziyade uygulama toleransı ve işçilik kalitesi açısından önemli olduğu değerlendirilmiştir.
- **Donatı Cinsinin Etkisi (Nervürlü-GFRP):** Aynı çap için nervürlü ve GFRP donatıların ortalama çekme kapasiteleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur.
 - 12 mm çapta GFRP donatılar, nervürlü donatılara göre yaklaşık %6 daha yüksek ortalama kapasite göstermiştir.
 - 16 mm çapta ise iki donatı türü neredeyse eşdeğer kapasitelere ulaşmıştır. Buna karşın, iki donatı türü arasında davranış biçimi açısından belirgin farklar bulunmaktadır. Nervürlü donatılar sünek karakterleri sayesinde akma ve plastik deformasyon geliştirebilirken, GFRP donatılar akma davranışı göstermeyen, lineer-elastik ve gevrek bir davranış sergilemiştir. Bu nedenle, kapasite değerleri benzer olsa dahi tasarım açısından göçme davranışı temel ayırt edici unsur olmuştur.
- **Göçme Modlarının Değerlendirilmesi:** Göçme modu incelemeleri sonucunda:
 - GFRP donatıların tamamında göçmenin sıyrılma şeklinde gerçekleştiği,
 - Nervürlü donatılarda ise sıyrılmanın baskın olmakla birlikte, koni, koni + sıyrılma ve beton yarılmaması + sıyrılma gibi daha çeşitli göçme modlarının oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum, nervürlü donatıların betonla daha etkin bir yük aktarımı sağladığını ve göçmenin daha dağıtılmış ve kontrollü biçimde geliştiğini; GFRP donatıların ise daha ani ve aderans kontrollü bir göçme karakterine sahip olduğunu göstermektedir.
- **ACI 318'e Göre Güvenlik Düzeyleri:** ACI 318'e göre hesaplanan tasarım dayanımları ile deneysel sonuçların oranlanması sonucunda:
 - 12 mm çaplı donatılarda güvenlik düzeyleri 1.9–2.0,
 - 16 mm çaplı donatılarda ise yaklaşık 1.5 seviyesinde bulunmuştur.

Hem nervürlü hem de GFRP donatılarda çap arttıkça güvenlik düzeyinin azaldığı görülmüştür. Bu durum, büyük çaplı donatılarda deneysel kapasitenin, yönetmelikte öngörülen tasarım kapasitesine daha fazla yaklaşmasıyla açıklanabilir. Tüm numuneler için elde edilen güvenlik düzeyleri, ankrajların güvenli tarafta kaldığını göstermektedir.

- Deneysel sonuçları, kimyasal ankrajların çekme kapasitesi ve göçme davranışının yalnızca donatı ve geometrik parametrelere değil, aynı zamanda kullanılan epoksi/reçinenin aderans özelliklerine ve mekanik performansına da önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Özellikle GFRP donatılarda göçmenin tüm numunelerde sıyrılma şeklinde gerçekleşmesi, ankraj kapasitesinin büyük ölçüde reçine–donatı–beton ara yüzeyindeki aderans tarafından kontrol edildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, kimyasal ankraj tasarımında epoksi/reçine seçimi, en az donatı çapı ve ekme derinliği kadar kritik bir parametre olarak değerlendirilmelidir.
- Bu çalışmanın sonuçları, kimyasal ankraj tasarımında donatı çapının birincil, diğer geometrik parametrelerin ise ikincil rol oynadığını; nervürlü ve GFRP donatılar için farklı güvenlik yaklaşımlarının benimsenmesi gerektiğini ortaya koymuştur.
- GFRP donatıların yüksek çekme dayanımı, korozyona karşı üstün dirençleri ve hafiflik avantajları sayesinde kimyasal ankraj uygulamalarında nervürlü çelik donatılara güvenilir bir alternatif oluşturabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, GFRP donatıların akma davranışı göstermeyen ve gevrek karakteri nedeniyle, tasarım aşamasında donatı çapı seçimi, göçme modu ve güvenlik yaklaşımının dikkatle ele alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

- Abolghasem, A., Azimi, H., Sennah, K., & Tropynina, E.** (2013). *Experimental study on bond behavior of GFRP group anchorage*. Proceedings of the CSCE Annual Conference, Montreal, Kanada, s. 1-10.
- ACI**, American Concrete Institute. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318)*. USA: ACI, 2019, ACI 318-19.
- ACI**, American Concrete Institute. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars (*ACI 440.1R*). USA: ACI, 2015, ACI 440.1R-15.
- Ağdağ, Y.** (2019). *Kimyasal Ankraj Çekme Dayanımını Etkileyen Faktörler*. (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bilecik.
- Ahmed, A., Guo, S., Zhang, Z., Shi, C., & Zhu, D.** (2020). A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete. *Construction and Building Materials*, 256, 119484.
- Ahmed, E. A., El-Salakawy, E. F., & Benmokrane, B.** (2008). Tensile capacity of GFRP postinstalled adhesive anchors in concrete. *Journal of Composites for Construction*, 12(6), 596–607.
- Akbaş, T. T.** (2018). *CFRP Donatılarının Yüksek Dayanımlı Beton ile Aderansına Etki Eden Faktörlerin Deneysel Olarak İncelenmesi*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Algın, Z., Mermerdaş, K., & Şeker, M.** (2019). Yüksek sıcaklığın cam elyaf takviyeli polimer donatı ile beton arasındaki aderans dayanımına etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 804-813.
- Al-Salloum, Y. A., El-Gamal, S., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., & Aqel, M.** (2013). Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 835-844.
- Anand, R.S., & Patra, K.** (2017). Mechanistic cutting force modelling for micro-drilling of CFRP composite laminates. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 16, 55-58.

Aras, M. (2015). *Yapıştırıcı Türünün Ankraj Çekme Kuvvetine Etkisi ve Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.

Arslan, T. (2016). *Group Effect in Axially Loaded Chemical Anchors Embedded in Low Strength Concrete*. (Yüksek Lisans Tezi). İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Arslan, Ş. (2020). *FRP Donatılarda Durabilite* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

ASTM, American Society for Testing and Materials. *Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements*. USA: American Society for Testing and Materials, 1984, ASTM E488-84.

Aybar, K., Yıldırım, M. E., & Canbaz, M. (2023). A new approach to tensile testing of GFRP bars. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(3), 826-833.

Aydoğan, İ. (2015). *Kimyasal Ankrajlarda Çap, Gömme Derinliği ve Kenar Mesafesinin Çekme Kuvvetine Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.

Başaran, B., Kartal, S., & Kalkan, İ. (2019). GFRP donatı-beton arasındaki aderans gerilmesinin sıyrılmaya göçme tipi ile sonuçlanan çekip çıkarma deneyleri ile tespiti. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 203–216.

Brinksmeier, E., Fangmann, S., & Rentsch, R. (2011). Drilling of composites and resulting surface integrity. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 60, 57–60.

Ceroni, F., Darban, H., & Luciano, R. (2020). Analysis of bond behavior of injected anchors in masonry elements by means of Finite Element Modeling. *Composite Structures*, 241, 112099.

Chinaka, E., Shokouhian, M., Head, M., & Efe, S. (2019). An experimental investigation of bond strength of AFRP bars with self-consolidating concrete. *Civil Engineering Design*, 1(5-6), 148-160.

Cook R. A., Collins D. M., Klinger R., & Polyzois D. (1992). Load deflection behavior of cast-in-place and retrofit concrete anchors. *ACI Structural Journal*, V.89, No.6, 639-649.

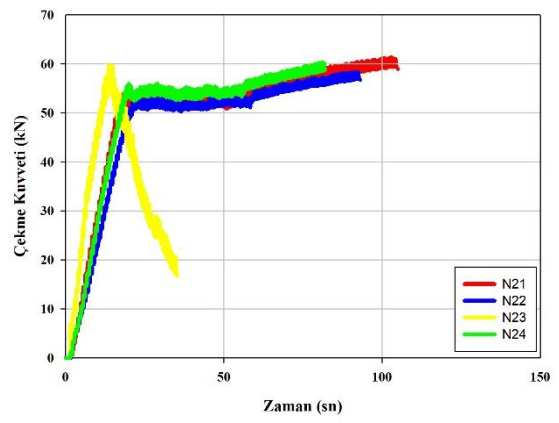
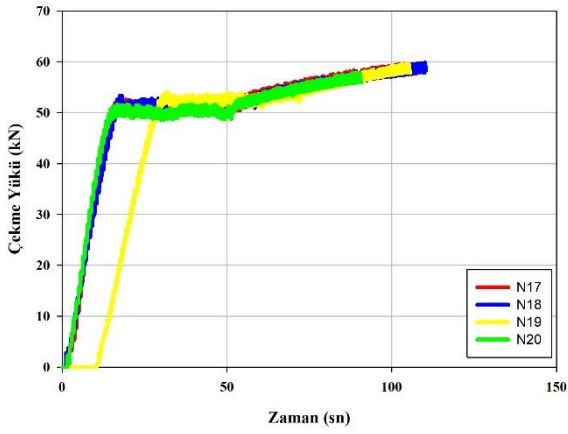
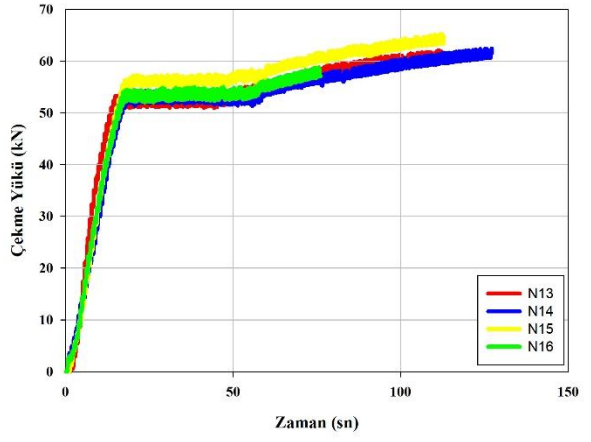
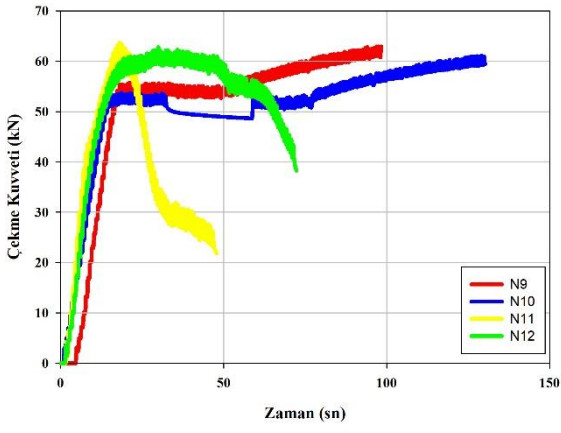
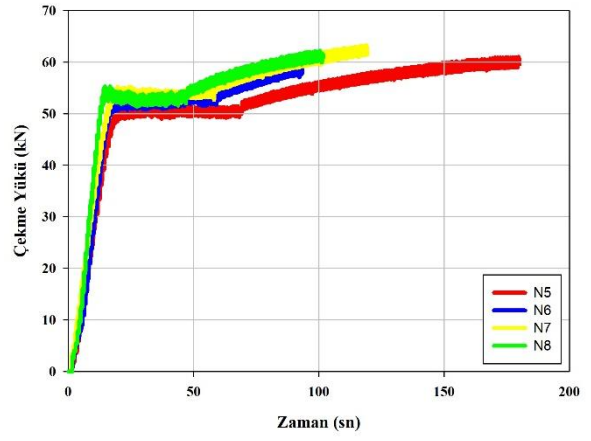
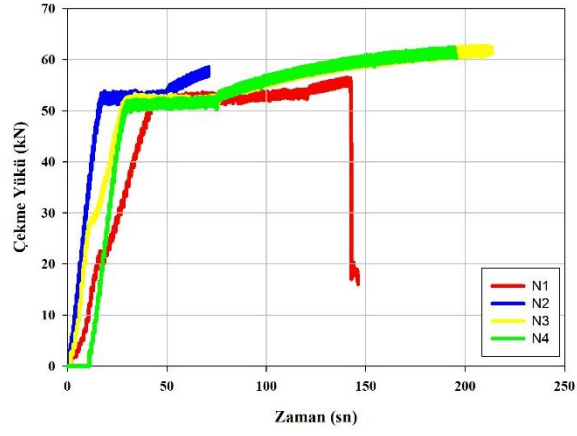
Cook, R. A., Doerr, G. T., & Klinger, R. (1993). Bond stress model for adhesive anchors. *ACI Structural Journal*, V.90, No.5, 514-524

- Çakıroğlu, M. O.** (2023). *GFRP Donatıların Beton ile Aderansına Donatı Yüzey Özellikleri ve Sıcaklık Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- Çalışkan Değirmenci, Ö., Aydoğan, İ., Aras, M., & Çerçevik, A. E.** (2016). Ankrajlarda Epoksi Kullanımı. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 69–74.
- Delhomme, F., & Brun, M.** (2018). *Pullout simulation of post installed chemically bonded anchors in UHPFRC*. MATEC Web of Conferences, 199, 11007.
- Genç, Ç.** (2006). *Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ghafoori, F.** (2021). *Çok Katlı Betonarme Binaların Kiriş ve Kolonlarında CFRP Donatı Davranışlarının Modelsel Olarak İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Gürbüz, T.** (2007). *Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan Kimyasal Ankrajların Eksenel Çekme Etkisi Altındaki Davranışlarının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kadı, M. E.** (2019). *Cam Elyaf Takviyeli Polimer Etriye Donatılı Diktörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerinin Kesme Davranışının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Karataş, M. A., & Gökçaya, H.** (2018). A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14(4), 318-326.
- Kaya, Y.** (2007). *Yapıların Güçlendirilmesi Uygulamalarında Kullanılabilecek Kısmi Bağlı Ankraj Detayı ve Yüzey Temizliği Koşulları Altında Ankrajların Eksenel Çekme Davranışlarının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lu, Z., Su, L., Xian, G., Lu, B., & Xie, J.** (2020). Durability study of concrete-covered basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars in marine environment. *Composite structures*, 234, 111650.
- Mohamed, O. A., Al Hawat, W., & Keshawarz, M.** (2021). Durability and mechanical properties of concrete reinforced with basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars: Towards sustainable infrastructure. *Polymers*, 13(9), 1402.
- Nkurunziza, G., Debaiky, A., Cousin, P., & Benmokrane, B.** (2005). Durability of GFRP bars: A critical review of the literature. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(4), 194–209.

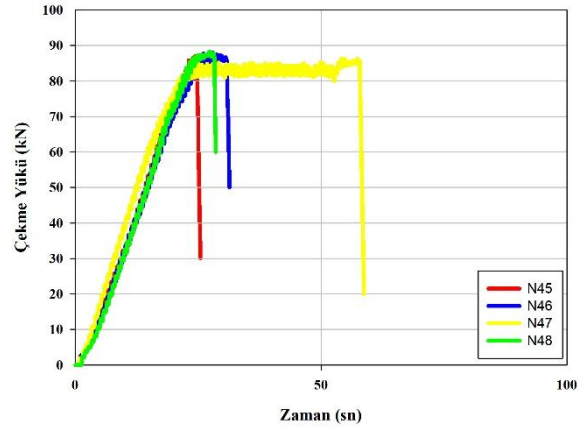
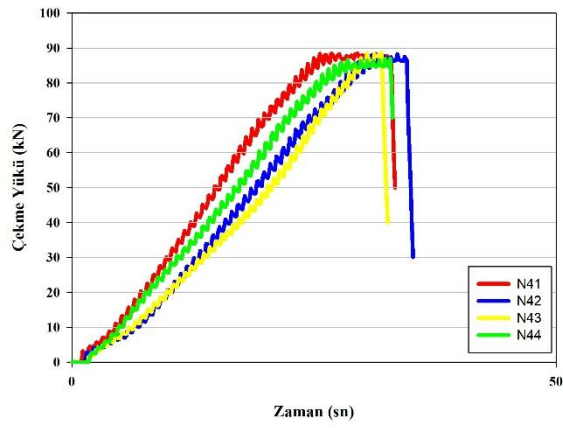
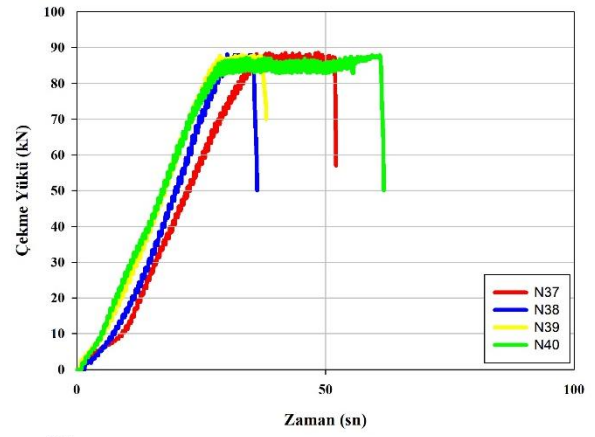
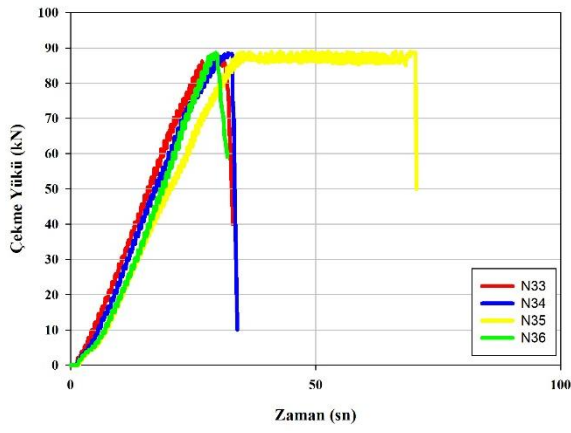
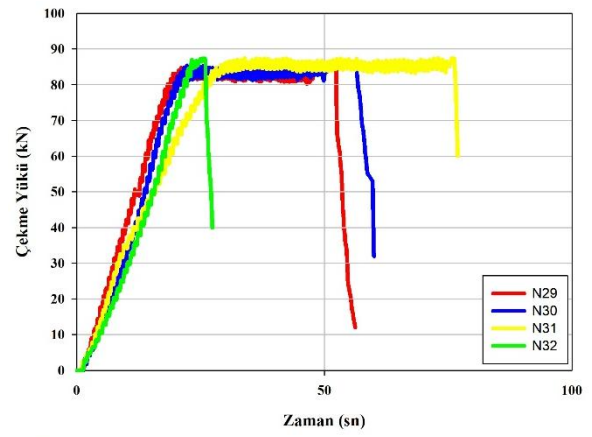
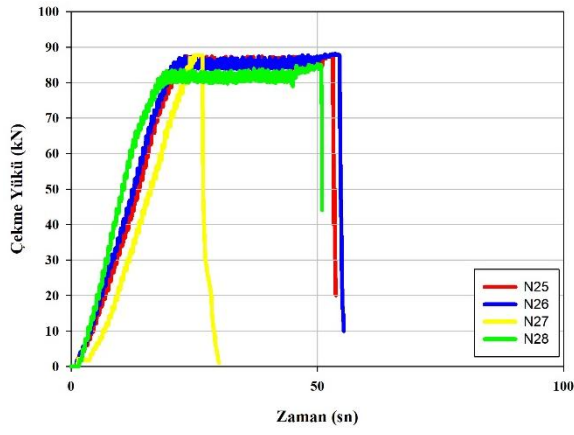
- Özdemir, Ö.** (2022). *Çekme Kuvvetleri Etkisindeki Kimyasal Ankrajlarda Grup Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Özen, M. A.** (2010). *Düşük ve Normal Dayanımlı Betonlarda Epoksi Ankrajların Çekme Davranışı*. (Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Özkul, H., Mutlu, M., & Sağlam, A. R.** (2001). Beton Ankrajları. *Sika Teknik Bülten*, 4, 1-11.
- Özşahin, B., Mülayim, A., & Arkoç, O.** (2015). *Betonarme yapı elemanlarında lif takviyeli polimerlerin kullanımı*. IX Sinan Symposium Book of Proceedings, Edirne, Türkiye, s. 109-115.
- Selcuk, S., Ahmetoglu, U., & Gokce, E. C.** (2023). Basalt fiber reinforced polymer composites (BFRP) other than rebars: a review. *Materials Today Communications*, 37, 107359.
- Seyhan, E. C.** (2006). *Kimyasal Ankrajların Davranışlarının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Toplu, E., Arslan, Ş., Kirtel, O., & Aydın, F.** (2023). Gfrp donatılı betonarme bir yapının performansının karşılaştırmalı incelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 346-362.
- Tóth, M., Bokor, B., & Sharma, A.** (2019). Anchorage in steel fiber reinforced concrete—concept, experimental evidence and design recommendations for concrete cone and concrete edge breakout failure modes. *Engineering Structures*, 181, 60-75.
- Türkay, N.** (2020). *Polimerik İnşaat Donatılarının Kimyasal Ankraj Performansının Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- TSE**, Türk Standardları Enstitüsü. *Çelik - Betonarme İçin - Donatı Çeliği*. Türkiye: Türk Standardları Enstitüsü, 2016, TS 708.
- TSE**, Türk Standardları Enstitüsü. *Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları*. Türkiye: Türk Standardları Enstitüsü, 2016, TS 802.
- TSE**, Türk Standardları Enstitüsü. *Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini*. Türkiye: Türk Standardları Enstitüsü, 2019, TS EN 12390-3.
- Yavuz, G.** (2011). Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı. *Engineering Sciences*, 6(4), 1001-1015.
- Zhou, J., Chen, X., & Chen, S.** (2011). Durability and service life prediction of GFRP bars embedded in concrete under acid environment. *Nuclear Engineering and Design*, 241(10), 4095-4102.

EKLER

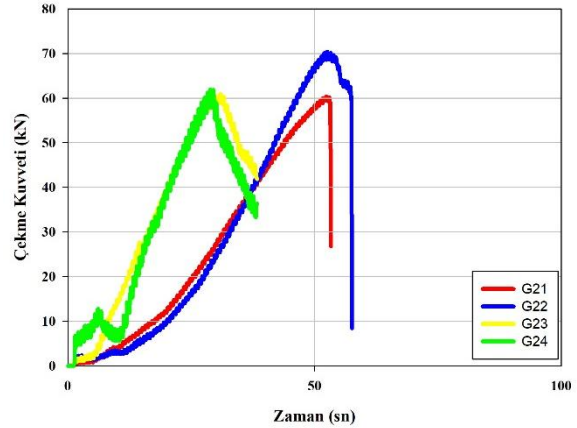
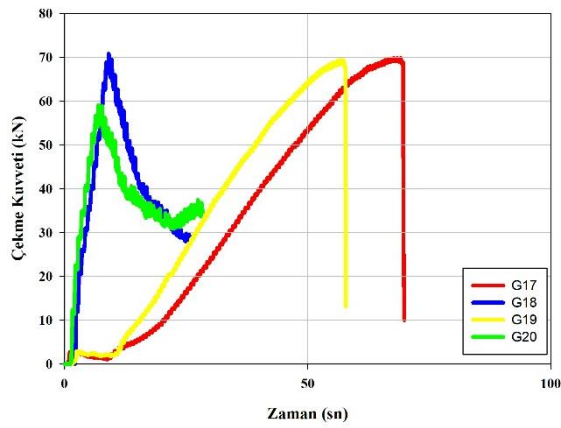
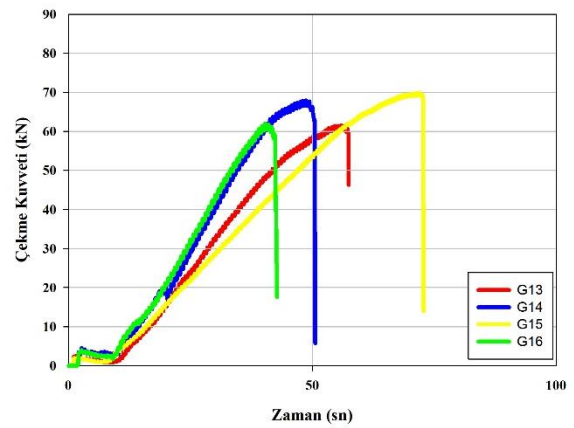
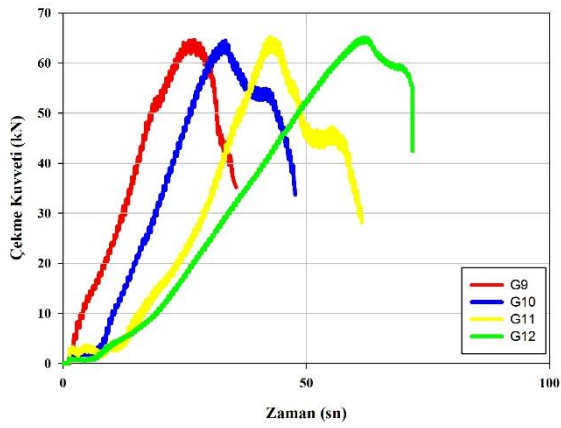
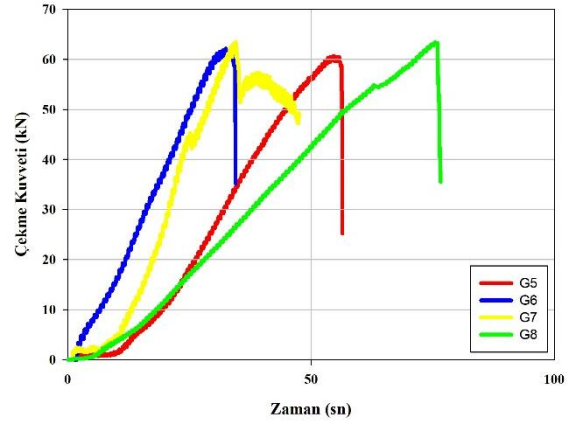
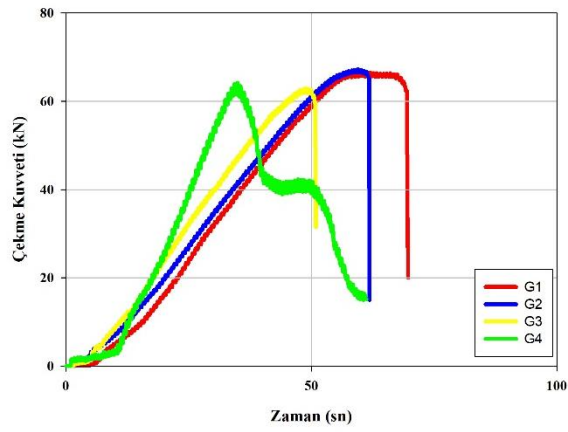
EK-1: N1-N24 Numunelere Ait Yük-Zaman Grafikleri



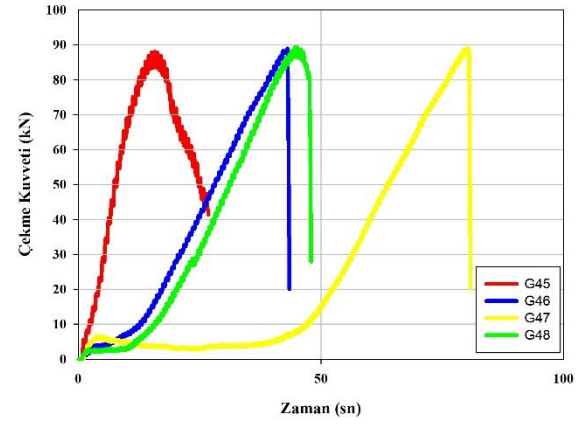
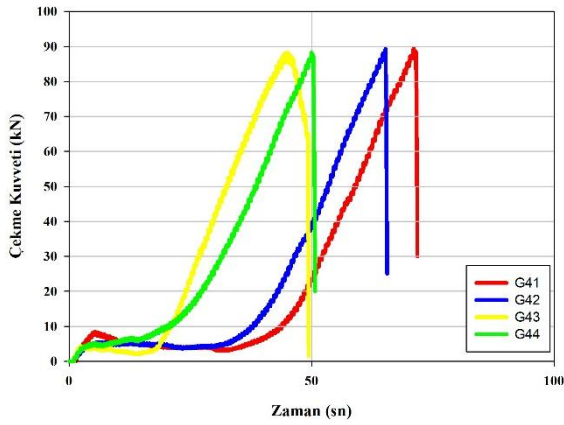
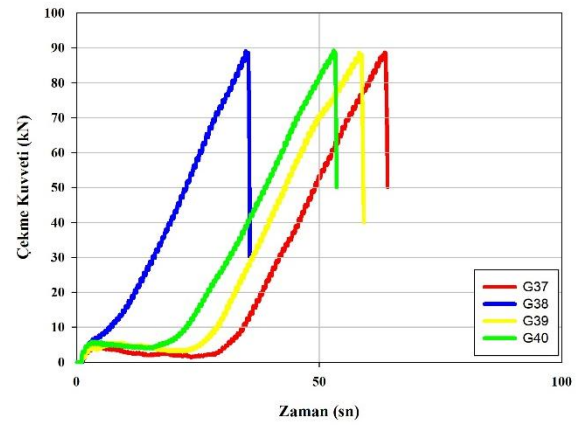
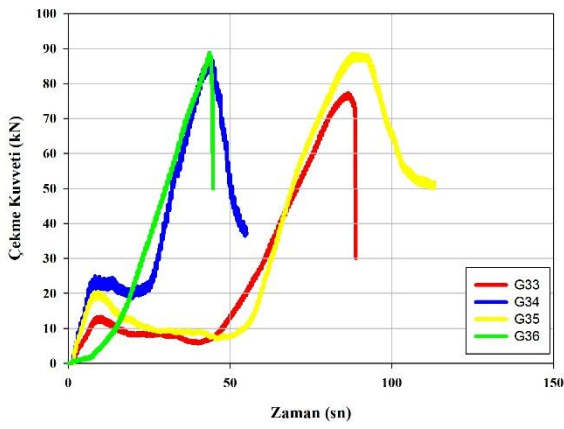
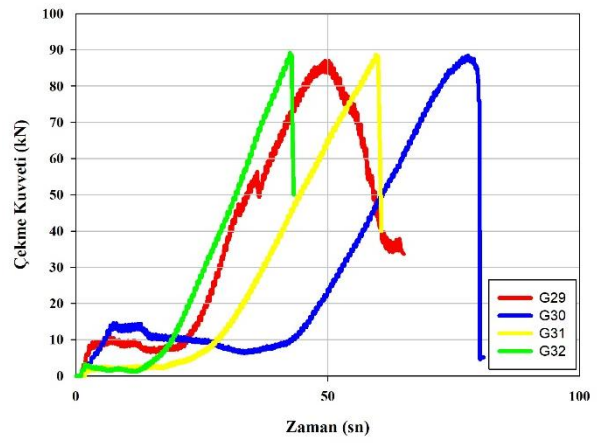
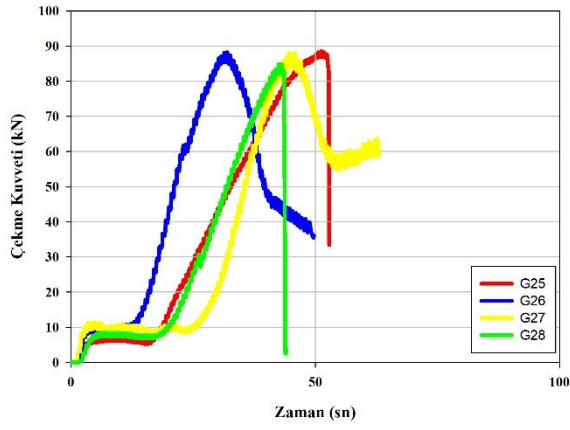
EK-2: N25-N48 Numunelere Ait Yük-Zaman Grafikleri



EK-3: G1-G24 Numunelere Ait Yük-Zaman Grafikleri



EK-4: G25-G48 Numunelere Ait Yük-Zaman Grafikleri



EK-5: N1-N12 Numunelere Ait Deney Sonrası Görüntüler



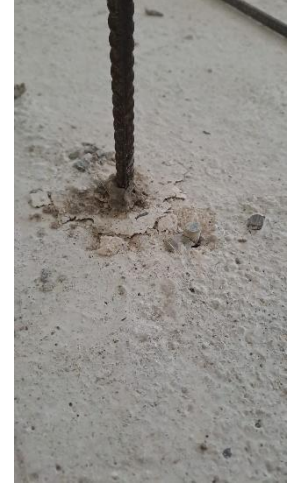
N1



N2



N3



N4



N5



N6



N7



N8



N9



N10



N11



N12

EK-6: N13-N24 Numunelere Ait Deney Sonrası Görüntüler



N13



N14



N15



N16



N17



N18



N19



N20



N21



N22



N23



N24

EK-7: N25-N36 Numunelere Ait Deney Sonrası Görüntüler



N25



N26



N27



N28



N29



N30



N31



N32



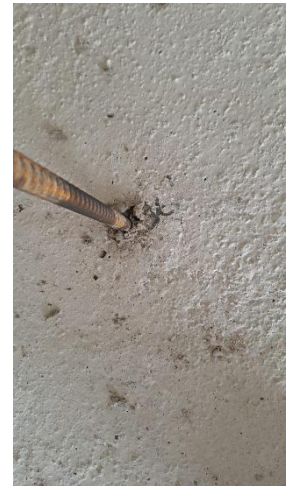
N33



N34



N35



N36

EK-8: N37-N48 Numunelere Ait Deney Sonrası Görüntüler



N37



N38



N39



N40



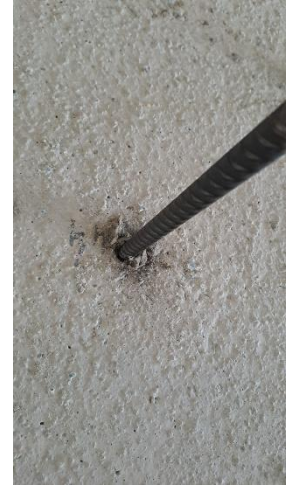
N41



N42



N43



N44



N45



N46



N47



N48

EK-9: G1-G12 Numunelere Ait Deney Sonrası Görüntüler



G1



G2



G3



G4



G5



G6



G7



G8



G9



G10



G11



G12

EK-10: G13-G24 Numunelere Ait Deney Sonrası Görüntüler



G13



G14



G15



G16



G17



G18



G19



G20



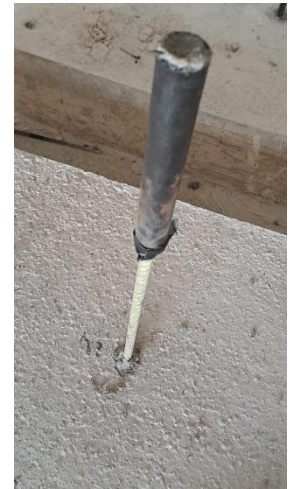
G21



G22



G23



G24

EK-11: G25-G36 Numunelere Ait Deney Sonrası Görüntüler



G25



G26



G27



G28



G29



G30



G31



G32



G33



G34



G35



G36

EK-12: G37-G48 Numunelere Ait Deney Sonrası Görüntüler



G37



G38



G39



G40



G41



G42



G43



G44



G45



G46



G47



G48

EK-13: Nervürlü ve GFRP Çubukların Göçme Modları

Adı	Numune	Göçme Modu
		Beton
N1	yarılması+Sıyırılma	
N2	Koni+Sıyırılma	
N3	Koni+Sıyırılma	
N4	Koni+Sıyırılma	
N5	Koni+Sıyırılma	
N6	Sıyırılma	
N7	Sıyırılma	
N8	Sıyırılma	
N9	Sıyırılma	
N10	Sıyırılma	
N11	Sıyırılma	
N12	Sıyırılma	
N13	Koni+Sıyırılma	
N14	Koni+Sıyırılma	
N15	Koni+Sıyırılma	
N16	Koni+Sıyırılma	
N17	Koni+Sıyırılma	
N18	Sıyırılma	
N19	Sıyırılma	
N20	Sıyırılma	
N21	Koni+Sıyırılma	
N22	Koni+Sıyırılma	
N23	Sıyırılma	
N24	Sıyırılma	
N25	Sıyırılma	
N26	Koni+Sıyırılma	
N27	Koni+Sıyırılma	
N28	Sıyırılma	
N29	Koni+Sıyırılma	
N30	Koni+Sıyırılma	
N31	Koni+Sıyırılma	
N32	Koni+Sıyırılma	
N33	Sıyırılma	
N34	Sıyırılma	
N35	Sıyırılma	
N36	Sıyırılma	
N37	Koni	
N38	Koni	
N39	Sıyırılma	
N40	Koni	
N41	Sıyırılma	
N42	Sıyırılma	
N43	Sıyırılma	
N44	Sıyırılma	
N45	Sıyırılma	
N46	Sıyırılma	
N47	Sıyırılma	
N48	Sıyırılma	

Adı	Numune	Göçme Modu
G1		Sıyırılma
G2		Sıyırılma
G3		Sıyırılma
G4		Sıyırılma
G5		Sıyırılma
G6		Sıyırılma
G7		Sıyırılma
G8		Sıyırılma
G9		Sıyırılma
G10		Sıyırılma
G11		Sıyırılma
G12		Sıyırılma
G13		Sıyırılma
G14		Sıyırılma
G15		Sıyırılma
G16		Sıyırılma
G17		Sıyırılma
G18		Sıyırılma
G19		Sıyırılma
G20		Sıyırılma
G21		Sıyırılma
G22		Sıyırılma
G23		Sıyırılma
G24		Sıyırılma
G25		Sıyırılma
G26		Sıyırılma
G27		Sıyırılma
G28		Sıyırılma
G29		Sıyırılma
G30		Sıyırılma
G31		Sıyırılma
G32		Sıyırılma
G33		Sıyırılma
G34		Sıyırılma
G35		Sıyırılma
G36		Sıyırılma
G37		Sıyırılma
G38		Sıyırılma
G39		Sıyırılma
G40		Sıyırılma
G41		Sıyırılma
G42		Sıyırılma
G43		Sıyırılma
G44		Sıyırılma
G45		Sıyırılma
G46		Sıyırılma
G47		Sıyırılma
G48		Sıyırılma

EK-14: ACI 318'e Göre Nervürlü Çubukların Beklenen Kapasite ve Tasarım Dayanımı Değerleri

Numune Adı	ACI 318 Nsa (kN)	ACI 318 Ncbg (kN)	ACI 318 Npn (kN)	Dayanım azaltma katsayısı	ACI 318 kapasite dayanımı (kN)	ACI 318 tasarım dayanımı (kN)
N1	53.7	53.2	34.8	0.6	53.2	31.9
N2	53.7	71.0	34.8	0.6	53.7	32.2
N3	53.7	82.8	34.8	0.6	53.7	32.2
N4	53.7	94.6	34.8	0.6	53.7	32.2
N5	53.7	84.7	34.8	0.6	53.7	32.2
N6	53.7	108.6	34.8	0.6	53.7	32.2
N7	53.7	119.4	34.8	0.6	53.7	32.2
N8	53.7	137.6	34.8	0.6	53.7	32.2
N9	53.7	107.0	34.8	0.6	53.7	32.2
N10	53.7	127.9	34.8	0.6	53.7	32.2
N11	53.7	150.5	34.8	0.6	53.7	32.2
N12	53.7	174.8	34.8	0.6	53.7	32.2
N13	53.7	53.2	75.0	0.6	53.2	31.9
N14	53.7	71.0	75.0	0.6	53.7	32.2
N15	53.7	82.8	75.0	0.6	53.7	32.2
N16	53.7	94.6	75.0	0.6	53.7	32.2
N17	53.7	78.1	75.0	0.6	53.7	32.2
N18	53.7	97.8	75.0	0.6	53.7	32.2
N19	53.7	119.4	75.0	0.6	53.7	32.2
N20	53.7	137.6	75.0	0.6	53.7	32.2
N21	53.7	107.0	75.0	0.6	53.7	32.2
N22	53.7	127.9	75.0	0.6	53.7	32.2
N23	53.7	150.5	75.0	0.6	53.7	32.2
N24	53.7	174.8	75.0	0.6	53.7	32.2
N25	96.1	81.9	45.5	0.6	81.9	49.2
N26	96.1	109.2	45.5	0.6	96.1	57.7
N27	96.1	127.4	45.5	0.6	96.1	57.7
N28	96.1	145.7	45.5	0.6	96.1	57.7
N29	96.1	120.3	45.5	0.6	96.1	57.7
N30	96.1	150.5	45.5	0.6	96.1	57.7
N31	96.1	183.9	45.5	0.6	96.1	57.7
N32	96.1	211.8	45.5	0.6	96.1	57.7
N33	96.1	164.8	45.5	0.6	96.1	57.7
N34	96.1	197.0	45.5	0.6	96.1	57.7
N35	96.1	231.7	45.5	0.6	96.1	57.7
N36	96.1	269.1	45.5	0.6	96.1	57.7
N37	96.1	81.9	96.4	0.6	81.9	49.2
N38	96.1	109.2	96.4	0.6	96.1	57.7
N39	96.1	127.4	96.4	0.6	96.1	57.7
N40	96.1	145.7	96.4	0.6	96.1	57.7
N41	96.1	120.3	96.4	0.6	96.1	57.7
N42	96.1	150.5	96.4	0.6	96.1	57.7
N43	96.1	183.9	96.4	0.6	96.1	57.7
N44	96.1	211.8	96.4	0.6	96.1	57.7
N45	96.1	164.8	96.4	0.6	96.1	57.7
N46	96.1	197.0	96.4	0.6	96.1	57.7
N47	96.1	231.7	96.4	0.6	96.1	57.7
N48	96.1	269.1	96.4	0.6	96.1	57.7

EK-15: ACI 318'e Göre GFRP Çubukların Beklenen Kapasite ve Tasarım Dayanımı Değerleri

Numune Adı	ACI 318 N _{sa} (kN)	ACI 318 N _{cbg} (kN)	ACI 318 N _{pn} (kN)	Dayanım azaltma katsayısı	ACI 318 kapasite dayanımı (kN)	ACI 318 tasarım dayanımı (kN)
G1	53.7	53.2	34.8	0.6	53.2	31.9
G2	53.7	71.0	34.8	0.6	53.7	32.2
G3	53.7	82.8	34.8	0.6	53.7	32.2
G4	53.7	94.6	34.8	0.6	53.7	32.2
G5	53.7	84.7	34.8	0.6	53.7	32.2
G6	53.7	108.6	34.8	0.6	53.7	32.2
G7	53.7	119.4	34.8	0.6	53.7	32.2
G8	53.7	137.6	34.8	0.6	53.7	32.2
G9	53.7	107.0	34.8	0.6	53.7	32.2
G10	53.7	127.9	34.8	0.6	53.7	32.2
G11	53.7	150.5	34.8	0.6	53.7	32.2
G12	53.7	174.8	34.8	0.6	53.7	32.2
G13	53.7	53.2	75.0	0.6	53.2	31.9
G14	53.7	71.0	75.0	0.6	53.7	32.2
G15	53.7	82.8	75.0	0.6	53.7	32.2
G16	53.7	94.6	75.0	0.6	53.7	32.2
G17	53.7	78.1	75.0	0.6	53.7	32.2
G18	53.7	97.8	75.0	0.6	53.7	32.2
G19	53.7	119.4	75.0	0.6	53.7	32.2
G20	53.7	137.6	75.0	0.6	53.7	32.2
G21	53.7	107.0	75.0	0.6	53.7	32.2
G22	53.7	127.9	75.0	0.6	53.7	32.2
G23	53.7	150.5	75.0	0.6	53.7	32.2
G24	53.7	174.8	75.0	0.6	53.7	32.2
G25	100.0	81.9	45.5	0.6	81.9	49.2
G26	100.0	109.2	45.5	0.6	100.0	60.0
G27	100.0	127.4	45.5	0.6	100.0	60.0
G28	100.0	145.7	45.5	0.6	100.0	60.0
G29	100.0	120.3	45.5	0.6	100.0	60.0
G30	100.0	150.5	45.5	0.6	100.0	60.0
G31	100.0	183.9	45.5	0.6	100.0	60.0
G32	100.0	211.8	45.5	0.6	100.0	60.0
G33	100.0	164.8	45.5	0.6	100.0	60.0
G34	100.0	197.0	45.5	0.6	100.0	60.0
G35	100.0	231.7	45.5	0.6	100.0	60.0
G36	100.0	269.1	45.5	0.6	100.0	60.0
G37	100.0	81.9	96.4	0.6	81.9	49.2
G38	100.0	109.2	96.4	0.6	100.0	60.0
G39	100.0	127.4	96.4	0.6	100.0	60.0
G40	100.0	145.7	96.4	0.6	100.0	60.0
G41	100.0	120.3	96.4	0.6	100.0	60.0
G42	100.0	150.5	96.4	0.6	100.0	60.0
G43	100.0	183.9	96.4	0.6	100.0	60.0
G44	100.0	211.8	96.4	0.6	100.0	60.0
G45	100.0	164.8	96.4	0.6	100.0	60.0
G46	100.0	197.0	96.4	0.6	100.0	60.0
G47	100.0	231.7	96.4	0.6	100.0	60.0
G48	100.0	269.1	96.4	0.6	100.0	60.0