KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

POLİPROPİLEN LİFLİ HİBRİT BETON İLE DONATI ARASINDAKİ ADERANSIN MAFSALLI KİRİŞ DENEY METODU İLE İNCELENMESİ

Muhammed SARIGÜZEL

Yüksek Lisans Tezi

KONYA
Haziran 2022

POLİPROPİLEN LİFLİ HİBRİT BETON İLE DONATI ARASINDAKİ ADERANSIN MAFSALLI KİRİŞ DENEY METODU İLE İNCELENMESİ

Muhammed SARIGÜZEL

KTO Karatay Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Tezli Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi İsa KUL
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Kâmil AKIN

Konya
Haziran 2022

BİLDİRİM

Enstitü tarafından onaylanan Yüksek Lisans tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını basılı veya dijital biçimde arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullar dahilinde erişime açma iznini KTO Karatay Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle, Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak ve gelecekteki çalışmalar (makale, kitap, lisans, patent vb.) için tezimin tamamının veya bir bölümünün kullanım hakları yalnızca bana ait olacaktır.

Tezimin bütünüyle kendi çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izinle kullanılması zorunlu olan kaynakları, yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde izinlerin suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayımlanan "Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge" kapsamında, tezim, aşağıda belirtilen koşullar haricince, YÖK Ulusal Tez Merkezi ve KTO Karatay Üniversitesi Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.[1]

☐ Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren … ay ertelenmiştir.[2]

☐ Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir.[3][4]

29 Haziran 2022

Muhammed SARIGÜZEL

[1] MADDE 6(1) Lisansüstü tezle ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.

[2] MADDE 6(2) Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.

[3] MADDE 7(1) Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

[4] MADDE 7(2) Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

ETİK BEYAN

KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Hazırlama ve Yazım Kurallarına uygun olarak Dr. Öğr. Üyesi İsa KUL danışmanlığında tarafımdan üretilen bu tez çalışmasında; sunduğum tüm veri, enformasyon, bilgi ve belgeleri bilimsel etik kuralları çerçevesinde elde ettiğimi, tüm değerlendirme, analiz, bulgu ve sonuçları bilimsel usullere uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım kaynakların tümüne bilimsel normlara uygun biçimde atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

29 Haziran 2022

_____

Muhammed SARIGÜZEL

TEŞEKKÜR

Tez sürecinde, planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı şekillendiren sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İsa KUL'a ve ikinci sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Kâmil AKIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ, Dr. Öğr. Üyesi Abdülkerim İLGÜN, Arş. Gör. Abdullah MÜSEVİTOĞLU ve tez çalışmasında desteğini aldığım Dr. Arş. Gör. Ahmad Javid ZIA hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

İnşaat mühendisliği laboratuvarında deneysel çalışmaları birlikte yürüttüğümüz ve gerçekleştirdiğimiz yardımını ve desteğini benden esirgemeyen, kıymetli zamanlarından bana da süre ayıran arkadaşım Bahri ARDIÇ'a ve KTO Karatay Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde yapı laboratuvarı görevlisi olan Uzman Rıza ELVAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde desteklerini esirgemeyen ve süreç boyunca her aşamada yanımda olan aileme teşekkür ederim.

29 Haziran 2022 Muhammed SARIGÜZEL

ÖZET

Muhammed SARIGÜZEL

Polipropilen Lifli Hibrit Beton ile Donatı Arasındaki Aderansın Mafsallı Kiriş Deney Metodu ile İncelenmesi

Yüksek Lisans Tezi

Konya, 2022

Yalnızca mikro veya makro lifli betonların mekanik özelliklerinde iyileşme daha kısıtlı olmaktayken hibrit lif içerikli betonlarda ise sinerjik bir etki ile daha geniş kapsamlı iyileşme görülebilmektedir. Betonarme sistemlerde beton ve donatının yükleme altında beraber çalışabilmesi için aderansın yeterli miktarda sağlanması gerekmektedir. Beton-donatı aderansının sağlanamaması durumunda yükleme altında olan betonarme sistemlerde donatı sıyrılması gerçekleşmekte ve sistem yük taşıyamamakta olup bu durum yapı güvenliğini etkilemektedir. Bu çalışmada iki noktadan yükleme yöntemiyle eğilme altında olan mafsallı kirişlerle, polipropilen lifli hibrit beton ve donatı arasındaki aderansın araştırılması amaçlanmıştır. Kirişlerde Ø10 donatı, 50 mm (5Ø) ve 100 mm (10Ø) olmak üzere iki farklı kenetlenme (gömülme) boyu tercih edilmiştir. Mikro polipropilen lif beton hacminin %0,05'i oranında ve makro kopolimer-polipropilen lifler ise 1 m^3 beton için sırasıyla 1, 2 ve 4 kg/m^3 oranında kullanılmıştır. Referans (lifsiz), yalnızca mikro, yalnızca makro ve ikisinin karışımı hibrit polipropilen lifler olmak üzere toplam sekiz farklı karışım elde edilmiştir. Hibrit lifler içerisinde mikro liflerin miktarı sabit tutulmuştur. Çalışma sonuçlarında 5Ø kenetlenme boyunda hibrit lif içerikli karışımların aderans dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Özellikle 10Ø kenetlenme boyunda hibrit lif miktarı arttıkça aderans dayanımının giderek azaldığı ve maksimum aderans gerilmesinde sıyrılma miktarlarının arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

Aderans dayanımı, hibrit lifler, mafsallı kiriş deneyi, polipropilen lif

ABSTRACT

Muhammed SARIGÜZEL

Investigation of Bond Between Polypropylene Fiber Reinforced Hybrid Concrete and Reinforcement by Hinged Beam Test Method

Master's Thesis

Konya, 2022

While the improvement in the mechanical properties of only micro or macro fiber concretes is more limited, a more comprehensive improvement can be seen with a synergistic effect in concretes with hybrid fiber content. In reinforced concrete systems, sufficient bond must be provided in order for the concrete and reinforcement to work together under loading. If the bond of concrete-reinforcement cannot be achieved, reinforcement slip occurs in reinforced concrete systems under loading and the system cannot carry loads, which affects the safety of the building. In this study, it was aimed to investigate bond between polypropylene fiber reinforced hybrid concrete and reinforcement by two-point loading method through the hinged beams under bending. In the beams Ø10 reinforcement diameter and 50 mm (5Ø) and 100 mm (10Ø) embedment lengths, were preferred. Micro polypropylene fiber was used at the rate of 0.05% of concrete volume and macro copolymer-polypropylene fibers were used at the rate of 1, 2 and 4 kg/m^3 for 1 m^3 of concrete, respectively. A total of eight different mixtures were obtained as reference (without fiber), micro only, macro only and hybrid polypropylene fibers mixed with both. The amount of microfibers in hybrid fibers was kept constant. In the results of the study, it was observed that mixtures containing hybrid fibers, decreased the bond strength at 5Ø embedment length. Especially, it was observed that as the amount of hybrid fiber increased at 10Ø embedment length, the bond strength gradually decreased and the amount of slip increased at maximum bond stress.

Keywords

Bond strength, hybrid fibers, hinged beam (bond) test, polypropylene fiber

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY i
BİLDİRİM ii
ETİK BEYAN iii
TEŞEKKÜR iv
ÖZET v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
TABLOLAR DİZİNİ ix
ŞEKİLLER DİZİNİ x
SİMGELER DİZİNİ xiv
KISALTMALAR DİZİNİ xvii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR TARAMASI 4
3. BETONARMEDE ADERANS VE LİFLİ BETONUN ADERANSA ETKİSİ 13
3.1. Aderans 14
3.1.1. Kenetlenme Aderansı 17
3.1.2. Eğilme Aderansı 24
3.1.3. Aderans Göçmesi 27
3.2. Aderans Dayanımını Etkileyen Unsurlar 31
3.2.1. Agrega Özellikleri ve Beton Katkısı 31
3.2.2. Beton Çekme Dayanımı 32
3.2.3. Beton Basınç Dayanımı 32
3.2.4. Pasif Sargılama 33
3.2.5. Aktif Sargılama 36
3.2.6. Donatı Çeliğinin Sınıfı 38
3.2.7. Donatı Çubuğunun Yüzey Geometrisi 38
3.2.8. Donatı Çapı 40
3.2.9. Donatının Beton İçerisindeki Konumu 40
3.2.10. Kenetlenme Boyu 43
3.2.11. Korozyon 44
3.2.12. Sıcaklık 45
3.2.13. Kür Koşulları 46

3.3. Beton Karışımlarında Kullanılan Lifler 46
3.3.1. Lifli Betonlar ve Lif Çeşitleri 48
4. MATERYAL VE YÖNTEM 60
4.1. Materyal 60
4.1.1. Agregalar 60
4.1.2. Çimento 61
4.1.3. Kimyasal Katkı 62
4.1.4. Beton Karışımında Kullanılan Su 62
4.1.5. Çelik Donatı Çubukları 62
4.1.6. Mikro Polipropilen Lifler (PP Elyaf) 63
4.1.7. Makro Kopolimer Polipropilen Lifler 64
4.2. Yöntem 66
4.2.1. Beton Karışım Bilgileri ve Lifli Beton Karışımlarının Kodlanması 66
4.2.2. Deney Elemanlarının Tasarlanması 69
4.2.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması 73
4.2.4. Çelik Çekme Deneyi 78
4.2.5. Taze Beton Çökme (*Slump*) Deneyi 79
4.2.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri 79
4.2.7. Mafsallı Kiriş Çalışma Prensibi ve Deney Düzeneği 82
5. BULGULAR 88
5.1. Taze Beton Çökme Deneyi Bulguları 88
5.2. Karışımların Beton Basınç Dayanımı Bulguları 89
5.3. Çelik Donatı Çekme Deneyi Bulguları 92
5.4. Eğilme Dayanımı Deneyi Bulguları 92
5.5. Mafsallı Kiriş Deneyi Bulguları 100
5.5.1. 50 mm (5Ø) Kenetlenme Boyuna Sahip Mafsallı Kirişlerin Deney Bulguları 102
5.5.2. 100 mm (10Ø) Kenetlenme Boyuna Sahip Mafsallı Kirişlerin Deney Bulguları 108
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 118
KAYNAKLAR 122
ÖZGEÇMİŞ 130

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çimento bazlı matrislerin ve liflerin tipik özellikleri 47
Tablo 2. Deneyde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri 60
Tablo 3. Kullanılan Çimentonun Özellikleri 61
Tablo 4. Yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcının özellikleri 62
Tablo 5. Beton karışımına eklenen mikro PP liflerin özellikleri 63
Tablo 6. Beton karışımına eklenen makro KPP liflerin özellikleri 65
Tablo 7. 1m^3 Beton için belirlenen malzeme miktarları 67
Tablo 8. Lif içerikli beton karışımlarının kodlanması ve açıklamaları 68
Tablo 9. Deneyde üretilen numunelerin özellikleri ve miktarları 70
Tablo 10. Lif içerikli beton karışımlarının çökme değerleri ve sınıfları 88
Tablo 11. Lif içerikli beton karışımlarının 7 günlük küp basınç dayanımları 89
Tablo 12. Lif içerikli beton karışımlarının 28 günlük küp basınç dayanımları 91
Tablo 13. Çalışmada kullanılan çelik donatı çubuklarının fiziksel ve mekanik özellikleri 92
Tablo 14. Eğilme dayanımına ait deney sonuçları 96
Tablo 15. Kenetlenme boyu 50 mm (5Ø) olan mafsallı kirişlere ait deneysel veriler 103
Tablo 16. Kenetlenme boyu 100 mm (10Ø) olan mafsallı kirişlere ait deneysel veriler 110

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Beton örtüsünün dökülmesiyle çevresel faktörlere karşı korumasız duruma gelen donatılar 13
Şekil 2. Aderansı sağlayan faktörler 15
Şekil 3. Düz ve deformeli donatılarda aderans mekanizması 16
Şekil 4. Aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi 17
Şekil 5. Aderans kuvveti bileşenleri ve halka çekme gerilmeleri 18
Şekil 6. Kenetlenme boyu 19
Şekil 7. Donatı çubuğuna paralel etki eden kuvvetler ve aderans gerilmesi 20
Şekil 8. Donatı çubuğu boyunca oluşan aderans gerilmeleri 22
Şekil 9. Çekip çıkarma deneyinde donatıda oluşan çekme ve aderans gerilmeleri 23
Şekil 10. Eksenel yüklü betonarme prizmada oluşan çatlaklar ve gerilme değişimleri .. 24
Şekil 11. Dört noktalı eğilme etkisi altında olan kiriş (a) Kiriş (b) Moment grafiği ve denge denklemi (c) Kirişte oluşan iç kuvvetler ve denge denklemleri (d) Kiriş kesiti (e) Eğilme aderansı (f) Kenetlenme aderansı 25
Şekil 12. Eğilme altındaki çatlamış kirişte beton, çelik ve aderans gerilmeleri 27
Şekil 13. Aderans göçmesi tipleri 28
Şekil 14. Betonarme kesitte yarılma tiplerinin oluşumu 29
Şekil 15. Donatı çubuğu boyunca betonda oluşan yarılmalar 30
Şekil 16. Çelik donatı çubuğu ile beton arasındaki aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği .. 31
Şekil 17. 150 mm kenetlenme boyunda aderans gerilmesi ve basınç dayanımı ilişkisi . 33
Şekil 18. Maksimum aderans dayanımı ve beton örtüsü ilişkisi 34
Şekil 19. Beton örtüsü ve bağıl aderans dayanımı ilişkisi 34
Şekil 20. Enine donatı varlığının aderans dayanımı üzerindeki etkisi 36
Şekil 21. Aktif sargılamalı pasif sargılama içermeyen numunelerde bölgesel aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi 37
Şekil 22. Donatı yüzeyinin aderans dayanımı ile ilişkisi; beton basınç dayanımları (a) 40 MPa (b) 50 MPa; lb / Ø oranı 3 olan 39
Şekil 23. Donatı çubuğu yüzeyindeki geometrik ifadelerin şematik gösterimi 39
Şekil 24. Donatıların altındaki beton örtü derinliğine bağlı maksimum aderans dayanımları (5 farklı beton karışımı için) 41
Şekil 25. Betonlama sırasındaki donatı konumuna bağlı olan katsayının belirlenmesi .. 43
Şekil 26. Donatı çapı ve kenetlenme boyu (ankraj boyu) etkisinin aderans dayanımı ile ilişkisi (a) 30 MPa (b) 40MPa 44
Şekil 27. Sonu kancalı çelik lif örneği 49

Şekil 28. Hibrit liflerin temel prensibi: (a) Kısa ve ince liflerin mikro çatlakları köprülemesi ve matrisin çekme dayanımını artırması; (b) Uzun ve kalın liflerin makro çatlakları köprülemesi ve matriste sünekliği artırması 54
Şekil 29. Propilen monomeri ve polipropilen 55
Şekil 30. Metil gruplarının dizilimine bağlı olarak oluşan PP türleri (taktisite) 55
Şekil 31. Agrega en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan beton için yönetmelikte verilen dağılım eğrisi sınırları ve deneyde kullanılan agregaların granülometri eğrisi 61
Şekil 32. Mafsallı kiriş için kesilen çelik donatı çubukları 63
Şekil 33. Mikro polipropilen lifler 64
Şekil 34. Burgulu makro kopolimer polipropilen lifler 65
Şekil 35. Karışım kodlarının şematik açıklaması 67
Şekil 36. Betoniyerde hazırlanan beton karışımı 68
Şekil 37. Beton karışımına eklenen lifler (a) Mikro PP lif (b) Makro KPP lif 69
Şekil 38. Farklı kenetlenme boyuna sahip donatı çubuklarının tasarımı (a) 5Ø (b) 10Ø 70
Şekil 39. Beton dökümüne hazır hâle getirilen üç boyutlu mafsallı kiriş kalıbı modellemesi (a) Şeffaf görünüm (b) Katı cisim görünümü 71
Şekil 40. Tasarlanan mafsallı kiriş (a) Üç boyutlu şeffaf görünüm (b) Üç boyutlu katı cisim görünümü 71
Şekil 41. Tasarlanan eğilme numunesi kalıbı 72
Şekil 42. Prizmatik eğilme numunelerinin modellenmesi 72
Şekil 43. Farklı kenetlenme boyuna sahip donatı çubuklarının hazırlanması (a) 50 mm (b) 100 mm 73
Şekil 44. Kenetlenme boyuna göre kılıflanan çelik donatı çubukları 74
Şekil 45. Donatı çubuklarının kalıplara yerleştirilmek üzere hazırlanması 74
Şekil 46. Mafsallı kiriş kalıplarının hazırlanması ve donatı çubuklarının yerleştirilmesi 75
Şekil 47. Deney numuneleri kalıplarının yağlanması ve hazırlanması 75
Şekil 48. Mafsallı kiriş kalıplarına taze beton dökülmesi 76
Şekil 49. Numune kalıplarına beton dökümü (a) Küp numune kalıpları (b) Prizmatik eğilme numune kalıpları 76
Şekil 50. Kür havuzunda bekletilen küp numuneler 77
Şekil 51. Hibrit lif ilaveli mafsallı kiriş ve eğilme numuneleri 77
Şekil 52. Çalışmada üretilen tüm mafsallı kiriş ve eğilme numuneleri 78
Şekil 53. Çelik donatı çekme deneyi 78
Şekil 54. Taze beton çökme deneyi (a) MiPP0,05MaKPP1 karışımına ait çökme deneyi (b) MiPP0MaKPP4 karışımına ait çökme deneyi 79

Şekil 55. (a) Kür havuzundan çıkarılan küp beton numuneleri (b) Küp numune basınç dayanımı belirleme düzeneği 80
Şekil 56. Eğilme dayanımı deney düzeneği 81
Şekil 57. Eğilme dayanımı belirleme düzeneği 81
Şekil 58. Mafsallı kiriş detayları 84
Şekil 59. Mafsallı kiriş deney düzeneği ve ölçüleri (Tip A) 86
Şekil 60. Çelik mafsal ölçüleri (Tip A) 86
Şekil 61. İki noktadan yükleme altında olan kirişin modellemesi 87
Şekil 62. Laboratuvar ortamında kurulumu yapılan mafsallı kiriş deney düzeneği 87
Şekil 63. Çalışmada üretilen referans ve lifli betonların 7 günlük ortalama küp basınç dayanımları 90
Şekil 64. Çalışmada üretilen referans ve lifli betonların 28 günlük ortalama küp basınç dayanımları 92
Şekil 65. MiPP0MaKPP0 kirişi deney sonu görünümü 93
Şekil 66. Göçme gerçekleşen MiPP0MaKPP0 kirişi 94
Şekil 67. MiPP0,05MaKPP4 kirişinde çatlağın köprülenmesi 94
Şekil 68. Kirişlerin ortalama eğilme dayanımları 95
Şekil 69. Yük-sehim grafiğinde maksimum yük sonrası davranışı 97
Şekil 70. MiPP0MaKPP0 kirişlerinin yük-sehim grafiği 98
Şekil 71. MiPP0,05MaKPP0 kirişlerinin yük-sehim grafiği 98
Şekil 72. MiPP0MaKPP1 kirişlerinin yük-sehim grafiği 98
Şekil 73. MiPP0MaKPP2 kirişlerinin yük-sehim grafiği 99
Şekil 74. MiPP0MaKPP4 kirişlerinin yük-sehim grafiği 99
Şekil 75. MiPP0,05MaKPP1 kirişlerinin yük-sehim grafiği 99
Şekil 76. MiPP0,05MaKPP2 kirişlerinin yük-sehim grafiği 100
Şekil 77. MiPP0,05MaKPP4 kirişlerinin yük-sehim grafiği 100
Şekil 78. Deneyi tamamlanan mafsallı kiriş 101
Şekil 79. Deneyi sonlanan ve sıyrılan mafsallı kiriş 101
Şekil 80. 5Ø kenetlenme boyuna sahip mafsallı kirişlerin ortalama aderans dayanımları 102
Şekil 81. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0MaKPP0 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 105
Şekil 82. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0,05MaKPP0 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 106
Şekil 83. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0MaKPP1 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 106

Şekil 84. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0MaKPP2 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 106
Şekil 85. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0MaKPP4 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 107
Şekil 86. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0,05MaKPP1 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 107
Şekil 87. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0,05MaKPP2 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 107
Şekil 88. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0,05MaKPP4 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 108
Şekil 89. 10Ø kenetlenme boyuna sahip mafsallı kirişlerin ortalama aderans dayanımları 109
Şekil 90. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0MaKPP0 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 112
Şekil 91. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0,05MaKPP0 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 113
Şekil 92. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0MaKPP1 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 113
Şekil 93. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0MaKPP2 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 114
Şekil 94. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0MaKPP4 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 114
Şekil 95. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0,05MaKPP1 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 115
Şekil 96. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0,05MaKPP2 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 115
Şekil 97. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0,05MaKPP4 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği 116
Şekil 98. Farklı kenetlenme boylarındaki kirişlerin ortalama aderans dayanımlarının karşılaştırılması 117

SİMGELER DİZİNİ

Simge	Açıklama
$\tau_{b,maks}$, τ_{max} , τ_{maks}	Maksimum aderans gerilmesi (MPa)
S_{maks}	Maksimum aderans gerilmesine karşılık gelen donatı sıyrılması (mm)
α	Açı (Derece)
p	Radyal basınç bileşeni (N)
τ_b , τ	Aderans (kayma) gerilmesi (MPa)
F	Donatıya veya kirişe etki eden kuvvet (N)
l_b, l	Kenetlenme boyu (mm)
f_{s1}	Donatı serbest ucunda oluşan küçük gerilme (MPa)
f_{s2}	Donatının diğer serbest ucunda oluşan büyük gerilme (MPa)
d_b , d , $\emptyset$	Donatı çapı (mm)
μ_{ort}	Ortalama aderans gerilmesi (MPa)
T	Çekme kuvvetlerinin bileşkesi veya donatıya etki eden kuvvet (N)
Δ_{fs}	Donatı serbest uçlarındaki gerilme farkı (MPa)
f_s	Donatıda oluşan gerilme (MPa)
C_0 , C_1	Deneye bağlı değişkenler
τ_b	Aderans gerilmesi (MPa)
f_{ctd}	Beton tasarım çekme dayanımı (MPa)
f_{yd}	Çelik tasarım dayanımı (MPa)
σ_s	Donatıda oluşan gerilme (MPa)
A_s	Donatı çubuğunun yüzey alanı (mm^2)
P	Eksenel çekme kuvveti veya eksenel yük (N)

L	Herhangi bir mesafe veya mesnetler arası açıklık (mm)
Δ_x	Kirişin boyuna uzunluğundan alınan bir kesit (mm)
M	Moment (N.m)
F_c	Basınç kuvvetlerinin bileşkesi (N)
j	Moment kolu sayısı
d	Etkili derinlik (mm)
z	Moment kolu (mm)
τ_e	Eğilmede ortalama aderans gerilmesi (MPa)
τ_k	Kenetlenme aderans gerilmesi (MPa)
ΔT	Donatı uçlarında oluşan çekme kuvveti farkı (N)
u	Donatı çubuğunun çevre uzunluğu (mm)
ΔM, M_1	Kesitteki moment farkı (N.m)
V	Kesme kuvveti (N)
C_b , c	Donatı çubuğunun betonun alt yüzüne olan net uzaklığı, beton örtü kalınlığı (mm)
C_s	Art arda olan iki donatı çubuğu arası net mesafenin yarısı (mm)
τ_1	Enine çatlamada oluşan aderans gerilmesi (MPa)
τ_2	Kısmi çatlama aşamasında oluşan aderans gerilmesi (MPa)
τ_3	Boyuna çatlamada oluşan aderans gerilmesi (MPa)
s	Donatı sıyrılması (mm)
f_c'	Beton basınç dayanımı (Mpa)
f_{bd}	Tasarım maksimum aderans gerilmesi (MPa)
f_{ctd}	Beton hesap eksenel çekme dayanımını (MPa)
η_1	Betonlama sırasındaki aderans koşulu ve donatı konumu ile ilgili bir katsayı

η_2	Donatı çapına göre belirlenen katsayı
NaCl	Sodyum klorür
h	Yükseklik (mm)
$(C_3H_6)_n$	Polipropilen
CH_3	Metil
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum hidroksit
Cl^-	Klorür
SO_3	Kükürt Trioksit
°C	Derece (Celcius)
R	Gerekli yükleme hızı (N/s)
s	Gerilme artış hızı (MPa/s)
d_1	Kiriş genişliği (mm)
d_2	Kiriş derinliği (mm)
f_{cf}	Eğilme dayanımı (MPa)
a	Kiriş düzeneğinde noktasal yük ve en yakın mesnet arasındaki mesafe (mm)
A_n	Donatı anma çapı alanı (mm^2)
$f_{ck,küp}$	Küp numune basınç dayanımı (MPa)
F_{maks}	Donatıda oluşan maksimum çekme kuvveti (kN)
S_y	Bu çalışmadaki donatı akma dayanımına karşılık gelen sıyrılma miktarı (mm)

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma	Açıklama
AASHTO	Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BS	İngiliz Standartları
BS EN	İngiliz Standartları Avrupa Normu
CEM	Çimento
dk	Dakika
EN	Avrupa Normu
Eurocode	Avrupa Yönetmeliği
FIB	Uluslararası Beton Federasyonu
g	Gram
GFRC	Cam lif takviyeli beton
hpa	Hectopascal
In.	İnç
Kg	Kilogram
KPP	Kopolimer polipropilen
LVDT	Doğrusal değişken diferansiyel transformatörler
MaKPP	Makro kopolimer polipropilen
MiPP	Mikro polipropilen
ml	Mililitre
mm	Milimetre
MMFX	Martensitik mikrokompozit şekillendirilebilir çelik

mmHg	Milimetre Civa
MPa	Megapascal
N	Newton
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PVC	Polivinil klorür
yd^3	Yarda küp
s	Saniye
TS	Türk Standardı
μm	Mikrometre
UV	Ultraviyole

1. GİRİŞ

Beton yapı alanında en çok tercih edilen ve yaygın kullanılan bir malzemedir. Betonun içeriğinde; farklı boyutlarda agrega (kum, çakıl ve mıcır), çimento (bağlayıcı madde), su ve istenilen beton kıvamı, koruyuculuğu ve priz süresini belirlemek için bazı kimyasal katkı maddeleri bulunmaktadır. Beton kendi yapısı bakımından basınç kuvvetine karşı oldukça dayanıklı olup yapılardaki yüklere karşı direnebilmektedir. Çekme kuvvetine karşı dayanımı oldukça düşük olan beton için bu bir dezavantaj olmakla birlikte içeriğinde kullanılan çelik donatı çubukları sinerjik bir etki oluşturarak betonu hem çekme hem de basınç kuvvetine karşı dayanıklı bir duruma getirmektedir (Kalyani vd., 2018). Beton ve çeliğin kombinasyonundan oluşan bu materyal betonarme olarak adlandırılmaktadır.

Bilindiği üzere, betonarme yapılar için en temel kavramlardan biri aderans durumudur. Betonarme taşıyıcı sistemlerde oluşan iç kuvvetlerin aktarılabilmesi için beton ve donatının birbirine tutunması ve tam olarak birbirini kavraması gerekmektedir. Yük etkisi altında beton ile donatı arasında oluşan kayma gerilmesine aderans denilmektedir (Arslan, 2017). Aderans sayesinde, yapıda oluşan iç kuvvetler beton ve donatı arasında aktarılabilmekte olup, sistem stabilitesi sağlanabilmektedir.

Betonarme sistemlerde aderans beton ve donatıların birbirini kavramasını, kenetlenmesini sağlar. Bu etki taşıyıcı sistemlerin birlikte çalışmasına imkân sağlamaktadır. Uygun kenetlenme sağlanamamış ise beton ile donatıda farklı seviyelerde uzunluk değişimi gerçekleşeceğinden donatıda sıyrılma oluşacaktır. Betonun içerisine kenetlenme için uygun uzunluktaki çelik donatı çubuklarının yerleştirilmesi durumunda bu donatı çubuklarını çekip çıkarmak mümkün değildir. Ancak gömülme boyu yetersiz ise donatı akma dayanımına ulaşamadan beton içinden sıyrılabilir ya da beton yüzeyinde yarılma etkisi oluşturabilir. Çelik çubuğun çapı, yapısı, nervürlü veya düz olması gibi parametreler aderans dayanımını belirlemede oldukça önemli olmakla birlikte özellikle nervürlü çubuğun aderans gerilmesi düz çubuğa kıyasla daha fazladır (Durmuş vd., 2006). Çeliğin akma dayanımı, çelik çubuğun beton içindeki konumu, çelik çubuğun kenetlenme boyu, beton basınç dayanımı, pas payı, kullanılan agreganın cinsi, kullanılan lifin; miktarı, narinlik oranı ve

tipi ayrıca betonun basınç ve çekme dayanımı, kür süresi gibi faktörler aderans dayanımını etkilemektedir (Arel, 2012).

Donatının, taşıyıcı sistem yükleri altında veya deprem gibi yanal (*lateral*) yükler tesirinde iken betondan sıyrılmadan yükleri transfer etmesi gerekmektedir. Yük etkisi altında olan bir betonarme elemanda donatının sıyrılması durumunda beton, donatı yerine yoğun çekme ve eğilme kuvvetleri etkisi altında kalarak göçme durumu meydana gelebilmektedir.

Betonarme elemanlar, zamanla deformasyona uğrayarak kullanım ömrü azalabilmektedir. Betonun mekanik özelliklerini artırarak servis süresi uzatılabilmekte ayrıca bakım ve tamir ihtiyacı azaltılarak maliyet açısından bir avantaj oluşturulabilmektedir. Yapılan literatür araştırması sonucunda, beton karışımlarında belirli oranlarda kullanılan liflerin, betonun mekanik özelliklerini artırdığı ve iyileştirdiği görülmektedir.

Çekme dayanımının yüksek olması, betonun mekanik özelliklerini güçlendirmesi, betona karışımının kolay olması, betonu sararak geçirgenliğini azaltabilmesi ve ekonomik olması sentetik bir lif türü olan polipropilen lifleri öne çıkarmaktadır.

Polipropilen liflerin kullanımına ilişkin olarak deneysel araştırmalarda genellikle tek çeşit polipropilen lif katkılı beton numunelerinin eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımına etkilerinin incelendiği görülmektedir. Nadir olarak görülen araştırmalarda, hibrit polipropilen lif (makro kopolimer polipropilen lif ve mikro polipropilen lif karışımı) takviyeli kompozitlerin deneylerinde ise yine eğilme dayanımı, basınç dayanımı, tokluk dayanımı, yarmada çekme dayanımı incelenmiştir. Hibrit PP lifli betonun, beton ve donatı arayüzeyinde dağılımının aderans dayanımına etkileri çalışmanın temel konusu olup ayrıca beton basınç dayanım ve eğilme dayanımına etkileri de, liflerin betonun mekanik özelliklerini değiştirebilmesi ve bu durumun da aderans dayanımını etkilemesi sebebiyle yapılan çalışma kapsamında değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada beton karışımına eklenen hibrit (sentetik makro kopolimer PP ve mikro PP) lifler ile elde edilen lifli betonların, betonarme taşıyıcı sistemlerde kritik öneme sahip olan beton ve donatı arasındaki aderans dayanımına vereceği yanıt dört noktalı eğilme yönteminin sağlandığı mafsallı kiriş deneyi ile gerçekleştirilerek sonuçları

değerlendirilmiştir. Mafsallı kiriş deneyi, hem eğilme etkisi hem de beton ve donatı yüzeyinin çekme kuvvetine maruz kalması sebebiyle gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekte olduğundan, bu çalışmada aderans dayanımını belirlemede tercih edilmiştir. Literatür araştırmalarından elde edilen bulgulara göre hibrit lif ilaveli betonlarda genelde, basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımları ve tokluk indeksi değerleri deneysel olarak incelenmiş olup polipropilen liflli hibrit betonların aderansa etkisi hakkında veri bulunamamıştır. Literatürdeki değerlendirmeler kapsamında bu eksiklik ele alınarak yapılan deneysel çalışmada, mikro PP lif ve makro PP lif olmak üzere tekil ve hibrit PP lifli betonların aderansa ilişkin parametreleri deney sonuçlarına göre belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Tepfers ve Olsson (1992) halka ve çekip çıkarma (*pull-out*) deneyleri ile beton ve donatı arasındaki aderans etkisinin betonun yarılmaya karşı yatkınlığını belirlemek üzere deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Halka deneyi ile aderansın neden olduğu radyal kenetlenme kuvvetinin betondaki şekil değiştirmesi ölçülmüş olup donatıyı saran teflon bir malzeme ile de donatı eksenine paralel olan aderans bileşeni incelenmiştir. Deney sonuçlarında, donatıda enine nervürlerin (90 derece), eğik olan nervürlere göre daha gevrek ve rijit ankraj dayanımı verdiği, nervür yüksekliği arttıkça ankraj (aderans) kapasitesinin ve rijitliğinin arttığı, nervürler arası mesafe belirli bir seviyeye kadar arttıkça ankraj yükünün de (maksimum çekme kuvveti) arttığı görülmüştür. Halka deneyi sonuçlarında ise maksimum aderans gerilmelerine karşılık, beton numunelerde 1-2,5 mm aralığında şekil değiştirme gözlemlenmiştir. Ayrıca donatı eksenine paralel olan kenetlenme kuvveti bileşeni ile nervür yüzey açısı arasındaki eğim arttıkça aderansın betonda yarılmaya yatkınlığı artırdığı tespit edilmiştir.

Durmuş vd. (2006) yaptıkları çalışmada yüksek başarımlı beton ve geleneksel betonlarda değişik çaplarda ve aderans boylarında beton ve donatı arasındaki aderans ilişkisini mafsallı kiriş deneyi ile incelemişlerdir. Çalışmada aderans gerilmelerinin, her iki beton türü için de küçük çaplı donatılarda daha yüksek olduğu, nervürlü çelik çubuk kullanıldığında yüksek başarımlı beton için 10Ø kenetlenme boyu ve geleneksel beton için 20Ø kenetlenme boyunun yeterli olduğu görülmüştür. Yüksek başarımlı betonda 10Ø aderans boyuna sahip düz yüzeyli çelik donatı kullanıldığında çap değeri arttıkça aderans gerilmelerinde dikkate değer azalma ve değişim oranı gözlemlenmiş, aynı aderans boyunda nervürlü çelik donatı kullanılması durumunda donatı çapı arttıkça aderans gerilmelerinde çok az miktarda azalma ve değişim oranı olduğu görülmüştür. Düz yüzeyli donatı kullanılan geleneksel betonda 20Ø kenetlenme boyu ve düz yüzeyli donatı kullanılan yüksek başarımlı betonda 10Ø kenetlenme boyunun aderansın sağlanması için yetersiz kaldığı görülmüştür.

Arel (2012) donatı ve beton arasındaki aderansa değişik faktörlerin etkisini araştırmak için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmasında pas payı faktörü, kür süresi, farklı narinlik oranlarına sahip çelik lif eklenmesi, lif katkılı ve katkısız numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılması ve donatı çapı, kenetlenme boyu gibi

etkenlerinin beton ve donatı aderansına etkilerini araştırmıştır. Deney sonuçlarında beton örtüsü arttıkça donatıları çekip çıkarma işleminde gerek duyulan kuvvetin arttığı belirli bir değerden sonra ise pas payı etkisinin azaldığı görülmüştür. Çelik lifli betonlarda beton ve donatı arasındaki aderans etkisinin lif katkısız betona kıyasla daha fazla olduğu analiz edilmiştir. Lif katkısız betonlara uygulanan yüksek sıcaklık ile betonun mekanik özelliklerinde kayıplar tespit edilmiş olup sıcaklık arttıkça bu özelliklerin daha fazla azaldığı ve bunlara bağlı olarak aderans kaybının da yüksek olduğu olmuştur. Yüksek sıcaklığa maruz kalan ve pas payı yüksek olan numunelerde beton ve donatı arasındaki aderans kaybı daha az olmuştur. Yüksek sıcaklığa maruz kalan çelik lif içeren beton numunelerinde, lif içermeyen numunelere kıyasla daha az aderans kaybı gerçekleşmiştir. Donatı çapı arttıkça aderans dayanımlarında ciddi kayıpların oluştuğu ve donatı gömülme boyu arttıkça aderans dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Beton basınç dayanımı daha yüksek olan numunelerde aderans dayanımlarının daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Arslan ve Arslan (2018) yaptıkları çalışmada kenetlenme boyu ve donatı çapının beton-donatı aderansına etkisini araştırmışlardır. Deneyde Ø10, Ø12 ve Ø14 donatıları belirlenmiş ve her bir donatı çapı için 10 cm, 15 cm ve 20 cm kenetlenme boylarına sahip kirişler hazırlanmıştır. Kirişler mafsallı kiriş deneyi ile test edilmiştir. Sabit donatı çaplarında kenetlenme boyu arttıkça donatının betona daha iyi tutunduğu ve sıyrılma miktarının, kenetlenme (aderans) boyu arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca aderans boyları arttıkça donatıda oluşan maksimum gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir. Kenetlenme boyu 20 cm olan bütün numunelerde donatı akma dayanımına ulaşmış ve sıyrılma gerçekleşmemiştir.

Shoenberger ve Tom (1992) havalimanı apron bölümü beton yol kaplaması için polipropilen liflerin etkilerini araştırmış ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler için tek filamanlı, harmanlanmış fibril ve burgulu demet halindeki polipropilen çeşitleri, 190 mm ve 381 mm (0,75 in. ve 1,5 in.) uzunluklarında olmak üzere iki farklı polipropilen lif uzunluğunda kullanılmıştır. Çalışmada üreticilerin tavsiyesi üzerine tüm lif türlerinden beton hacminin (yd^3) yaklaşık %0,1'i oranında karışımlara eklendiği aktarılmıştır. Deney sonuçlarında basınç ve eğilme dayanımları üzerinde kayda değer bir iyileşme görülmemiştir. Eğimli kesme metodu ile ASTM C882 yönetmeliği üzerinde biraz değişiklik yapılarak, polipropilen lif katkılı beton ile

lif katkısız beton arasındaki aderans dayanımları ölçülmüş ve lif katkısının betonun kendi aderans dayanımını azalttığı tespit edilmiştir. Polipropilen lif katkılı numunelerin yorgunluk dayanımında, katkısız numunelere kıyasla büyük bir gelişme gözlemlenmemiştir. Liflerin katılması ile tokluk indeksinin arttığı görülmüş ve hacimce %0,1 polipropilen lif katkısının betonun işlenebilirliğine fazla etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Hsie vd. (2008) yaptıkları deneysel çalışmada polipropilen hibrit lif donatılı betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyde makro lif olarak tek filamanlı uzunluğu 60 mm çapı 1 mm, çekme dayanımı 320 MPa olan, mikrolif için saçaklı, elyaf şeklinde ve 10 mm ve 25 mm aralığında uzunluğa sahip ve çekme dayanımı 550 MPa olan polipropilen lifler kullanılmıştır. Deneyde tek filamanlı makrolif kütlece 3 kg/m^3, 6 kg/m^3, 9 kg/m3 olarak kullanılmış ve elyaf mikrolif 0,6 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Hibrit lifler de tek filamanlı ve elyaf liflerin kütlece oranları değiştirilmeden karıştırılması ile yapılmıştır. Karışımlara uygulanan deneyler sonucunda hibrit lif takviyeli beton numunelerin basınç dayanımları lif katkısı olmayan referans numunelere göre %14,60 ile %17,31 arasında artış, yarmada çekme dayanımında %8,88 ile %13,35 arasında artış ve yırtılma modülünde %8,99 ile %24,60 arasında artış olduğu görülmüş ayrıca betonda kullanılan polipropilen lif miktarı arttıkça tokluk indeksinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Lung Huang vd. (2012) deneysel çalışmalarında yüksek dayanımlı polipropilen fiber donatılı betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk indeksini araştırmışlardır. Deneyde kullanılan lifler 46 mm makro polipropilen olup narinlik değeri 40~45'tir. Hacimce %0, %0,5, %1 ve %1,5 içeriğine sahip lif ve 0,2 su-bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Sonuçlar, yüksek dayanımlı betonlara lif ilavesinin basınç dayanımını %3-5 oranında düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca dinamik elastisite modülünü %5 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Lif katkılı betonun 7 günlük eğilme dayanımı katkısız olan beton numunesine kıyasla %10 azalmıştır. 28 günlük numunelerde ise polipropilen lif katkılı numunelerde tokluk indeksi ve darbe yükünde iyileşme gözlemlenmiştir.

Reufi ve Marku (2015) yaptıkları deneysel çalışmada çelik ve polipropilen liflerin betonun mekanik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Çelik lifler, 50 mm ve 30 mm

uzunluğunda, 0,75 mm çapında ve sırasıyla 67 ve 40 narinlik oranlarına sahip kanca sonlu iki farklı türde lif tercih edilmiştir. Polipropilen lifler ise 12 mm, 6 mm ve 3 mm olarak kullanılmıştır. Çelik lifler beton hacminin %0, %0,25, %0,5 ve %1'i oranlarında kullanılmış, polipropilen lifler ise çimento ağırlığının %0, %0,25, %0,5 ve %1'i oranlarında betona ilave edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarında 28 günlük basınç dayanımında en çok artış çimento ağırlığının %1'i olan ve 12 mm uzunluğa sahip polipropilen lif katkılı numunede oluşmuş ve kontrol numunesine (lif katkısız) oranla basınç dayanımı %31 artmıştır. Çelik lif katkılı numunelerde en çok basınç artışı 30 mm uzunluğa sahip ve beton hacminin %1'i olan numunede gerçekleşmiş olup, basınç dayanımı kontrol numunesine oranla yaklaşık %17,6 artmıştır. Yarmada çekme dayanımında, beton hacminin %1 oranında olan ve 30 mm uzunluğunda olan çelik en yüksek dayanıma ulaşırken, polipropilen lifler de en yüksek çekme değerine, çimento ağırlığının %1'i olan ve 6 mm uzunluğundaki lif ulaşmıştır.

Yew vd. (2016) yaptıkları çalışmada 54 mm polipropilen burgulu demet liflerin palm yağı muhteva eden yüksek dayanımlı hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyde 35 mm uzunluğundaki çelik lifler de kullanılarak deneylerin sonuç değerleri karşılaştırılmıştır. Polipropilen lifler beton hacminin %0,125, %0,167, %0,25 ve %0,5 oranlarında, çelik lifler beton hacminin %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında ve lif katkısız kontrol numunesi üretilmiştir. 28 günlük küp numune basınç dayanımında, sadece polipropilen lif katkısı olan numuneler arasında en yüksek değer %0,5 makro polipropilen lif içerikli numunede gerçekleşmiştir. Çelik lif katkısı ve polipropilen lif katkısında %0,25 lif oranına kadar çökme (*slump*) değerleri aynı çıkmış, bu hacim değerinden daha fazla olanlarda polipropilen lif eklenmesi çelik lif eklenmesine kıyasla çökme değerini daha az oranda azaltmıştır. Hacimce %0,5 polipropilen içerikli numunede 28 günlük basınç dayanımı 54,6 MPa, kontrol betonunda ise 49,7 MPa olarak yaklaşık %10 artış görülmüştür. Polipropilen lifler beton yoğunluğunu çelik liflere oranla azaltmış bu da yapı maliyetini düşürmüştür. %0,5 polipropilen lif katkısı maksimum gerilmedeki uzama miktarını belirgin şekilde artırmış, yarmada çekme dayanımını ise %17 artırmıştır. Düşük hacimlerde (%0,125-%0,25) polipropilen lif ilaveli karışımların 28 günlük eğilme dayanımında, kontrol betonuna kıyasla daha belirgin artış gözlemlenmiştir. En yüksek

eğilme dayanımına %1 çelik lif içerikli numune ulaşmış olup, kontrol betonuna göre yaklaşık %31,5 artış görülmüştür.

Garcez vd. (2019) yaptıkları çalışmada tek filamanlı burgulu demet şeklinde ve uzunluğu 54 mm olan makro polipropilen lifleri kullanarak kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Lifler sırasıyla 4 kg/m^3, 6 kg/m^3 ve 8 kg/m^3 olacak şekilde betona karıştırılıp elde edilen kiriş numuneleri eğilme etkisi altında test edilmiştir. Makro sentetik polipropilen fiber oranları kütlece 4 kg/m^3, 6 kg/m^3 ve 8 kg/m^3 için; beton çökme (slump) değerlerini sırasıyla 570 mm, 650 mm ve 440 mm olarak, 28 günlük basınç deney sonuçlarını sırasıyla 69,5 MPa, 69,6 MPa ve 52,7 MPa olarak, yarmada çekme dayanımlarını ise 3,89 MPa, 5,00 MPa ve 2,28 MPa olarak bulmuşlardır. Deney sonucunda kullanılan 54 mm polipropilen makro sentetik lif oranı 4 kg/m^3'ten, 8 kg/m^3'e çıktığı zaman basınç dayanımında yaklaşık %24'lük bir azalma oluşmuş, en büyük yarmada çekme dayanımı ise katkısız betona kıyasla %28,5 artış ile 6 kg/m^3 olan karışımda sağlanmıştır.

Pekdemir (2020) gerçekleştirdiği deney çalışmasında farklı hacimlerde, 2,5 cm uzunluğunda ve 0,1 cm çapında makro polipropilen lif katkısının betonun eğilmede çekme ve basınç dayanımına etkilerini araştırmıştır. Bunun için katkısız ve altı dizi %0,25, %0,50, %0,75, %1,0, %1,25 ve %1,5 lif içeren prizmatik beton numuneler üretilmiştir. Deney sonuçlarında polipropilen lif takviyesi arttıkça basınç dayanımında azalma olduğu, eğilmede çekme dayanımında ise artış gözlemlenmiştir.

R. A. S. (2006) yaptığı çalışmasında hacimce %0,25, %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında 15 mm uzunluğunda olan polipropilen lif içerikli beton karışımlarını ürettikten sonra basınç ve eğilme deneylerini ayrıca beton ile donatı arasındaki aderansı belirlemek için çekip çıkarma deneyini gerçekleştirmiştir. 28 günlük basınç dayanımında en yüksek değer hacimce %0,50 lif içerikli beton numunede görülmüş olup basınç dayanımı lif katkısız betona göre yaklaşık %18,4 artmıştır. 28 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımında en çok artış %0,50 lif katkılı numunede olup lif katkısız betona kıyasla yaklaşık %11 artış görülmüştür. Sadece %1,5 lif içerikli numunede yarmada çekme dayanımında düşüş görülmüştür. Maksimum aderans dayanımında, lif katkısız betona kıyasla %11,3 artış ile en yüksek değere ulaşan numune %0,5 lif içerikli beton

numunesi olup, bunu sırasıyla %0,25, %0, %1 ve %1,5 lif içerikli numuneler takip etmiştir.

Tastani vd. (2014) yaptıkları çalışmada olumsuz gerilme koşullarında karbon nanotüp ve polipropilen lif ile güçlendirilmiş çimento içerikli beton kompozitlerde bölgesel aderansın etkilerini incelemişlerdir. Deney için 10 mm nervürlü eğilme donatısı kullanılarak küçük kirişler hazırlanmış ve donatı çapının beş katı uzunluğunda gömülme boyu belirlenerek kirişlerin orta açıklıkta bindirmeli ek yapması sağlanarak kalıplar hazır hale getirilmiştir. Kirişin bindirme yapılan kısmında (diğer yarısı) donatı gömülme boyu kısa olduğundan oluşacak momenti karşılamak için iki adet yardımcı 8 mm donatı yerleştirilmiştir. Deneyde hacimce %1,5 ve %2 oranında polipropilen içerikli ve çimento ağırlığının %0,1 oranında karbon nanotüp içerikli karışımlar önce her biri ayrı olarak elde edilip daha sonra lifler ile karbon nanotüp içerikleri oluşturularak karışımlar hazırlanmıştır. Kiriş numuneleri dört noktalı eğilme deneyi altında değerlendirilmiş olup ayrıca basınç ve eğilme dayanımı deneyleri de yapılmıştır. Deney sonuçlarında polipropilen ilave edilen kompozitlerde eğilme dayanımını ve sünekliğini artırmış olup nanotüp ilavesi ile mekanik özelliklerde daha da iyileşme olduğu ve tokluk değerinin de arttığı görülmüştür. Basınç dayanımında en çok azalma sadece polipropilen lif içerikli numunede görülmüştür. Karbon nanotüplerin ilavesi yük-sehim grafiğinin başlangıç (elastik deformasyon) eğrisinde bir miktar artış gözlemlenmiştir. Deney sonrası, kirişlerde aderansın sağlandığı bölgede, nanotüp içerikli numunelerde tek çatlak oluşurken polipropilen ve nanotüp içerikli numunelerde daha çok çatlak ağı ve genişliği oluşmuş ayrıca kirişte daha büyük deformasyon meydana gelmiştir. Bu durumlar sadece dayanımların arttığını değil, fiber-matris aderansının ve donatı-matris kenetlenme kapasitesinin de iyileştiğini göstermiştir. Karışımlara ilave edilen karbon nanotüplerin betonun dayanım özelliklerini iyileştirdiği, ilgili aderans deneyi ile açıkça gösterilememiş ve bunun sebebi olarak deney ölçeği gösterilmiştir.

Ganesan vd. (2014) çelik ve polipropilen hibrit lif katkılı yüksek performanslı betonda belirli aderans boyunda betona gömülen donatı ile beton arasındaki aderans-sıyrılma yanıtı ve aderans dayanımını deneysel olarak incelemişlerdir. Çekip çıkarma deneyi için 96 adet numune hazırlanmıştır. Deneydeki değişkenler çelik ve polipropilen lif hacmi ve donatı çapıdır. Hibrit liflerin olduğu numunelerde sargılama ve köprüleme etkisi sebebiyle lif katkısız betona kıyasla aderans gerilmesinin arttığı görülmüştür. Donatı

çapı küçük olan numunelerde hibrit lif katkısının aderans gerilmesine fark edilir bir etkisi olmamıştır. Hacimce %1 çelik lif ve %0,1 polipropilen liflerin kullanıldığı karışımlarda 12 mm, 16 mm ve 20 mm donatılar için en yüksek aderans gerilmeleri sırasıyla %50, %46 ve %33 olarak artış göstermiştir. Deney sonucunda hibrit liflerin, yüksek performanslı beton ve nervürlü donatı içeren betonarme sistemlerde kullanılmasıyla gerekli ankraj boyunun azaltılabileceği kanısına varılmıştır.

Varghese vd. (2019a) yaptıkları deneysel çalışmada farklı beton sınıfları (M20 ve M50) ve farklı donatı çapları (10 mm ve 20 mm) kullanarak bir dizi farklı liflerin aderans dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Karışımda cam, polipropilen ve bazalt lifleri kullanılmış ve her biri ayrı olarak hacimce %0,25 alınmıştır. Deneyde cam, polipropilen ve bazalt liflerin boyu 12 mm olarak belirlenmiş ve çapları sırasıyla 0,012, 0,022, 0,009 olarak alınmıştır. Donatı aderans boyu 10 mm ve 12 mm alınarak çekip çıkarma deneyi yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde lif içermeyen betona göre aderans artışı en fazla bazalt lif içerikli numunelerde olurken sonra sırasıyla cam ve polipropilen liflerde olmuştur. Beton sınıfı M50 olan lif takviyeli tüm numunelerde aderans artışı M20'ye göre daha fazla olmuştur. M20 beton sınıfını içeren numuneler için en çok aderans dayanımı artış oranı katkısız betona göre sırasıyla bazalt lif için yaklaşık %40, cam lif için %30 ve polipropilen lif için %24 olarak gerçekleşmiştir. M50 beton sınıfını içeren numuneler için ise en çok aderans dayanımı artış oranı katkısız betona göre sırasıyla bazalt lif için yaklaşık %64, cam lif için %62 ve polipropilen lif için %46 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca tüm numune türlerinde donatı çapı arttıkça aderans dayanımı artmıştır. İki beton sınıfı için de lif katkısız numunelerde, lifli numunelere göre daha az aderans dayanımı gözlemlenmiştir.

Varghese vd. (2019b) yaptıkları deneysel çalışmada lif içerikli beton numunelerin, yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun, aderans dayanımı üzerine etkisini çekip çıkarma deneyi ile araştırmışlardır. Deneyde betona ilave edilmek üzere her biri 12 mm uzunluğunda olan aramid, bazalt, karbon, cam ve polipropilen lif türleri her birinden ayrı olarak beton hacminin %0,25'i oranında belirlenmiştir. Diğer değişken beton sınıfı olup, bunlar M20, M30, M40 ve M50'dir. Numuneler 30, 60, 90 ve 120 dakika olmak üzere sırasıyla 821°C, 925°C, 986°C, 1029°C denk ısıya maruz bırakılmıştır. Tüm değişkenlerde ve numunelerde beton sınıfı arttıkça aderans dayanımının arttığı görülmüştür. 30 dakikalık ısıya maruz kalan lif içerikli numunelerin tamamında aderans

dayanımı, ısıya maruz bırakılmayan numunelere göre belirgin olarak azalmıştır. 60 ve 90 dakikalık ısıya kalan numunelerde aderans dayanımı ciddi oranda azalmıştır. 90 dakika ısıya maruz kalan karbon lif ilaveli numunede, ısı işlemi görmemiş duruma göre aderans dayanımında neredeyse %83 oranında azalma görülmüştür. 90 dakika ısıya maruz kalması sonrası M50 beton sınıfında en düşük aderans dayanımı aramid içerikli betonda ve en yüksek aderans dayanımı polipropilen içerikli betonda olmuştur. Polipropilen lif düşük erime noktasına sahip olduğundan yüksek sıcaklıkta eriyip beton matrisi tarafından emilerek boşluk basıncını düşürdüğü, bu durumun makro çatlakların oluşmasını engellediği ileri sürülmüştür. 120 derecede bütün lif ilaveli numunelerin aderans dayanımı sıfıra yaklaşmış ve numuneler ayrışmıştır. Isıya maruz bırakılmayan tüm beton sınıflarındaki numunelerde 0,25 mm sıyrılmaya denk gelen aderans dayanımları lif katkısız numuneye oranla, en çok sırasıyla karbon, bazalt, aramid ve polipropilen lif içerikli numunelerde oluşmuştur.

Şahin (2019) yaptığı araştırmada uçucu kül, çelik ve polipropilen liflerin beton-donatı arasındaki aderansa etkisini mafsallı kiriş deneyi ile araştırmıştır. Araştırma sonuçlarında tüm uçucu kül, çelik ve polipropilen lif katkılarının basınç dayanımını ciddi ölçüde azalttığı görülmüştür. Eğilme dayanımında en çok artış beton hacminin %0,5'i oranında sadece polipropilen lif ilave edilen numunede görülmüştür. Eğilme dayanımında en ciddi azalma hibrit %0,5 polipropilen ve %1,5 çelik lif içerikli numunede görülmüş olup yaklaşık %67,8 dayanım kaybı görülmüştür. Mafsallı kiriş deney sonuçlarında ise en yüksek sıyrılma yüküne sadece %0,20 uçucu kül içerikli ve 12 cm aderans boyunda olan numune ulaşmıştır. Çelik lif içerikli numunelerde sıyrılma gözlemlenmiş ve çelik liflerin donatı-beton arayüzünde aderansa olumsuz etki ettiği belirtilmiştir. Lif ve uçucu kül içermeyen numunelerde ve sadece uçucu kül içeren numunelerde her iki aderans boyunda da deney beton kırılması ile sonuçlanmıştır. Aderansı en zayıf ve en küçük sıyrılma yüküne sahip olan %20 uçucu kül, %0,5 polipropilen lif ve %0,5 çelik lif içeren numune olup en düşük basınç dayanımına da bu numunede ulaşılmıştır.

Huang vd. (2019) yaptıkları çalışmada, hibrit çelik-polipropilen içerikli betona belirli uzunlukta gömülü deformeli çelik çubuğun aderans dayanımını incelemişlerdir. Çalışma, hibrit fiberlerin etkilerini belirleyebilmek için bir dizi monotonik ve tekrarlı yükler altında çekip çıkarma deneyi ile 72 adet küp numune (150 x 150 x 150 mm)

üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmada çok ölçekli ve çok aşamalı fiber donatı mekanizması üzerinde durulmuştur. Hibrit numunelerin maksimum aderans dayanımını tahmin etmek için analitik bir model öne sürülmüştür. Deneyde 15 mm, 30 mm ve 40 mm uzunluklarında ve çapı 0,5 mm olan kıvrımlı çelik lifler ve 8 mm, 13,5 mm ve 19 mm uzunluğunda polipropilen lifler kullanılmıştır. Betona aderans boyu kadar gömülmesi için Ø20 deformeli ve etriye olarak Ø6 düz yüzeyli donatı kullanılmıştır. Deneylerin sonucunda monotonik yükleme uygulanan ve lif katkısız numuneye oranla aderans artışı en fazla olan numune %35,65 artış ile, beton hacminin %1,5 oranında, 80 narinlik oranına sahip çelik lif ve beton hacminin %0,15 oranında 167 narinlik oranına sahip polipropilen lif hibrit karışımında olmuş, aynı hibrit karışımda tekrarlı yükler altında yaklaşık %57'lik aderans dayanım artışı sağlanmış ve pik sıyrılma miktarına da bu karışım oranında ulaşılmıştır. Monotonik ve tekrarlı yükler uygulan numuneler arasındaki en yüksek aderans dayanım değerleri ve pik sıyrılma miktarları çok yakın çıkmıştır. Maksimum aderans dayanımında lif içerikli numunelerde düz betona kıyasla ufak bir azalma görülmüştür. Monotonik yük etkisindeki kalıcı aderans dayanım değerleri, tekrar eden yükler etkisindeki aderans dayanım değerlerinden belirgin olarak daha fazla olduğu görülmüştür. Beton numunelerde hibrit lif kullanımı, büyük sıyrılma miktarına neden olan çok sayıdaki tekrarlı yük ve önceki yüklerin kümülatif etkisinin olumsuz etkilerini azaltmıştır. Hibrit lif katkısı arttıkça aderans dayanımları genel olarak artmış ve lifler aderans dayanımına pozitif yönde yanıt vermiştir. Hibrit lifler pik aderans dayanımından sonraki aşamada oluşan kalıcı aderans dayanımlarını da artırmıştır.

3. BETONARMEDE ADERANS VE LİFLİ BETONUN ADERANSA ETKİSİ

Beton ve donatı yüzeyi arasındaki bağ kuvvetleri yapıların güvenliği için en temel araştırma konularından birisi olmuştur. Aderans sayesinde betona uygulanan yükler doğrudan donatıya aktarılmakta ve donatı ile beton arasında karşılıklı reaksiyonlar oluşturmaktadır. Betonarme sistemlerin taşıma gücünü doğrudan etkileyen aderans, uygun kenetlenme koşulları sağlanamadığı durumlarda yapılarda kritik derecede hasar oluşturabilmektedir. Yeterli pas payı bırakılmayan betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında zamanla dökülüp ufalanan beton örtüsü donatıyı çevresel etkenlere maruz bırakmakta, özellikle yoğun nem içeren bölgelerde veya doğrudan suyla temas halinde bulunan yapılarda donatılar korozyona uğrayarak zaman içerisinde hacmini kaybetmekte ve bu durum da beton ile donatı arasındaki aderansı azaltmaktadır (Şekil 1). Aderansın azalması veya kopması ile betonarme yapılar taşıma gücünü kaybedebilmektedirler.



Şekil 1. Beton örtüsünün dökülmesiyle çevresel faktörlere karşı korumasız duruma gelen donatılar

Betonun zayıf olan mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için kullanılan çeşitli lif türleri bulunmakta ve bunlar doğru oran ve tür seçildiği zaman betonarme elemanın servis süresini uzatabilmekte ve yükleme veya çevresel etkenlerin neden olduğu negatif ekilerin azaltılması sağlanabilmektedir. Lifler betonun mekanik özelliklerini iyileştirirken beton ve donatı arayüzeyinde oluşan aderansa da çeşitli şekillerde etki etmekte ve betonarme eleman için en optimum lif türü ve en ideal lif oranı kullanılması durumunda aderansı iyileştirebildiği görülmektedir.

3.1. Aderans

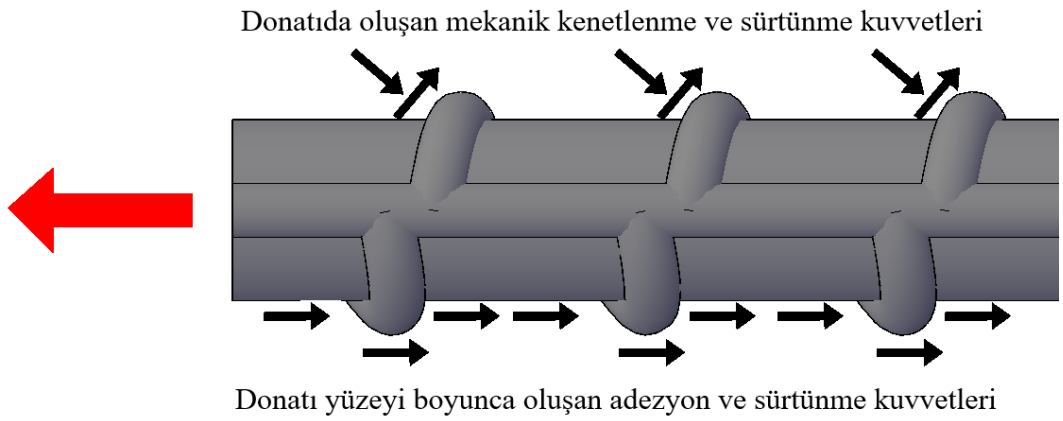
İnşaat mühendisliği alanında aderans, betonarme bir yapıda, taze beton dökümünden itibaren beton ve donatının birbirinden ayrılmayacak şekilde birbirine kenetlenmesi bir başka ifade ile yapışmasıdır. Betonarme elemanda, donatının kendi doğrultusu boyunca beton ile yaptığı kayma gerilmeleri aderansın mekanizmasını tanımlamaktadır. Betonarme bir sistemde donatıda oluşan gerilmeler ve yapıda oluşan iç kuvvetlerin birbirine aktarılması aderans aracılığıyla gerçekleşmektedir. Aderansın yeterli olduğu durumlarda beton ve çelik donatının birim şekil değiştirme değerleri her konumda eşit olmaktadır (Sümer, 2009). Donatı ve donatı etrafını saran beton örtüsü ile sağlanan aderansın tam aderans olduğu düşünülmekte ve donatı birim şekil değiştirmesi ile betonun ilgili katmandaki birim şekil değiştirme değeri eşit alınmaktadır (TS500, 2000). Yeterli aderansın sağlanamadığı durumlarda donatı betondan sıyrılarak veya beton yarılarak yapıda hasar veya göçme durumları oluşabilmektedir. Monotonik, tekrarlı ve tersinir tekrarlı yükler etkisi altında olan yapılarda, beton ve donatı arasındaki yetersiz aderans yapının yük taşıma kapasitesi ve rijitliğini büyük ölçüde azaltabilmektedir (Chao vd., 2009).

Beton ve deformeli donatı arasında kuvvetlerin aktarılması ve aderansın gerçekleşmesini sağlayan üç temel faktör bulunmaktadır (ACI 408R, 2003). Bunlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- Donatı ve beton arasındaki kimyasal yapışma (adezyon),
- Beton ve donatı yüzeyindeki pürüzlülük, donatı yüzeyine gelen enine kuvvetler ve beton ile donatı arasında oluşan rölatif kayma nedenleriyle oluşan sürtünme kuvvetleri,

- Mekanik ankraj veya donatı nervürleri ile beton arasındaki mekanik kenetlenme.

Bu maddeler yüzeyi deformeli veya nervürlü donatıların aderans etkileşiminde geçerli olurken düz yüzeyli donatılarda ise, yüzeylerinde deforme veya nervür bulunmadığından son maddede belirtilmekte olan mekanik kenetlenme durumu oluşmamaktadır. Donatı yüzeyi boyunca oluşan mekanik kenetlenme, sürtünme kuvveti ve kimyasal adezyon Şekil 2'de gösterilmektedir.



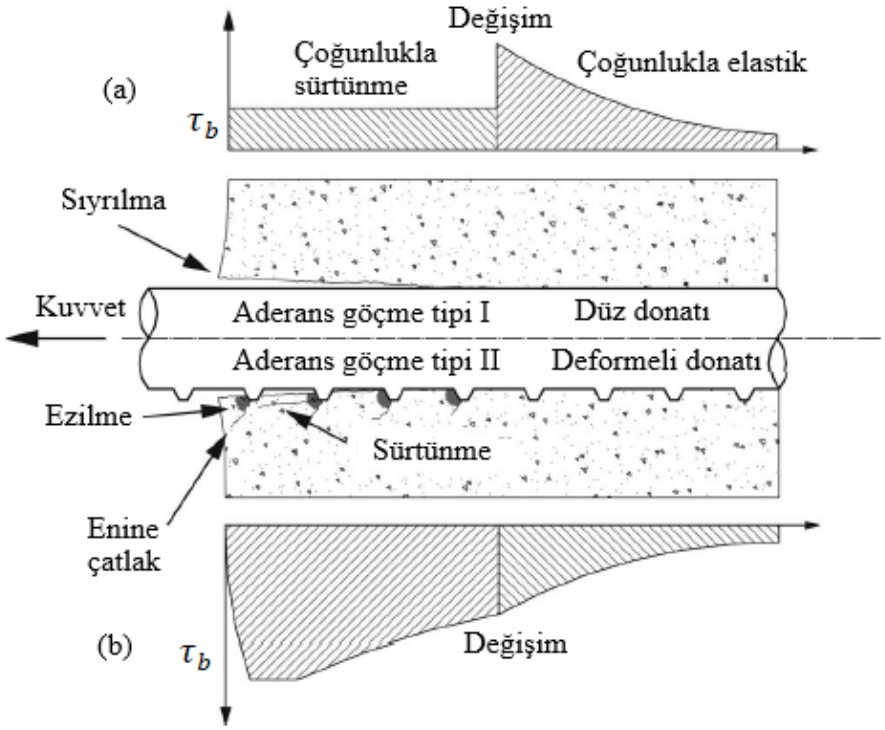
Şekil 2. Aderansı sağlayan faktörler

Kaynak: ACI 408R (2003, Bölüm 1)'den düzenlenerek

Nervürlü veya deformeli donatılarda kimyasal adezyon, yapıda oluşan küçük hareketler sonucu bozularak ardından yüzey pürüzlülüğüne dayalı oluşan sürtünme kuvvetleri kısa sürede etkisini yitirirken, aderans gerilmesindeki en büyük direnmeyi nervürler ile beton arasındaki mekanik kilitlenme sağlamaktadır (Gull vd., 2020). Deformeli donatılarda oluşan maksimum aderans gerilmesi düz yüzeyli donatılarda oluşan maksimum aderans gerilmesine göre oldukça fazla olmaktadır (Hong ve Park, 2012).

Herhangi bir deforme içermeyen düz yüzeyli donatılarda aderans mekanizması deformeli donatılardan farklı olmakta, aderans gerilme şekilleri değişmekte ve aderans göçme tipleri de bu durumdan etkilenmektedir. Düz yüzeyli donatılarda boyut etkisi aderansı etkilemekte ve bu etki sıyrılmayı artırmak için gerekli olan enerji ile betona gömülü olan donatının sağladığı çoğunlukla elastik olan enerji ile dengelidir (Bamonte ve Gambarova, 2007). Şekil 3 (a)'da düz yüzeyli donatılarda oluşan aderans gerilmesi

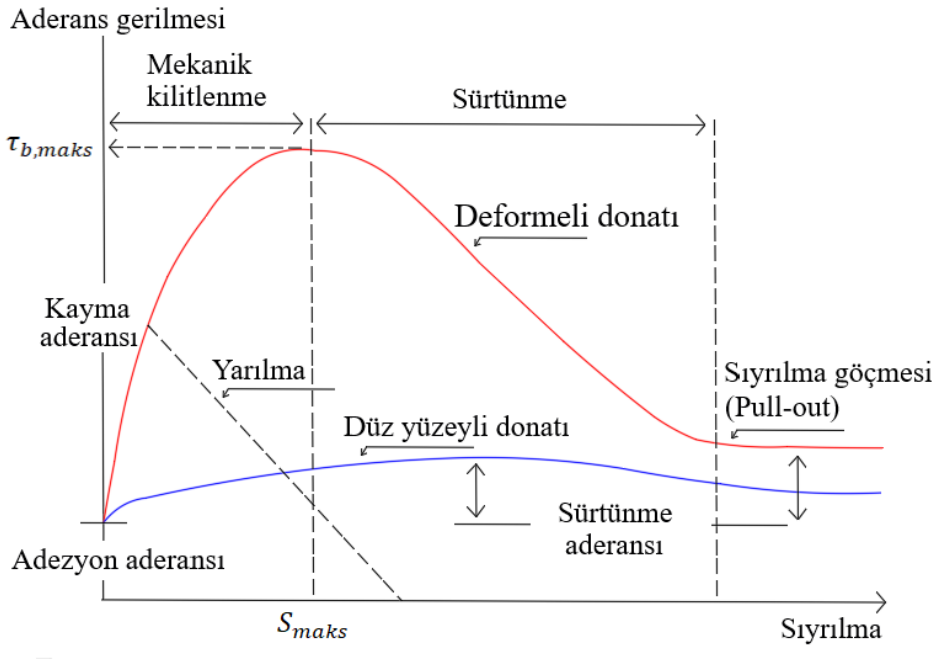
ve Şekil 3 (b)'de deformeli donatılarda oluşan aderans gerilmesi gösterilmekte olup ayrıca her iki donatı türü için aderans göçme tiplerinin detayları verilmektedir.



Şekil 3. Düz ve deformeli donatılarda aderans mekanizması

Kaynak: Bamonte ve Gambarova (2007, s. 226)

Aderans gerilmelerini oluşturan faktörler ve düz yüzeyli donatı ile deformeli donatının aderans gerilmelerinin karşılaştırması Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4'te gösterilen $\tau_{b,maks}$ ifadesi maksimum aderans gerilmesini ve S_{maks} ifadesi ise maksimum aderans gerilmesine karşılık gelen sıyrılma miktarını belirtmektedir.



Şekil 4. Aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi

Kaynak: Hong ve Park (2012, s. 2)

3.1.1. Kenetlenme Aderansı

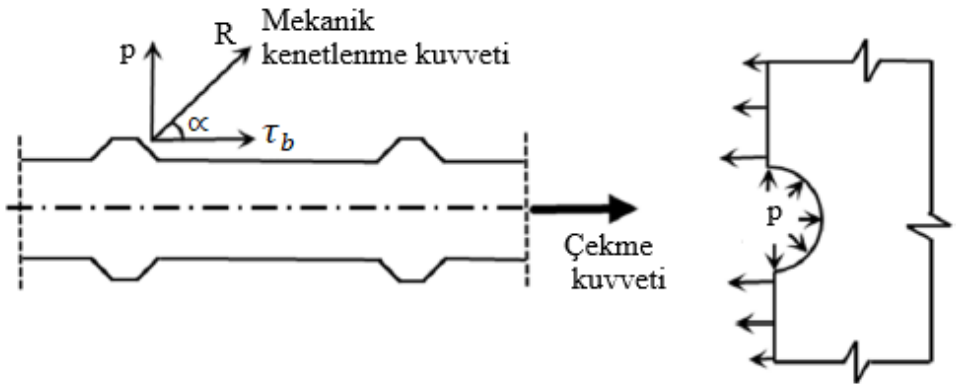
Yükleme altında betonarme elemanlarda oluşan basınç ve çekme kuvvetleri aderansın tayin edilmesinde önemli rol almaktadır. Basınç veya çekme kuvvetleri etkisinde olan donatının betondan sıyrılmaya zorlanması durumunda donatıyı betonun içerisinden sıyrılıp çıkmasını önleyen mekanizma kenetlenme (ankraj) aderansı olarak ifade edilmektedir (Sümer, 2009).

Bir betonarme eleman yükleme altında eğilmeye zorlanıyorsa yapıda oluşan iç kuvvetler beton ve donatı tarafından karşılanmaktadır. Bu iki malzemenin bir arada çalışması için aderans gerilmesinin gerçekleşmesi gerekmekte aksi takdirde donatı betondan sıyrılıp çıkabilmekte böylece sıyrılma göçmesi (*pull-out*) oluşabilmektedir. Aderansın çözünmemesi ve betonun yarılmaması yapının güvenliği için oldukça önemli bir durum olmakla birlikte beton ve donatının aynı anda göçmesi (donatının akmasının sağlanması) yeterli aderans gerilmesinin sağlandığını göstermektedir.

Betonarme elemanlarda kenetlenme aderansı deformeli donatılarda oluşan donatının dış yüzeyindeki çıkıntılar ile sağlanmaktadır. Betonarme sistemlerde donatı çubuğuna uygulanan çekme kuvveti sonrası deformeli donatıda gerilmeler meydana gelmekte ve

kenetlenme sebebiyle betondan donatının deformeli yüzeyine (nervürlere) dik açı ile bir tepki kuvveti gelmekte ve aynı şekilde donatıdan da betona doğru bir kuvvet oluşmaktadır (Özden ve Akpınar, 2003).

Donatı çubuğu çekme kuvveti etkisindeyken nervürlerde basınç gerilmeleri oluşmakta ve donatı etrafındaki betona Şekil 5'te gösterildiği üzere $\propto$ açısı ile etki etmektedir (Xu vd., 2018). Donatı ve beton arasında rölatif hareketlerin gerçekleşmesi sonucu ortaya çıkmakta olan radyal mekanik kenetlenme kuvvetinin donatıya dik basınç kuvvet bileşeni p değerini ve bu basınç kuvvetinin (p'nin) tanjantı donatıya paralel olan bileşen τ_b değerini yani betona gömülü olan donatı çubuğunun uzunluğu boyunca oluşan aderans kayma gerilmesi değerini vermektedir (Özden ve Akpınar, 2003; Xu vd., 2018). Betona gömülü nervürlü donatı çubuğunun uzunluğu boyunca kenetlenmeyi sağlayan τ_b, aderans kayma gerilmesi olarak adlandırılırken, donatı çubuğundan betona doğru dik açı ile etkiyen radyal basınç bileşeni ise p olarak gösterilmiştir (Özden ve Akpınar, 2003). Oluşan radyal p bileşeni, donatı ve beton arayüzeyinde içten hidrostatik basınç olarak etki ettiği kabul edilmekte ve betona halka şeklinde yayılan bu p kuvvetleri donatıyı sargılayan beton örtüsü ile dengelenmektedir (Xu vd., 2018). Goto'ya (aktaran Özden ve Akpınar, 2003, s. 86-) göre oluşan radyal basınç bileşenlerinin betonun çekme dayanımı limitinin üzerinde bir kuvvet ile etki etmesi durumunda betonda yarılma tipi aderans göçmesi durumu gerçekleşmektedir.

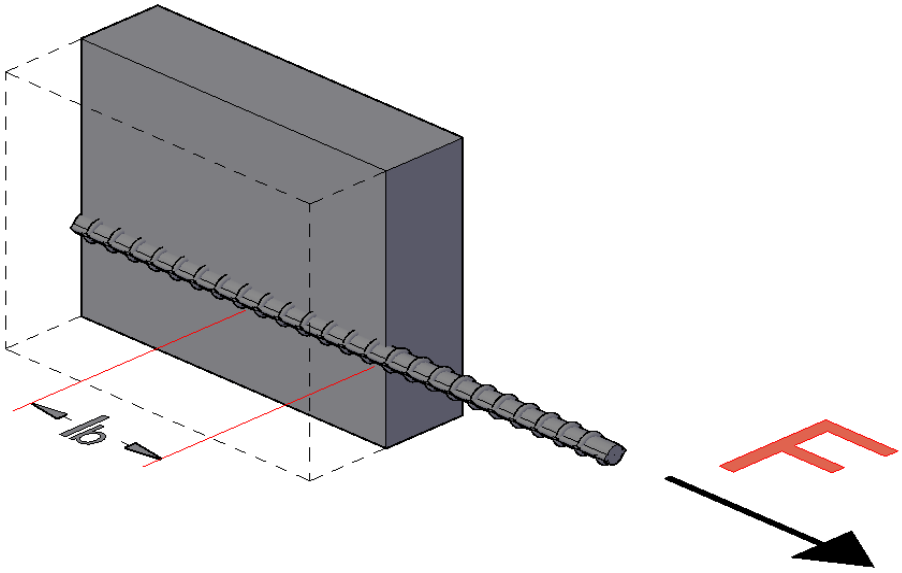


Şekil 5. Aderans kuvveti bileşenleri ve halka çekme gerilmeleri

Kaynak: Xu vd. (2018, s. 2)

Beton ve donatı arasındaki aderans kaybedilmeden, donatının akma dayanım sınır değerine erişmeyi sağlayacak şekilde beton içerisinde kalan kısmına kenetlenme boyu,

bu şekilde oluşan aderans ise kenetlenme aderansı olarak adlandırılmaktadır (Sümer, 2009). Şekil 6'da betonarme bir elemanın iç yüzey kesiti gösterilmekte olup nervürlü donatıya uygulanan kuvvet F, kenetlenme boyu ise l_b veya l olarak ifade edilmektedir.

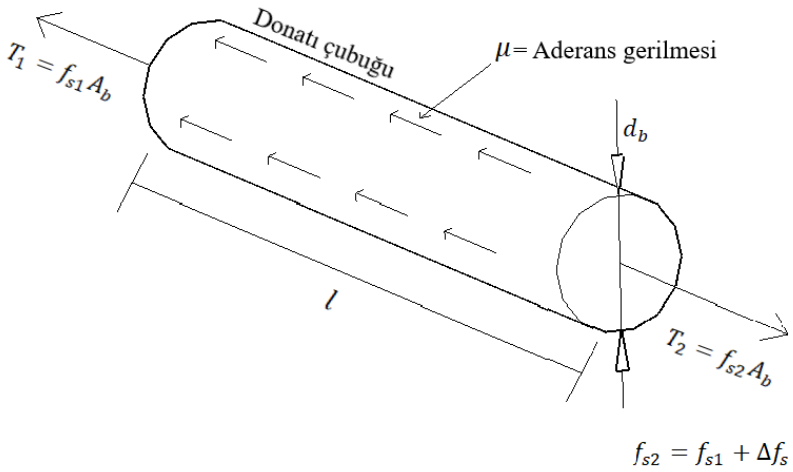


Şekil 6. Kenetlenme boyu

Eğilmeye çalışan betonarme elemanda donatı çubuğunda oluşan gerilmeler donatının uzunluğu boyunca her noktada eşit olmamaktadır (ACI 408R, 2003). Donatı çubuğunun uzunluğu boyunca bir kesitinden diğer kesitine değişen kuvvet veya gerilmelerin var olması sebebiyle aderans tüm kesit boyunca sağlanması gerekmektedir (Wight ve Macgregor, 2011).

Donatıda oluşan çekme kuvvetinin karşılanması için donatının beton içine gömülme miktarı en az l_b kadar veya daha büyük olması gerekmekte böylelikle kiriş gibi betonarme elemanların sıyrılma göçmesi olmadan eğilme veya kesmeden kaynaklı göçme yapması sağlanmaktadır (Darwin vd., 2016).

Şekil 7'de donatı çubuğuna etki eden gerilmeler ve aderans gerilmesi gösterilmektedir.



Şekil 7. Donatı çubuğuna paralel etki eden kuvvetler ve aderans gerilmesi

Kaynak: Wight ve Macgregor (2011, s. 368)'dan düzenlenerek

Donatı çubuğunun bir ucunda oluşan kuvvetin diğer serbest ucunda oluşan kuvvetten daha büyük olması durumunda donatıda oluşan aderans gerilmeleri donatıya paralel kuvvetlerin toplamı ile saptanabilmektedir. Denklem 1'de aderans gerilmesinin formülü;

$$(f_{s2} - f_{s1}) \frac{\pi {d_b}^2}{4} = \mu_{ort} (\pi d_b) l \tag{1}$$

olarak verilmekte ve Denklem 1 ve Şekil 7'de; f_{s1} donatı serbest ucundaki küçük olan gerilmeyi, f_{s2} donatının diğer serbest ucundaki büyük olan gerilmeyi, d_b donatı çapını, μ_{ort} ortalama aderans gerilmesini, T çekme kuvvetinin bileşkesini göstermekte ve $(f_{s2} - f_{s1})$ yerine Δ_{f_s} yazıldığında Denklem 2 elde edilmektedir (Wight ve Macgregor, 2011, s. 367).

$$\mu_{ort} = \frac{\Delta_{f_s} d_b}{4l} \tag{2}$$

Kenetlenme (gömülme boyu) olan l ‘ nin d_x kadar olan küçük bir kesitinde oluşan gerçek aderans gerilmesi ise Denklem 3 ile saptanabilmektedir (Wight ve Macgregor, 2011, s. 367).

$$\frac{df_s}{d_x} = \frac{4\mu}{d_b} \tag{3}$$

Betonun çekme dayanımı kenetlenme boyunu (gömülme boyu) değiştirebilmekte ve bu durum Denklem 4’te görüldüğü üzere aderans gerilmesini etkilemektedir. Ersoy ve Özcebe (2016)’ye göre betonun çekme dayanımını etkilemesi sebebiyle aderans gerilmesini belirlerken deneye bağlı değişken olan C_0 ve C_1 değerleri ile, Denklem 4’teki varsayımlar kabul edilirse Denklem 5’te gösterilen eşitlik elde edilmektedir (s. 723). Burada τ_b aderans gerilmesini, f_{ctd} beton tasarım çekme dayanımını belirtmektedir.

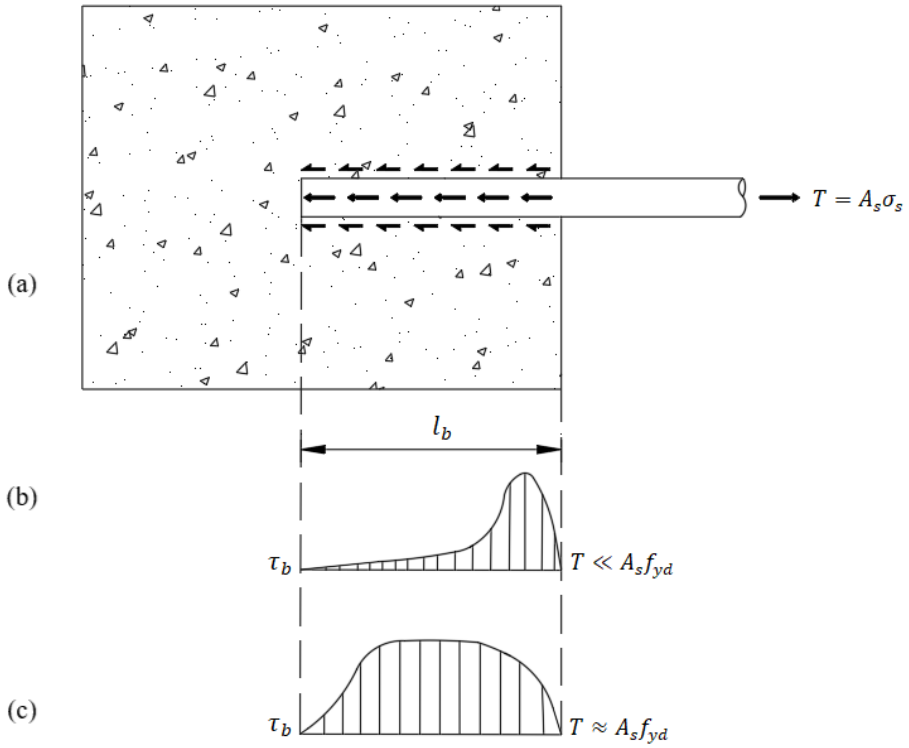
$$\tau_b = C_1 f_{ctd} \ , \ \frac{1}{4C_1} = C_0 \tag{4}$$

Denklem 5‘te elde edilen kenetlenme boyu formülünde, f_{yd} çelik tasarım dayanımını, Ø donatı çapını göstermektedir.

$$l_b = C_0 \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \text{Ø} \tag{5}$$

Betonarme bir elemanda aderans gerilmeleri donatı çubuğu boyunca sabit bir değerde olmayıp donatıya etki eden kuvvete göre değişmektedir. Şekil 8 (a)’da donatıya etki eden çekme kuvveti ve buna zıt yönde gerçekleşen aderans gerilmeleri, Şekil 8 (b)’de donatı da akma dayanımının altındaki gerilmelere neden olan kuvvetin uygulanması ile oluşan aderans gerilmeleri ve Şekil 8 (c)’de donatıda yaklaşık akma dayanımını oluşturacak kadar kuvvetin uygulanması durumunda gerçekleşen aderans gerilmeleri

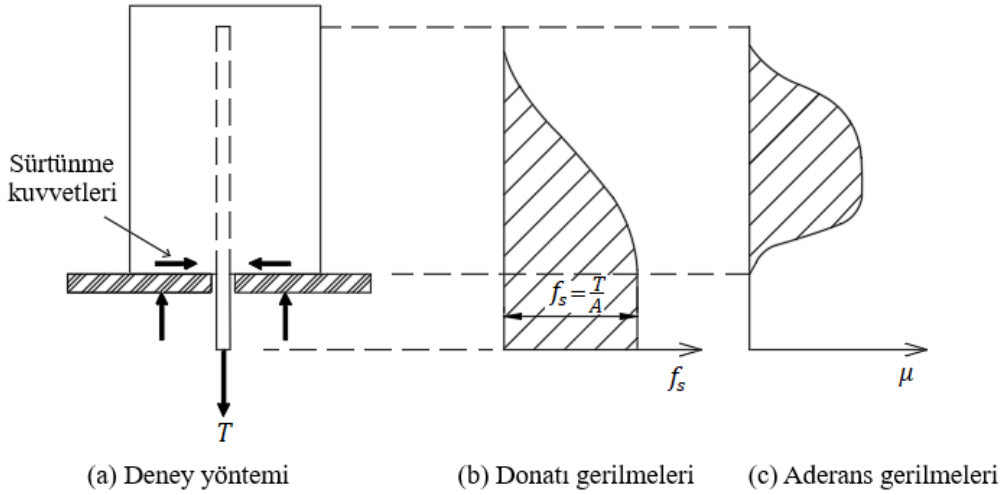
gösterilmektedir. Şekil 8'de σ_s donatı gerilmesini ve A_s donatı çubuğunun yüzey alanını belirtmektedir.



Şekil 8. Donatı çubuğu boyunca oluşan aderans gerilmeleri

Kaynak: Ersoy ve Özcebe (2016, s. 723)

Aderans gerilmelerini belirlemekte kullanılan en kolay yöntemlerden birisi eksenel çekip çıkarma deneyi (*pull-out test*) dir. Bu deney ile küp numunenin merkezine yerleştirilen donatı çubuğu eksenel çekme kuvvetine maruz bırakılmaktadır. Deney süreci boyunca donatı çubuğu çekme kuvveti etkisindeyken beton çekme kuvvetine maruz kalmamakta, sadece basınç etkisinde olmaktadır. Betonun eğilme ve çekmeye maruz kalmamasından dolayı betonarme numune gerçek bir betonarme yapı etkisini yansıtamamakta ve aderans gerilmelerini belirlemede yetersiz kalabilmektedir. Çekip çıkarma deneyinde betonda çatlama oluşmamasından dolayı giriş-çıkış aderans gerilmeleri (kesme kuvvetinden kaynaklanan) oluşmamakta dolayısıyla gerçek bir kiriş aderans dayanımını belirlemede bu deney yetersiz kalmaktadır (Wight ve Macgregor, 2011). Şekil 9'da çekip çıkarma deney düzeneği ve donatıya uygulanan kuvvet T ile oluşan çekme ve aderans gerilmeleri gösterilmektedir.

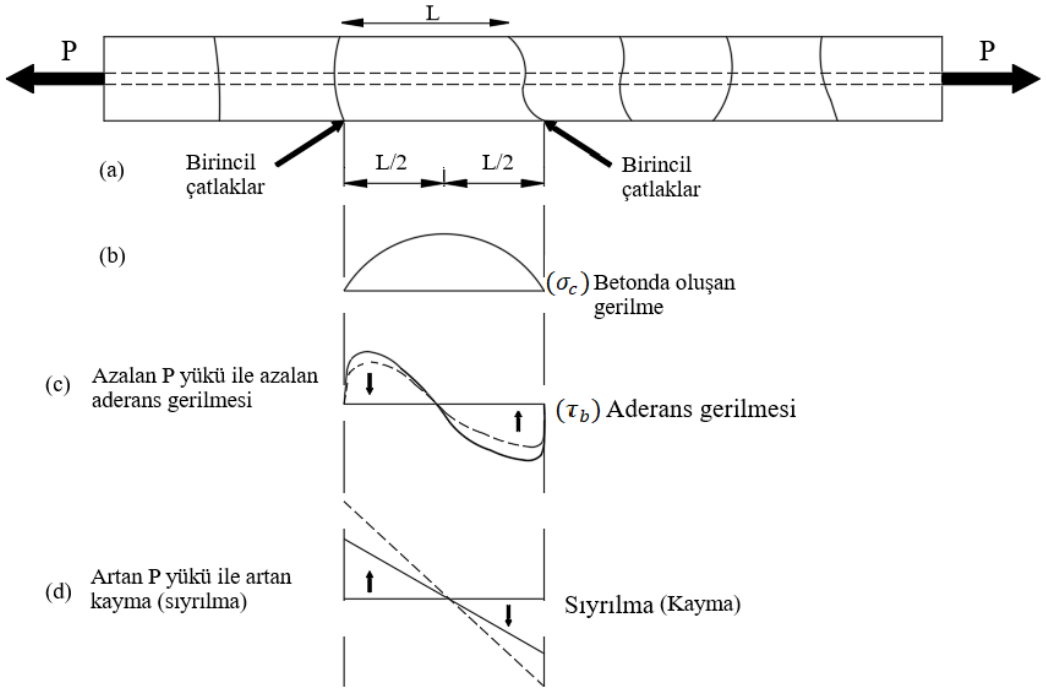


Şekil 9. Çekip çıkarma deneyinde donatıda oluşan çekme ve aderans gerilmeleri

Kaynak: Wight ve Macgregor (2011, s. 371)

Betonarme elemanlar yüklemeye maruz kaldıklarında şekil değiştirebilmekte ve betonun çekmeye karşı dayanımının düşük olması sebebiyle betonda çatlaklar oluşabilmektedir. Şekil 10 (a)'da eksenel yüklü tek donatı içeren betonarme prizma elemanı verilmektedir. Eksenel çekme kuvveti P'ye maruz kalan ve gerilme taşıyan donatı, bu gerilmelerin bir kısmını çatlaklar arasında Şekil 10 (b)'deki gibi betona aktarmaktadır. Çatlamanın oluştuğu yerde artan donatı gerilmeleri, çatlağın bitip betonun sürekli olduğu yerde azalmaktadır.

Yüklemenin azalması ile prizmada oluşan aderans gerilmeleri de azalacağından Şekil 10 (c)'deki aderans gerilmesi değişimi gözlenecektir. Yüklemenin artırılması durumunda ise beton ve donatı arasındaki aderans gerilmesi artacağı ve bu artışında kayma (sıyrılma) miktarını artıracağı beklenmektedir (Şekil 10 (d)). Ayrıca çatlakların oluştuğu noktalarda donatı ile beton arasında temas oluşmadığı için aderans gerilmeleri de sıfır olmaktadır.



Şekil 10. Eksenel yüklü betonarme prizmada oluşan çatlaklar ve gerilme değişimleri

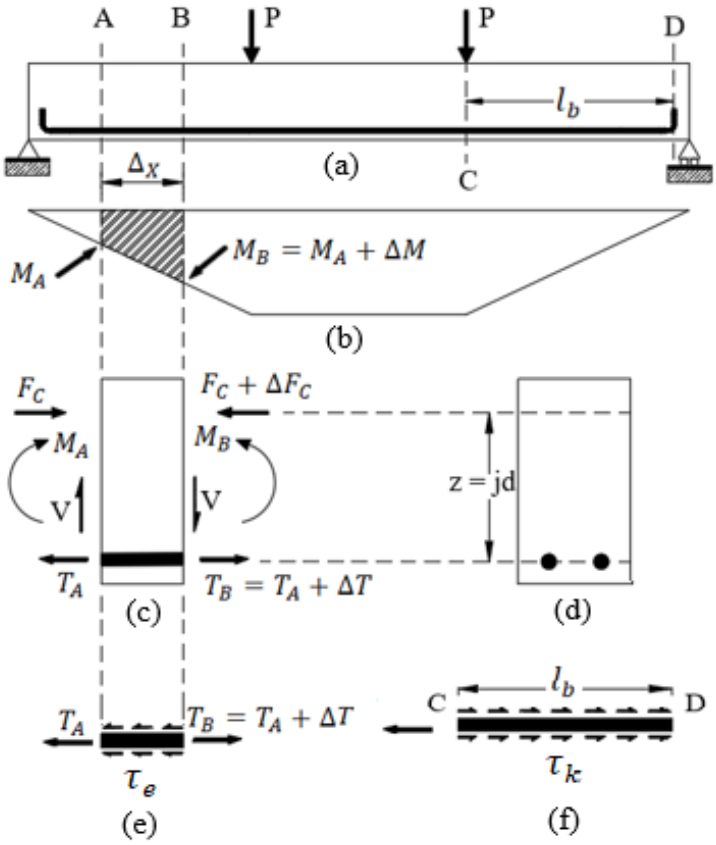
Kaynak: Wu ve Gilbert (2009, s. 2382)'den değiştirilerek

Çekmeye maruz kalan betonarme elemanlarda çatlaklar oluşabilmekte ve bunlar birincil ve ikincil çatlaklar olmak üzere; birincil çatlaklar betonarme elemanın dış yüzeylerinde gözle görülebilir ve çatlak genişlikleri fazla olmaktayken ikincil çatlaklar ise donatı yüzeyine yakın daha dar genişlikte ve küçük olmakta ayrıca dış yüzeyden gözle tespit edilememektedir (Darwin vd., 1992).

3.1.2. Eğilme Aderansı

Betonarme kiriş benzeri yapılar statik ve dinamik yükler altında eğilme momenti oluşturarak donatıda çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Bu durumda beton büzülerek donatılara sürtünme kuvveti oluşturmaktadır.

Eğilme etkisinde olan bir betonarme eleman, beton ve donatıyı birlikte hem çekme hem de eğilme etkisinde bırakmakta ve burada oluşan aderans betonarme elemandaki çatlama şeklini belirlemekte olup bu tür aderansa eğilme aderansı denilmektedir (Sümer, 2009). Eğilme aderansı, yükleme altında olan bir betonarme elemanın uzunluğu boyunca eğilme momentindeki değişiklikler olduğunda gerçekleşmektedir (Siempu ve Pancharathi, 2018).



Şekil 11. Dört noktalı eğilme etkisi altında olan kiriş (a) Kiriş (b) Moment grafiği ve denge denklemi (c) Kirişte oluşan iç kuvvetler ve denge denklemleri (d) Kiriş kesiti (e) Eğilme aderansı (f) Kenetlenme aderansı

Kaynak: Arslan (2017, s. 4)'dan düzenlenerek

Şekil 11'de dört noktalı eğilme durumunda olan bir kirişin iç kuvvetler diyagramları ve denge denklemleri verilmekte olup, Δ_x kirişin boyuna uzunluğunun kısa bir kısmını, M kirişte oluşan momenti, F_c basınç kuvvetlerinin bileşkesini, j moment kolu sayısını, d etkili derinliği (çekme donatısı ağırlık merkezinin en uç basınç kenarına olan mesafesi), T çekme kuvvetlerinin bileşkesini, z moment kolunu (iç kuvvetler arası mesafe), τ_e eğilmede ortalama aderans gerilmesini ve τ_k kenetlenme aderans gerilmesinin belirtmektedir.

Donatıya paralel oluşan kuvvetler denge koşulu gereği birbirine eşit olması gerekmektedir. Donatının belirli bir kısmının (Δ_x) çevresinde oluşan aderans gerilmelerinin toplamı, donatı çubuğunun iki zıt uç kısımlarında oluşan çekme kuvvetlerinin farkına eşit olması gerekmektedir (Karataş, 2007). Donatı çubuğunda zıt

uçlarda oluşan çekme kuvvetlerinin farkı olan ΔT ve donatı çubuğunun çevre uzunluğu olan u ile Denklem 6'da ki denge denklemi kurulmaktadır (Arslan, 2017, s. 4).

$$\tau_e(u)\,\Delta_x = \Delta T = \frac{\Delta M}{Z} \tag{6}$$

Bir kesitteki enine kesme kuvveti olan V değeri için Denklem 7 oluşturulursa,

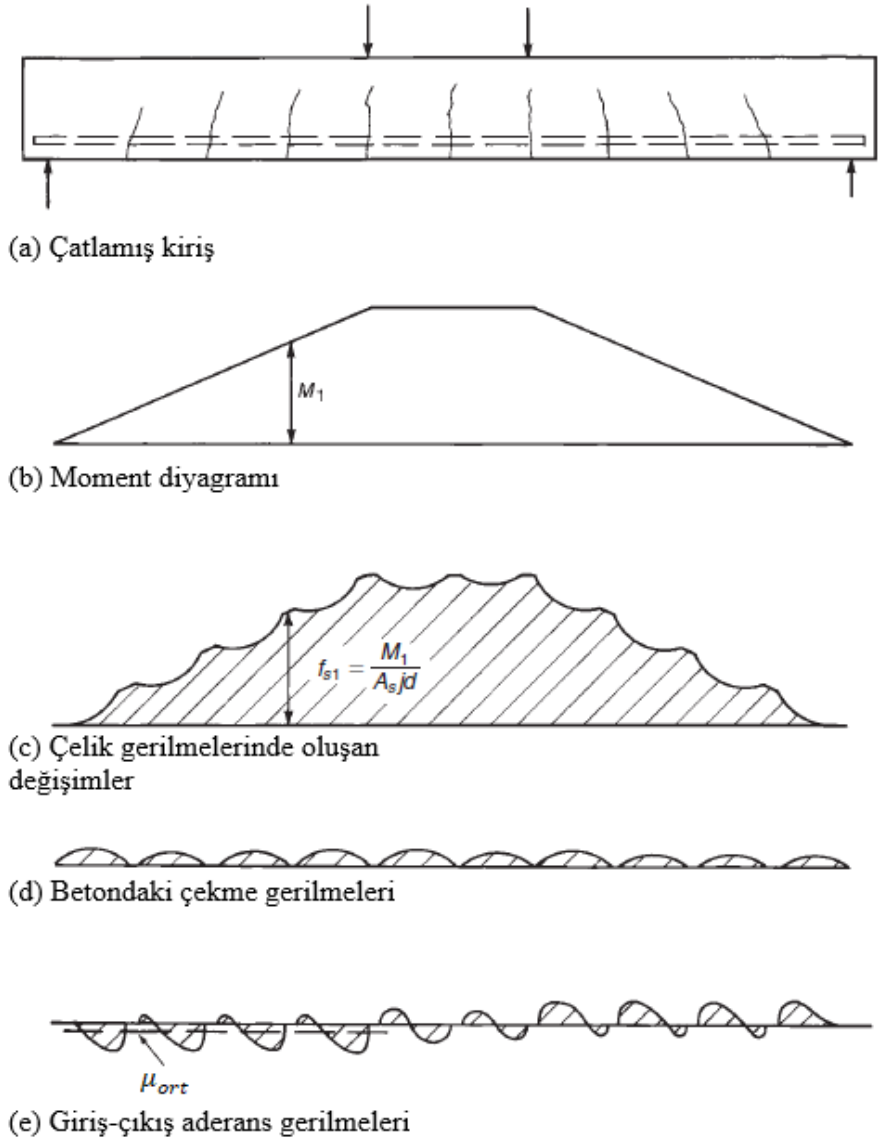
$$\mathrm{V} = \frac{\Delta M}{\Delta x} \tag{7}$$

bu değer denklem 8'de yerine konulduğunda, eğilmede ortalama aderans gerilmesi elde edilmektedir (Arslan, 2017, s.4).

$$\tau_e = \frac{V}{u.z} \tag{8}$$

Dört noktalı eğilme yöntemi ile yüklenmiş ve çatlamış bir kirişte oluşan gerilmeler ve aderans gerilmesi Şekil 12'de gösterildiği gibi olmaktadır. Çelik gerilmelerine çatlak noktalarında betonda kısmen direnerek bunun sonucunda çelik gerilmelerinde oluşan gerilme değişimi 12 (c)'de ve betonda oluşan çekme gerilmelerinde değişim Şekil 12 (d)'de gösterilmektedir (Wight ve Macgregor, 2011). Bu değişmelerde aderans gerilmelerinin Şekil 12 (e)'deki gibi oluşmasına yol açmaktadır.

Momentin sabit değerde olduğu iki yük hücresi arasında kesme kuvveti sıfır olduğundan bu bölgedeki giriş-çıkış şeklinde gerçekleşen ortalama aderans gerilmesi μ_{ort} 'da sıfır olmakta fakat yük ve mesnet arasında kesme kuvveti var olduğu için bu bölgedeki giriş-çıkış aderans gerilmeleri alanları toplamı sıfır olmamakta ve Şekil 12 (e)'de gösterildiği üzere μ_{ort} değeri oluşmaktadır (Wight ve Macgregor, 2011, s. 371).



Şekil 12. Eğilme altındaki çatlamış kirişte beton, çelik ve aderans gerilmeleri

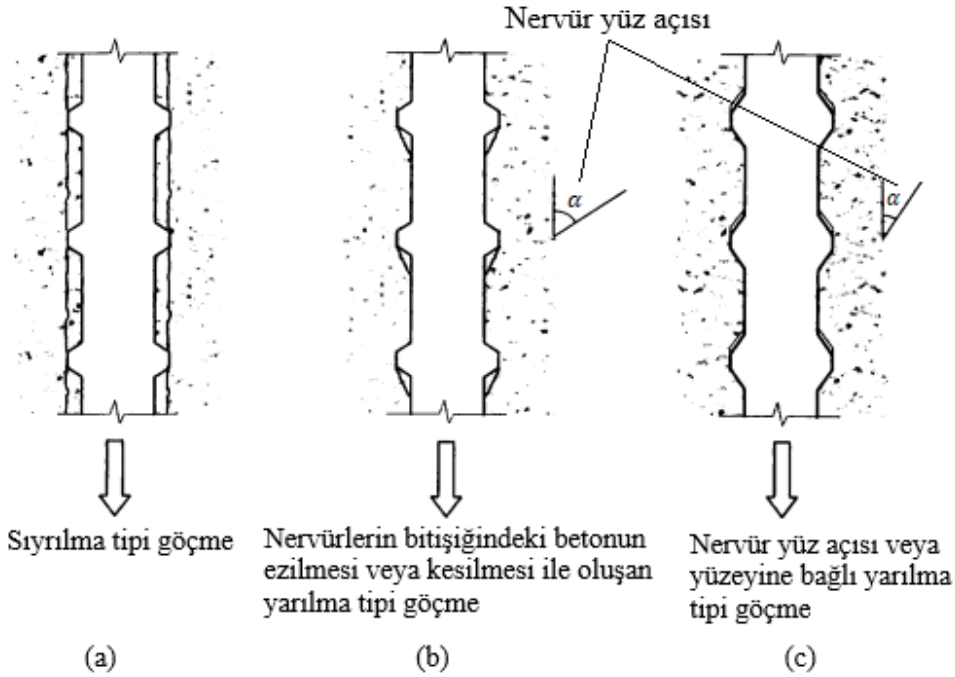
Kaynak: Wight ve Macgregor (2011, s. 371)

3.1.3. Aderans Göçmesi

Betonarme sistemlerde beton ile donatı çubuğu arasındaki aderans göçmesi (kaybı) genellikle iki farklı tipte oluşmaktadır. Bunlardan birisi donatı etrafındaki beton örtünün ayrışması ile oluşan yarılma tipi göçme diğeri ise çelik donatı ile beton ara yüzeyindeki kayma kuvvetinin kaybedilmesi sonrası donatının sıyrılarak betondan çıkması ile oluşan sıyrılma tipi göçmedir (García Taengua, 2013). Sıyrılma veya yarılma tipi göçmeler oluşmadığı ve donatının aktığı göçmeler de aderansın başarılı şekilde sağlandığı görülmektedir. Sıyrılma tipi aderans göçmesi ise Şekil 13'te görüldüğü üzere iki farklı

şekilde oluşabilmektedir. Şekil 13 (a)'da gösterilen sıyrılma tipi göçmede, nervürlerin üzerindeki çizgi hattı boyunca betonun kesilmesi ile donatı sıyrılarak çıkmakta ve bu tür göçme, donatıyı çevreleyen yoğun ikincil donatı (etriye) olması veya donatıyı saran beton örtüsünün kalın olması sebebiyle betonun, donatının nervür dişleri ile ezilmesine karşı mevcut direncinin, aderansın neden olduğu ezici kuvvetleri aşması durumunda gerçekleşmektedir (Fib Bulletin 10, 2000). Bu tip göçmeler donatıyı saran minimum beton tabakasının donatı çapının üç katını geçmesi durumunda gerçekleşmekteyken, donatıyı saran beton tabakanın donatı çapının iki katından küçük olması durumunda betonda yarılma tipi aderans göçmesi oluşmaktadır (Fib Bulletin 10, 2000).

Yarılma tipi aderans göçmesinde yarılma gerçekleştiğinde kenetlenmenin sonucu olarak nervür dişlerinin, nervüre yapışık olan (kenetlenmiş) ezilmiş beton parçacığını kesmesi sonucu oluşan göçme tipi Şekil 13 (b)'de gösterilmektedir (Fib Bulletin 10, 2000). Diğer bir yarılma tipi aderans göçmesi ise nervür yüzeyinin donatı çubuğu ekseni ile yaptığı açının 30° derecenin altında olmasından veya donatı nervür yüzeyinin normal hadde tufalı ile kaplı donatı nervüründen daha az pürüzlü olmasından kaynaklanabilen göçme tipi Şekil 13 (c)'de gösterilmektedir (Fib Bulletin 10, 2000).

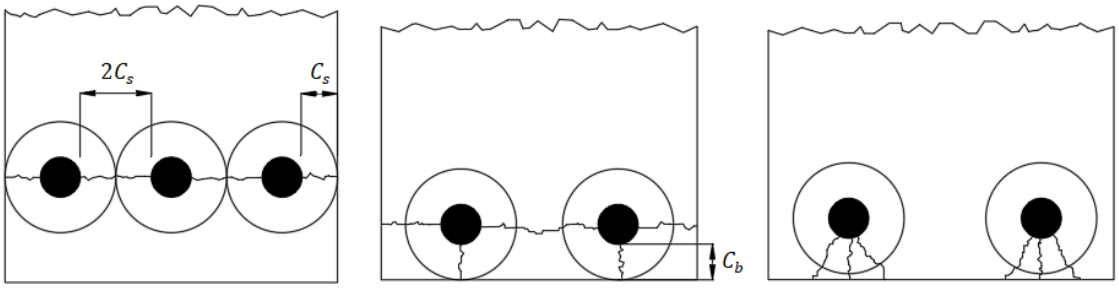


Şekil 13. Aderans göçmesi tipleri

Kaynak: Fib Bulletin 10 (2000, s. 247)

Donatı ve beton arasında oluşan aderans sonucu gerçekleşen radyal bileşen (p) tıpkı iç çapı donatı çapına eşit olan ve içten hidrostatik basınç uygulanan kalın et kalınlığına sahip bir silindire (boruya) benzetilebilmektedir (Orangun vd., 1977).

Buna göre donatı çubuğunun etrafında oluşturduğu aderans kuvvetlerinin, belirli bir halka boyunca (çapta) betona etki ettiği düşünülmekte ve bu halkanın, beton örtüsünün veya donatılar arası mesafelerin birbirleriyle olan uzaklık ilişkisi de yarılma tipi aderans göçmesinin belirleyicisi olabilmektedir. Şekil 14'te gösterilen, donatı çubuğunun betonun alt yüzüne olan net uzaklığı C_b veya art arda olan iki donatı çubuğu arası net mesafenin yarısı olan C_s'den küçük olan değer oluşan bu halkanın kalınlığını vermektedir (Orangun vd., 1977).



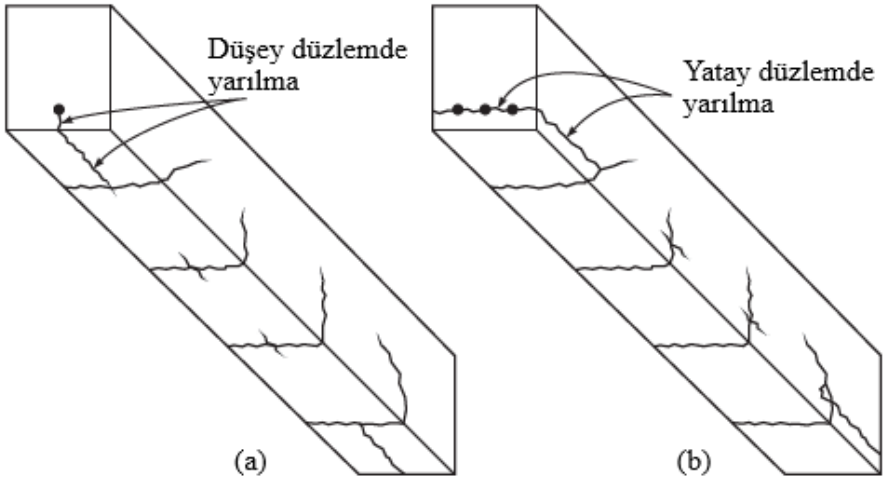
(a) $C_b > C_s$ Yan yüzde yarılma oluşumu (b) $C_s > C_b$ Yan ve alt yüzde yarılma oluşumu (c) $C_s \gg C_b$ V tipi yarılma oluşumu

Şekil 14. Betonarme kesitte yarılma tiplerinin oluşumu

Kaynak: Özden ve Akpınar (2003, s. 86)'dan düzenlenerek

Betonarme elemanlarda yarılma tipi aderans göçmesi Şekil 15 (a)'da gösterildiği üzere düşey düzlemde veya Şekil 15 (b)'de olduğu üzere yatay düzlemde oluşabilmektedir. Betonarme elemanın yatay düzleminde oluşan yarılmalar çoğunlukla diyagonal çatlaklarda oluşmaya başlamakta ve genellikle kesme ile aderans göçmesi arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir. (Darwin vd., 2016). Sıyrılma için gereken kuvvet aşıldığı durumda ya da çatlakların devam etmesiyle yarılma ilerleyerek donatının ankrajlanmadığı (kenetlenmenin sağlanmadığı) noktalara ulaşarak tam aderans göçmesi gerçekleşmekte olup betonarme kirişte donatının betondan sıyrılması durumunda ise ani çökme meydana gelebilmektedir (Darwin vd., 2016). Tepfers (1979) kullandığı çekip çıkarma numunelerinde beton örtüsünde çatlak oluşması durumunda maksimum aderans gerilmesine ulaşılmadığını aksine yüklemenin artırılarak devam edebileceğini fakat deformasyonun da buna bağlı olarak devam edebileceğini aktarmıştır. Böylelikle çatlak

oluşumu ilerlediği sürece deformasyon artabilmekte ve betonarme eleman için dökülmeler dolayısıyla donatıda korozyon veya tamamen beton örtüsü (pas payı) kaybı gibi durumlar gerçekleşebilmektedir.

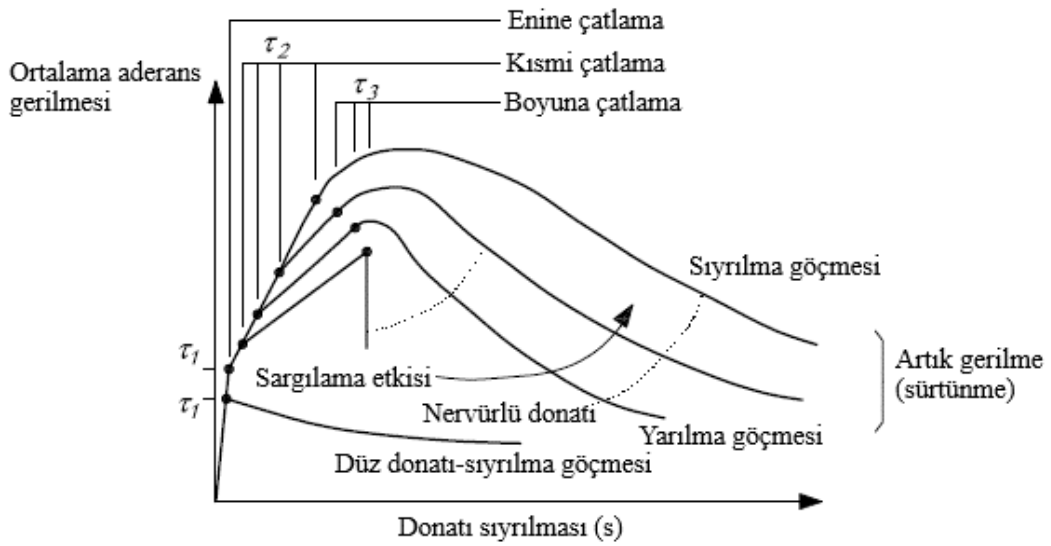


Şekil 15. Donatı çubuğu boyunca betonda oluşan yarılmalar

Kaynak: Darwin vd. (2016, s. 184)

Beton ile donatı arasındaki aderans gerilmeleri; enine çatlamada oluşan aderans gerilmesi τ_1, kısmi çatlama aşamasında oluşan aderans gerilmesi τ_2, boyuna çatlamada oluşan aderans gerilmesi τ_3 ve sıyrılma s, ilişkisi Şekil 16'da gösterilmektedir.

Şekil 16'da görüldüğü üzere sargılamanın ve donatı yüzey geometrisinin aderans gerilmesi üzerindeki olumlu etkileri görülmekte ayrıca çatlak aşamalarının hangi seviyelerde gerçekleştiği ve farklı tip çatlamaların (enine, kısmi ve boyuna) denk geldiği aderans gerilmesi-sıyrılma noktaları gösterilmektedir.



Şekil 16. Çelik donatı çubuğu ile beton arasındaki aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

Kaynak: Fib Bulletin 10 (aktaran Başaran, 2019, s. 16)'dan düzenlenerek

3.2. Aderans Dayanımını Etkileyen Unsurlar

Yapılan araştırmalar ile elde edilen bulgular sonucunda aderans dayanımını etkileyen faktörler genel olarak betonun çekme ve basınç dayanımı ile doğrudan ilişkili olmak üzere birçok faktör aderans dayanımını etkilemektedir. Burada aderans dayanımını etkileyen faktörlere değinilmektedir.

3.2.1. Agrega Özellikleri ve Beton Katkısı

Yapılan araştırmalar sonucunda agrega özelliklerinin aderans dayanımını belirlemede önemli bir faktör olduğu görülmektedir. Maksimum agrega boyutunun aderans dayanımı üzerine etkilerini araştıran Iqbal vd. (2018) yaptıkları çalışma sonucunda maksimum kaba agrega boyutunun yüksek olduğu numuneler arasında aderans dayanımında önemli bir değişiklik gözlemlememiş fakat maksimum agrega boyutunun 10 mm altında düşmesiyle beton ile donatı arasındaki aderans dayanımında önemli bir düşüş kaydetmişlerdir.

Yapılan bir çalışmada nervürlü donatı ile geri kazanımlı agregaya sahip beton ile normal agregalı betonun yüksek sıcaklıklarda aderans dayanımı karşılaştırılmış ve çalışma

sonuçlarında ısı artışıyla aderansın her iki beton türünde de azaldığı fakat geri kazanımlı agregalı betonda bu düşüşün daha az olduğu tespit edilmiştir (Yusuf vd., 2020).

Gerçekleştirilen bir diğer çalışmada kumla kaplanmış atık PP içerikli plastik kaba agregaya sahip beton ile düz ve nervürlü donatı arasındaki aderans-sıyrılma etkisi çekip çıkarma deneyi ile incelenmiş ve sonuçlarda düz ve nervürlü donatılı numunelerde aderans dayanımının, deneyde kullanılan donatı çaplarındaki artışla beraber arttığı tespit edilmiş ayrıca nervürlü donatılarda aderans dayanımının düz donatıya sahip numunelere kıyasla daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Gandjar vd., 2018).

Yüksek sıcaklıkta mineral katkılı beton ile nervürlü donatı arasındaki aderans dayanımının etkilerini araştıran Coşkun vd. (2007) yaptıkları çalışma sonucunda yüksek sıcaklıkta silis dumanı katkılı betonların aderans dayanımının uçucu kül normal betona göre daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir.

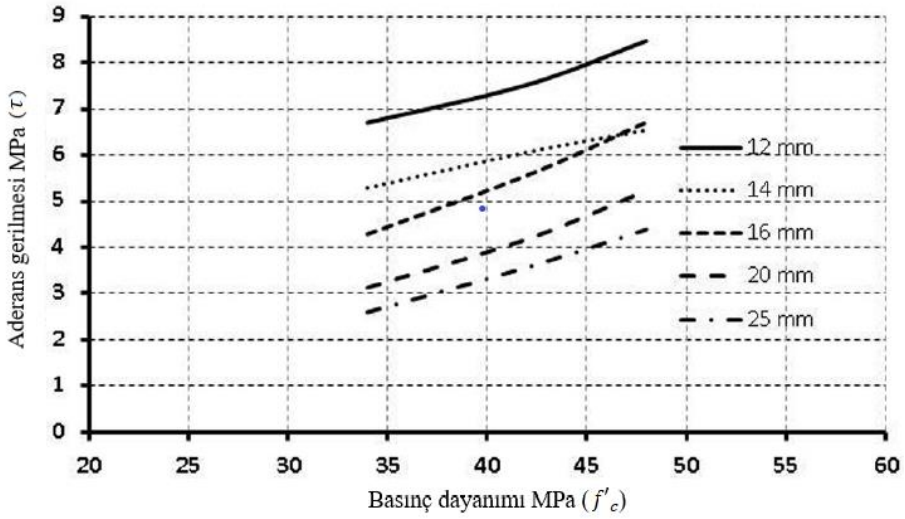
3.2.2. Beton Çekme Dayanımı

Beton ve donatı arasında oluşan radyal aderans bileşeni betona dairesel olarak her yönden etki uyguladığı için bu noktada betonun çekme dayanımı aderansı etkileyen önemli bir etken olmaktadır (Xu vd., 2018). Özellikle nervürlü donatıya sahip betonarme elemanlarda kırılma durumu yarılma ile gerçekleşeceği için çekme dayanımının etkisi önemli olmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2016). Krstulovic-Opara vd. (1994) yaptıkları çalışmada lif katkılı beton numunelerinde çekip çıkarma deneyi gerçekleştirmiş, deney sonucunda ise betondaki artan çekme ve tokluk dayanımı ile çekip çıkarma yükü ve donatıda maksimum yüke denk gelen sıyrılma miktarında artış gözlemlemişlerdir.

3.2.3. Beton Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımının aderans dayanımına etkisi hakkında yapılan çalışmalarda, basınç dayanımında artışın aderans dayanımında da artışa yol açtığı görülmektedir. Al-Shannag ve Charif (2017) yaptıkları çalışmada kütlece iki farklı (350 ve 500 kg/m^3) çimento oranına sahip karışımların ortalama basınç (34 ve 48 MPa) ve aderans dayanımı değerlerini ele alarak aderans gerilmesi – basınç dayanımı grafiğini elde etmişlerdir. Yapılan çalışmada farklı çaplarda ve 150 mm uzunluğunda kenetlenme boyuna sahip

deformeli donatıların hafif agregalı beton içerisine gömülerek elde edilmesiyle oluşan betonarme numuneler deneysel olarak incelenmiş ve çekip çıkarma deneyi sonucu basınç dayanımı arttığında aderans dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 17) (Al-Shannag ve Charif, 2017).



Şekil 17. 150 mm kenetlenme boyunda aderans gerilmesi ve basınç dayanımı ilişkisi

Kaynak: Al-Shannag ve Charif (2017, s. 6)

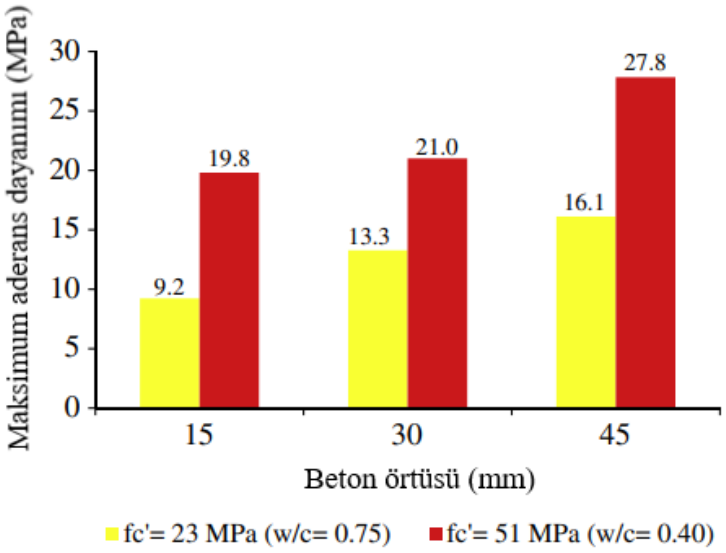
3.2.4. Pasif Sargılama

Beton örtüsü ve enine donatının sarma etkisinin yol açtığı bu etki betonarme elemanda aderans gerilmelerinin başlamasıyla birlikte sürekli olarak devam etmektedir (García Taengua, 2013).

3.2.4.1. Beton örtüsünün kalınlığı

İçten hidrostatik basınçlı boru analojisi düşünüldüğünde, nervürlü donatının etkisiyle oluşan radyal aderans bileşenleri, betona halka şeklinde tüm yönlerde etki etmekte ve bu da donatıyı saran beton tabakanın kalınlığının (pas payı) önemini ortaya çıkarmaktadır. Bu konuda yapılan deneysel araştırmalarda da beton örtüsünün aderans dayanımını etkilediği görülmektedir. Yalciner vd. (2012) yaptıkları çalışmada beton örtüsü, beton dayanımı ve korozyon seviyesinin, 14 mm nervürlü donatı ile beton arasındaki aderans dayanımına etkilerini çekip çıkarma deneyi ile incelemiş ve korozyona uğramamış

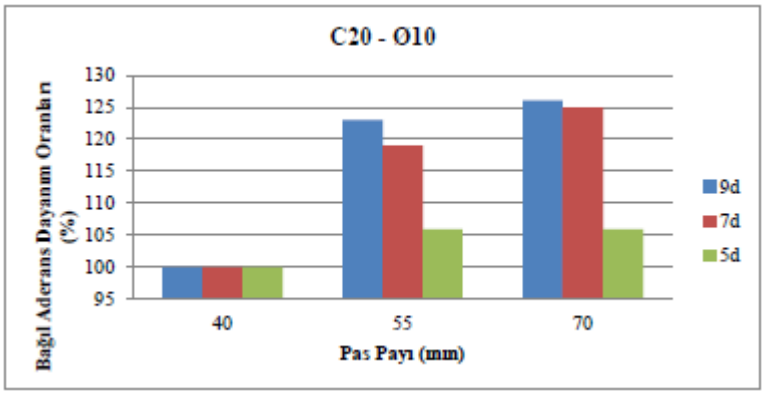
donatıya sahip numunelerde beton örtüsü ve dayanımı arttıkça maksimum aderans dayanımının da arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 18).



Şekil 18. Maksimum aderans dayanımı ve beton örtüsü ilişkisi

Kaynak: Yalciner vd. (2012, s. 648)

Arel (2012) yaptığı çalışmanın bir kısmında incelediği 10 mm nervürlü donatıya sahip ve 20 MPa dayanıma sahip küp beton numunelerine çekip çıkarma deneyi uygulamıştır. Deneyde 40, 55 ve 70 mm pas payı ve farklı kenetlenme boylarına sahip küp numuneler kullanılmış ve 40 mm pas payına sahip numuneye göre bağıl aderans dayanımları Şekil 19'da gösterilmekte olup bu sonuçlara göre beton örtüsü arttıkça aderans dayanımının arttığı gözlemlenmektedir (Arel, 2012).



Şekil 19. Beton örtüsü ve bağıl aderans dayanımı ilişkisi

Kaynak: Arel (2012, s. 177)

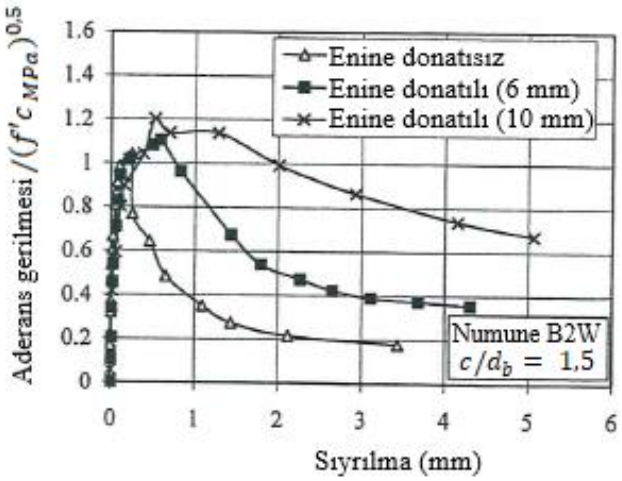
3.2.4.2. Sargılama donatısı

Yapılan araştırmalar sonucunda enine donatının aderans dayanımı üzerinde olumlu etkileri olduğu ve yapıyı daha sünek bir hale getirdiği görülmektedir.

Orangun vd. (1977) beton ve deformeli donatı arasındaki aderans dayanımı için detaylı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, bindirmeli ekleri olan kirişlerin deney sonuçlarından elde edilen verilere dayanarak kenetlenme boyu ve bindirme boyu için bir denklem ileri sürülmüştür. Araştırma sonucunda enine donatıların kullanılmasının beton ve donatı arasındaki aderansı geliştirdiği görülmüştür. Elde edilen denklemlere göre donatı etrafındaki beton örtüsü arttıkça ve enine donatı miktarı arttıkça kenetlenme boyunun azalabileceği aktarılmıştır.

Hem beton örtüsü hem de sargılama donatısının analiz edildiği bir başka çalışmada ise yapılan çekip çıkarma deneyi sonuçlarında sargılama donatısının maksimum aderans dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir (Plizzari vd., 1996).

Yapılan başka bir deneysel çalışmada beton örtüsü ve enine donatı etkisinin bölgesel aderans dayanımı üzerindeki rolünü belirlemek için bindirmeli eklere sahip kirişler üzerinde deneysel olarak çalışılmış olup enine donatı sargılı kirişlerde enine donatısı olmayan kirişlere göre pik aderans gerilmesi sonrasında sıyrılmaya karşılık gelen aderans dayanımında artış olduğu görülmüştür (Harajli vd., 2004). Çalışmada enine donatılı numunelerin daha sünek bir yapıda olduğu tespit edilmiş ayrıca çelik liflerin aderans dayanımına olumlu etkileri olduğu görülmüştür (Harajli vd., 2004). Şekil 20'de farklı çaplarda enine donatı etkisinin, enine donatı içermeyen numuneye göre aderans dayanımındaki değişiklikler gösterilmektedir (Harajli vd., 2004).



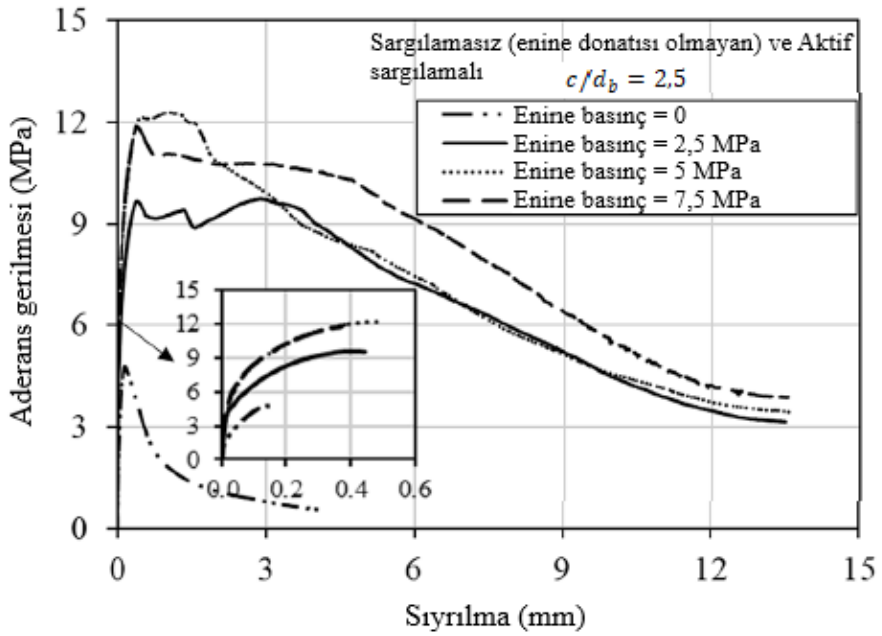
Şekil 20. Enine donatı varlığının aderans dayanımı üzerindeki etkisi

Kaynak: Harajli vd. (2004, s. 598)

3.2.5. Aktif Sargılama

Betonarme elemana uygulanan dış kuvvetlerin oluşturduğu yanal kuvvetler sonucu betona basınç uygulanmakta ve mesnet veya kolon-kiriş birleşimi gibi bölgelerde görülebilmektedir (García Taengua, 2013). Aktif sargılama, sistemdeki dış yüklere bağlı olduğundan aderansın sağlandığı bölgede çatlak oluşumlarından etkilenmemekte (pasif sargılamaya bağlı bir değişken olmadığından) beton örtüsünün ayrışmaya (yarılmaya) başladığı durumlarda etkili olup aderans dayanımına olumlu bir katkı sağlayabilmektedir (García Taengua, 2013).

Assaad vd. (2021) yaptıkları çalışmada farklı kuvvetlerde uyguladıkları yanal (enine) basınç ile aktif sargılamayı ve farklı türlerde pasif sargılamayı sağladıkları çekip çıkarma numunelerini deneysel olarak incelemiş ve deney sonuçlarında pasif sargılama içermeyen ama yanal basınç uygulanan numunelerin yanal basınç kuvveti uygulanmayan numunelere göre aderans dayanımının daha fazla olduğunu ayrıca pik aderans gerilmesi sonrasında sıyrılmaya karşılık gelen aderans dayanımında da iyileşme olduğunu görmüşlerdir (Şekil 21).



Şekil 21. Aktif sargılamalı pasif sargılama içermeyen numunelerde bölgesel aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi

Kaynak: Assaad vd. (2021, s. 7)

Aktif sargılamanın araştırıldığı bir çalışmada Robins ve Standish (1984) hafif agregalı beton ile gerçekleştirilen yarım-kiriş ve çekip çıkarma deneyleri sonucunda yanal basıncın donatı-beton aderans dayanımı üzerindeki etkilerini tespit etmiş ve sonuçlarda deformeli ve düz donatıların ikisi için de aderans dayanımında bir artış olduğunu saptamışlardır. Yapılan çalışmada 8 ve 12 mm çaplarında ve düz yapıya sahip (deformesiz) olan donatılarda beton basınç dayanımına yakın değerlerde yanal basınç uygulandığında çekip çıkarma yükünde ciddi bir artış olduğu tespit edilmiştir (Robins ve Standish, 1984). Çekip çıkarma deneyindeki deformeli donatıya sahip numunelere, beton basınç dayanımının 0-0,3 katlarında yanal basınç uygulanmasıyla göçme modu beton örtüdeki ezilme veya yarılmadan kaynaklanmış ayrıca beton basınç dayanımının 0,3 katını aşan değerlerde yanal basınç uygulanmasıyla aderans dayanımında daha fazla bir artış görülmemiş, betonda yarılma ve sıyrılma tipi göçme oluşmamıştır (Robins ve Standish, 1984).

Dolayısıyla düz donatılı numunelerde yanal basınç kuvveti aderans dayanımını artırırken deformeli donatıya sahip numunelerde belirli bir değerden sonra (basınç dayanımın 0,3 katından daha büyük) uygulanan yanal basınç kuvveti betondaki

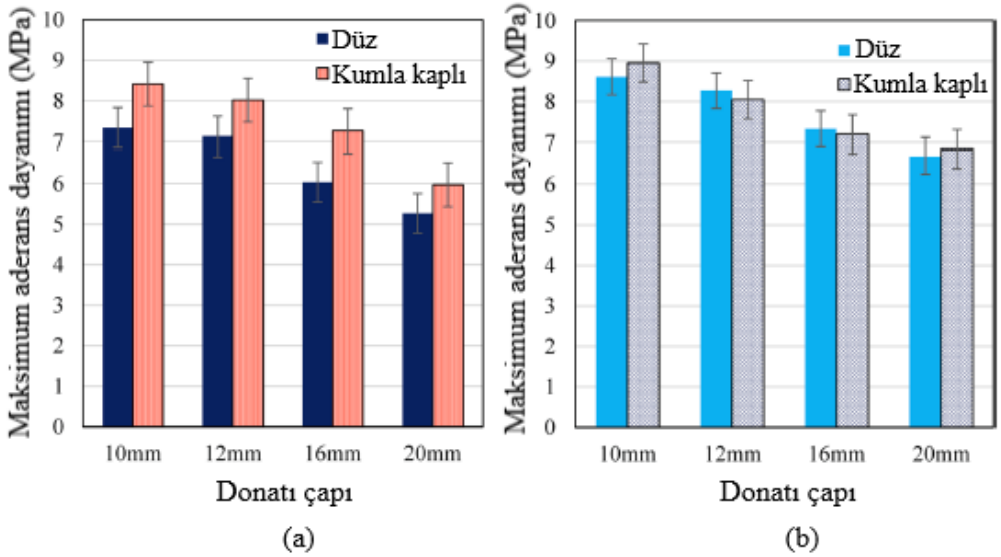
nervürlerden kaynaklanan yarılmayı önlemekte olduğu görülmüştür (García Taengua, 2013).

3.2.6. Donatı Çeliğinin Sınıfı

Donatı çelik çubuğunun akma dayanımı betona gömülen donatı boyu uzunluğunca aderans dayanımı üzerinde etki edebilmektedir (Ersoy ve Özcebe, 2016). Seis (2017) yaptığı çalışmada bazalt lifli donatının kopma dayanımının S420 çelik donatısının akma ve kopma dayanımına göre daha fazla olduğunu tespit etmiş ayrıca yaptığı mafsallı kiriş deneyi ile nervürlü bazalt lifli donatının betonla arasındaki aderans dayanımının, S420 sınıfına sahip nervürlü çelik donatıya kıyasla daha fazla olduğunu saptamıştır.

3.2.7. Donatı Çubuğunun Yüzey Geometrisi

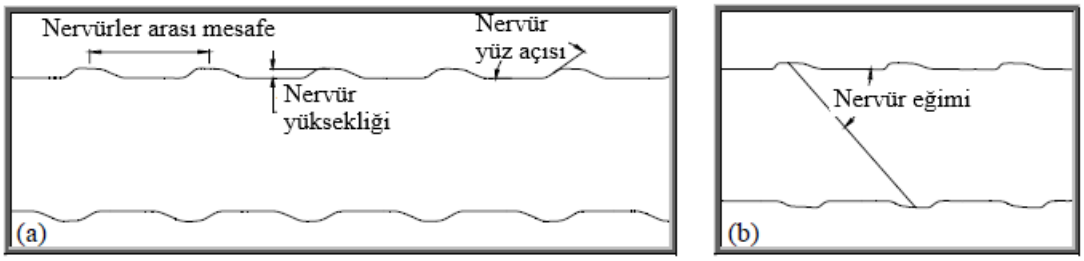
Yapılan araştırma sonuçlarında donatı çubuğunun düz veya deformeli olması, nervür tipi, yüksekliği ve eğimi, nervür dişleri arasındaki mesafe, nervür yüz açısı gibi faktörler çubuğun yüzey geometrisinin aderans dayanımına etkileri hususunda başlıca araştırılan faktörler olmaktadır. Yüksek basınç dayanımına (yüksek başarımlı) sahip betonlar ile nervürlü donatı çubukları arasındaki aderans dayanımı, düz yüzeyli olan donatı çubuklarına göre daha fazla olduğu görülmekte ve kenetlenme boyunun da buna bağlı olarak azaltılabileceği görülmektedir (Durmuş vd., 2006). Islam vd. (2020) kenetlenme boyunun donatı çapına oranı 3 olan numuneler üzerinde gerçekleştirmiş oldukları itip-çıkarma deneyi aracılığıyla farklı boyutlardaki düz yüzeyli donatı çubukları ile kumla kaplanmış donatı çubuklarının maksimum aderans dayanımlarını kıyaslamış ve düşük olan beton dayanımında (40 Mpa) kumla kaplı donatıların düz donatıya göre daha fazla aderans dayanımı sağladığını görmüş, daha yüksek basınç dayanımında (50Mpa) ise kumla kaplanan donatı ile düz donatılar arasında değişken maksimum aderans dayanımları olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 22).



Şekil 22. Donatı yüzeyinin aderans dayanımı ile ilişkisi; beton basınç dayanımları (a) 40 MPa (b) 50 MPa; l_b / Ø oranı 3 olan

Kaynak: Islam vd. (2020, s. 2376)

Lorrain vd. (2010) yaptıkları deneysel çalışmada farklı üreticilere sahip sabit çap ve akma dayanımına sahip ve yüzeyi farklı tiplerde deformeli (nervürlü) olan donatıların aderans dayanımına etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada üç boyutlu lazer tarayıcı ile laboratuvar ortamında farklı yüzey geometrisine sahip donatıların nervür dişleri arası mesafe, nervür yüz açısı (nervürün donatı ekseni ile yaptığı açı), nervür yüksekliği ile eğimi ölçülmüş ve çekip çıkarma deneyi için hazır duruma getirilmiştir. Şekil 23'te nervürler arası mesafe, nervür yüz açısı, nervür yüksekliği ve eğimi gösterilmektedir (Lorrain vd., 2010, s. 7).



Şekil 23. Donatı çubuğu yüzeyindeki geometrik ifadelerin şematik gösterimi

Kaynak: Lorrain vd. (2010, s. 7)

Yapılan çekip çıkarma deneyi sonuçlarında nervür yüz açısının ve nervür eğiminin aderans dayanımında önemli bir değişikliğe yol açmadığı fakat nervür yüksekliğinin

artması ile aderans dayanımında doğrusal bir artış gözlemlendiği ve yapılan üssel ayarlama ile nervürler arası mesafenin artması ile bir donatı hariç doğrusala yakın bir eğride aderans dayanımında artış görülmektedir. Ayrıca bir donatı türünde, donatı çubuğunun bir yüzeyindeki nervürlerin diğer yüzeyindeki nervürlere olan eğimlerinin farklı olmasının, donatı yüzeyindeki ardışık nervür dişleri arasındaki mesafelerin farklı olmasına yol açması sebebiyle aderans dayanımının düştüğü görülmektedir.

3.2.8. Donatı Çapı

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan donatıların çap uzunluklarının aderans dayanımını etkilediği ve önemli bir faktör olduğu görülmektedir.

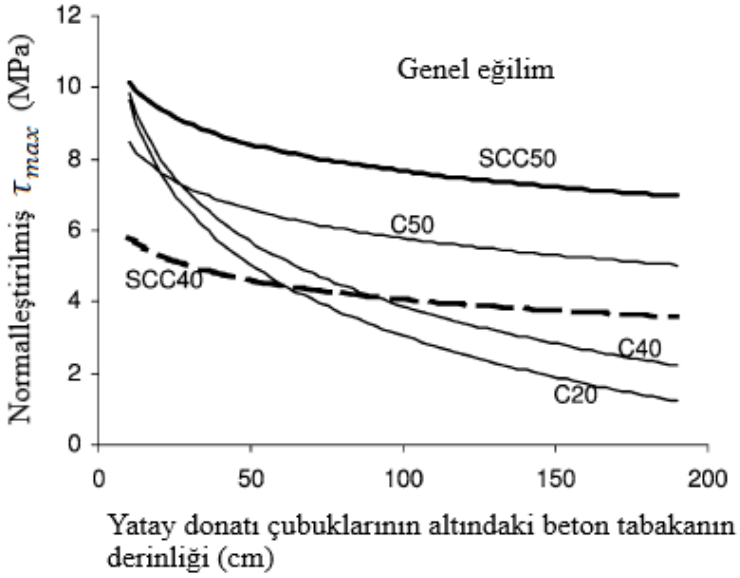
Donatı çapı değiştikçe kenetlenen donatı boyunca çevre ve alanın değişmesi sebebiyle aderans gerilmeleri de değişiklik göstermektedir (Ersoy ve Özcebe, 2016). Belirli bir aderans gerilmesini karşılayabilmek (kenetleyebilmek) için daha küçük çapta donatısı olan bir betonarme elemana kıyasla, daha büyük çaplı olan donatıda daha uzun gömülme boyunun olması gerekmektedir (García Taengua, 2013). Bu durum düşünüldüğünde daha az sayıda ve uzun gömülme boyuna sahip büyük çaplı donatı çubuğu yerine daha çok sayıda ve daha kısa gömülme boyuna sahip küçük çaplı donatı çubuğu kullanılması istenmektedir (ACI 408R, 2003). Büyük çapta donatı kullanımı gerektiği durumlarda ise beton örtüsü kalınlığının ve sargılama donatısının artırılması ile boyut etkisinin azalacağı düşünülmektedir (Ichinose vd., 2004).

Aderans dayanımı küçük çaplı donatılarda büyük çaplı donatılara kıyasla daha büyük olmakta ve bu durum betonda oluşan şekil değiştirmenin (betonun büzülmesi) yanal basınç olarak donatıya etki etmekte ve bu da aderans dayanımını artırıcı özellik göstermektedir (Durmuş vd., 2006). Ayrıca aderans dayanımı analizleri genellikle dayanımı kontrol eden beton örtüsünün donatı çapına oranı varsayımına dayanmakta ve donatı çapının değişmesiyle aderans dayanımında oluşan etkiler de bu oranın sabit olması koşuluyla değerlendirilebilmektedir (Fib Bulletin 10, 2000).

3.2.9. Donatının Beton İçerisindeki Konumu

Donatı çubuğunun beton içerisindeki konumuna bağlı olarak aderans dayanımının değişebilmekte olduğu yapılan araştırma sonucu görülmektedir. Söylev ve Franćois

(2006) yaptıkları deneysel çalışmada 2000 mm yüksekliğinde (zeminden 2000 mm üzeri) ve 200 mm genişliğinde beton panele düşey eksende 150 mm aralıklarla 13 yatay düz yüzeyli yuvarlak donatı çubukları yerleştirmiş ve beton priz sürecini tamamladıktan sonra her birinin ortasında bir donatı çubuğu kalacak şekilde kesilerek 13 ayrı numune elde edilmiş olup bu numunelerin de bir kısmı kesilerek video-mikroskop (porozite ölçmeye yarayan alet) incelemesi için kullanılmıştır. Geleneksel beton ve kendiliğinden yerleşen beton türü farklı karışımlarda kullanılmış olup tüm numunelere çekip çıkarma deneyi uygulanmıştır. Beton panelin en altına yerleştirilen donatı çubuğundan en üst kottaki donatı çubuğuna doğru gidildikçe (donatıların altındaki beton tabakasının derinliği arttıkça) aderans dayanımının azaldığı görülmüştür. Üst kotlara çıktıkça aderans dayanımında en çok kayıp deneyde kullanılan en küçük beton sınıfına sahip olan (20 MPa) geleneksel betona ait iken en az aderans dayanım kaybı ise kendiliğinden yerleşen ve deneyde kullanılan en büyük (50 MPa) beton sınıfına sahip betonda görülmüştür (Şekil 24). Donatıların altındaki beton tabakasının derinliği arttıkça en çok poroziteye sahip olan beton sınıfı geleneksel C20 betonu olurken en az poroziteye sahip olan geleneksel C50 sınıfı beton olmuştur. Şekil 24'te farklı beton sınıflarında kendiliğinden yerleşen beton (SCC) ve geleneksel betonun (C) donatı konumuna göre değişen aderans dayanımları gösterilmektedir (Söylev ve Franćois, 2006).



Şekil 24. Donatıların altındaki beton örtü derinliğine bağlı maksimum aderans dayanımları (5 farklı beton karışımı için)

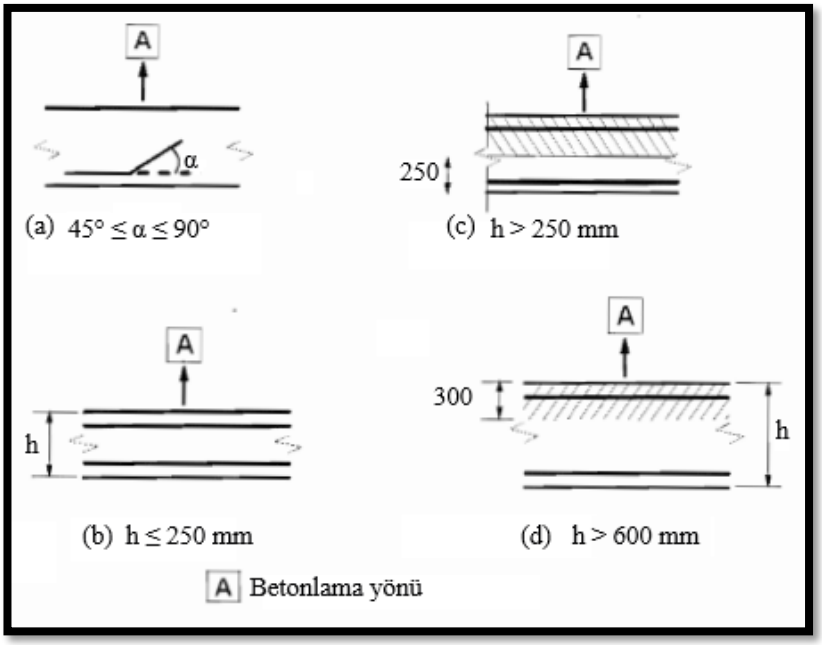
Kaynak: Söylev ve Franćois (2006, s. 218)

Betonun içerisindeki donatının konumu aderans için oldukça önemli bir parametre olmakla birlikte donatının beton dökümü sırasındaki konumuna bağlı olarak maksimum aderans dayanımının belirlenmesinde Eurocode 2 yönetmeliğindeki, Denklem 9'da verilen eşitlik belirlenmiş olup bu dayanım, donatının betonlama sırasındaki konumuna ve aderans kalitesine bağlı bir katsayı olan η_1'in saptanmasıyla bulunabilmektedir (EN 1992-1-1, 2004, s. 133).

$$f_{bd} = 2{,}25.\eta_1.\eta_2.f_{ctd} \tag{9}$$

Burada Denklem 9'da f_{bd} tasarım maksimum aderans gerilmesini, f_{ctd} beton hesap eksenel çekme dayanımını, η_1 betonlama sonrası aderans kalitesi koşulunu ifade eder. Donatı çapına göre alınacak katsayıyı ise η_2 simgesi ifade etmekte olup donatı çapı, Ø $\leq$ 32 mm ise 1,0 değeri alınmakta eğer çap 32 mm'den büyük ise (132-Ø)/100 işlemi uygulanarak η_2 değeri bulunabilmektedir. Betonlama sonrası aderans koşulu belirlenirken η_1 değeri, donatı konumunun aderans koşulları açısından yeterli olması durumunda "iyi" olarak kabul edilip 1,0 değerini almakta eğer aderansın zayıf olacağı bir betonlama koşulu varsa "zayıf" olarak kabul edilip 0,7 değerini almaktadır.

İyi ve zayıf aderans koşulları Şekil 25'te gösterilmekte ve taralı alanlar zayıf aderans koşulunu belirtmektedir. Şekil 25 (a)'da kalıp veya sertleşmiş beton taban yüzeyinden itibaren herhangi bir yükseklikteki açılı donatının 45° ve 90° derece olması halinde iyi durum olduğu, Şekil 25 (b)'de kalıp veya sertleşmiş beton taban yüzeyinden ilk 250 mm mesafedeki donatı konumunun aderans için iyi durum olduğu, Şekil 25 (c)'de beton yüksekliğinin 250 mm'den büyük olması halinde donatı katsayısı için tabandan ilk 250 mm iyi daha yukarı konumda olan donatıların ise zayıf aderans koşulunda olduğunu belirtmektedir. Şekil 25 (d)'de ise beton yüksekliğinin 600 mm'den fazla olması halinde betonun en üst yüzeyinden aşağı yönde ilk 300 mm zayıf durum olarak belirlenmekte ve bu konumdaki donatının maksimum aderans gerilmesini belirlemek için azaltma katsayısı kullanılmaktadır.

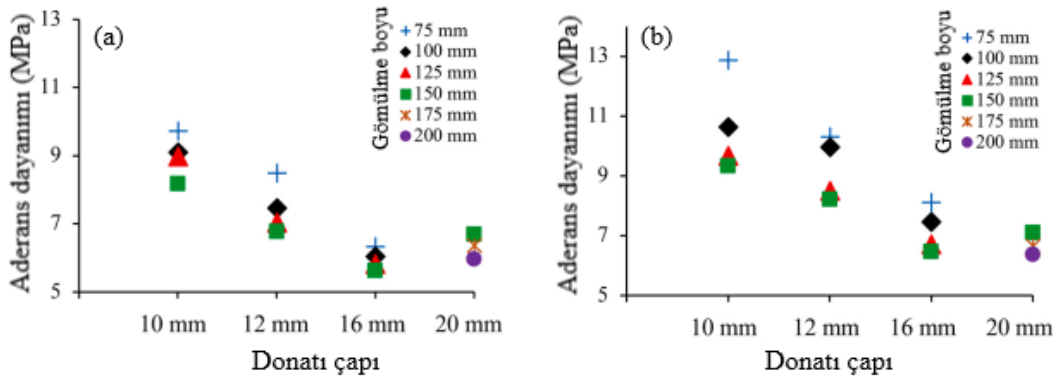


Şekil 25. Betonlama sırasındaki donatı konumuna bağlı olan katsayının belirlenmesi

Kaynak: EN 1992-1-1 (2004, s. 134)

3.2.10. Kenetlenme Boyu

Yapılan literatür taramasında elde edilen bulgulara göre kenetlenme veya gömülme boyu değiştikçe aderans dayanımında da değişiklikler olabilmektedir. Kenetlenme boyu ile aderans dayanımı arasında bir orantı olmamakta birlikte kenetlenme boyunun sürekli artması veya azalması aderans dayanımının sürekli arttığı veya azaldığı anlamı taşımamaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2016). Şekil 26'da iki farklı beton basınç dayanımında kimyasal (epoksi) ankrajlı silindirik beton numunelerinin, deformeli olan farklı donatı çaplarında ve farklı donatı gömülme boylarında çekip çıkarma deneyi sonrası elde edilen aderans dayanımları gösterilmektedir (Ahmed vd., 2021, s. 11). Şekil 26 (a) ve (b)' de görüldüğü üzere 20 mm çaplı donatılardaki kenetlenme boyu aderans dayanımı ilişkisi ile diğer çaptaki donatıların kenetlenme boyu ve aderans dayanımı ilişkileri arasında farklılıklar oluşmuştur. Dolayısıyla aderans dayanımı ile kenetlenme boyunun lineer bir eğride değişemeyeceği görülmektedir.



Şekil 26. Donatı çapı ve kenetlenme boyu (ankraj boyu) etkisinin aderans dayanımı ile ilişkisi (a) 30 MPa (b) 40MPa

Kaynak: Ahmed vd. (2021, s. 11)

3.2.11. Korozyon

Korozyon faktörünün aderans dayanımını etkilediği ve değişik yüzdelerle oluşturulan korozyonun aderans dayanımında da değişikliklere yol açtığı görülmektedir.

Fang vd. (2004) yaptıkları çalışmada düz ve deformeli donatıya sahip numuneleri NaCl (Sodyum Klorür) solüsyonu ve elektrik akımı ile farklı seviyede (%0 ile %9 arasında) korozyona bırakarak, korozyonun aderansa etkilerini belirlemek için çekip çıkarma deneyini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çekip çıkarma deneyi sonuçlarında sargılama donatısı olmayan deformeli donatısı olan numunelerin korozyona karşı hassas olduğu ve artan korozyon seviyesi ile aderans dayanımında da hızlı bir düşüş olduğu görülmüştür. Sargılama donatısı olan deformeli donatıya sahip numunelerde korozyonun aderans dayanımı üzerinde önemli bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir. Sargılama donatısı olmayan düz donatılı numunelerde düşük korozyon oranlarında aderans dayanımında bir miktar artış görülürken yüksek korozyon oranında ise düşüş görülmüş ayrıca sargılama donatısı olan düz donatılı numunelerde yüksek sayılabilecek bir korozyon oranına yaklaştıkça aderans dayanımında artış görülmüştür.

Coccia vd. (2016) gerçekleştirdikleri analitik ve deneysel çalışmada deformeli ve 12 mm çapında donatıya sahip numunelere hızlandırılmış korozyon deneyi uygulamış ve bu numunelere aderans dayanımı için çekip çıkarma deneyini uygulamışlardır. Deney sonuçlarında sargılama donatısı olmayan numunelerde düşük korozyon seviyesinde

(%0,5 - 0,6'dan az kütle kaybı) korozyonsuz numunelere göre %50 - 60 artış görülmüş, daha yüksek korozyon miktarında aderans dayanımında önemli bir azalma görülmüştür.

Khatua (2017) yaptığı çalışmasında deneysel olarak hızlandırılmış korozyon uygulamasının ve polipropilen liflerin, betona gömülü ve korozyona dayanıklı olan donatıların aderans dayanımına etkilerini araştırmıştır. Çalışmada aderansı belirlenmek üzere siyah donatı, epoksi kaplı donatı, MMFX donatı, paslanmaz çelik donatı, sıcak daldırma galvanizli donatı ve CGR donatı türleri küp şeklindeki çekip çıkarma (*pull-out*) numuneleri içine gömülme boyu 6,35 cm (2,5 in.) olacak şekilde oluşturularak beton dökümüne hazır duruma getirilmiştir. Karışımların yarısı polipropilen lif içerikli, diğer yarısı ise lif katkısı olmayan normal beton numunelerine tahsis edilmiştir. Korozyona maruz bırakılan numuneler plastik kaplar içinde ve %5 NaCl solüsyonu içerisine daldırılarak ve elektrik akımı verilerek %5 seviyesinde korozyon elde edilmiştir. Deney sonuçlarında hiçbir donatı türünde korozyona karşı tam koruma sağlanamamıştır. Korozyona uğrayan donatılarda aderans dayanımı azalmış dolayısıyla yük taşıma gücünde kayıp olmuştur. Polipropilen lif hem hızlandırılmış korozyona uğrayan numunelerde hem de normal betonlarda tüm donatı türlerinde taşıma kapasitesini artırmıştır. Korozyona maruz kalmayan numunelerde polipropilen lif ilavesi aderans dayanımını %32 oranında artırmıştır. Tüm koşullarda en yüksek taşıma gücüne CGR donatı ulaşırken en düşük seviyede kalan ise epoksi kaplı donatılar olmuştur. Lif ilaveli numunelerde korozyon etkisi aderans dayanımını %5,8 düşürürken lif ilavesiz numunelerde %11 oranında düşürdüğü görülmüş ve liflerin aderans kaybını önlemede yaklaşık %50 oranında başarılı olduğu tespit edilmiştir.

3.2.12. Sıcaklık

Yapılan araştırmalarda sıcaklık faktörünün aderans dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Rashid vd. (2019) gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmada silindirik (100 mm çap x 200 mm yükseklik) beton ve 10 mm çaplı donatıya sahip numuneleri sırasıyla 150°, 250°, 350° ve 500°C artan sıcaklıklarda ısıtarak çekip çıkarma deneyi ile aderans dayanımını gözlemlemiş olup sonuçlarda ise artan sıcaklık ile beraber özellikle 250°C'den sonra aderans dayanımının düştüğü, 500°C'ye ulaşan numunelerin kontrol numunelerine göre aderans dayanımında ısıtılma sonrası bir saat içinde %52,13 ve ısıtma işleminden 24 saat sonra ise %49,81 azalma olduğunu görmüş

ayrıca tüm sıcaklık değerlerinde numunelerin ısıtıldıktan sonraki bir saat içinde gerçekleşen aderans dayanımlarının ısıtıldıktan 24 saat sonrakine göre daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Lublóy ve György (2014) yaptıkları çalışmada lif içermeyen beton karışım türü için 20°, 150°, 300°, 400°, 500° ve 800°C sıcaklığa ulaşan çekip çıkarma numunelerini (120 mm çap ve 100 mm yükseklikteki) laboratuvar ortamında bekletip oda sıcaklığına ulaşılınca çekip çıkarma deneyini uygulamış ve artan sıcaklıkla beraber maksimum aderans dayanımında düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir.

3.2.13. Kür Koşulları

Petcherdchoo vd. (2020) yaptıkları çalışmada farklı çapta donatıları olan ve uçucu kül bazlı jeopolimer beton ile portland çimentolu beton numunelere farklı plastik kür süreleri uygulamış (28 - 56 gün) ve çekip çıkarma deneyi sonuçlarında kür süresinin 28 günden 56 güne çıkmasıyla birlikte aderans dayanımında artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Yapılan başka bir deneysel çalışmada su kürüne maruz kalan beton numunelerin hava ve naylon kürüne maruz kalan numunelere kıyasla daha fazla aderans dayanımı oluşturduğu tespit edilmiştir (Tanyıldızı ve Yazıcıoğlu, 2006).

3.3. Beton Karışımlarında Kullanılan Lifler

Gevrek (kırılgan) matrislerde lif takviyeli kompozitlerin kullanımı çok eski tarihlere dayanmakta olup (en az 3500 yıl öncesi) güneşte kurutulmuş saman ilaveli tuğlalar ile yüksek yapılar inşa edildiği görülmektedir (Newman ve Choo, 2003). Lifler taze beton karışımına direkt katılabildiği gibi lifli beton püskürtme yoluyla da uygulanabilmektedir. Püskürtmeli çelik lifli beton uygulaması ile yapının yüzeyinde oluşan rötre çatlakları sınırlandırılabilmektedir (Kozak, 2013).

Lifler betonun mekanik özelliklerinde iyileşme sağlarken beton ve donatı arasındaki aderans dayanımına etkisinin, kullanılan lif türü, yapısı, karışımdaki kullanım oranı, uzunluğu, narinlik oranı etkenlerine bağlı olduğu elde edilen literatür araştırmaları sonucu görülmektedir.Lifli betonlarda lif oranı genellikle hacimce %2'den daha az

kullanılarak bu liflerin betonarme elemanda ikincil donatı görevi yaparak çatlak oluşumunun sınırlandırılmasında etkili olmaktadır (Bentur ve Mindess, 2007).

Beton içerisine karıştırılabilen lifler çap, uzunluk, yoğunluk, çekme dayanımı, kopma uzaması ve hacim gibi birçok yönden farklılık göstermekte ve Tablo 1'de farklı lif çeşitlerinin tipik özellikleri verilmektedir (Newman ve Choo, 2003, Bölüm 6,4).

Tablo 1. Çimento bazlı matrislerin ve liflerin tipik özellikleri

Malzeme veya lif	Göreli yoğunluk	Çap veya kalınlık (mikron)	Uzunluk (mm)	Elastisite modülü (GPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Kompozit-teki hacim (%)
Matris harcı	1,8-2,0	300-5000	-	10-30	1-10	0,01-0,05	85-97
Beton harcı	1,8-2,4	10000-20000	-	20-40	1-4	0,01-0,02	97-99,9
Asbest	2,55	0,02-30	5-40	164	200-1800	2-3	5-15
Karbon	1,16-1,95	7-18	3-sürekli	30-390	600-2700	0,5-2,4	3-5
Selüloz	1,5	20-120	0,5-5,0	10-50	300-1000	20	5-15
Cam	2,7	12,5	10-50	70	600-2500	3,6	3-7
Polipropilen monofilament	0,91	20-100	5-20	4	-	-	0,1-0,2
Kesilmiş Polipropilen film	0,91	20-100	5-20	5	300-500	10	0,1-1,0
Polivinil alkol (PVA,PVOH)	1-3	3-8	2-6	12-40	700-1500	-	2-3
Çelik	7,86	100-600	10-60	200	700-2000	3-5	0,3-2,0

Kaynak: Newman ve Choo (2003, Bölüm 6,4)

Sertleşmiş betonda lifler, çatlama sonrası davranışın iyileştirilmesi ve çatlakları köprüleyerek daha sünek bir yapı elde edilerek ani göçme durumunun önlenmesi ayrıca şekil değiştirme ve tokluk değerlerinin artması durumlarına katkı sağlayabilmektedir (Newman ve Choo, 2003).

Lifler genel olarak taze beton dökümü sonrası betonun sertleşme (priz alma) evresinde oluşan rötre (büzülme) çatlaklarını önleyebilmek ve betonun yükleme ile maruz kaldığı kuvvetler sonucu, oluşan mikro çatlakların ilerlemesini durdurabilmek için etkili olan malzemelerdir (Rai ve Joshi, 2014). Yeterli oranda lif miktarı ve betonarme eleman için en uygun lif türü kullanılmak üzere, beton örtüsünde ve betonarme yapıda hem imalat aşaması hem de imalat sonrasında oluşabilecek mikro ve makro çatlakları sınırlandırarak donatıyı korozyondan koruyabilmekte böylece aderansın devamlılığı için önemli bir etken olabilmektedir. Lifler, betonda birincil donatı işlevi göstermemekle birlikte betonu üç boyutlu olarak her yönde donatılandırmakta böylelikle betonu daha

dayanıklı bir yapıya dönüştürmekte olup, yapı alanlarında daha sık kullanılmakta olan lifler sentetik liflerdir (Aktürk, 2007). Lifler ayrıca eğilme dayanımı, darbe direnci ve tokluk değerinin artırılmasına olumlu etki ederken betonda çatlama sonrası sünekliğin sağlanmasına da yardımcı olabilmektedir (Newman ve Choo, 2003).

3.3.1. Lifli Betonlar ve Lif Çeşitleri

Betonarme sistemlerde tercih edilmekte olan çeşitli özelliklerde ve farklı yapıya sahip lif türleri bulunmaktadır. ASTM C1116 / C1116M - 10a (2015) ve ACI 544.2R-89 (2002) yönetmeliklerine göre lif donatılı betonlar aşağıdaki gibi;

- Çelik lif donatılı beton
- Cam lif donatılı beton
- Sentetik lif donatılı beton
- Doğal lif donatılı beton

sınıflandırılmaktadır (ASTM C1116 / C1116M - 10a, 2015).

3.3.1.1. Çelik lifler

Çelik lifler paslanmaz çelik, alaşımlı çelik ve karbon çelik içeriğine sahip lifleri kapsamaktadır (ASTM C1116 / C1116M - 10a, 2015). Çelik lifler çelik tellerin kesilmesi, çelik levhanın kesilmesi veya sıcak döküm ile elde edilebilmekte ve genelde deformeye sahip olmakta böylelikle lif - matris aderansının daha etkili olması sağlanmaktadır (Plizzari ve Mindess, 2019).

Çelik lifler farklı boyut ve uzunluklarda olmakta ayrıca burgulu, kıvrımlı (düz olmayan), girintili - çıkıntılı, kancalı, uçları düğme sonlu ve burgulu poligonal gibi değişik geometrik şekillerde bulunabilmektedir. (Plizzari ve Mindess, 2019). Kancalı çelik lif örneği Şekil 27'de gösterilmektedir.



Şekil 27. Sonu kancalı çelik lif örneği

Tünel kaplaması veya döşeme gibi yerlerde oluşan büzülme veya sıcaklık farkından oluşan çatlakları sınırlandırmada etkili olduğu düşünülmekte fakat bu parametreyi ölçen doğrudan bir yöntem olmamakla birlikte lif – matris arasında sıyrılma veya kopma kuvveti parametlerinden bu konuda fikir edinilebilmektedir (Newman ve Choo, 2003). Çelik liflerin kullanımının en önemli nedenlerinden birisi de betonda çatlama sonrası eğilme durumunda iyileştirme ayrıca eğilmeye veya nokta yüklere maruz kalan betonarme sistemlerde et kalınlığının düşürülmesinde yardımcı olabilmesidir (Newman ve Choo, 2003).

Çelik liflerin kullanım miktarının oranı (hacimce veya kütlece), narinlik oranı, lifin geometrik yapısı, beton matrisin dayanımı ve lifin matris içerisinde dağılımı gibi parametreler betonun mekanik özelliklerini etkilemede önemli faktörler olmakta ayrıca çelik lifler betonun darbe direnci, eğilme, kesme ve yorgunluk dayanımlarını etkileyebilmektedir (Newman ve Choo, 2003). Özellikle narinlik oranı yüksek olan çelik lifler daha büyük lif - matris sıyrılma kuvvetine sahip olduğundan pik yükleme sonrası durumu iyileştirmede daha etkili olabilmektedir (ACI 544.1R-96, 2002).

Yazdani vd. (2002) yaptığı çalışmada öngerilimli ve ardgerilimli prefabrik köprü kirişlerinin uç ankraj bölgesinde lif katkılı beton kullanımının etkilerini araştırmıştır. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilip, ilk aşamada betona çelik ve polipropilen lifler eklenerek yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımı ve eğilme tokluğu deneyleri uygulanmıştır. İkinci aşamada ise AASHTO'da yer alan ankraj deneyi lifli ankraj numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Farklı uzunluklarda ve şekillerde iki farklı çelik lif ve polipropilenden üretilen hacimce (yd^3) %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında lifler beton karışımlarına eklenmiştir. Deney sonuçlarında, numunelerde çelik liflerin miktarı arttıkça basınç dayanımı artmış, polipropilen liflerde ise kullanım miktarı arttıkça basınç dayanımı azalmış ve en düşük basınç dayanımı hacimce %0,75 oranındaki lif içerikli numunede görülmüştür. Çelik liflerin kullanım miktarı arttıkça beton çekme dayanımlarında artış gözlemlenmiş fakat polipropilen içerikli numunelerde lif kullanım miktarı arttıkça beton çekme dayanımı azalmıştır. Çelik lif katkılı numunelerde genel olarak kullanım miktarı arttıkça tokluk değeri ve ilk çatlak dayanımının arttığı görülmüştür. Polipropilen içerikli numunelerde lif oranı arttıkça tokluk değeri artmış fakat en yüksek eğilme yüküne ve en yüksek ilk çatlak değerine hacimce %0,75 lif içerikli numune ulaşmıştır. İkinci aşama deney sonuçlarında hacimce %1 oranında kullanılan 38 mm uzunluğa sahip ve narinlik oranı 38 olan tırtıklı çelik lif türü ile ankraj bölgesindeki yoğun ikincil donatı (burgu ve etriye donatıları) kullanımının azaltılabileceği ve aynı oranda 30 mm uzunluğunda ve narinlik oranı 55 olan tutkallı çelik lif ile en az 40,7 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılması durumunda ikincil donatının tamamen kaldırılabileceği görülmüştür. Birinci deneyde kullanılan oranlardaki polipropilen liflerin ise betonun özelliklerini yeterince iyileştiremediği görülmüştür.

Çelik liflerin betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada çelik liflerin değişik oranlarda betona ilave edilmesiyle donatı çubuğu ile beton arasındaki aderansın arttığı, yüksek sıcaklıklarda en az aderans kaybının çelik lif içeren numunelerde olduğu ayrıca değişik oranlarda kullanılan lif miktarının artması ile mekanik özelliklerde gelişme olduğu tespit edilmiştir (Arel, 2012).

3.3.1.2. Cam lifler

Cam lifler eritilmiş camın çekilip filamanlar haline getirilmesiyle üretilen lif türüdür (Bentur ve Mindess, 2007). Cam liflerin yaygın kullanımı, ekonomik olmaları, düşük elastisite modülüne sahip olmaları, yüksek çekme dayanımı ve kimyasal maddelere karşı daha dirençli ve yalıtkan olmalarından dolayı yapılarda tercih edilebilmektedir (Başaran, 2019). Camın düşük alkali dayanımı olması ve çekme dayanımı kaybolduğundan alkali bir yapıya sahip olan betonun içine ilave edilmesi çok uygun görülmemekte fakat yüksek zirkonyum dioksit ile üretilen cam liflerde alkali dayanımı yüksek olmakta ve beton karışımında kullanılabilir duruma gelmektedir (İskender ve Karasu, 2018). Alkali dayanımlı cam lifler beton karışımının liflere zarar vermesini önleyerek yapının servis süresi boyunca betonda oluşabilecek büzülme veya rötre çatlaklarının ilerlemesini sınırlandırmaya katkı sağlayabilmekte ve betona çekme dayanımı ve kısmen de olsa basınç dayanımına olumlu etkileri olabilmektedir.

Cam lif içerikli betonlarda (GFRC - *Glass Fibre Reinforced Concrete*) geçirimliliğin azalması donatıyı su gibi dış etkenlere karşı daha dayanıklı hale getirerek donatıda oluşabilecek korozyonu önleyebilmekte dolayısıyla betonda çatlama gibi risklerin azaltılmasında yardımcı olabilmektedir.

Alkali dayanımlı cam liflerin hafif betonda sıcaklık ve çatlama oluşumu üzerindeki etkilerini araştıran Mirza ve Soroushian (2002) lifli hafif betonlarda sıcaklık artışıyla eğilme dayanımında azalma olduğu ve tüm numunelerde lif kullanımı ile çoklu çatlak oluşumunun sağlandığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca ısı uygulanmayan lifli betonlarda oluşan çatlak genişliklerinin azaldığını ve deneyde kullanılan lif miktarı arttıkça eğilme dayanımında artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Alkali dayanımlı cam lifli betonlarda çatlak genişliği az olacağı ve eğilme dayanımının artması neticesinde donatı ile beton arasındaki aderans dayanımına olumlu etkileri olabilmekte donatının korozyona uğrama olasılığının daha az olması ve beton örtüsünün daha az hasar alması sebebiyle aderansın devamlılığı daha uzun süre sağlanabilmektedir.

Cam, Karbon ve PP lif katkılı betonların donatı ile arasındaki aderans dayanımına etkilerinin çekip çıkarma deneyi ile incelendiği bir çalışmada, betona hacimce %0,25

cam lif katkısının düşük donatı gömülme boyuna sahip numunelerde (5 cm) aderans dayanımında kontrol betonuna (lif katkısız) kıyasla artış gözlemlenmiştir (Tekeli, 2019).

3.3.1.3. Sentetik lifler

Sentetik lifler esnek, homojen gövdeli, yüksek narinlik oranı ve küçük kesite sahip yapıda olan beton karışımlarında kullanılabilen liflerdir (Zheng ve Feldman, 1995). Betonun mekanik özelliklerini geliştirmek, çevresel etkenlere bağlı beton ve donatıda oluşan bozulmaları önlemek için kullanılan ve ekonomik olması nedeniyle de tercih edilebilen çoğunluğu polimer yapıda olan liflerdir. Çeşitli boy, narinlik oranı (genelde yüksek) ve yapıda sentetik lifler bulunmaktadır.

Sentetik lif çeşitleri;

- Polietilen
- Polipropilen
- Akrilik
- Polivinil Alkol
- Poliamid
- Aramit
- Polyester
- Karbon
- Naylon
- Hibrit

olmak üzere sıralanabilmektedir (Zheng ve Feldman, 1995).

Polimer yapıdaki sentetik lifler üreticinin imalat sürecinde oluşturduğu liflerin fiziksel yapısına göre makro veya mikro lif olarak sınıflandırılabilmekte ve aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (BS EN 14889-2, 2006).

- Sınıf Ia: Mikro lifler < 0,30 mm çap; Tek filamentli (*Mono-filamented*)
- Sınıf Ib: Mikro lifler < 0,30 mm çap; Fibrile (ağ) olabilen (*Fibrillated*)
- Sınıf II: Makro lifler > 0,30 mm çap

Sınıf II kapsamında bulunan makro lifler daha yüksek artık eğilme dayanımının sağlanması gereken yerlerde tercih edilebilmektedir (BS EN 14889-2, 2006).

Mikro lif: BS EN 14889-2 (2006) yönetmeliğine göre 0,30 mm çapından daha küçük eş değer çapa sahip ve genellikle makro liflere oranla daha kısa olarak üretilen liflerdir. Mikro PP lifler genellikle 30 mm'den kısa ve yapısal yük taşıma gücü yeterli olmayan liflerdir (Blazy ve Blazy, 2021). Mikro lifler bordür, yaya kaldırımı, garaj yolu, sıkıştırılmış zemin üzerine imal edilen beton döşeme, bodrum zemini ve döşeme gibi yapılarda kullanılabilmektedir ("Things To Consider About Fiber - Reinforced Concrete", t.y.). Mikro liflerin matriste oluşturduğu faydalı etkiler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Blazy ve Blazy, 2021; The Euclid Chemical Company, t.y.; Güngör, 2013).

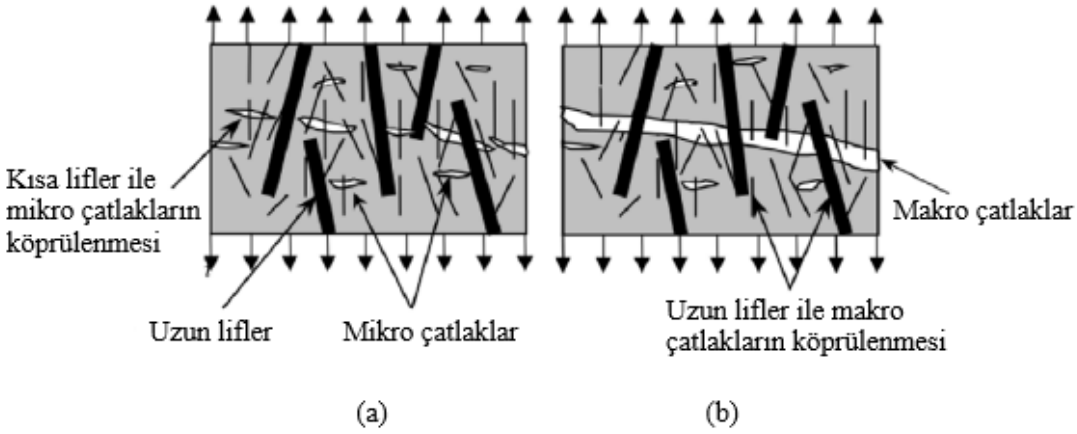
- Rötre ve büzülme çatlağını ilerlemeden sınırlandırma
- Beton örtünün dökülüp ufalanmasını engelleme
- Donma ve çözülmeye karşı dayanıklılık
- Betonun döküm aşamasında homojenliğini sağlama
- Yapının servis süresini artırma
- Korozyon direnci

Makro lif: BS EN 14889-2 (2006) yönetmeliğine göre 0,30 mm çapından daha büyük çapa sahip ve genellikle 38-50 mm uzunluğunda olan liflerdir. Makro sentetik PP lifler genellikle 30 – 50 mm uzunluğa sahiptir (Blazy ve Blazy, 2021). Makro sentetik liflerin betonda oluşturduğu etkiler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Blazy ve Blazy, 2021; The Euclid Chemical Company, t.y.; Güngör, 2013).

- Plastik büzülmeyi ve çatlamayı köprüleme
- Betona dayanıklılık kazandırma
- Betonun eğilme dayanımını artırma
- Betonun tokluk değerini artırma
- Yapıyı daha sünek bir duruma getirme
- Yapısal yükü aktarabilme
- Maksimum yük sonrası davranışı iyileştirme
- Çelik lifli betona kıyasla daha hafif olması, kolay pompaj ve yerleştirme
- Korozyon dayanımı

Makro lifler kaynaklı hasır donatısı veya ikincil donatı gerektiren yerlerde daha ekonomik ve etkili olduğundan tercih edilebilmekteyken mikro liflerle birlikte hibrit

kullanımı betonun özelliklerini iyileştirme ve performansını geliştirme açısından önemli bir konu olmaktadır ("Things To Consider About Fiber - Reinforced Concrete", t.y.). Makro ve mikro liflerin hibrit olarak kullanıldığı yerlere; septik tankları, rögar kapakları ve bazı prekast ürünleri ile ticari alanlardaki zeminler (havalimanı apron bölümü yol kaplaması vb.), zımbalama etkisinin olduğu kolon başları ve köprü tabliyeleri örnek verilebilmektedir ("Things To Consider About Fiber - Reinforced Concrete", t.y.; Kocatürk vd., 2005). Kısa ve ince lifler uzun liflere oranla aynı miktarda olsalar bile matriste sayıca daha fazla olacağında mikro çatlakları daha iyi köprüleyebilmekte böylelikle betonun çekme dayanımını artırmaktayken uzun ve kalın lifler de mikro çatlakların ilerleyip büyümesiyle oluşan makro çatlakları köprüleyebilmektedir (Şekil 28) (Markovic, 2006, s. 8).



Şekil 28. Hibrit liflerin temel prensibi: (a) Kısa ve ince liflerin mikro çatlakları köprülemesi ve matrisin çekme dayanımını artırması; (b) Uzun ve kalın liflerin makro çatlakları köprülemesi ve matriste sünekliği artırması

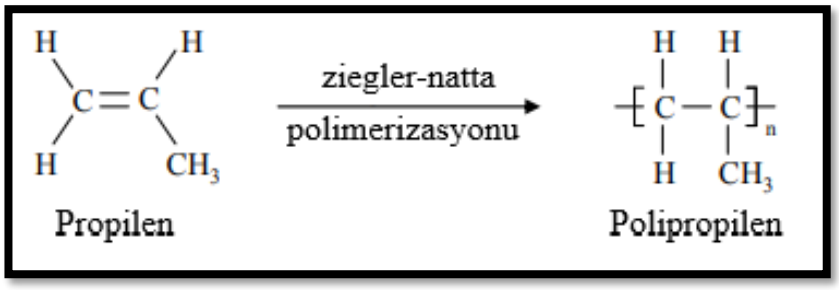
Kaynak: Markovic (2006, s. 8)

Sentetik lifler arasında ekonomik olması, üretiminin kolay olması, çekme dayanımının yüksek olması, kopma uzamasının diğer liflere göre yüksek olması özgül yoğunluğunun düşük ve hafif olması ve deneyde kullanılan lif türü olması sebebiyle bu çalışmada sentetik lifler başlığı altında PP liflere değinilmektedir.

a. Polipropilen lifler

Polipropilen, kimyasal formülü $(C_3H_6)_n$ olmak üzere propilen (propen) monomerinin (C_3H_6) Ziegler-Natta veya Metalosen katalizörleri ile polimerizasyon yoluyla elde

edilmektedir (“The Definitive Guide to Polypropylene (PP)”, t.y.). Şekil 29’da propilen monomeri ve polipropilenin moleküler yapısı gösterilmektedir (Kahouli vd., 2013, s. 1068).

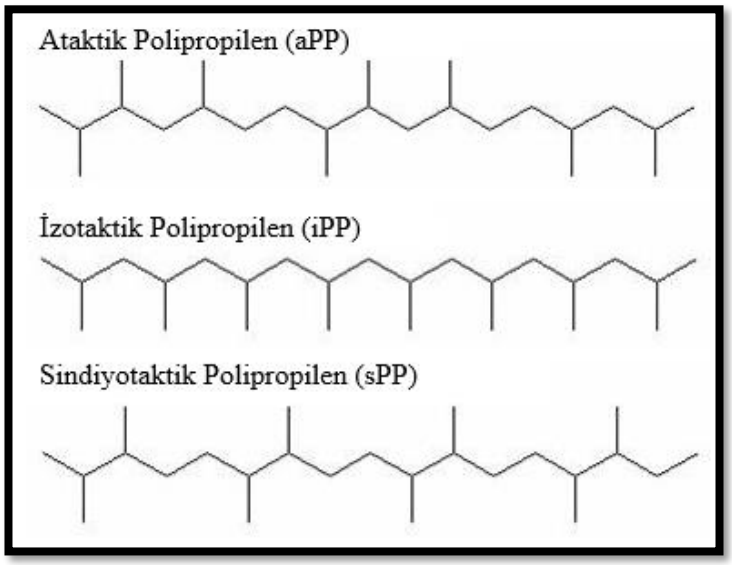


Şekil 29. Propilen monomeri ve polipropilen

Kaynak: Kahouli vd. (2013, s. 1068)

PP polimerleşmeye bağlı olarak metil (CH_3) gruplarının konumuna göre üç farklı polimer zinciri şeklinde oluşmakta olup bunlar aşağıda gösterilmektedir (Şekil 30) (Zheng ve Feldman, 1995; (“The Definitive Guide to Polypropylene (PP)”, t.y.).

- Ataktik (Düzensiz metil grubu dizilimi içerir.)
- İzotaktik (Karbon zincirinin tek tarafında dizili olan metil grubunu içerir.)
- Sindiyotaktik (Karbon zincirinin iki tarafında da dizili olan metil grubunu içerir.)



Şekil 30. Metil gruplarının dizilimine bağlı olarak oluşan PP türleri (taktisite)

Kaynak: (“The Definitive Guide to Polypropylene (PP)” (t.y.)

Propilen zincirleri asimetrik yapıda olduğundan metil gruplarının bağlanma şekline göre İzotaktik, Ataktik ve Sindiyotaktik olarak adlandırılmaktadır (Petrocuyo, t.y.). PP türleri moleküler yapısına ve içeriğine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilmektedir ("The Definitive Guide to Polypropylene (PP)", t.y.; Petrocuyo, t.y.).

- Homopolimer PP (propilen)
- Düzensiz kopolimer PP (propilen-etilen)
- Blok kopolimer PP (propilen-etilen)
- Darbeye dayanıklı kopolimer PP (propilen-etilen)
- Terpolimer PP (propilen-etilen-(1-bütan))

Bu çalışmada kullanılan PP türleri homopolimer PP ve düzensiz kopolimer PP olduğundan bu türlere ait bilgiler aşağıdaki iki farklı başlık altında incelenmiştir.

Homopolimer PP: En yaygın kullanıma sahip olan ve PP zinciri boyunca tek tür propilen monomerlerine sahip olan ve bu birimlerin de genellikle izotaktik yapıda olduğu propilenlerdir (Hisham, 2016). Sadece propilen monomerlerini içermesi ve bunların izotaktik yapıda olması malzemeye kristallik kazandırmaktadır (Hisham, 2016). Göreli olarak yüksek kristalliğe, çekme dayanımına ve rijtlik özelliğine sahip olduğundan ev gereçleri ve sanayi ürünlerinde tercih edilebilmektedir (Hanwha-Total, t.y.).

Düzensiz (Rastgele) kopolimer PP: Propilen ve düşük miktarlardaki etilenin (kütlece %7'den az) tek reaktörde kopolimerizasyon yoluyla üretilmesiyle oluşmakta ve bu şekilde oluşan PP malzemenin kristalliği düşük olmakta dolayısıyla şeffaf bir yapıya sahip olmaktadır (Hisham, 2016). Bu tür PP'nin yapısı, PP ile zincir boyunca rastgele konumlara yerleşmiş olan ko-monomerlerin (etilen) birleşmesiyle oluşmaktadır (Petrocuyo, t.y.). Etilen katkısı polipropilenin düzenli yapısını bozarak kristalliğini azaltmakta bu da malzemeye daha şeffaf bir görünüm kazandırmaktadır (Hisham, 2016). Etilen katkısı ile kristallik arasında ters bir oran olmakta, etilen miktarı arttıkça polipropilen malzemenin kristalliği kademeli olarak azalmakta ve daha şeffaf bir görünüm kazanmakta ayrıca daha düşük erime noktasına neden olmaktadır (Hisham, 2016).

Kopolimerler genellikle daha yüksek darbe dayanımı ve daha düşük erime noktasına sahip ayrıca daha esnek malzemelerdir (Hisham, 2016).

Genel olarak, PP lifler, homopolipropilen reçinesinden elde edilmekte ayrıca çeşitli şekillerde, özelliklerde ve farklı boyutlarda üretilmekte ve PP liflerin en önemli özellikleri alkali dayanımına sahip olmaları, kısmen yüksek erime noktasına sahip olması (165°C) ve ekonomik olmalarıdır (Bentur ve Mindess, 2007). Hidrofobik özelliğe sahip olan lifler suyu absorbe etmemektedirler. Betona ilave edilmesiyle yangına ve diğer çevresel faktörlere karşı betonda koruyucu bir etki oluşturmaktadır (Bentur ve Mindess, 2007).

PP liflerin olumsuz özellikleri ise düşük yangın dayanımına sahip olmaları, güneş ışığı ve oksijene karşı hassas olmaları ve düşük elastisite modülüne (1 – 8 GPa) sahip olmalarıdır (Bentur ve Mindess, 2007). Ayrıca PP malzemeler, klorlu çözücüler ile aromatiklerden ve yüksek dereceli oksitleyici asitlerden olumsuz olarak etkilenebilmekte ve düşük sıcaklıklarda kırılgan bir davranış sergileyebilmektedir. ("The Definitive Guide to Polypropylene (PP)", t.y.).

PP lifler burgulu demet şeklinde, tek filamentli, harmanlanmış fibrile ve sürekli şerit film vb. değişik fiziksel özelliklerde üretilebilmektedir (Zheng ve Feldman, 1995). Harmanlanmış fibrile PP beton içerisinde dağılarak etkili bir lif-matris aderansı sağlayabilmektedir (Zheng ve Feldman, 1995).

PP lifler ile yapılan deneysel çalışmalarda PP liflerin betonun zayıf olan çekme ve eğilme dayanımlarını iyileştirebildiği, tokluk değeri ve darbe dayanımını artırabildiği görülmektedir. PP liflerin kullanım amaçları; beton döküm aşamasından itibaren oluşabilecek plastik rötre veya büzülme çatlağına karşı direncin sağlanması, beton örtüsünün dökülmesini ve korozyonu önleme, yangın dayanımını artırma, yük-birim değiştirme grafiğinde maksimum yük sonrası bölgeyi iyileştirme, matriste çoklu çatlak oluşumunu sağlama ve yapıyı daha sünek bir duruma getirip ani çökmelerin önüne geçmek olarak sıralanabilmektedir.

Sun ve Xu (2009) yaptıkları çalışmada polipropilen liflerin betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Araştırmada taramalı elektron mikroskobu ile betonun lif katkısı ile oluşan yapısını incelemişlerdir. Mikroskobik inceleme sonucunda polipropilen liflerin betonu sargılayarak beton içindeki boşlukları azalttığı ve $Ca(OH)_2$ miktarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Polipropilen lifler beton içinde ağ şeklinde kurularak çimento ve agrega ara yüzeyinde oluşan mikro çatlakları önlediği ve betonda

oluşan gerilmeleri yeniden düzenlediği görülmüştür. Yapılan inceleme ile polipropilen liflerin basınç dayanımına, eğilme dayanımına, aderans dayanımına ve yorgunluk dayanımına pozitif etki oluşturarak betonun mekanik özelliklerini geliştirdiği görülmüştür. Deney sonucunda betonun mekanik özelliklerini geliştirmek için en uygun polipropilen lif katkı miktarının 0,9 kg/m^3 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

PP lifler ile yapılan çalışmalarda beton-donatı aderans dayanımı uygun oranda kullanım ile artırılabilmekteyken bu oranın arttıkça beton matriste hava boşlukları oluşturabilmesinden ötürü aderansı zayıflatabileceği görülmektedir.

Mohebi vd. (2019) yüksek dayanımlı betonda polipropilen lif ilavesinin aderans performansı üzerine etkilerini deneysel olarak inceleyip sonuçları teorik tahmine dayalı veriler ile karşılaştırmışlardır. Çalışma için iç orta açıklığında bindirmeli ek gerilmesi olan toplam 8 kiriş ve 12 adet merkezi çekip çıkarma deneyi numunesi oluşturmuşlardır. Kirişlerde Ø25 nervürlü donatı kullanılmış ve kenetlenme boyu 305 mm alınmıştır. Numunelerin beton karışımlarında beton hacminin %0,15, %0,30 ve %0,45 oranlarında polipropilen fiber kullanılmıştır. Çekip çıkarma deneyi uygulanan, katkısız ve hacimce değişken lif katkılı numunelerde aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği eğrileri neredeyse aynı olup, hepsi yaklaşık 26 MPa seviyesinde kalmıştır. Betona lif eklenmesi betonun çekme gerilmesini etkilediği belirtilmiş fakat çekip çıkarma deneyinde numunelerin beton-donatı arayüzü çekme gerilmesine maruz kalmadığından yani sadece donatıya çekme işlemi uygulanması sebebiyle aderans dayanımını belirlemede çekip çıkarma (*pull-out*) deneyinin güvenilirliğinin zayıf kaldığı öne sürülmüştür. Dört noktalı eğilme ile test edilen kirişlerde ise katkısız kirişe kıyasla daha fazla çatlak, daha büyük göçme yükü ve sehim miktarı ayrıca göçme aşamasında daha büyük çatlak genişliği gözlemlenmiştir. Numunelerden elde edilen sonuçlarda basınç dayanımı ve aderans gerilmesi için en büyük değerler hacimce %0,15 polipropilen lif katkılı karışımda görülmüştür. Hacimce %0,15 polipropilen lif katkılı betonda basınç dayanımı katkısız kirişe oranla yaklaşık %14 artış ve aderans dayanımında %11,4 artış gözlemlenmiştir. Teorik aderans dayanım tahminlerinin ise deneysel sonuçlara yakın olduğu görülmüştür.

3.3.1.4. Doğal lifler

Bitkisel kaynaklı, hayvansal kaynaklı ve mineral türlerinden oluşan liflerdir. Hayvansal kaynaklı liflerin daha sınırlı sayıda bulunmasından ve yapılan çalışmalarda genellikle yapılan çalışmalarda bitkisel lifler ön planda olmaktadır.

Doğal lifler içeriğine göre üç başlık altında aşağıdaki gibi sınıflandırılabilmektedir (Kalkan, 2017).

- Selüloz bazlı lifler (Pamuk, Keten, Sisal, Hindistan cevizi vb.)
- Protein bazlı lifler (Yün, Tiftik, İpek vb.)
- Mineral bazlı lifler (Asbest vb.)

Çalışmalarda sıklıkla tercih edilen doğal lifler; Hindistan cevizi lifi, Sisal, Şeker kamışı, Muz, Bambu, Hint keneviri, bazı sebzeler, Küspe, Pirinç çeltiği, Keten vb. olmak üzere bunlar arasında en yaygın kullanılan Sisal, Hindistan cevizi lifi, Bambu, Keten, Muz, Kenevir, Jüt çeşitleridir (Shadheer vd., 2021). Doğal lifler yüksek dayanım ve düşük elastisite modülüne sahiptir (Shadheer vd., 2021).

Hayvansal kaynaklı at tüyü ve bitkisel saman gibi lifler de herhangi bir işlem gerektirmeden doğrudan tuğla ve harç içerisine katılarak kullanılabilmektedir (Shadheer vd., 2021).

Rahuman ve Yeshika (2015) yaptıkları bir çalışmada iki farklı beton sınıfına sahip ve beton karışımına çimento kütlesinin %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında eklenen Sisal liflerinin betonda kullanım oranı arttıkça çekme ve basınç dayanımında artış tespit etmiş ayrıca yüksek beton sınıfında olan lif içerikli numunelerin çekme dayanımındaki artış daha küçük beton sınıfında olan lif içerikli numuneye kıyasla daha az olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bambu donatılı betonların davranışı üzerine araştırma yapan Arpit ve Baradiya (2014) yaptıkları deneysel çalışma sonucunda bambunun betonun eğilme dayanımı ve maksimum sehim miktarını düz (donatısız) betona kıyasla artırdığını gözlemlemişlerdir.

Sivaraja vd. (2010) tarafından yapılan bir çalışma da Hindistan cevizi ve Şeker kamışı liflerinin betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımları gibi mekanik özelliklerinde artış gösterdiği görülmüştür.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

Çalışmada üretilen beton numunelerde; CEM I 42,5R Portland çimento, kum (0-4 mm), kaba agrega (4-11mm) ve diğer kaba agrega (11-22 mm), Konya ili KTO Karatay Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarındaki şehir şebeke suyu, lif içerikli beton numuneler için makro Kopolimer PP ile mikro PP ve süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

4.1.1. Agregalar

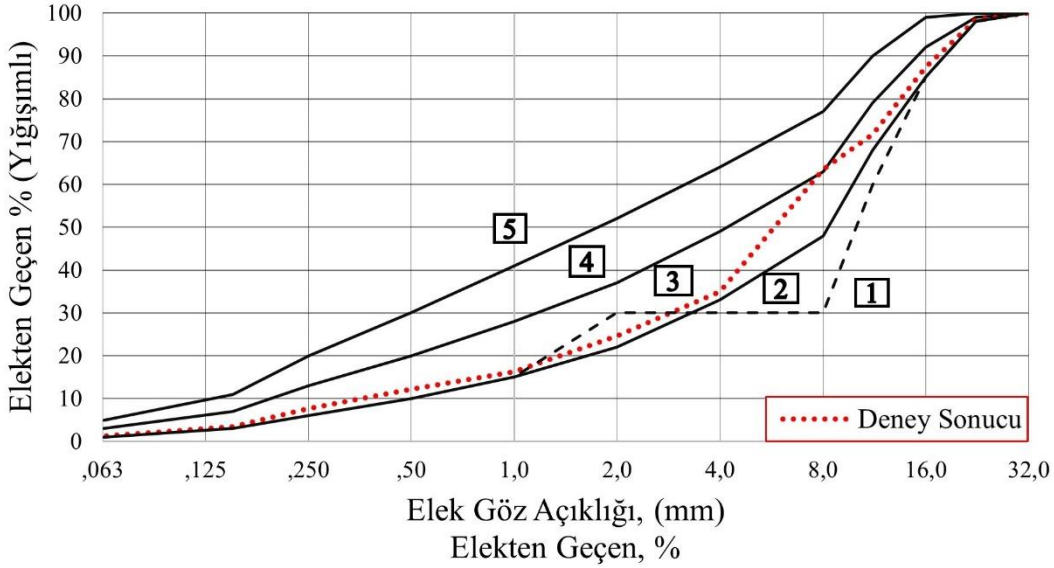
Deneyde üretilen betonlarda üç farklı elek çapında olmak üzere; kum (0-4 mm), kırma taş I (4-11 mm) ve kırma taş II (11-22 mm) tipi agrega kullanılmıştır. Referans ve tüm lif içerikli betonlarda aynı oranda agrega tercih edilmiştir. Deneyde beton üretimi için kullanılan tüm agregaların özellikleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Deneyde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Agregalar	**Su emme oranı (%)**	**Özgül ağırlık (g/cm^3)**
0-4 mm agrega (Kum)	1,9	2,62
4-11 mm agrega (İri agrega)	0,8	2,69
11-22 mm agrega (İri agrega)	0,6	2,71

Deneyde kullanılan agregalara elek analizi deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre çizilen granülometri eğrisinin, TS 802 yönetmeliğinde belirtilen agrega en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan agrega dağılım eğrisi sınırlarına göre karşılaştırılması yapılmış olup deneyde kullanılan agregaların eğrisinin, ideal dağılım eğrisi alanı olan 3 numaralı bölgede kaldığı görülmüştür.

Çalışmada kullanılan agregaların granülometri eğrisi ve agrega en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan beton için agrega tane büyüklüğü dağılımı sınırları Şekil 31'de gösterilmektedir (TS 802, 2016).



Şekil 31. Agrega en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan beton için yönetmelikte verilen dağılım eğrisi sınırları ve deneyde kullanılan agregaların granülometri eğrisi

Kaynak : TS 802 (2016, s. 11)

4.1.2. Çimento

Deneyde kullanılan beton karışımında bağlayıcı madde olarak CEM I 42,5 R tipi Portland çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Kullanılan Çimentonun Özellikleri

Mekanik Özellikler	Değer	Fiziksel Özellikler	Değer	Kimyasal İçerik	Değer
İki Günlük Basınç Dayanımı	22,7 MPa	Özgül Ağırlık	3,15 g/cm^3	Cl^- (Klorür)	%0,012
		Priz Başlangıcı (min)	145 dk	SO_3 (Kükürt Trioksit)	%2,85
28 Günlük Basınç Dayanımı	45,3 MPa	Hacim Genleşmesi	1 mm	Çözünmeyen Kalıntı	%0,26
				Kızdırma Kaybı	%4,33

Kaynak: Konya Çimento A.Ş. (aktaran Şahin, 2019, s.39)

4.1.3. Kimyasal Katkı

Çalışmadaki beton dayanımını azaltmadan beton karışımındaki su kullanımını azaltmak veya daha akışkan kıvamda beton elde etmek amacıyla Sika Group şirketine ait süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Deneyde kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcının özellikleri

Özellikler	**Süper Akışkanlaştırıcı (Sikament – 300)**
Görünüş	Sıvı
Renk	Koyu kahverengi
Koku	Hafif
pH	> 5
Özgül Ağırlık	1,2 g/ml (23 °C)
Kinematik Viskozite	ca > 20,5 mm/s (40 °C)
Yanma Noktası	> 100°C
Buhar Basıncı	0,01 hpa (0,01 mmHg)
Suda Çözünürlük	Tamamen çözülebilir

Kaynak: Sika Group (t.y.)

4.1.4. Beton Karışımında Kullanılan Su

Beton içeriğinde kullanılan tüm malzemeleri işlenebilir bir duruma getirmek ve hidratasyon sürecini başlatmak amacıyla KTO Karatay Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarındaki Konya ili şebeke suyu kullanılmıştır.

4.1.5. Çelik Donatı Çubukları

Çalışmada mafsallı kirişlerin içine yerleştirilmek üzere nervürlü, 10 mm (Ø10) çaplı ve 1100 mm uzunluğunda olan S420 sınıfı çelik donatı çubukları kullanılmıştır. Çelik çubuklar donatı makası ile kesilerek elde edilip toplamda 48 adet donatı çubuğu kullanılmıştır (Şekil 32).



Şekil 32. Mafsallı kiriş için kesilen çelik donatı çubukları

4.1.6. Mikro Polipropilen Lifler (PP Elyaf)

Mikro lif içerikli beton karışımına katılmak üzere %100 saflık oranına sahip PP lifler kullanılmıştır. Çalışma için tercih edilen ve tek ve hibrit numunelerde kullanılan mikro PP liflerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Beton karışımına eklenen mikro PP liflerin özellikleri

Değerlendirmeler	**PP Mikro Lif (Elyaf)**
Standart	ASTM Clll6 CE, EN 14889-2BBA 92/2830
Görünüm	Doğal beyaz lif
Tip	Polipropilen
Saflık	%100 saf
Yoğunluk	0,91 g/cm^3
Uzunluk	19 mm
Kesit ve Çap	Dairesel, 18 μm – 20 μm
Narinlik Oranı	~ 1.000
Çekme Dayanımı	450 - 700 N/mm^2 (MPa)
Elastisite Modülü	3000 - 3500 N/mm^2 (MPa)
Erime Noktası	162 °C
Yanma Noktası	593 °C
Asit Reaksiyonu	Asit etkileşimine dayanıklı
Tuz Reaksiyonu	Tuz etkileşimine dayanıklı
Alkali Reaksiyonu	Alkali etkileşimine dayanıklı
UV Dayanımı	UV ışınlara karşı dirençli
Oksidasyon Direnci	Yüksek
Aşınma Dayanımı	Yüksek
Çimento ile Uyumluluk	Çok iyi
Nem Tutma	Nem tutuculuğu yok

Kaynak: "Atlas 1" (t.y. a)

Deneyde şekil 33'te gösterildiği üzere her bir ince lif teli 19 mm uzunluğunda ve 18-20 μm eninde boyutlara sahip olan elyaf şeklindeki mikro PP lifler kullanılmıştır.



Şekil 33. Mikro polipropilen lifler

4.1.7. Makro Kopolimer Polipropilen Lifler

Çalışmadaki makro lif içeren numuneler için beton karışımına Kopolimer Polipropilen (Etilen ilaveli PP) kimyasal yapısına sahip lifler eklenmiştir.

Deneyde tek ve hibrit numunelerde kullanılan makro Kopolimer PP liflerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 6'da gösterilmektedir.

Tablo 6. Beton karışımına eklenen makro KPP liflerin özellikleri

Değerlendirmeler	Makro PP Lif
Özgül Ağırlık	0,91 g/cm3
Hammadde	PP/PE (%99 Polipropilen)
Görünüm	Burgulu ve deforme edilmiş
Yüzey	Kabartılmış yüzey
Koku	Kokusuz
Lif Uzunluğu	54 mm
Lif Çapı	0,65 mm
Narinlik Oranı	83
Lif sayısı (adet/kg)	>200.000
Asit ve Tuz Dayanımı	Yüksek
Alkali Dayanımı	Yüksek
Elektrik İletkenliği	Düşük
Erime Sıcaklığı	160 - 170 °C
Tutuşma Sıcaklığı	400 °C
Çekme Dayanımı	550 – 750 N/mm^2 (MPa)
Termal İletkenlik	Düşük
Su Emme	Yok

Kaynak: "Atlas 1" (t.y. b)

Deneyde tercih edilen makro lif türü Atlas 1 firmasına ait Macromesh 54 tipi Makro Kopolimer burgulu PP lifler olmakla birlikte Şekil 34'te gösterilmektedir.



Şekil 34. Burgulu makro kopolimer polipropilen lifler

4.2. Yöntem

Bu çalışmanın temel amacı mikro polipropilen ve makro kopolimer polipropilen liflerin beton ve donatı arasındaki aderans dayanımına etkilerinin incelenmesi olup aynı zamanda çalışmada liflerin betonun eğilme dayanımına ve basınç dayanımına etkileri de incelenmiştir. Çalışmada tekil ve hibrit lifli betonun, beton ile donatı arasındaki aderans dayanımına etkilerini incelemek amacıyla BS 4449:2005+A2:2009 standardına uygun olarak mafsallı kiriş deneyi tercih edilmiş ve kirişlere dört noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır (BS 4449:2005+A2:2009, 2009). Deney sonuçlarından her bir lifli beton karışımının yük-sıyrılma ve aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri oluşturulmuş ayrıca aderans, eğilme ve basınç dayanımları saptanmış olup tüm karışımların sonuçları birbiri ile kıyaslanmıştır.

Aderans dayanımını incelemede en kolay yöntemlerden birisi olan çekip çıkarma deneyinin ise betonun eğilme ve çekmeye maruz kalmaması sebebiyle daha az gerçekçi bir yaklaşım olabileceği düşünülmektedir.

Mafsallı kirişler eğilmeye maruz kaldığından beton ve donatının aynı anda çekme kuvvetinin etkisine maruz kalmasından dolayı gerçek bir betonarme elemana yakın şekilde çalışmakta ve daha gerçekçi bir yapısal tepki oluşturmakta olduğundan bu araştırmada tercih edilmiştir.

4.2.1. Beton Karışım Bilgileri ve Lifli Beton Karışımlarının Kodlanması

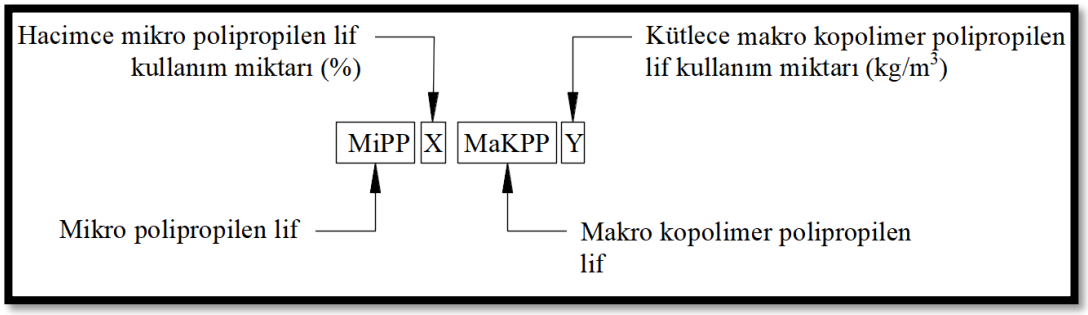
Çalışma için 28 günlük küp numune basınç dayanımı 37 MPa olan C30 sınıfı geleneksel betonun üretilmesi hedeflenmiş olup referans ve tüm lifli beton karışımlarında beton karışımı sabit tutulmuştur.

Su/çimento oranı 0,70 olan 1 m^3 beton için önceden tasarımı hazırlanan betona ait karışım oranları Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7. 1m^3 Beton için belirlenen malzeme miktarları

Malzeme	Kullanılan Miktar (kg/m^3)	Oran (%)
Çimento	250	10,50
Su	175	7,35
0-4 mm Dane Çaplı Agrega	1170	49,15
4-11 mm Dane Çaplı Agrega	391	16,43
11-22 mm Dane Çaplı Agrega	392	16,47
Süperakışkanlaştırıcı	2,5	0,11
Su/Çimento Oranı	0,70	

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada referans (lif içeriksiz), mikro polipropilen lif içerikli, makro kopolimer polipropilen lif içerikli ve hibrit lifler (mikro PP lif + makro kopolimer PP lif) olmak üzere beton karışımları hazırlanmıştır. Beton karışımlarında, 1 m^3 beton için mikro PP lifler beton hacminin %0,05 oranında ve makro kopolimer PP lifler ise 1 m^3 betonda 1, 2 ve 4 kg/m^3 oranında olmak üzere belirlenmiştir. Hibrit lifler ise mikro liflerin hacimce %0,05 oranında sabit tutulması ve makro liflerin farklı oranlarda sırasıyla 1, 2 ve 4 kg/m^3 olmak üzere beton karışımına eklenmiştir. Bu şekilde sekiz farklı beton karışımı elde edilmekte olup Tablo 8'de bu karışımlara farklı kodlar verilerek her bir karışım isimlendirilmiş ve özellikleri gösterilmiştir. Çalışma için oluşturulan bu karışım kodlarının açıklamaları Şekil 35'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 35. Karışım kodlarının şematik açıklaması

Karışım kodlarında mikro PP lifler "MiPP" şeklinde kodlanarak gösterilmiş ve kodun sağında bulunan sayılar da karışımda kullanılan PP'nin kendi hacimce miktarını gösterirken makro kopolimer PP lifler ise "MaKPP" şeklinde kısaltma yapılarak verilmekte ve yine kodun sağında yer alan sayılar lifin 1 m^3 beton için kullanım miktarını belirtmektedir. Tablo 8'de beton karışımlarında kullanılan lif miktarlarının kodlamaları gösterilmektedir.

Tablo 8. Lif içerikli beton karışımlarının kodlanması ve açıklamaları

Beton Karışım Kodları	Mikro PP Lif Miktarı	Makro Kopolimer PP Lif Miktarı
	Hacimce (%)	Kütlece (kg/m^3)
MiPP0MaKPP0	0	0
MiPP0,05MaKPP0	0,05	0
MiPP0MaKPP1	0	1
MiPP0MaKPP2	0	2
MiPP0MaKPP4	0	4
MiPP0,05MaKPP1	0,05	1
MiPP0,05MaKPP2	0,05	2
MiPP0,05MaKPP4	0,05	4

Deney elemanlarını üretmek amacıyla tüm malzemeler laboratuvarda bulunan ve Şekil 36'da gösterilmekte olan betoniyer hacmine (0,06 m^3) göre tekrardan hesaplanıp tartılarak bu karışımlar üretilmiştir.



Şekil 36. Betoniyerde hazırlanan beton karışımı

Betoniyerde hazır hâle getirilen taze beton içerisine en son olarak lifler eklenerek lifli beton içeriği üretici firmanın önerdiği süre olan minimum 5 - 7 dakika boyunca ek olarak karıştırılmıştır. Lifler betoniyer içine eşit şekilde her yere dağılacak şekilde eşit süreyle aktarılmıştır. Hibrit lif karışımlarında ise önce mikro lifler iyice karıştırılıp daha sonra makro lifler yavaşça karışıma eklenerek toplamda minimum 5 – 7 dakika boyunca karışım sağlanmıştır. Burgulu (MaKPP) veya elyaf (MiPP) hâldeki lifler karışım sırasında kendiliğinden açılarak betona homojen olarak dağılmıştır. Oluşturulan

karışımlar el arabası aracılığıyla ilgili kalıplara dökülmek üzere taşınmıştır. Şekil 37 (a) ve (b)'de beton karışımına eklenen lifler gösterilmektedir.



(a) Mikro PP lif (b) Makro KPP lif

Şekil 37. Beton karışımına eklenen lifler (a) Mikro PP lif (b) Makro KPP lif

4.2.2. Deney Elemanlarının Tasarlanması

Sekiz farklı lif içerikli beton karışımı üretilirken her bir karışım için üçer adet 7 ve 28 günlük olmak üzere toplam altı adet küp numune üretilmiştir.

Eğilme dayanımlarının tespiti için her bir karışımdan üçer adet prizmatik eğilme numunesi üretilmiştir.

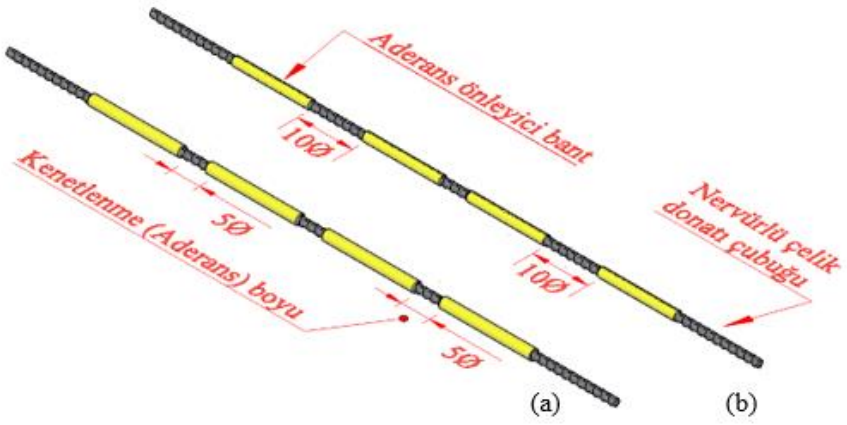
Aderans ile ilgili parametreleri belirlemek amacıyla her bir karışımdan 5Ø (50 mm) aderans boyu için üçer adet ve 10Ø (100 mm) aderans boyu için üçer adet olmak üzere altışar adet mafsallı kiriş numunesi hazırlanmıştır.

Deney için tasarlanan ve hazırlanan tüm numunelerin sayısı, özellikleri ve ölçüleri Tablo 9'da verilmektedir. Tablo 9'da gösterildiği üzere deneyde toplam 48 adet küp numune, 24 adet prizmatik kiriş ve 48 adet mafsallı kiriş üretilmiştir.

Tablo 9. Deneyde üretilen numunelerin özellikleri ve miktarları

Deney Elemanları	Belirlenen Dayanım Türü	Bir Karışımdaki Numune Sayısı (Adet)	Sekiz Karışımdaki Numune Sayısı (Adet)	Toplam (Adet)	Numune Ölçüleri (mm)
Küp Numunesi	7 Günlük Basınç Dayanımı	3	24	48	150 x 150 x 150
	28 Günlük Basınç Dayanımı	3	24		
Eğilme Kirişi Numunesi	Eğilme Dayanımı	3	24	24	100 x 100 x 500
Mafsallı Kiriş Numunesi	Aderans Dayanımı (5Ø)	3	24	48	100 x 180 x 800
	Aderans Dayanımı (10Ø)	3	24		

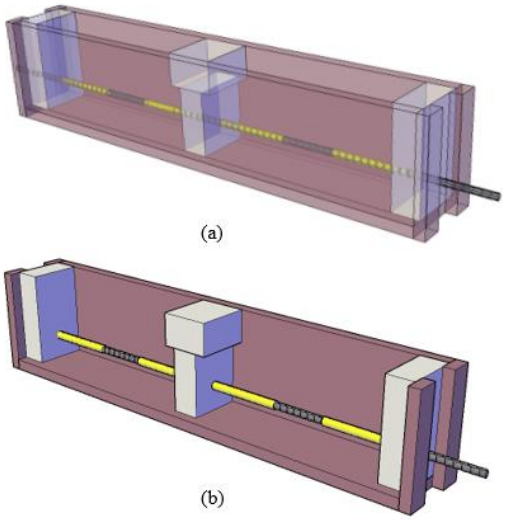
Mafsallı kirişte eğilme donatısı olarak tercih edilen 10 mm çapındaki nervürlü çelik donatı çubukları belirlenen kenetlenme boylarına (5Ø ve 10Ø) göre aderans önleyici bantlar ile sarılı (kılıflanmış) hâlde üç boyutlu olarak bilgisayar ortamında tasarlanmıştır. Gömülme boyu ayarlanmış ve mafsallı kiriş kalıbına yerleştirilmeye hazır hâldeki tasarı donatıları Şekil 38'de gösterilmiştir.



Şekil 38. Farklı kenetlenme boyuna sahip donatı çubuklarının tasarımı (a) 5Ø (b) 10Ø

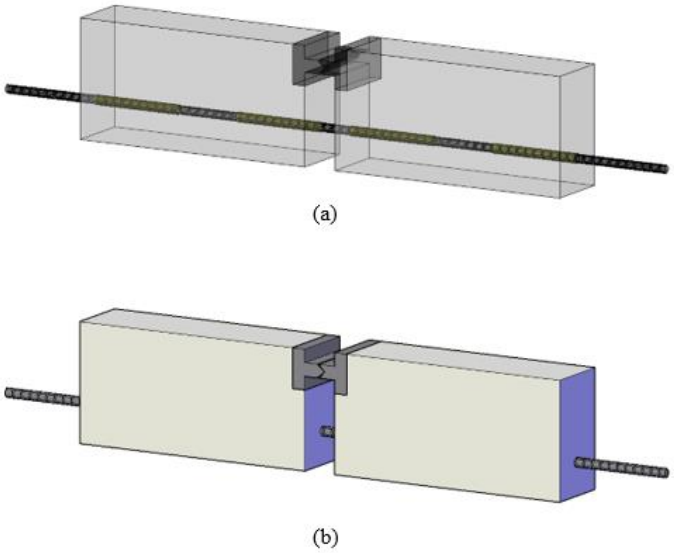
BS 4449:2005+A2:2009 yönetmeliğine uygun olarak mafsallı kiriş beton numunelerini hazırlayabilmek amacıyla KTO Karatay Üniversitesi laboratuvarında bulunan plywood malzemeden imal edilmiş hazır kalıplar içine aderans dayanımı belirlenecek çelik donatı

çubuğu yerleştirilip hazırlanmış durumda bilgisayar ortamında tasarlanarak Şekil 39'da gösterilmiştir.



Şekil 39. Beton dökümüne hazır hâle getirilen üç boyutlu mafsallı kiriş kalıbı modellemesi (a) Şeffaf görünüm (b) Katı cisim görünümü

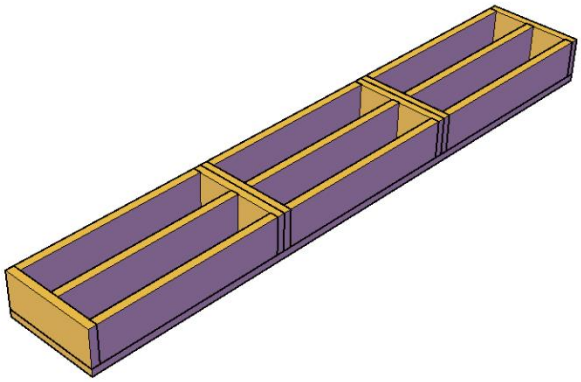
Tasarlanan mafsallı kiriş kalıplarına beton döküldükten 24 saat sonra kalıptan çıkarma işlemi sonrası elde edilecek olan görünüm üç boyutlu olarak modellenmiştir. Şekil 40'ta kirişlerin orta basınç noktasına çelik mafsal yerleştirilmesi ile deney sonunda elde edilecek olan kirişlerin üç boyutlu izometrik modellemesi yapılmıştır.



Şekil 40. Tasarlanan mafsallı kiriş (a) Üç boyutlu şeffaf görünüm (b) Üç boyutlu katı cisim görünümü

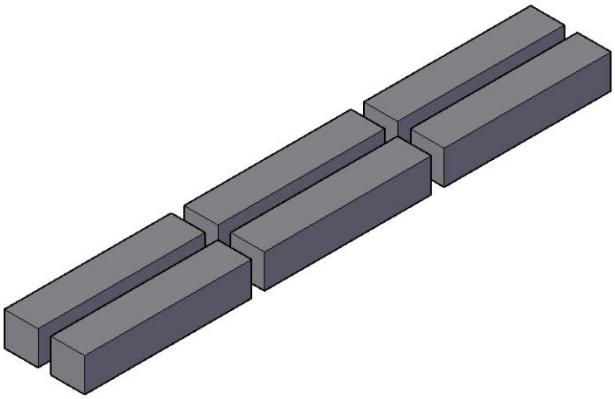
Referans ve lifli beton karışımlarının basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla numunelerin üretimini sağlamak için standart küp numune kalıpları kullanılmıştır.

Lifli betonların eğilme dayanımlarını belirleyebilmek için TS EN 12390-5 yönetmeliğine uygun ölçülerde tasarlanmıştır (TS EN 12390-5, 2002). Beton kirişleri elde etmek amacıyla tek seferde altı adet eğilme numunesi oluşturulabilen ahşap kalıplar hazırlanmış ve Şekil 41'deki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 41. Tasarlanan eğilme numunesi kalıbı

Şekil 42'de eğilme dayanımının belirlenmesi için tasarlanan kalıplardan elde edilecek olan beton numunelerinin üç boyutlu izometrik modellemesi gösterilmiştir.



Şekil 42. Prizmatik eğilme numunelerinin modellenmesi

4.2.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Mafsallı kirişlerde kullanılmak üzere toplam 48 adet S420 sınıfı nervürlü çelik donatı çubuğunun her biri 1100 mm uzunluğunda kesilmiş ve her bir donatının yüzeyi tel fırça yardımıyla temizlenmiştir. Donatılar kesildikten sonra 50 mm (5Ø) ve 100 mm (10Ø) olmak üzere iki farklı kenetlenme boyunu ayarlamak için donatı yüzeyinin belirli kısımlarının çevresi parke şiltesi (polietilen köpük malzeme) ve PVC elektrik izolasyon bandı yardımıyla sarılarak bu bölgelerde aderans kesilmiştir. Şekil 43'te iki farklı kenetlenme boyu için hazırlanmış ve kenetlenme boyu dışında kalan kısımları aderans önleyici bantlar ile sarılmış olan donatı çubukları gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 43. Farklı kenetlenme boyuna sahip donatı çubuklarının hazırlanması (a) 50 mm (b) 100 mm

Şekil 44'te kenetlenme boyları ayarlanmış ve mafsallı kiriş kalıplarına yerleştirilmeye hazır duruma getirilen çelik donatı çubukları gösterilmektedir.



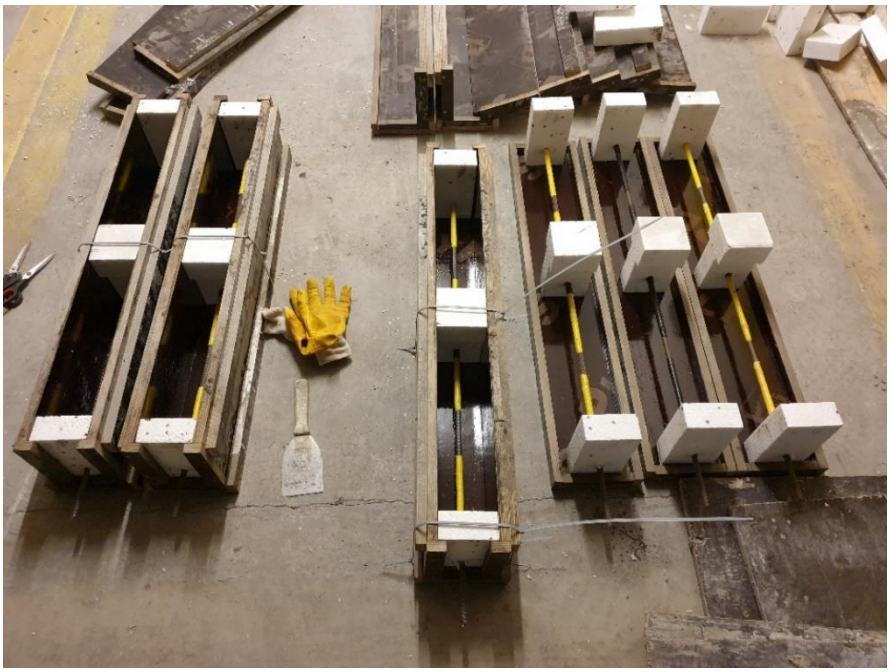
Şekil 44. Kenetlenme boyuna göre kılıflanan çelik donatı çubukları

Aderans dayanımı belirlenecek olan donatıların tamamı hazırlandıktan sonra mafsallı kiriş kalıpları hazırlanmış ve yüzeyleri betonun yapışmasını önlemek için yağlanmıştır. Donatı çubukları kalıplardan ayrı ortamda mafsallı kiriş ölçülerini sağlaması amacıyla köpük malzeme içerisinde konumlandırılıp Şekil 45'te görüldüğü üzere kalıba yerleştirilmeye hazır duruma getirilmiştir.



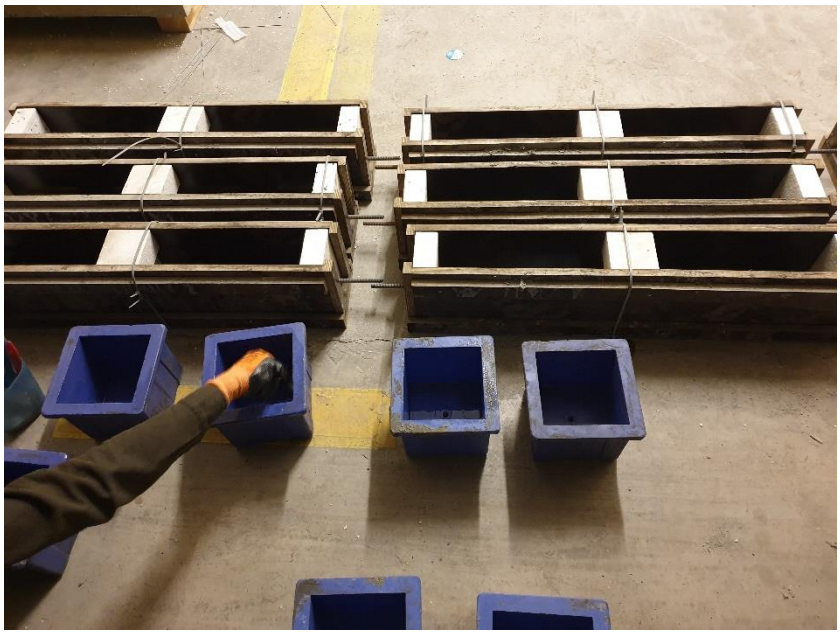
Şekil 45. Donatı çubuklarının kalıplara yerleştirilmek üzere hazırlanması

Kalıplar yağlandıktan sonra donatı çubukları mafsallı kiriş kalıplarına yerleştirilmiş ve beton dökümü için hazır hâle getirilmiş Şekil 46'da gösterilmektedir.



Şekil 46. Mafsallı kiriş kalıplarının hazırlanması ve donatı çubuklarının yerleştirilmesi

Mafsallı kiriş kalıpları hazır duruma getirildikten sonra küp ve eğilme numunesi kalıpları da kalıp yağı ile yağlanarak beton dökümüne hazır duruma getirilmiştir (Şekil 47).



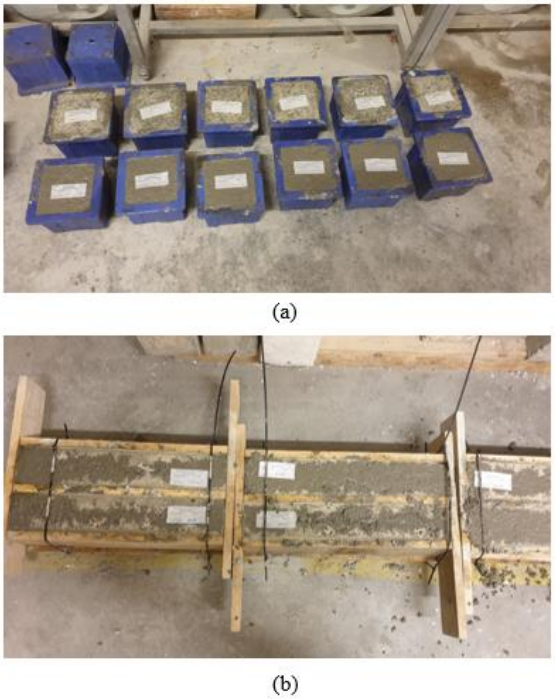
Şekil 47. Deney numuneleri kalıplarının yağlanması ve hazırlanması

Kalıplar hazırlandıktan sonra laboratuvar ortamında hazırlanan lifli beton karışımları kalıplara dökülmüş ve her bir numune türünde şişleme çubuğu kullanımı ile taze betonun yerleşmesi sağlanmış ve segregasyon oluşması önlenmiştir (Şekil 48).



Şekil 48. Mafsallı kiriş kalıplarına taze beton dökülmesi

Aynı şekilde eğilme ve küp numuneleri kalıplarına da beton dökülerek istenilen numuneler imal edilmiştir (Şekil 49 (a) ve (b)).



(a)

(b)

Şekil 49. Numune kalıplarına beton dökümü (a) Küp numune kalıpları (b) Prizmatik eğilme numune kalıpları

Üretilen beton numuneleri 24 saat kalıp içerisinde bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmıştır. Beton dökümünden 24 saat sonra küp numuneleri 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının belirlenmesi amacıyla numuneler 20 ± 2°C su sıcaklığında olan kür havuzuna aktarılmış ve bekletilmiştir (Şekil 50).



Şekil 50. Kür havuzunda bekletilen küp numuneler

Kalıptan çıkarılan hibrit lif içerikli eğilme ve mafsallı kiriş numuneleri Şekil 51'de gösterilmektedir.



Şekil 51. Hibrit lif ilaveli mafsallı kiriş ve eğilme numuneleri

Eğilme ve mafsallı kiriş numuneleri ıslatma yoluyla her gün nemlendirilmiş ve 28 gün süresince bu şekilde kür uygulanmıştır. Çalışma süresince üretilen mafsallı kirişler ve eğilme numuneleri bir alanda düzenli olarak dizilmiştir (Şekil 52).



Şekil 52. Çalışmada üretilen tüm mafsallı kiriş ve eğilme numuneleri

4.2.4. Çelik Çekme Deneyi

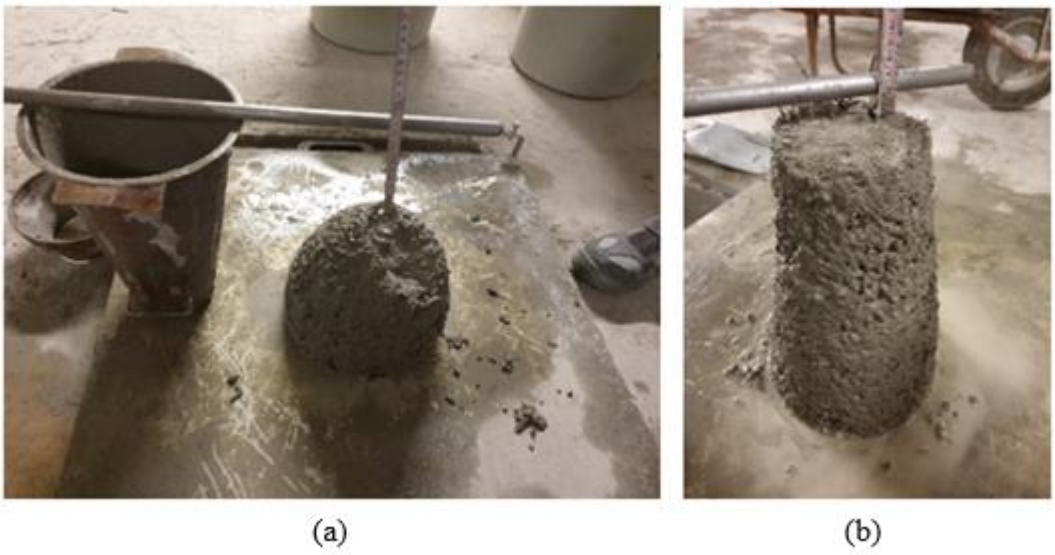
Mafsallı kiriş için kullanılan donatı çubuklarının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çelik donatı çekme deneyi yapılmıştır. Şekil 53'te 10 mm çaplı S420 çelik donatı çubuğunun deney aşaması gösterilmektedir.



Şekil 53. Çelik donatı çekme deneyi

4.2.5. Taze Beton Çökme (*Slump*) Deneyi

Deneyde kullanılan liflerin taze betonun kıvamına ve işlenebilirliğine etkisini incelemek amacıyla betoniyerde hazırlanmış olan taze beton karışımlarına TS EN 12350-2 yönetmeliğine uygun olarak çökme deneyi yapılmıştır (TS EN 12350-2, 2019). Deneydeki toplam sekiz farklı karışımın her birine uygulanan çökme deneyi ile liflerin referans beton karışımına göre değişen işlenebilirlik ve yerleşme etkileri de gözlemlenmiştir. Çalışma sırasında betoniyerden alınarak gerçekleştirilen iki farklı taze beton karışımının çökme deneyleri Şekil 54 (a) ve (b)'de gösterilmektedir.



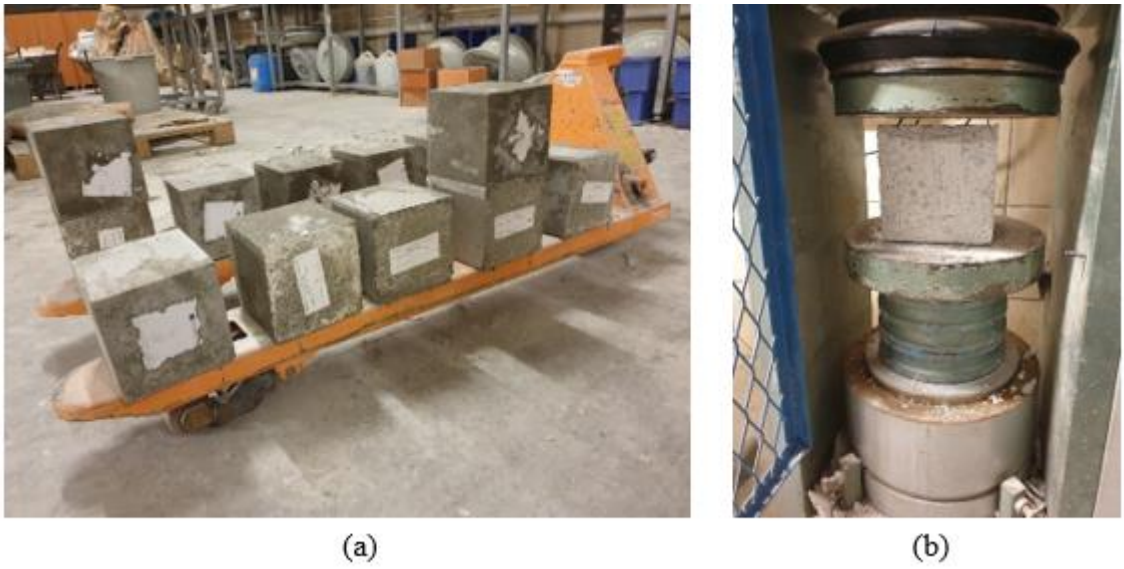
Şekil 54. Taze beton çökme deneyi (a) MiPP0,05MaKPP1 karışımına ait çökme deneyi (b) MiPP0MaKPP4 karışımına ait çökme deneyi

4.2.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri

4.2.6.1. Beton basınç dayanımı belirleme deneyi

Deney sırasında betoniyerden alınarak küp numune kalıplarına eklenen taze beton karışımlarının 7 ve 28 günlük suda kür havuzunda bekletilmesiyle gerçekleştirilen sertleşmiş küp beton numunelerinin dayanımları düşeyde sıkıştırma (basınç) uygulayan 200 ton kapasiteli test cihazı ile belirlenmiştir. Çalışmada 7 ve 28 günlük basınç dayanımları TS EN 12390-3 yönetmeliğine uygun olarak belirlenmiştir (TS EN 12390-3, 2019). Üretilen referans ve lifli küp beton numunelerinin 7 ve 28 günlük kür sürelerindeki basınç dayanımı belirlenerek birbirleri ile karşılaştırma yapılmış olup mikro, makro ve hibrit liflerin basınç dayanımına etkileri açığa çıkarılmıştır. Çalışmada

üretilen kür havuzundan çıkarılmış bazı küp numuneler Şekil 55 (a)'da ve basınç dayanımı belirleme düzeneğine yerleştirilerek dayanımı belirlenen bir küp numunesi Şekil 55 (b)'de gösterilmektedir. Deneyde kullanılan pres makinesinin gerilme artış hızı (yükleme hızı) TS EN 12390-3 yönetmeliğinde belirtilen alt ve üst sınırların (0,2 – 1 MPa/s) ortalaması alınarak, 0,6 MPa/s olarak seçilmiştir (TS EN 12390-3, 2019).



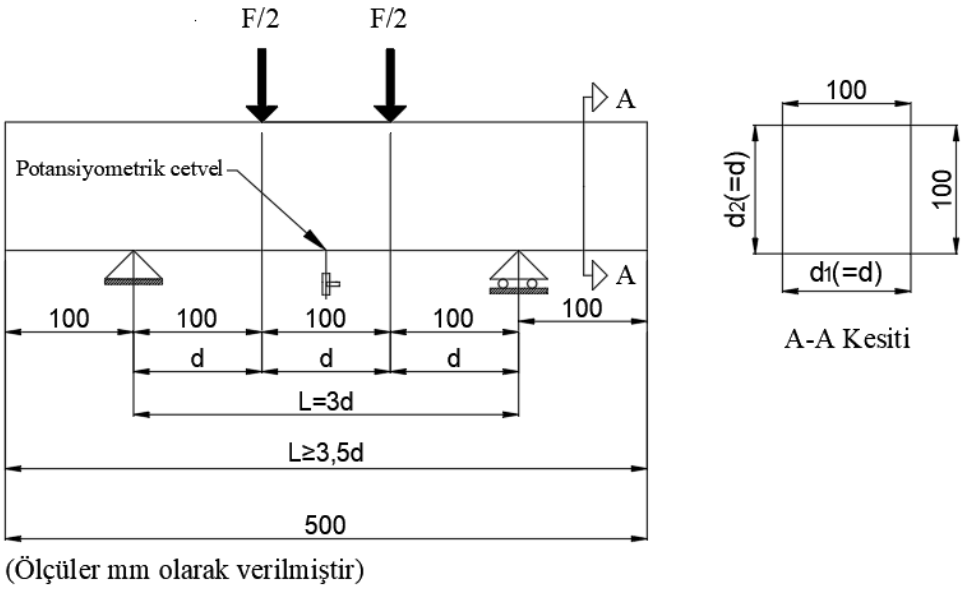
Şekil 55. (a) Kür havuzundan çıkarılan küp beton numuneleri (b) Küp numune basınç dayanımı belirleme düzeneği

4.2.6.2. Eğilme dayanımı belirleme deneyi

Betonun eğilme dayanımı betonun çekme yüzeyindeki fiber tabakalarının çekme dayanımına bağlı olması ve bunun da aderans dayanımına etkilerinin, özellikle kullanılan lif miktarı ve lif türlerinin (mikro ve makro lifler) farklı olabilmesi sebebiyle bu çalışmada lifli betonların eğilme dayanımları araştırılmıştır. Deneyde üretilen referans ve lifli beton numunelerinin ölçüleri, eğilme dayanımı ve deney düzeneği TS EN 12390-5 yönetmeliğine uygun olarak belirlenmiştir (TS EN 12390-5, 2002).

TS EN 12390-5 yönetmeliğinde eğilme dayanımının belirlenmesinde iki noktadan yükleme deneyi için mesnetler arası mesafenin kiriş numunesinin yüksekliğinin (veya derinlik) üç katı olması gerektiği ve en yakın mesnet ile yük arasındaki mesafelerle yük noktaları arasındaki mesafelerin eşit olması gerektiği vurgulanmış olup eğilme kiriş numuneleri bu duruma uygun olarak deney düzeneğine yerleştirilmiştir (Şekil 56) (TS EN 12390-5, 2002). Deneyde lif içerikli kirişlerin eğilme altındaki sehim miktarını

ölçmek için kiriş eksenine düşey yönde yerleştirilen potansiyometrik cetvel ve yük ölçerden (loadcell) alınan veriler veri toplayıcı sayesinde bilgisayar ortamına aktarılmıştır.



Şekil 56. Eğilme dayanımı deney düzeneği

Kaynak: TS EN 12390-5 (2002, s. 4)'ten yeniden tasarlanarak

Şekil 57'de laboratuvarda hazırlanan eğilme dayanımı deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 57. Eğilme dayanımı belirleme düzeneği

Deneyde eğilme deneyi için eğilme presi cihazı kullanıldığından, sabit gerilme artış hızı yönetmelikte verilen koşullar içerisinde 0,048 MPa/s olarak belirlenmiştir. TS EN 12390-5 yönetmeliğine uygun olarak yükleme hızı ise Denklem 10'da verilen eşitlik ile belirlenmiştir (TS EN 12390-5, 2002, s. 2).

$$R = \frac{s.d_1.d_2^2}{L} \tag{10}$$

Denklem 10'da gerekli yükleme hızı R, gerilme artış hızı s, kiriş en kesit boyutları d_1 ve d_2, mesnet silindirleri arası açıklık ise L olarak belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan kiriş boyutları Denklem 11'de yerine konularak yükleme hızı bulunmuştur.

$$R = \frac{0{,}048.100.100^2}{300} = 160\ \mathrm{N/s} \tag{11}$$

Deneyde eğilme numunelerinin ulaştığı maksimum kuvvet F olarak alınıp Denklem 12'de yerine konulduğunda eğilme dayanımı bulunmaktadır (TS EN 12390-5, 2002, s. 3).

Denklem 12'de eğilme dayanımı f_{cf}, mesnetler arası açıklık L, en büyük kuvvet F, kiriş en kesit boyutları d_1 ve d_2 olarak belirtilmiş ve tüm eğilme kiriş numunelerinin eğilme dayanımı bu eşitlik ile saptanmıştır (TS EN 12390-5, 2002, s. 3).

$$f_{cf} = \frac{F\ x\ L}{d_1.d_2^2} \tag{12}$$

4.2.7. Mafsallı Kiriş Çalışma Prensibi ve Deney Düzeneği

4.2.7.1. Mafsallı kiriş deneyi prensibi

Birbirinin aynı boyutlarda iki beton bloğun tabanından geçen donatı çubuğu (aderansı belirlenecek olan) ile birbirine bağlanmasıyla elde edilen ve bağlantı noktasının en üst

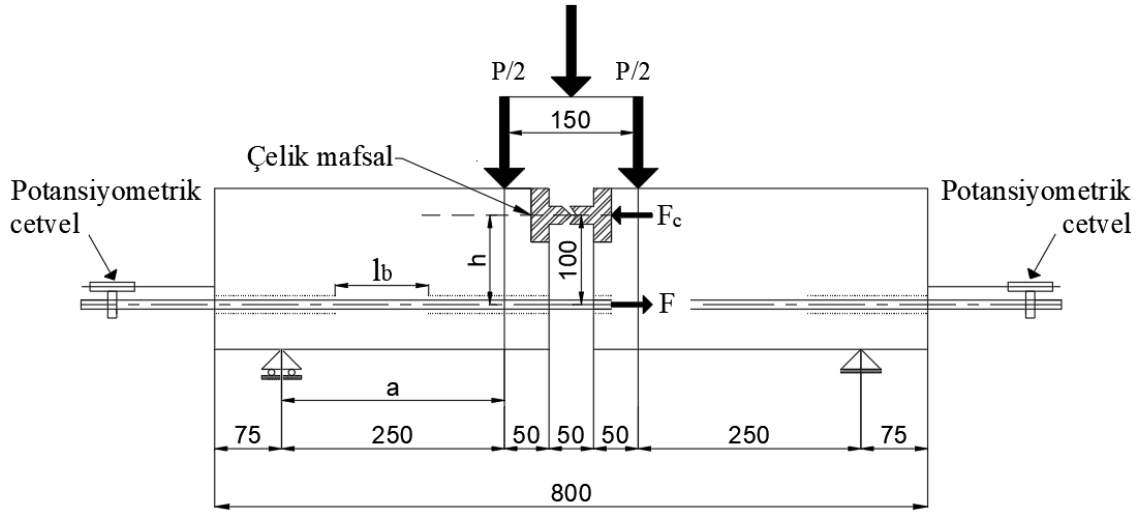
kısmına yerleştirilen çelik mafsal yardımıyla donatıda oluşan aderans dayanımını belirlemeye yarayan bir deneydir(BS 4449:2005+A2009, 2009). Mafsalın iki yarım kiriş ortasına eklenmesi; kirişte basınç kuvvetlerinin sürekliliğini sağlamakta ve basınç kuvvetlerinin bileşkesinin (F_c) konumunun tam olarak belli olmasından dolayı kurulan denge denklemleri ile çekme bölgesindeki aderansı belirlenecek olan donatıda oluşan kuvveti (F) net olarak bulmaya yardımcı olmaktadır.

Mafsallı kiriş deneyi iki noktadan yükleme ile basit eğilme altında yapılan ve deney süresince kirişin her iki tarafında da bulunan serbest donatı uçlarından potansiyometrik cetvel yardımıyla sıyrılma miktarının ölçüldüğü bir deney türüdür (BS 4449:2005+A2009, 2009).

Deneyde kullanılan LVDT ve yük hücresi *(loadcell*) yardımıyla yüklemeye göre sıyrılma miktarı da tespit edilebilmektedir. Ölçümler donatıda aderans çözünmesi (sıyrılma göçmesi), beton kırılması, donatının kopması sürecine veya düzeneğin izin verdiği maksimum sehime kadar devam ettirilmektedir.

Mafsallı kiriş deneylerinde deney sırasında geçekleşen aderans kaybı kirişin her iki yarım bloğunda eşit miktarda olmamakta bu nedenle iki taraftaki oluşan sıyrılma miktarı ölçümlerinden daha büyük olan değerin alınması gerekmektedir. Böylelikle daha güvenli sonuçlar elde edilmektedir.

Ersoy ve Özcebe'ye (aktaran Arslan, 2017, s. 16) göre "Teknik literatürde donatının betona göre 0,25 mm'lik sıyrılmasına karşılık gelen aderans gerilmesi emniyetli aderans gerilmesi olarak kabul edilmektedir". Ersoy ve Özcebe'ye göre 0,25 mm sıyrılma miktarında donatıda akma dayanımına ulaşılması durumunda kenetlenmenin sağlanmış olduğu eğer akma dayanımına ulaşılamamış ise donatıda sıyrılma gerçekleştiği kabul edilmektedir (aktaran Arslan, 2017, s. 12).



(Ölçüler mm olarak verilmiştir)

Şekil 58. Mafsallı kiriş detayları

Şekil 58'de gösterilmekte olan şematik kiriş düzeneğinde noktasal yük ve en yakın mesnet arasındaki mesafe a, donatı oluşan çekme kuvveti F, deney düzeneğindeki pistonun uyguladığı kuvvet P ve basınç kuvvetlerinin bileşkesi F_c olarak ifade edilmiştir. Mafsallı kirişte izostatik bir yapı oluşturulduğundan dolayı yapılan denge denklemlerinden donatıda oluşan F kuvveti bulunabilmektedir. Buna göre denge denklemlerinden elde edilen donatıdaki F kuvvetinin değeri Denklem 13'te gösterildiği üzere bulunmaktadır.

$$\frac{P\ x\ a}{2} = F\ x\ h \tag{13}$$

Denklem 13'te verilen ve çalışmada kullanılan kiriş için h=100 mm ve a=250 mm olduğundan;

$$F = 1{,}25\ x\ P \tag{14}$$

Denklem 14'te ki eşitlik elde edilmektedir (Beycioğlu, 2013, s. 90).

Donatı da oluşan F kuvveti bulunduktan sonra donatı anma çapının alanı olan A_n' ye bölünmesi ile Denklem 15'te gösterilen donatıda oluşan gerilme σ_s, bulunabilmektedir (BS 4449:2005+A2009, 2009, s. 22).

$$\sigma_s = \frac{1{,}25P}{A_n} \quad , \qquad Ø < 16\ mm\ için \tag{15}$$

Donatıda oluşan gerilme kuvveti bulunarak Denklem 16'daki;

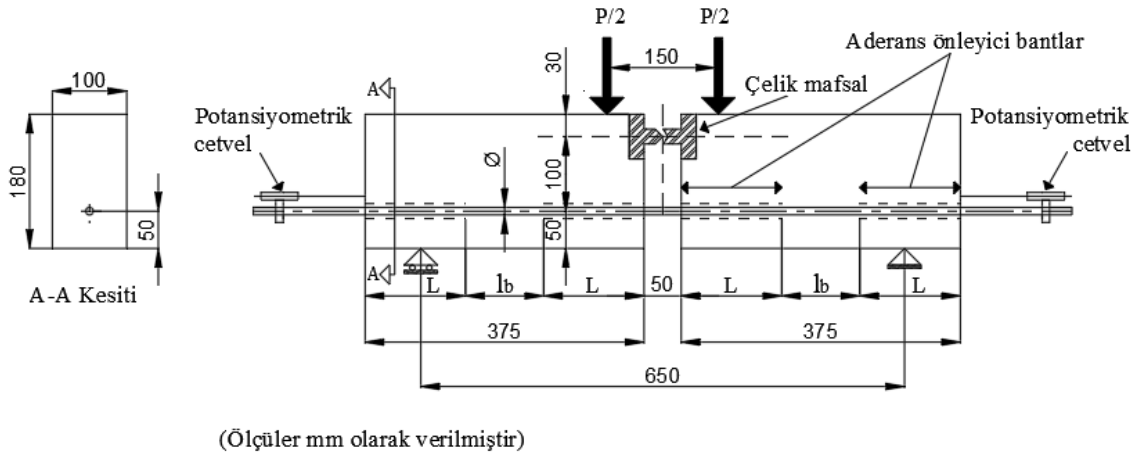
$$\tau_{maks} = \frac{\sigma_s Ø}{4l_b} \tag{16}$$

eşitlikte yerine yazılırsa donatıda oluşan maksimum aderans dayanımı olan τ bulunabilmektedir (Wight ve Macgregor, 2011, s. 367).

4.2.7.2. Mafsallı kiriş deney düzeneği

Deneyde kullanılan donatı çubuklarının çapının 10 mm olması sebebiyle mafsallı kiriş tercih edilirken BS 4449:2005+A2009 yönetmeliğine göre donatı çapı 16 mm'den küçük olan donatı çubukları için kullanılan tip A mafsallı kiriş türü seçilmiştir (BS 4449:2005+A2009, 2009). Deney için üretilen mafsallı kirişlere BS 4449:2005+A2009 yönetmeliğine uygun olarak iki noktadan yükleme yapılarak eğilme altında aderans dayanımı analiz edilmiştir (BS 4449:2005+A2009, 2009). Mafsallı kirişlere Şekil 59'da gösterildiği üzere kirişin her iki tarafından çıkan donatı çubuklarına potansiyometrik cetvel (LVDT) bağlanarak eğilme altında farklı aderans boylarına sahip çelik donatı çubuklarının sıyrılma miktarı tespit edilmiştir.

Şekil 59'da mafsallı kiriş deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiş, deney düzeneğinde aderans önleyici bantların uzunluğu L, kenetlenme boyu l_b, donatı çapı Ø ve yükler P/2 olarak belirtilmiş ve kirişin kesit ölçüleri verilmiştir.

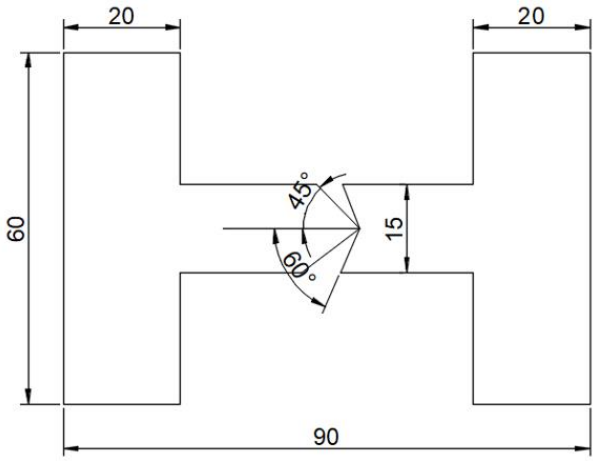


(Ölçüler mm olarak verilmiştir)

Şekil 59. Mafsallı kiriş deney düzeneği ve ölçüleri (Tip A)

Kaynak: BS 4449:2005+A2009 (2009, s. 17)

Mafsallı kirişte, mafsal tercih edilirken BS 4449:2005+A2009 yönetmeliğinde donatı çapı 16 mm'den küçük olan donatı çubukları için verilen tip A'ya uygun ölçüler kullanılmış ve kullanılan çelik mafsalın detayları Şekil 60'ta gösterilmiştir.

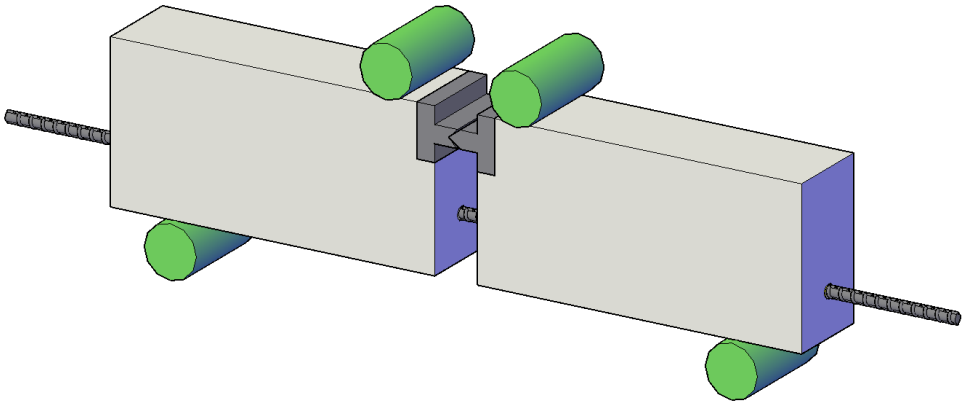


(Ölçüler mm olarak verilmiştir)

Şekil 60. Çelik mafsal ölçüleri (Tip A)

Kaynak: BS 4449:2005+A2009 (2009, s. 16)

Şekil 61'de iki noktalı yükleme altında (dört noktalı eğilme deneyi uygulanan) geometrik modellemesi yapılan mafsallı kirişin izometrik görünümü verilmektedir.



Şekil 61. İki noktadan yükleme altında olan kirişin modellemesi

Şekil 62'de laboratuvar ortamında hazır duruma getirilen deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 62. Laboratuvar ortamında kurulumu yapılan mafsallı kiriş deney düzeneği

5. BULGULAR

5.1. Taze Beton Çökme Deneyi Bulguları

Referans beton ve diğer tüm lifli beton karışımlarından elde edilen çökme değerleri TS EN 206+A2 yönetmeliğine uygun olarak değerlendirilmiş ve kıvamlarına göre sınıflandırılmıştır (TS EN 206+A2, 2021). Çökme deneyinin sonuçları Tablo 10'da gösterilmektedir.

Tablo 10. Lif içerikli beton karışımlarının çökme değerleri ve sınıfları

Beton Karışım Kodları	Ölçülen Çökme Değeri (mm)	Çökme (*Slump*) Sınıfı
MiPP0MaKPP0	170	S4
MiPP0,05MaKPP0	240	S5
MiPP0MaKPP1	80	S2
MiPP0MaKPP2	60	S2
MiPP0MaKPP4	20	S1
MiPP0,05MaKPP1	110	S3
MiPP0,05MaKPP2	50	S2
MiPP0,05MaKPP4	40	S1

Mikro PP liflerin kullanımının taze beton karışımını bir miktar ayrıştırdığı (kohezyonu azalttığı) çalışma sırasında gözlemlenmiş olup MiPP0,05MaKPP0 karışımındaki çökme değeri referans karışımı olan MiPP0MaKPP0 karışımındaki çökme değerine göre %41 oranında artmıştır. Bu durum işlenebilirlik ve kalıba yerleştirme açısından olumlu olarak gözükmektedir.

Yapılan lifli beton karışımlarında makro KPP liflerin beton karışımı içindeki oranı arttıkça çökme değerinin azaldığı dolayısıyla işlenebilirliği önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Karışımlar içinde en düşük çökme değeri, MiPP0MaKPP4 karışımında görülmüş olup referans karışımı olan MiPP0MaKPP0 karışımına göre %88 oranında azalmıştır. Beton döküm aşamasında da gözlemlendiği üzere makro liflerin taze beton karışımını bir arada tuttuğu (kohezyonu artırdığı) görülmüş olup karışım içindeki oranının artışı ile anlamlı ve azalan çökme değerleri görülmüştür.

Hibrit lif içeren karışımlarda ise makro lif miktarının artması ile orantılı olarak çökme değerlerinde azalma tespit edilmiş dolayısıyla işlenebilirlik azalmıştır. Hibrit lif içerikli

beton karışımlarında en çok azalan çökme değeri MiPP0,05MaKPP4 karışımında görülmüş ve referans beton karışımına göre yaklaşık %77 oranında azalma tespit edilmiştir. Mikro PP liflerin kullanımı taze beton karışımının kohezyonunu azaltmasına rağmen makro KPP liflerin eklenmesiyle oluşan hibrit lif karışımlarında taze betonun kohezyon özelliği artmıştır. Giderek artan oranda kullanılan makro KPP liflerin, hibrit lif içerikli beton karışımlarının çökme değerlerinde anlamlı düşüşlere neden olduğu gözlemlenmiştir.

5.2. Karışımların Beton Basınç Dayanımı Bulguları

Üretilen referans ve lif takviyeli küp beton numuneler 7 ve 28 günlük kür uygulaması sonrasında kür havuzundan çıkarılıp yüzeyinin kuruması sağlandıktan sonra basınç dayanımları için basınç dayanımı belirleme presinde test edilmiştir. Küp betonların 7 günlük basınç dayanımları Tablo 11'de gösterilmektedir.

Tablo 11. Lif içerikli beton karışımlarının 7 günlük küp basınç dayanımları

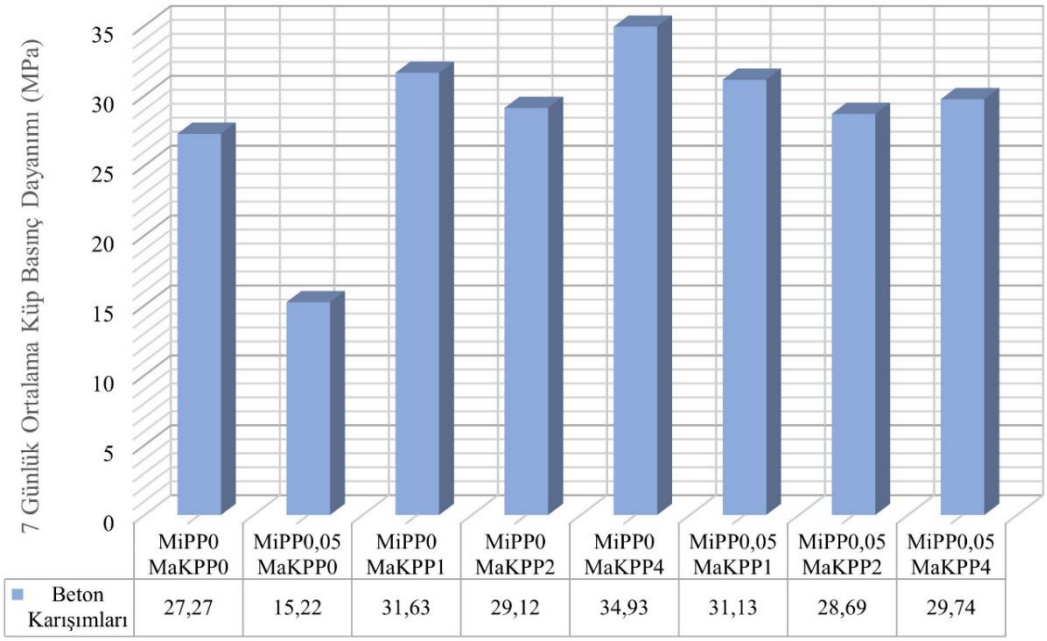
7 Günlük Küp Basınç Dayanımı $f_{ck,küp}$ (MPa)				
Beton Karışım Kodları	**Numune Numarası**			**Ortalama**
	1	**2**	**3**	
MiPP0MaKPP0	27,29	27,00	27,51	27,27
MiPP0,05MaKPP0	12,32	16,28	17,06	15,22
MiPP0MaKPP1	31,59	30,30	33,00	31,63
MiPP0MaKPP2	31,50	26,92	28,93	29,12
MiPP0MaKPP4	34,92	35,26	34,60	34,93
MiPP0,05MaKPP1	31,15	31,24	30,99	31,13
MiPP0,05MaKPP2	28,92	28,72	28,43	28,69
MiPP0,05MaKPP4	29,84	29,57	29,81	29,74

Elde edilen 7 günlük küp basınç dayanımı bulgularında, mikro PP lifli betonların basınç dayanımında önemli ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Tablo 11'de gösterildiği üzere mikro PP lifli betonların ortalama basınç dayanımını referans betona göre %44,2 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Makro KPP lifli betonlarda ise %6,8 ile %28,1 arasında bir dayanım artışı sağlamıştır. 7 günlük ortalama basınç dayanımını, referans betona kıyasla %28,1 oranında artırarak tüm karışımlar arasında en çok artışı sağlayan karışım MiPP0MaKPP4 olmuştur. Basınç dayanımında düşüşe neden olan mikro PP liflerin negatif etkisinin, makro KPP liflerin eklenmesiyle elde edilen hibrit lif karışımlarında azaldığı görülmüş tüm hibrit karışımların basınç dayanımında referans

betona kıyasla dayanım artışı görülmüştür. Böylelikle 7 günlük ortalama basınç dayanımında, sadece mikro PP lif içeren MiPP0,05MaKPP0 karışımına kıyasla hibrit lif içerikli betonlarda %88,5 ile %104,5 arasında artış sağlanmıştır.

Sadece mikro lif içeren (MiPP0,05MaKPP0) 7 günlük beton karışımına göre %104,5 oranıyla en çok basınç dayanım artışı sağlayan hibrit karışım MiPP0,05MaKPP1 olmuştur.

Ayrıca referans betona kıyasla %14,2 oranıyla, 7 günlük en çok ortalama basınç dayanım artışını sağlayan hibrit lif karışımı da MiPP0,05MaKPP1 olmuştur. Şekil 63'te beton karışımlarının 7 günlük küp basınç dayanımlarının grafiği verilmiştir.



Şekil 63. Çalışmada üretilen referans ve lifli betonların 7 günlük ortalama küp basınç dayanımları

Tablo 11'de gösterildiği üzere 7 günlük ortalama küp basınç dayanımına benzer şekilde 28 günlük ortalama basınç dayanımları tespit edilmiş ve Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Lif içerikli beton karışımlarının 28 günlük küp basınç dayanımları

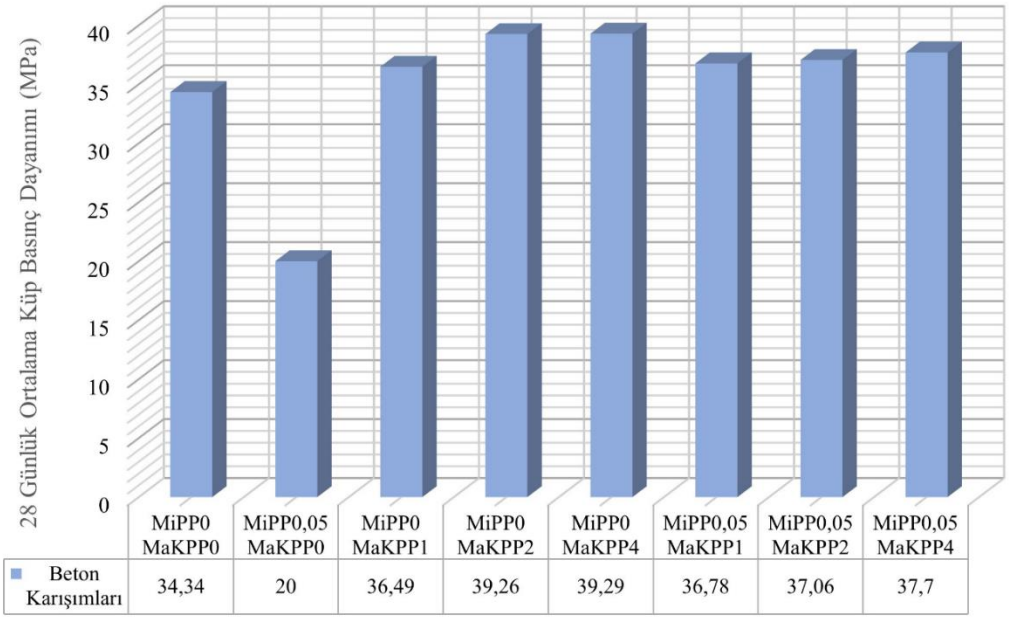
28 Günlük Küp Numune Basınç Dayanımı $f_{ck,küp}$ (MPa)				
Beton Karışım Kodları	**Numune Numarası**			**Ortalama**
	1	**2**	**3**	
MiPP0MaKPP0	34,97	34,79	33,26	34,34
MiPP0,05MaKPP0	20,26	19,94	19,80	20,00
MiPP0MaKPP1	37,47	34,30	37,69	36,49
MiPP0MaKPP2	38,63	40,44	38,71	39,26
MiPP0MaKPP4	41,21	38,63	38,02	39,29
MiPP0,05MaKPP1	36,65	38,94	34,75	36,78
MiPP0,05MaKPP2	37,52	37,55	36,11	37,06
MiPP0,05MaKPP4	37,71	37,70	37,68	37,70

Yalnızca mikro PP lifli betonlarda 28 günlük ortalama basınç dayanımında referans betona kıyasla %41,8 oranında dayanım azalması görülmüştür. Sadece makro KPP lif içeren karışımlarda ise referans betona kıyasla %6,3 ile %14,4 arasında basınç dayanım artışı tespit edilmiştir. 28 günlük ortalama dayanımlarda MiPP0MaKPP0 betonuna kıyasla en çok basınç dayanım artışı MiPP0MaKPP4 karışımında gerçekleşmiş onu benzer oranla MiPP0MaKPP2 karışımı takip etmiştir.

28 günlük hibrit lif içerikli betonlarda referans betona kıyasla en çok ortalama basınç dayanım artışı %9,8 ile MiPP0,05MaKPP4 olmuş bunu sırayla MiPP0,05MaKPP2 ve MiPP0,05MaKPP1 takip etmiştir.

MiPP0,05MaKPP0 betonuna kıyasla hibrit lif içerikli betonların 28 günlük ortalama basınç dayanımlarında %83,9 ile %88,5 oranlarında dayanım artışı gözlemlenmiştir.

28 günlük ortalama basınç dayanımlarında MiPP0,05MaKPP0 betonuna kıyasla %88,5 ile en çok basınç dayanım artışı sağlayan karışım MiPP0,05MaKPP4 olmuştur. Şekil 64'te karışımların 28 günlük küp basınç dayanımlarının grafiği verilmiştir.



Şekil 64. Çalışmada üretilen referans ve lifli betonların 28 günlük ortalama küp basınç dayanımları

5.3. Çelik Donatı Çekme Deneyi Bulguları

Çalışmada kullanılan çelik donatı çapında (10 mm) üç adet donatı çubuğuna laboratuvar ortamında çelik çekme deneyi uygulanmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınarak bu çubukların fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 13'te gösterilmiştir.

Tablo 13. Çalışmada kullanılan çelik donatı çubuklarının fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellikler	**S420 Nervürlü Çelik Donatı Çubuğu**
Anma Çapı (mm)	10
Anma Çapı Alanı (mm^2)	78,5
Ort. Akma Dayanımı (MPa)	474
Ort. Çekme Dayanımı (MPa)	591
Ort. Çekme/Akma Dayanım Oranı	1,25
Ort. Kopma Uzaması (%)	%51
Ort. Birim Ağırlık (kg/m)	0,620

5.4. Eğilme Dayanımı Deneyi Bulguları

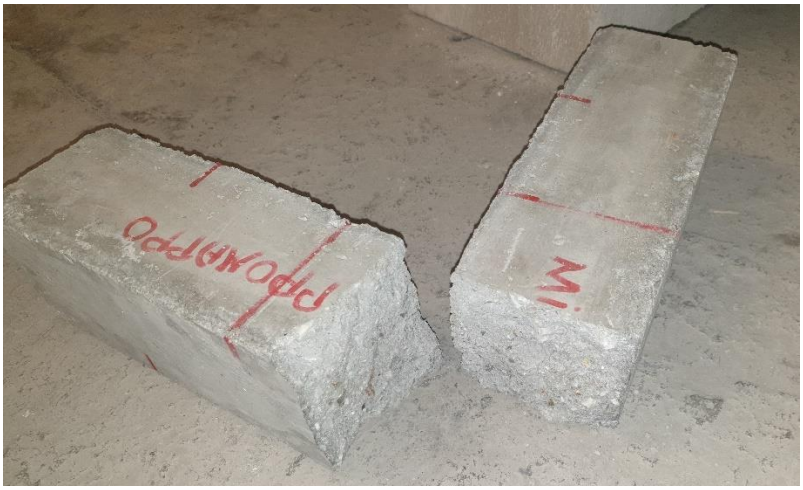
Deney sürecinde elde edilen, çelik donatı içermeyen, 24 adet prizmatik beton numunenin eğilme dayanımlarının belirlenmesi için, numuneler iki noktadan yükleme altında eğilme etkisine maruz bırakılmış ve her bir numunenin mesnetler arası açıklığın

tam orta noktasına potansiyometrik cetvel yerleştirilerek eğilme dayanımı ile buna karşılık gelen sehim miktarı ölçülmüştür. Şekil 65'te de görüldüğü üzere eğilme deneyi sonrası yapılan gözlemlerde lif içermeyen MiPP0MaKPP0 kirişleri maksimum yüke ulaştığında yükleme açıklığından çatlayarak ikiye ayrılıp kırılmıştır. Aynı şekilde MiPP0,05MaKPP0 kirişleri de maksimum kuvvete ulaştığında yükleme kolları arasından çatlayarak kırılıp iki parçaya ayrılmıştır. Diğer tüm kirişler de maksimum kuvvet sonrası çatlama yine yükleme açıklığında gerçekleşmiş fakat beton parçalanmadan tek parça halinde kalarak deney sonlanmıştır. Şekil 65'te MiPP0MaKPP0 kirişinin deney sonundaki görünümü verilmektedir.



Şekil 65. MiPP0MaKPP0 kirişi deney sonu görünümü

Şekil 65'te görüldüğü üzere MiPP0MaKPP0 kirişi herhangi bir donatı veya lif içeriği olmadığından beton oldukça gevrek bir davranış göstererek maksimum yük sonrası çatlamış ve ikiye ayrılmıştır. Şekil 66'da göçme gerçekleşen MiPP0MaKPP0 kirişine ait görünüm verilmektedir.



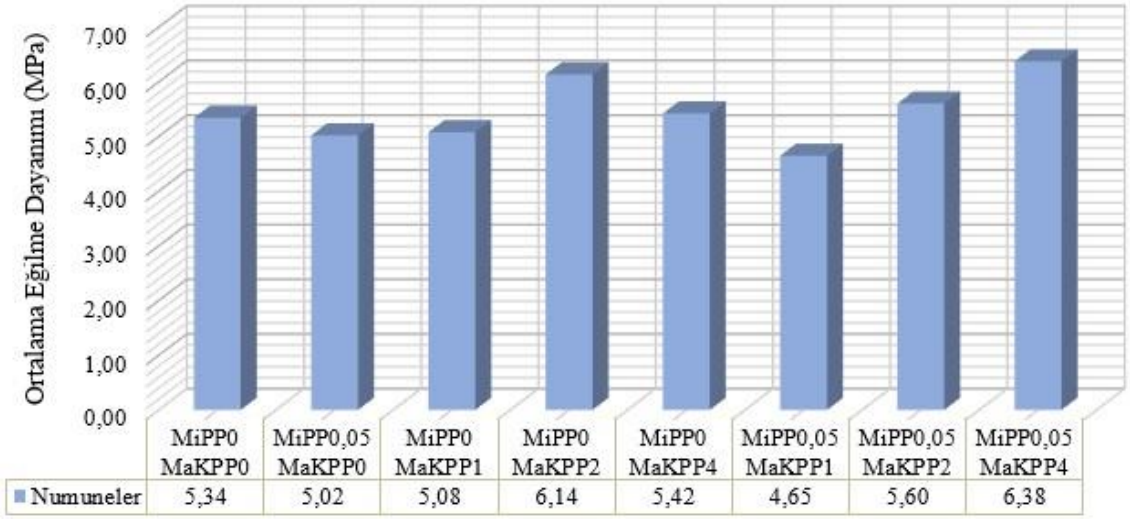
Şekil 66. Göçme gerçekleşen MiPP0MaKPP0 kirişi

Hibrit lifli betonlar makro çatlaklara köprüleme yaparak maksimum dayanım sonrası ani göçmeyi engellemiştir. Hibrit lif içeriğine sahip MiPP0,05MaKPP4 kirişinde deney sonu çatlak gözlemlenmiş fakat iki parçaya bölünmeden daha sünek bir davranış göstermiştir. Şekil 67'de MiPP0,05MaKPP4 kirişine ait yükleme sonrası numune görünümü verilmiştir.



Şekil 67. MiPP0,05MaKPP4 kirişinde çatlağın köprülenmesi

Her bir kirişin eğilme dayanımı ortalamaları belirlenmiş ve Şekil 68'de gösterilmiştir.



Şekil 68. Kirişlerin ortalama eğilme dayanımları

Ortalama eğilme dayanımları incelendiğinde MiPP0MaKPP0 (referans) kirişine göre en yüksek dayanım %19,5 artış ile hibrit lif karışımı olan MiPP0,05MaKPP4 kirişinde ve %15 artış ile sadece makro lif içeren MiPP0MaKPP2 kirişinde görülmüş olup bunu MiPP0,05MaKPP2 kirişi takip etmiştir.

Eğilme dayanımında, MiPP0MaKPP0 kirişine göre yaklaşık %13 azalma ile en çok düşüş görülen hibrit lif içerikli MiPP0,05MaKPP1 kirişi olarak tespit edilmiş olup bunu MiPP0,05MaKPP0 kirişi takip etmiştir.

Yüklemeyi otomatik olarak ayarlayan pres cihazı pistonu kirişin dayandığı maksimum kuvvete kadar inip çatlama sonrası maksimum yükte azalma olmaya başladığı andan itibaren yüklemeyi bırakmaktadır. Bundan dolayı kirişlerde maksimum yük sonrası davranışı temsili olarak belirtmek için maksimum yük noktasından maksimum yükün %85'ine denk gelen yüke doğru çizgi eklenmiştir. Bu durum enerji tüketme kapasitesi olan yük-sehim grafiği altında kalan alanda herhangi bir değişiklik oluşturmamış ve hiçbir sonucu değiştirmemiştir.

Maksimum yükte gerçekleşen eğilme dayanımları, aynı zamanda maksimum yükte (maksimum eğilme dayanımında) gerçekleşen sehim miktarları ve yük-sehim grafiği altında kalan alan olan enerji tüketme kapasiteleri belirlenmiş olup Tablo 14'te gösterilmektedir.

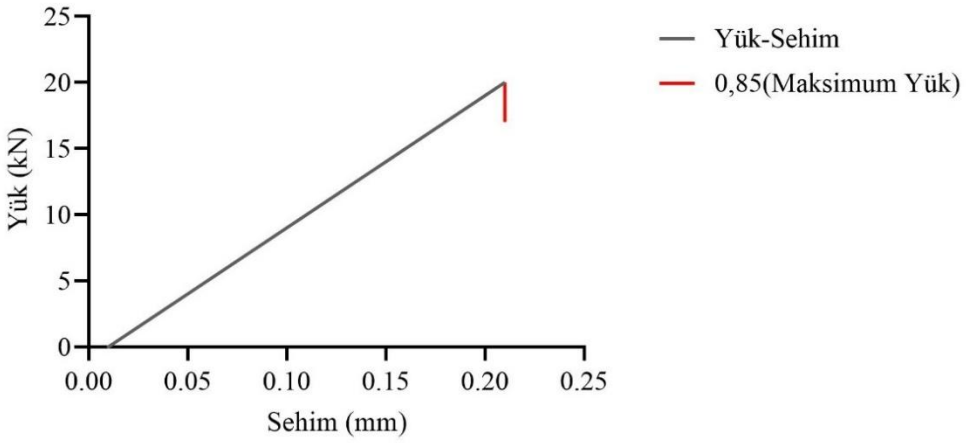
Tablo 14. Eğilme dayanımına ait deney sonuçları

Beton Karışım Kodları	Numune No	Maks. Yük (kN)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ort. Eğilme Dayanımı (MPa)	Maks. Yükte Sehim (mm)	Maks. Yükte Ort. Sehim (mm)	Enerji Tüketme Kapasitesi (kN.mm)	Ort. Enerji Tüketme Kapasitesi (kN.mm)
MiPP0MaKPP0	1	19,29	5,79	5,34	0,5	0,43	3,58	2,81
	2	16,60	4,98		0,47		3,12	
	3	17,53	5,26		0,34		1,73	
MiPP0,05MaKPP0	1	15,26	4,58	5,02	0,37	0,52	2,05	2,55
	2	16,37	4,91		0,47		2,29	
	3	18,59	5,58		0,71		3,31	
MiPP0MaKPP1	1	15,89	4,77	5,08	1,37	0,71	5,98	3,37
	2	16,58	4,97		0,34		1,79	
	3	18,33	5,5		0,42		2,34	
MiPP0MaKPP2	1	18,01	5,4	6,14	0,34	0,43	2,02	2,81
	2	20,84	6,25		0,51		3,09	
	3	22,52	6,76		0,44		3,33	
MiPP0MaKPP4	1	18,00	5,4	5,42	0,35	0,47	1,99	3,02
	2	18,36	5,51		0,53		3,07	
	3	17,87	5,36		0,54		4,02	
MiPP0,05MaKPP1	1	13,93	4,18	4,65	0,41	0,5	1,91	2,51
	2	14,29	4,29		0,53		2,16	
	3	18,27	5,48		0,57		3,46	
MiPP0,05MaKPP2	1	17,29	5,19	5,6	0,37	0,4	1,9	2,34
	2	19,69	5,91		0,41		2,52	
	3	19,05	5,71		0,42		2,61	
MiPP0,05MaKPP4	1	20,57	6,17	6,38	0,66	0,41	5,55	3,8
	2	21,96	6,59		0,37		2,23	
	3	21,23	6,37		0,22		3,61	

Yapılan deney sonuçlarına göre maksimum yükteki sehim miktarlarında, tüm karışımlarda yaklaşık olarak aynı sonuçlar elde edilmiş ve belirgin bir fark oluşturan değer saptanamamıştır.

Ortalama enerji tüketme kapasiteleri incelendiğinde ise MiPP0MaKPP0 betonuna göre %35,2 yükselme ile en çok artış sağlayan MiPP0,05MaKPP4 kirişleri olmuş bunu yaklaşık %20 ile MiPP0MaKPP1 ve yaklaşık %7,5 artış ile MiPP0MaKPP4 kirişleri takip etmiştir. Ortalama enerji tüketme kapasitesinde en çok azalma ise yaklaşık %16,7 ile MiPP0,05MaKPP2 kirişlerinde kaydedilmiştir.

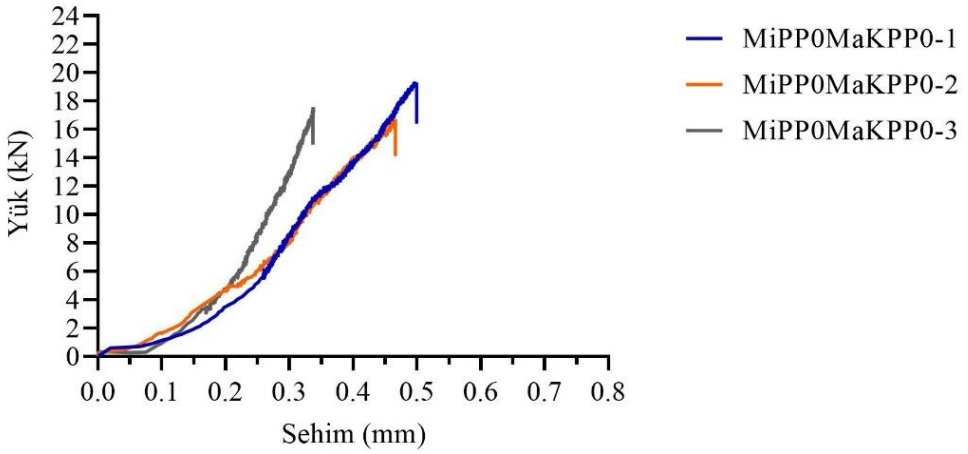
Eğilme kirişleri mesnet açıklığının orta noktasına (kirişin merkez noktası) yerleştirilen potansiyometrik cetvel ile tüm karışımlara ait yük-sehim grafiği elde edilmiştir. Her bir karışım türü için üçer adet yük-sehim grafiği verisi alınmıştır. Kirişlerde maksimum yükten sonraki davranış otomatik eğilme cihazında saptanamadığı için temsili olarak Şekil 69'da gösterildiği gibi, kırmızı çizgiyle çizilen yerde maksimum yükte ulaşılan sehim sabit kalarak her bir numunenin kendi maksimum yükünün 0,85 katı olan yaklaşık kopma noktası deney sonucu çıkan grafiklere eklenmiştir.



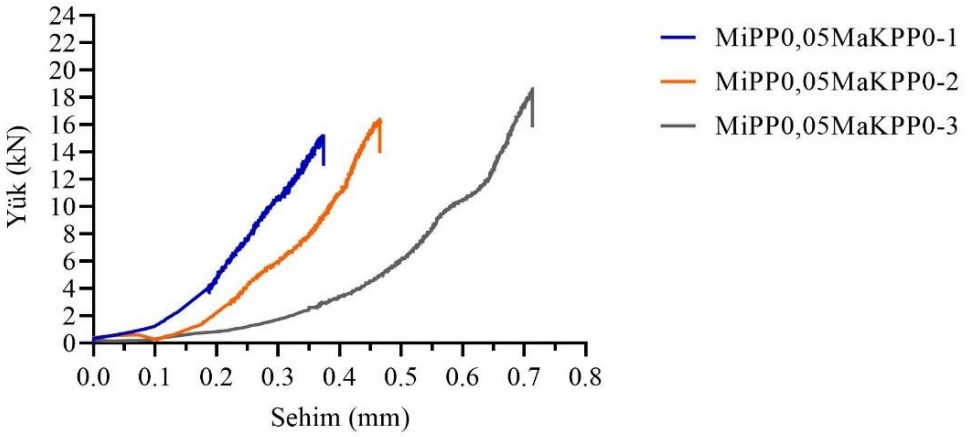
Şekil 69. Yük-sehim grafiğinde maksimum yük sonrası davranışı

Yük-sehim grafikleri; MiPP0MaKPP0 karışımı için Şekil 70'te, MiPP0,05MaKPP0 karışımı için Şekil 71'de, MiPP0MaKPP1 karışımı için Şekil 72'de, MiPP0MaKPP2 karışımı için Şekil 73'te, MiPP0MaKPP4 karışımı için Şekil 74'te verilmiştir.

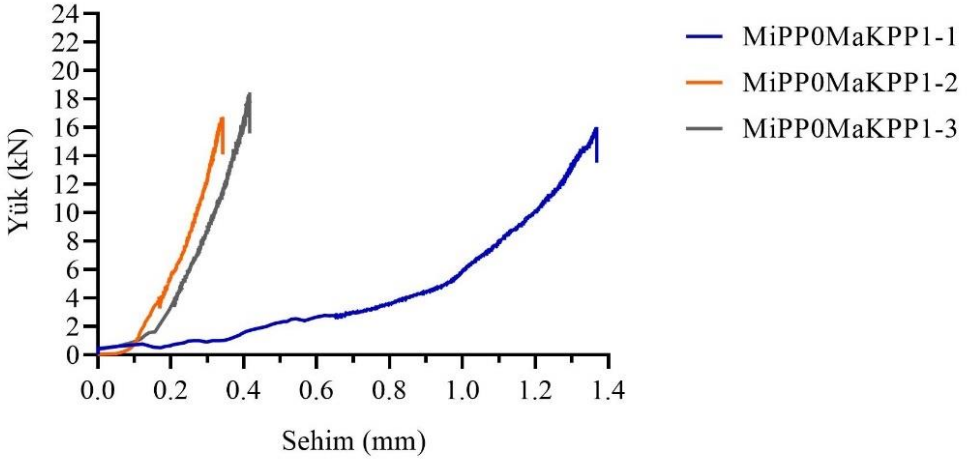
Ayrıca hibrit PP lifli kirişlerin yük-sehim grafikleri; MiPP0,05MaKPP1 karışımı için Şekil 75'te, MiPP0,05MaKPP2 karışımı için Şekil 76'da ve MiPP0,05MaKPP4 karışımı için Şekil 77'de verilmiştir.



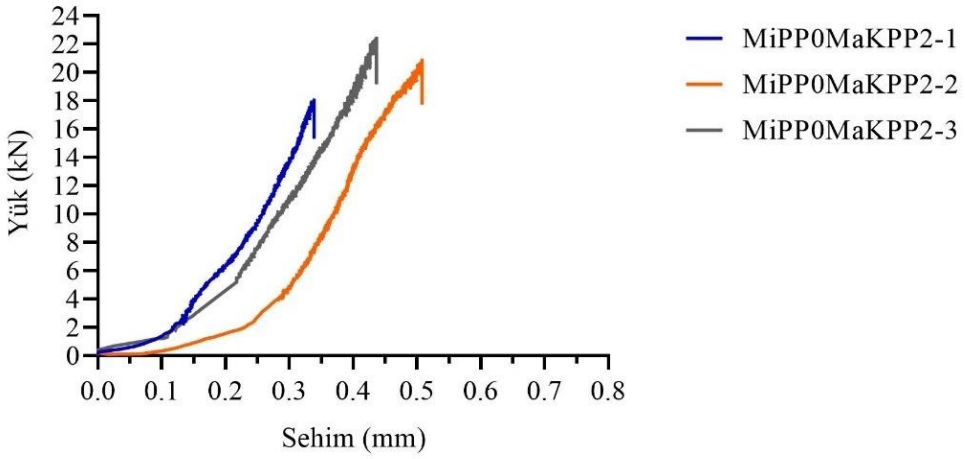
Şekil 70. MiPP0MaKPP0 kirişlerinin yük-sehim grafiği



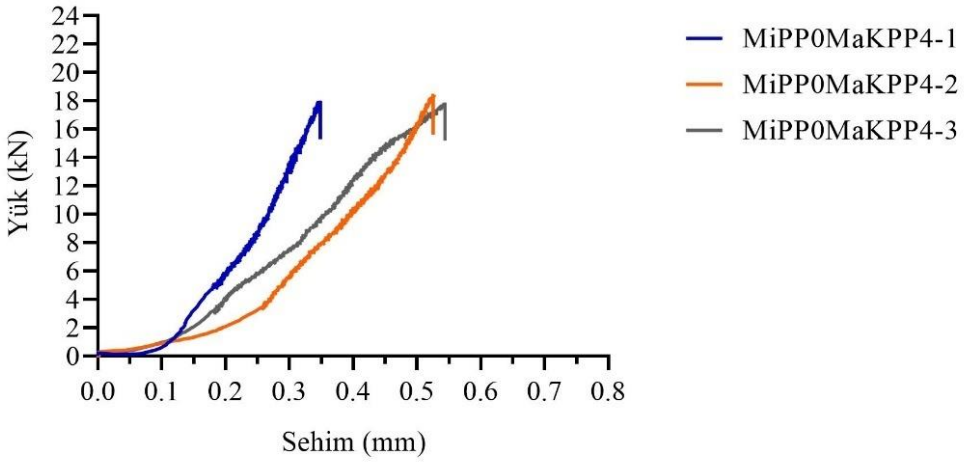
Şekil 71. MiPP0,05MaKPP0 kirişlerinin yük-sehim grafiği



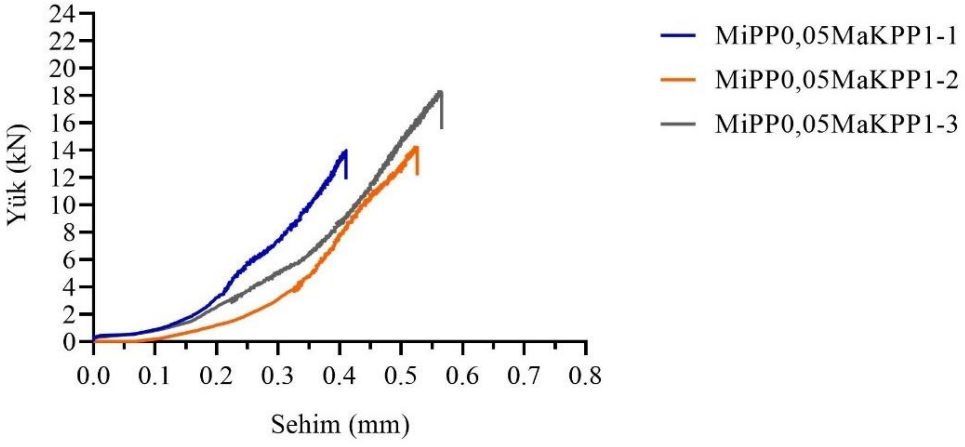
Şekil 72. MiPP0MaKPP1 kirişlerinin yük-sehim grafiği



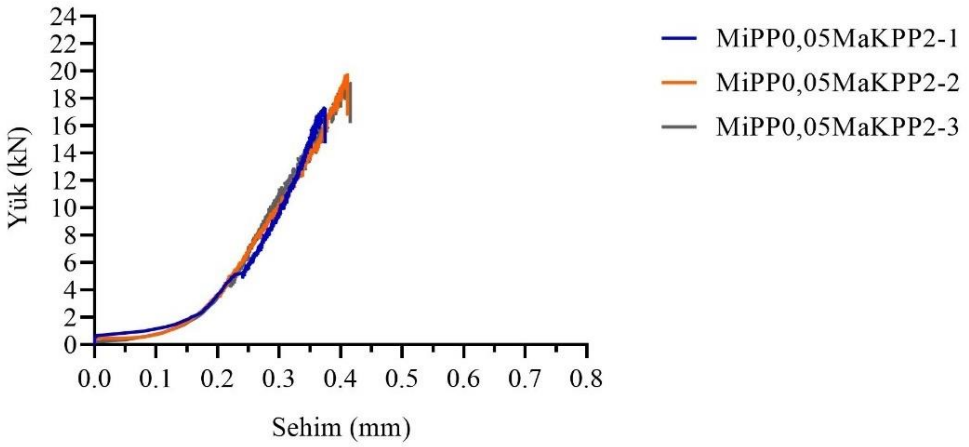
Şekil 73. MiPP0MaKPP2 kirişlerinin yük-sehim grafiği



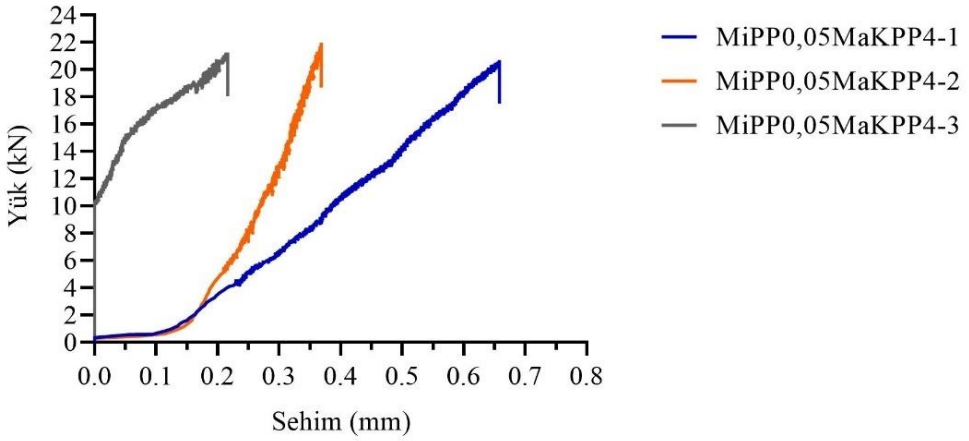
Şekil 74. MiPP0MaKPP4 kirişlerinin yük-sehim grafiği



Şekil 75. MiPP0,05MaKPP1 kirişlerinin yük-sehim grafiği



Şekil 76. MiPP0,05MaKPP2 kirişlerinin yük-sehim grafiği



Şekil 77. MiPP0,05MaKPP4 kirişlerinin yük-sehim grafiği

Kirişlerin yük-sehim grafikleri incelendiğinde aynı karışımdaki yük-sehim eğrilerinin farklı şekillerde olabileceği bunun sebebi olarak da betonun homojen bir karışım olmaması gösterilebilmektedir. Yük-sehim eğrileri neredeyse çakışmakta olan hibrit lif içeriğine sahip MiPP0,05MaKPP2 kirişlerinin daha homojen bir çıktı verdiği görülmektedir.

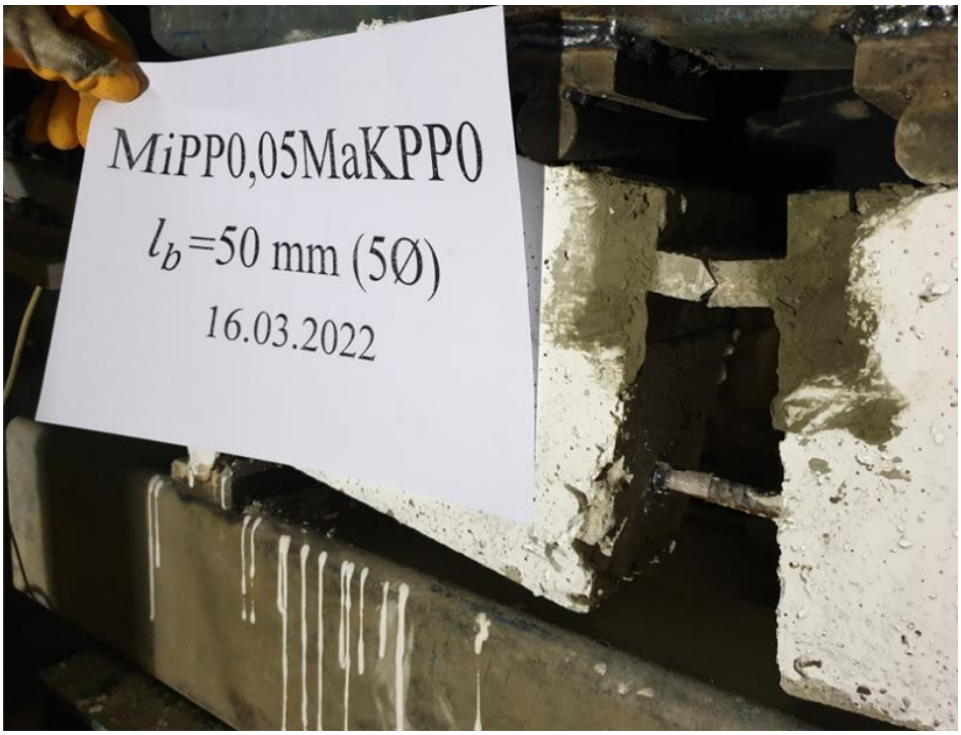
5.5. Mafsallı Kiriş Deneyi Bulguları

Dört noktalı eğilme etkisi altında olan tüm mafsallı kirişlerde, deneyin yapıldığı düzeneğin sağlayabileceği maksimum sehim miktarına ulaşılıncaya kadar (5cm) yükleme devam etmiştir. Şekil 78'de de görüldüğü üzere tüm kirişlerde, kiriş orta-alt yüzeyi düzenekteki kutu profile temas edene kadar (maksimum 5 cm sehim) yüklemeye devam edilmiştir.



Şekil 78. Deneyi tamamlanan mafsallı kiriş

Deney sonlanırken beton içerisinde kalan aderans kesici PVC bantların da ortaya çıkmasıyla sıyrılma fiziksel olarak da gözlemlenebilmiştir (Şekil 79).

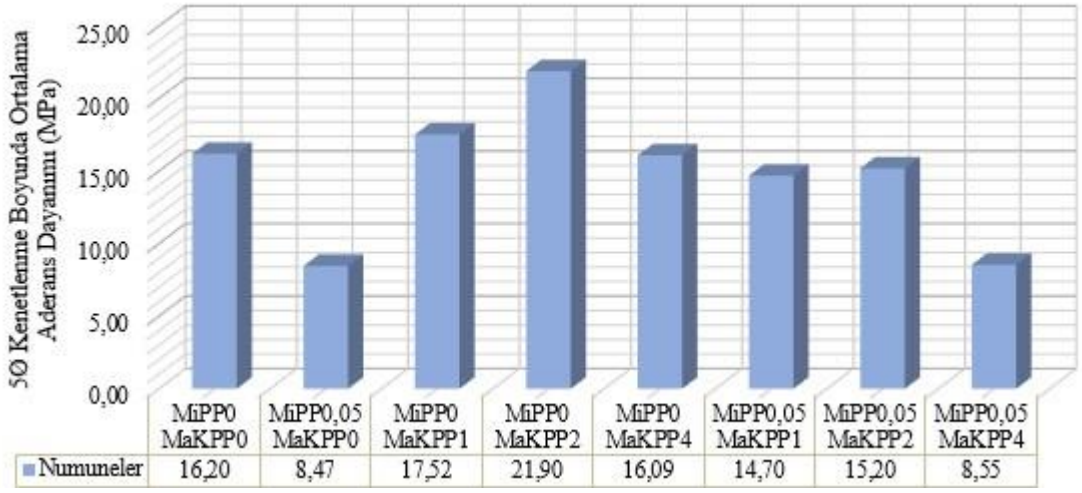


Şekil 79. Deneyi sonlanan ve sıyrılan mafsallı kiriş

Çalışmada her bir karışım türünde, aderans dayanımının daha net anlaşılabilmesi amacıyla iki farklı aderans boyunda (50-100 mm) kenetlenme boyuna sahip kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği elde edilmiştir.

5.5.1. 50 mm (5Ø) Kenetlenme Boyuna Sahip Mafsallı Kirişlerin Deney Bulguları

Gerçekleştirilen tüm mafsallı kiriş deneyleri sonrası 50 mm kenetlenme boyuna sahip kirişlerin ortalama aderans dayanımına ait grafik Şekil 80'de verilmektedir.



Şekil 80. 5Ø kenetlenme boyuna sahip mafsallı kirişlerin ortalama aderans dayanımları

50 mm (5Ø) kenetlenme boyuna sahip mafsallı kirişlerin ortalama aderans dayanımları incelendiğinde MiPP0MaKPP0 referans kirişine göre en çok dayanım artışı yaklaşık %35,2 artış ile MiPP0MaKPP2 kirişlerinde görülmüş onu yaklaşık %8,1 artış ile MiPP0MaKPP1 kirişleri takip etmiştir.MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre en çok dayanım azalması yaklaşık %47,7 düşüş ile MiPP0,05MaKPP0 ve %47,2 düşüş ile hibrit MiPP0,05MaKPP4 kirişleri takip etmiştir. Böylelikle deneyde 5Ø kenetlenme boyunda ortalama aderans dayanımları incelendiğinde, en yüksek aderans dayanımına ulaşan karışım MiPP0MaKPP2 ve en düşük dayanıma ulaşan karışım da MiPP0,05MaKPP0 olmuştur. Hibrit veya tekil liflerin miktarının artmasıyla aderans dayanımında sürekli artan veya azalan bir ilişki olmadığı görülmüştür. Ayrıca MiPP0MaKPP4 kirişlerinin ortalama aderans dayanımının referans betonuna yakın olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 15'te 5Ø kenetlenme boyundaki donatılara sahip kirişlere ait tüm deneysel bulgular verilmekte olup, l_b kenetlenme boyunu, F_{maks} donatıda oluşan maksimum kuvveti, $\sigma_{s\,maks}$ donatıda oluşan maksimum gerilmeyi, τ_{maks} maksimum aderans gerilmesini (aderans dayanımı), S_{maks} maksimum aderans gerilmesinde gerçekleşen sıyrılma miktarını belirtmektedir. 0,25 mm sıyrılma miktarına ulaşana kadar donatıdaki akma dayanımına (474 MPa) ulaşılma durumuna göre sıyrılma durumu da belirtilmiştir.

Tablo 15. Kenetlenme boyu 50 mm (5Ø) olan mafsallı kirişlere ait deneysel veriler

Karışım Kodu	l_b (mm)	Numune No	F_{maks} (kN)	$\sigma_{s\,maks}$ (MPa)	Ort. $\sigma_{s\,maks}$ (MPa)	τ_{maks} (MPa)	Ort. τ_{maks} (MPa)	S_{maks} (mm)	Ort. S_{maks} (mm)	Deney Sonu Donatı Durumu
MiPP0MaKPP0	50	1	15,12	192,55	324,06	9,63	16,20	0,15	0,32	Sıyrıldı
		2	32,64	415,85		20,79		0,33		Sıyrıldı
		3	28,56	363,78		18,19		0,48		Sıyrıldı
MiPP0,05MaKPP0	50	1	14,46	184,23	169,43	9,21	8,47	0,28	0,38	Sıyrıldı
		2	9,78	124,65		6,23		0,29		Sıyrıldı
		3	15,65	199,40		9,97		0,56		Sıyrıldı
MiPP0MaKPP1	50	1	23,85	303,81	350,44	15,19	17,52	1,66	0,97	Sıyrıldı
		2	26,04	331,73		16,59		0,02		Sıyrıldı
		3	32,64	415,78		20,79		1,24		Sıyrıldı
MiPP0MaKPP2	50	1	34,57	440,39	438,09	22,02	21,90	0,85	0,96	Sıyrıldı
		2	35,94	457,77		22,89		1,23		Sıyrıldı
		3	32,67	416,12		20,81		0,80		Sıyrıldı
MiPP0MaKPP4	50	1	30,28	385,69	321,82	19,28	16,09	1,05	0,89	Sıyrıldı
		2	23,54	299,90		15,00		0,75		Sıyrıldı
		3	21,97	279,87		13,99		0,87		Sıyrıldı
MiPP0,05MaKPP1	50	1	22,94	292,18	293,90	14,61	14,70	0,56	0,61	Sıyrıldı
		2	21,93	279,39		13,97		0,77		Sıyrıldı
		3	24,35	310,14		15,51		0,51		Sıyrıldı
MiPP0,05MaKPP2	50	1	28,12	358,25	303,96	17,91	15,20	0,71	0,73	Sıyrıldı
		2	18,68	238,01		11,90		0,48		Sıyrıldı
		3	24,77	315,60		15,78		0,99		Sıyrıldı
MiPP0,05MaKPP4	50	1	8,81	112,18	170,97	5,61	8,55	0,05	0,35	Sıyrıldı
		2	15,96	203,29		10,16		0,55		Sıyrıldı
		3	15,50	197,44		9,87		0,46		Sıyrıldı

5Ø kenetlenme boyundaki kirişlerde deneyde kullanılan donatının akma dayanımı ortalamasına (474 MPa) ulaşabilen herhangi bir kiriş olmadığı görülmüştür. Deneyde 50 mm kenetlenme boyunda 0,25 mm sıyrılma miktarından önce donatı akma dayanımına ulaşılamadığından tüm numunelerde aderans kaybolmuş ve hepsi sıyrılma göçmesi ile sonuçlanmıştır.

5Ø kenetlenme boyunda ortalama aderans dayanımında (maksimum aderans gerilmesi) en çok sıyrılma miktarı MiPP0MaKPP1 kirişlerinde görülmüştür. MiPP0MaKPP1 kirişleri ortalama aderans dayanımında MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre %8,1 artış sağlamış fakat ortalama sıyrılma miktarı MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre yaklaşık %203 artış göstermiştir. 50 mm kenetlenme boyunda ortalama aderans dayanımında en fazla dayanım artışı (%35,2) görülen MiPP0MaKPP2 kirişlerinin, MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre sıyrılma miktarı %200 artarak ikinci en büyük ortalama sıyrılma miktarına sahip olduğu belirlenmiştir. MiPP0MaKPP4 yalnızca makro lifli kirişler arasında en düşük ortalama aderans dayanımına sahip olan karışım olmuş, MiPP0MaKPP0 kirişlerine yakın bir dayanım sergilemiş fakat sıyrılma miktarı %178,1 oranında artmıştır.

5Ø kenetlenme boyunda hem en düşük aderans dayanımı hem de MiPP0MaKPP0 kirişleri ortalamasına göre daha fazla sıyrılma miktarına sahip olan karışım kodu yalnızca mikro lif içeren MiPP0,05MaKPP0 olmuştur.

5Ø kenetlenme boyunda MiPP0,05MaKPP1, MiPP0,05MaKPP2 ve MiPP0,05MaKPP4 hibrit lif içeren kirişlerin ortalama aderans dayanımlarının MiPP0MaKPP0 kirişlerinden daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Hibrit lifler içerisinde en yüksek aderans dayanımına ulaşan kirişler MiPP0,05MaKPP2 kirişleri olmuş bunu sırasıyla MiPP0,05MaKPP1 ve MiPP0,05MaKPP4 takip etmiştir. Hibrit liflerde ortalama aderans dayanımında MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre MiPP0,05MaKPP1 kirişlerinde %9,3 azalma, MiPP0,05MaKPP2 kirişlerinde %6,2 azalma ve MiPP0,05MaKPP4 kirişlerinde %47,2 azalma tespit edilmiştir. Hibrit lif içerikli kirişlerin ortalama sıyrılma miktarları aderans dayanımı ile orantılı olarak arttığı gözlemlenmiş olup en yüksek sıyrılma miktarı sırasıyla MiPP0,05MaKPP2, MiPP0,05MaKPP1 ve MiPP0,05MaKPP4 kirişlerinde tespit edilmiştir.

5Ø kenetlenme boyunda yalnızca makro lif içeren MiPP0MaKPP1, MiPP0MaKPP2 ve MiPP0MaKPP4 kirişlerinin hibrit lif karışımları olan MiPP0,05MaKPP1,

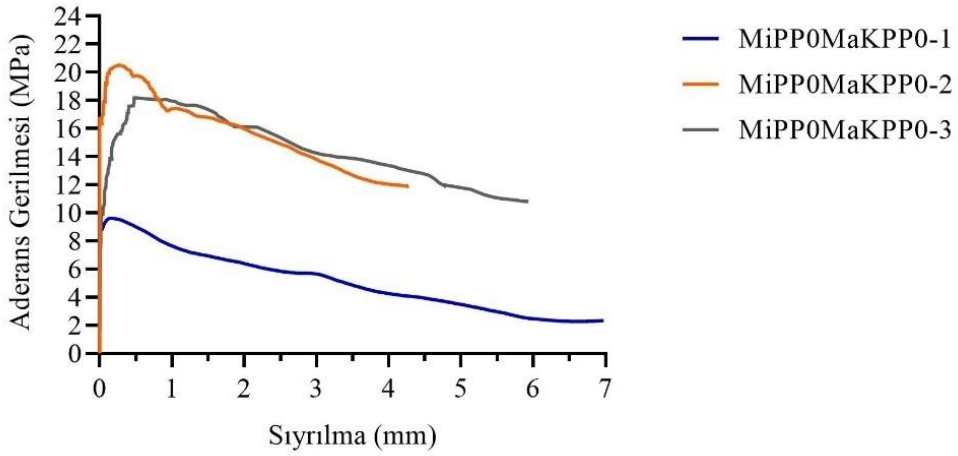
MiPP0,05MaKPP2 ve MiPP0,05MaKPP4 olan kirişlere göre daha yüksek ortalama aderans dayanımı verdiği görülmektedir. Yalnızca mikro lif içeren MiPP0,05MaKPP0 ortalama aderans dayanımı ise tüm karışımlara göre en düşük dayanımı sergilemiştir.

5Ø kenetlenme boyundaki hibrit lifli kirişler MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre daha düşük ortalama aderans dayanımına sahip olmalarına rağmen ortalama sıyrılma miktarları incelendiğinde MiPP0,05MaKPP1 kirişlerinde %90,6, MiPP0,05MaKPP2 kirişlerinde %128,1 ve MiPP0,05MaKPP4 kirişlerinde %9,4 artış tespit edilmiştir.

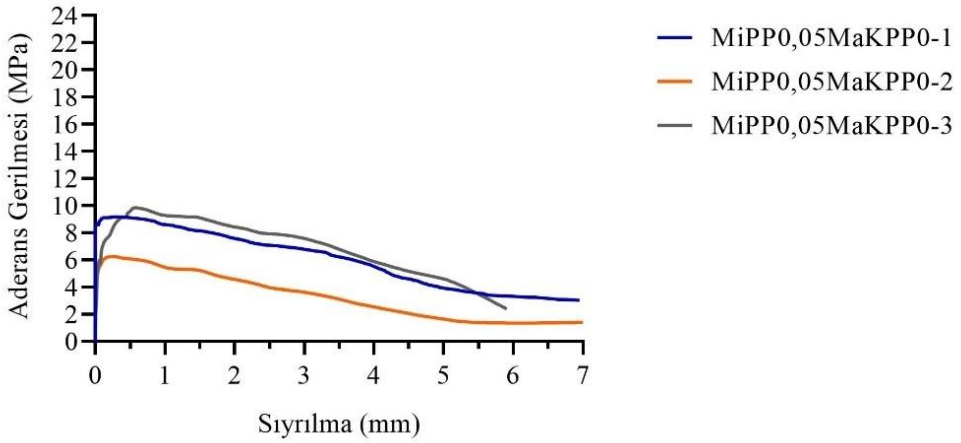
5Ø kenetlenme boyuna sahip olan; Şekil 81'de MiPP0MaKPP0 karışımına , Şekil 82'de MiPP0,05MaKPP0 karışımına, Şekil 83'te MiPP0MaKPP1 karışımına, Şekil 84'te MiPP0MaKPP2 karışımına ve Şekil 85'te MiPP0MaKPP4 karışımına ait kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri gösterilmektedir.

Hibrit PP ve 50 mm (5Ø) kenetlenme boyuna sahip; Şekil 86'da MiPP0,05MaKPP1 karışımına, Şekil 87'de MiPP0,05MaKPP2 karışımına ve Şekil 88'de MiPP0,05MaKPP4 karışımına ait kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri gösterilmektedir.

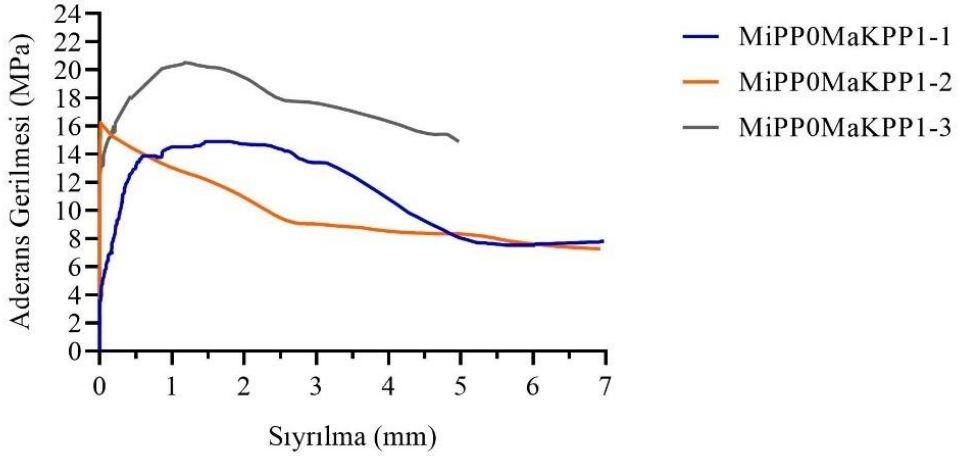
Tüm 5Ø kenetlenme boyuna sahip kirişlerde aderans gerilmesi-sıyrılma grafiğinin net olarak görülebilmesi için sıyrılma miktarı grafiklerde 7 mm alınmıştır.



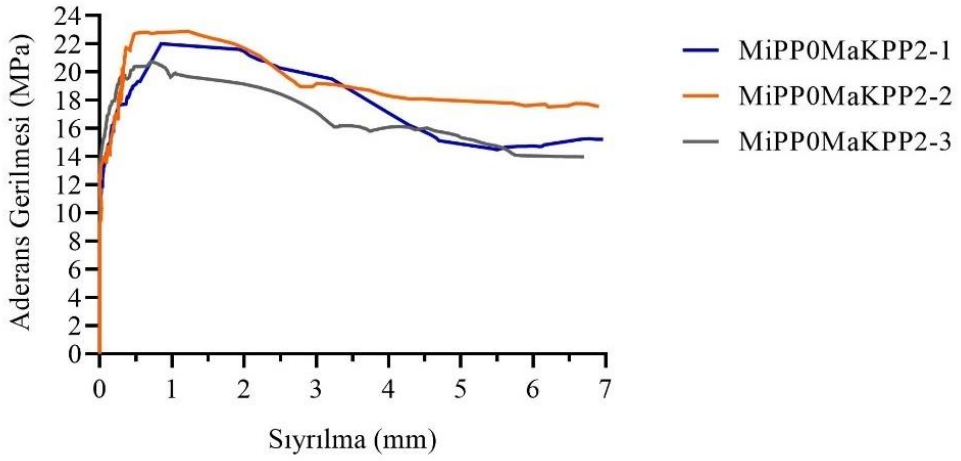
Şekil 81. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0MaKPP0 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği



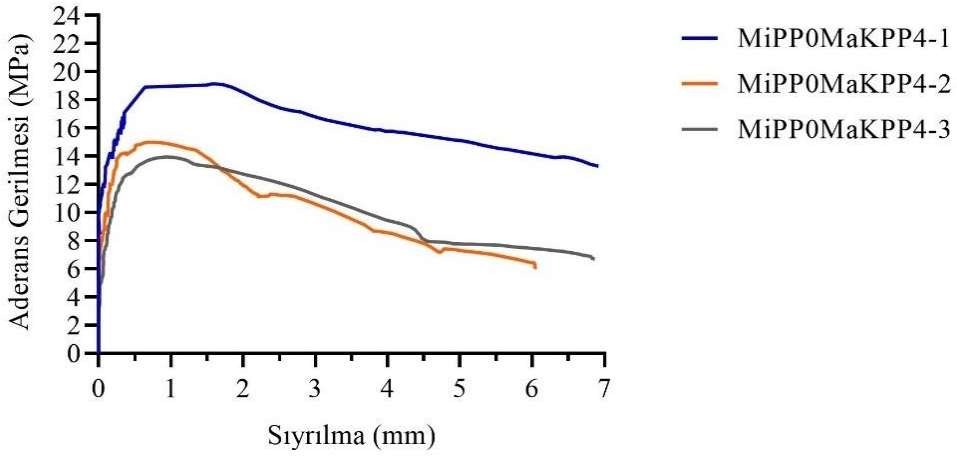
Şekil 82. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0,05MaKPP0 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği



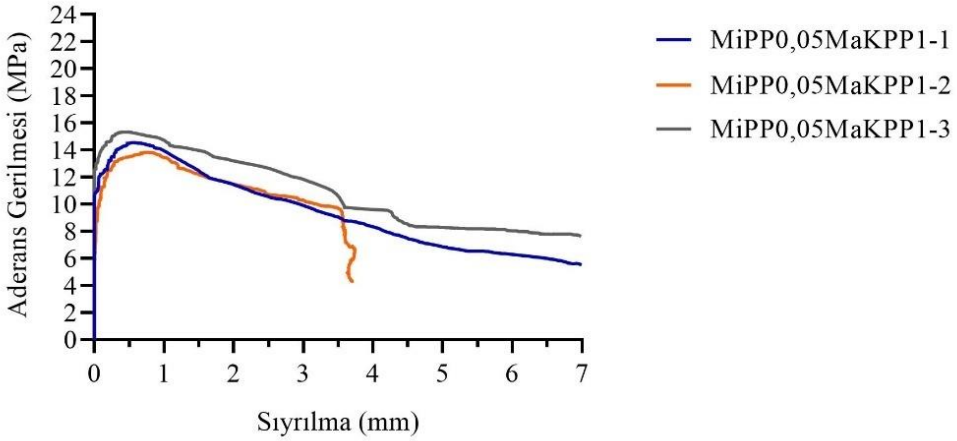
Şekil 83. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0MaKPP1 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği



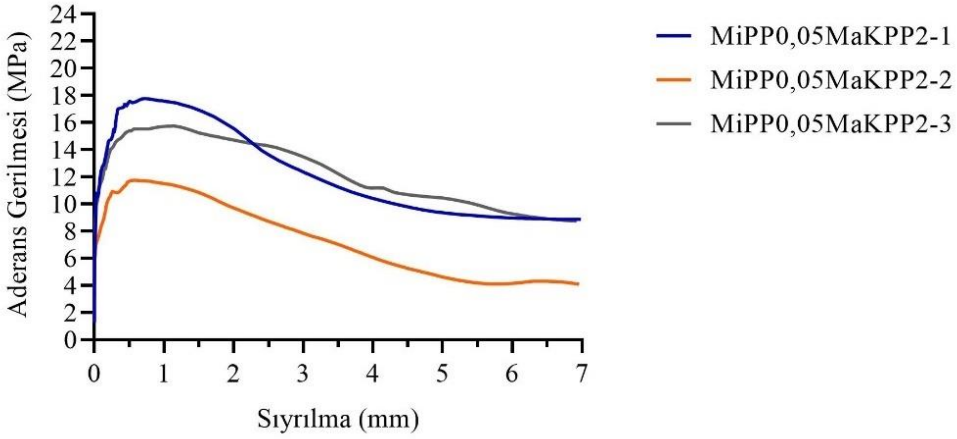
Şekil 84. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0MaKPP2 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği



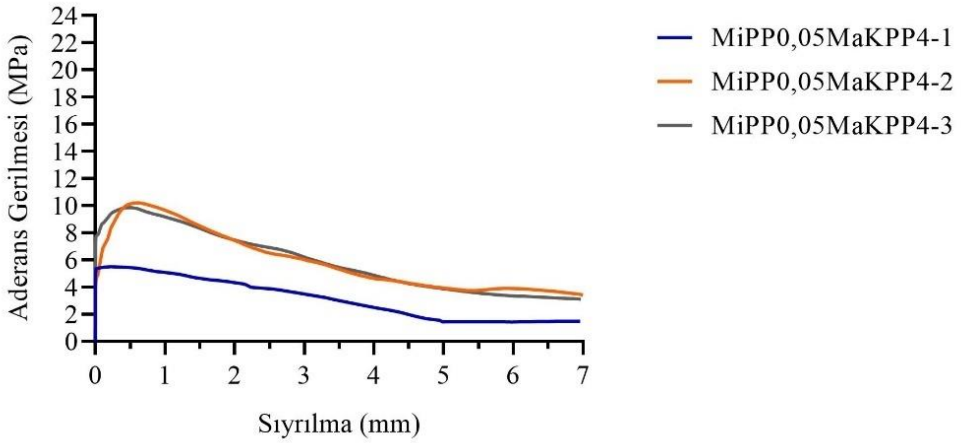
Şekil 85. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0MaKPP4 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği



Şekil 86. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0,05MaKPP1 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği



Şekil 87. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0,05MaKPP2 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

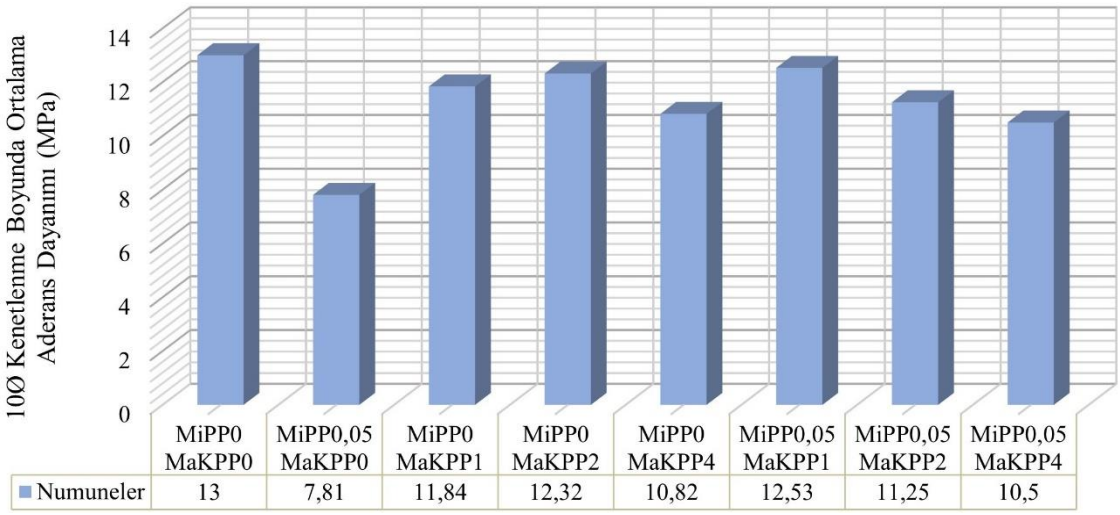


Şekil 88. Kenetlenme boyu 5Ø olan MiPP0,05MaKPP4 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

Şekil 81'de 5Ø kenetlenme boyunda aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği incelendiğinde MiPP0MaKPP0 kirişlerinde maksimum aderans gerilmesinden sonraki bölgede aderans dayanımında hızla azalma görülmüştür. Şekil 84'te MiPP0MaKPP2 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği incelendiğinde MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre azalmanın çok daha az olduğu ve MiPP0MaKPP2 kirişlerinin maksimum aderans gerilmesi sonrası daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Şekil 83'te görüldüğü üzere MiPP0MaKPP1-2 kiriş numunesinde maksimum aderans gerilmesine ulaşıldıktan sonra yarılma görülmüş olup aderans gerilmesi o noktadan sonra düşmeye başlamıştır. Yalnızca mikro lif içeren MiPP0,05MaKPP0 kirişlerinde aderans dayanımı maksimum aderans gerilmesi sonrası hızla azalmıştır. MiPP0,05MaKPP1 ve MiPP0,05MaKPP2 kirişleri maksimum aderans gerilmesi sonrası MiPP0MaKPP0 kirişine benzer çıktılar vermiş fakat MiPP0,05MaKPP4 kirişlerinde maksimum aderans gerilmesi sonrası bölgede dayanımın hızla düştüğü görülmüştür. Tüm 5Ø kenetlenme boyuna sahip kirişlerde artık gerilme bölgesi yaklaşık 5-6 mm sıyrılma sonrasında gözlemlenebilmiştir.

5.5.2. 100 mm (10Ø) Kenetlenme Boyuna Sahip Mafsallı Kirişlerin Deney Bulguları

Deneyleri yapılan ve 100 mm (10Ø) kenetlenme boyuna sahip mafsallı kirişlerin ortalama aderans dayanımına ait grafik Şekil 89'da verilmektedir.



Şekil 89. 10Ø kenetlenme boyuna sahip mafsallı kirişlerin ortalama aderans dayanımları

Şekil 89'da 10Ø (100 mm) kenetlenme boyuna sahip mafsallı kirişlerin ortalama aderans dayanımları incelendiğinde en yüksek dayanıma MiPP0MaKPP0 kirişlerinin ulaştığı görülmüştür. MiPP0MaKPP0 kirişlerini %3,6 azalma ile hibrit lif içerikli MiPP0,05MaKPP1 kirişleri ve %5,2 azalma ile MiPP0MaKPP2 kirişleri takip etmiştir.

10Ø kenetlenme boyunda MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre en çok aderans dayanımı azalması yaklaşık %40 düşüş ile MiPP0,05MaKPP0 kirişleri ve %19,2 düşüş ile hibrit MiPP0,05MaKPP4 kirişleri takip etmiştir.

10Ø kenetlenme boyunda ortalama aderans dayanımları analiz edildiğinde, en yüksek aderans dayanımına ulaşan karışım MiPP0MaKPP0 ve en düşük dayanıma ulaşan karışım da MiPP0,05MaKPP0 olmuştur.10Ø kenetlenme boyunda hibrit lif miktarı arttıkça ortalama aderans dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Böylelikle kendi aralarında en yüksek ortalama aderans dayanımına ulaşan kirişler MiPP0,05MaKPP1 olup onu sırasıyla MiPP0,05MaKPP2 ve MiPP0,05MaKPP4 azalarak takip etmiştir. Tablo 16'da, 10Ø kenetlenme boyundaki donatılara sahip kirişlere ait tüm deneysel bulgular verilmekte olup, l_b kenetlenme boyunu, F_{maks} donatıda oluşan maksimum kuvveti, $\sigma_{s\,maks}$ donatıda oluşan maksimum gerilmeyi, τ_{maks} maksimum aderans gerilmesini (aderans dayanımı), S_{maks} maksimum aderans gerilmesinde gerçekleşen sıyrılma miktarını ve S_y akma dayanımındaki (474 MPa) sıyrılma miktarını belirtmekte ayrıca 0,25 mm sıyrılma limitinden önce donatı akma dayanımına ulaşan donatılar "sıyrılmadı", ulaşamayanlar ise "sıyrıldı" şeklinde belirtilmiştir.

Tablo 16. Kenetlenme boyu 100 mm (10Ø) olan mafsallı kirişlere ait deneysel veriler

Karışım Kodu	l_b (mm)	Numune No	F_{maks} (kN)	$\sigma_{s\,maks}$ (MPa)	Ort. $\sigma_{s\,maks}$ (MPa)	τ_{maks} (MPa)	Ort. τ_{maks} (MPa)	S_{maks} (mm)	Ort. S_{maks} (mm)	S_y (mm)	Deney Sonu Durum
MiPP0MaKPP0	100	1	43,68	556,42	519,97	13,91	13,00	0,88	0,94	0	Sıyrılmadı
		2	41,02	522,59		13,06		1,85		0,63	Sıyrıldı
		3	37,75	480,91		12,02		0,08		0,08	Sıyrılmadı
MiPP0,05MaKPP0	100	1	33,09	421,54	312,39	10,54	7,81	0,03	0,18	-	Sıyrıldı
		2	19,56	249,12		6,23		0,26		-	Sıyrıldı
		3	20,92	266,50		6,66		0,26		-	Sıyrıldı
MiPP0MaKPP1	100	1	39,78	506,73	473,47	12,67	11,84	2,21	0,87	2,04	Sıyrıldı
		2	36,37	463,32		11,58		0,11		-	Sıyrıldı
		3	35,35	450,37		11,26		0,28		-	Sıyrıldı
MiPP0MaKPP2	100	1	33,45	426,06	492,70	10,65	12,32	2,49	2,71	-	Sıyrıldı
		2	41,80	532,46		13,31		0,10		0,07	Sıyrılmadı
		3	40,79	519,59		12,99		5,54		2,13	Sıyrıldı
MiPP0MaKPP4	100	1	31,92	406,69	432,97	10,17	10,82	6,34	2,84	-	Sıyrıldı
		2	34,03	433,55		10,84		0,02		-	Sıyrıldı
		3	36,01	458,66		11,47		2,16		-	Sıyrıldı
MiPP0,05MaKPP1	100	1	38,58	491,49	501,31	12,29	12,53	0,23	0,19	0,21	Sıyrılmadı
		2	43,87	558,91		13,97		0,12		0,06	Sıyrılmadı
		3	35,60	453,52		11,34		0,22		-	Sıyrıldı
MiPP0,05MaKPP2	100	1	36,78	468,51	450,13	11,71	11,25	0,10	1,26	-	Sıyrıldı
		2	33,05	421,01		10,53		0,08		-	Sıyrıldı
		3	36,18	460,86		11,52		3,59		-	Sıyrıldı
MiPP0,05MaKPP4	100	1	32,41	412,88	420,05	10,32	10,50	0,61	2,80	-	Sıyrıldı
		2	29,20	372,01		9,30		6,60		-	Sıyrıldı
		3	37,31	475,27		11,88		1,20		1,20	Sıyrıldı

10Ø kenetlenme boyuna sahip olan kirişlerin donatı gerilmesi ortalamaları incelendiğinde 0,25 mm sıyrılma miktarından önce ortalama donatı akma dayanımına (474 MPa) ulaşamayan ve tüm numuneleri sıyrılma göçmesi ile sonlanan karışımlar MiPP0,05MaKPP0 MiPP0MaKPP1, MiPP0MaKPP4, MiPP0,05MaKPP2 ve MiPP0,05MaKPP4 olmuştur. MiPP0MaKPP0 ve hibrit lif içerikli MiPP0,05MaKPP1 karışımlarına ait üçer numuneden sadece birer numuneleri sıyrılma ile sonuçlanmıştır.

10Ø kenetlenme boyunda ortalama aderans dayanımında (maksimum aderans gerilmesi) MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre en çok ortalama sıyrılma miktarına, %202,1 artışla MiPP0MaKPP4 kirişleri ulaşmış ve bu kirişlerin ortalama aderans dayanımı MiPP0MaKPP0 kirişlerininkine oranla %16,8 daha az olduğu görülmüştür. En çok ortalama sıyrılma miktarına ulaşan diğer kirişler MiPP0MaKPP0 kirişine göre kıyaslandığında %198 sıyrılma artışıyla MiPP0,05MaKPP4 olmuş ve onu %188,3 artışla MiPP0MaKPP2 kirişleri takip etmiştir. MiPP0MaKPP2 kirişlerinin ortalama aderans dayanımı MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre %5,2 azalma göstermiş olup MiPP0,05MaKPP4 kirişlerinin ise ortalama aderans dayanımında ikinci en düşük dayanıma sahip olduğu görülmüştür.

10Ø kenetlenme boyunda en az ortalama sıyrılma miktarına sahip olan MiPP0,05MaKPP0 kirişleri aynı zamanda en düşük ortalama aderans dayanımına sahip olduğu saptanmıştır.

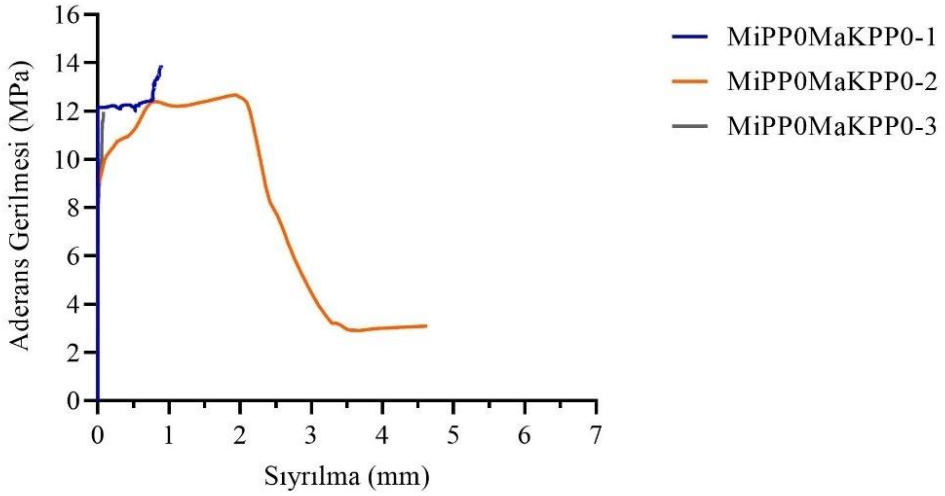
10Ø kenetlenme boyunda yalnızca makro lif içeren mafsallı kirişlerde ortalama aderans dayanımı incelendiğinde lif miktarı artışıyla orantılı sürekli artan veya azalan bir ilişki tespit edilememiştir. Yalnızca makro lif içeren karışımlar kendi arasında sıralandığında aderans dayanımı en yüksek olan karışım kodu MiPP0MaKPP2 olmuş ve onu sırasıyla MiPP0MaKPP1 ile MiPP0MaKPP4 takip etmiştir. Makro lif miktarı arttıkça ortalama aderans dayanımında ortalama sıyrılma miktarı sürekli olarak artmıştır. Yalnızca makro lif içeren ortalama aderans sıyrılma miktarlarında MiPP0MaKPP0 kirişlerine göre; MiPP0MaKPP1 kirişlerinde %7,4 azalma, MiPP0MaKPP2 kirişlerinde %188,3 artış ve MiPP0MaKPP4 kirişlerinde %202,1 artış olduğu görülmüştür.

MiPP0,05MaKPP1 mafsallı kiriş numuneleri hibrit lifli kirişler arasında hem en yüksek ortalama aderans dayanımına hem de en düşük ortalama sıyrılma miktarına sahip olan

karışım kodu olmuştur. Hibrit liflerin artmasıyla ortalama aderans dayanımında sürekli azalma görülürken ortalama sıyrılma miktarında ise sürekli artış görülmüştür.

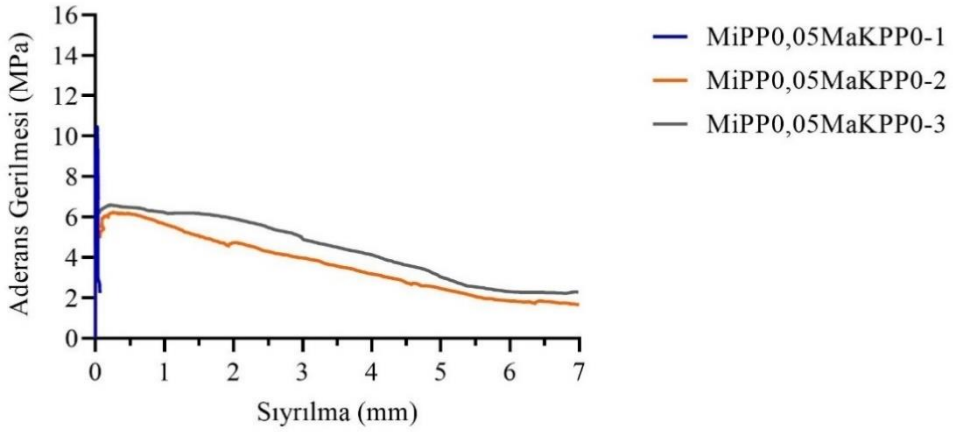
10Ø kenetlenme boyundaki hibrit lifli kirişlerin ortalama sıyrılma miktarları MiPP0MaKPP0 kirişlerininkine göre kıyaslandığında MiPP0,05MaKPP1 kirişlerinde %79,8 azalma, MiPP0,05MaKPP2 kirişlerinde %34 artış ve MiPP0,05MaKPP4 kirişlerinde %197,9 artış görülmüştür.

100 mm (10Ø) kenetlenme boyuna sahip olan; Şekil 90'da MiPP0MaKPP0 karışımına , Şekil 91'de MiPP0,05MaKPP0 karışımına, Şekil 92'de MiPP0MaKPP1 karışımına, Şekil 93'te MiPP0MaKPP2 karışımına ve Şekil 94'te MiPP0MaKPP4 karışımına ait kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri gösterilmektedir.



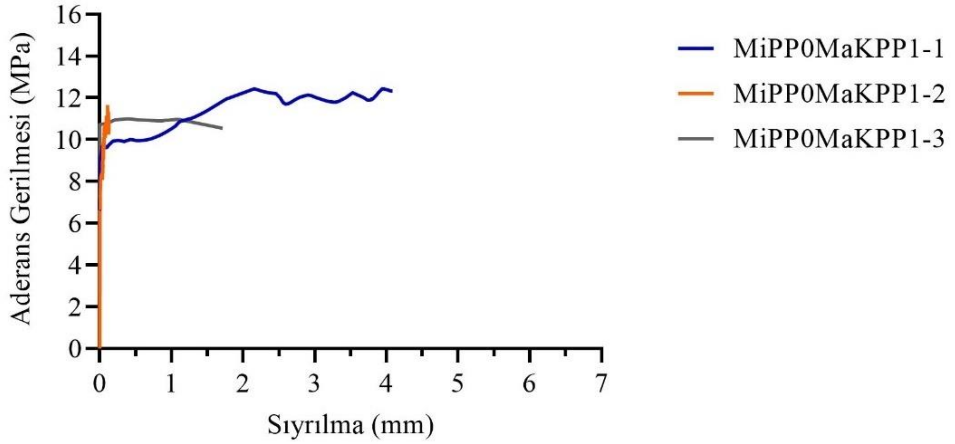
Şekil 90. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0MaKPP0 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

Şekil 90'da görüldüğü üzere MiPP0MaKPP0 kirişlerine ait aderans gerilmesi sıyrılma grafiklerinde görüldüğü üzere üç farklı sonuç elde edilmiş olup MiPP0MaKPP0-2 numunesinde standart aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği çıktısı alınmış ve maksimum aderans gerilmesine ulaşıldıktan sonra bir süre aderans dayanımı o seviyede kalmış ardından hızla aderans dayanımı düşmüş ve daha sonra numune grafiği artık gerilme bölgesine ulaşmıştır. MiPPMaKPP0-2 numunesinin MiPP0MaKPP0-1 numunesine göre daha düşük aderans gerilmesinde sıyrılmaya başladığı tespit edilmiştir.



Şekil 91. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0,05MaKPP0 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

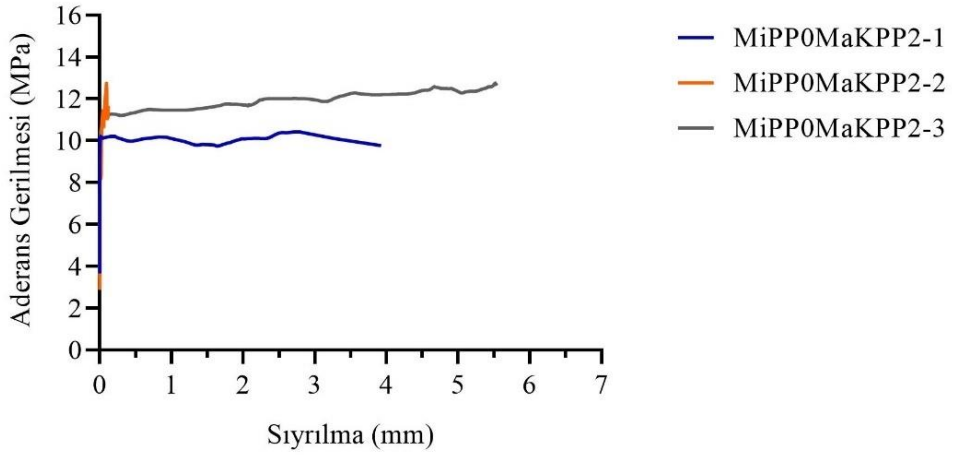
10Ø kenetlenme boyunda en düşük aderans dayanımına sahip olan MiPP0,05MaKPP0 kirişlerinin aderans gerilmesi sıyrılma grafiği Şekil 91'de gösterilmektedir. MiPP0,05MaKPP0-1 kirişinde sıyrılma çok küçük miktarda oluşmuş kiriş maksimum aderans gerilmesine ulaştıktan sonra sıyrılma değeri kaydedilememiştir. Diğer numuneler 5Ø kenetlenme boyundaki benzer eğrileri oluşturarak yaklaşık aynı maksimum aderans gerilmesine ulaştıktan sonra sıyrılma miktarı sürekli artmış ve daha fazla yük taşıyamadan artık gerilme noktasına ulaşmıştır.



Şekil 92. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0MaKPP1 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

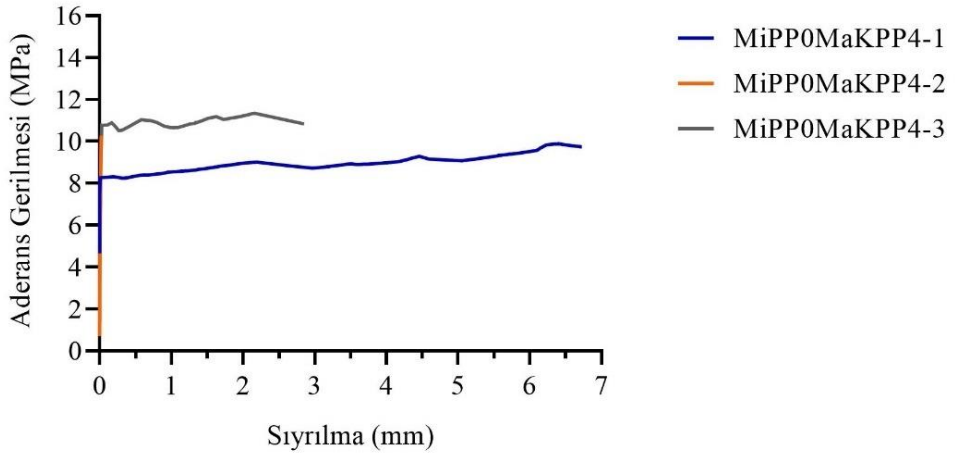
Şekil 92'de görüldüğü üzere MiPP0MaKPP1 kirişleri kendi aralarında benzer maksimum aderans gerilmesi noktasına ulaşmıştır. MiPP0MaKPP1-3 kirişi maksimum aderans gerilmesine ulaştıktan sonra sıyrılma artmaya devam ettiği halde kiriş yük taşımaya devam etmiş maksimum aderans gerilmesi sonrası dayanım azalmaya

başlamıştır. MiPP0MaKPP1-1 numunesi ise sıyrılma devamlı arttığı hâlde 2,21 mm seviyesinde aderans dayanımına ulaşmış daha sonra dayanım azalmaya başlamıştır.



Şekil 93. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0MaKPP2 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

Şekil 93'te görüldüğü üzere MiPP0MaKPP2-1 kirişi sıyrılma miktarı 2,21 mm olduğunda maksimum aderans gerilmesine ulaşmış öncesinde ise maksimum aderans gerilmesine yakın seviyelerde sıyrılma artmaya devam etmiştir. MiPP0MaKPP2-3 kirişi maksimum aderans gerilmesine 5,54 mm sıyrılma seviyesinde ulaşmış ve o noktaya kadar aderans gerilmesi artarak devam etmiştir.

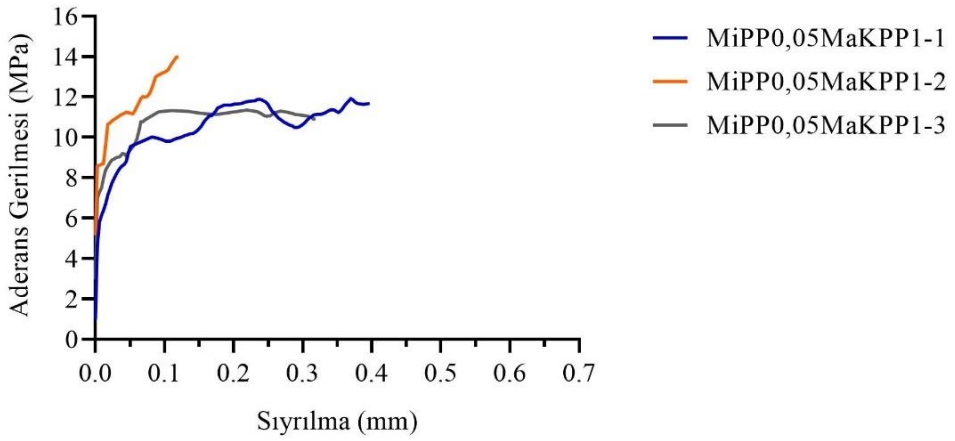


Şekil 94. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0MaKPP4 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

MiPP0MaKPP4-1 ve MiPP0MaKPP4-3 kirişlerinde maksimum aderans gerilmesine sıyrılma miktarı artarak devam ettikten sonra ulaşılmıştır. MiPP0MaKPP4-1 kirişi

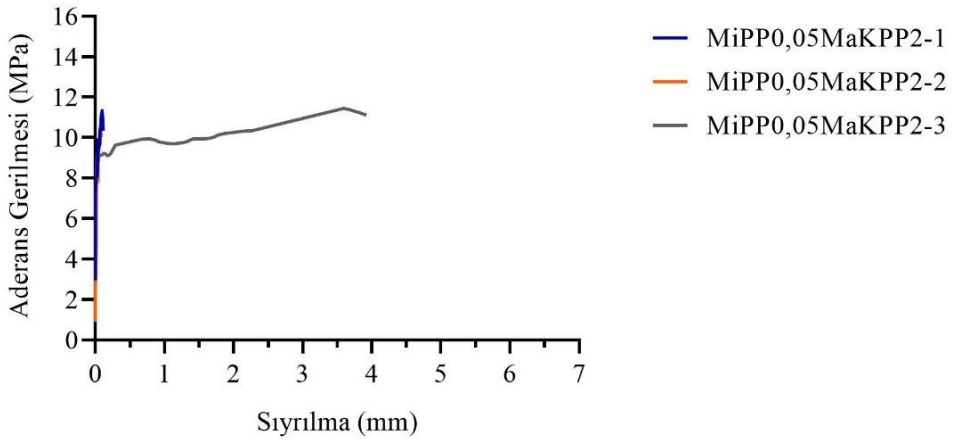
diğerlerine göre daha fazla sıyrıldıktan sonra (6,34 mm) aderans dayanımına ulaşmıştır (Şekil 94).

Hibrit PP ve 100 mm (10Ø) kenetlenme boyuna sahip olan; Şekil 95'te MiPP0,05MaKPP1 karışımına, Şekil 96'da MiPP0,05MaKPP2 karışımına ve Şekil 97'de MiPP0,05MaKPP4 karışımına ait kirişlerin aderans gerilmesi-sıyrılma grafikleri gösterilmektedir.



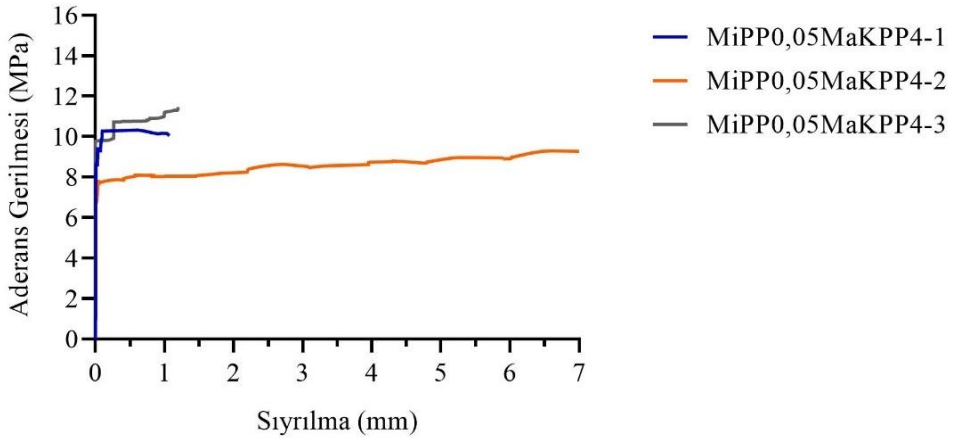
Şekil 95. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0,05MaKPP1 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

Şekil 95'te görüldüğü üzere 10Ø kenetlenme boyundaki karışımlar arasında, ortalama aderans dayanımına karşılık gelen ortalama sıyrılma miktarında en düşük değerlere sahip olan MiPP0,05MaKPP1 kirişlerinin hepsinde benzer grafikler elde edilmiş olup MiPP0,05MaKPP1-1 ve MiPP0,05MaKPP1-2 numunelerinin donatılarında 0,25 mm sıyrılma miktarından önce akma dayanımına ulaşılmıştır.



Şekil 96. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0,05MaKPP2 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

Şekil 96'da gösterildiği üzere MiPP0,05MaKPP2-3 kirişinde sıyrılmanın giderek artmasına rağmen maksimum aderans gerilmesine 3,59 mm sıyrılma miktarı seviyesinde ulaşılmış ve hiçbir numunede donatı akma dayanımına erişilememiştir.

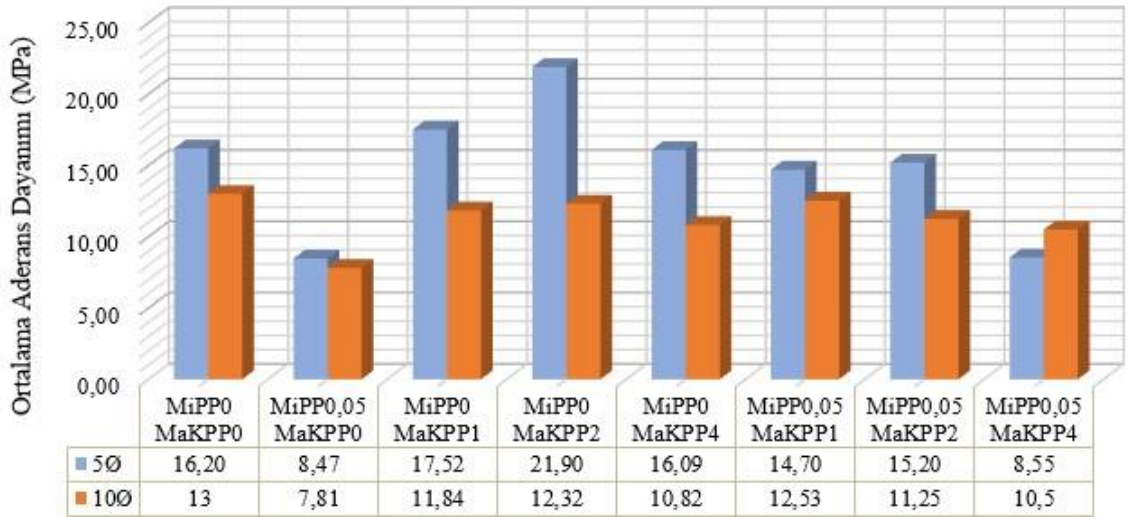


Şekil 97. Kenetlenme boyu 10Ø olan MiPP0,05MaKPP4 kirişlerine ait aderans gerilmesi-sıyrılma grafiği

Şekil 97'de görüldüğü üzere MiPP0,05MaKPP4 hibrit lifli kirişlerinde tüm numuneler deney sonunda sıyrılmıştır. MiPP0,05MaKPP4-1 numunesi maksimum aderans gerilmesinden sonra bir süre sabit dayanımda kalıp daha sonra azalmaya başlamıştır. MiPP0,05MaKP4-2 numunesi daha küçük aderans gerilmelerinde sıyrılmaya başlamış ve 6,60 mm sıyrılma seviyesine kadar yük artarak devam etmiş ve maksimum aderans gerilmesine bu noktada ulaşmıştır.

5Ø ve 10Ø kenetlenme boyunda her bir karışıma ait ortalama aderans dayanımları karşılaştırılmalı grafik olarak Şekil 98'de verilmiştir. verilmiştir. MiPP0,05MaKPP4 karışımı hariç tüm diğer karışımlarda kenetlenme boyu 5Ø'den 10Ø'ye çıkarıldığında aderans dayanımı azalmıştır. MiPP0MaKPP2 iki kenetlenme boyu arasında en çok aderans dayanımı farkı olan karışım kodu olmuştur.

5Ø kenetlenme boyunda en yüksek ortalama aderans dayanımına sahip MiPP0MaKPP2 karışımında, kenetlenme boyu 5Ø değerinden 10Ø değerine çıkarıldığında %43,7 azalma olmasına rağmen 10Ø kenetlenme boyunda en yüksek ortalama aderans dayanımına sahip referans betonuna yakın değerler elde edilmiştir.



Şekil 98. Farklı kenetlenme boylarındaki kirişlerin ortalama aderans dayanımlarının karşılaştırılması

MiPP0,05MaKPP0 karışımı iki kenetlenme boyunda da benzer dayanım sergilemiştir. Hibrit liflerde MiPP0,05MaKPP1 ve MiPP0,05MaKPP2 karışımları benzer dayanım değişikliği göstermiştir. MiPP0,05MaKPP4 karışımında ise kenetlenme boyu arttığında aderans dayanımı artmıştır. Diğer tün karışımlarda referans betonuna benzer sonuçlar elde edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, mikro polipropilen (PP) ve makro kopolimer-polipropilen (KPP) lifleri içermek üzere PP lifli hibrit betonların donatı ile arasındaki aderansın araştırılması amacıyla, mafsallı kirişler iki noktadan yükleme yöntemi ile eğilme etkisi altında deneysel olarak incelenmiştir. PP lifli hibrit betonların aderansa etkilerinin daha net anlaşılabilmesi için çalışmada 50 mm (5Ø) ve 100 mm (10Ø) olmak üzere iki farklı kenetlenme boyu belirlenmiştir. Lif katkısız, sadece mikro lif, sadece makro lif ve hibrit lifler olmak üzere toplam sekiz farklı beton karışımı elde edilmiş ve hibrit lif içerikli betonlarda, mikro lifler her karışımda sabit tutulmuş makro liflerin miktarı artırılmıştır. Her bir karışım için iki farklı kenetlenme boyunda aderans etkisi incelenmiş olup toplamda 48 adet mafsallı kiriş üzerinde çalışılmıştır. Her beton karışımında liflerin; taze beton çökme değerine, basınç dayanımına, eğilme dayanımına ve aderansa etkileri araştırılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları aşağıda derlenmiştir.

Karışımların taze beton çökme değerleri değerlendirildiğinde;

- Yalnızca mikro PP lif içeren beton karışımlarında (MiPP0,05MaKPP0) en yüksek çökme değeri elde edilmiş ve bu çalışmada kullanılan mikro PP liflerin betonun kohezyonunu azalttığı ve betonda ayrışma yaptığı tespit edilmiştir.
- Makro lifler taze betonun çökme değerini büyük ölçüde azaltmış ve makro lif miktarı arttıkça çökme değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmadaki en yüksek miktarda yalnızca makro lif içeren beton karışımında (MiPP0MaKPP4) 20 mm çökme değerine ulaşılmış bu tüm karışımlar arasında en düşük çökme değeri olup bu durumun betonun işlenebilirliğine etkisi negatif olarak yansımıştır. İşlenebilirliği düşürmesine rağmen makro liflerin, betonun kohezyonunu artırdığı fiziksel olarak gözlemlenmiştir.
- Yalnızca mikro PP lifler çökme değerini artırıp betonun ayrışmasına neden olsa da hibrit lif içerikli karışımlarda makro lifler bu ayrışmayı azaltıp kohezyonu artırmış ve hibrit lif içeren beton karışımlarında makro lif miktarı arttıkça anlamlı olarak çökme değerleri azalmıştır.

Karışımların beton basınç dayanımları değerlendirildiğinde;

- Yalnızca mikro PP lif içeriği beton basınç dayanımını ciddi oranda düşürmüş, 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımında sırasıyla referans betonuna (MiPP0MaKPP0) göre %44,2 ve %41,8 azalma tespit edilmiştir.
- Yalnızca makro lif içeriği beton basınç dayanımına olumlu yansımış özellikle 7 günlük ortalama erken basınç dayanımında MiPP0MaKPP4 karışımı, referans betonuna göre %28,1 artış sağlamış ve makro lifler arasında en çok basınç dayanımı artışı bu karışımda olmuştur.
- 7 günlük ortalama basınç dayanımına benzer şekilde 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarında da makro lifli betonun basınç dayanımına etkisi olumlu olmuş MiPP0MaKPP4 karışımı referans betonuna göre %14,4 ile en çok dayanım artışı sağlayan karışım olmuştur.
- Hibrit lif içeriği, yalnızca mikro PP lif içeren betonların basınç dayanımına olan negatif etkisini gidererek sinerjik bir etki oluşturmuş ve ortalama beton basınç dayanımını referans betonuna göre %7-10 arasında artırmıştır.

Karışımların eğilme dayanımları değerlendirildiğinde;

- Ortalama eğilme dayanımını %19,5 ile referansa göre en çok artıran karışım en yoğun hibrit lif içeriği olan MiPP0,05MaKPP4 karışımı olmuştur. Yalnızca makro lif içeren MiPP0MaKPP2 kirişleri ise eğilme dayanımını en çok artıran diğer karışım olmuştur. Hibrit lif miktarı arttıkça eğilme dayanımının da yükseldiği tespit edilmiştir. Sehim miktarları ile lifli karışımlar arasında net bir ilişki saptanamamıştır.
- Ortalama enerji tüketme kapasitelerinde en yüksek değere, en yoğun hibrit lif içerikli MiPP0,05MaKPP4 kirişlerinde ulaşılmış onu yalnızca makro lif içeren MiPP0MaKPP1 takip etmiştir.

50 mm (5Ø) kenetlenme boyundaki mafsallı kirişlerin deney sonuçları incelendiğinde;

- Hiçbir karışım türünde, bu çalışmadaki ortalama çelik donatı akma dayanımına (474 MPa) ulaşılamamıştır. Tüm numuneler deney sonunda sıyrılmıştır.
- Maksimum aderans dayanımında en az sıyrılma miktarı MiPP0MaKPP0 kodlu referans betonlarında gerçekleşmiştir.

- Yalnızca mikro PP lif içeren karışımlar (MiPP0,05MaKPP0) beton-donatı arasındaki ortalama aderans dayanımını referans betonuna göre %47,7 düşürmüş ve en düşük ortalama aderans dayanımı bu kirişlerde tespit edilmiştir.
- Makro lifli karışımlar aderans dayanımına olumlu etki etmiş olup, referans betonuna göre (MiPP0MaKPP0) %35,2 artışla en fazla dayanıma MiPP0MaKPP2 kodlu kirişlerde ulaşılmıştır.
- MiPP0MaKPP2 kirişlerinde, pik aderans gerilmesi sonrası bölgedeki sıyrılmalara karşılık gelen aderans gerilmelerinin diğer karışımlara göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Hibrit lifli karışımlar ortalama aderans dayanımını düşürmüş olup, %47,2 azalma ile hibrit lifli karışımlarda referansa göre en çok düşüş gösteren MiPP0,05MaKPP4 kodlu kirişler olmuştur.
- Hibrit lifli karışımların ortalama aderans dayanımına karşılık gelen ortalama sıyrılma miktarını artırdığı görülmüştür.

100 mm (10Ø) kenetlenme boyundaki mafsallı kirişlerin deney sonuçları incelendiğinde;

- Kenetlenme boyu 50 mm'den 100 mm'ye arttığında MiPP0,05MaKPP4 karışımı hariç tüm numunelerin ortalama aderans dayanımında azalma tespit edilmiştir.
- En yüksek ortalama aderans dayanımına ulaşan karışım MiPP0MaKPP0 kodlu referans kirişleri olmuştur. Hiçbir numunede donatı kopma dayanımına ulaşılamamıştır.
- Mikro PP lifli karışımlar ortalama aderans dayanımını referans betonuna göre %40 düşürmüş ve en az aderans dayanımına sahip olan karışım MiPP0,05MaKPP0 olmuştur.
- Makro KPP lifli karışımlar, mikro lifli karışımlara oranla çok daha az dayanım düşüşüne neden olmuştur. Yalnızca makro KPP lif içeren MiPP0MaKPP2 ve MiPP0MaKPP4 kodlu kirişlerin sıyrılma miktarı yükselmesine rağmen aderans gerilmesindeki artışın maksimum aderans gerilmesine kadar devam ettiği görülmüştür.

- Ortalama aderans dayanımında en az sıyrılma miktarına sahip karışım hibrit lif içeriğine sahip MiPP0,05MaKPP1 olmuş ve bu karışımın bir numunesinde deneydeki en yüksek aderans dayanımına ulaşılmış ayrıca bu karışımdaki iki numunede, deney sonunda aderans kaybı olmamıştır. Referans kirişlerinin aderans dayanımı ortalamasına en yakın karışım yine MiPP0,05MaKPP1 olmuştur.
- Hibrit lif içeriği olan MiPP0,05MaKPP1 karışımına ait iki numunede, donatı akma dayanımındaki sıyrılma miktarının referans betonuna göre daha az olduğu görülmüştür.
- Hibrit lif miktarı arttıkça ortalama aderans dayanımının azaldığı, aderans dayanımına karşılık gelen ortalama sıyrılma miktarlarının ise arttığı sonucuna varılmıştır.
- Referans betonuna göre %19,2 düşüş ile hibrit lifli karışımlar arasında, ortalama aderans dayanımında en çok azalma görülen karışım MiPP0,05MaKPP4 olmuştur.

Çalışmadaki her iki kenetlenme boyunda da PP lifli hibrit betonların ortalama aderans dayanımlarının referans betonuna (MiPP0MaKPP0) göre daha düşük çıkması nedeniyle bu oranlardaki hibrit PP lif kullanımının aderans açısından uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Öneriler;

- İlerideki çalışmalarda, mikro PP ve makro KPP lif içerikli hibrit betonarme sistemler yüksek sıcaklık etkisi altında bırakılarak bu durumun beton-donatı aderansına etkileri araştırılabilir.
- Mikro PP lifler yerine mikro çelik lifler ile makro KPP liflerin farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen hibrit lif içeriğinin aderans dayanımına etkileri 5Ø, 10Ø ve 20Ø kenetlenme boylarında ve mafsallı kirişler aracılığıyla incelenebilir.

KAYNAKLAR

ACI 544.1R-96 (2002). *Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96 Reapproved 2002)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

ACI 544.2R-89 (1999). *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.2R-89-Reapproved 1999)*. Reported by ACI Committee 544, American Concrete Institute, Michigan, US.

ACI 408R-03 (2003). *Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (ACI 408R-03)*. Reported by ACI Committee 408, American Concrete Institute, MI, USA.

Ahmed, K. S., Shahjalal, M., Siddique, T. A., & Keng, A. K. (2021). Bond strength of post-installed high strength deformed rebar in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, *15*(2021), e00581.

Aktürk, M. (2007). *Polipropilen lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonların performans özelliklerinin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Al-Shannag, M. J., & Charif, A. (2017). Bond behavior of steel bars embedded in concretes made with natural lightweight aggregates. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, *29*(4), 365–372.

Arel, H. Ş. (2012). *Değişik parametrelerin beton ile çelik donatı aderansına etkisi*. Doktora tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Arpit, S., & Baradiya, V. (2014). Experimental Investigation on Behavior of Bamboo Reinforced Concrete Member. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, *03*(02), 344–348.

Arslan, M. E., & Arslan, T. (2018). Kenetlenme Boyu ve Donatı Çapının Beton-Donatı Aderansına Etkisinin Mafsallı Kiriş Deneyiyle İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *30*(2), 1–11.

Arslan, T. (2017). *Beton dayanımı ve kenetlenme boyunun beton-donatı aderansına etkisinin mafsallı kiriş deneyi ile incelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

Assaad, F., Hany, N., Fawaz, G., Hantouche, E., & Harajli, M. (2021). Effect of active and passive concrete confinement on the bond stress-slip response of steel bars in tension. *Construction and Building Materials*, *305*(2021), 124737.

ASTM C1116/C1116M-10a. (2015). *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete (ASTM C1116/C1116M-10a-Reapproved)*. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, US.

Atlas 1 (t.y. a). *Betonfiber- BF- 19*. Erişim adresi: https://atlas1.com.tr/p-p-elyaf. Erişim tarihi: 21 Kasım 2021.

Atlas 1 (t.y. b). *Macromesh 54 Genel Özellikleri.* Erişim adresi: https://atlas1.com.tr/macromesh54-2. Erişim tarihi: 21 Kasım 2021.

Bamonte, P. F., & Gambarova, P. G. (2007). High-Bond Bars in NSC and HPC: Study on Size Effect and on the Local Bond Stress-Slip Law. *Journal of Structural Engineering*, *133*(2), 225–234.

Başaran, B. (2019). *Beton-FRP donatı arasındaki aderansı etkileyen faktörler ve kenetlenme boyu bağıntısının belirlenmesi*. Doktora tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

Bentur, A., & Mindess, S. (Eds.). (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites* (2nd Ed.). Taylor & Francis Group.

Beycioğlu, A. (2013). *Kendiliğinden yerleşen betonlarda beton ile donatı aderansı ilişkisinin araştırılması*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Blazy, J., & Blazy, R. (2021). Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. *Case Studies in Construction Materials*, *14*, e00549.

British Standards Institution (2006). *BS EN 14889-2: Fibres for Concrete, Part 2: Polymer Fibres, Definitions, Specification and Conformity*, British Standards Institution, London.

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

Chao, S. H., Naaman, A. E., & Parra-Montesinos, G. J. (2009). Bond behavior of reinforcing bars in tensile strain-hardening fiber-reinforced cement composites. *ACI Structural Journal*, *106*(6), 897–906.

Coccia, S., Imperatore, S., & Rinaldi, Z. (2016). Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *49*(1–2), 537–551.

Coşkun, A., Tanyıldızı, H., & Yazıcıoğlu, S. (2007). Mineral katkılı betonun aderans dayanımına 800°C'nin etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *13*(3), 347–351.

Darwin, D., Dolan, C. W., & Nilson, A. H. (2016). *Design of concrete structures*. (15. Bs.). McGraw-Hill Education.

Durmuş, A., Dahil, H., & Arslan, M. E. (2006). Yüksek başarımlı beton-donatı aderansının karşılaştırılmalı olarak incelenmesi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, *441*(1), 45–52.

EN 1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (Eurocode 2).* Brussel, Belgium.

Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2016). *Betonarme: Temel İlkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap*, (5. Bs.). Evrim Yayınevi, İstanbul, Türkiye.

Fang, C., Lundgren, K., Chen, L., & Zhu, C. (2004). Corrosion influence on bond in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, *34*(11), 2159–2167.

Fib Bulletin 10 (2000). *Bond of Reinforcement in Concrete. International Federation for Structural Concrete (fib)*, Lausanne, Switzerland, 2000.

Gandjar, P., Bimasena, H., Yuta, P. A., & Heru, P. (2018). Bond-slip behavior of steel bar embedded in lightweight concrete using sand coated polypropylene coarse aggregate. *Materials Science Forum*, *929 MSF*, 103–108.

Ganesan, N., Indira, P. V., & Sabeena, M. V. (2014). Bond stress slip response of bars embedded in hybrid fibre reinforced high performance concrete. *Construction and Building Materials*, *50*, 108–115.

Garcez, E. O., Kabir, M. I., MacLeod, A., Subhani, M., & Ghabraie, K. (2019). Self-compacting concrete reinforced with twisted-bundle macro-synthetic fiber. *Applied Sciences (Switzerland)*, *9*(12), 1-16.

García Taengua, E. J. (2013). *Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete (SFRC)*. Doktora tezi, Politècnica de València Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Valencia, İspanya.

Gull, S., Wani, S. B., & Amin, I. (2020). The Influence of Rib Configuration on Bond Strength Development between Steel and Concrete. *Journal of the Civil Engineering Forum*, *6*(1), 193.

Güngör, E. (2013). *Karma lifli betonların özelliklerinin deneysel irdelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Hanwha Total (t.y.). *Polymer*. Erişim adresi: https://www.hanwha-total.com/en/product/product_polymer?depth2Cd=AABB&depth3Cd=AABBAA. Erişim tarihi: 10 Ağustos 2021.

Harajli, M. H., Hamad, B. S., & Rteil, A. A. (2004). Effect of confinement of bond strength between steel bars and concrete. *ACI Structural Journal*, *101*(5), 595–603.

Hisham, A. M. (2016). Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science*, *6*(1), 1–11.

Hong, S., & Park, S. K. (2012). Uniaxial bond stress-slip relationship of reinforcing bars in concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2012*.

Hsie, M., Tu, C., & Song, P. S. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering A*, *494*(1–2), 153–157.

Huang, L., Xu, L., Chi, Y., Deng, F., & Zhang, A. (2019). Bond strength of deformed bar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *218*, 176–192.

Ichinose, T., Kanayama, Y., Inoue, Y., & Bolander, J. E. (2004). Size effect on bond strength of deformed bars. *Construction and Building Materials*, *18*(7), 549–558.

Iqbal, S., Ullah, N., & Ali, A. (2018). Effect of Maximum Aggregate Size on the Bond Strength of Reinforcements in Concrete. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *8*(3), 2892–2896.

Islam, K., Billah, A. M., Chowdhury, M. M. I., & Ahmed, K. S. (2020). Exploratory study on bond behavior of plain and sand coated stainless steel rebars in concrete. *Structures*, *27*, 2365–2378.

İskender, M., & Karasu, B. (2018). Glass Fibre Reinforced Concrete (GFRC). *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, *5*(1), 136–162.

Kahouli, A., Gallot-Lavallee, O., Rain, P., Lesaint, O., Guillermin, C., & Lupin, J. M. (2013). Relationship between structure and dielectric properties of Bi-oriented isotactic polypropylene films for capacitors. *Proceedings of IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD*, 1068–1071.

Kalkan, Ş. O. (2017). *Technical investigation for the use of textile waste fiber types in new generation composite plasters*. Yüksek lisans tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Kalyani, R., Rao, P. N., & Bharathi, M. D. V. M. (2018). An experimental investigation on strength properties of fiber reinforced concrete (steel and glass fibers). *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, *7*(6), 507–526.

Karataş, M. (2007). *Mineral katkı dozajının ve türünün kendiliğinden sıkışan betondaki donatı aderansına etkisi*. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Khatua, S. (2017). *Effect of accelerated corrosion on the bond strength of corrosion resistant reinforcıng bars embedded in concrete*. Yüksek lisans tezi, Akron Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ohio, ABD.

Kocatürk, A. N., Haberveren, S., Aslan, E. G., & Taşdemir, M. A. (2005). Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar*, 447–458.

Kozak, M. (2013). Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması. *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, *3*(5), 26–35.

Krstulovic-Opara, N., Watson, K. A., & LaFave, J. M. (1994). Effect of increased tensile strength and toughness on reinforcing-bar bond behavior. *Cement and Concrete Composites*, *16*(2), 129–141.

Lorrain, M. S., Caetano, L. F., Silva, B. V., Gomes, L. E. S., Barbosa, M. P., & Silva Filho, L. C. P. (2010). Bond strength and rib geometry: A comparative study of the influence of deformation patterns on anchorage bond strength. *3rd International Fib Congress and Exhibition, Incorporating the PCI Annual Convention and Bridge Conference: Think Globally, Build Locally, Proceedings, August 2015*.

Lublóy, É., & György, B. L. (2014). Temperature Effects on Bond Between Concrete and Reinforcing Steel. *Zbornik Radova Građevinskog Fakulteta*, *30*(26), 27–35.

Lung Huang, H., Lung Hwang, C., Szu Peng, S., Tsun Chen, C., & Chuan Lee, H. (2012). Study on the properties of high strength polypropylene fiber concrete. *Proceedings of the 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12)* içinde (ss. 3426–3434). Seoul, Kore: Techno-press.

Marković, I. (2006). *High-performance hybrid-fibre concrete: development and utilisation.* IOS Press.

Mirza, F. A., & Soroushian, P. (2002). Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, *24*(2), 223–227.

Mohebi, Z. H., Bahnamiri, A. B., & Dehestani, M. (2019). Effect of polypropylene fibers on bond performance of reinforcing bars in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, *215*, 401–409.

Newman, J., & Choo, B. S. (Eds.). (2003). *Advanced concrete technology 3: processes*. Elsevier.

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

Özden, Ş., & Akpınar, E. (2003), *Aderans boyu hesap yöntemlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması, Deprem Sempozyumu 2003* içinde ss. 86- . Kocaeli.

Pekdemir, N. R. (2020). *Polipropilen lif oranının betonun eğilmede çekme ve basınç dayanımına etkisi*. Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.

Petcherdchoo, A., Hongubon, T., Thanasisathit, N., Punthutaecha, K., & Jang, S. H. (2020). Effect of curing time on bond strength between reinforcement and fly-ash geopolymer concrete. *Applied Science and Engineering Progress*, *13*(2), 127–135.

Petrocuyo (t.y.). *Polypropylene.* Erişim adresi: http://www.petrocuyo.com/en/technology. Erişim tarihi: 10 Ağustos 2021.

Plizzari, G. A., Deldossi, M. A., & Massimo, S. (1996). Experimental study on anchored bars in R.C. elements with transverse reinforcement. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *29*(9), 534–542.

Plizzari, G., & Mindess, S. (2019). Fiber-reinforced concrete. In *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete* içinde (ss. 257 - 287). Woodhead Publishing.

Rahuman, A., & Yeshika, S. (2015). Study on Properties of Sisal Fiber Reinforced Concrete With Different Mix Proportions and Different Percentage of Fiber Addition. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, *04*(03), 474–477.

Rai, A., & Joshi, Y. P. (2014). Applications and properties of fibre reinforced concrete. *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(5), 123-131.

Rashid, M. H., Molla, M., & Taki, I. M. (2019). Effect of Elevated Temperature on Bond Strength of Concrete. *In Materials Science Forum* (Cilt: 972, ss. 26-33) içinde. Trans Tech Publications Ltd.

R. A. S., M. (2006). Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete. *JES. Journal of Engineering Sciences*, *34*(4), 1049–1059.

Reufi, E., & Marku, J. (2015). Effect of steel fiber and polypropylene fiber on reinforced concrete. E. Hajrizi (Ed), *University for Business and Technology International Conference* içinde (ss. 103–108). Durres, Arnavutluk: UBT Knowledge Center.

Robins, P. J., & Standish, I. G. (1984). The influence of lateral pressure upon anchorage bond. *Magazine of Concrete Research*, *36*(129), 195–202.

Seis, M. (2017). *Mafsallı kiriş yöntemiyle bazalt lifli kompozit donatının aderans performansının araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

Shadheer, A. M., Ravichandran, P., & Krishnaraja, A. . (2021). Natural Fibers in Concrete – A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1055*(1).

Shoenberger, J. E., & Tom, J. G. (1992). *Polypropylene fibers in portland cement concrete pavements* (Rapor No. DOT/FAA/RD-92/9). Washington, DC: US Department of Transportation Sonuç Raporu.

Siempu, R., & Pancharathi, R. K. (2018). A study on the parameters influencing flexural bond stress in reinforced concrete. *Structures*, *16*, 198–207.

Sika Group (t.y.). *Sikament-300*. Erişim adresi: https://can.sika.com/en/construction/concrete-admixtures/water-reducers/high-range-waterreducers/sikament-300.html. Erişim tarihi: 17 Kasım 2021.

Sivaraja, M., Kandasamy, Velmani, N., & Pillai, M. S. (2010). Study on durability of natural fibre concrete composites using mechanical strength and microstructural properties. *Bulletin of Materials Science*, *33*(6), 719–729.

Söylev, T. A., & Franćois, R. (2006). Effects of bar-placement conditions on steel-concrete bond. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *39*(2), 211–220.

Sun, Z., & Xu, Q. (2009). Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering A*, *527*(1–2), 198–204.

Sümer, G. (2009). *Betonarme Elemanlarda Donatı Düzenleme İlkeleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şahin, A. (2019). *F Tipi uçucu kül kullanımının mafsallı kiriş deneyi ile aderans etkisinin deneysel olarak incelenmesi.* Yüksek lisans tezi, KTO Karatay Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Tanyıldızı, H., & Yazıcıoğlu, S. (2006). Betonarme demiri ve beton arasındaki aderans dayanımına kür koşullarının etkisi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, *5*(1), 11–14.

Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J., Konsta-Gdoutos, M. S., & Balopoulos, V. (2014). Experimental local bond of reinforcing bars in cementitious composites reinforced with polypropylene fibers/carbon nanotubes. *3rd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC3)* içinde (ss. 417-424). Dordrecht, Hollanda: RILEM Publ., 2014.

Tekeli, İ. E. (2019). *Mikrofiber donatıların beton ile donatı arasındaki aderansa ve beton basınç dayanımına etkileri*. Yüksek lisans tezi, KTO Karatay Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

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

Tepfers, R., & Olsson, P.A. (1992). Ring test for evaluation of bond properties of reinforcing bars. *International Conference on Bond in Concrete - From Research to Practice* içinde (ss. 89-99). Riga, Letonya: RTU.

The Definitive Guide to Polypropylene (PP). (t.y.). Erişim adresi: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic. Erişim tarihi: 09 Ağustos 2021.

The Euclid Chemical Company (t.y.). *What Are the Differences Between Micro and Macro-Synthetic Fibers.* Erişim adresi: https://www.euclidchemical.com/fileshare/Literature/Technical_Bulletins/FC-1-Difference%20between%20micro%20and%20macro.pdf. Erişim tarihi: 14 Eylül 2021.

Things to consider about fiber - reinforced concrete. (t.y.). Erişim adresi: https://cf.specifyconcrete.org/doc/FiberReinforcedConcrete.pdf. Erişim tarihi: 17 Eylül 2021.

TS500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım Ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, Türkiye.

TS EN 12350-2 (2019). TS EN 12350-2 Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, Türkiye.

TS EN 12390-3 (2019). TS EN 12390-3 Beton−Sertleşmiş Beton Deneyleri−Bölüm 3:Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, Türkiye.

TS EN 12390-5 (2002). TS EN 12390-5 Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, Türkiye.

TS EN 206+A2 (2021). TS EN 206+A2 Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, Türkiye.

TS 802 (2016). TS 802 - Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, Türkiye.

Varghese, A., Harikrishnan, T. P., Haritha, K., & Mohammed Razeem, S. M. (2019a). Effect of diameter of reinforced bar in various fiber reinforced concretes. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, *8*(8), 2847–2852.

Varghese, A., N, A., Arulraj G, P., & Johnson Alengaram, U. (2019b). Influence of fibers on bond strength of concrete exposed to elevated temperature. *Journal of Adhesion Science and Technology, 33*(14), 1521–1543.

Wight, J. K., & Macgregor, J. G. (2011). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design* (6. Bs.). Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Wu, H. Q., & Gilbert, R. I. (2009). Modeling short-term tension stiffening in reinforced concrete prisms using a continuum-based finite element model. *Engineering Structures*, *31*(10), 2380–2391.

Xu, F., Wu, Z., Li, W., Liu, W., Wang, S., & Du, D. (2018). Analytical bond strength of deformed bars in concrete due to splitting failure. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *51*(6).

Yalciner, H., Eren, O., & Sensoy, S. (2012). An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level. *Cement and Concrete Research*, *42*(5), 643–655.

Yazdani, N., Spainhour, L., & Saif, H. (2002). *Application of fiber reinforced concrete in the end zones of precast prestressed bridge girders*. (Rapor No. 1902-145-11). Florida: Florida Department of Transportation Sonuç Raporu.

Yew, M. K., Mahmud, H. Bin, Shafigh, P., Ang, B. C., & Yew, M. C. (2016). Effects of polypropylene twisted bundle fibers on the mechanical properties of high-strength oil palm shell lightweight concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *49*(4), 1221–1233.

Yusuf, M. A., Sarhat, S., Hajiloo, H., & Green, M. F. (2020). *Bond strength between steel reinforcement and RCA concrete at elevated temperatures*. 293–300.

Zheng, Z., & Feldman, D. (1995). Synthetic fibre-reinforced concrete. *Progress in Polymer Science*, *20*(2), 185–210.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed SARIGÜZEL

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : 2018, KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi : 2022, KTO Karatay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

Bilimsel Faaliyetleri :

İŞ DENEYİMİ

Stajlar :2016, Stajyer Öğrenci, Şantiye Stajı, Ayhan İnşaat

:2017, Stajyer Öğrenci, Büro Stajı, Lodos Proje Müşavirlik İnşaat Mühendislik Ltd.Şti.

Projeler :

Çalıştığı Kurumlar :

Tarih: 29 Haziran 2022