

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSİLİĞİ ANABİLİM DALI



ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON İLE DONATI
ARASINDAKİ ADERANSIN DENEYSEL İNCELENMESİ

MURAT EFDAL YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Baki ÖZTÜRK
Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL

BALIKESİR, EYLÜL - 2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON İLE DONATI ARASINDAKİ ADERANSIN DENEYSEL İNCELENMESİ**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

MURAT EFDAL YILMAZ

ÖZET

YÜKSEK PERFORMANSLI BETON İLE DONATI ARASINDAKİ ADERANSIN DENEYSEL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MURAT EFDAL YILMAZ

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ALTUĞ YAVAŞ)

BALIKESİR, EYLÜL - 2025

Bu tez çalışmasında, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) ile donatı arasındaki aderans davranışının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. İnceleme kapsamında; paspayı, kenetlenme boyu ve çelik lif varlığı gibi değişkenlerin aderans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel uygulamalar, donatı ile beton arayüzündeki yük aktarım mekanizmasının anlaşılmasına yönelik olarak, mafsallı kiriş deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma boyunca, donatı çapı sabit tutularak toplamda 12 adet kiriş tipi numune hazırlanmıştır. Numuneler, lifli ve lifsiz olmak üzere iki farklı UYPB karışımıyla üretilmiş; kenetlenme boyları 5φ ve 10φ olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, her grup için paspayı değerleri sırasıyla 14 mm, 28 mm ve 42 mm olacak şekilde farklılaştırılmıştır. Bu parametrelerin değişimiyle, donatı-beton birleşim bölgesindeki aderans dayanımı üzerindeki etkiler deneysel olarak gözlemlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, literatürde kısıtlı sayıda bulunan UYPB ve donatı arasındaki aderans ilişkisine dair çalışmalara katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular; yüksek dayanım ve dayanıklılık gerektiren yapı elemanlarında UYPB'nin donatı ile olan etkileşiminin daha iyi anlaşılmasına olanak tanımakta ve bu malzemenin mühendislik uygulamalarındaki güvenli kullanımı açısından tasarım sürecine veri sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Aderans, donatı, mafsallı kiriş deneyi, ultra yüksek performanslı beton (UYPB)

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON BENDING OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE AND REINFORCEMENT

MSC THESIS

MURAT EFDAL YILMAZ

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC.PROF. ALTUĞ YAVAŞ)

BALIKESİR, SEPTEMBER - 2025

In this thesis study, the main objective is to experimentally investigate the bond behavior between ultra-high-performance concrete (UHPC) and reinforcement. The study evaluates the effects of variables such as concrete cover thickness, anchorage length, and the presence of steel fibers on bond performance. Experimental procedures were conducted using a hinged beam test setup designed to analyze the load transfer mechanism at the concrete–reinforcement interface.

Throughout the experimental process, a total of 12 beam-type specimens were prepared with a constant reinforcement diameter. The specimens were produced using two different UHPC mixtures: with and without steel fibers. The anchorage lengths were set as 5ϕ and 10ϕ , while the concrete cover thicknesses were varied as 14 mm, 28 mm, and 42 mm for each group. The influence of these parameters on bond strength at the steel–concrete interface was experimentally observed and evaluated.

This study aims to contribute to the limited body of literature concerning the bond interaction between UHPC and reinforcement. The findings obtained provide valuable insight into the behavior of UHPC in structural elements requiring high strength and durability, and offer design-oriented data to support the safe and effective use of this material in engineering applications.

KEYWORDS: Bond, reinforcement, hinged beam test, ultra high performance concrete (UHPC)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
TEŞEKKÜR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton	1
1.2 Aderans	1
1.2.1 Aderans gerilmesi.....	2
1.2.2 Aderans türleri ve mekanizmaları	2
1.2.2.1 Kimyasal yapışma	3
1.2.2.2 Mekanik kenetlenme	3
1.2.2.3 Yüzey sürtünmesi	3
1.2.2.4 Genel değerlendirme	3
1.2.3 Aderans davranışını etkileyen faktörler	3
1.2.3.1 Betonun basınç dayanımı ve mikro yapısı	4
1.2.3.2 Donatı yüzey ve şekil geometrisi	4
1.2.3.3 Donatı çapı	4
1.2.3.4 Kenetlenme boyu.....	5
1.2.3.5 Paspayı (Beton örtüsü kalınlığı)	5
1.2.3.6 Betonun yaşı ve kür koşulları	5
1.2.3.7 Lif takviyesi.....	6
1.2.3.8 Donatı yerleşim konumu (Top Bar Effect).....	6
1.2.3.9 Yükleme türü ve hızı	6
1.2.3.10 Yüzey temizliği ve döküm kalitesi	7
2. MATERYAL	8
2.1 Çimento.....	8
2.2 Agregası.....	9
2.3 Su 10	
2.4 Katkı Maddeleri	11
2.4.1 Kimyasal katkıları	11
2.4.1.1 Süper akışkanlaştırıcıları	11
2.4.1.2 Priz düzenleyicileri	11
2.4.2 Mineral katkıları	12
2.4.2.1 Silis dumanı.....	12
2.4.2.2 Yüksek fırın cürufu (GGBS)	13
2.4.2.3 Uçucu kül	14
2.4.3 Çalışmadaki katkı malzemeleri	14
2.5 Lif Takviyesi	15

İÇİNDEKİLER(devam)

2.5.1 Çelik lifler	15
2.5.2 Cam elyaf	16
2.5.3 Polipropilen lif	17
2.5.4 Lif katkılarının etkileri	17
2.5.5 UYPB’da lif kullanımı	18
3. ADERANS GERİLMESİNE ETKİ EDEN DEĞİŞKENLER	19
3.1 Kenetlenme Boyu.....	19
3.2 Paspayı	20
3.3 Donatı Çapı	21
4. BETON-DONATI ADERANSINI DENEYLERİ	22
4.1 Pull-Out (Çekme) Deneyi	22
4.1.1 Deneyin temel prensibi	22
4.1.2 Deney düzeneği.....	23
4.1.3 Aderans gerilmesinin hesaplanması.....	24
4.1.4 Literatürde pull-out deneyi uygulamaları.....	24
4.1.5 Yorum ve sınırlamalar.....	24
4.2 Bureau of Standards Kiriş Deneyi	24
4.3 Teksas Çıkmalı Kiriş Deneyi	26
4.3.1 Deneyin tanımı ve uygulama prensibi	26
4.3.2 Avantajları ve uygulama alanları	27
4.4 Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi	27
4.4.1 Deneyin tanımı ve uygulama prensibi	28
4.4.2 Avantajları ve uygulama alanları	28
5. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR	29
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	45
6.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton Karışımı ve Üretimi.....	45
6.2 Test Kirişlerinin hazırlanışı.....	46
6.3 Test Düzenekleri	50
7. BULGULAR.....	52
7.1 5Φ-NF-14MM numunesine ilişkin deney sonuçları	52
7.2 5Φ-NF-28MM numunesine ilişkin deney sonuçları	53
7.3 5Φ-NF-42MM numunesine ilişkin deney sonuçları	54
7.4 10Φ-NF-14MM numunesine ilişkin deney sonuçları	54
7.5 10Φ-NF-28MM numunesine ilişkin deney sonuçları	55
7.6 10Φ-NF-42MM numunesine ilişkin deney sonuçları	56
7.7 5Φ-2F-14MM numunesine ilişkin deney sonuçları	57
7.8 5Φ-2F-28MM numunesine ilişkin deney sonuçları	58
7.9 5Φ-2F-42MM numunesine ilişkin deney sonuçları	59
7.10 10Φ-2F-14MM numunesine ilişkin deney sonuçları	60
7.11 10Φ-2F-28MM numunesine ilişkin deney sonuçları	61
7.12 10Φ-2F-42MM numunesine ilişkin deney sonuçları	62
7.13 Paspayı değişiminin aderansa etkisi.....	63
7.14 Lif katkısının aderans etkisi	65
8. SONUÇLAR	70

İÇİNDEKİLER(devam)

9. KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.1: Pull-out deney düzeneği	24
Şekil 4.2: Bureau of standart deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	26
Şekil 4.3: Teksas Çıkmalı Kiriş deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	27
Şekil 4.4: Belçika Mafsallı Kiriş deney düzeneği şematik gösterimi.	28
Şekil 6.1: Küp numune kalıpları	46
Şekil 6.2: Kiriş kalıplar	46
Şekil 6.3: $\phi 14$ Çelik donatılar ve özel kılıfların yerleştirilmesi	47
Şekil 6.4: Kiriş kalıpları; a) Lifli UYPB kalıpları b) Lifsiz UYPB kalıpları	47
Şekil 6.5: Lifsiz betonlu numunelerin kesme donatısı planları.....	47
Şekil 6.6: UYPLB üretiminde kullanılan pan mikser	49
Şekil 6.7: Her bir döküm setine ait örnek numuneler.	49
Şekil 6.8: Kür havuzu.....	50
Şekil 6.9: Beton test presini	50
Şekil 6.10: Kiriş Deney Düzeneği.....	51
Şekil 6.11: Kiriş Deney Düzeneği.....	51
Şekil 7.1: 5 Φ -NF-14MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	52
Şekil 7.2: 5 Φ -NF-14MM kodlu deney numunesi a) deney öncesi b)deney sonrası	53
Şekil 7.3: 5 Φ -NF-28MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	53
Şekil 7.4: 5 Φ -NF-28MM kodlu deney numunesi	53
Şekil 7.5: 5 Φ -NF-42MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	54
Şekil 7.6: 5 Φ -NF-42MM kodlu deney numunesi	54
Şekil 7.7: 10 Φ -NF-14MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	55
Şekil 7.8: 10 Φ -NF-14MM kodlu deney numunesi	55
Şekil 7.9: 10 Φ -NF-28MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	56
Şekil 7.10: 10 Φ -NF-28MM kodlu deney numunesi	56
Şekil 7.11: 10 Φ -NF-42MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	57
Şekil 7.12: 10 Φ -NF-42MM kodlu deney numunesi	57
Şekil 7.13: 5 Φ -2F-14MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	58
Şekil 7.14: 5 Φ -2F-14MM kodlu deney numunesi	58
Şekil 7.15: 5 Φ -2F-28MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	59
Şekil 7.16: 5 Φ -2F-28MM kodlu deney numunesi	59
Şekil 7.17: 5 Φ -2F-42MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	60
Şekil 7.18: 5 Φ -2F-42MM kodlu deney numunesi	60
Şekil 7.19: 10 Φ -2F-14MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	61
Şekil 7.20: 10 Φ -2F-14MM kodlu deney numunesi	61
Şekil 7.21: 10 Φ -2F-28MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	62
Şekil 7.22: 10 Φ -2F-28MM kodlu deney numunesi	62
Şekil 7.23: 10 Φ -2F-42MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği.....	63
Şekil 7.24: 10 Φ -2F-42MM kodlu deney numunesi	63
Şekil 7.25: 5 Φ -NF-(14,28 ve 42MM) kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği	64
Şekil 7.26: 10 Φ -NF-(14,28 ve 42MM) kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği	64
Şekil 7.27: 5 Φ -2F-(14,28 ve 42MM) kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği	65
Şekil 7.28: 10 Φ -2F-(14,28 ve 42MM) kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği	65
Şekil 7.29: 5 Φ -(NF ve 2F)-14MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği....	66
Şekil 7.30: 5 Φ -(NF ve 2F)-28MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği....	66

- Şekil 7.31:** 5Φ-(NF ve 2F)-42MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyırılma grafiği.... 67
- Şekil 7.32:** 10Φ-(NF ve 2F)-14MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyırılma grafiği.. 67
- Şekil 7.33:** 10Φ-(NF ve 2F)-28MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyırılma grafiği.. 68
- Şekil 7.34:** 10Φ-(NF ve 2F)-42MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyırılma grafiği.. 68

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Lif çeşitlerinin etkileri	17
Tablo 6.1: Ultra yüksek performanslı beton karışım oranları.....	45
Tablo 6.2: Test numuneleri.....	48
Tablo 7.1: Deney Sonuçları	69

SEMBOL LİSTESİ VE KISALTMALAR LİSTESİ

%	:Yüzde
A_c	:Beton kesit alanı (mm ²)
A_s	:Çelik donatı kesit alanı (mm ²)
CEM I 42.5 R	:Yüksek dayanımlı Portland çimentosu
G	:Kayma modülü (MPa)
L	:Donatı gömme boyu (mm)
V	:Hacim (m ³)
W/B	:Su/bağlayıcı oranı (-)
C	:Paspayı (mm)
D	:Donatı çapı (mm)
f'_c	:Betonun karakteristik silindir basınç dayanımı (MPa)
kg/m^3	:Kilogram/metreküp
s	:Donatı aralığı veya çatlak aralığı (mm)
w	:Çatlak genişliği (mm)
w/c	:Su/çimento oranı (-)
°C	:Santigrat derece
Δ	:Yer değiştirme (mm)
Γ	:Birim hacim ağırlık (kg/m ³)
E	:Birim deformasyon (-)
ν	:Poisson oranı (-)
ρ	:Donatı oranı (%)
σ	:Normal gerilme (MPa)
τ	:Aderans gerilmesi (MPa)
BSBT	:Bureau of Standards Beam Test
E_c	:Betonun elastisite modülü (MPa)
E_s	:Çeliğin elastisite modülü (MPa)
FA	:Uçucu kül
FTIR	:Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GFRP	:Cam Elyaf Takviyeli Polimer
HRWRA	:Yüksek oranda su azaltıcı katkı
ITZ	:Geçiş bölgesi
MKT	:Mafsallı Kiriş Deneyi
MPa	:Megapascal – Basınç/gerilme birimi
PP	:Polipropilen lifi
RPC	:Reaktif Toz Beton
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
SF	:Silis dumanı
SL	:Çelik lifi
SRA	:Kürsüz rötre azaltıcı katkı
TPT	:Texas Push-Out Test
UHPC	:Ultra Yüksek Performanslı Beton
UHPFRC	:Ultra Yüksek Performanslı Fiber Takviyeli Beton
XRD	:X-Işını Kırınımı
Cm	:Santimetre
F_{ct}	:Betonun çekme dayanımı (MPa)
F_t	:Doğrultu çekme dayanımı (MPa)

f_u :Donatının kopma dayanımı (MPa)
 f_y :Çelik donatının akma dayanımı (MPa)
 f_{yd} :Tasarım akma dayanımı (MPa)
mm :Milimetre

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle yol gÖsteren, değerli katkıları ve desteğiyle yanımda olan kıymetli tez danıŐmanım Sayın Doç. Dr. Altuğ Yavaş'a en içten teŐekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez sürecinde değerli katkılarıyla destek olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tamer Birol'a da teşekkür ederim.

Akademik hayatım ile iŐ yaŐamımı birlikte sürdürebilmem konusunda gösterdiği anlayıŐ ve sağladığı destek nedeniyle Kepsut Belediye BaŐkanı Sayın İsmail Cankul'a ve Fen İŐleri Müdürü Sayın Vedat Aslan'a teŐekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte sabır ve anlayıŐlarıyla her zaman yanımda olan sevgili anneme, babama ve kardeŐime; moral kaynağım olan biriciğim Merve'ye ve desteklerini esirgemeyen tüm dostlarıma gönülden minnettarım.

Balıkesir, 2025

MURAT EFDAL YILMAZ

1. GİRİŞ

1.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB), gelişen malzeme teknolojilerinin bir ürünü olarak, son yıllarda inşaat mühendisliği alanında dikkat çeken yenilikçi beton türlerinden biri hâline gelmiştir (Aitcin, 2000; Graybeal, 2006). Özellikle yüksek dayanım, dayanıklılık ve uzun servis ömrü gerektiren yapısal uygulamalarda tercih edilmektedir. UYPB'nin bu üstün nitelikleri, ince taneli agregaların kullanımı, oldukça düşük su/bağlayıcı oranı ve özel mineral katkı malzemelerinin optimize edilmesiyle sağlanmaktadır (Mehta & Monteiro, 2014).

Bu beton türü, özel bir kür prosedürü uygulanmaksızın standart kür koşullarında yaklaşık 150 MPa mertebesinde basınç dayanımı elde edebilmektedir. Ancak, buharla kür, ısıtmalı kür gibi termal işlemler ile yüksek performanslı kimyasal katkıların birlikte kullanılması hâlinde bu dayanım düzeyi 200 MPa ve üzerine çıkabilmektedir (Neville, 2011).

Yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra, UYPB aynı zamanda düşük geçirgenlik, yüksek elastisite modülü, gelişmiş çatlak kontrol kapasitesi ve olağanüstü dayanıklılık gibi önemli mühendislik avantajları sunmaktadır (Aitcin, 2000; Richard & Cheyrezy, 1995). Bu özellikleri sayesinde, köprüler, altyapı sistemleri, yüksek yapı elemanları, nükleer santral yapıları ve patlamaya dayanıklı tesisler gibi özel güvenlik veya yüksek performans gerektiren yapılarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Graybeal, 2010).

1.2 Aderans

Betonarme sistemlerde, taşıyıcı elemanların rijitliğini ve bütünlüğünü sağlayan temel etkileşim, beton ile çelik donatı arasındaki bağıdır (Neville,2011). Bu bağ, esas olarak "aderans" olarak tanımlanan kayma kuvvetleri aracılığıyla gerçekleşir (Orangun, Jirsa & Breen, 1977). Aderans kuvvetleri, donatı çubuklarının beton içinde aksel yönde kaymasını engelleyerek iki malzeme arasında etkili bir kenetlenme oluşturur (Eligehausen, Popov & Bertero, 1983). Bu kenetlenme, yüklerin donatıdan betona veya betondan donatıya aktarılmasını mümkün kılar ve böylece betonarme elemanların birleşik bir şekilde çalışmasını sağlar (Mehta & Monteiro, 2014).

Aderansın sağladığı bu birleşik davranış, özellikle çekme kuvvetlerinin taşınmasında büyük önem arz eder; çünkü çekme yükleri doğrudan çelik donatı aracılığıyla karşılanır

(Neville, 2011). Bu nedenle aderans, betonarme yapıların hem taşıma kapasitesinin hem de süneklik davranışının belirlenmesinde kritik bir rol üstlenmektedir (Eligehausen et al., 1983).

1.2.1 Aderans gerilmesi

Aderans, donatının beton içerisindeki konumunu koruyarak kaymasını önler ve birleşik taşıma davranışı oluşturur. Bu bağ kuvvetinin birim alanda meydana getirdiği kayma tipi gerilme ise aderans gerilmesi olarak adlandırılır ve genellikle megapaskal (MPa) birimiyle ifade edilir.

Aderans gerilmesi, donatının çevresini saran beton tabakasında gelişen bağ kuvvetlerinin sonucunda ortaya çıkar. Uygulanan yük arttıkça, bu kayma gerilmesi de yükselir; belirli bir seviyeye ulaştığında bağın kopması veya donatının sıyrılması gibi olumsuz durumlar meydana gelebilir (ACI 408R-03, 2003). Bu yüzden aderans gerilmesinin sınır değerleri yapısal güvenliğin sağlanması açısından dikkatle analiz edilmelidir.

Gerilmenin büyüklüğü ve bağ uzunluğu boyunca dağılımı; betonun dayanımı, donatının yüzey şekli (düz veya nervürlü), paspayı kalınlığı, bağ uzunluğu ve uygulanan yükün tipi gibi birçok parametreden etkilenir. Literatürde yapılan deneysel çalışmalar, aderans gerilmesinin genellikle donatının serbest ucuna yakın bölgelerde maksimuma ulaştığını ve bağ uzunluğu boyunca azalarak devam ettiğini göstermektedir (Orangun et al., 1977; Harajli, 2007).

Yüklem türü ve yüklem hızı da bu gerilme davranışını etkilemektedir. Özellikle tekrarlı ya da darbe tipi yükler altında aderans gerilmesi zaman içinde azalarak donatı-beton arayüzünde hasarın birikmesine neden olabilir.

1.2.2 Aderans türleri ve mekanizmaları

Betonarme yapıların taşıyıcı sistemlerinde, çelik donatı ile beton arasındaki bağ kuvveti olan aderans, yapının bütünsel davranışını belirleyen temel parametrelerden biridir. Literatürde aderans; kimyasal yapışma, mekanik kenetlenme ve yüzey sürtünmesi olmak üzere üç temel bileşenin birlikte etkileşimi sonucu oluşan karmaşık bir mekanizma olarak tanımlanmaktadır (ACI Committee 408R-03, 2003; CEB-FIP Model Code, 2010).

1.2.2.1 Kimyasal yapışma

Kimyasal yapışma, çimento hamurunun hidratasyonu sonucu oluşan ürünlerin, donatı yüzeyiyle moleküler düzeyde oluşturduğu bağ kuvvetidir. Bu bağ, betonun priz alma sürecinde gelişir ve aderansın başlangıç aşamasında önemli bir rol oynar (Neville, 2011). Ancak bu kuvvet, özellikle yüzeyi pürüzsüz olan düz donatılarda, yük etkisiyle hızla ortadan kalkabilir. Yine de kür koşullarının uygun şekilde sağlanması, kimyasal yapışmanın aderans performansına olumlu katkıda bulunmasına olanak tanır.

1.2.2.2 Mekanik kenetlenme

Mekanik kenetlenme, betonun donatı yüzeyindeki çıkıntı ve girintilere fiziksel olarak tutunmasıyla oluşur. Nervürlü (ribbed) donatıların kullanıldığı betonarme sistemlerde bu etki, aderansın baskın bileşeni haline gelir. Donatı üzerindeki nervürler, yük aktarımı sırasında betonla arasında kilitleme etkisi yaratarak donatının kaymasını engeller (Tepfers, 1979). Özellikle yüksek dayanımlı betonlarda, mekanik kenetlenme aderans kapasitesinin belirlenmesinde başat rol oynamaktadır (Harajli, 2007).

1.2.2.3 Yüzey sürtünmesi

Yükleme sırasında kimyasal yapışmanın ortadan kalkması veya betonun donatı etrafında çatlaması durumunda, aderansın devamı yüzey sürtünmesiyle sağlanır. Bu mekanizma, donatının beton içinde aksel yönde yer değiştirmesine karşı gelişen sürtünme direncidir. Sürtünme, özellikle tekrarlı yüklemeler, darbe etkileri veya artan bağ gerilmesi koşullarında aktif hale gelir ve donatının sıyrılmasını geciktirir (Eligehausen et al., 1983).

1.2.2.4 Genel değerlendirme

Aderansın gelişimi, yukarıda açıklanan üç bileşenin toplam etkisine bağlıdır. Bu bileşenlerin göreceli etkinlikleri, başta donatının geometrisi (çap, yüzey şekli), betonun basınç dayanımı, paspayı kalınlığı, kür şartları ve yükleme türü olmak üzere birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu nedenle, betonarme yapıların güvenli tasarımı için aderans performansının bu faktörler dikkate alınarak değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir (Orangun et al., 1977; Harajli, 2007)

1.2.3 Aderans davranışını etkileyen faktörler

Betonarme sistemlerde donatı ile beton arasındaki etkileşim, yapının yük taşıma kapasitesi ve süneklik düzeyini doğrudan belirler. Bu etkileşimin temelini oluşturan aderans; malzeme özellikleri, geometrik parametreler, üretim kalitesi ve yükleme koşulları gibi birçok değişkenin etkisi altındadır.

1.2.3.1 Betonun basınç dayanımı ve mikro yapısı

Betonun basınç dayanımı arttıkça, donatının çevresindeki beton matrisinin çatlamaya karşı direnci de artar. Yüksek dayanımlı betonlarda, çimento hamuru daha yoğun ve geçirimsiz bir yapı sergiler. Bu, donatı etrafındaki aderans kuvvetlerinin gelişimini destekler. Ancak bu betonlar aynı zamanda daha gevrek davranış gösterme eğilimindedir. Bu durum, yüksek aderans kapasitesine karşın ani bağ kopması veya sıyrılma gibi istenmeyen davranışlara neden olabilir.

Düşük dayanımlı betonlarda aderans; yüzey yapışması ve sürtünmeye daha bağımlıdır.

Yüksek dayanımlı betonlarda mekanik kenetlenme baskındır.

Gevrek kırılma riski, ani aderans kaybına yol açabilir (Graybeal, 2006).

1.2.3.2 Donatı yüzey ve şekil geometrisi

Donatının yüzey profili, aderansın gelişiminde belirleyici bir unsurdur. Nervürlü (ribbed) donatılar, yüzeylerindeki girinti ve çıkıntılar aracılığıyla beton ile fiziksel bir kenetlenme oluşturur. Bu mekanik kilitleme, aderans kapasitesini ciddi şekilde artırırken, düz donatılarda bu katkı mevcut değildir.

Nervür tipi, yüksekliği, yönü: aderans kapasitesini doğrudan etkiler.

Yüzey pası veya kaplamalar (epoksi, galvaniz): aderans davranışını hem artırabilir hem de azaltabilir (kaplama kalınlığına bağlı).

1.2.3.3 Donatı çapı

Donatı çapı büyüdükçe, aderans kuvvetinin etkili olduğu yüzey alanı artar. Ancak yük aktarımı donatı boyunca homojen olarak dağılmadığından, büyük çaplı donatılarda kenetlenme boyu yetersiz kalırsa sıyrılma riski yükselir.

Çap büyüdükçe aderans gerilmesi donatının serbest ucuna yakın bölgelerde yoğunlaşır (ACI 408, 2003).

Büyük çaplı donatılar için daha uzun kenetlenme boyu gereklidir.

Donatı çapının küçük olması durumunda, aderansın gevrek kırılma yerine daha sünek kopma şeklinde gelişmesi olasıdır.

1.2.3.4 Kenetlenme boyu

Kenetlenme boyu, aderans kuvvetinin yükü çelik donatıdan betona aktardığı mesafedir. Bağ uzunluğu arttıkça, yük aktarımına katılan beton hacmi artar ve bu durum aderansı artırır. Ancak belirli bir uzunluğun üzerinde, aderans kapasitesindeki artış sınırlı hale gelir.

Yetersiz bağ boyu → sıyrılmaya tipi kopma.

Aşırı bağ boyu → etkin olmayan “ölü bölge” oluşumu.

Optimum bağ boyu; donatı çapına, betonun dayanımına ve yükleme şekline göre belirlenmelidir.

1.2.3.5 Paspayı (Beton örtüsü kalınlığı)

Paspayı, donatının dış yüzeyi ile beton yüzeyi arasındaki mesafedir. Bu örtü, hem donatının korozyona karşı korunmasında hem de aderans kuvvetinin gelişiminde etkilidir.

Çok düşük paspayı: çatlak oluşumuna ve kenetlenmenin zayıflamasına neden olur.

Aşırı yüksek paspayı: donatının çekirdek betonla olan etkileşimini azaltabilir.

TS 500 ve Eurocode 2 gibi yönetmelikler, çevresel koşullara göre minimum paspayı değerlerini belirlemiştir.

1.2.3.6 Betonun yaşı ve kür koşulları

Betonun yaşı ilerledikçe, hidrasyon devam eder ve bağ kuvveti gelişir. Uygun kür koşulları sağlanmazsa, mikroyapı yeterince gelişemez ve aderans kapasitesi düşer.

İlk 7 gün içinde bağ kapasitesi hızla artar.

Yetersiz kür → mikro çatlak, boşluk oluşumu → aderans kaybı.

Buhar kürü uygulanan UYPB sistemlerinde erken yaş aderansı yüksek olabilir.

1.2.3.7 Lif takviyesi

Lifler, betonun çatlama karşı direncini artırarak aderans davranışını olumlu yönde etkiler. Özellikle çelik lifler, çatlak uçlarında gerilme yığılmalarını azaltır ve betonun gevrek davranışını sünek hale getirir.

Lifler, çatlağın ilerlemesini yavaşlatarak aderans sürekliliği sağlar.

%1–2 oranında çelik lif içeren UYPB sistemlerinde, ani sıyrılma yerine enerji sönmüleyen kopma davranışı gözlemlenir (Banthia & Trottier, 1995).

1.2.3.8 Donatı yerleşim konumu (Top Bar Effect)

Donatının beton dökümü sırasındaki konumu, özellikle üst donatılarda beton segregasyonu ve hava boşlukları nedeniyle aderans kaybına neden olabilir. Bu durum literatürde “üst donatı etkisi (top bar effect)” olarak tanımlanır.

Yatay dökümlerde üstte kalan donatılar çevresinde boşluk oranı artabilir.

Bu bölgelerde aderans değerleri, alt donatılara göre %20–30 oranında daha düşük olabilir

1.2.3.9 Yükleme türü ve hızı

Aderans performansı, uygulanan yükün şekline ve süresine göre değişir. Tekrarlı yüklemelerde arayüzde hasar birikimi meydana gelirken, darbe yüklerinde ani sıyrılmalar gözlemlenebilir.

Statik yük → kontrollü bağ kopması.

Dinamik veya tekrarlı yük → bağ zayıflaması ve gevrek sıyrılma.

Deprem etkisinde çalışan elemanlarda aderansın sürekliliği kritik önemdedir.

1.2.3.10 Yüzey temizliği ve döküm kalitesi

Donatı yüzeyinde pas, yağ, toz gibi kirleticilerin bulunması aderansın gelişmesini engeller. Aynı şekilde betonun düzgün yerleşmemesi veya segregasyon göstermesi, arayüzde zayıf bağ bölgeleri oluşturur.

Paslı veya kirli donatı → kimyasal yapışma ve mekanik kenetlenme zayıflar.

Kalıp vibrasyonunun yetersiz olması → segregasyon ve boşluk oluşumu.

2. MATERYAL

2.1 Çimento

Çimento, yapı malzemeleri arasında en önemli bağlayıcılardan biri olup, su ile etkileşime geçtiğinde gerçekleşen hidrasyon tepkimeleri sonucunda sertleşen ve yapı elemanlarına dayanım kazandıran temel bir inşaat malzemesidir. Beton ve harç gibi ürünlerin performansında belirleyici rol oynayan bu bağlayıcı, çoğunlukla yüksek sıcaklıkta pişirilmiş klinker adı verilen bir ara ürün ile az miktarda düzenleyici katkıların öğütülmesiyle elde edilir. Klinkerin üretiminde kullanılan başlıca hammaddeler kireçtaşı (CaCO_3) ve kil olup, yaklaşık $1450\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılarak sinterleşme sağlanır.

Portland çimentosu, hem Türkiye'de hem de dünyada en yaygın olarak kullanılan çimento türüdür. Hidrasyon süreci sonucunda ortaya çıkan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazı, betonun mekanik dayanımının temelini oluşturur (Neville, 2011). Uygulama alanı, performans gereksinimleri ve çevresel şartlara bağlı olarak çeşitli çimento türleri tercih edilmektedir. Örneğin, sülfatlı ortamlarda dayanıklılığı artırılmış çimentolar veya düşük ısı açığa çıkaran türler, belirli mühendislik projelerinde önemli avantajlar sunar (TS EN 197-1, 2012).

Çimentonun fiziksel yapısı ve kimyasal bileşimi, betonun mukavemet özelliklerini, suya ve kimyasallara karşı direncini doğrudan etkiler. Özellikle ultra yüksek performanslı beton (UYPB) gibi gelişmiş beton teknolojilerinde, çimentonun reaktivitesi, tane boyutu dağılımı ve katkılarla uyumu gibi özellikler büyük önem taşır. Bu tür betonların üretiminde, çimentoya ilave olarak ince puzolanik malzemeler (örneğin silis dumanı, uçucu kül) kullanılarak betonun mikro yapısı daha yoğun hale getirilir. Böylece hem dayanım artar hem de geçirimsizlik özelliği iyileştirilmiş olur (Richard & Cheyrezy, 1995; Aitcin, 2000).

Bu çalışma kapsamında, deneysel karışımların hazırlanmasında CEM I 42.5 R sınıfında yer alan Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento türü, katkı içermeyen ve yalnızca klinker ile az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesiyle elde edilen saf Portland çimentosudur. "42.5", bu çimentonun 28 gün sonunda ulaşması gereken minimum basınç dayanımını (MPa), "R" ise hızlı priz alma ve erken dayanım geliştirme özelliğini ifade etmektedir.

Yüksek erken dayanım gerektiren uygulamalarda ve soğuk hava koşullarında dökülen betonlarda öne çıkan bu çimento, kısa sürede mekanik dayanımını önemli ölçüde artırabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Aynı zamanda, düşük su/bağlayıcı oranıyla üretilen UYPB karışımlarında yeterli hidrasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesini sağlayarak, mikro yapının yoğunlaşmasına ve mukavemetin yükselmesine katkı sunar.

Bu çalışmada CEM I 42.5 R çimentosunun tercih edilmesinin temel nedeni, yüksek erken dayanım gerektiren ultra yüksek performanslı beton üretimiyle uyumlu yapıda olması ve kimyasal olarak diğer mineral katkılarla (özellikle silis dumanı) iyi bir reaksiyon göstermesidir. Böylece istenen düşük porozite, yüksek dayanım ve uzun vadeli dayanıklılık hedeflerine ulaşmak mümkün olmuştur.

2.2 Agregata

Agregata, betonun hacimsel olarak en büyük bileşenini oluşturan ve betonun dayanım, işlenebilirlik, dayanıklılık ve rötre gibi birçok özelliğini doğrudan etkileyen mineral kökenli malzemedir. Betonun maliyetini düşürmenin yanı sıra, sertleşmiş betona mekanik dayanım kazandırma görevini de üstlenir. Genel olarak agregalar, tane boyutuna göre ince agregata (kum) ve iri agregata (çakıl, kırmataş) olarak iki gruba ayrılmaktadır.

İnce agregata, genellikle doğal kum veya kırılmış taş tozlarından oluşmakta ve çimento hamurunun bütünlüğünü sağlayarak boşlukları doldurma işlevi görmektedir. UYPB üretiminde ise özellikle ince taneli ve iyi derecelendirilmiş silis kumu tercih edilmektedir. Bu tür kumlar, çimento hamuru ile birlikte daha yoğun bir matris oluşmasına olanak sağlar, böylece yüksek dayanım ve düşük geçirgenlik özellikleri elde edilir.

Kaba agregata, daha büyük taneli malzemelerden oluşur ve betonun iç yapısına iskeletlik kazandırır. Ancak UYPB sistemlerinde, maksimum kompaktlık ve homojen yapı elde edebilmek amacıyla genellikle iri agregata kullanılmaz veya oldukça sınırlı miktarda tercih edilir. Bunun yerine, tane boyutu 0–4 mm arasında değişen mikroderecelendirilmiş agregalar kullanılır. Bu yaklaşım, karışımın yoğunluğunu artırarak mikro boşlukların en aza indirilmesini sağlar (Aitcin, 2000).

Agregaların temiz, sert, dayanıklı ve zararlı madde içermemesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle UYPB karışımlarında kullanılan agregaların su emme oranı düşük, tane şekli

küresel veya yuvarlak, yüzey dokusu ise çimento macunu ile iyi aderans sağlayacak şekilde olmalıdır. Bu sayede çimento hamuruyla agrega arasındaki bağ güçlenir ve betonun genel performansı artırılmış olur.

Bu çalışmada, ultra yüksek performanslı beton karışımlarında 0–2 mm ve 0–4 mm tane boyutlarında, doğal ve kırmataş esaslı silis kumları kullanılmıştır. Kullanılan agregalar, uygun tane dağılımı ve düşük su emme kapasitesi sayesinde hem karışım işlenebilirliğini artırmış hem de nihai dayanım üzerinde olumlu etki oluşturmuştur. Tüm agregalar, TS 706 EN 12620 standardına uygun olarak seçilmiş ve üretim öncesinde yüzeylerinde yabancı madde bulunmaması için yıkanarak hazırlanmıştır.

2.3 Su

Beton üretiminde su, yalnızca çimentonun hidrasyonunu başlatan bir reaktan değil, aynı zamanda karışımın işlenebilirliğini doğrudan etkileyen kritik bir bileşen olarak kabul edilmektedir. Su, çimento ile kimyasal reaksiyona girerek hidrasyon ürünlerini oluşturur ve bu ürünler sayesinde beton, zamanla sertleşerek gerekli mekanik dayanımı kazanır (Neville, 2011).

Kullanılan suyun kalitesi, betonun performansını doğrudan etkiler. İçeriğinde klorür, sülfat, organik madde veya askıda katı madde gibi zararlı bileşenler bulunan sular, priz süresinde gecikmelere, aderans kayıplarına ve özellikle donatının korozyon riskinde artışa yol açabilir. Bu nedenle, beton üretiminde içme suyu kalitesinde, temiz, kokusuz ve nötr pH (yaklaşık 6.5–8.5) değerine sahip suların kullanılması TS EN 1008 standardı kapsamında önerilmektedir (TS EN 1008, 2003).

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB) gibi ileri beton teknolojilerinde, su/bağlayıcı (S/B) oranı genellikle 0.20'nin altındadır. Bu düşük oran, betonun boşluksuz ve yoğun bir mikro yapı kazanmasını sağlar; bu sayede yüksek basınç dayanımı, düşük geçirgenlik ve üstün dayanıklılık elde edilir. Ancak bu tür karışımlarda düşük su oranı, işlenebilirliği olumsuz etkileyebileceğinden, karışıma süper akışkanlaştırıcı katkıları ilave edilerek uygun kıvam elde edilmektedir (Aİtcin, 2000; Wille et al., 2011).

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, karışımların hazırlanmasında içme suyu standartlarına uygun, berrak ve nötr pH değerine sahip musluk suyu tercih

edilmiştir. S/B oranı, taze betonun kıvam özelliklerini ve sertleşmiş betonun dayanım gerekliliklerini karşılayacak şekilde dikkatle belirlenmiş ve sabit tutulmuştur.

2.4 Katkı Maddeleri

Beton karışımlarında kullanılan katkı maddeleri, karışımın taze veya sertleşmiş halindeki özelliklerini iyileştirmek amacıyla düşük oranlarda eklenen yardımcı bileşenlerdir. Bu katkılar, betonun işlenebilirliğini artırmak, priz süresini düzenlemek, dayanım ve dayanıklılığını geliştirmek gibi çeşitli amaçlara hizmet eder. Özellikle özel performans gerektiren beton türlerinde, katkı maddeleri karışım tasarımının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir (Neville, 2011).

Katkı maddeleri genellikle kimyasal ve mineral katkılar olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır.

2.4.1 Kimyasal katkılar

Kimyasal katkılar, çoğunlukla sıvı halde olup çimento ağırlığına göre çok küçük oranlarda kullanılır. Uygulama amacına bağlı olarak, farklı etkilere sahip katkı türleri mevcuttur.

2.4.1.1 Süper akışkanlaştırıcılar

Bu katkılar, özellikle düşük su/bağlayıcı oranıyla çalışan UYPB karışımlarında, işlenebilirliği korumak için kullanılır. Polikarboksilat eter bazlı süper akışkanlaştırıcılar, çimento tanelerini dağıtarak karışımın akışkanlığını artırır ve homojenliği sağlar (Wang et al., 2012). Bu deneysel çalışmada, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) karışımlarının düşük su/bağlayıcı oranı ile yeterli işlenebilirlik düzeyine ulaşmasını sağlamak amacıyla, polikarboksilat eter (PCE) esaslı bir süper akışkanlaştırıcı olan BASF MasterGlenium 51 katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı, taze betonun akışkanlık özelliğini korurken, liflerin homojen dağılımını desteklemiş ve karışımda segregasyon oluşumunu engellemiştir.

2.4.1.2 Priz düzenleyiciler

Priz düzenleyiciler, betonun sertleşme sürecindeki priz zamanını kontrol etmek için kullanılan kimyasal katkı maddeleridir. Betonun taze halden katılaşmaya geçiş hızı, çevresel şartlar ve karışım bileşenlerine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu nedenle, priz düzenleyiciler betonun yerleşme ve işlenme özelliklerini iyileştirmek ve donatı aderansını olumlu yönde etkilemek amacıyla kullanılır.

Priz düzenleyiciler genel olarak iki gruba ayrılır: priz süresini geciktirenler ve hızlandıranlar.

Priz geciktiriciler: Bu katkılar, özellikle yüksek sıcaklıklarda betonun çok hızlı sertleşmesini önlemek için kullanılır. Betonun priz süresini uzatarak, daha uzun çalışma süresi sağlar ve betonun kalıpta düzgün yerleşmesini kolaylaştırır. Genellikle şeker türevleri veya organik asitler gibi maddeler priz geciktirici olarak görev yapar. Bu sayede erken çatlak oluşum riski azaltılır ve betonun homojenliği korunur.

Priz hızlandırıcılar: Betonun priz süresini kısaltarak erken dayanım kazanımını destekler. Soğuk hava koşullarında veya hızlı kalıp sökülmesi gereken durumlarda tercih edilir. Kalsiyum nitrat gibi katkılar priz hızlandırıcı olarak kullanılırken, bazı priz hızlandırıcılar donatı üzerinde korozyona sebep olabileceği için dikkatli kullanılmalıdır.

Priz düzenleyici katkıların kullanımı, betonun hem taze hem de sertleşmiş performansını etkilediği için dozaj ve katkı türü titizlikle seçilmelidir. Uygun katkı miktarı, betonun işlenebilirliğini koruyup, donatı ile beton arasındaki aderansı da olumlu yönde etkiler. Bu nedenle, her beton karışımı için priz düzenleyici katkıların etkisi deneysel olarak belirlenmelidir.

2.4.2 Mineral katkılar

Mineral katkılar ise bağlayıcı sistemin bir parçası olarak çimentoya eklenen toz formundaki malzemelerdir. Bu katkılar, betonun mikroyapısını geliştirerek hem mekanik hem de fiziksel özelliklerini iyileştirir. UYPB gibi yüksek performanslı beton sistemlerinde yaygın şekilde kullanılırlar.

2.4.2.1 Silis dumanı

Silis dumanı, silisyum alaşımı üretimi sırasında yan ürün olarak oluşan, oldukça ince partiküllü ve yüksek oranda amorf silika (SiO_2) içeren bir mineral katkı malzemesidir. Elektro-ark fırınlarında silisyum veya ferrosilisyum elde edilirken baca gazlarından filtrelenen bu malzeme, çevresel açıdan da geri kazanım yoluyla değerlendirilen önemli bir sanayi atığıdır (Mehta & Monteiro, 2014).

Tanecik çapı genellikle 0.1 mikrometreden daha küçük olan silis dumanı, çimento ile karşılaştırıldığında yüzey alanı açısından çok daha aktiftir. Bu özelliği sayesinde betonun boşluklu yapısını azaltarak daha sıkı ve yoğun bir matris oluşumuna katkı sağlar. Ayrıca silis dumanı, çimento hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek ikincil kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) üretir. Bu reaksiyon hem dayanımı artırır hem de betonun kimyasal dayanıklılığını geliştirir (ACI 234R-06, 2006).

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB) sistemlerinde silis dumanı, bağlayıcı sistemin önemli bir bileşeni olarak kullanılır. Düşük su/bağlayıcı oranlarının neden olduğu yoğun iç yapının oluşturulmasında aktif rol oynar. Betonun geçirimsizliğini artırarak özellikle klorür iyonlarının geçişini sınırlar ve donatı korozyonuna karşı direncini yükseltir (Aİtcin, 2000). Ancak silis dumanının çok ince yapısı ve yüksek reaktivitesi, betonun işlenebilirliğini azaltabileceğinden dolayı karışımlarda genellikle süper akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanılır. Böylece karışımda homojen dağılım sağlanarak işlenebilirlik korunur.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan UYPB karışımlarında, yüksek saflığa sahip silis dumanı kullanılmıştır. Kullanımıyla hedeflenen, betonun mikro yapısının daha kompakt hale getirilmesi ve erken ile nihai dayanımın artırılmasıdır.

2.4.2.2 Yüksek fırın cürufu (GGBS)

Yüksek fırın cürufu, demir-çelik üretiminde ana ürün olan dökme demirin elde edilmesi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan ve belirli işlemlerden geçirilerek bağlayıcı özellik kazanan granüler bir malzemedir. Ergitilmiş haldeki cüruf, ani su soğutmasıyla camı yapıda granül hale getirilir ve ardından öğütülerek beton üretiminde kullanılan bağlayıcı materyal haline gelir (Çelikten & Yılmaz, 2013).

Granüle yüksek fırın cürufunun (GGBS) beton teknolojisindeki önemi, sahip olduğu hem latent hidrolik hem de puzolanik özelliklerden kaynaklanmaktadır. Bu malzeme, çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek zamanla betonun iç yapısında daha yoğun ve dayanıklı bağlayıcı fazlar (özellikle C-S-H jel fazı) oluşmasına katkı sağlar (Benhelal et al., 2012). Bu sayede hem geç yaş dayanımı artar hem de betonun geçirimsizliği azalır.

GGBS ilavesi aynı zamanda hidrasyon ısısını azaltarak özellikle büyük hacimli dökümlerde oluşabilecek termal gerilmelerin önüne geçilmesine yardımcı olur. Ayrıca sülfat etkisi, klor iyonu penetrasyonu ve alkali-agrega reaksiyonlarına karşı direnci artırarak betonun uzun ömürlü performansını olumlu yönde etkiler (Shi et al., 2021).

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB) üretiminde ise GGBS, çimento ile birlikte kullanıldığında hem mikro yapı yoğunluğunu artırmakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. GGBS'in düşük karbon ayak izi, bu malzemenin çevreci beton tasarımlarında tercih edilmesini desteklemektedir (Habert et al., 2011).

Bu çalışmada, bağlayıcı sistemin bir parçası olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. UYPB karışımlarında GGBS'nin kullanımı, dayanıklılık özelliklerini geliştirmeye yönelik olarak değerlendirilmiş ve özellikle geç yaş dayanım katkısı hedeflenmiştir.

2.4.2.3 Uçucu kül

Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yakılması sırasında ortaya çıkan ve baca gazlarından toplanan ince partiküllerden oluşan endüstriyel atık bir malzemedir. İnce taneli yapısı ve pozzolanik özellikleri nedeniyle beton teknolojisinde bağlayıcı olarak değerlendirilir. Uçucu kül, hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girerek betonun uzun süreli dayanım gelişimini destekler ve geçirimsizliğini artırır. Ayrıca, betonun işlenebilirliğine olumlu katkı sağlar ve betonun ısı gelişimini kontrol ederek termal çatlak oluşum riskini azaltır (Kumar ve ark., 2015).

2.4.3 Çalışmadaki katkı malzemeleri

Bu çalışmada, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) üretiminde, karışımın hem reolojik hem de mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla yüksek saflıkta silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve polikarboksilat eter bazlı süper akışkanlaştırıcılar kullanılmıştır. Silis dumanı, yüksek yüzey alanı ve kimyasal reaktivitesi sayesinde betonun mikro yapısını sıkılaştırarak gözenek hacmini azaltmakta ve böylece dayanım ile dayanıklılık özelliklerini artırmaktadır.

Yüksek fırın cürufu ise pozzolanik özellikleri sayesinde çimento hidrasyonu sırasında ikincil bağlayıcı ürünlerin oluşumuna katkı sağlamakta, bu sayede betonun geç yaş dayanımı

ve iç yapısının yoğunluğu olumlu yönde etkilenmektedir. Ayrıca, yüksek fırın cürufu kullanımı, özellikle büyük hacimli beton dökümlerinde oluşabilecek ısıl çatlak riskini azaltmada da fayda sağlamaktadır.

Polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcılar, düşük su/bağlayıcı oranına sahip UYPB karışımında işlenebilirliği artırmakta, çimento ve liflerin homojen dağılmasını destekleyerek karışımın akışkanlığını artırmakta ve segregasyonu önlemektedir. Bu katkıların birlikte kullanımı, karışımdaki boşluk oranını minimize ederken mekanik dayanımın artırılmasına ve karışımın yerleştirilme kolaylığının sağlanmasına olanak tanımıştır.

Sonuç olarak, bu katkı kombinasyonu sayesinde, yüksek dayanım ve dayanıklılık gerektiren uygulamalara uygun, kompakt ve güvenilir bir UYPB karışımı elde edilmiştir.

2.5 Lif Takviyesi

Betonun performansını artırmak ve çatlama davranışını iyileştirmek amacıyla lif kullanımı, modern beton teknolojisinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Lif takviyesi sayesinde beton yalnızca basınç dayanımı açısından değil, aynı zamanda çekme ve eğilme gibi kırılma davranışları karşısında da daha dayanıklı hâle gelir. Beton içerisine belirli oranlarda eklenen lifler, mikro çatlakların oluşumunu geciktirir ve mevcut çatlakların ilerlemesini sınırlar.

Lifler, çekme yüklerinin taşınmasına katkı sağlamakta ve çatlak sonrası dayanımın korunmasında etkin rol oynamaktadır. Bu sayede beton, sünek bir davranış sergileyerek ani göçme riskine karşı daha güvenli hale gelir. Lif takviyesinin etkinliği, kullanılan lifin türü, boyutları, geometrisi ve karışım içerisindeki dağılımı gibi faktörlere bağlıdır.

2.5.1 Çelik lifler

Çelik lifler, betonun mekanik özelliklerini geliştirmek ve çatlama davranışını iyileştirmek amacıyla karışıma belirli oranlarda ilave edilen metalik takviyelerdir. Geleneksel beton yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen, kırılma yapısı nedeniyle çekme ve eğilme etkileri altında kolaylıkla çatlayabilmektedir. Bu noktada çelik lifler, çatlak oluşumunu sınırlayan ve çatlakların ilerlemesini yavaşlatan mikro takviyeler olarak

betonun sünekliğini ve enerji sönümlenme kapasitesini artırmaktadır (Banthia & Trottier, 1995).

Lif takviyeli betonlarda çelik lifler, çatlak uçlarında gerilimi dağıtarak yük altındaki davranışı daha kontrollü hâle getirir. Böylece betonun yalnızca basınç dayanımı değil; aynı zamanda eğilme, çekme ve darbe dayanımı gibi farklı mekanik özellikleri de önemli ölçüde iyileştirilmiş olur (ACI Committee 544, 1996). Liflerin varlığı, betonun kırılma davranışını gevrekten süneğe dönüştürerek, özellikle deprem gibi dinamik yükler altında yapı güvenliğini artırır.

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB) sistemlerinde çelik lif kullanımı, karışımın karakteristik özelliği olan yüksek dayanım ve dayanıklılık seviyesine ulaşmada kritik rol oynamaktadır. Bu tür betonlarda kullanılan çelik lifler genellikle kısa boylu (örneğin 13 mm), ince çaplı ve yüksek çekme dayanımına (≥ 2000 MPa) sahip tellerdir. Liflerin karışım içerisinde homojen dağılımı, betonun izotropik mekanik özellikler göstermesini sağlar ve yönsel dayanım farklılıklarını azaltır (Graybeal, 2006).

Bu tez çalışmasında, UYPB üretiminde kullanılan çelik lifler; 13 mm uzunluğunda, düz kesitli ve endüstriyel tipte olup, karışımlara %2 hacim oranında eklenmiştir. Liflerin homojen dağılımı mekanik karıştırma ile sağlanmış, topaklanma riski minimize edilmiştir. Bu katkı sonucunda betonun süneklik, çatlak kontrolü ve darbe dayanımı gibi özelliklerinde belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir.

2.5.2 Cam elyaf

Cam elyaflar, yüksek çekme dayanımı ve rijitliğe sahip, genellikle ince kesitli beton elemanlarda kullanılan inorganik liflerdir. Klasik cam elyaflar alkali ortamlarda çözülmeye yatkın olduğundan, beton uygulamalarında alkaliye dayanıklı (AR) tip cam elyaflar tercih edilmektedir. Bu lifler genellikle 12 mm uzunluğunda ve monofilament formundadır. Özellikle ilk çatlakların oluşumunu geciktirme ve çatlak kontrolü sağlama açısından etkilidirler.

UYPB içerisinde cam elyaflar, betonun yoğun matrisi sayesinde homojen bir şekilde dağılmakta ve lif-beton arayüzünde yüksek bağ kuvvetleri oluşabilmektedir. Bu durum eğilme dayanımını olumlu yönde etkilerken, çatlak genişliklerinin kontrolünü de

kolaylaştırmaktadır. AR cam elyaflar, UYPB'nin yüzey çatlaklarına karşı direncini artırmakta ve estetik, ince kesitli yapı elemanlarında ideal bir takviye olarak öne çıkmaktadır (Bentur & Mindess, 2007).

2.5.3 Polipropilen lif

Polipropilen lifler, betonun özellikle plastik rötre döneminde çatlamasını önlemek amacıyla kullanılan, düşük yoğunluklu ve kimyasal olarak inert sentetik liflerdir. En belirgin etkileri, priz alma sürecinde meydana gelen hacim değişikliklerinden kaynaklanan mikro çatlakların engellenmesidir.

Genellikle 6–12 mm uzunluğunda olan bu lifler, karışımın işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilemeden betonun erken yaş dayanımına katkı sağlar. UYPB uygulamalarında, özellikle çatlama-yatkın karmaşık döküm geometrilerinde polipropilen lif kullanımı yüzey kalitesini artırmakta, ayrışmayı önlemekte ve genel dayanıklılığı güçlendirmektedir.

Polipropilen liflerin doğrudan mekanik dayanım üzerindeki etkisi sınırlı olmakla birlikte, rötre çatlaklarını engelleme konusundaki başarısı sayesinde uzun vadeli dayanıklılığa katkıda bulunduğu belirtilmiştir (ACI 544.1R-96).

2.5.4 Lif katkılarının etkileri

Lif katkılarının çeşitlerine göre etkileri aşağıda Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Lif çeşitlerinin etkileri

Özellikler	Çelik Lif	Cam Elyaf	Polipropilen Lif
Çekme Dayanımı	Yüksek (>2000MPa)	Orta(1000-2000MPa)	Düşük(<400MPa)
Süneklik Katkısı	Yüksek	Orta	Düşük
Çatlak Kontrolü	Etkin(makro)	Etkin(mikro)	Etkin(mikro)
Rötre Çatlak Önleme	Orta	Orta	Yüksek

Kimyasal Dayanıklılık	Yüksek	Orta	Yüksek
Uygulama Oranı(Hacim)	(%1-2)	(%0,5-1)	(%0.05-0.2)

2.5.5 UYPB’da lif kullanımı

Ultra yüksek performanslı betonlarda, düşük su/bağlayıcı oranı ve yoğun içyapı sayesinde liflerin etkisi daha belirgin hâle gelmektedir. UYPB’de kullanılan çelik lifler yalnızca çatlak kontrolü sağlamakla kalmaz, aynı zamanda eğilme dayanımı ve süneklik özelliklerine de önemli katkıda bulunur. Bu sayede beton, darbe, sismik etki ve ani yüklemeler altında daha güvenilir bir performans sergiler.

Bu tez kapsamında üretilen deney numunelerinde, 13 mm uzunluğunda ve kancalı uçlara sahip çelik lifler, beton karışımına %2 hacim oranında eklenmiştir. Liflerin homojen dağılımını sağlamak ve işlenebilirliği korumak amacıyla uygun süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri de karışıma dahil edilmiştir. Sonuç olarak, lif katkısı betonun sünekliğini artırmış, çatlak genişlikleri kontrol altına alınmış ve yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde geliştirilmiştir.

3. ADERANS GERİLMESİNE ETKİ EDEN DEĞİŞKENLER

3.1 Kenetlenme Boyu

Betonarme yapılarda, donatı çeliğinin beton ile birlikte yük taşıyabilmesi, iki malzeme arasındaki aderansın etkin şekilde sağlanmasına bağlıdır. Bu bağlamda kenetlenme boyu, donatının beton içerisine gömülerek kaymadan yük aktarımını gerçekleştirebilmesi için gereken minimum gömülme uzunluğu olarak tanımlanır (ACI 318, 2019).

Aderans, donatının yüzey şekli (nervürlü veya düz), çevreleyen betonun dayanımı, paspayı kalınlığı, bağ yüzeyindeki çatlak gelişimi ve donatının çapı gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu nedenle, kenetlenme boyu sabit bir değer olmayıp, yapısal elemanın çalışma koşullarına ve kullanılan malzemelere göre değişiklik gösterir (Orangun et al., 1977; CEB-FIP, 2010).

Yeterli kenetlenme boyu sağlanmadığı durumlarda, donatı beton içerisinden sıyrılarak yapısal bütünlük bozulabilir. Bu durum, özellikle çekme etkisinin baskın olduğu bölgelerde gevrek kırılma riskini artırır ve yapı güvenliği açısından ciddi sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, donatının uç bölgelerinde veya ankraj gerektiren noktalarda, uygun kenetlenme uzunluklarının detaylandırılması hayati önemdedir (Frosch, 1999).

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB) sistemlerinde, malzemenin yoğun yapısı ve yüksek basınç dayanımı sayesinde donatı ile beton arasında yüksek bağ gerilmeleri gelişebilir. Ancak bu yüksek aderans seviyesi, bağ yüzeyinde aniden çatlama veya gevrek sıyrılma gibi istenmeyen kırılma mekanizmalarına neden olabilir. Bu nedenle UYPB

kullanılarak tasarlanan elemanlarda kenetlenme boyu, geleneksel betonlara kıyasla daha dikkatli değerlendirilmelidir (Graybeal, 2007).

Bu çalışmada, farklı kenetlenme boylarının donatı-beton etkileşimi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş; özellikle UYPB sistemlerinde 5φ ve 10φ oranlarının bağ dayanımına katkısı karşılaştırmalı şekilde değerlendirilmiştir.

3.2 Paspayı

Betonarme yapılarda donatı çeliğinin uzun süreli dayanım gösterebilmesi, onu çevresel etkilerden koruyan beton örtüsünün yeterli kalınlıkta olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Bu koruyucu mesafe, yapı mühendisliğinde paspayı olarak adlandırılır. Paspayı, donatının dış ortam koşullarına karşı korunmasının yanı sıra yangın dayanımı, aderans gelişimi ve çatlak kontrolü gibi yapısal işlevler açısından da önemli bir tasarım parametresidir (Neville, 2011).

Donatının korozyona uğraması, genellikle klorür iyonlarının veya karbonatlaşma yoluyla indirgenen pH seviyesinin donatı yüzeyine ulaşması sonucu meydana gelir. Yeterli kalınlıkta beton örtüsü, bu tür zararlı etkilerin donatıya ulaşmasını geciktirerek çelik donatının paslanmasını önler ve böylece yapı ömrünü uzatır (Mehta & Monteiro, 2014). Özellikle dış ortamda yer alan ve su, nem ya da kimyasal maddeye maruz kalan betonarme elemanlarda paspayının artırılması, dayanıklılık açısından büyük önem taşır.

Paspayı aynı zamanda, donatı çevresindeki çatlak oluşumları üzerinde de belirleyici rol oynar. Donatıya çok yakın yüzeyde çatlak oluşması, yapının görsel bütünlüğünü zedelerken; aşırı kalın paspayı, donatının betonla yeterli aderans kurmasını güçleştirebilir (Zuo & Darwin, 2000). Bu nedenle, paspayı değeri, beton dayanımı, donatı çapı, çevresel maruziyet sınıfı ve yapı elemanının konumuna göre optimum düzeyde belirlenmelidir.

Ulusal ve uluslararası yapı standartları (TS 500, TS EN 1992-1-1, ACI 318) bu bağlamda yapı tipine göre minimum paspayı değerlerini tanımlamıştır. Örneğin, deniz suyuna maruz kalan bir yapı ile iç mekânda yer alan kuru bir yapı için öngörülen paspayı değerleri farklıdır.

Bu çalışmada, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) ile donatı arasında oluşan aderans davranışını etkileyen parametrelerden biri olarak, üç farklı paspayı (14 mm, 28 mm ve 42 mm) kullanılarak deneysel incelemeler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, paspayı kalınlığının yalnızca dayanıklılığa değil, aynı zamanda donatı-beton arayüzündeki mekanik bağ performansına da etki ettiğini göstermiştir.

3.3 Donatı Çapı

Betonarme sistemlerde donatı ile beton arasındaki bağ, yük aktarımının sürekliliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağ kuvvetinin etkinliği, betonun dayanım özelliklerinin yanı sıra donatının geometrik yapısıyla da doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, donatı çapı, aderansın gelişiminde belirleyici parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir.

Donatı çapı büyüdükçe, yüzey alanı artar; ancak bu artış aderans kuvvetinin aynı oranda yükselmesi anlamına gelmez. Daha büyük çaplı donatılarda, bağ yüzeyine düşen birim aderans gerilmesi azalabilir ve bu durum, çatlak oluşumu ile birlikte donatının betondan sıyrılma riskini artırabilir (Zuo & Darwin, 2000). Ayrıca, çap büyüdükçe gerilmenin donatı çevresinde eşit dağılması zorlaşır; bu da bağ dayanımının azalmasına ve daha uzun kenetlenme boylarına ihtiyaç duyulmasına yol açar (Orangun et al., 1977).

Özellikle nervürlü donatılar kullanıldığında mekanik kenetlenme etkisi devreye girse de, bu etkinin çap büyüdükçe kademeli olarak azaldığı ve bağın daha gevrek bir kırılma moduna kayabileceği belirtilmektedir (CEB-FIP, 2010). Bu nedenle, tasarım sürecinde donatı çapı ile birlikte kenetlenme uzunluğu, paspayı ve çevresel koşullar birlikte değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada, donatı çapı sabit tutularak diğer parametrelerin bağ performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Ancak literatürdeki bulgular, küçük çaplı donatıların genellikle daha kısa kenetlenme boyu ile benzer veya daha yüksek bağ dayanımı sağladığını göstermektedir. Bu durum, taşıyıcı sistemlerin sadece yük taşıma kapasitesi açısından değil, aderans güvenliği yönünden de optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

4. BETON-DONATI ADERANSINI DENEYLERİ

4.1 Pull-Out (Çekme) Deneyi

Betonarme sistemlerde, donatı ile beton arasındaki bağ kuvveti, yapı elemanlarının bütünlük ve güvenli çalışması açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu bağ kuvveti, betonun donatıya tutunmasını sağlayan kimyasal yapışma, mekanik kenetlenme ve yüzey sürtünmesi gibi etkileşimlerin birleşiminden oluşur. Bu etkileşimleri sayısal olarak değerlendirmek ve arayüz davranışını analiz etmek amacıyla laboratuvar ortamında çeşitli deneysel yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler içerisinde en yaygın ve tekrarlanabilir olanı pull-out (çekme) deneyidir (Eligehausen et al., 2006).

4.1.1 Deneyin temel prensibi

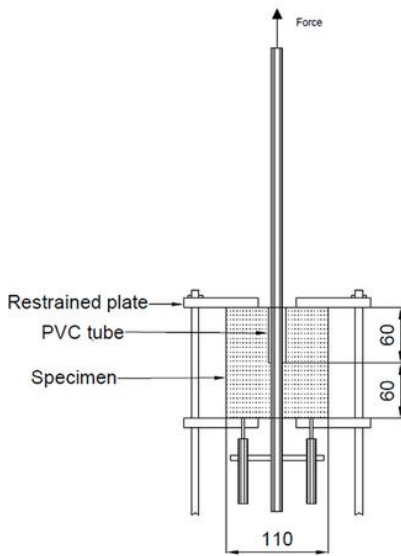
Pull-out deneyi, beton içerisine belirli bir bağ uzunluğu ile gömülen donatı çubuğunun aksel yönde çekilmesi esasına dayanır. Deney sırasında uygulanan kuvvet ve bu kuvvet etkisiyle oluşan kayma (slip) miktarı eş zamanlı olarak ölçülür. Bu verilerden yararlanılarak beton ile donatı arasındaki bağ gerilmesi–kayma ilişkisi elde edilir ve maksimum aderans dayanımı hesaplanır (Lutz & Gergely, 1967).

4.1.2 Deney düzeneği

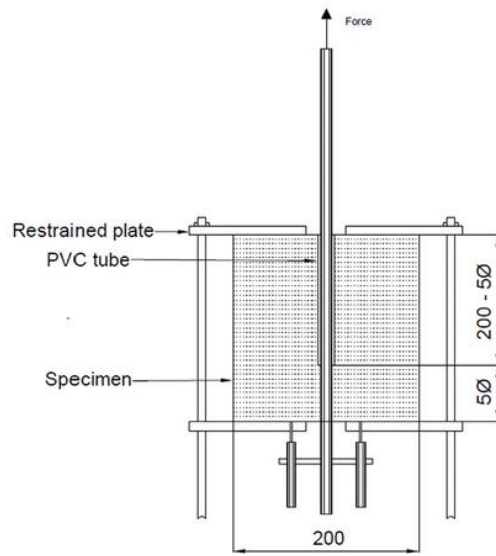
Deney düzeneği; donatı çubuğunun aksel çekme kuvveti ile çekilmesini sağlayan bir yükleme sistemi, numuneyi sabitleyen ankastre bir sistem ve yer değiştirme ile kuvveti ölçen sensörlerden oluşmaktadır. Donatı uçlarından biri sabitlenmiş beton numunesine gömülürken, diğer ucu çekme cihazına bağlanarak aksel olarak çekilir. Deney sürecinde ölçülen maksimum çekme kuvveti, aderans dayanımının hesaplanmasında kullanılır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.1: Pull-out deney düzeneği

4.1.3 Aderans gerilmesinin hesaplanması

Pull-out deneyinden elde edilen maksimum kuvvet kullanılarak ortalama aderans gerilmesi bağıntı (4.1) ile hesaplanır:

$$\tau = \frac{As \times \sigma}{L \times D \times \pi} \quad 4.1$$

4.1.4 Literatürde pull-out deneyi uygulamaları

Eligehausen ve arkadaşları (2006), çekme deneyinin donatı-beton arayüzündeki yerel bağ gerilmesi-kayma ilişkisini anlamada etkin bir araç olduğunu vurgulamıştır. Malvar ve Melaragno (1991) tarafından yapılan çalışmalarda, yüksek dayanımlı betonlarda bağ dayanımının, lif katkıları ve bağ uzunluğu gibi parametrelerden güçlü şekilde etkilendiği gösterilmiştir. Ayrıca Kim ve Yoo (2021), lif katkısının aderans gerilmesini artırdığını ve çatlak yayılımını sınırlayarak bağ sürekliliğini sağladığını ortaya koymuştur.

4.1.5 Yorum ve sınırlamalar

Pull-out deneyinin en büyük avantajı, uygulanabilirliğinin yüksek ve sonuçlarının tekrarlanabilir olmasıdır. Ancak deney, yalnızca tek eksenli yükleme altındaki sınırlı bağ bölgesini değerlendirdiği için, gerçek yapı elemanlarında meydana gelen çok eksenli gerilmeleri doğrudan yansıtmayabilir. Bu nedenle sonuçlar yapısal tasarıma aktarılırken deneyin sınırları dikkate alınmalıdır (Cairns & Plizzari, 2003).

4.2 Bureau of Standards Kiriş Deneyi

Donatı ile beton arasındaki aderans davranışının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda, laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çekme deneylerinin yanı sıra, daha gerçekçi sınır koşullarını yansıtan kiriş deneyleri de önemli bir yer tutmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen yöntemlerden biri olan Bureau of Standards Deneyi, donatının eğilme etkisi altındaki bağ davranışını incelemek amacıyla kullanılan klasik bir deney yöntemidir (ACI Committee 408, 2003).

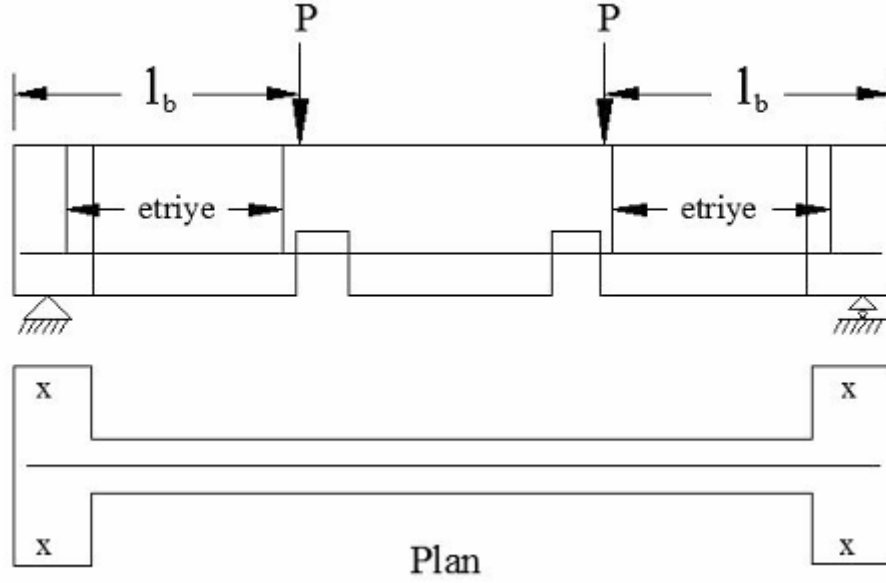
Bureau of Standards kiriş deneyi, tek açıklıklı bir betonarme kiriş numunesi üzerinde gerçekleştirilir. Kiriş, iki basit mesnet üzerine yerleştirilir ve açıklığın ortasına yakın bölgelerde iki noktalı yükleme uygulanır. Yükleme bölgesinin altında, donatının bağ

dayanımının sınanacağı bir bölge oluşturulur. Donatı çubuğu bu bölge boyunca betonla kenetlenmiş olup, her iki ucunda özel çapaklı sistemlerle çekilmeye elverişli hale getirilmiştir.

Deney süresince, kirişin alt yüzeyinde yer alan donatıya etki eden çekme kuvveti, yükleme noktalarından gelen momentle birlikte artar. Yükleme ilerledikçe, donatının kenetlenmiş olduğu bölgede çekme gerilmesi ve kayma meydana gelir. Bu sayede, donatı ile beton arasındaki bağ kuvveti doğal bir şekilde gelişirken, aynı zamanda çatlak oluşumu ve ilerlemesi de gözlemlenebilir.

Bu deneyin en önemli avantajı, donatı ile beton arasındaki aderansın yalnızca aksenal çekme etkisi altında değil, aynı zamanda eğilme momenti ve kesme kuvveti ile birlikte incelenmesine olanak sağlamasıdır. Böylece, bağ davranışı yapısal sistemlere daha yakın sınır koşulları altında değerlendirilebilir. Bununla birlikte, deney düzeneğinin karmaşıklığı, ölçüm ekipmanlarının hassasiyeti ve elde edilen sonuçların çok sayıda parametreden etkilenmesi, bu yöntemin analiz ve yorumlama aşamalarını zorlaştırmaktadır (CEB-FIP, 1990).

Bureau of Standards Deneyi, özellikle farklı bağ uzunluklarının, lif katkılarının veya pas paylarının bağ kapasitesi üzerindeki etkisini incelemek için uygun bir yöntemdir. Bu deney, uygulamaya yakın sınır koşulları sunması sebebiyle, teorik modellerin kalibrasyonu ve bağ gerilmesi-kayma ilişkilerinin doğrulanması amacıyla da sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 4.2: Bureau of standards deney düzeneğinin şematik gösterimi

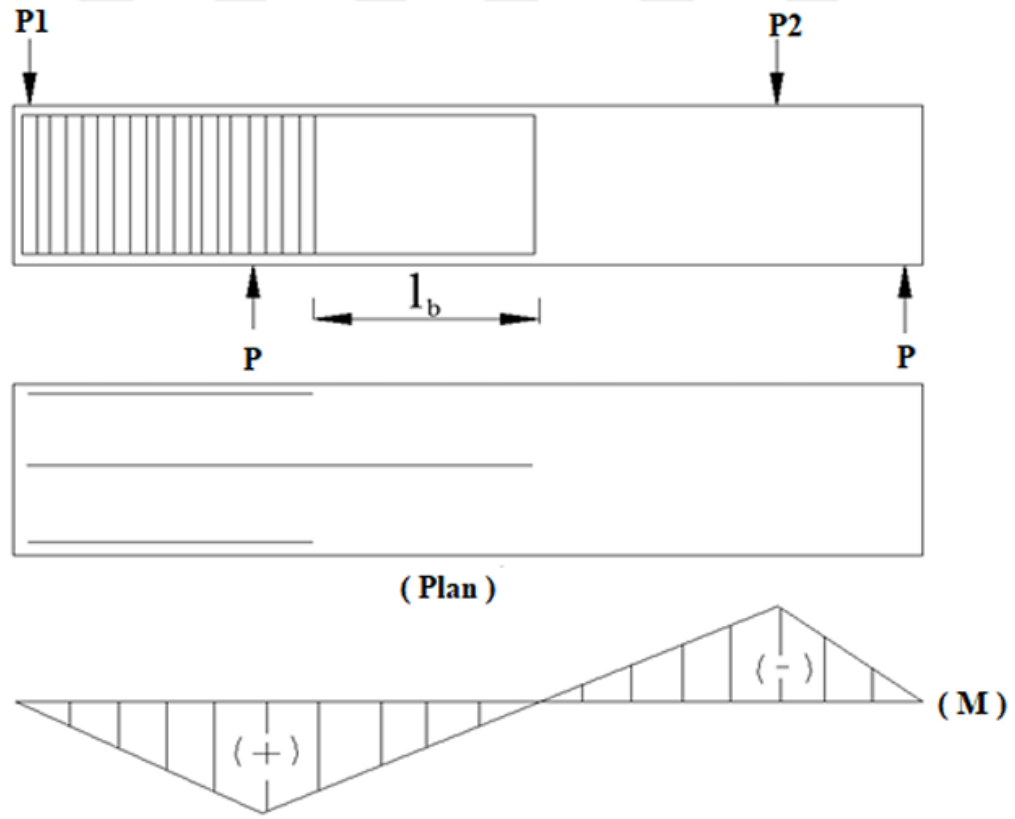
4.3 Teksas Çıkmalı Kiriş Deneyi

Donatı ile beton arasındaki aderans davranışını değerlendirmek amacıyla geliştirilen deney yöntemlerinden biri de Teksas çıkmalı kiriş deneyi (*Texas Pullout Beam Test*) olarak literatürde yer almaktadır. Bu yöntem, standart çekme (pull-out) deneylerinin idealize edilmiş sınır koşullarından farklı olarak, daha gerçekçi gerilme durumlarını yansıtan ve kiriş elemanlarının davranışını esas alan bir yaklaşıma sahiptir.

4.3.1 Deneyin tanımı ve uygulama prensibi

Teksas çıkmalı kiriş deneyi, çıkmalı (cantilever) bir betonarme kiriş numunesi üzerinde gerçekleştirilir. Numune, bir ucu ankastre şekilde sabitlenmiş bir kiriş biçimindedir ve serbest uç bölgesine yerleştirilen çelik donatı, aksenal olarak dışarı doğru çekilir. Donatının belirli bir uzunluğu beton içerisinde kenetlenmiştir ve çekme işlemi sırasında beton ile donatı arasındaki bağ dayanımı değerlendirilir.

Bu deney türünde, donatıya uygulanan kuvvet doğrudan eğilme momenti yaratmadan, yalnızca aksenal çekme etkisiyle aktarılır. Böylece, geleneksel eğilme kiriş deneylerinden farklı olarak, sadece donatı-beton aderans davranışı incelenmiş olur. Deney sırasında, çekme kuvveti ile birlikte donatının kayma (slip) miktarı ve beton yüzeyinde oluşan çatlak davranışları kaydedilir. Bu sayede, bağ dayanımı ile birlikte çatlak oluşumu, ilerlemesi ve ayrılma şekli hakkında da bilgi edinilir.



Şekil 4.3: Teksas Çıkmalı Kiriş deney düzeneğinin şematik gösterimi.

4.3.2 Avantajları ve uygulama alanları

Teksas çıkmalı kiriş deneyinin öne çıkan avantajı, numunenin yapısal eleman ölçeğinde olması ve donatıya uygulanan kuvvetin çekme yönünde ve doğrudan aktarılması sayesinde, arayüz davranışının daha kontrollü bir şekilde analiz edilebilmesidir. Aynı zamanda deney düzeneği, lifli beton, yüksek dayanımlı beton ve farklı bağ uzunluğu konfigürasyonlarının aderans üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak tanır.

Deney, özellikle yüksek dayanımlı ve lif katkılı betonların kullanıldığı sistemlerde, donatı-beton etkileşimini daha iyi anlayabilmek ve tasarım parametrelerini optimize edebilmek açısından etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

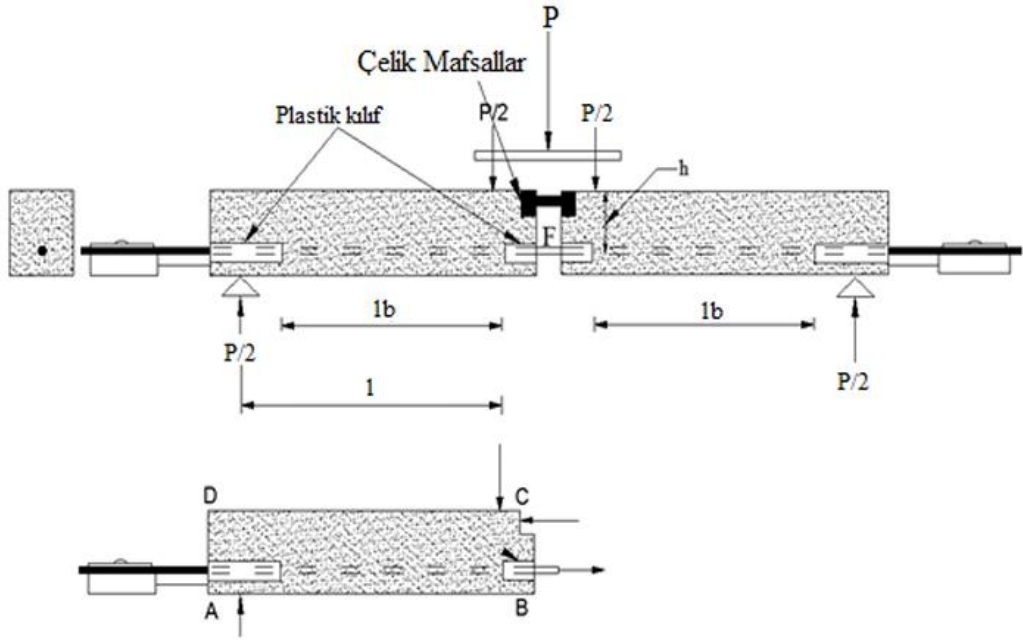
4.4 Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi

Donatı ile beton arasındaki aderans davranışını değerlendirmek amacıyla geliştirilen deney yöntemlerinden biri de Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi (*Standard Belgium Hinged Beam Test*) olarak literatürde yer almaktadır. Bu yöntem, standart çekme (pull-out) deneylerinin

idealize edilmiş sınır koşullarından farklı olarak, daha gerçekçi gerilme durumlarını yansıtan ve kiriş elemanlarının davranışını esas alan bir yaklaşıma sahiptir.

4.4.1 Deneyin tanımı ve uygulama prensibi

Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi, her iki ucu mafsallı destekler üzerine yerleştirilen betonarme bir kiriş numunesi üzerinde gerçekleştirilir. Kirişin ortasına tek noktalı yükleme uygulanarak eğilme momenti oluşturulur ve bu yükleme etkisiyle donatıda gelişen çekme gerilmeleri, betonla olan bağ üzerinde etkili olur. Deney sırasında, donatıya uygulanan kuvvet doğrudan eğilme momenti yaratmadan, yalnızca aksel çekme etkisiyle aktarılır. Böylece, geleneksel eğilme kiriş deneylerinden farklı olarak, sadece donatı-beton aderans davranışı incelenmiş olur.



Şekil 4.4: Belçika Mafsallı Kiriş deney düzeneği şematik gösterimi

4.4.2 Avantajları ve uygulama alanları

Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi'nin öne çıkan avantajı, numunenin yapısal eleman ölçeğinde olması ve donatıya uygulanan kuvvetin çekme yönünde ve doğrudan aktarılması sayesinde, arayüz davranışının daha kontrollü bir şekilde analiz edilebilmesidir. Aynı zamanda deney düzeneği, lifli beton, yüksek dayanımlı beton ve farklı bağ uzunluğu konfigürasyonlarının aderans üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak tanır.

Deney, özellikle yüksek dayanımlı ve lif katkılı betonların kullanıldığı sistemlerde, donatı-beton etkileşimini daha iyi anlayabilmek ve tasarım parametrelerini optimize edebilmek açısından etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

5. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Donatı ile beton arasında kurulan aderans, betonarme yapı elemanlarının yük taşıma kapasitesini, süneklik davranışını ve servis ömrünü doğrudan etkileyen temel bir yapısal parametredir. Bu bağ kuvveti sayesinde donatı ve beton, dış yüklere karşı birlikte çalışabilirlik göstererek dayanım ve rijitlik sağlar. Aderansın zayıf olduğu sistemlerde, donatının sıyrılması veya göçmesi sonucu yapısal bütünlük ciddi şekilde tehlikeye girebilir.

Bu bağlamda, ulusal ve uluslararası düzeyde çok sayıda yüksek lisans ve doktora tezi, donatı-beton arayüzündeki bağ davranışını etkileyen parametreleri deneysel ve teorik olarak incelemeye odaklanmıştır. Çalışmalarda farklı çimento türleri, beton dayanım sınıfları, lif katkıları, bağlayıcı sistemler (örneğin geopolimer beton), donatı yüzey özellikleri, sıcaklık etkisi, bağ uzunluğu, donatı çapı ve yerleşim yönü gibi birçok değişkenin aderans dayanımı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

Bu tezlerde kullanılan deney yöntemleri arasında özellikle çekip çıkarma (pull-out), Belçika mafsallı kiriş, Texas çıkmalı kiriş, eksantrik çekme ve yorulmalı sıyrılma gibi test protokolleri öne çıkmaktadır. Ayrıca bazı çalışmalarda sayısal modelleme ve regresyon analizleri ile deneysel verilerin analizi yapılmış; önerilen bağıntılarla mevcut yönetmelik değerleri karşılaştırılmıştır.

Aşağıda, literatürdeki önemli tez çalışmalarından seçilen örnekler konu başlıklarına göre özetlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Döndüren, Çöğürçü ve Altın (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı beton dayanım sınıflarının (C16 ve C25) ve farklı donatı türlerinin (BÇI – düz yüzeyle, BÇIII – nervürlü) donatı-beton aderansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Araştırmanın amacı, hem beton dayanımının hem de donatı yüzey şeklinin bağ kuvvetine olan katkısını karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır.

Çalışmada, sabit boyutlarda hazırlanan beton numunelerine farklı tipte çelik donatılar yerleştirilmiş ve her bir kombinasyon için çekip çıkarma (pull-out) deneyleri uygulanmıştır. Deneysel veriler, aderans kuvveti, sıyrılma gerilmesi ve göçme tipi gibi kriterler doğrultusunda analiz edilmiştir.

Elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

Nervürlü donatılar (BÇIII), düz yüzeyle donatılara (BÇI) kıyasla belirgin şekilde daha yüksek aderans dayanımı göstermiştir. Bu fark, mekanik kenetlenmenin bağ kuvvetine olan etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Beton sınıfı arttıkça (C16'dan C25'e), aderans kuvvetinde de artış gözlemlenmiştir. Daha yüksek dayanımlı betonlar, donatının çevresinde daha yoğun bir mikro yapı oluşturarak bağ bölgesinde daha güçlü bir tutunma sağlamıştır.

Özellikle düşük dayanım sınıfına sahip betonlarda, aderans göçmesinin daha çok sıyrılma ve yüzeyden ayrılma şeklinde gerçekleştiği; yüksek dayanımlı betonlarda ise kopma davranışının daha kırılğan olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma, beton sınıfı ve donatı tipi gibi temel parametrelerin, betonarme elemanların bağ davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, tasarım aşamasında uygun malzeme seçiminin önemine işaret etmektedir.

Besim Osman Yalçın (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, soğuk hava koşullarının taze betonun priz alma süreci ve donatı ile beton arasındaki aderans kuvveti üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, düşük sıcaklıklarda betonun dayanım gelişimi ve donatı ile kurduğu bağ arasındaki ilişkinin anlaşılmasını sağlamaktır.

Deneysel çalışmada, farklı sıcaklıklarda (-10 °C, -5 °C, 0 °C ve 20 °C [kontrol grubu]) kür edilmiş beton numuneleri hazırlanmış; bu numuneler üzerinde Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi uygulanarak sıyırılma kuvveti ve aderans gerilmesi ölçülmüştür. Kullanılan beton karışımları aynı karışım oranlarına sahip olacak şekilde sabitlenmiş, böylece yalnızca sıcaklık değişkeninin aderansa etkisi izole olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın bulgularına göre:

Soğuk hava koşulları, özellikle taze betonun hidrasyon sürecini yavaşlatarak, geç dayanım gelişimine ve zayıf bağ oluşumuna neden olmuştur. Bu durum, donatı çevresinde zayıf bir geçiş bölgesi oluşmasına sebep olmuştur.

-10 °C ve -5 °C gibi donma sınırına yakın sıcaklıklarda üretilen beton numunelerinde, aderans dayanımında %25'in üzerinde düşüş gözlemlenmiştir.

Normal sıcaklıkta (20 °C) kür edilen beton numunelerle karşılaştırıldığında, düşük sıcaklıklarda oluşan mikroskobik boşluklar, bağın sürekliliğini bozarak sıyırılma direncini azaltmıştır.

Ayrıca, soğuk ortamda üretim sonrası erken yaşta uygulanan yüklerin, çatlak oluşumunu hızlandırarak aderans kaybını artırdığı da gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak çalışma, soğuk iklim bölgelerinde beton dökümünden hemen sonra uygun koruma ve kürlenme yapılmadığı takdirde, donatı ile beton arasında yeterli aderans oluşamayacağını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, tasarım ve uygulama aşamalarında düşük sıcaklık etkisi mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Orhan M. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, betonarme yapılarda çelik donatı ile beton arasında gelişen aderans kuvvetinin, çelik lif katkısı ile nasıl etkilendiği deneysel

olarak araştırılmıştır. Özellikle çatlak kontrolü ve dayanım artışı sağlamak amacıyla beton karışımlarına dahil edilen çelik liflerin, bağ davranışına etkisi bu çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır.

Deneysel program kapsamında, iki ucu kancalı ve 60 mm uzunluğunda çelik lifler kullanılarak farklı oranlarda lif içeren beton karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlarla üretilen numunelerde çekip çıkarma (pull-out) ve Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi uygulanarak lif katkısının aderans dayanımı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Çalışma sonuçlarına göre:

Çelik lifler, donatı çevresindeki mikro çatlak oluşumunu sınırlandırarak betonun kenetlenme davranışını iyileştirmiştir. Bu durum, sıyırılma direncinin artmasına neden olmuş ve maksimum aderans kuvvetini yükseltmiştir.

Liflerin homojen dağılımı ve optimum oranda kullanımı ile birlikte çatlak kontrolü etkin bir şekilde sağlanmış, donatının sıyırılmadan önce daha fazla yük taşıyabildiği tespit edilmiştir.

Ayrıca liflerin bağ yüzeyine uyguladığı mekanik direnç, sadece aderans dayanımını artırmakla kalmamış; aynı zamanda sistemin sünek davranış göstermesini sağlamıştır. Bu, özellikle ani göçme riskinin azaltılması açısından önemli bir bulgudur.

Bu çalışmanın sonucunda, lif takviyesinin yalnızca betonun genel dayanımına değil, donatı ile olan mekanik bağın kalitesine de olumlu katkı sunduğu ortaya konmuştur. Bu nedenle çelik lif katkısı, yüksek performans gerektiren betonarme yapı sistemlerinde aderans iyileştirici bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Alper Duran (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, betonarme yapılarda donatı ile beton arasındaki aderansın yorulma etkisi altındaki davranışı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle yapılar uzun süreli değişken yükler altında çalışırken, donatı-beton arayüzeyinde oluşan bağın sürdürülebilirliği kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda çalışma, aderans kuvvetinin statik ve dinamik sıyırma yükleri altındaki değişimini analiz etmektedir.

Deneysel program kapsamında farklı ankrajlama açlarına (örneğin 0°, 15°, 30°) ve delik çaplarına sahip örnekler hazırlanmıştır. Bu örnekler üzerinde hem statik çekme yükleri hem de tekrarlı/döngüsel (yorulmalı) yükler uygulanarak sıyrılma davranışı gözlemlenmiş ve elde edilen kuvvet–yer değiştirme eğrileri yardımıyla aderans dayanımı belirlenmiştir. Çalışmanın temel bulguları şu şekilde özetlenebilir:

Betonun çekme dayanımı, donatının aderans kapasitesi üzerinde doğrudan belirleyici bir etkidir. Daha yüksek çekme dayanımına sahip betonlarda, sıyrılma kuvvetinin de anlamlı ölçüde arttığı gözlemlenmiştir.

Dinamik yükler altında, aderans dayanımında zamanla azalma meydana geldiği, özellikle döngü sayısının artmasıyla bağın zayıfladığı saptanmıştır. Bu durum, yorulma etkisiyle beton-donatı arayüzeyinde mikro çatlakların birikerek makro kopmalara yol açmasından kaynaklanmaktadır.

Delik çapı ve ankrajlama eğimi arttıkça, bağ yüzeyindeki stres dağılımı bozulmuş ve bu da aderans kuvvetinde azalmaya neden olmuştur. Özellikle büyük çaplı deliklerde kenetlenmenin yeterli düzeyde oluşmaması, sıyrılmayı kolaylaştırmıştır.

Bu çalışma, betonarme yapılarda aderans dayanımının yalnızca malzeme özelliklerine değil, aynı zamanda bağlantı detayları ve yükleme türlerine de bağlı olarak değişebileceğini göstermiştir. Yapı ömrü boyunca tekrar eden yüklerin etkisi altında aderansın zayıflayabileceği dikkate alınarak, tasarımlarda güvenlik katsayılarının buna göre ayarlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Yeşim Ünal (1998) tarafından yapılan çalışmada, çelik donatı ile beton arasındaki aderans davranışının, betonun agrega tane çapı ve basınç dayanımı gibi parametreler doğrultusunda nasıl değiştiği deneysel olarak incelenmiştir. Araştırma, betonarme yapıların performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri olan aderans kuvvetinin, beton bileşenlerine bağlı olarak optimize edilebileceğini göstermeyi amaçlamaktadır.

Tez kapsamında farklı beton sınıfları (örneğin C20, C30, C40) ve çeşitli maksimum agrega çapları (8 mm, 16 mm, 22 mm gibi) kullanılarak deney numuneleri hazırlanmış; bu

numunelere belirli çap ve kenetlenme boyuna sahip nervürlü çelik donatılar yerleştirilmiştir. Aderans dayanımı, her bir değişken için pull-out (çekip çıkarma) deneyleri ile ölçülmüştür.

Deneysel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

Agrega tane çapı büyüdükçe, donatının çevresindeki mekanik kenetlenme artmış ve bu durum aderans dayanımına olumlu katkı sağlamıştır. Ancak, çok büyük agrega boylarının homojen karışımı zorlaştırabileceği ve boşluk oluşturabileceği de vurgulanmıştır.

Beton sınıfı arttıkça, yani daha yüksek basınç dayanımlı betonlar kullanıldıkça, bağ dayanımının da paralel olarak yükseldiği görülmüştür. Bu artış, daha yoğun mikro yapıya sahip beton matrisinin donatı yüzeyine daha iyi tutunması ile açıklanmıştır.

Agrega türü sabit tutulmuş olsa da, farklı dane çaplarının bağ yüzeyinde oluşturduğu gerilme dağılımı ve çatlak örüntüsü, aderans davranışını önemli ölçüde etkilemiştir.

Sonuç olarak, çalışmada yüksek mukavemetli ve uygun dane boyutuna sahip betonların donatı ile daha güçlü bir bağ geliştirdiği; dolayısıyla aderans dayanımının iyileştirilmesinde bu parametrelerin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Konca (2006) tarafından yapılan çalışmada, betonarme yapılarda donatı ile beton arasındaki aderansın çeşitli parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiği deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, farklı çimento türleri, donatı çapları ve donatı tiplerinin aderans dayanımı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan çimento türleri:

Portland Çimentosu (CEM I)

Katkılı Portland Çimentosu (CEM II)

Traslı Çimento (CEM IV)

Ayrıca deney numunelerinde, 10 mm ve 16 mm çaplarında, hem düz yüzeyli hem de nervürlü çelik donatılar kullanılmıştır. Numunelerde kullanılan beton karışımları, farklı çimento tipleriyle üretilerek çeşitli dayanım sınıflarında tasarlanmış; bu sayede çimento türünün yalnızca dayanım değil, bağ davranışına da etkisi gözlemlenmiştir. Tüm numuneler üzerinde çekip çıkarma (pull-out) testleri uygulanarak aderans kuvvetleri karşılaştırılmıştır.

Deneysel bulgular şu şekilde özetlenmiştir:

Nervürlü donatılar, düz donatılara kıyasla daha yüksek aderans dayanımı sağlamıştır. Bu, mekanik kenetlenmenin aderans üzerindeki etkisini doğrulamaktadır.

Çimento cinsi, elde edilen betonun mikro yapısını etkileyerek bağ ortamını değiştirmiştir. Özellikle Portland çimentosu ile hazırlanan betonların daha yüksek aderans değerleri bulunduğu belirlenmiştir.

Donatı çapı arttıkça, bağ yüzey alanı artsa da birim yüzeye düşen bağ kuvveti azalmış ve bu durum bağ dayanımında düşüşe neden olmuştur.

Katkılı ve traslı çimentolar, belirli oranlarda bağ ortamının homojenliğini artırsa da, bağ kuvveti üzerinde çelişkili etkiler gösterebilmiştir. Bu durum, hidrasyon ürünlerinin aderans arayüzeyine etkisiyle ilişkilendirilmiştir.

Bu çalışma, çimento seçiminin ve donatı özelliklerinin yalnızca betonun dayanımını değil, aynı zamanda donatı ile kurduğu bağın etkinliğini de önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle, aderans performansı gerektiren uygulamalarda malzeme seçimleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmelidir.

Muhammet Oğuzhan Çakıroğlu (2020) tarafından yapılan çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) donatıların beton içerisindeki aderans davranışı, çeşitli parametrelerin etkisi altında detaylı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, geleneksel çelik donatılara alternatif olarak geliştirilen GFRP donatıların bağ kapasitesini ve bu kapasiteyi etkileyen değişkenleri ortaya koymaktır.

Deneysel çalışmada, hem nervürlü hem de kumlu yüzeye sahip GFRP donatılar kullanılarak farklı çaplarda (Ø10 mm, Ø16 mm gibi) numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, çeşitli sıcaklık koşullarına (örneğin 20°C, 40°C, 60°C) maruz bırakılarak pull-out (çekip çıkarma) deneyleri uygulanmıştır. Aderans gerilmesi, sıyrılma kuvveti ve bağ gerilmesi–kayma ilişkileri değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre:

Donatı yüzey özellikleri, aderans davranışında belirleyici faktörlerden biri olmuştur. Kumlu yüzeye sahip GFRP donatılar, yüzey sürtünmesini artırdığı için nervürlü yüzeyli GFRP donatılara kıyasla daha yüksek aderans dayanımı göstermiştir.

Sıcaklık artışı, GFRP donatıların aderans kapasitesinde düşüşe neden olmuştur. Bu durum, polimer bazlı yapının ısıya karşı duyarlılığı ve bağlayıcı ortamda yumuşama eğilimi göstermesiyle açıklanmıştır.

Donatı çapı, bağ yüzey alanını etkileyerek aderans kuvvetlerinde farklılıklara neden olmuştur. Ancak büyük çaplı GFRP donatılarda bağ homojenliğinin azalması, yerel kopmalarla sonuçlanabilmiştir.

Bu çalışma, GFRP donatıların mekanik bağ performansının sadece yüzey geometrisiyle değil, aynı zamanda çevresel etkilerle (örneğin sıcaklık) doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, GFRP sistemlerinin aderans performansının iyileştirilmesi için yüzey modifikasyonlarının önemine dikkat çekilmiştir.

Metin Hüsem (2004) tarafından yapılan çalışmada, yüksek başarılı betonlar (YBB) ile geleneksel normal dayanımlı betonlar arasında donatı-beton aderansı açısından performans karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmada amaç, betonun mekanik özelliklerindeki artışın donatı ile kurduğu bağa etkisini sistematik olarak ortaya koymaktır.

Araştırma kapsamında, farklı dayanım sınıflarındaki betonlardan (C30, C60, C80 gibi) üretilen numuneler hazırlanmış ve içerisine belirli kenetlenme boylarına sahip nervürlü çelik donatılar yerleştirilmiştir. Numuneler üzerinde çekip çıkarma (pull-out) deneyleri

uygulanarak, her bir beton sınıfı için donatı çevresinde gelişen aderans gerilmesi ve sıyrılma kuvvetleri ölçülmüştür.

Deney sonuçlarına göre:

Yüksek başarımı betonlarda (YBB), bağ dayanımı genel olarak daha yüksek çıkmış; bu durum, yoğun ve düşük boşluk oranına sahip iç yapının donatı çevresinde daha güçlü bir bağ ortamı oluşturmasından kaynaklanmıştır.

Bununla birlikte, YBB sistemlerinde gevrek göçme davranışının daha erken başladığı, çatlak kontrolünün lif katkısı olmaksızın zorlaştığı da gözlemlenmiştir.

Geleneksel betonlarda, aderans dayanımı daha düşük olsa da, daha sünek ve uyarı veren bir sıyrılma davranışı sergilenmiştir.

Ayrıca donatı çapı ve yüzey özelliklerinin her iki beton türü için aderans performansını etkilediği belirlenmiştir; özellikle daha küçük çaplı donatılar, yüzey alanı başına daha yüksek bağ gerilmesi sağlayarak yüksek bağ kuvvetleri üretmiştir.

Bu çalışma, yüksek başarımı betonların yalnızca basınç dayanımı değil, aynı zamanda donatı ile kurduğu bağ açısından da farklı mühendislik parametrelerine sahip olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, YBB'nin aderans performansını artırdığı, ancak süneklik gibi davranışsal gereksinimlerin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Esra Tuğrul Tunç (2020) tarafından yapılan çalışmada, yüksek performanslı hafif betonlar (YPHB) ile donatı arasındaki aderans davranışı hem deneysel hem de sayısal analiz yöntemleriyle kapsamlı olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, yapı hafifliğinin sağlandığı özel beton karışımlarında, donatı ile beton arasındaki bağ performansının değerlendirilmesidir.

Tez kapsamında, farklı çaplara (Ø12, Ø16, Ø20 mm) ve kenetlenme boylarına (5φ, 10φ) sahip nervürlü çelik donatılar, özel olarak tasarlanmış YPHB karışımlarına gömülerek Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi yöntemi ile test edilmiştir. Deneysel program çerçevesinde hem taze beton özellikleri (yayılma, yerleşme, kıvam) hem de sertleşmiş beton özellikleri (basınç ve çekme dayanımı, birim hacim ağırlığı) değerlendirilmiştir.

Çalışmanın önemli bulguları şu şekildedir:

YPHB'lerde, geleneksel betona kıyasla düşük yoğunluklu agrega kullanımı nedeniyle aderans dayanımında bir miktar düşüş gözlenmiş; ancak uygun agrega seçimi ve lif katkısı ile bu fark minimize edilebilmiştir.

Donatı çapı büyüdükçe aderans dayanımı azalma eğilimi göstermiştir. Bu durum, daha büyük çaplı donatılarda çevresel yüzey başına düşen kenetlenme gerilmesinin azalmasından kaynaklanmıştır.

Kenetlenme boyunun artırılması, aderans kuvvetini anlamlı ölçüde artırmıştır. 10φ kenetlenme boyunda daha kararlı ve sünek sıyrılma davranışı gözlemlenmiştir.

Ayrıca, elde edilen deneysel veriler kullanılarak sayısal modellemeler gerçekleştirilmiş ve sonuçların, literatürde önerilen bağ gerilmesi–sıyrılma bağıntılarıyla tutarlı olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışma, yapının taşıma kapasitesi ve süneklik gereksinimlerinin karşılandığı durumlarda hafif beton kullanımının aderans açısından optimize edilebileceğini göstermekte ve yüksek performanslı hafif beton sistemlerinin mühendislik uygulamalarındaki kullanılabilirliğini desteklemektedir.

Mervan Aba (2023) tarafından yapılan çalışmada, çimento içermeyen bağlayıcı sistemlere sahip geopolimer betonların, çelik donatıyla olan aderans davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma, geleneksel portland çimentosu yerine yüksek oranda uçucu kül ve alkali aktivatör kullanılan geopolimer betonların sürdürülebilirliği ve mekanik performansı bağlamında değerlendirilmiştir.

Deneysel kısımda, farklı kenetlenme boyları ve donatı konfigürasyonları kullanılarak üretilen numuneler üzerinde Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi uygulanmıştır. Bu yöntem, donatının beton içerisinden sıyrılma davranışını eğilme yükleri altında değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

Elde edilen bulgulara göre:

Geopolimer betonların çelik donatı ile oluşturduğu aderans dayanımı, uygun karışım oranlarıyla sağlandığında klasik çimentolu betonlara benzer veya daha üstün performans sergileyebilmektedir.

Aderans dayanımını belirleyen temel unsurlar arasında kenetlenme boyu, paspayı ve bağlayıcı sistemin homojenliği yer almaktadır.

Donatı konfigürasyonlarının (düz veya nervürlü, farklı çaplar) aderans performansı üzerinde önemli etkileri olduğu, özellikle nervürlü çubukların geopolimer matriste daha yüksek kenetlenme kuvveti sağladığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca, geopolimer betonların düşük gözenekliliği ve yüksek erken dayanımı sayesinde donatı çevresindeki mikro yapının güçlü olduğu ve çatlak oluşumunun geciktiği tespit edilmiştir.

Çalışma, geleneksel betonlara sürdürülebilir bir alternatif olarak sunulan geopolimer sistemlerin, yapısal bütünlük ve aderans açısından da mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliğini destekler niteliktedir. Özellikle çevresel etkilerin azaltılması ve CO₂ salımının düşürülmesi yönünden geopolimer betonlar, aderans performanslarını da kanıtlayarak önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Ahmet Beycioğlu (2013) yapılan çalışmada, kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ile üretilmiş betonarme kiriş elemanlarında farklı türde lifli donatıların (çelik, cam elyaf ve bazalt) betonla olan aderans davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan ana deney yöntemi, donatının eğilme altındaki sıyrılma davranışını incelemeye olanak tanıyan Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi olmuştur.

Tez kapsamında hazırlanan numunelerde, her bir lifli donatı türü için farklı kenetlenme boyları, donatı çapları ve pas payları sabit tutulmuş; böylece lif türünün aderansa etkisi izole biçimde değerlendirilebilmiştir. Elde edilen veriler, her donatı tipi için sıyrılma kuvveti ve bağ gerilmesi hesaplanarak analiz edilmiştir.

Deney sonuçlarına göre:

Cam elyaf takviyeli donatılar, düşük bağ kapasitesi sergileyerek aderans açısından en zayıf performansı göstermiştir. Bu, cam lifin düşük yüzey sürtünmesi ve kırılğan yapısından kaynaklanmaktadır.

Bazalt lifli donatılar, hem mekanik kenetlenme hem de yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi sonuçlar vermiş ve çelik donatıya en yakın aderans değerlerini sağlamıştır.

Çelik donatılar ise hem yüksek bağ dayanımı hem de sünek davranış özellikleri ile en iyi aderans performansını göstermiştir.

Ayrıca, çalışmada kullanılan KYB karışımlarının, geleneksel betona göre daha homojen dağılım ve yüksek yerleşebilirlik sağlaması sayesinde donatı çevresindeki bağ ortamının daha kararlı hale geldiği, bunun da aderans dayanımını genel olarak artırdığı vurgulanmıştır.

Bu çalışma, lif türünün aderans üzerindeki etkisinin yalnızca malzeme değil, aynı zamanda donatı-beton arayüzeyinde oluşan mikro yapı ile de doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymakta ve lifli donatıların kullanılacağı betonarme uygulamalarda dikkatli seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Recep Çelik (2019) tarafından yapılan çalışmada, katkı maddeleri kullanılarak üretilmiş betonların hem eğilme hem de aderans dayanımı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada, özellikle uçucu kül ve silis dumanı gibi puzolanik mineral katkıları ile çelik lif takviyesi, aderans ve çatlak kontrol performansı açısından değerlendirilmiştir.

Deneysel aşamada üç farklı test yöntemi uygulanmıştır:

Pull-Out (Çekip çıkarma) deneyi: Donatının aksel olarak çekilmesiyle aderans kuvveti ölçülmüştür.

Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi: Eğilme etkisinde aderans davranışı incelenmiştir.

Eksantrik çekme deneyi: Gerçek yükleme senaryolarını daha yakından temsil eden bu yöntemle, kenetlenme boyu ve donatı konfigürasyonlarının aderansa etkisi analiz edilmiştir.

Çalışmanın bulgularına göre:

Uçucu kül ve silis dumanı katkıları, betonun mikro yapısını daha yoğun hale getirerek donatı ile beton arasındaki kimyasal bağlanmayı güçlendirmiştir. Böylece aderans gerilmesinde belirgin bir artış sağlanmıştır.

Çelik lif katkısı, çatlakların ilerlemesini yavaşlatarak yük transferinin daha uzun süre sürdürülebilmesine olanak tanımış, bu da aderansın stabil kalmasını sağlamıştır.

Farklı deney türleri arasında gözlemlenen varyasyonlar ise her yöntemin bağ davranışını farklı yönlerden temsil ettiğini ortaya koymuştur. Belçika kiriş deneyi, eğilme altındaki bağ davranışını daha iyi simüle ederken, pull-out deneyi hızlı ve karşılaştırmalı analizler için uygun bulunmuştur.

Bu çalışma, katkı maddelerinin sadece betonun dayanım özelliklerine değil, aynı zamanda donatı ile olan aderans ilişkisine de olumlu katkılar sunduğunu göstermiştir. Aynı zamanda, deneysel yöntemin seçiminde test amacının belirleyici rol oynadığı vurgulanmıştır.

Kemal Muhammet Erten (2009) tarafından yapılan çalışmada, farklı türlerde katkı maddeleri ile üretilmiş betonların donatıyla olan aderans dayanımı üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde incelenmiştir. "Katkılı Betonların Aderans Dayanımlarının İncelenmesi" başlıklı bu çalışmada, hem mineral katkıları (uçucu kül gibi puzolanik malzemeler) hem de lif katkıları (çelik lif ve doğal sisal lifi) değerlendirmeye alınmıştır.

Çalışmada kullanılan deneysel yöntem, çekip çıkarma (pull-out) testidir. Farklı katkı oranlarına sahip beton numuneleri içerisine yerleştirilen çelik donatılar, aksenal çekme kuvvetine maruz bırakılmış; elde edilen maksimum kuvvet ve sıyrılma miktarları

yardımıyla aderans dayanımları hesaplanmıştır. Deneylerde 16 mm çapında nervürlü donatı kullanılmış ve donatılar 20 cm kenetlenme boyuna gömülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre:

Çelik lif katkısı, donatı etrafındaki betonun çatlama direncini artırarak aderans dayanımını anlamlı düzeyde yükseltmiştir.

Sisal lifi, doğal ve düşük maliyetli bir lif olmasına rağmen aderans dayanımına sınırlı katkı sağlamış; ancak liflerin beton matrisinde homojen dağılması halinde performansın arttığı gözlemlenmiştir.

Uçucu kül katkısı, çimento içeriğini kısmen ikame ederek daha yoğun bir mikro yapı oluşturmuş, böylece donatı yüzeyine tutunmayı güçlendirmiştir.

Sonuç olarak çalışma, uygun oranda kullanılan lif ve mineral katkıların, donatı ile beton arasındaki bağ dayanımını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, katkı türü ve miktarının aderans davranışında belirleyici olduğu vurgulanmıştır.

Selim Baradan (1997) tarafından yapılan çalışmada, donatı ile beton arasındaki aderans davranışının yüksek sıcaklık etkisi altındaki değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Özellikle yangın gibi ani ve yüksek sıcaklık maruziyetine bağlı olarak ortaya çıkan dayanım kayıplarının, betonarme yapıların bütünlüğünü ne ölçüde tehdit ettiği bu çalışma kapsamında araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda farklı sıcaklık seviyelerine (örneğin 100°C, 300°C, 500°C ve 700°C) ısıtılmış beton numuneleri kullanılmış; belirli sürelerde bu sıcaklıklarda tutulduktan sonra standart ortam sıcaklığına soğutulmuş donatı-beton aderans testlerine tabi tutulmuştur. Aderans dayanımı, sıyrılma kuvveti ölçümleri ile değerlendirilmiştir.

Elde edilen veriler, sıcaklık arttıkça betonun iç yapısında bozulmaların meydana geldiğini ve bu durumun aderans kuvvetini önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Özellikle 500°C üzerindeki sıcaklıklarda donatı çevresindeki çatlakların yoğunlaştığı, beton matrisinin parçalanmaya başladığı ve dolayısıyla mekanik kenetlenmenin büyük ölçüde

zayıfladığı belirlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık artışının çelik donatının genişmesine neden olarak bağ yüzeyinde mikro çatlak oluşumunu tetiklediği ve bu durumun da aderans dayanımını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Bu çalışma, yüksek sıcaklık maruziyetinin yalnızca betonun basınç dayanımı değil, aynı zamanda donatıyla olan bağ kuvvetini de zayıflattığını ortaya koyarak, yangın dayanımı yüksek betonarme tasarımlarının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Cheng-Yee Wang (1963) tarafından yürütülen bu çalışmada, betonarme yapıların en temel davranışlarından biri olan donatı ile beton arasındaki bağ (aderans) gerilmesinin çeşitli parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiğini deneysel olarak incelemiştir. Kansas State University'de gerçekleştirilen çalışmada, bağ dayanımını etkileyen bir dizi fiziksel ve malzeme özelliği sistematik biçimde değerlendirilmiştir.

Çalışmada, aşağıdaki parametrelerin aderans gerilmesi üzerindeki etkileri ayrı ayrı test edilmiştir:

Su/çimento (S/Ç) oranı: Düşük S/Ç oranlarının aderans dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Bunun nedeni, düşük oranlı karışımların daha yoğun (kompakt) bir matris yapısı oluşturması ve donatı yüzeyine daha iyi tutunma sağlamasıdır.

Donatı şekli ve yüzeyi: Düz ve nervürlü çubuklar arasında yapılan karşılaştırmalarda, mekanik kenetlenmenin önemli rol oynadığı vurgulanmıştır. Ayrıca donatı yüzeyine uygulanan kaplamalar (örneğin epoksi) da bağ gerilmesini doğrudan etkilemiştir.

Yerleştirme yönü: Donatının beton içinde yatay ya da dikey yönde yerleştirilmesinin, aderans davranışında farklılık yarattığı gözlemlenmiştir. Özellikle dikey yerleştirilen donatılarda beton yerleşimi sırasında segregasyon riski nedeniyle bağ gerilmesi düşebilmektedir.

Vibrasyon süresi: Betonun yerleştirilmesi esnasındaki vibrasyon süresinin artırılmasının, boşluksuz bir dolgu sağlayarak aderansı olumlu yönde etkilediği raporlanmıştır.

Agrega boyutu ve çimento miktarı: Daha büyük agrega çaplarının mekanik kenetlenmeye katkı sağladığı ve bağ dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde, çimento

miktarının artırılması da bağ yüzeyindeki mikro yapı özelliklerini iyileştirerek aderansı güçlendirmiştir.

Wang'ın bu çalışması, modern betonarme tasarımda kullanılan bağ modellemelerinin gelişimine öncülük etmiştir. Ayrıca çalışmanın sonuçları, özellikle düşük su/çimento oranı ve artırılmış çimento içeriği ile aderansın optimize edilebileceğini ortaya koyarak, günümüzdeki yüksek performanslı beton tasarımlarına doğrudan katkı sağlamaktadır.

Lemnitzer, Schröder, Lindorf ve Curbach (2009) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, özellikle nükleer santral yapılarında karşılaşılan karmaşık yükleme durumları altında betonarme yapı elemanlarında donatı ile beton arasındaki bağ davranışını araştırmayı amaçlamıştır. Çalışma kapsamında, çok eksenli yükleme koşullarında (örneğin eksenel çekme, enine gerilme ve moment etkisi altında) donatı-beton arayüzeyinin mekanik etkileşimi deneysel olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda, çeşitli beton örtü kalınlıklarına sahip örnekler üzerinde pull-out (çekip çıkarma) testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerle birlikte, örneklerin bazılarında enine çekme gerilmesi uygulanarak aderans dayanımında meydana gelen değişim analiz edilmiştir. Araştırmacılar, yalnızca eksenel yüklemeye maruz kalan numuneler ile hem eksenel hem de enine çekme yüküne maruz kalan numuneleri karşılaştırarak, çok eksenli gerilme durumunun bağ dayanımı üzerindeki etkisini ortaya koymuştur.

Çalışmanın önemli bulgularından biri, enine çekme gerilmelerinin donatı-beton bağ dayanımını azaltıcı etkisi olmuştur. Bu durum, enine çekmenin donatı çevresindeki çatlakların genişlemesini tetikleyerek, mekanik kenetlenmeyi zayıflatmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, beton örtü kalınlığının yalnızca aderans dayanımına değil, aynı zamanda göçme moduna (kopma, sıyırılma, yarıma vb.) da etkide bulunduğu belirlenmiştir. Daha kalın beton örtüsüne sahip örneklerde, bağ dayanımının arttığı ve sıyırılma yerine kopma türü göçmelerin gözlemlendiği raporlanmıştır.

Bu çalışma, yüksek güvenlik gerektiren yapılar (örn. nükleer santraller, barajlar, kritik altyapı elemanları) için tasarım kriterlerinin belirlenmesinde donatı-beton aderansının çok eksenli yükleme koşulları altında değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, tasarım standartlarının bu tür yükleme kombinasyonlarını dikkate alarak geliştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton Karışımı ve Üretimi

Bu çalışmada kullanılacak karışımlar Tablo 6.1 de verilmiştir. Üretimi yapılan betonlarda bağlayıcı olarak CEM I 42.5 Portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Agrega 0-400 mikron kuvarz kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı çok düşük olduğu için kıvamı dengelemek için polikarboksilat eter esaslı akışkanlaştırıcı tercih edilmiştir. Lifli betonlarda ise hacimce %2 oranında mikro çelik lif kullanılmıştır. Çelik lif 2500 MPa çekme dayanımına sahiptir. Çapı 0.16 mm, boyu 13 mm olan çelik lifin narinlik oranı 81'dir. Üretilen betonların basınç dayanımları 10x10x10 küp numuneler ile belirlenmiştir. Bu numunelerin üretimi için Şekil 6.1'de verilen 2 gözlü standart kalıplar kullanılmıştır.

Tablo 6.1: Ultra yüksek performanslı beton karışım oranları

Malzeme	NF	%2F
Listesi	Miktar(kg/m ³)	Miktar(kg/m ³)
Çimento	720	720
Silis Dumanı	240	240
Yüksek Fırın Cürufu	240	240
Su	204	204

Akışkanlaştırıcı	24	24
Agrega	855	806
Çelik Lif	0	156



Şekil 6.1: Küp numune kalıpları

6.2 Test Kirişlerinin hazırlanışı

Test kirişleri için boyutları $100 \times 180 \times 800$ mm boyutlarında 3 adet kalıp hazırlanmıştır (Şekil 6.2). Test numuneleri iki parçalı ve özel bir geometriye sahip olduğundan orta bölgeye özel bir strafor kesilip yerleştirilmiştir. Donatıların kalıpların kenarlarından daha rahat çıkabilmesi için yan kapak olarak da xps strafor kullanılmıştır.



Şekil 6.2: Kiriş kalıplar

Aderansın belirlenmesi için BS 4449:2005’de çapı $\phi 14$ mm olan çelik donatı çubukları verilen değerlere göre donatıların uç ve orta bölgelerine özel bir kılıf yerleştirilmiştir. Kiriş kalıbının sağında ve solunda sadece orta bölgede donatı ile betonun teması sağlanmıştır (Şekil 6.3).

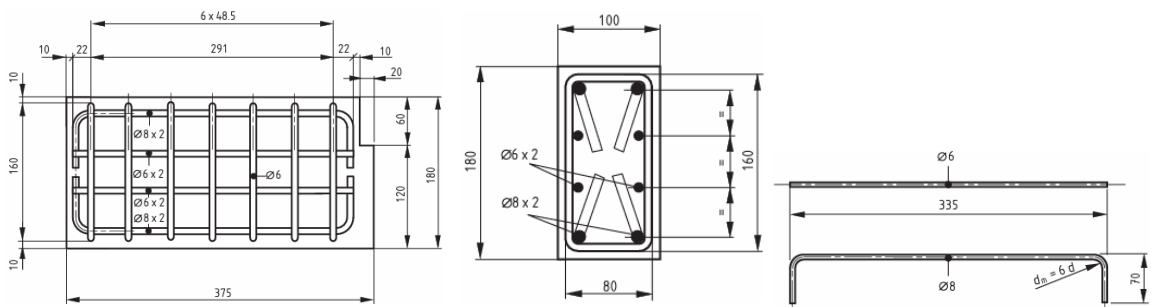


Şekil 6.3: $\phi 14$ Çelik donatılar ve özel kılıfların yerleştirilmesi

Lifli ve lifsiz numunelerdeki donatılar Şekil 6.4’de verilmiştir. Üretilen kirişlerde lifli olan numunelerde kesme kırılması olmayacağı için herhangi bir etriye uygulaması yapılmamıştır. Ancak lifsiz numunelerde kesme kırılmasını engellemek için BS 4449:2005’de önerilen ve Şekil 6.5’de verilen kesme donatısı uygulanmıştır.



Şekil 6.4: Kiriş kalıpları; a) Lifli UYPB kalıpları b) Lifsiz UYPB kalıpları



Şekil 6.5: Lifsiz betonlu numunelerin kesme donatısı planları

Çalışmada ana parametre aderans boyu ve paspayının etkisidir. Bu nedenle iki farklı (10φ ve 5φ) aderans boyu ve üç farklı paspayı (14,28 ve 42 mm) incelenmiştir. Ayrıca lifin katkısını belirleyebilmek için her numunenin lifsiz ve %2 lifli üretimi yapılmıştır. Test edilecek numuneler Tablo 6.2'deki verilmiştir.

Numune İsimleri	Açıklama
10φ-NF-14MM	10 φ Kenetlenme boyu lifsiz 14mm paspayı
10φ-NF-28MM	10 φ Kenetlenme boyu lifsiz 28mm paspayı
10φ-NF-42MM	10 φ Kenetlenme boyu lifsiz 42mm paspayı
10φ-2F-14MM	10 φ Kenetlenme boyu %2 Lifli 14mm paspayı
10φ-2F-28MM	10 φ Kenetlenme boyu %2 Lifli 28mm paspayı
10φ-2F-42MM	10 φ Kenetlenme boyu %2 Lifli 42mm paspayı
5φ-NF-14MM	5 φ Kenetlenme boyu lifsiz 14mm paspayı
5φ-NF-28MM	5 φ Kenetlenme boyu lifsiz 28mm paspayı
5φ-NF-42MM	5 φ Kenetlenme boyu lifsiz 42mm paspayı
5φ-2F-14MM	5 φ Kenetlenme boyu %2 Lifli 14mm paspayı
5φ-2F-28MM	5 φ Kenetlenme boyu %2 Lifli 28mm paspayı
5φ-2F-42MM	5 φ Kenetlenme boyu %2 Lifli 42mm paspayı

Tablo 6.2: Test numuneleri

Kiriş numunelerini üretiminde 100 dm³ kapasiteli UYPLB üretimi için özel olarak tasarlanmış pan mikser kullanılmıştır.



Şekil 6.6: UYPLB üretiminde kullanılan pan mikser

Pan mikserle her bir karışımda üç kiriş ve 6 küp numune üretilmiştir. Üç kirişte değişkenler paspayıdır. Üretilen bir grup numune Şekil 6.7’da verilmiştir.



Şekil 6.7: Her bir döküm setine ait örnek numuneler

Belirlenen kür süresi sonunda numuneler kalıplardan çıkarılmış ve tam dayanımlarını kazanabilmeleri için Özel olarak tasarlanmış kür havuzuna yerleştirilmiştir. Her bir numune grubu 24 saat 90°C’de kürlenmiştir (Şekil 6.8).



Şekil 6.8: Kür havuzu

6.3 Test Düzenekleri

Numunelerin özellikleri aksenal basınç testleri ve dört noktalı eğilme testleri ile belirlenmiştir. Aksenal basınç testleri 2000 kN kapasitesi dört kolonlu deformasyon kontrollü beton presinde yapılmıştır (Şekil 6.9).



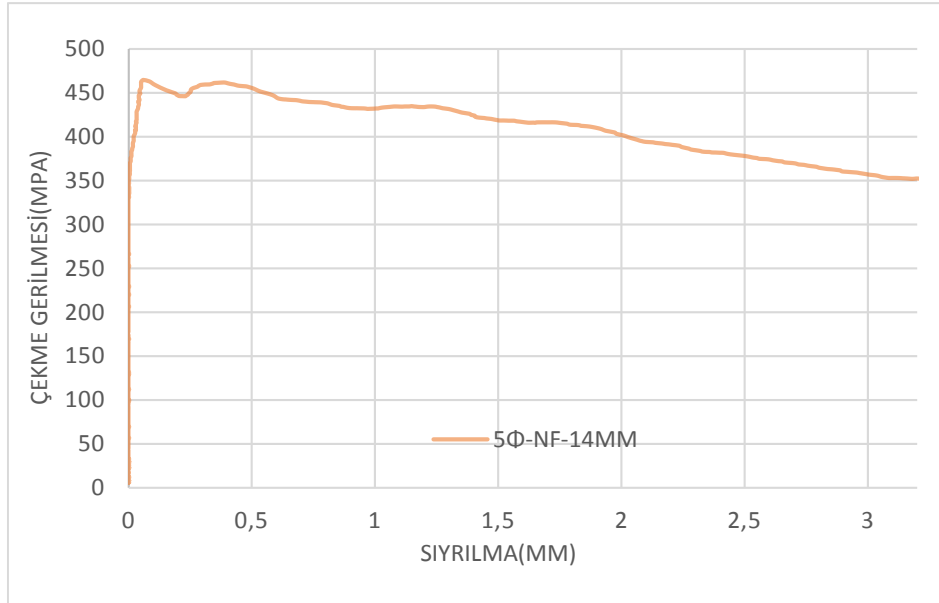
Şekil 6.9:Beton test presi

Aderans testleri ise Prof. Dr. Şerif Saylan Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan 500kN kapasiteli kiriş test düzeneğinde yapılmıştır (Şekil 6.10). Numunelere 4 noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Test numunelerinin mesnet ve yük açıklıkları BS 4449:2005’de verilmiştir. (Şekil 6.11). Testlerde yük sıyrılma değerleri ölçülmüştür. Yük 500 kN kapasiteli yük hücresi ile ölçülmüştür. Sıyrılmayı ölçmek için test numunelerinin sağından ve solundan çıkan donatıların üzerine yerleştirilen 30mm kapasiteli potansiyometrik cetvel yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 6.10).

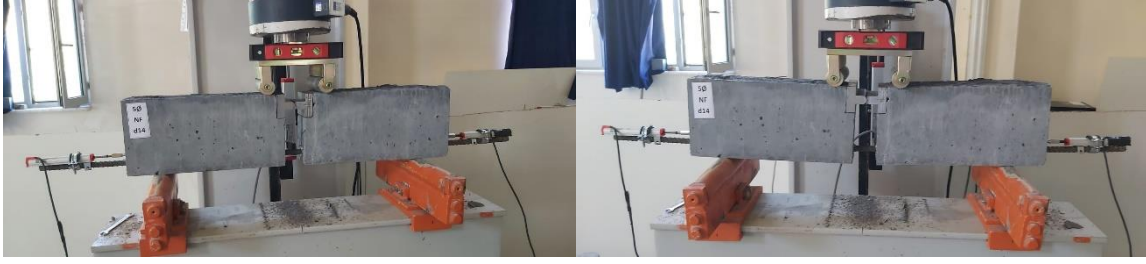
7. BULGULAR

7.1 5Φ-NF-14MM numunesine ilişkin deney sonuçları

5Φ-NF-14MM numunesinde, 0,25 mm sıyrılma seviyesinde çekme gerilmesi 450,62 MPa'ya ulaşmıştır. Maksimum çekme gerilmesi 461,96 MPa, 0,35 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir. Maksimum noktadan sonra çekme gerilmesi azalma eğilimi göstermiş olsa da, 3,00 mm sıyrılmada 356,76 MPa seviyesinde kapasitenin korunduğu gözlenmiştir.



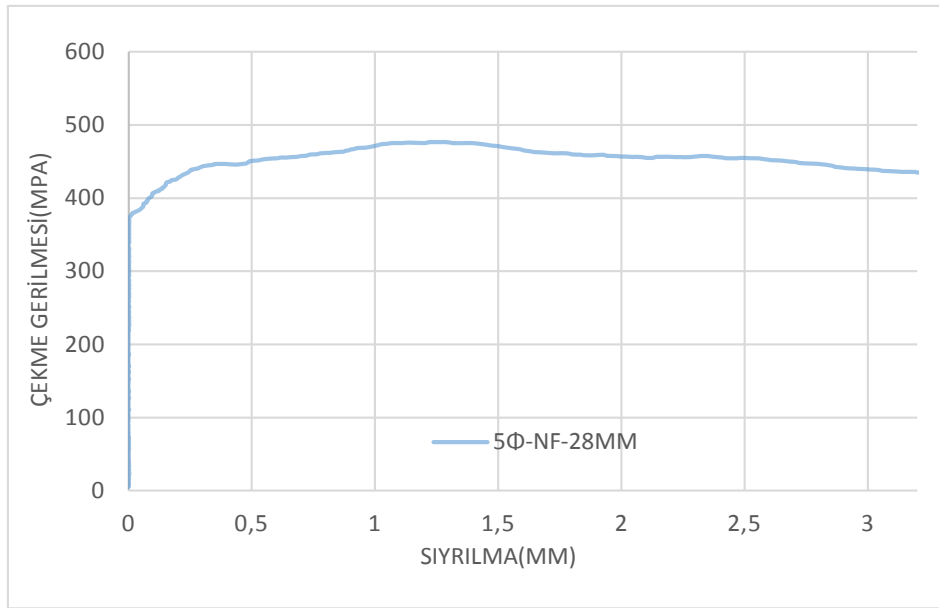
Şekil 7.1: 5Φ-NF-14MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



Şekil 7.2: 5Φ-NF-14MM kodlu deney numunesi a) deney öncesi b) deney sonrası

7.2 5Φ-NF-28MM numunesine ilişkin deney sonuçları

5Φ-NF-28MM numunesinde 0,25 mm sıyrılma seviyesinde 437 MPa çekme gerilmesi elde edilmiştir. Maksimum çekme gerilmesi 476 MPa, 1,25 mm sıyrılma değerinde gözlemlenmiştir. Maksimum noktadan sonra gerilmeye sınırlı bir azalma meydana gelmiş, ancak sistem 3,00 mm sıyrılmada dahi 439 MPa seviyesini koruyarak dayanımını sürdürmüştür.



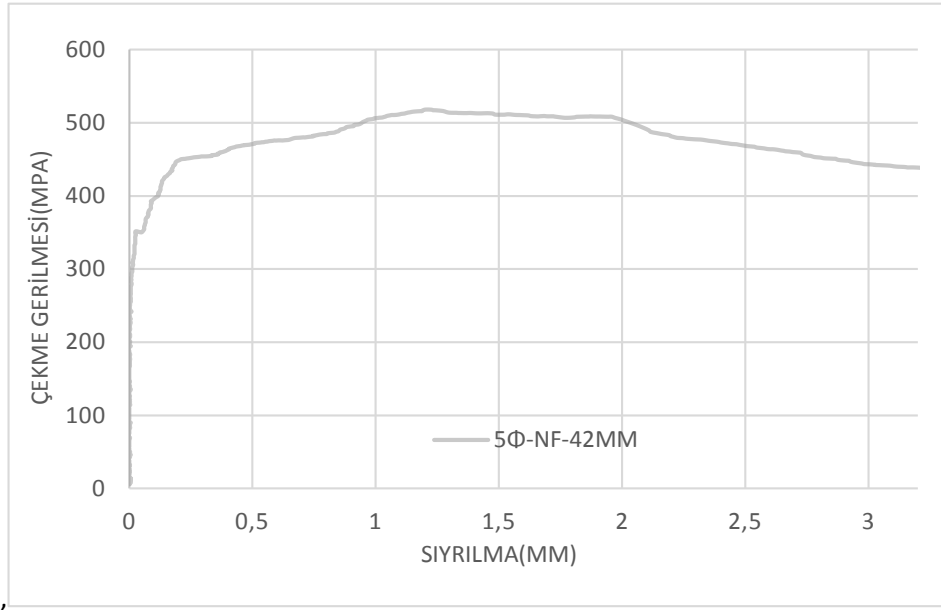
Şekil 7.3: 5Φ-NF-28MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



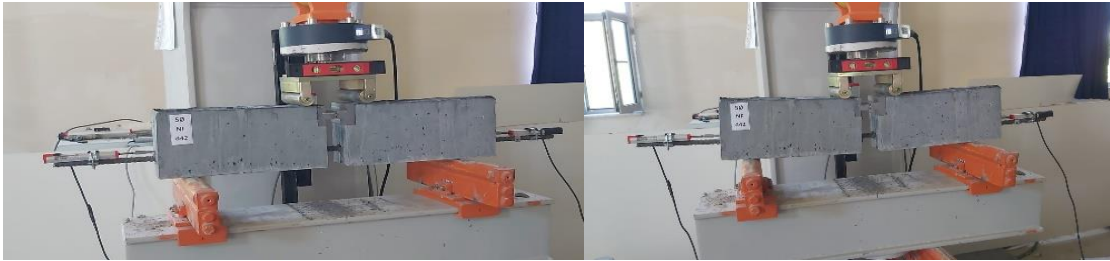
Şekil 7.4: 5Φ-NF-28MM kodlu deney numunesi

7.3 5Φ-NF-42MM numunesine ilişkin deney sonuçları

5Φ-NF-42MM numunesinde maksimum çekme gerilmesi 518,10 MPa, 1,203 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir. Başlangıçta, 0,25 mm sıyrılmada 452 MPa değerine ulaşılması, sistemin yüksek başlangıç rijitliğine sahip olduğunu göstermektedir. Maksimum noktadan sonra çekme gerilmesi azalmış olsa da, 3,00 mm sıyrılmada 443,22 MPa seviyesinde kapasitenin korunduğu görülmektedir.



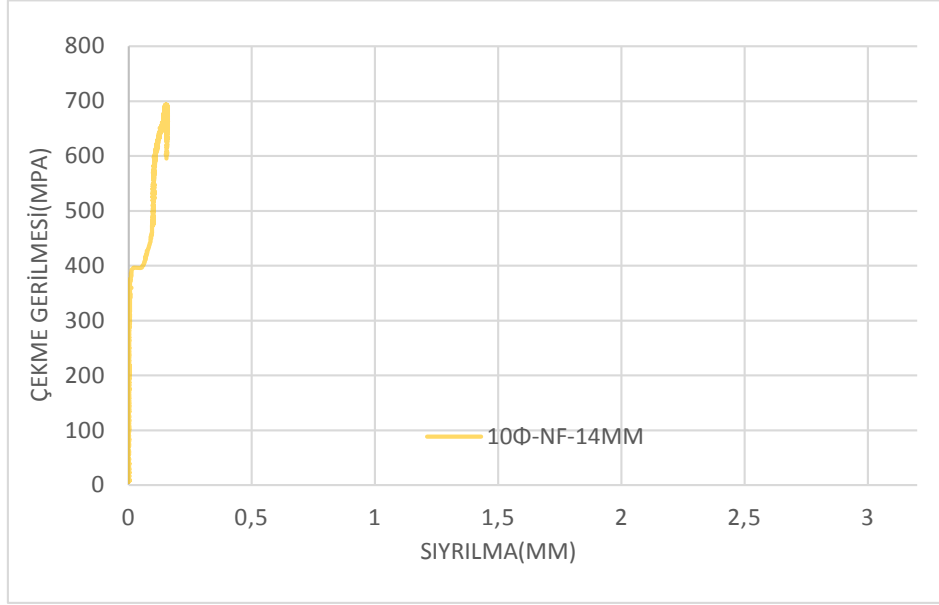
Şekil 7.5: 5Φ-NF-42MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



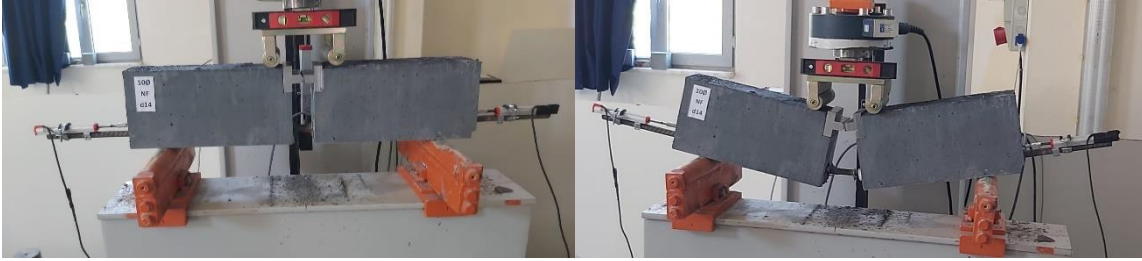
Şekil 7.6: 5Φ-NF-42MM kodlu deney numunesi

7.4 10Φ-NF-14MM numunesine ilişkin deney sonuçları

10Φ-NF-14MM numunesinde maksimum çekme gerilmesi 692 MPa, 0,151 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir. Bu sonuç, numunenin çok kısa deplasmanlarda dahi yüksek çekme kapasitesine ulaşabildiğini göstermektedir.



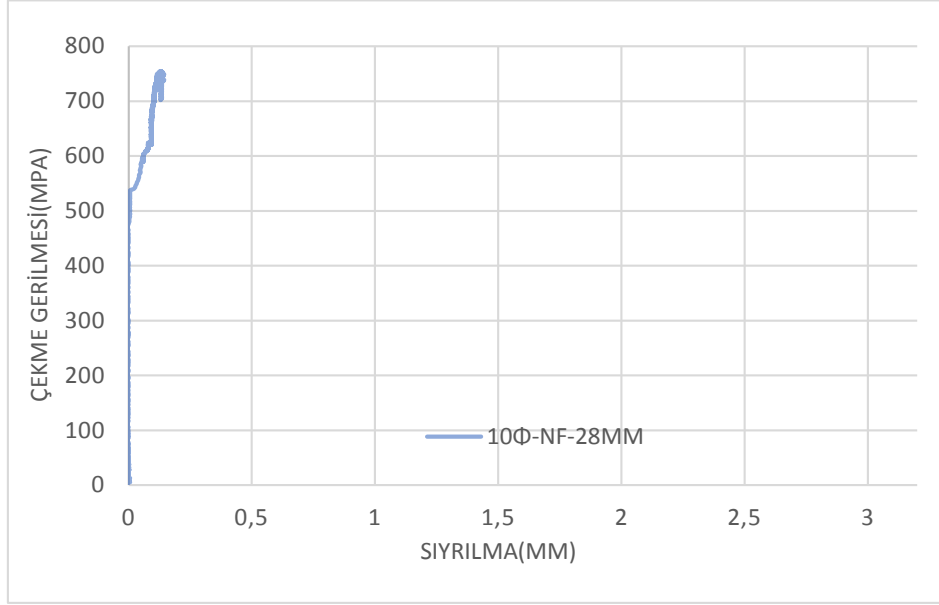
Şekil 7.7: 10Φ-NF-14MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



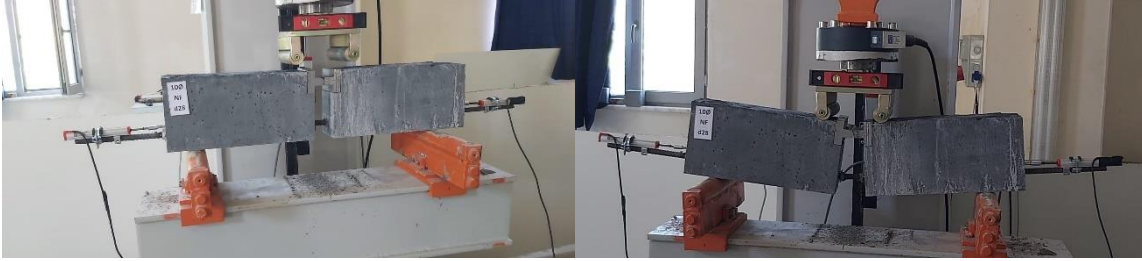
Şekil 7.8: 10Φ-NF-14MM kodlu deney numunesi

7.5 10Φ-NF-28MM numunesine ilişkin deney sonuçları

10φ–NF–28MM numunesinde maksimum çekme gerilmesi 753,19 MPa, 0,132 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir. Bu durum, sistemin son derece küçük deplasmanlarda dahi yüksek çekme kapasitesine ulaştığını göstermektedir.



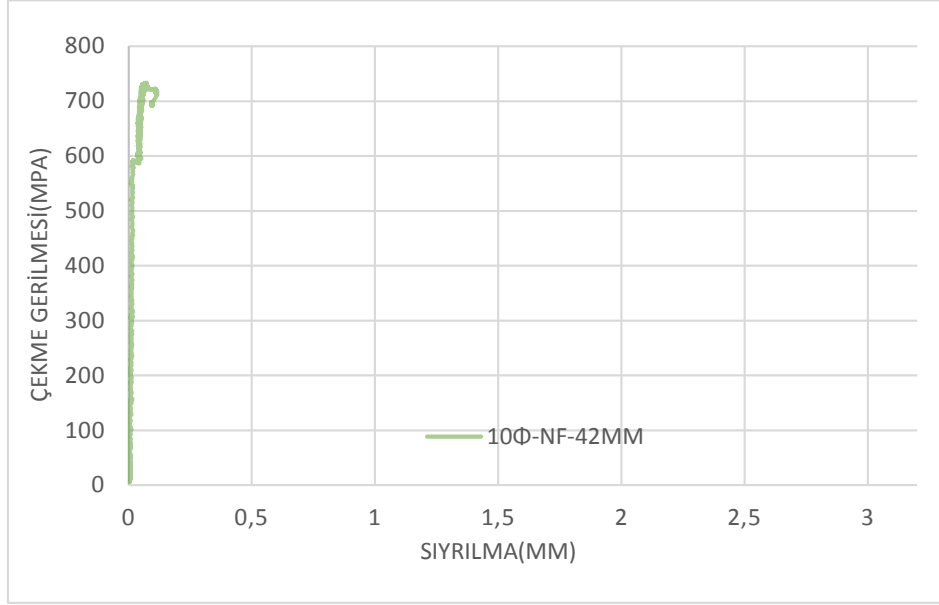
Şekil 7.9: 10Φ-NF-28MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



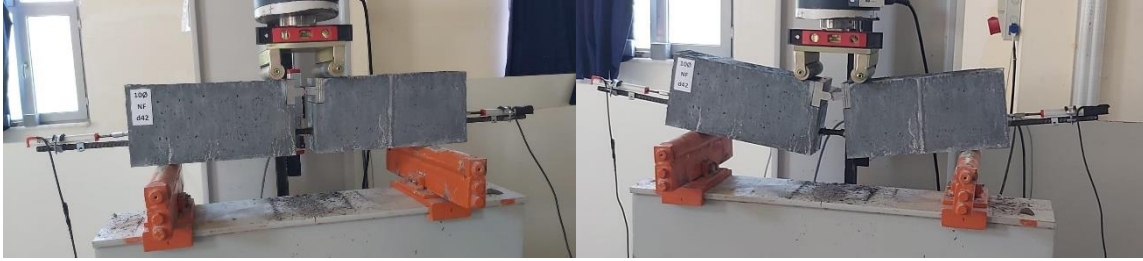
Şekil 7.10: 10Φ-NF-28MM kodlu deney numunesi

7.6 10Φ-NF-42MM numunesine ilişkin deney sonuçları

10φ–NF–42MM numunesinde maksimum çekme gerilmesi 732,08 MPa, 0,0678 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir. Bu sonuç, beton–donatı arayüzünün çok kısa deplasmanlarda dahi son derece yüksek çekme kapasitesine ulaştığını göstermektedir.



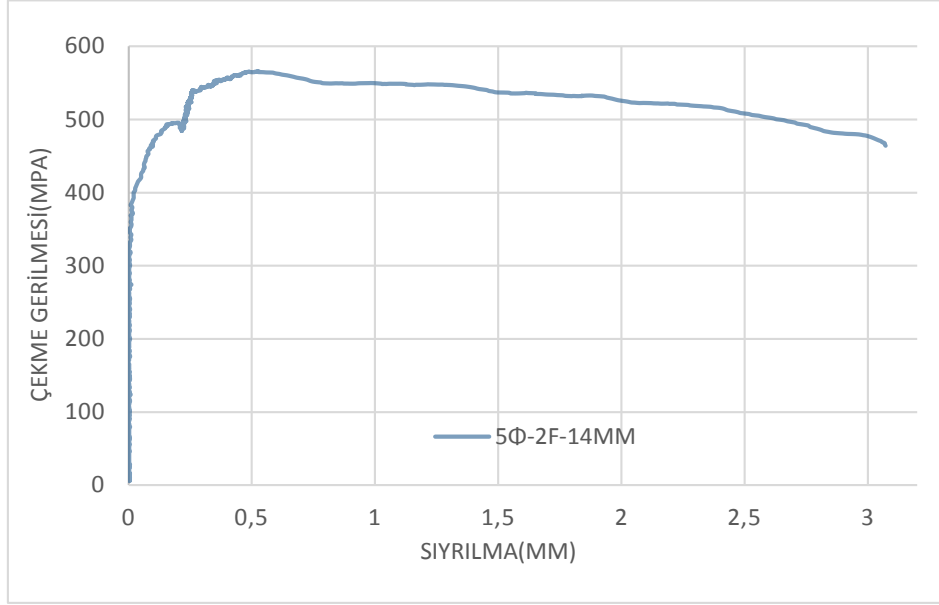
Şekil 7.11: 10Φ-NF-42MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



Şekil 7.12: 10Φ-NF-42MM kodlu deney numunesi

7.7 5Φ-2F-14MM numunesine ilişkin deney sonuçları

5φ–2F–14MM numunesinde maksimum çekme gerilmesi 565,61 MPa, 0,531 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir. 0,25 mm sıyrılmada 526,10 MPa’ya ulaşılması, sistemin yüksek başlangıç rijitliğine sahip olduğunu göstermektedir. Maksimum noktadan sonra çekme gerilmesi kısmen azalmış olsa da, 3,00 mm sıyrılmada 476,70 MPa seviyesinde kapasitenin korunduğu görülmüştür.



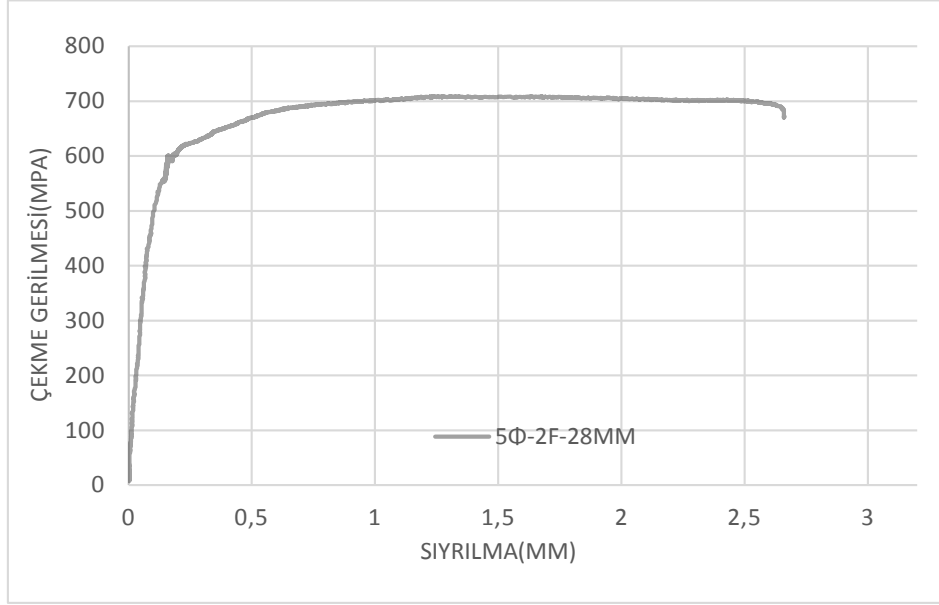
Şekil 7.13: 5Φ-2F-14MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyırılma grafiği



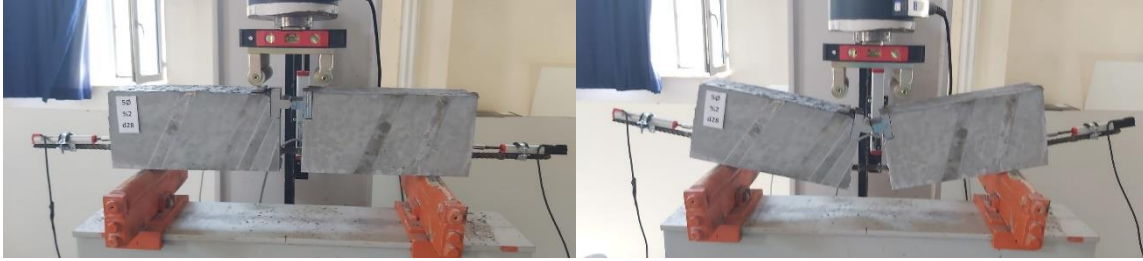
Şekil 7.14: 5Φ-2F-14MM kodlu deney numunesi

7.8 5Φ-2F-28MM numunesine ilişkin deney sonuçları

5φ-2F-28MM numunesinde başlangıç bölgesinde, 0,25 mm sıyırılmada 624,24 MPa değerine ulaşılmış, maksimum çekme gerilmesi 709,02 MPa ise 1,678 mm sıyırılma değerinde elde edilmiştir. Bu durum, numunenin yüksek çekme kapasitesine ulaşırken daha büyük deplasmanlarda da dayanımını sürdürebildiğini göstermektedir.



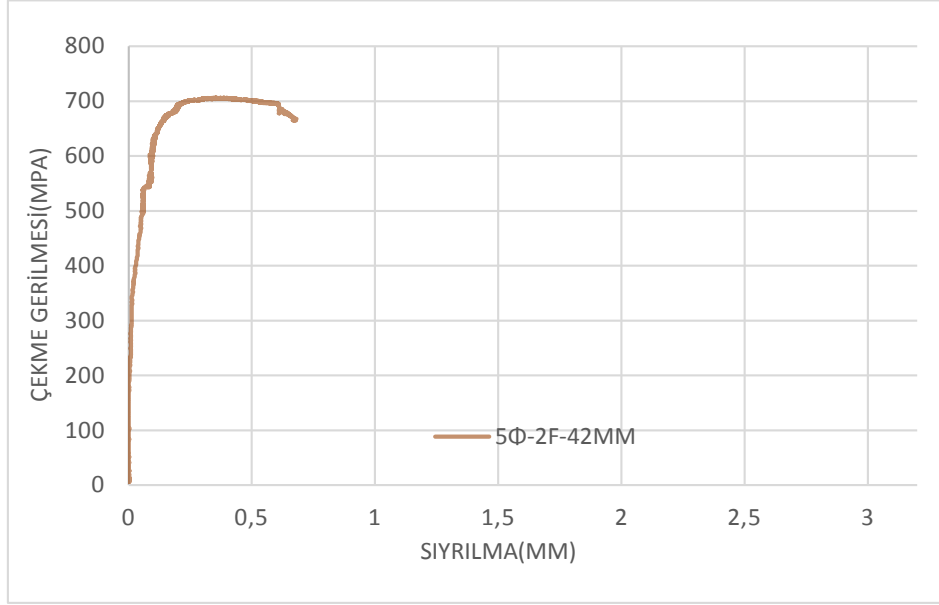
Şekil 7.15: 5Φ-2F-28MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



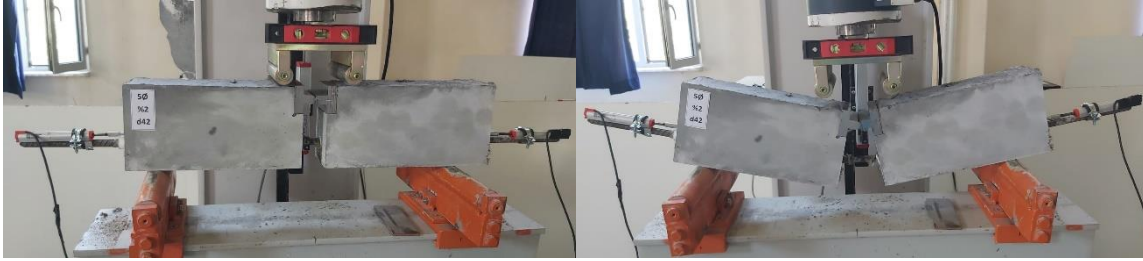
Şekil 7.16: 5Φ-2F-28MM kodlu deney numunesi

7.9 5Φ-2F-42MM numunesine ilişkin deney sonuçları

5φ-2F-42MM numunesinde başlangıç aşamasında, 0,25 mm sıyrılmada 702,13 MPa değerine ulaşılmış, maksimum çekme gerilmesi 705,89 MPa ise 0,398 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir.



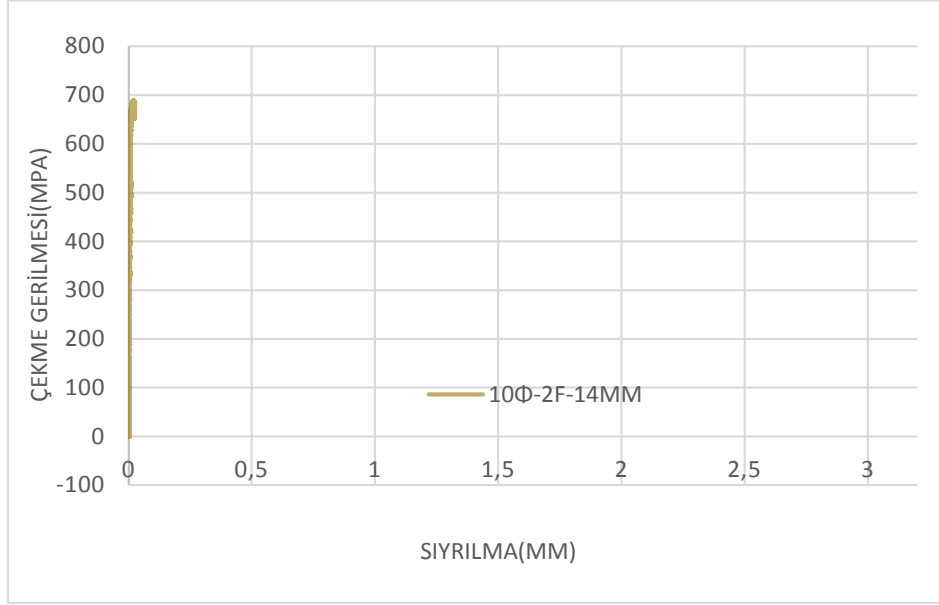
Şekil 7.17: 5Φ-2F-42MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



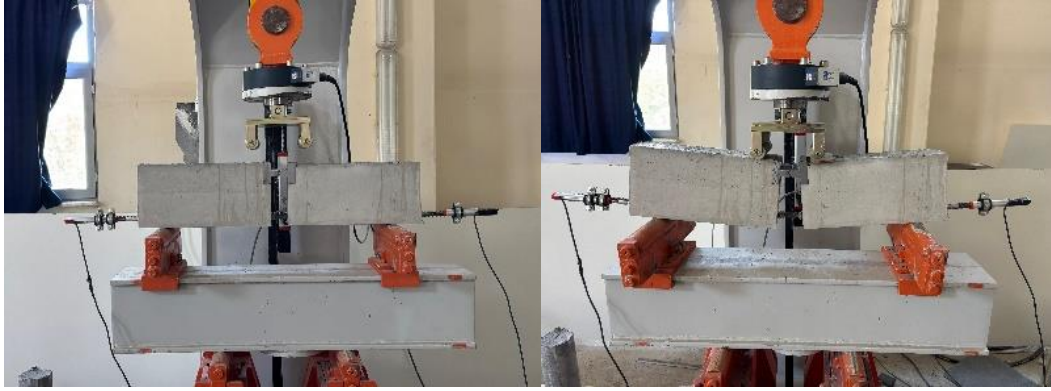
Şekil 7.18: 5Φ-2F-42MM kodlu deney numunes

7.10 10Φ-2F-14MM numunesine ilişkin deney sonuçları

10φ-2F-14MM numunesinde maksimum çekme gerilmesi 685 MPa, 0,021 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir



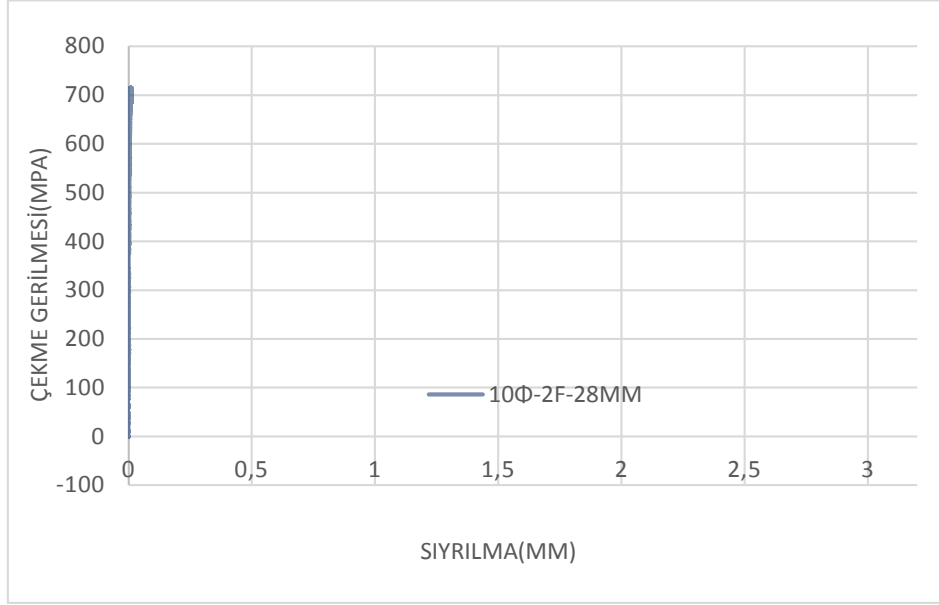
Şekil 7.19: 10Φ-2F-14MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



Şekil 7.20: 10Φ-2F-14MM kodlu deney numunesi

7.11 10Φ-2F-28MM numunesine ilişkin deney sonuçları

10φ-2F-28MM numunesinde maksimum çekme gerilmesi 714,26 MPa, 0,0092 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir.



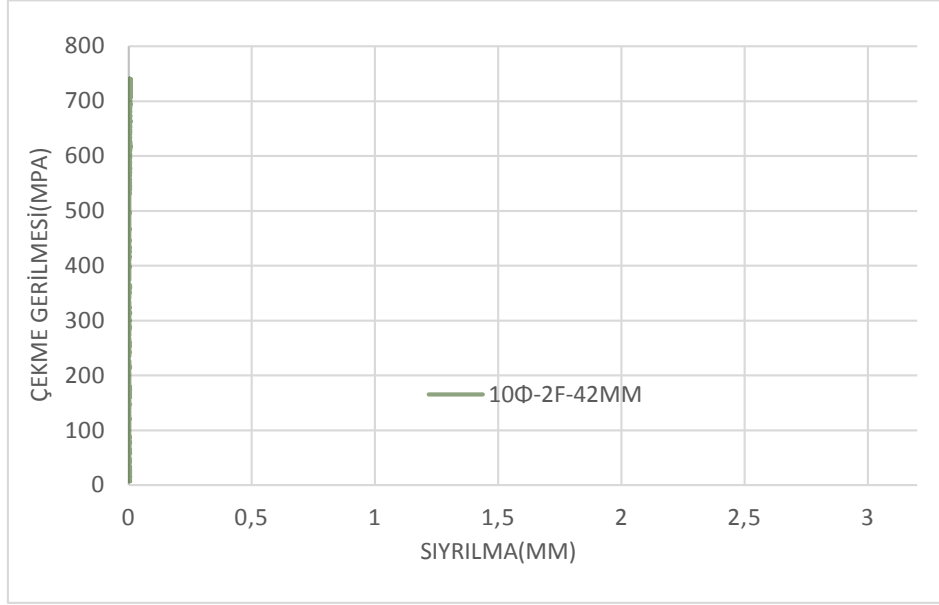
Şekil 7.21: 10Φ-2F-28MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



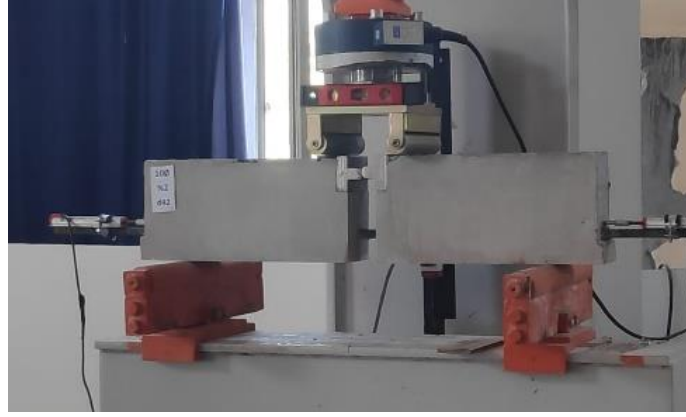
Şekil 7.22: 10Φ-2F-28MM kodlu deney numunesi

7.12 10Φ-2F-42MM numunesine ilişkin deney sonuçları

10Φ-2F-42MM numunesinde maksimum çekme gerilmesi 740,36 MPa, 0,0045 mm sıyrılma değerinde elde edilmiştir.



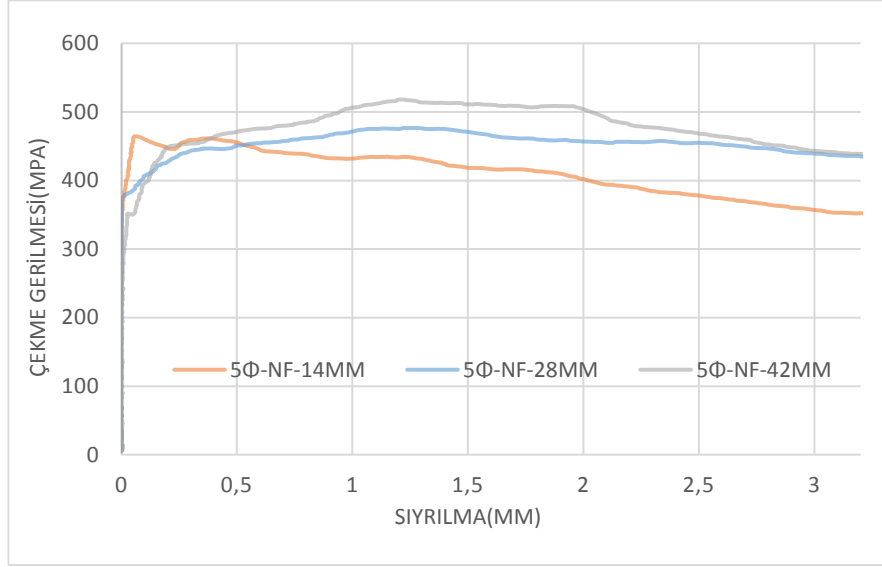
Şekil 7.23: 10Φ-2F-42MM kodlu numunenin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



Şekil 7.24: 10Φ-2F-42MM kodlu deney numunesi

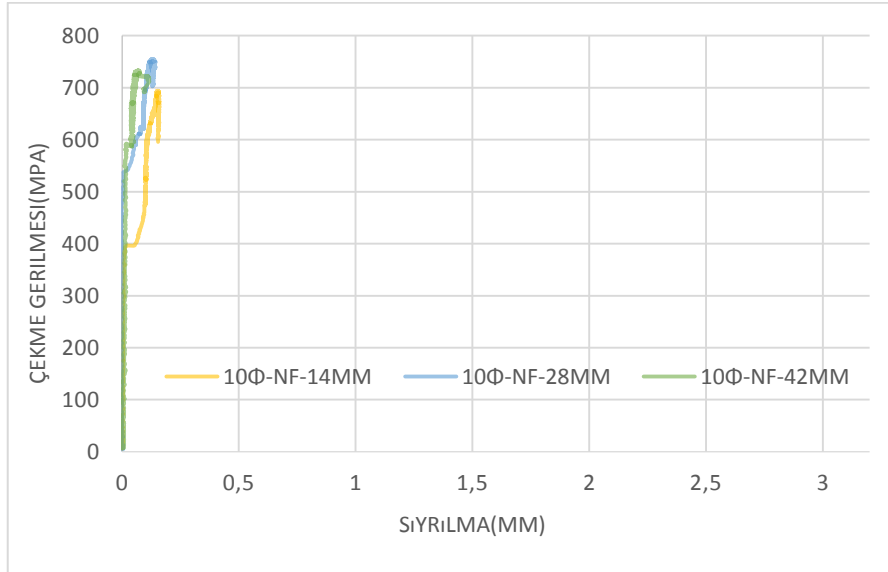
7.13 Paspayı değişiminin aderansa etkisi

5φ aderans boyuna sahip lifsiz deney numunelerinde paspayının net bir katkısı izlenmemiştir. Ancak 14 mm paspayına sahip lifsiz numunede 0.5 mm sıyrılmadan itibaren çekme gerilmeleri düşmüştür (Şekil 7.25).



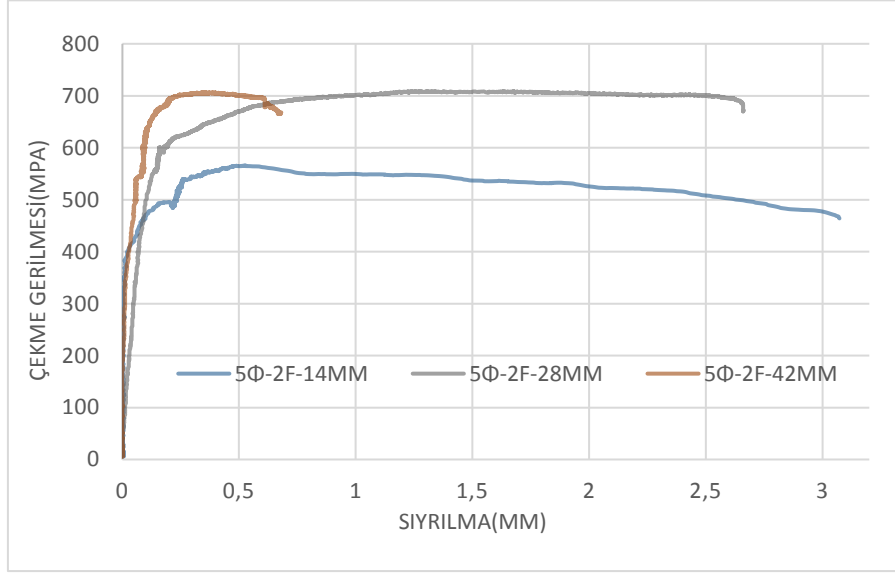
Şekil 7.25: 5Φ-NF-(14,28 ve 42MM) kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği

5φ aderans boyuna sahip lifsiz deney numunelerinde paspaylarında çok benzer bir davranış gözlenmiştir. Ayrıca tüm numunelerde sıyrılma 0.3 mm'nin altında kalmıştır (Şekil 7.25).



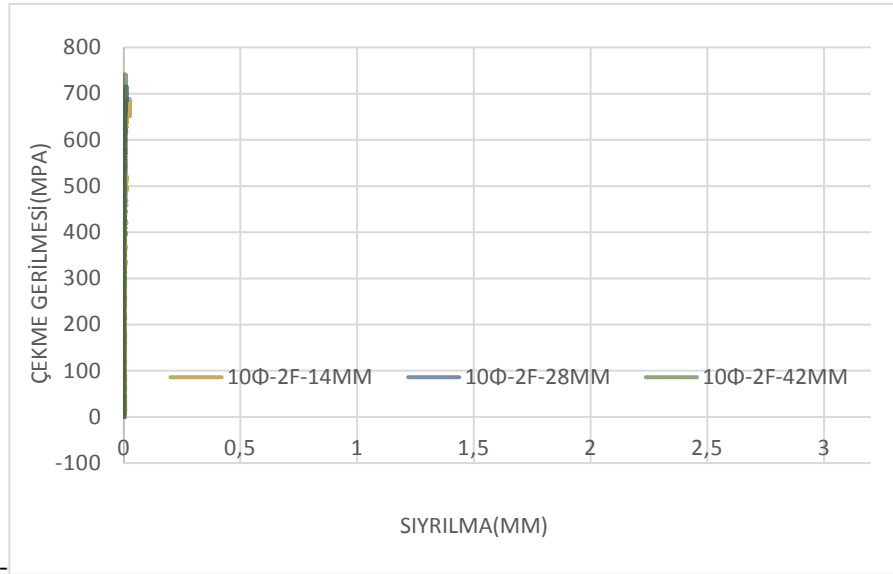
Şekil 7.26: 10Φ-NF-(14,28 ve 42MM) kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği

Paspayının 5φ aderans boyuna sahip %2 çelik lifli deney numunelerinin çekme gerilmesi sıyrılma davranışı 0.2 mm'den sonra farklılık göstermiştir. 42 mm paspayına sahip numunede 0.5 mm sıyrılma gözlenmişken 28 mm'lik pas paylı numunede sıyrılma 2.5 mm 14 mm paspaylı numunede ise 3 mm sıyrılmada deney sonlandırılmıştır (Şekil 7.27).



Şekil 7.27: 5Φ-2F-(14,28 ve 42MM) kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği

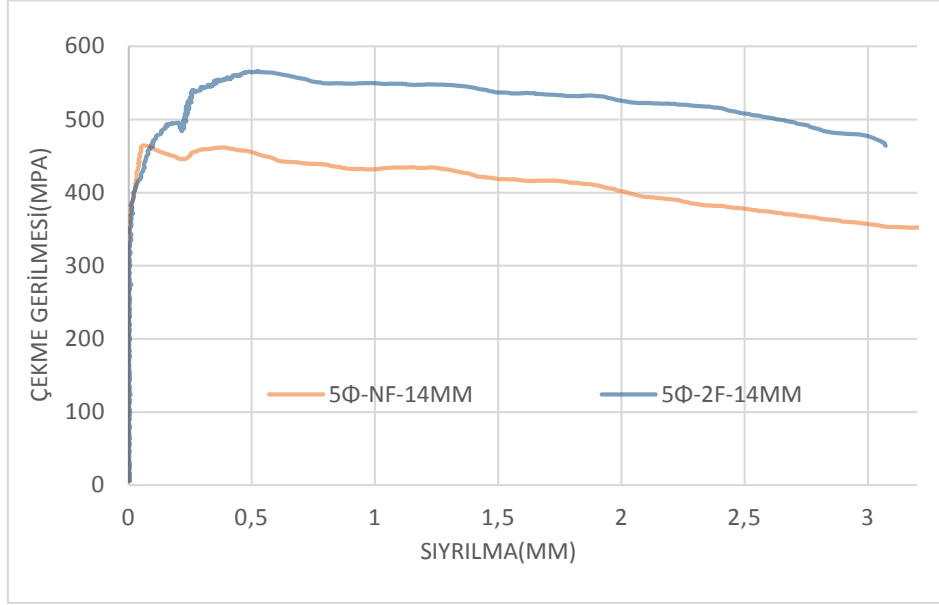
Aderans boyunun artmasıyla lifli numunelerde sıyrılma nerdeyse hiç oluşmamıştır (Şekil 7.28).



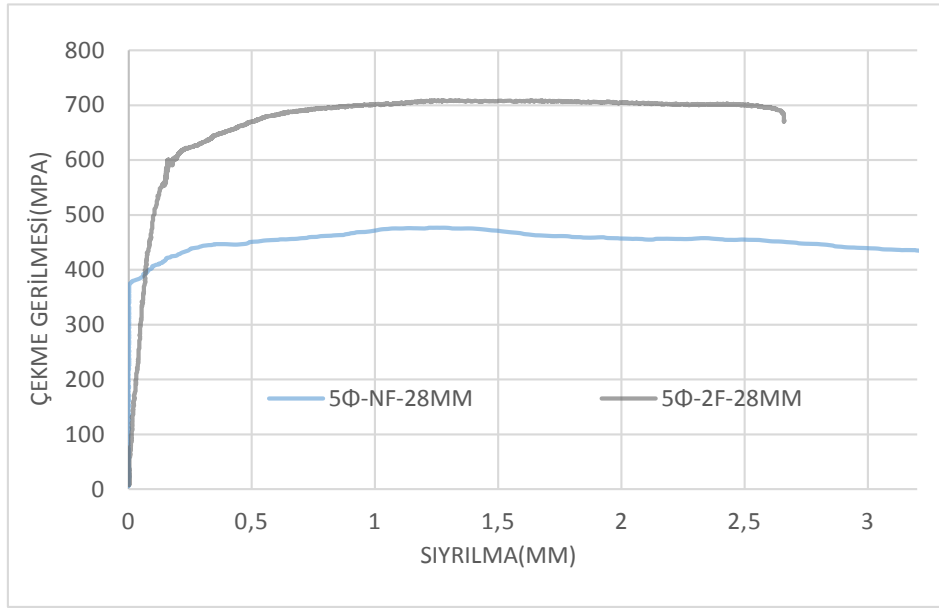
Şekil 7.28: 10Φ-2F-(14,28 ve 42MM) kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği

7.14 Lif katkısının aderans etkisi

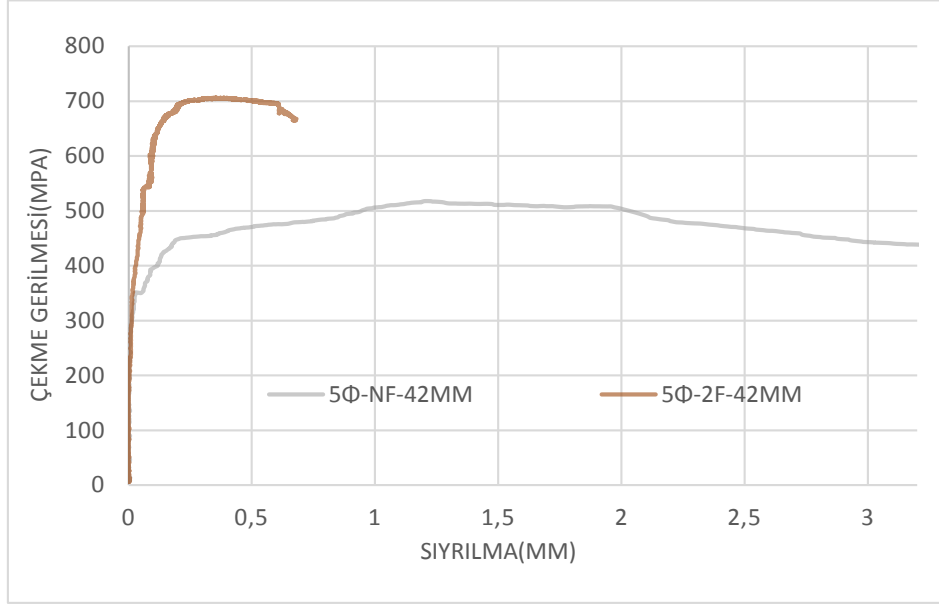
Her bir paspayı için lifin katkısı değerlendirilmiştir. 5Φ aderans boyu için %2 oranında çelik lif kullanıldığında tüm paspaylarında çekme gerilmesi artmıştır (Şekil 7,29-31).



Şekil 7.29: 5Φ-(NF ve 2F)-14MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği

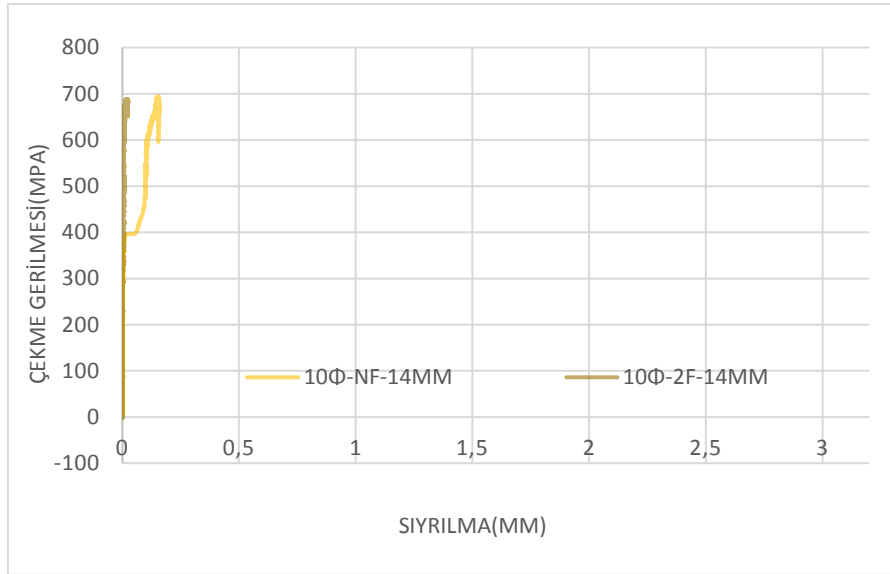


Şekil 7.30: 5Φ-(NF ve 2F)-28MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği

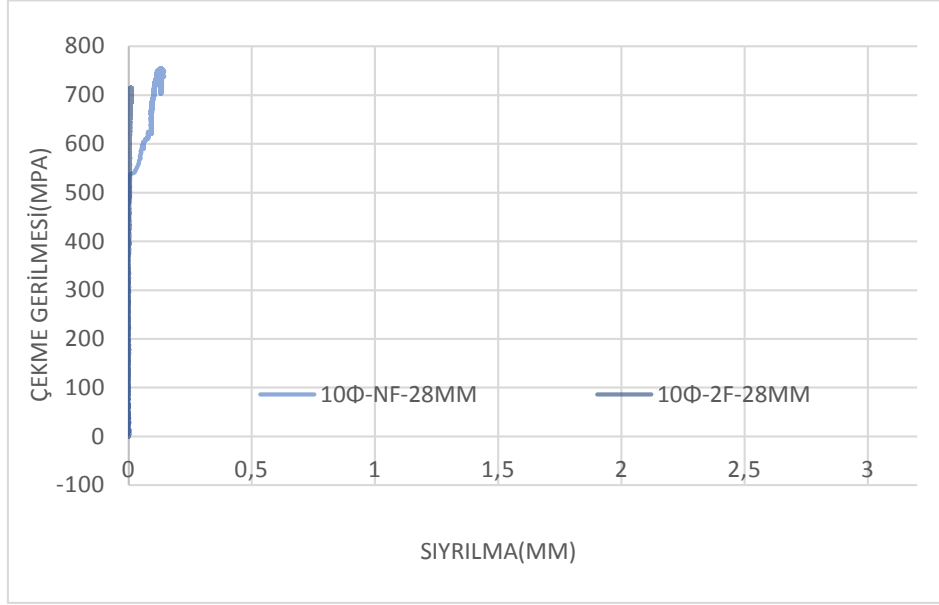


Şekil 7.31: 5Φ-(NF ve 2F)-42MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği

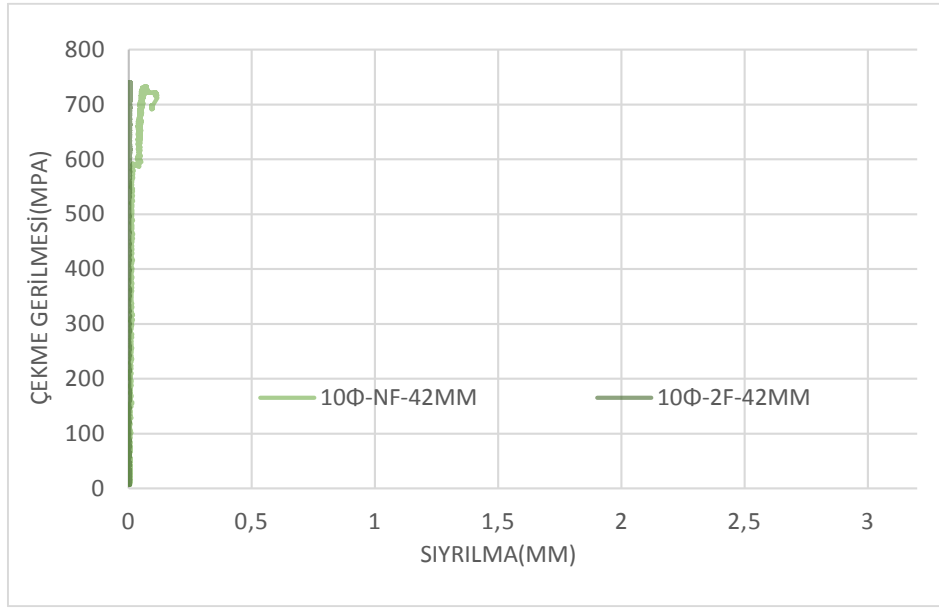
10Φ aderans boyuna sahip tüm numunelerde sıyrılma oluşmadığı için lifin katkısı gözlemlenmemiştir (Şekil .7.32-34)



Şekil 7.32:- 10Φ-(NF ve 2F)-14MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



Şekil 7.33: 10Φ-(NF ve 2F)-28MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği



Şekil 7.34: 10Φ-(NF ve 2F)-42MM kodlu numunelerin çekme gerilme-sıyrılma grafiği

Deney numunelerine ait beton basınç dayanımları ve bağıntı 4.1 ile 0,25 mm ve 3 mm'de hesaplanan aderans gerilmeleri Tablo 7.1'de özetlenmiştir.

Tablo 7.1: Deneý Sonuçları

Numune Adı	Beton Basınç Dayanımı (Mpa)	ekme Gerilmesi(Mpa)		Aderans Gerilmesi(Mpa)	
		0,25mm	3,00mm	0,25mm	3,00mm
5Φ-NF-14mm	135	450,62	356,76	22,531	17,8384
5Φ-NF-28mm	135	437	439	21,875	21,978
5Φ-NF-42mm	135	452	443,22	22,61	22,161
10Φ-NF-14mm	138	692*		17,3*	
10Φ-NF-28mm	138	753,19*		18,826*	
10Φ-NF-42mm	138	732,08*		18,302*	
5Φ-2F-14mm	152	526,1	476,7	26,329	23,83
5Φ-2F-28mm	152	624,24	709,02*	31,212	35,46*
5Φ-2F-42mm	152	702,13	705,89*	35,1	35,28*
10Φ-2F-14mm	153	685*		17,13*	
10Φ-2F-28mm	153	714,26*		17,85*	
10Φ-2F-42mm	153	740,36*		18,5*	

“*” 0.25 mm sıyrılma değerine ulaşılmadığı için maksimum çekme gerilmesi verilmiştir.

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) ile donatı arasındaki aderans davranışı paspayı, lif içeriği ve kenetlenme boyu değişkenleri ışığında incelenmiş ve deneysel bulgulara dayalı değerlendirmeler yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

5Φ kenetlenme boylu lifsiz numunelerde, paspayının artışı, 0,25 mm sıyırılma değerinde hesaplanan aderans gerilmelerinde değişim göstermezken 3,00 mm sıyırılmada hesaplanan aderans gerilmeleri paspayı artıkça artış göstermiştir. 14 mm paspayı ile elde edilen düşük aderans gerilmesi, beton örtüsünün sıyrılmaya karşı yeterli direnç gösteremediğini ortaya koymuş ancak paspayında herhangi bir çatlama dökülme gözlenmemiştir.

Lif katkılı UYPB numunelerinde, kısa adereans boyunda lifsiz numunelere göre paspayı artıkça çekme gerilmeleri artmıştır. 14 mm paspaylı numunelerde bu artış %14 iken 28 mm de %43'e 42 mm'lik paspayında ise %54 olmuştur. Kenetlenme boyu 2 katına çıktığında ise numunelerde minimum sıyırılma olduğundan herhangi bir artış gözlenmemiştir. Bu numunelerde sıyırılma olmadan donatılar kopma seviyesine gelmiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda ise farklı lif oranlarının katkısı incelenmelidir. Ayrıca farklı donatı çaplarının UYPLB ile aderansının nasıl değiştiği belirlenmelidir.

9. KAYNAKLAR

Aba, M. (2023). Geopolimer betonlarda donatı aderans performansının mafsallı giriş yöntemiyle analizi. Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

ACI Committee 234. (2006). Guide for the use of silica fume in concrete. American Concrete Institute.

ACI Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19). American Concrete Institute.

ACI Committee 408. (2003). Bond and development of straight reinforcing bars in tension. American Concrete Institute.

ACI Committee 544. (1996). State-of-the-art report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-96). American Concrete Institute.

Aİtcin, P. C. (2000). High-performance concrete. Taylor & Francis.

Banthia, N, & Trottier, J. (1995). Bond-slip mechanisms in steel fiber reinforced concrete.

Baradan, S. (1997). Yüksek sıcaklıkların beton-donatı aderansına etkisi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E. & Bahadori, A. (2012). An overview of cement hydration and microstructure formation. Journal of Construction and Building Materials, 36, 8-18.

Bentur, A. & Mindess, S. (2007). Fibre reinforced cementitious composites (2nd ed.). Taylor & Francis.

Beycioğlu, A. (2013). Kendiliğinden yerleşen betonlarda lifli donatıların aderans davranışlarının incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

BS 4449:2005 +A2:2009: Steel for the reinforcement of concrete Weldable reinforcing steel Bar, coil and decoiled product Specification

Cairns, J. & Plizzari, G. A. (2003). Bond behaviour of reinforcement in concrete. RILEM Publications.

9.KAYNAKLAR DİZİNİ(DEVAMI)

CEB-FIP. (1990). CEB-FIP model code 1990: Design code. Comité Euro.

CEB-FIP. (2010). Model code for concrete structures.

Çakıroğlu, M. O. (2020). Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) donatıların betonla aderans davranışının incelenmesi. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Çelik, R. (2019). Katkılı betonların eğilme ve aderans mukavemetinin incelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Çelikten, E. & Yılmaz, G. (2013). Yüksek fırın cürufu ve beton teknolojisindeki kullanımı. İnşaat Mühendisliği Dergisi, 55(1), 23-30.

Darwin, D. & Graham, E. K. (1993). Bond of reinforcement in high-strength concrete: Part 1 – Beam tests with unconfined bars. ACI Structural Journal, 90(6), 609–617.

Desai, V. M. & Breen, J. E. (1983). Bond strength of reinforcing bars embedded in high-strength concrete. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.

Deval, P. & Vierendeels, J. (1988). Bond behavior of reinforcement under flexural loading: Belgian Hinged Beam Test. K.U. Leuven Concrete Research Reports.

Döndüren, M., Çöğürçü, M. T. & Altın, S. (2008). Farklı donatı tipleri ve beton sınıflarının aderans üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi.

Duran, A. (2008). Betonarme donatısının aderans yorulmasına beton mukavemetinin etkisi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Eligehausen, R., Popov, E. P. & Bertero, V. V. (1983). Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. Report UCB/EERC-83/23, University of California, Berkeley.

Eligehausen, R., Popov, E. P. & Bertero, V. V. (2006). Local bond stress–slip relationships of deformed bars under generalized excitations. University of California, Berkeley, Earthquake Engineering Research Center.

Erten, K. M. (2009). Katkılı betonların aderans dayanımlarının incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

9.KAYNAKLAR DİZİNİ(DEVAMI)

- Frosch, R. J.** (1999). Another look at bond. *Structural Journal*, 96(4), 638–645.
- Graybeal, B. A.** (2006). Material property characterization of ultra-high performance concrete (Report No. FHWA-HRT-06-103). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Graybeal, B. A.** (2007). Behavior of UHPC-prestressed girders. FHWA-HRT-06-115.
- Habert, G., Rossi, P. & Roussel, N.** (2011). Environmental impact and sustainability of concrete production. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 1037-1049.
- Harajli, M. H.** (2007). Bond stress–slip response of tension lap splices in high-strength concrete.
- Hüsem, M.** (2004). Yüksek başarımli beton-donatı aderansının geleneksel betonlarla karşılaştırılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Jameel, M. et al.** (2020). Experimental investigation of bond strength in self-compacting concrete using pull-out test. ResearchGate.
- Kim, S. B. & Yoo, D. Y.** (2021). Bond behavior of steel reinforcement in fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 273, 121766.
- Konca, M.** (2006). Çimento cinsi ve donatı özelliklerinin beton-donatı aderansı üzerine etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Kumar, A. et al.** (2015). Effects of fly ash on the mechanical and durability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 74, 411-418.
- Lemnitzer, L., Schröder, S., Lindorf, A. & Curbach, M.** (2009). Multiaxial bond behavior in reinforced concrete elements for nuclear power plants. Technische Universität Dresden.
- Lutz, L. A. & Gergely, P.** (1967). Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete. *ACI Journal*, 64(11), 711–721.
- Malvar, L. J. & Melaragno, R. J.** (1991). Bond strength of reinforcement in high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, 88(6), 653–660.

9.KAYNAKLAR DİZİNİ(DEVAMI)

Malvar, L. J. (1992). Tension development length of high-strength reinforcement. *ACI Structural Journal*, 89(3), 287–294.

Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Mindess, S., Young, J. F. & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.

Naaman, A. E. & Wille, K. (2006). Development of strain-hardening engineered cementitious composites (SH-ECC). *ACI Materials Journal*, 103(2), 244–252.

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

Orangun, C. O., Jirsa, J. O. & Breen, J. E. (1977). A reevaluation of test data on development length and splices. *ACI Journal Proceedings*, 74(3), 114–122.

Orhan, M. (2018). Çelik liflerin donatı-beton aderansı üzerindeki etkisinin deneysel incelenmesi. KTO Karatay Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Richard, P. & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511.

Shi, C. et al. (2021). Supplementary cementitious materials in concrete: Part I. *Cement and Concrete Research*, 41, 123-130.

Tepfers, R. (1979). Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research*, 31(106), 3–12.

TS 500. (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standardları Enstitüsü.

TS EN 1008. (2003). Beton - karışımında kullanılan su - Özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü.

TS EN 12620. (2004). Agregalar – Beton için. Türk Standardları Enstitüsü.

TS EN 197-1. (2012). Çimento – Bölüm 1: Genel çimentolar – Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü.

9.KAYNAKLAR DİZİNİ(DEVAMI)

TS EN 1992-1-1. (2005). Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.

Tuğrul Tunç, E. (2020). Yüksek performanslı hafif betonlarda donatı aderansının belirlenmesi ve sayısal modellemesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Ünal, Y. (1998). Agregata tane çapı ve beton dayanımının donatı-beton aderansı üzerindeki etkisi. Yüksek Lisans Tezi.

Wang, C.-Y. (1963). Bond stress between concrete and steel reinforcement. Kansas State University, Master's Thesis.

Wang, K. et al. (2012). Influence of polycarboxylate superplasticizer on the rheological behavior of ultra-high performance concrete. *Materials and Structures*, 45(12), 1867-1879.

Wille, K., Naaman, A. E. & Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. *ACI Materials Journal*, 108(1), 46–54.

Yalçın, B. O. (2019). Soğuk ortamda üretilen betonarme elemanlarda donatı aderansının incelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Yoo, D. Y., Bantia, N. & Yoon, Y. S. (2016). Bond-slip response of deformed steel bars in ultra-high-performance concrete. *Materials and Structures*, 49(3), 925–935.

Zuo, J. & Darwin, D. (2000). Bond strength of reinforcing bars embedded in high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, 97(4), 611–620.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : **Murat Efdal YILMAZ**

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2025
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2020
Lise	İzmir Bornova Anadolu Lisesi	2014