

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**BETON YOL KAPLAMALARINDA ULTRA YÜKSEK  
PERFORMANSLI LİFLİ BETON (UYPLB) KULLANILMASI  
ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

**AYHAN ARIK**

**DOKTORA TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Ayşe TURABİ (Tez Danışmanı)**  
**Prof. Dr. Ali TOPAL**  
**Dr. Öğr. Üyesi Taylan ENGİN**  
**Dr. Öğr. Üyesi Altuğ YAVAŞ**  
**Dr. Öğr. Üyesi Füsun ÇİFTÇİ**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2022**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Beton Yol Kaplamalarında Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) Kullanılması Üzerine Bir Araştırma**” başlıklı tezde;

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

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

**Ayhan ARIK**

## ÖZET

### BETON YOL KAPLAMALARINDA ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON (UYPLB) KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

DOKTORA TEZİ

AYHAN ARIK

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR ÜYESİ AYŞE TURABI)

BALIKESİR, HAZİRAN 2022

Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) sıkı içyapısı ve durabilite özellikleri nedeniyle mevcut yolların onarılması için kullanılan Whitetopping kaplaması olarak ideal bir malzemedir. Aynı zamanda UYPLB yeni yapılacak beton yollarda da aşınma katmanı olarak kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında, UYPLB katmanının bazı durabilite özellikleri ve beton yollara yapısal katkısı araştırılmıştır.

Durabilite açısından UYPLB'nin aşınma direnci ve donma-çözülme etkisi beton yollar için önemlidir. UYPLB'nin bu durabilite özelliklerini belirlemek için üç farklı lif tipi ve oranına sahip dokuz farklı beton karışımı üretilmiştir. Bu karışımların mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için basınç testi, yarmada çekme testi ve prizma eğilme testleri yapılmıştır. Durabilite özelliklerinin belirlenmesi için ise donma-çözülme ve aşınma testleri yapılmıştır. UYPLB'nin beton yolun yapısal davranışına katkısını belirlemek için ise her bir karışım için katmanlı plaklar üretilmiş ve test edilmiştir. Test plaklarını 60x60x10 cm boyutundadır. Bu plakların 2.5 cm'lik üst katmanları UYPLB, alttaki 7.5 cm kalınlığındaki bölüm ise lifli geleneksel beton ile üretilmiştir. Her bir lif tipi ve lif oranı için 2'şer katmanlı plak üretilip test edilmiş, bunların ortalama sonuçları maksimum yük taşıma kapasitesi, ilk çatlak yükü ve enerji yutma kapasiteleri açısından değerlendirilmiştir.

Lif kullanımı UYPLB'nin basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını, enerji yutma kapasitesini ve plakların ilk çatlak yükü ile maksimum yük taşıma kapasitesini belirgin şekilde arttırmaktadır. Aşınma ve donma-çözülme davranışına da olumlu katkısı mevcuttur. Yapılan çalışmalar neticesinde, kullanılan lif oranının artmasıyla davranışa katkının da arttığı gözlemlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Beton yol, Katmanlı Plak, UYPLB.

Bilim Kod / Kodları : 91125

Sayfa Sayısı: 108

## **ABSTRACT**

### **A RESEARCH ON USING ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE (UHPFRC) IN CONCRETE ROAD PAVEMENTS**

**PH.D THESIS**

**AYHAN ARIK**

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. AYŞE TURABI)**

**BALIKESİR, JUNE 2022**

Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) is an ideal material as a Whitetopping coating for the repair of existing roads due to its tight internal structure and durability properties. Also, UHPFRC can be used as a surface layer in new concrete roads. In this study, some durability properties of the UHPFRC layer and its structural contribution to concrete pavements were investigated.

In terms of durability, abrasion resistance and freeze-thaw effect of UHPFRC are important for concrete pavements. To determine these durability properties of UHPFRC, nine different mixtures with three different fiber types and ratios were produced. In order to determine the mechanical properties of these mixtures, compression test, split tensile test and prism bending tests were performed. In order to determine the durability properties, freeze-thaw and abrasion tests were carried out. In order to determine the contribution of UHPFRC to the structural behavior of the concrete pavement, two layered slabs were produced and tested. In order to determine the contribution of UHPFRC to the structural behavior of the concrete pavement, layered slabs were produced and tested for each mixture. Test plates are 60x60x10 cm in size. The 2.5 cm upper layer of these slabs are made of UHPFRC, and the lower 7.5 cm thick section is made of traditional fibrous concrete. For each fiber type and fiber ratio, two layered plates were produced and tested, and their average results were evaluated in terms of maximum load carrying capacity, initial crack load and energy absorption capacity.

The fiber use significantly improves the compressive strength, splitting tensile strength, and the initial crack load and maximum load carrying capacity of the slabs. It also has a contribution to the wear and freeze-thaw behavior. As a result of the past studies, it was observed that the contribution of the fibers to the general behavior improved with the increase in the fiber ratio.

**KEYWORDS:** Concrete pavements, Layered plate, UHPFRC.

Science Code / Codes : 91125

Page Number : 108

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	7
1.2 Literatür Taraması .....	9
<b>2. BETON YOLLAR</b> .....	<b>12</b>
2.1 Beton Yolların Tarihi .....	12
2.2 Beton Yolların Özellikleri ve Esnek Üstyapılara Göre Avantajları .....	19
2.2.1 Rijit Yol Yapımında Kullanılan Beton Türleri ve Uygulama Teknikleri .....	21
2.2.2 Beton Yolların Esnek Üstyapılara Göre Avantajları .....	23
<b>3. ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETONLAR (UYPLB)</b> .....	<b>27</b>
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>35</b>
4.1 UYPLB İçeriklerinin Belirlenmesi .....	36
4.1.1 Çimento .....	36
4.1.2 Agregası .....	36
4.1.3 Silis Dumanı .....	36
4.1.4 Yüksek Fırın Cürufu .....	37
4.1.5 Çelik Lifler .....	37
4.1.6 Katkı Maddeleri .....	37
4.2 Geleneksel Beton İçeriklerinin Belirlenmesi .....	37
4.2.1 Çimento .....	37
4.2.2 Agregası .....	37
4.2.3 Çelik Lifler .....	39
4.2.4 Katkı Maddeleri .....	39
4.3 Geleneksel Beton ve UYPLB Üretimi .....	39
4.4 Test Numunelerinin Hazırlanması .....	42
4.4.1 Test Numune Kodlarının Verilmesi .....	43
4.4.2 Test Numuneleri .....	43
4.5 Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	45
4.5.1 Beton Basınç Deneyleri .....	45
4.5.2 Beton Çekme Dayanımı Deneyleri .....	47
4.5.3 Dört Noktalı Eğilme Deneyleri .....	50
4.5.4 Beton Aşınma Deneyleri .....	55
4.5.5 Donma Çözünme Deneyleri .....	68
4.5.6 Katmanlı Beton Plak Deneyleri .....	71
<b>5. SONUÇLAR</b> .....	<b>99</b>
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	<b>104</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>108</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1:</b> Ulaşım türlerine göre yurtiçi yük ve yolcu taşıma oranları, 2017 yılı verileri (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2019-2023 Stratejik Planı).....	2
<b>Şekil 1.2:</b> Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre, 2001-2020 yılları arası taşıt-km değerleri (TÜİK).....	3
<b>Şekil 1.3:</b> Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre yol ağında yıllara göre ton-km değerleri (TÜİK).....	4
<b>Şekil 1.4:</b> Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre yol ağında yıllara göre yolcu-km (milyon) değerleri (TÜİK).....	4
<b>Şekil 1.5:</b> Türkiye İstatistik Kurumu 2021 yılı Haziran sonu verilerine göre trafiğe kayıtlı ve kaydı yapılan taşıtların dağılımı (TÜİK).....	5
<b>Şekil 1.6:</b> TÜİK 2021 yılı Haziran ayı verilerine göre 2020 yılındaki otoyollar, devlet, il ve köy yolları dahil satıl cinslerine göre dağılımı (%). ....	5
<b>Şekil 1.7:</b> Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü 2021 yılı verilerine göre karayollarının satıl cinslerine göre dağılımı (%). ....	6
<b>Şekil 1.8:</b> Geleneksel lifli beton ve ultra yüksek performanslı lifli betonun eksenel çekme altındaki davranışları (Naaman, 2007). ....	9
<b>Şekil 2.1:</b> 1891 yılında Bellefontaine kasabasında inşa edilen beton yol. ....	12
<b>Şekil 2.2:</b> 1891 yılında Bellefontaine kasabasında inşa edilen beton yoldan alınan bir kesit.....	12
<b>Şekil 2.3:</b> 1920’li yıllarda sabit kalıp ile 1930’lu yıllarda mekanik olarak yapılan beton kaplama uygulamalarına örnekler (Tanyıldızı, 2010). ....	13
<b>Şekil 2.4:</b> Sabit ve kayar kalıp sistemlerinin uygulama örnekleri (Çetin, 2009). ....	14
<b>Şekil 2.5:</b> Sabit ve kayar kalıp sistemlerinin uygulama örnekleri (Işıksdağ, 2009). ....	14
<b>Şekil 2.6:</b> Afyonkarahisar İncehisar beton yol uygulaması. ....	17
<b>Şekil 2.7:</b> Hasdal Kemerburgaz beton yol uygulaması. ....	17
<b>Şekil 2.8:</b> Hasdal Kemerburgaz beton yol uygulaması yol en kesiti.....	18
<b>Şekil 2.9:</b> Turgut Özal Bulvarı, Adana (1986) (Mutuyılmaz, 2014). ....	18
<b>Şekil 2.10:</b> Mavi Bulvar, Adana (1986) (Çetin, 2009). ....	19
<b>Şekil 2.11:</b> Rijit üstyapının tipik bir en kesiti. ....	19
<b>Şekil 2.12:</b> Beton ve asfalt kaplamalı yolların gece görünüşleri (THBB, 2002). ....	25
<b>Şekil 3.1:</b> UYPLB’ye ait tipik karışım oranları. ....	28
<b>Şekil 3.2:</b> UYPLB’ye ait su/bağlayıcı oranının diğer betonlarla karşılaştırılması (Eide ve Hisdal, 2012).....	28
<b>Şekil 3.3:</b> Ultra yüksek performanslı lifli betonda kullanılan lif çeşitleri (Buttignol ve diğ., 2017). ....	30
<b>Şekil 3.4:</b> Soldaki şekilde lif takviyesiz UYPB’nin, sağdaki şekilde ise UYPLB’nin aynı gerilme altındaki davranışı gösterilmektedir (Fehling ve diğ., 2005). ....	31
<b>Şekil 3.5:</b> UYPLB’nin basınç altındaki Gerilme-Şekil Değiştirme grafiği; a) Farklı tip ve farklı lif oranları için deneysel çalışmalar (Schmidt ve diğ., 2008; Reineck ve diğ.,2003), b) Farklı lif tip, oran ve dağılımlarına göre çıkarılan şematik gösterim (Schmidt ve diğ., 2008) ....	31
<b>Şekil 3.6:</b> Ultra yüksek performanslı lifli betonun eksenel çekme altındaki davranışı (Naaman, 2007). ....	32
<b>Şekil 3.7:</b> Ultra yüksek performanslı lifli betonun uygulama alanları (Gültekin, 2020). ...	33
<b>Şekil 4.1:</b> Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Şerif Saylan Yapı Mekaniği Laboratuvarı. ....	35
<b>Şekil 4.2:</b> Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı. ....	35
<b>Şekil 4.3:</b> UYPLB üretiminde kullanılan bileşenler. ....	36

Şekil 4.4: Beton karıştırılma işinde kullanılan mikser. ....	41
Şekil 4.5: Çelik lifli geleneksel beton karışımı. ....	41
Şekil 4.6: UYPLB'lerin üretiminde kullanılan malzemelerin görünümü. ....	42
Şekil 4.7: Test numunelerinin üretimi. ....	43
Şekil 4.8: Numune kod açılımları. ....	43
Şekil 4.9: Dökümü yapılmış bir set deney numuneleri. ....	44
Şekil 4.10: Mekanik özelliklerin belirlenmesi için üretilen deney numuneleri. ....	44
Şekil 4.11: Plak deney numune örnekleri. ....	44
Şekil 4.12: Geleneksel Beton lifsiz ve farklı lif ve lif oranlarındaki basınç dayanımlarının grafik gösterimi. ....	46
Şekil 4.13: UYPLB lifsiz ve farklı lif ve lif oranlarındaki basınç dayanımlarının grafik gösterimi. ....	46
Şekil 4.14: Geleneksel Beton ve UYPLB lifsiz ve farklı lif ve lif oranlarındaki basınç dayanımlarının grafik gösterimi. ....	47
Şekil 4.15: Yarmada çekme deney düzeneği. ....	47
Şekil 4.16: Geleneksel betonda yarmada çekme dayanımları. ....	49
Şekil 4.17: UYPLB'lerde yarmada çekme dayanımları. ....	49
Şekil 4.18: Geleneksel ve UYPLB'lerde yarmada çekme dayanımları. ....	50
Şekil 4.19: Dört noktalı eğilme deneylerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği. ....	51
Şekil 4.20: Çelik lifsiz UYPB eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	51
Şekil 4.21: 30 mm uzunluk % 0.25 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	52
Şekil 4.22: 30 mm uzunluk % 0.50 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	52
Şekil 4.23: 30 mm uzunluk % 1.00 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	52
Şekil 4.24: 60 mm uzunluk % 0.25 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	53
Şekil 4.25: 60 mm uzunluk % 0.50 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	53
Şekil 4.26: 60 mm uzunluk % 1.00 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	53
Şekil 4.27: 13 mm uzunluk % 0.25 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	54
Şekil 4.28: 13 mm uzunluk % 0.50 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	54
Şekil 4.29: 13 mm uzunluk % 1.00 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği. ....	54
Şekil 4.30: Deney aparatı. ....	55
Şekil 4.31: ASTM C 944-99'a uygun aşınma deneyi ekipmanı. ....	55
Şekil 4.32: Geleneksel beton referans numune, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları. ....	56
Şekil 4.33: % 0.25 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları. ....	56
Şekil 4.34: % 0.50 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları. ....	57
Şekil 4.35: % 1.0 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları. ....	57

<b>Şekil 4.36:</b> % 0.25 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	58
<b>Şekil 4.37:</b> % 0.50 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	58
<b>Şekil 4.38:</b> % 1.0 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	59
<b>Şekil 4.39:</b> % 0.25 oranlı 13 mm düz çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	59
<b>Şekil 4.40:</b> % 0.50 oranlı 13 mm düz çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	60
<b>Şekil 4.41:</b> % 1.0 oranlı 13 mm düz çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	60
<b>Şekil 4.42:</b> UYPLB beton referans numune, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	61
<b>Şekil 4.43:</b> % 0.25 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	61
<b>Şekil 4.44:</b> % 0.50 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	62
<b>Şekil 4.45:</b> % 1.0 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	62
<b>Şekil 4.46:</b> % 0.25 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	63
<b>Şekil 4.47:</b> % 0.50 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	63
<b>Şekil 4.48:</b> % 1.0 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	64
<b>Şekil 4.49:</b> % 0.25 oranlı 13 mm düz çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	64
<b>Şekil 4.50:</b> % 0.50 oranlı 13 mm düz çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	65
<b>Şekil 4.51:</b> % 1.0 oranlı 13 mm düz çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.....	65
<b>Şekil 4.52:</b> Geleneksel beton numunelerinin ortalama değerlerine göre, deney sonunda meydana gelen ağırlıkça ve yüzde kayıplar.....	66
<b>Şekil 4.53:</b> UYPLB numunelerinin ortalama değerlerine göre, deney sonunda meydana gelen ağırlıkça ve yüzde kayıplar.....	66
<b>Şekil 4.54:</b> Geleneksel beton ve UYPLB numunelerinin ortalama değerlerine göre, deney sonunda meydana gelen ağırlıkça ve yüzde kayıpların tek grafik üzerinde gösterilmesi.....	67
<b>Şekil 4.55:</b> Donma çözülme deneyleri sonucunda geleneksel beton karışımlarında meydana gelen kütleli değişim.....	69
<b>Şekil 4.56:</b> Donma çözülme deneyleri sonucunda geleneksel beton karışımlarında meydana gelen kütleli değişim yüzdesi.....	69
<b>Şekil 4.57:</b> Donma çözülme deneyleri sonucunda UYPLB'lerde meydana gelen kütleli değişim.....	70
<b>Şekil 4.58:</b> Donma çözülme deneyleri sonucunda UYPLB'lerde meydana gelen kütleli değişim yüzdesi.....	70
<b>Şekil 4.59:</b> 300 çevrim sonucunda deney numunelerinde meydana gelen kütleli değişim yüzdesi.....	71
<b>Şekil 4.60:</b> Mesnet üzerine oturtulmuş katmanlı beton.....	72



<b>Şekil 4.61:</b> Plaka eğilme testlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği.....	73
<b>Şekil 4.62:</b> Numunenin test düzeneğine yerleştirilmesi.....	73
<b>Şekil 4.63:</b> Plak eğilme testi örnekleri.....	74
<b>Şekil 4.64:</b> Plak eğilme testi örnekleri.....	74
<b>Şekil 4.65:</b> Plak eğilme testi örnekleri.....	75
<b>Şekil 4.66:</b> Çelik lifsiz katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	75
<b>Şekil 4.67:</b> 30 mm uzunluk % 0.25 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	76
<b>Şekil 4.68:</b> 30 mm uzunluk % 0.50 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	76
<b>Şekil 4.69:</b> 30 mm uzunluk % 1.00 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	77
<b>Şekil 4.70:</b> 30 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	78
<b>Şekil 4.71:</b> 30 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).....	78
<b>Şekil 4.72:</b> 60 mm uzunluk % 0.25 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	79
<b>Şekil 4.73:</b> 60 mm uzunluk % 0.50 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	79
<b>Şekil 4.74:</b> 60 mm uzunluk %1.00 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	80
<b>Şekil 4.75:</b> 60 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	80
<b>Şekil 4.76:</b> 60 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).....	81
<b>Şekil 4.77:</b> 13 mm uzunluk % 0.25 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	81
<b>Şekil 4.78:</b> 13 mm uzunluk % 0.50 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	82
<b>Şekil 4.79:</b> 13 mm uzunluk % 1.00 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	82
<b>Şekil 4.80:</b> 13 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.....	83
<b>Şekil 4.81:</b> 13 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).....	84
<b>Şekil 4.82:</b> Farklı lif uzunluklarına ve % 0.25 çelik lif oranı sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).....	84
<b>Şekil 4.83:</b> Farklı lif uzunluklarına ve % 0.50 çelik lif oranı sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).....	85
<b>Şekil 4.84:</b> Farklı lif uzunluklarına ve % 1.00 çelik lif oranı sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).....	85

<b>Şekil 4.85:</b>	% 0.25 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen ilk çatlak yükleri (ortalama değerler). .....	87
<b>Şekil 4.86:</b>	% 0.50 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen ilk çatlak yükleri (ortalama değerler). .....	87
<b>Şekil 4.87:</b>	% 1.00 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen ilk çatlak yükleri (ortalama değerler). .....	88
<b>Şekil 4.88:</b>	% 0.25 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen maksimum yükler (ortalama değerler). .....	88
<b>Şekil 4.89:</b>	% 0.50 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen maksimum yükler (ortalama değerler). .....	88
<b>Şekil 4.90:</b>	% 1.00 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen maksimum yükler (ortalama değerler). .....	89
<b>Şekil 4.91:</b>	% 0.25 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ile lifsiz beton arasındaki maksimum yükteki artış oranlarının yüzdesi (ortalama değerler). .....	89
<b>Şekil 4.92:</b>	% 0.50 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ile lifsiz beton arasındaki maksimum yükteki artış oranlarının yüzdesi (ortalama değerler). .....	89
<b>Şekil 4.93:</b>	% 1.00 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ile lifsiz beton arasındaki maksimum yükteki artış oranlarının yüzdesi (ortalama değerler). .....	90
<b>Şekil 4.94:</b>	Farklı çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen ilk çatlak yükleri (ortalama değerler). .....	90
<b>Şekil 4.95:</b>	Farklı çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen maksimum yükler (ortalama değerler). .....	91
<b>Şekil 4.96:</b>	Farklı çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ile lifsiz beton arasındaki maksimum yükteki artış oranlarının yüzdesi (ortalama değerler). .....	92
<b>Şekil 4.97:</b>	Enerji yutma kapasitelerinin elde edilmesi. ....	93
<b>Şekil 4.98:</b>	% 0.25 çelik lif oranına ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi. ....	94
<b>Şekil 4.99:</b>	% 0.50 çelik lif oranına ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi. ....	95
<b>Şekil 4.100:</b>	% 1.00 çelik lif oranına ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi. ....	95
<b>Şekil 4.101:</b>	30 mm lif uzunluğuna ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi. ....	96
<b>Şekil 4.102:</b>	60 mm lif uzunluğuna ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi. ....	96
<b>Şekil 4.103:</b>	13 mm lif uzunluğuna ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi. ....	97
<b>Şekil 4.104:</b>	Farklı lif uzunluğu ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi. ....	97
<b>Şekil 4.105:</b>	Katmanlı plakların ortalama enerji yutma kapasiteleri. ....	98

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Beton yolların dünyadaki tarihsel gelişimi.....	15
<b>Tablo 2.2:</b> ABD’de üstyapı tipi dağılımı (FHWA, 2016).....	16
<b>Tablo 2.3:</b> Esnek ve rijit üstyapıların avantaj ve dezavantajları. ....	26
<b>Tablo 3.1:</b> UYPLB’nin kronolojik gelişim süreci (Naaman ve Wille, 2012).....	27
<b>Tablo 3.2:</b> UYPLB’ler için en yaygın ticari markalara ait dozajlar ve özellikler (Camacho ve diğ., 2012). ....	29
<b>Tablo 4.1:</b> Çimentonun kimyasal özellikleri. ....	37
<b>Tablo 4.2:</b> Çimentonun fiziksel özellikleri. ....	38
<b>Tablo 4.3:</b> Çimentonun mekanik özellikleri. ....	38
<b>Tablo 4.4:</b> Kırmataş-I ve Kırmataş-II agregalarının fiziksel özellikleri. ....	38
<b>Tablo 4.5:</b> Kırma Kum-I ve Kırma Kum-II agregalarının fiziksel özellikleri. ....	39
<b>Tablo 4.6:</b> Geleneksel betonun bileşenleri.....	40
<b>Tablo 4.7:</b> UYPLB’nin bileşenleri.....	40
<b>Tablo 4.8:</b> Beton basınç dayanımları. ....	45
<b>Tablo 4.9:</b> Yarmada çekme dayanımları.....	48
<b>Tablo 4.10:</b> Plak Eğilme deneylerinde ilk çatlak yükü, deplasmanı, maksimum yük ve maksimum yüke karşılık gelen deplasmanlar. ....	86
<b>Tablo 4.11:</b> Plak Eğilme deneylerinde ilk çatlak yükü, deplasmanı, maksimum yük ve maksimum yüke karşılık gelen deplasmanlar (ortalama değerler). ....	87
<b>Tablo 4.12:</b> Plak Eğilme deneylerinde farklı çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ve lifsiz katmanlı betonda meydana gelen sehimlere karşılık gelen enerji değerleri. ....	92
<b>Tablo 4.13:</b> Katmanlı plaklarda farklı sehimlere karşılık gelen ortalama enerji yutma kapasiteleri.....	94

## SEMBOL LİSTESİ

<b>D</b>	: Silindirin çapı (mm)
<b><math>f_{sp}</math></b>	: Yarmada çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
<b>L</b>	: Silindirin yüksekliği (mm)
<b><math>P_{maks}</math></b>	: Maksimum Yük (N)
<b>UYPLB</b>	: Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada beton yolların lif katkıları ile performanslarındaki etkileşimler deneysel olarak incelenmiştir.

Doktora tezi çalışmalarımnda her türlü desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ayşe TURABİ'ye ve (merhum) hocam Sayın Prof.Dr. Turgut ÖZDEMİR'e, tezimin her aşamasında bilgi ve deneyimlerini paylaşan, deneylerin yapımında laboratuvardaki tüm olanakları seferber eden Sayın Dr. Öğr. Üyesi Altuğ YAVAŞ'a, tezin hazırlanması aşamasında çok değerli bilgi ve yorumlarından faydalandığım Sayın Prof.Dr. Ali TOPAL'a, tezin hazırlanmasında desteklerini esirgemeyen Sayın Doç.Dr. Nuray GEDİK'e, Sayın Dr.Öğr. Üyesi Tamer BİROL'a, Sayın İnş.Yük.Müh. Onur BORA'ya ve Sayın İnş.Yük.Müh. Atılay KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Akademik ve iş hayatımda desteklerini, hoşgörülerini hiç esirgemeyen eşim ve çocuklarıma minnetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

**Balıkesir, 2022**

**Ayhan ARIK**

## 1. GİRİŞ

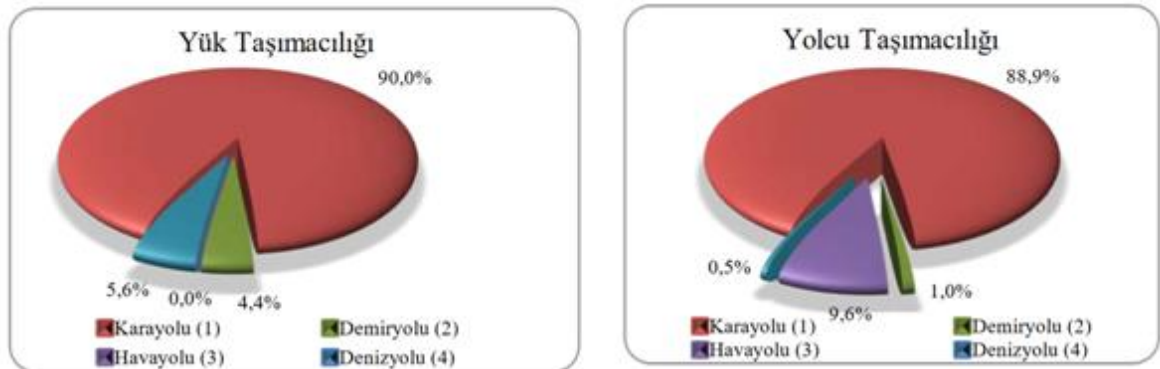
Ulaşım, çağımızda insanların yaşamlarında zaruri ihtiyaçları arasında yer almaktadır. “Kişilerin ve eşyaların bir noktadan başka bir noktaya hareketi” olarak tanımlanan ve sosyo-ekonomik gelişmenin temel itici güçlerinden olan ulaşım günümüzde; karayolları, demiryolları, denizyolları, boru hatları ve havayolları gibi alt sistemlerle sağlanmaktadır. Artık çağdaş ulaşım sistemleri olmaksızın yaşamın sürdürülmesi düşünülemez durumdadır. Sağlık, eğitim, yiyecek, giyecek vb. gereksinimlerin karşılanabilmesi, insanların bir yerden bir yere gitme mecburiyetleri, ulaşım hizmetlerinden yoksun bir toplum için düşünülemez.

Tekerleğin 5000 yıl önce yaklaşık M.Ö. 3000 yıllarında bulunmasından itibaren yollara ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Bilinen en eski yollardan birisi olan İpek Yolu ile başlayan süreç Britanya’da ağaç kütüklerinden oluşan yol keşifleriyle, Mezopotamya’da M.Ö. 1100 yıllarındaki Asur askerlerinin inşa ettiği yollarla ve Roma imparatorluğunun Avrupa’da inşa ettiği uzun ve etkileyici yollarla devam etmiştir. Robert Philips tarafından 1736 yılında Kraliyet Akademisi’ne “İngiltere’deki Anayolların Bugünkü Durumu Üzerine Tez” isimli bir çalışmada iyi drene edilmiş bir taban üzerinde oluşturulan kil ve çakıl yolların üzerine bir çakıl tabakasının yerleştirilmesi durumunda sağlam bir yol elde edileceğini sürülmüştür. XVIII. yüzyıl sonlarında İngiltere’de Thomas Telfard ve John Mc Adam isimli iki İngiliz mühendisin geliştirdiği “makadam” adlı stabilize sistem ile modern yollara geçiş yapılmıştır. 1870 yılında Belçikalı kimyager Edmund J. Desmedt Amerika Birleşik Devletleri’nde Newark’da ilk asfalt yol uygulamasını gerçekleştirmiştir. Aynı yıl içerisinde ABD’de sıcak asfalt üreten ilk tesis açılmış ve 1871 yılında asfalt için ilk patent alınmıştır. 1900’lu yılların başından itibaren petrol endüstrisinin gelişmesiyle birlikte ham petrolün rafinesinden elde edilen bitümün yol inşaatlarında kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Otomobil endüstrisinin de gelişmesiyle yol ihtiyaçları ve dolayısıyla bitüm takviyeli yolların yapımı da çok büyük hız kazanmıştır.

1923 yılında Türkiye Cumhuriyeti’nin ulusal sınırları içerisinde, 13 900 km’si stabilize şose ve 4 450 km’si ise toprak yol olmak üzere 18 350 km yol bulunmaktaydı. Cumhuriyetin ilk yıllarında ulaşımda dönemin en çağdaş teknolojisi olan demiryolu yapımı ağırlık kazanmış, ancak bir süre sonra demiryolunun tek başına yeterli olmadığı, entegre bir ulaşım sistemi için karayoluna ihtiyaç olduğu görülerek, 1929 yılında Nafia Vekaleti(Bayındırlık Bakanlığı) içinde Şose ve Köprüler Reisliği kurulmuş ve çıkarılan yol kanunu ile karayolu

yapım çalışmalarına hız verilmiştir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2019-2023 Stratejik Planı). Yollar önceleri kazma kürekle, insan gücüne dayanarak yapılırken, İkinci Dünya Savaşı'nın ardından iş makineleri teknolojisindeki yeniliklerle makineli yol yapımına geçilmiştir. Getirdiği hızlı ve ucuz sistemle yol yapımında devrim anlamına gelen bu gelişme ve yine aynı dönemde motorlu taşıt sanayindeki gelişmelerin ardından, ülkenin karayolu hamlesinin daha dinamik ve yetkin bir teşkilatla sürdürülmesi amacıyla 1950 yılında Şose ve Köprüler Reisliği yeniden yapılandırılarak Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) kurulmuştur. 1950 yılında farklı bir kalkınma modelinin benimsenmesiyle, İstanbul'u ve batıdaki kentleri hedef alan hızlı bir iç göç başlamış, bunun sonucunda, hala devam eden plansız ve denetimsiz bir kentleşme (yapılaşma) sürecine girilmiştir. Buna paralel olarak artan ulaşım ve taşımacılık ihtiyacının karşılanmasına yönelik planlamalarda ise karayolu tercihi belirginleşmiştir (Karayolları Genel Müdürlüğü).

Ülkemizde yük ve yolcu taşımacılığının büyük bir kısmı karayolları vasıtasıyla gerçekleşmektedir. 2017 yılı verilerine göre ulaşım türleri arasındaki ilişki yurtiçi yük taşımacılığı dağılımı açısından incelendiğinde, karayolunun yük taşımacılığındaki payının % 90, yolcu taşımacılığındaki payının ise % 89 olduğu ve karayolu ile yapılan taşımacılığın diğer ulaşım türlerine göre çok daha fazla ulaşım talebini karşıladığı gözlemlenmektedir (Şekil 1.1).

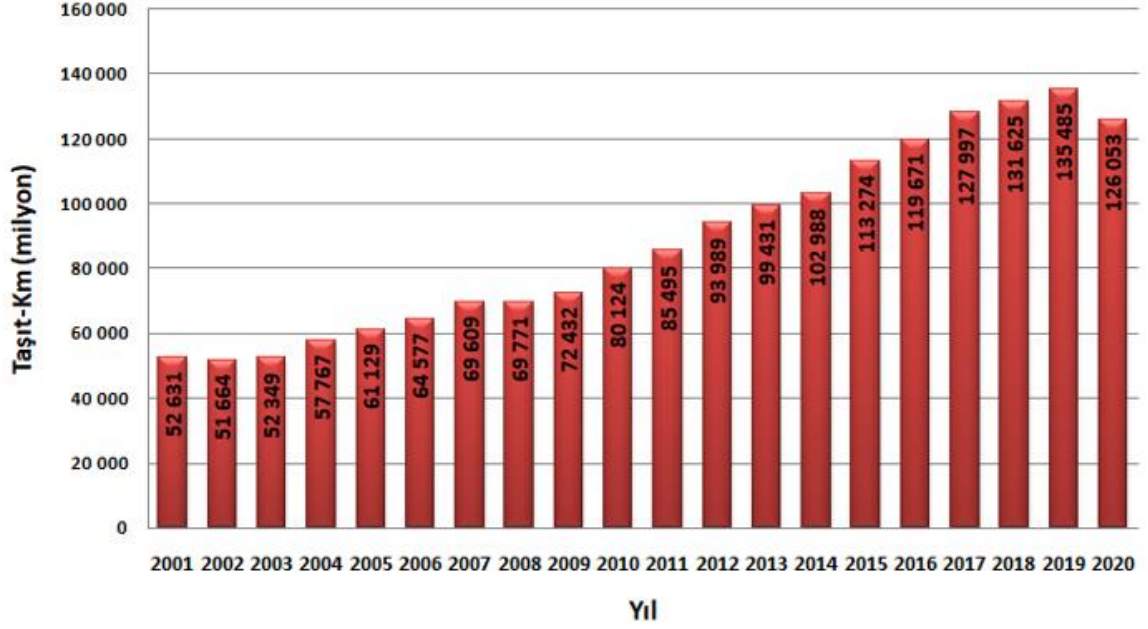


- (1) KGM sorumluluğundaki yol ağı üzerinde yük/yolcu taşımalarıdır.  
(2) TCDD'ye ait yük/yolcu taşımalarıdır. Yolcu taşımalarında banliyö ayrı tutulmuştur.  
(3) Havalimanlarımız arasındaki iç hat yük/yolcu taşımalarıdır. Yük taşımada yüklenen-boşaltılan kargo miktarı (bagaj ve posta hariç).  
(4) Kabotajda yük/yolcu taşımalarıdır. Yolcu x mil ve ton x mil değerleri yolcu-km ve ton-km'ye dönüştürülmüştür.

**Şekil 1.1:** Ulaşım türlerine göre yurtiçi yük ve yolcu taşıma oranları, 2017 yılı verileri (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2019-2023 Stratejik Planı).

Şekil 1.2'den verilen Karayolları Genel Müdürlüğü yol ağına yıllara göre taşıt-km değerleri incelendiğinde 2001 yılında taşıt-km değerinin yaklaşık 53 milyon olduğu, 2020 yılında ise

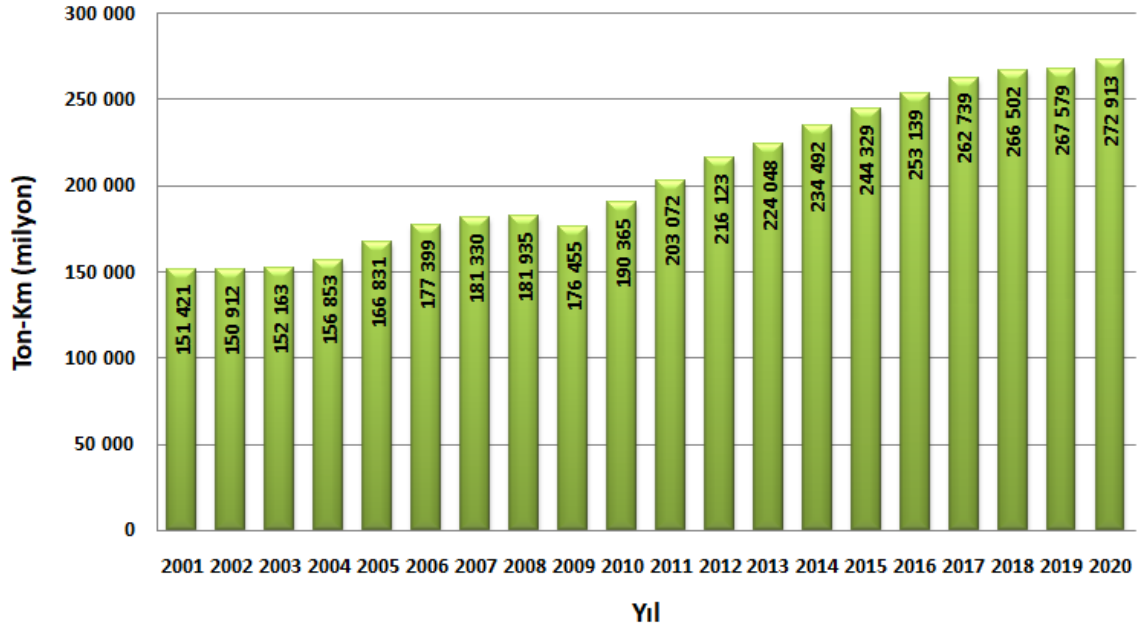
bu değerin yaklaşık 126 milyon taşıt-km değerine ulaştığı yani son 19 yılda yaklaşık % 137'lik bir artışın meydana geldiği gözlemlenmektedir. Söz konusu veriler ışığında taşıt-km değerlerindeki artışlar göz önünde bulundurulduğunda en çok kullanılan ulaşım türü olan karayolunun korunmasının ve geliştirilmesinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır.



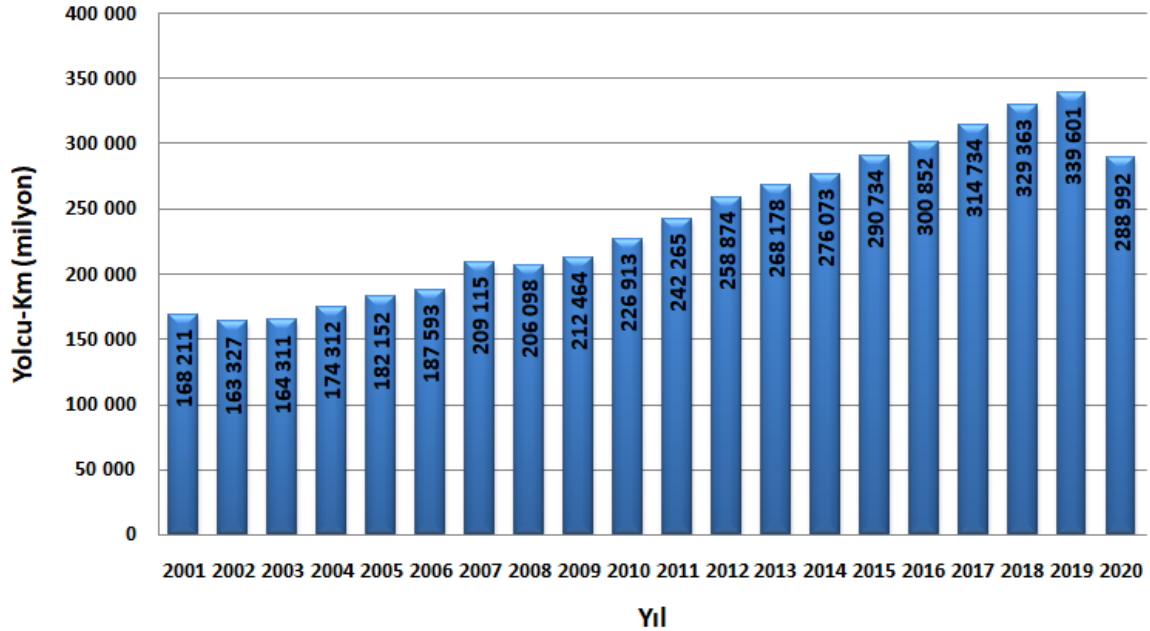
**şekil 1.2:** Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre, 2001-2020 yılları arası taşıt-km değerleri (TÜİK).

şekil 1.3'de gösterilen yıllara göre ton-km değerleri incelendiğinde yük taşımacılığı, 2001 yılına göre 19 yılda yaklaşık % 80'lik bir artış göstererek 272 913 ton-km (milyon) değerine ulaşmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğundaki yol ağlarında gerçekteşen yolcu taşımacılığı 2001 yılında 168 211 yolcu-km (milyon) değerindeyken bu değer 2019 yılında yaklaşık 339 601 yolcu-km (milyon) değerine ulaşmıştır (şekil 1.4).





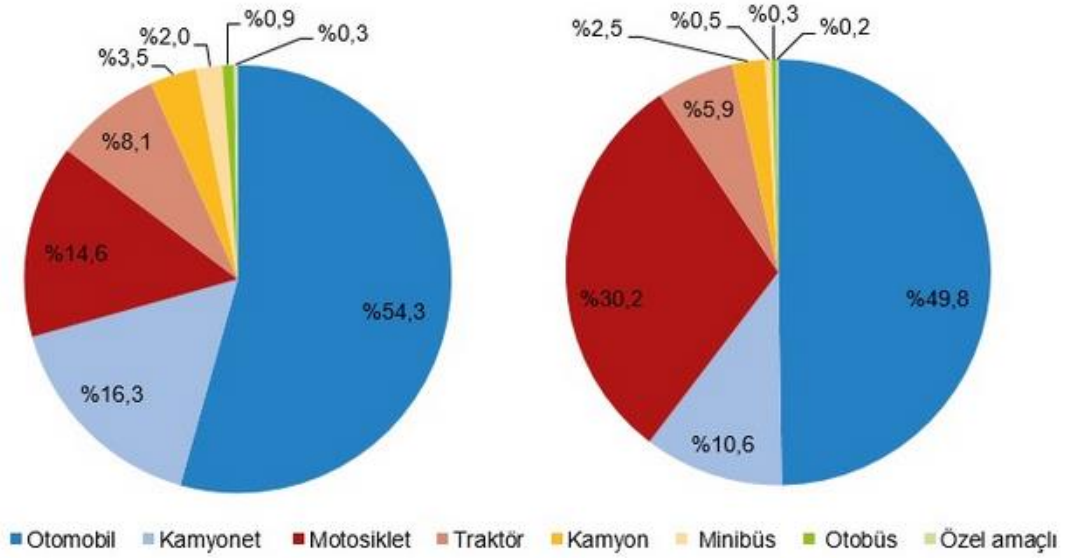
**Şekil 1.3:** Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre yol ağında yıllara göre ton-km değerleri (TÜİK).



**Şekil 1.4:** Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre yol ağında yıllara göre yolcu-km (milyon) değerleri (TÜİK).

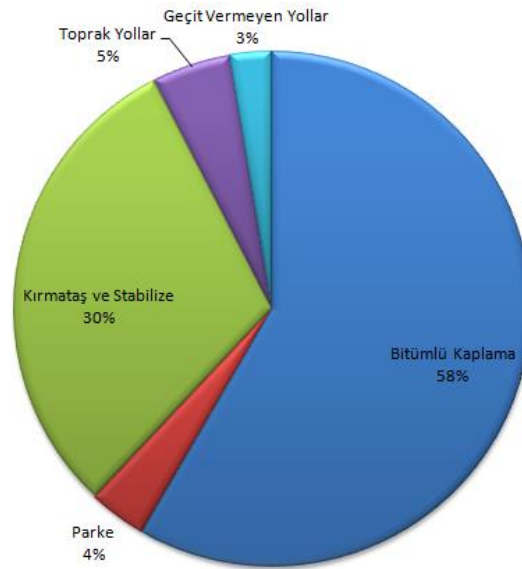
Ülkemizde taşıt sahipliği ve paralelinde yüksek standartlı karayolu ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. TÜİK 2021 yılı Haziran ayı verilerine göre trafiğe kayıtlı toplam taşıt sayısı 24 729 901 değerine ulaşmıştır. Yine aynı verilere göre trafiğe kayıtlı toplam taşıt sayısı içerisinde en önemli araç türü % 54.3'lük dilime sahip olan otomobildir (Şekil 1.5).

**Trafiğe kayıtlı taşıtların dağılımı, Haziran 2021**      **Trafiğe kaydı yapılan taşıtların dağılımı, Haziran 2021**



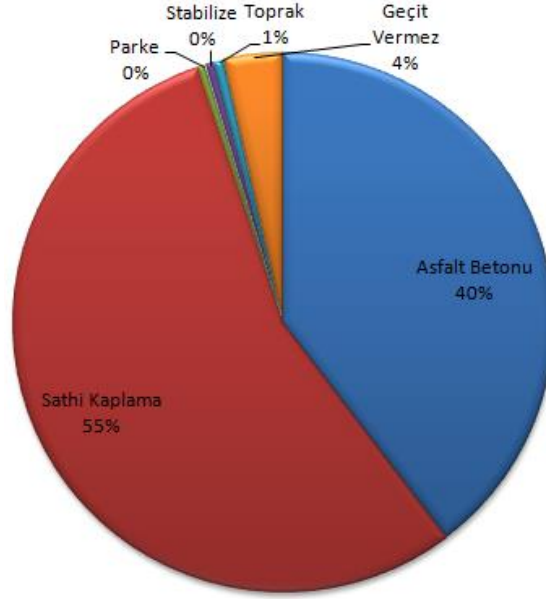
**Şekil 1.5:** Türkiye İstatistik Kurumu 2021 yılı Haziran sonu verilerine göre trafiğe kayıtlı ve kaydı yapılan taşıtların dağılımı (TÜİK).

TÜİK verilerine göre 2020 yılındaki yolların yüz ölçümünün dağılımı Şekil 1.6'da gösterilmektedir. Buna göre mevcut yolların % 30 kırmataş ve stabilize, % 5 toprak yol ve % 3 geçit vermeyen yol olmak üzere toplam % 38'i hala sürüş konforundan uzak bir durumdadır.



**Şekil 1.6:** TÜİK 2021 yılı Haziran ayı verilerine göre 2020 yılındaki otoyollar, devlet, il ve köy yolları dahil yüz ölçümüne göre dağılımı (%).

KGM verilerine göre 2021 yılındaki otoyol, devlet yolu ve il yolu olmak üzere yolların sath cinslerinin dağılımı Şekil 1.7’de gösterilmektedir. Buna göre mevcut yolların % 4’ü geçit vermez, % 1’i toprak ve % 55 sathi kaplamaya sahiptir.



**Şekil 1.7:** Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü 2021 yılı verilerine göre karayollarının sath cinslerine göre dağılımı (%).

KGM verilerine göre 2021 yılındaki sathi kaplamaya sahip yollar 37 922 km, asfalt betonuna sahip yollar ise 27 230 km, diğer yollar ile birlikte toplam yol ağı 68 633 km uzunluğuna ulaşmış durumdadır.

Avrupa ve dünya standartları ile paralel bir şekilde özellikle son 20 yılda karayolu ağında, yapım teknolojilerindeki gelişmelerle de paralel bir şekilde kaliteli, yüksek standartlı, konforlu yollarda büyük bir artış meydana gelmiştir. Beton yol teknolojilerinde de yaşanan hazır beton, lifli beton, ön germeli beton, kayar kalıp vb. gibi yenilikler ve hızlı gelişmeler ile yol ağlarında beton kaplamaların kullanılması bitüm gibi petrol bazlı asfalt kaplamalara karşı büyük önem kazanmıştır. Avrupa ve dünyada birçok uygulaması görülen beton yollar ülkemizde sadece belirli bölgelerde uygulanmış olup pilot uygulama aşamasından öteye geçilememiştir.

13.10.1983 tarihinde yürürlüğe giren 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanunu'nun yönetmeliği ile yasal tekil dingil yükü 10 tondan 13 tona, çift (tandem) dingil yükü ise 16 tondan 19 tona çıkarılmıştır. Daha sonraki yıllarda bu yükler 11.5 ton ve 17 ton olarak revize

edilmiştir. Karayollarımızda denetimsiz seyahat eden aşırı yüklü taşıtlar nedeniyle asfaltlar öngörülen süreden önce bozulmaya başlamakta, ağır dingil yüklerinden ve yoğun ağır vasıta trafiğinden kaynaklı asfalt yol hasarları ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Ayrıca Türkiye’de son yıllarda asfalt yollar için bakım-onarım harcamalarının giderek arttığı gözlemlenmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü 2020 yılı verilerine göre 1 km yolun bakımı için harcanan yıllık ortalama gider 94.411 TL (emanet ve ihaleli bakım) ve toplam karayolu ağımızda asfalt bakımı için gider masrafı 3.620.229.666 TL (emanet ve ihaleli bakım) olarak açıklanmıştır. Karayollarına ayrılan bütçenin çok büyük bir bölümü bakım-onarım hizmetlerine ayrıldığı düşünüldüğünde daha dayanıklı, uzun yıllar bakım onarım gerektirmeden kullanılabilir yolların yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu durumda dünyada pek çok ülkede kullanımı gittikçe yaygınlaşan, bakım giderleri esnek kaplamalı yollara oranla oldukça az olan, daha az bakım gerektiren ve daha uzun süre hizmet verebilen beton yolların kullanımı öne çıkmaktadır. Türkiye’de beton yol kullanımının öne çıkarılması gerekliliğinin ön önemli sebeplerinden biri de beton üretiminin yerli ve milli kaynakları ile sağlanması, gelişmiş teknoloji ürünü olması ve uzun vadede esnek üstyapılara oranla bakım ve onarım masraflarının daha düşük olmasıdır.

Tüm bu etkenler değerlendirildiğinde beton yolların ekonomik ömrünü doldurmuş mevcut yolların onarımında ve özellikle yeni yol/yeni otoyol yapımlarında tercih edilmesinin bir gereklilik olduğu görülmektedir.

### **1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Günümüzde yol imalatlarında kullanılan hem rijit hem de esnek yol kaplamalarının bozulmasında iki ana etken mevcuttur. Bunlar çevresel faktörler (sıcaklık, güneş ışığına maruz kalma, oksidasyon vb. gibi) ve yüklerle ilgili faktörlerdir. Yüklerle ilgili faktörler yorulma çatlama, tekerlek izi gibi yapısal sıkıntıların gelişmesine neden olurken, çevresel faktörler termal çatlaklara, blok çatlaklarına ve dağılma gibi etkenlere neden olabilmektedir. Kaplamalar çatladıkça, yük taşıma kapasitelerini kaybetmeye başlar ve yüzey altındaki katmanlara nemin sızması etkilerine karşı daha hassas bir hal alırlar. Nemin alt tabakalara sızmasıyla kaplamanın daha fazla zayıflamasına ve bozulmasına neden olabilir (Uzarowski and Bashir, 2007). Oluşan bu çatlakların dolayısı ile yolun onarımı için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar;

- Asfalt kaplama yapmak
- Geri dönüşüm

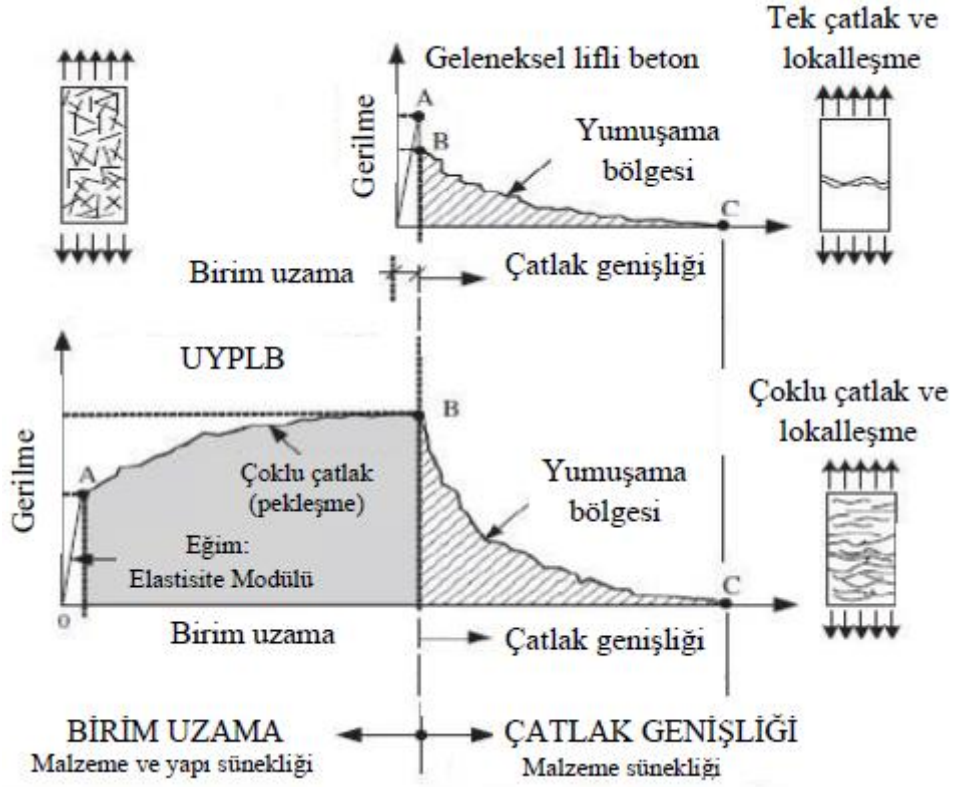
- Tümden yenilemek
- Yapısal kaplama yapmak.

Yapısal kaplamalar ile iyileştirme gerçekleştirilerek kaplamanın yapısal kapasitesi arttırılır. Kaplamalarda iyileştirme yapmak için üç farklı yöntem uygulanmaktadır. Bunlar;

- Asfalt Betonu
- Beton Kaplama (Whitetopping)
- Çok İnce Beton Kaplama (Ultra-thinwhitetopping)

Son yıllarda asfalt kaplamaların üzerine uygulanan Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) ile yapılabilmektedir.

UYPLB çok yüksek basınç dayanımı ve çekme altında üstün çatlak sonrası performansı nedeniyle normal ve yüksek dayanımlı lifli betonlara göre önemli avantajlara sahiptir. Özellikle geleneksel lifli betonlardan farklı olarak çatlak sonrası çekmede dayanım artışı göstermesi (strain-hardening) karakteristik özelliklerinden bir tanesidir. UYPLB ile normal dayanımlı lifli betonun aksenal çekme altındaki karakteristik davranışları Şekil 1.8’de sunulmuştur. Matristeki lifler çatlak sonrası evrede oluşan kılcal çatlakları sınırlayarak/önleyerek betonun dayanımının artmasını sağlamaktadır. Bu evrede çok sayıda kılcal çatlak meydana gelmektedir. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldığında ise çatlaklar genişlemekte ve lifler sıyrılmaya başlamakta, yakın çatlaklar bir bölgede yoğunlaşarak tek bir çatlak meydana getirmektedir. Yük taşıma kapasitesi sonrası dayanım azalması (yumuşama) başlamaktadır. UYPLB için kullanılan lif veya liflerin hacimsel oranları, boyutları ve mekanik özelliklerine bağlı olarak betonun kapasitesi, rijitliği, enerji yutma kapasitesi (tokluğu) farklılıklar göstermektedir. Şekil 1.8’den de görüldüğü gibi normal dayanımlı betona lif eklendiğinde tepe yük sonrası pekleşme oluşmamakta, yumuşama davranışı hakim olmaktadır. UYPLB yüksek sıklıkta içyapısı sebebiyle lifler ile matris arasında yüksek aderansın olması bu davranışın en önemli nedenidir.



**Şekil 1.8:** Geleneksel lifli beton ve ultra yüksek performanslı lifli betonun aksenal çekme altındaki davranışları (Naaman, 2007).

UYPLB'nin sıkı içyapısı ve durabilite özellikleri mevcut yolların onarılması, asfalt üzeri beton kaplaması (whitotopping) veya yeni yapılacak yollarda aşınma tabakası olarak kullanılması için ideal bir malzeme olmaktadır.

Bu doktora çalışmasının amacı, ultra yüksek performanslı lifli betonların, eskiyen iyileştirme gereksinimi duyan asfalt kaplama üzerine veya yeni yapılacak beton kaplamalarda aşınma tabakası olarak kullanılması durumunda betonun bazı durabilite özelliklerinin ve beton yollara yapısal katkısının belirlenmesidir. Bu kapsamda, betonun durabilite özelliklerinin belirlenmesi için beton aşınma deneyleri, donma-çözünme deneyleri, mekanik özelliklerin belirlenmesi için basınç dayanım deneyleri, yarmada çekme dayanımı deneyleri ve prizma eğilme deneyleri, katmanlı plakların yapısal davranışının belirlenmesi için ise plak eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

## 1.2 Literatür Taraması

Kadioğlu (2020), Trabzon'da aynı yol güzergahı, aynı iklim etkileri ve trafik yüküne maruz kalan asfalt ve beton kaplamaların dayanıklılıkları, ilk yapım ve bakım maliyetleri karşılaştırmıştır. Buna göre beton ve asfalt kaplamalı yollardan karot numuneleri alınarak

basınç dayanım değerleri karşılaştırılmış, asfalt kaplamaların stabilite değeri limit değerlerin altında kaldığı, beton yolların ise proje dayanım sınıfı limitlerinde yer aldığı gözlemlenmiştir. Gözlem alanlarından birinde asfalt kaplamalarında çökme, çatlama ve çeşitli deformasyonların meydana geldiği gözlemlenmekle birlikte beton yollarda benzer deformasyonların gözlemlenmediği belirtilmekte olup beton yolların asfalt kaplamalı yollara göre daha yüksek bir dayanıma sahip olduğu gösterilmiştir.

Kınay (2020), bazalt agregalı lifsiz ve bazalt agregalı lifli beton, bazalt agregalı lifsiz ve bazalt agregalı lifli pudra beton olmak üzere 4 farklı tip beton üreterek her bir betonun farklı kür koşullarındaki basınç, çekme, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını test etmiştir. Bazalt agregalı lifsiz betonun basınç dayanımı istenilen limit değeri sağlamakla birlikte eğilme dayanımı 3 farklı kür koşulunda dahi istenilen limit değeri sağlamadığı, bazalt agregalı lifli betonun ise basınç dayanımı istenilen limit değeri sağlamakla birlikte eğilme dayanımı sadece kombine kür sonrası istenilen limit değeri sağlamaktadır. Bu nedenle bazalt agregalı lifsiz beton ve kombine kür yapılmayan bazalt agregalı lifli betonun yol kaplaması olarak kullanılamayacağı sonucuna varılmıştır. Bazalt agregalı lifsiz pudra betonun, istenilen basınç dayanımını 3 farklı kürde de sağlayabildiği, istenilen eğilme dayanımını ise su ve kombine kür ile sağlayabildiği fakat sadece hava kürünün uygulanması durumunda istenilen eğilme dayanımına ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Bazalt agregalı lifli pudra betonun ise 3 farklı kür durumunda da istenilen basınç ve eğilme dayanımlarını karşılayabildiği, bu nedenle yol kaplaması olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir. 4 farklı tip betonda en yüksek dayanımların elde edildiği kür tipinin kombine kür olduğu tespit edilmiştir.

Kızılelma (2021), mikro ve makro liflerin beton yol performansına etkisini incelemiştir. Buna göre hacimce % 0.3, % 0.6 ve % 0.9 oranlarında mikro (poliamid) ve makro (polipropilen) lifler kullanılarak sertleşmiş betonda ultrasonik geçiş hızı, basınç, eğilmede çekme dayanımı, donma-çözünme, yaşlandırma, kayma analizi, böhme aşınma, kılcal su emme, çarpma dayanımı ve SEM analizleri yapılarak beton performansları incelenmiştir. Beton yollarda kullanım ömrünü etkileyen en önemli parametrelerin basınç ve eğilme dayanımları olduğu göz önüne alındığında, sonuç olarak mikro ve makro liflerin kür süresi fark etmeksizin eğilme dayanımını arttırdığı, her iki lif türünde de basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

Uçar (2022), çalışmasında iki farklı lif tipi (Sikafiber PPM-12 ve Polymono 18) ve su/çimento oranları ile farklı gradasyonlar kullanarak üretilen betonlarda basınç, eğilme mukavemetleri ile enerji yutma kapasitelerinin optimizasyonunu amaçlayarak Taguchi metodu L16 ortogonal dizisi yardımıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Su/çimento oranları 0.30, 0.35, 0.40 ve 0.45, lif oranları ise % 0, % 0.50, % 1 ve % 1.5 olacak şekilde farklı su/çimento ve lif oranlarına göre katkılı betonlar üretilerek deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmalar sonucunda, liflerin basınç dayanımına çok fazla bir etkisinin olmadığı, karışıma % 0.5'den daha fazla lif katıldığında dayanımın azaldığı, eğilme mukavemetinde ise polipropilen lif oranının artmasıyla dayanımın arttığı gözlemlenmiştir. Basınç ve eğilme dayanımları açısından en olumlu sonucun liflerin hibrit kullanımı ile elde edildiği tespit edilmiştir.



## 2. BETON YOLLAR

### 2.1 Beton Yolların Tarihi

Karayolu üstyapıları, yapımında kullanılan malzemeye ve yüzey çeşidine göre “Rijit Üstyapı”, “Esnek Üstyapı” ve “Kompozit Üstyapı” olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Esnek üstyapılarda bağlayıcı malzeme olarak petrol ürünü olan bitüm kullanılmakta iken rijit üstyapılarda bağlayıcı olarak kullanılan malzeme çimentodur. Kompozit üstyapılarda ise beton ve asfalt üstyapıda tabakalar halinde birlikte kullanılmaktadır. Resmi olarak bilinen ilk rijit üstyapı Amerika Birleşik Devletleri Ohio eyaleti Bellefontaine kasabasında George Batholomew tarafından 1891 yılında inşa edilmiştir. 1891 yılında yapımı tamamlanan beton yol 2021 yılı itibariyle hala rijitliğini sürdürmekte olup söz konusu bölge Şekil 2.1’den görülebilir. Ayrıca Şekil 2.2’de söz konusu beton yoldan alınan bir kesit gösterilmektedir.



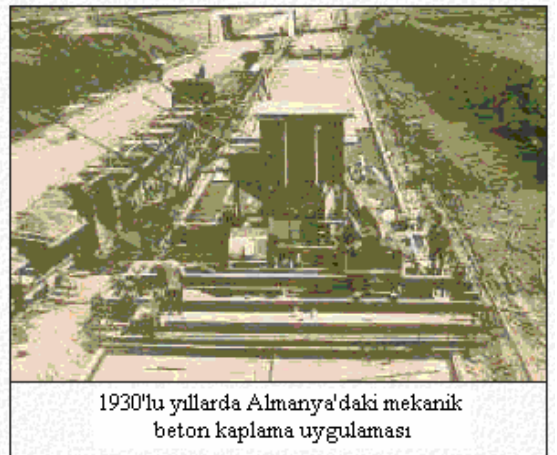
Şekil 2.1: 1891 yılında Bellefontaine kasabasında inşa edilen beton yol.



Şekil 2.2: 1891 yılında Bellefontaine kasabasında inşa edilen beton yoldan alınan bir kesit.

1930 yılına kadar rijit ve diğer tip üstyapıların taşıma, yerleştirme, sıkıştırma ve tamamlama işlemleri insan gücü yardımıyla gerçekleştirilmekteydi. İkinci Dünya Savaşı öncesi Almanya’da beton yol üretimi hız kazanarak 4 000 km’ye ulaşmıştır. İngiltere’de 1945-1975 yılları arasında üstyapıların çoğu, kaplamanın her iki yanına yerleştirilmiş raylar üzerinde ilerleyen mekanik kaplayıcılar aracılığı ile yapılmaya başlanmıştır. A.B.D. de 1957 yılında başlayan “Eyaletlerarası Otoyol Sistemi” tamamlandığında önemli bölümü beton kaplama olarak 60 000 km’den fazla yol yapılmıştır. Bu gün A.B.D. de bazı büyük şehirlerin çevre yolları da beton kaplamadır (Darter, 1993).

Kayar-kalıp sistemi, Iowa Eyaleti Karayolları komisyonunda malzeme mühendisi olarak çalışan J. W. Johnson tarafından geliştirilmiş olup zamanla yüksek verimlilik ve uygulanabilirlik özelliğinden dolayı kayar-kalıp sistemi ile kaplama işlemi en çok kullanılan metot haline gelmiştir. Kayar-kalıp tipli kaplayıcılar kenar kalıplarına ihtiyaç duymadan hazırlanmış alt-temel üzerinde hareket ederek gerekli sıkıştırma ve seviyeleme işlemini aynı anda gerçekleştirebilirler. Günümüzdeki mekanik kaplama araçları eskiye göre daha karmaşık hale gelmiş ve otomatikleştirilmiştir. Bu tip araçlar birden fazla şeridi tek bir geçişte yerleştirebilmektedirler. Sabit kalıp ve kayar kalıp uygulamalarına ait örnekler 1920 ve 1930 yıllarındaki beton yol uygulamaları Şekil 2.3’de, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.3:** 1920’li yıllarda sabit kalıp ile 1930’lu yıllarda mekanik olarak yapılan beton kaplama uygulamalarına örnekler (Tanyıldızı, 2010).



**Sabit Kalıp Sistemi ile Beton Kaplama Uygulaması**



**Kayar Kalıp Sistemi ile Rijit Üstyapı Uygulaması**

**Şekil 2.4:** Sabit ve kayar kalıp sistemlerinin uygulama örnekleri (Çetin, 2009).



**Sabit Kalıp Sistemi ile Beton Kaplama Uygulaması**



**Kayar Kalıp Sistemi ile Rijit Üstyapı Uygulaması**

**Şekil 2.5:** Sabit ve kayar kalıp sistemlerinin uygulama örnekleri (Işıkdag, 2009).

Tablo 2.1’de beton yolların dünyadaki tarihsel gelişimi özetle gösterilmektedir.

**Tablo 2.1:** Beton yolların dünyadaki tarihsel gelişimi.

Zaman	Durum
M.Ö. I.YY	Romalılar’ın çimento benzeri puzolanik bağlayıcılar kullanarak yaptıkları yollar
1865	İskoçya’da ilk beton yol denemeleri
1880	Avustralya’da ilk beton yollar yapılmaya başlıyor
1891	Ohio’da Amerika’nın, bugün de kullanılmakta olan ilk beton yolu yapıyor
1913	Arkansas’ta Amerika’nın ilk beton otoyolu yapıyor
1914	Amerika’da 3.500 km beton yol yapımı tamamlanıyor; yol yapımında “Silindirle Sıkıştırılan Beton” (Roller Compacting Concrete) kullanılmaya başlanıyor
1924	Fransa’da beton yol yapımı programı başlatılıyor
1930	Almanya’da 4.000 km uzunluğunda beton otoyol yapımına başlanıyor İsviçre, Belçika başta olmak üzere, diğer Avrupa ülkelerinde de beton yol yapımı başlıyor
1950	Kayar kalıp kullanımıyla beton yol yapımında hız ve kalite artıyor
1960 - 70	ABD ve Kanada’da beton yol yapımı yoğunlaşıyor; ABD’de 70.000 km beton yol yapıyor.
1990	Beton teknolojisindeki ilerlemelerle beton yol yapımında yeni gelişmeler kaydediliyor. Betonda lif kullanımı, öngerme teknolojisi, akıcı-kuru kıvamlı

Dünyanın en büyük yol ağına sahip Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) kırsal ve kentsel yol ağına ait veriler üstyapı durumlarına göre Tablo 2.2’de gösterilmektedir. ABD’de yol üstyapı tipi bilinmeyen önemli bir miktarda yol ağı bulunmaktadır. Yol üstyapı tipi bilinen yol ağları göz önüne alındığında toplam yol ağının % 6’sında beton yol kullanımı olduğu gözlemlenmektedir. Kompozit yol tipinde de beton yol kullanıldığı düşünüldüğünde bu oranın % 18 değerine ulaştığı görülmektedir. Daha önemli bir gözlem olarak ağır taşıt trafiğinin bulunduğu eyaletler arası yollarda rijit ve kompozit yol toplam kullanımının % 50 mertebelerine ulaştığı görülmektedir. ABD’nin dünyanın en büyük bitüm üreticisi olduğu düşünüldüğünde, beton yolların asfalt yollara göre tercih edilebilirliğin gün geçtikçe arttığı söylenebilir (Şengün ve Yaman, 2019).

**Tablo 2.2:** ABD’de üstyapı tipi dağılımı (FHWA, 2016).

Yol Kategorisi	Yol Üstyapısı Belirli Olan Kırsal ve Kenstsel Yol Ağları						Toplam
	Esnek		Kaplama Tipi			Kompozit	
			Rijit				
Eyaletlerarası Yol	41138	%53	17350	%23	18514	%24	77002
Diğer Devlet Yolları ve Hız Koridorları	15513	%52	8174	%28	5912	%20	29599
Ana Arterler	182037	%73	17774	%7	49379	%20	249191
İkincil Arterler	309366	%80	17270	%4	58106	%15	384741
Ana Toplayıcı Yollar	691731	%90	30441	%4	46709	%6	768881
Toplam (Kırsal ve Kenstsel)	1239784	%82	91009	%6	178620	%12	1509413

Avusturya’da otoyolların yaklaşık % 75’i, Belçika’da otoyolların yaklaşık yarısı ve hatta köy yollarının % 60’ı, Almanya’da ise otoyolların % 25’ini beton yollar oluşturmaktadır (Şengün ve diğerleri, 2016).

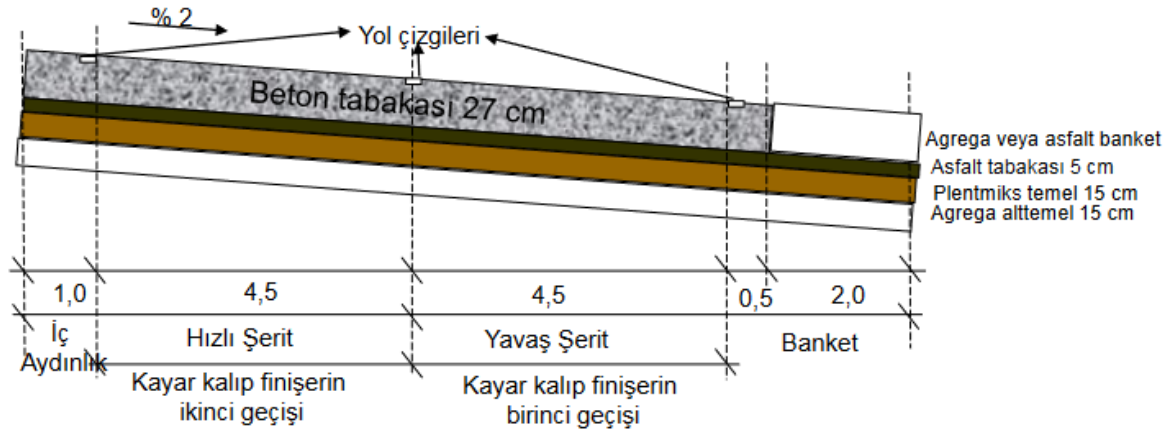
Ülkemizde ilk beton yol denemesi Karayolları Genel Müdürlüğü ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) arasında gerçekleştirilen protokol çerçevesinde 2005 yılında Afyonkarahisar İncehisar (Şekil 2.6) devlet yolunda 2 000 m uzunluğunda tek doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yine aynı protokol çerçevesinde 2007 yılında Hasdal Kemerburgaz (Şekil 2.7) devlet yolunun 40+000 ve 43+500 km’leri arasında 3 500 m uzunluğunda tek doğrultuda beton yol üretimi gerçekleştirilmiştir. Hasdal Kemerburgaz beton yolunun eğimi % 2, tabaka kalınlığı ise 32 cm olarak uygulanmıştır. Uygulanan yolun enkesiti Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) ile birlikte 2009 yılında Ordu Ulubey devlet yolunda 2 000 m bor katkılı çimento kullanılarak beton yol üretimi yapılmıştır. 2010 yılında KGM tarafından Karamürsel şehir geçişinde 2 000 m uzunluğunda beton yol yapımı gerçekleştirilmiştir (KGM, 2021).



Şekil 2.6: Afyonkarahisar İncehisar beton yol uygulaması.



Şekil 2.7: Hasdal Kemberburgaz beton yol uygulaması.



**Şekil 2.8:** Hasdal Kemerburgaz beton yol uygulaması yol en kesiti.

Diğer yandan, KGM sorumluluğu dışındaki alanlar Büyükşehir Belediyeleri ve İl Özel İdareleri sorumluluğunda yer almaktadır. Bu yolların uzunluğu ve üstyapı dağılımı tam olarak bilinmemekle birlikte toplam uzunluğun 350 000 km'nin üzerinde olduğu tahmin edilmektedir. Bu yollarda da çeşitli tipte beton yol uygulamaları bulunmaktadır (Şengün ve Yaman, 2019). 1985-1990'lı yıllarda Adana Büyükşehir Belediyesi tarafından başlatılan Yeni Adana Projesi kapsamındaki Planlı Şehirleşme uygulamalarında birçok bulvar beton yol olarak yapılmıştır (Uçar ve Konrapa, 2002). Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da Adana'da uygulanan beton yol örnekleri sunulmaktadır.



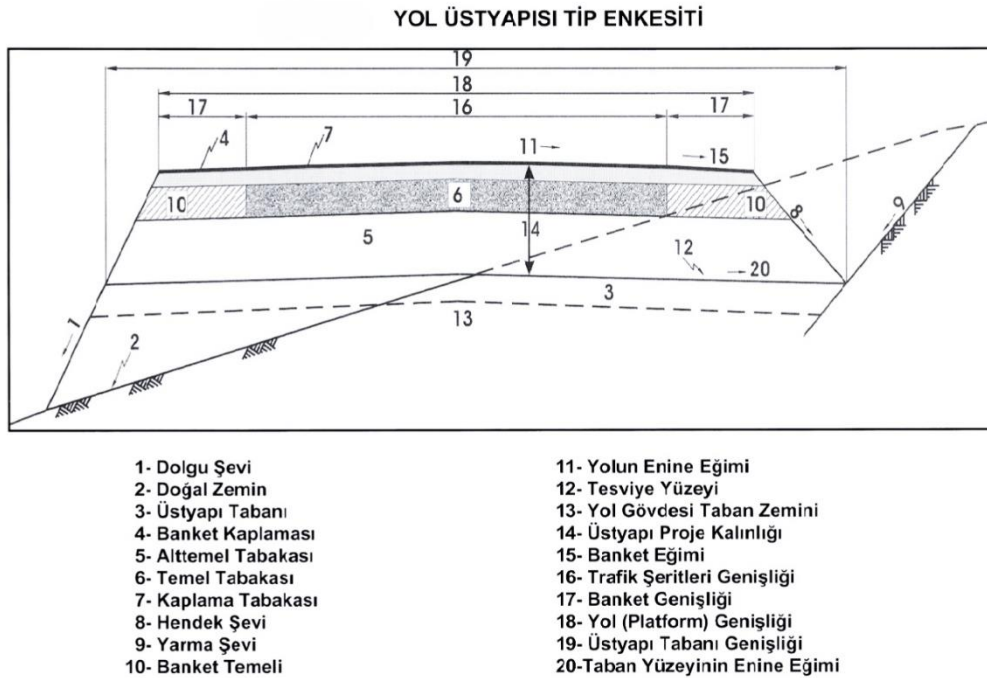
**Şekil 2.9:** Turgut Özal Bulvarı, Adana (1986) (Mutylmaz, 2014).



Şekil 2.10: Mavi Bulvar, Adana (1986) (Çetin, 2009).

## 2.2 Beton Yolların Özellikleri ve Esnek Üstyapılara Göre Avantajları

Beton yollar, belirli büyüklüklere sahip granüler malzemeden oluşan belirli kalınlıkta alt temel tabakası üzerine kısmen donatılı veya sürekli donatılı olarak serilen beton plaklardan oluşmaktadır. Şekil 2.11’de rijit üstyapının tipik bir enkesiti gösterilmektedir.



Şekil 2.11: Rijit üstyapının tipik bir en kesiti.

Rijit yolların davranışları, esnek yollarda da olduğu gibi kaplama altına serilen malzemelerin ve mevcut taban zemininin özelliklerine göre değişmektedir. Bu yüzden, betonu oluşturan malzemelerin yanında, taban zemini, alt temel ve temel tabakalarının fiziksel özelliklerinin



iyi irdelenmesi gerekmektedir. Taban zemininin özellikleri plak gerilmelerine önemli ölçüde etki ettiğinden zemin yapısının bu gerilmeleri karşılayacak özelliklere sahip olması gerekmektedir. Serbest su bulunması halinde alt temel kısmına uygun malzeme koyarak pompaj olayına yatkın zemin korunmalıdır. Plastisite indeksi 25'ten az olan zeminler uygun bir deney yöntemiyle tespit edilen yoğunlukların en az % 95'i elde edilecek şekilde sıkıştırılmalıdır. Yüksek plastisite indeksine sahip killi zeminler alt temel tabakasına ilave olarak yeterli kalınlıkta seçme malzeme ile örtülmelidir. Don olan alanlarda, önlem olarak dona hassas zemin sıyrılıp atılmalıdır. İyi sıkışmamış taneli taban zeminleri trafığın titreşimiyle yerleşerek oturacağı için yeterince sıkıştırılmalıdır. Fazla elastik olan zeminlerde yeterli kalınlıkta uygun malzeme ile ek çökmelerin oluşturacağı zararlı etkilerin önüne geçilir (Ağar ve Öztaş, 1998).

Donma etkisi, yüksek hacim gösteren topraklarda “şişme” ve “büzülme” etkisi ve ince taneli topraklarda “pompaj” etkisi gibi durumların görülebildiği zeminlerde beton plak ile taban zemini arasına taneli malzemedan oluşan bir tabaka serilmek zorunda kalınır. Bu tabakaya temel veya kaplama altı tabakası adı verilir. Silt ve çok ince taneli kumlar gibi kapilaritesi yüksek olan zeminler donma etkilerinden en çok etkilenen zeminler olup donma etkisinden en çok etkilenen zeminlerdir. Şişme ve büzülme etkisi gösteren zeminlerde de temel tabakası yapılması gerekmektedir. Bu tabakanın kalınlığı, toprağın nemlilik oranı, iklim, kaplama altında kullanılacak olan malzemenin sızdırmazlık özelliklerine bağlı olarak değişmekle birlikte minimum 30 cm olarak inşa edilmelidir. Pompaj olayının etkilerini en aza indirmek amacıyla kaplama altı tabakasında kum, düşük miktarda kil ve çakıldan oluşan granüler malzeme kullanılır ve en çok 15 cm'lik tabakalar halinde serilir (Ağar ve Öztaş, 1998).

Beton plakalar eğer tek tabaka halinde döküm gerçekleştirilecek ise mevcut ve sağlam bir altyapı üzerine inşa edilecek beton tabakanın kalınlığı birinci sınıf yollarda 15 cm, diğer sınıflarda ise 12 cm'den daha az yapılamaz. Beton yolun enine eğimi boyuna eğime bağlı olarak, düşük boyuna eğimde enine eğim % 2, dik boyuna eğimlerde de minimum % 1 olmalıdır. Beton yollarda yüzey kaymaya karşı daha dirençli ve pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu için boyuna eğim % 7 değerine kadar çıkarılabilir. Minimum boyuna eğim % 0.4 olarak göz önüne alınabilir.

### **2.2.1 Rijit Yol Yapımında Kullanılan Beton Türleri ve Uygulama Teknikleri**

Çimento esaslı bağlayıcı malzemenin kullanıldığı beton yollar, yüksek mukavemet, taşıma gücü ve eğilme dayanımına sahiptirler. Beton yollar her mevsim ve her hava koşulunda inşa edilebildiği gibi yapısal ömürleri uzun ve periyodik bakım/onarım süreleri kısa ve ucuzdur. Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Bu durum, betonun rijitliğinden yararlanmak sonucunu doğurur. Beton, çekme direnci düşük olan bir yapı malzemesidir. Betonda deformasyonlar ile gerilmeler arasındaki bağıntı lineer değildir. Ayrıca, yükler kalktıktan sonra bir süre, betonda kalıcı deformasyonlar görülür. Daha sonra beton yavaş yavaş ilk duruma döner. Bir tekerlek yükü bir beton plak üzerinden geçerken çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri oluşur. Tekerlek geçtikten sonra gerilmeler yön değiştirerek kaybolur. Özellikle yoğun ağır taşıt trafiği taşıyan bir beton yolda bu gerilme değişimleri kısa zaman aralıkları ile sürekli olarak kendini gösterir. Bu durumda, beton plakta çekme ile basınç arasında değişen sürekli gerilmeler oluşur, bu da zamanla malzemenin yorulmasına neden olur. O halde bu tip gerilmelerin, betonun sürekli direncinin çok altında bulunması gerekir. Rijit yol yapımında birbirinden farklı tekniklerin uygulanmasına olanak sağlayacak farklı tipte betonlar kullanılabilir.

#### **❖ Silindirle Sıkıştırılabilen Beton (SSB)**

Silindirle sıkıştırılabilen beton kaplamalar, geleneksel beton kaplamalar ile benzer türde olup karıştırılması, serilmesi ve sıkıştırılması normal betonlar ile aynıdır. Normal beton kaplamalara göre daha düşük su/çimento daha yüksek agrega oranına sahip olan SSB kaplamalar toprak kıvamında olmakta, böylelikle bitümlü kaplama yapılan araçlarda taşınabilmekte, serilip sıkıştırılabilmektedir. SSB kaplamalar genellikle çift tamburlu titreşimli silindir ile sıkıştırılabilmekte olup büyük miktarda beton donatısız olarak yerleştirilebilmektedir. SSB kaplamaların maliyeti, geleneksel beton kaplamalardan %10 ile % 30 arasında daha düşüktür. SSB kaplamalar; genellikle düşük hızlı ağır trafiğe sahip olan yol kesimleri ile havaalanı pist ve taksi yolları gibi mukavemet, dayanıklılık ve ekonominin çok önemli olduğu yerlerde kullanılmaktadır (Ağar ve Taşdemir, 2007).

#### **❖ Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)**

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), betonun vibratör yardımıyla yerleştirilme ve sıkıştırılma işlemine gerek kalmadan kendi ağırlığı ile akıp kalıbı doldurabilen ve tamamen sıkışabilen oldukça yüksek akıcılığa sahip özel bir betondur. Bu beton tipinde hamur

hacminin fazla olması normal betona göre daha kaliteli yüzeyler elde edilmesini sağlarken (Cussigh, 2007), perdahlama işleminin normal betona göre daha kolay yapılması nedeniyle işçilik masrafları düşmektedir (Khayat vd., 1999). KYB'nin taze beton özelliklerinin avantajları yanında sertleşmiş beton özellikleri de normal betonlara oranla farklı avantajlar sağlamaktadır. Örneğin KYB normal betona göre daha geçirimsiz bir beton oluştururken aynı su/çimento oranında normal betona göre daha yüksek dayanım elde edilebilmektedir. KYB sızdırmaz kalıplara pompa veya transmikseler yardımıyla dökülebilmektedir.

#### ❖ **Sürekli Betonarme**

Sürekli betonarme kaplama cinsinde beton plakalar, klasik beton kaplamalı yollarda belirli aralıklarla enine ve boyuna derzlerle parçalara bölünmeden yekpare olarak üretilerek araç yükleri ve iklim koşulları nedeniyle meydana gelen genişmeler neticesinde oluşan çatlakların rastgele oluşmasını sağlamak fakat bu durumda oluşan çatlakların açılması sürekli donatılar ile önlenmektedir. Sürekli betonarme yolların yapım maliyetleri, klasik plaklı rijit üstyapı tiplerinden daha yüksek olmaktadır. Fakat özellikle havaalanı pistleri ve uçak park alanları gibi ağır ve sürekli yüklere maruz kalan bölgelerde kullanılabilir.

#### ❖ **Geçirimli Beton**

Geçirimli betonlar boşluk hacmi yüksek betonlar olup üzerine gelen suyun kaplama içerisine girmesini ve dolayısıyla hızlıca drenajını gerçekleştirdiği için yol üzerindeki kayma risklerini düşürmektedir. Genellikle % 15~% 25 arasında boşluk yapısına sahip olan geçirimli betonlar iri agregaların daha yüksek ince agregaların daha düşük oranlarda kullanıldığı bir kaplama tipidir. Bu beton türü yaya yolları, şehir içi yollar, kaldırımlar, bisiklet yolları gibi farklı alanlarda da kullanılabilir.

#### ❖ **Öngerilmeli Beton**

Öngerilmeli betonlar yardımıyla çekme gerilmeleri öngerilmeli elemanlar tarafından karşılanmakta böylelikle plak kalınlıkları 12-15 cm mertebelerine kadar düşürülebilmektedir. Bu durum derz sayılarının azalmasına ve kullanım ömrünün artmasına olanak sağlamaktadır. Plak kalınlıklarının azalmasına olanak sağlasa da ilk yatırım maliyetleri bir miktar yüksektir.

### 2.2.2 Beton Yolların Esnek Üstyapılara Göre Avantajları

Genel olarak bir üstyapıdan beklenen özellikler maruz kalacağı trafik yüklerini emniyetle taşıyabilmesi ve sürücülere belirlenen hız limitleri çerçevesinde konforlu bir sürüş sağlayabilmeleridir. Bu noktada beton yolların (rijit üstyapı) esnek üstyapılara göre birçok avantajı bulunmaktadır. Beton yolların esnek üstyapılara göre avantajları arasında en öne çıkan özellikleri uzun hizmet ömrü, ağır trafiğe ve iklim şartlarına karşı mukavemet ve düşük bakım giderleridir. Bu avantajlar dünyada ve ülkemizde uygulamalar ile daha da ön plana çıkmaktadır. Söz konusu avantajlar aşağıda sırasıyla incelenmiştir.

❖ Yolların yapısal performansı, üstyapının mevcut ve gelecek trafik yüklerine karşı dayanımı ve çevresel etkilere karşı koyabilme kabiliyeti olarak özetlenebilir. Beton yolların esnek yollara göre başta gelen avantajlarından biri sınanmış uzun hizmet ömürleri ve üstün dayanımlarıdır. Esnek üstyapılarda yapıya gelen yükler daha geniş bir yer kaplayan bir alt tabakaya yayılarak iletilir. En üstte yer alan kaplamadan temele tabakasına, temel tabakasından alt temele, alt temelden de zemine iletilen yükler zeminin performansına göre kaplama tabakasında etki yaratabilmektedir. Yani tabana iletilen yükler zemin zayıfça çeşitli deformasyonlara ve buna bağlı olarak da çeşitli ondülasyonlar ve oturmalar sebep olabilmektedir. Rijit üstyapıya gelen yükler altında meydana gelen davranış elastik bir zemine oturan bir kirişe gelen yük altındaki davranış ile benzer bir durumda olduğundan yükler çok daha geniş bir alana yayılarak taban zeminine iletilir. Yani rijit üstyapının taşıma gücü zeminin direncine bağlı değildir. Bu durumun sonucu olarak da ağır trafik altındaki yollarda beton yol gibi rijit üstyapı uygulamaları dayanıklılığı sebebiyle asfalt kaplamalı esnek yollara oranla ortalama 3 kat daha uzun süre hizmet verebilmektedir.

❖ 2021 yılı itibariyle Türkiye'nin her bölgesinde bulunan toplam entegre çimento fabrikası sayısı 56 adet olup Türkiye kendi kaynakları ve düşük maliyet ile üretebileceği beton yollar için gerekli malzeme ve altyapıya sahiptir. Rijit üstyapılarda gerekli malzeme Türkiye'nin kendi öz kaynaklarından karşılandığı için bitüm gibi dışa bağımlı petrol ürünlerinin kullanılması ve bu noktada yüksek maliyetlerin öne geçilmesine olanak sağlanmaktadır.

❖ Esnek üstyapılarda alt temel, temel ve beton asfalt kaplamadan oluşan bir yapı mevcut olup ana malzeme agregalardan oluşmaktadır. Rijit üstyapılarda ise temel ve onun üstünde beton plaklar mevcuttur. Esnek üstyapılarda gerekli agrega miktarı rijit üstyapılara oranla her zaman daha yüksek olacaktır. Bu durum da maliyet kısmında devreye girmektedir.

Asfalt altındaki temel maliyetleri beton yollarda kaplama altındaki temel maliyetlerine oranla daha pahalıdır. İlk yatırımın toplam maliyetinde ise esnek üstyapıların maliyeti, rijit üstyapıların maliyetleri ile hemen hemen aynı düzeydedir. Fakat yolun hizmet ömrü boyunca tüm maliyetleri düşünüldüğünde beton yollar asfalt yollara oranla % 30~60 oranında daha düşük maliyetlere sahip olacaktır.

❖ Rijit üstyapılarda dayanımın artırılması ve olası çatlakların giderilmesi amacıyla gerektiği zaman derzlerde, plak içerisinde çeşitli şekillerde kullanılabilir. Bu durum maliyeti arttıran bir husus olmakla birlikte rijit üstyapının ömrünü arttırdığından esnek üstyapılara oranla bir avantaj sayılmaktadır.

❖ Esnek üstyapı uygulamalarında onarım kolay bir şekilde trafik altında dahi yapılabilmekteyken rijit üstyapılarda hasarlı plağın kırılıp, kırılan plağın çıkarılması, yerine yeni betonun atılması ve bir süre beklenmesi gerekmektedir. Bu durum rijit üstyapının bir dezavantajı olarak görünse de rijit üstyapı esnek üstyapılara oranla çok daha dayanıklı ve uzun ömürlü olduğundan onarım süreleri esnek üstyapılara göre çok daha uzundur. Bu durum uzun vadede rijit üstyapıların esnek üstyapılara göre avantajlı olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

❖ Rijit üstyapı uygulamaları yağmurlu havalar dahil her türlü iklim koşullarında yapılabilmekteyken, esnek üstyapı uygulamaları düşük sıcaklık ve yağışlı hava koşullarında yapılamamaktadır. Esnek üstyapı uygulamaları belirli bir sıcaklığın altında yapıldığında asfalt işlenebilirliğini kaybetmekte ve kaplamada boşluk yüzdesi artmaktadır. Bunun sonucunda ise nitelik yönünden istenilen performans alınamamaktadır. Beton kaplamalarda ise hemen hemen her beton kaplama uygulamasında vibratör ile sıkıştırılmakta olup ısı kaybı ile ilgili bir durum söz konusu olmamaktadır. Ayrıca rijit üstyapılarda bakım ve onarım aşırı yağış ve aşırı soğuk havanın olmadığı her mevsimde yapılabildiğinden bakım ve onarım için gerekli zaman dilimi de rahatça her mevsimde sağlanabilmektedir.

❖ Rijit üstyapılar ile esnek üstyapıların yüzeydeki kayma sürtünme katsayıları hemen hemen aynı olmakla birlikte ıslak koşullar altında esnek üstyapıların kayma dirençleri oldukça düşmektedir. Bu durum da rijit üstyapıların güvenlik yönünden önemli bir üstünlük olarak ortaya çıkmaktadır.

- ❖ Beton kaplamalar daha açık renkli olduğundan daha koyu renkli asfalt yollara oranla araçların ışıklarını daha iyi yansıtacak ve böylelikle sürücülerin gece görüşlerini arttıracaktır. Beton ve asfalt kaplamalı yollarda gece görüşü Şekil 2.12’de sunulmaktadır.



**Şekil 2.12:** Beton ve asfalt kaplamalı yolların gece görünüşleri (THBB, 2002).

- ❖ Asfalt malzemesi bünyesinde çeşitli uçucu maddeleri içermektedir. Bu uçucu maddeler zamanla kaybolarak malzemenin gevrekleşip eskimesine neden olmaktadır. Yaşlanma adı verilen bu durum haricinde benzin, yağ, tuz gibi maddelerin yol üzerine dökülmesi ile de kimyasal etkileşim gösteren asfalt kaplama niteliklerinin bir kısmını kaybetmektedir. Rijit üstyapılarda ise kullanılan bağlayıcı çimento olup herhangi bir uçucu madde içermemekte olup tuz gibi eritici özelliği bulunan kimyasalların beton yol üzerine dökülmesi durumunda da hiçbir özellikte değişiklik meydana gelmemektedir. Bu nedenlerden ötürü esnek üstyapılarda meydana gelen yaşlanma olgusu rijit kaplamalarda meydana gelmemekte üstyapının ömrü ve dayanıklılığı artmaktadır.

- ❖ Bitümlü karışımın petrol ürünü olması ve esnek kaplamaların yapım ve uygulama aşamalarında ısıtma ve kurutma gibi işlemlerin uygulanması nedeniyle meydana gelen çevresel etkiler, rijit yolların üretimi aşamasında meydana gelen etkilerden çok daha fazladır. Ayrıca rijit üstyapı kaplamalarında kullanılan beton üretiminde termal santrallerin atık ürünleri uçucu kül gibi malzemelerin kullanımı mümkün olduğundan bu tür malzemelerin doğayı kirletmelerinin de bir miktar önüne geçilmektedir. Ayrıca beton yollarda taşıtların esnek üstyapılı yollara oranla daha hızlı seyretmeleri taşıt egzoz gazı emisyonlarından kaynaklanan çevresel kirliliğinden bir miktar azalmasına olanak sağlamaktadır.

- ❖ Ağır taşıtlar asfalt kaplamalarda beton kaplamalı yollara oranla çok daha fazla deformasyona neden olurlar. Beton kaplamalı yollarda deformasyon oluşmadığı için ve rijit yüzey tekerleklerin dönmesini kolaylaştırdığı için beton kaplamaların “yuvarlanma sürtünme katsayıları” dolayısıyla tekerleğin dönme hareketine karşı dirençleri düşük ve

motordan tekerleklere aktarılan kuvvet düzenli ve az olacağından, yakıt ve yağ giderleri ile bandaj lastik aşınması az olacaktır. Bu nedenlerden ötürü beton kaplamalı yollar enerji tasarrufu açısından esnek yollara oranla daha avantajlı bir konuma gelmektedir.

❖ Beton kaplamaların yüzey düzgünlüğü asfalt yollara oranla daha uzun süre korunduğundan beton kaplamalı yollar daha uzun süre düzgün ve konforlu sürüş imkanı sağlamaktadır (Khayat vd., 1999).

Esnek ve rijit üstyapıların avantaj ve dezavantajları özetle Tablo 2.3’de sunulmaktadır.

**Tablo 2.3:** Esnek ve rijit üstyapıların avantaj ve dezavantajları.

Parametreler	Esnek Üstyapı	Rijit Üstyapı
Dayanıklılık	+	++
Onarım Sıklığı	-	++
Islak Durumda Kayma Direnci	-	+
Seyir Konforu	++	++
Kaliteli Agrega Gereksinimi	+	-
Demir Donatı Kullanabilme	-	++
Trafiğe Çabuk Açılabilme	++	-
Gece Seyirde Görüş Olanığı	-	++
Yaşlanma ve Kimyasal Maddelerden Etkilenme	--	+
Çevre Kirliliğini Arttırma	-	+
İklim Koşullarına Bağımlılık	--	++
Ağır Taşıt Seyrine Uygunluk	+	++
Yerli Kaynaklarla İnşa Olanığı	-	++
Zayıf Taban Zeminine İnşa Uygunluğu	--	+

++: Yüksek avantajlı, çok uygun; +: Avantajlı, uygun; -: Sakınca yaratır, uygun değil;--: Çok Sakıncalı, hiç uygun değil

### 3. ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETONLAR (UYPLB)

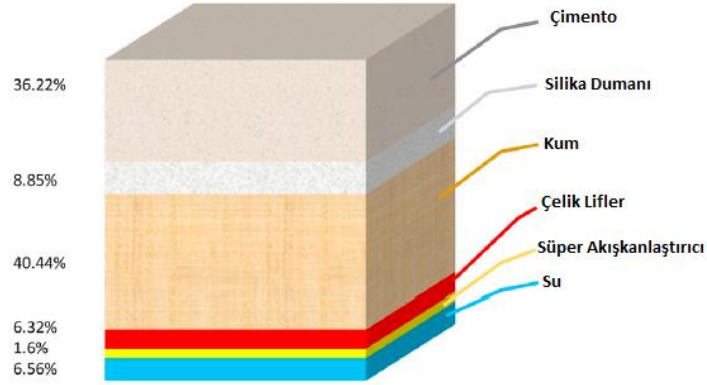
Beton teknolojisinin son yıllarda ortaya koyduğu önemli ürünlerden birisi de ultra yüksek dayanımlı ve çelik lif takviyeli betonlardır. Ultra yüksek performanslı beton, önemli miktarda çimento içeren (600 kg'dan fazla), küçük agrega (6 mm'den düşük) boyutlarının kullanıldığı, puzolanik kül, uçucu kül, silika dumanı, reaktif toz gibi bağlayıcıları içeren ve düşük su/çimento oranına ( $Su/\text{çimento} < 0.2$ ) sahip çimento esaslı kompozit bir malzemedir. Bu karışım tasarımı, yoğun ve yüksek homojenliğe, % 1.5'ten daha düşük kapiler gözenekliliğe ve 150 MPa'dan yüksek basınç dayanımına sahip mikro bir yapı oluşturur. Bu özellikleriyle birlikte ultra yüksek performanslı betonlar normal betonlara oranla daha yüksek dayanıklılığa, daha yüksek taşıma kapasitesine ve tokluğa sahip olmaktadır (Buttignol v.d., 2017). Ayrıca yüksek enerjili karıştırıcılar ve özel kür koşulları (ısı, basınç vb.) uygulanarak çok daha yüksek dayanımlı betonlar (200 MPa ve üzeri) da elde edilebilmektedir (Türker ve diğ., 2019). Tablo 3.1'de UYPLB'nin kronolojik gelişim süreci gösterilmektedir.

**Tablo 3.1:** UYPLB'nin kronolojik gelişim süreci (Naaman ve Wille, 2012).

YILLAR	MALZEME MATRİSİ VE BETON	FİBER
1970'li Yıllar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hidratasyon reaksiyonlarının daha iyi anlaşılması</li> <li>- Büzülme, sinme porozite gibi etkilerin daha iyi anlaşılması</li> <li>- Uygulamada 50 Mpa'ya kadar yüksek beton dayanımı</li> <li>- Su azaltıcı kimyasalların gelişimi</li> <li>- Beton kür ve iyileştirmelerde gelişmeler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Düz çelik lifler; normal dayanım</li> <li>- Cam lifler</li> <li>Bazı sentetik lifler</li> </ul>
1980'li Yıllar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kimyasal katkıların gelişimi</li> <li>- Yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve diğer mineral içerikli katkıların artışı</li> <li>- Beton akışkanlığındaki artış</li> <li>- Su/Çimento oranında azalma</li> <li>- Yüksek Dayanımlı Beton terminolojisi; 120 Mpa'ya kadar dayanım</li> <li>- Yüksek Performanslı Beton terminolojisi; Yüksek dayanımlı beton ile durabilite özelliklerinin gelişimi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Şekil verilebilen lifler; normal ve yüksek dayanımlı lifler</li> <li>- Düşük modüllü sentetik lifler (Naylon vb. gibi)</li> <li>- Cam lif kullanımının artışı</li> <li>- Mikro lifler</li> <li>- Yüksek dayanımlı polimer lifler (karbon, kevlar vb. gibi)</li> </ul>
1990'lı Yıllar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kimyasal katkılardaki artış (süper akışkanlaştırıcı vb. gibi)</li> <li>- Çimento yerine bağlayıcı başka bağlayıcı, çimentomsu malzemelerin kullanımının artışı</li> <li>- UYPB: İnce tanelerin ilavesi; düşük porozite; Su/Çimento oranının azalması, daha sıkı bir yapının uygulanması</li> <li>- Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Kendiliğinden Sıkışan Beton</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Yeni helezonik çelik lifler</li> <li>- Betonla kimyasal bağlantı kuran Polivinil Alkol Fiberler</li> <li>- Sentetik liflerin bulunabilirliğinde gelişme</li> </ul>
2000'li Yıllar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Patentli ve patentsiz UYPB ve UYPLF'nin gelişimi</li> <li>- UYPB: Sıkı yapı anlayışının geliştirilmesi; Nanoteknoloji kavramının uygulanması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ultra yüksek dayanımlı çelik lifler: 0,12 mm'ye kadar küçük çaplı 3400 Mpa'ya kadar dayanımlı düz veya kancalı lifler</li> <li>- Karbon içerikli nano-lifler</li> </ul>
2010'lu Yıllar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nano ölçekte çimentomsu malzemenin matrisinin daha iyi anlaşılması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Karbon içerikli nano-lifler</li> </ul>



UYPLB'lere ait tipik karışım (kum, çimento, silika dumanı, su, süper akışkanlaştırıcı ve çelik lif) oranları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

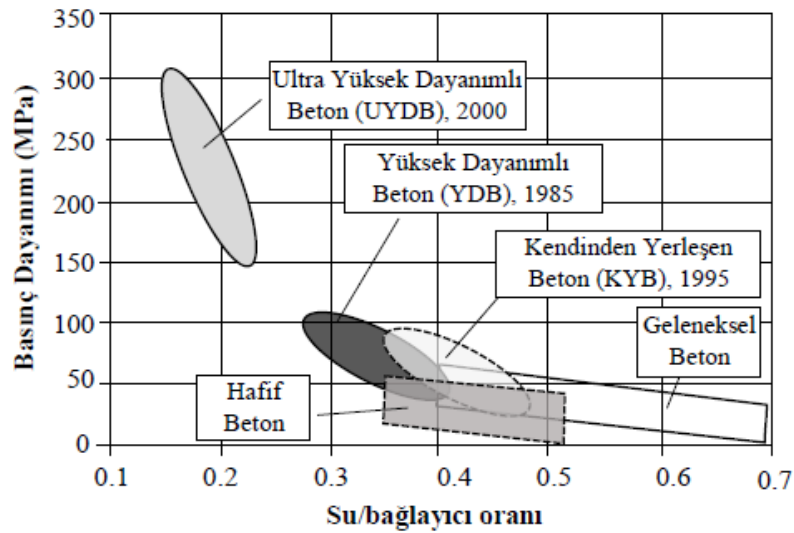


Karışım	Ağırlık (kg)	Tipik Aralık (kg)*
<b>Ön Karışım Maddeleri</b>		
İnce Kum	1005	490-1390
Portland Çimento	900	610-1080
Silika Dumanı	220	50-334
Su	163	126-261
Süper Akışkanlaştırıcı	40	9-71
Çelik Lifler	157	40-250
<b>Toplam Ağırlık</b>	<b>2485</b>	

\* Tayeh ve diğ.,2013

**Şekil 3.1:** UYPLB'ye ait tipik karışım oranları.

UYPLB'ye ait su/bağlayıcı oranlarının diğer betonlarla karşılaştırılması Şekil 3.2'de sunulmaktadır.



**Şekil 3.2:** UYPLB'ye ait su/bağlayıcı oranının diğer betonlarla karşılaştırılması (Eide ve Hisdal, 2012).

UYPLB’lerde karışım oranları hedeflenen mekanik özelliklere göre değişmektedir. UYPLB konusunda patentleri bulunan ve uygulamada sıklıkla kullanılan markalara ait bileşen miktarları Tablo 3.2’de gösterilmektedir.

**Tablo 3.2:** UYPLB’ler için en yaygın ticari markalara ait dozajlar ve özellikler (Camacho ve diğ., 2012).

Bileşenler	Ductal®		BSI®		CRC®		CEMTEC®		BCV®	
	Özellik	kg/m <sup>3</sup>	Özellik	kg/m <sup>3</sup>	Özellik	kg/m <sup>3</sup>	Özellik	kg/m <sup>3</sup>	Özellik	kg/m <sup>3</sup>
Çimento	Portl.	746	-	1114			CEM I 52,5	1050		
Silika Dumanı	-	242	-	169	Bağlayıcı	930	-	275		2115
Öğütülmüş Kuvars	-	224	-	-			-	-		premix
Kum (mm)	0,1-0,6	1066	0-6	1072	0-5	1325	<0,5	730	2-3	
Su	Su/Çim.	0,19	Su/Çim.	0,19	Su/Bağ.	0,16	Su/Çim.	0,181	Su/Çim.	0,25
Katkı	Chryso	9	SIKA	40	-	-	Chryso	35	-	21,5
Lif	13/0,2	161	20/0,3	234	12/0,4	150-300	10/0,2	470	20 <sub>2/3</sub> 13 <sub>1/3</sub>	156
Yayıma Değeri (mm)		700		640		-		-		750
f <sub>ct,28</sub> (Mpa)		8		8,8		-		-		8
f <sub>cm,7</sub> (Mpa)	20°	101	20°	165		-	20°	-	20°	98
f <sub>cm,28</sub> (Mpa)	20°/90°	124/198	20°	199	20°/90°	150/400	20°	168	20°/90°	130-150

UYPB’lere çelik, karbon, sentetik vb. lifler de dahil edilmesi ile birlikte çekme kapasitelerinde büyük artışlar meydana gelmektedir. Çelik lifler UYPB’nin basınç dayanımı, aksel çekme ve durabilite gibi mekanik özellikleri arttırmak amacıyla kullanılırken sentetik lifler genellikle durabilite amaçlı kullanılmaktadır. Uygulamada kullanılan çelik lifler şekil, uzunluk, çap ve dayanım bakımından çeşitlilik göstermekle birlikte geometrik olarak mikro ve makro boyutlu lifler olarak ikiye ayrılmaktadır. Mikro lifler daha ince ve kısa makro lifler ise kalın ve uzun boyutlu olmaktadır. Makro lifler ( $I_{\text{fiber}} > 10$  mm) UYPB’ye dahil edildiğinde malzemenin deforme olabilirliğinin artmasına katkıda bulunduğu yapısal düzeyde bir etkiye sahip olmaktadır. Makro liflerin kullanımında, çatlama hemen sonra lifler birleşerek çoklu çatlaklara ve lokal çatlaklara yol açar. Buna karşılık mikro liflerin UYPB’ye eklenmesi malzeme düzeyinde bir etki ortaya çıkarır. Yani beton çatladıktan hemen sonra mikro lifler aktive olur ve daha uzun bir elastik faz ile karakterize edilen bir beton davranışına yol açar. Şekil 3.3’de ultra yüksek performanslı lifli betonda kullanılan lif çeşitleri gösterilmektedir.



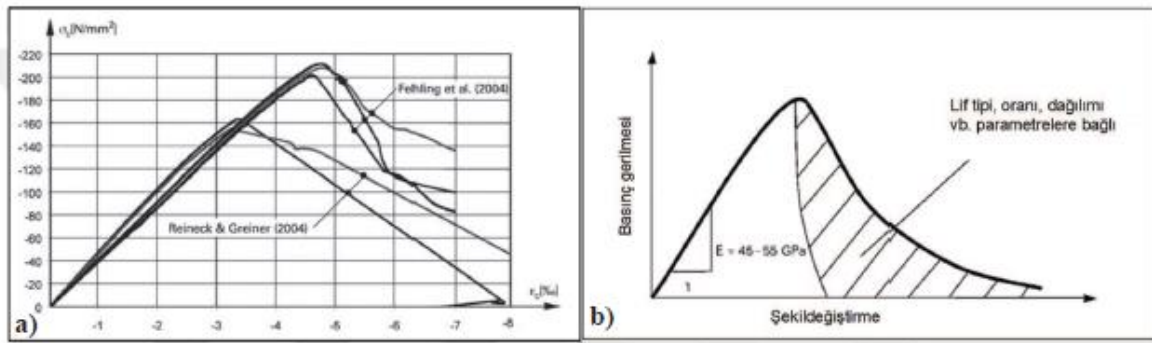
**Şekil 3.3:** Ultra yüksek performanslı lifli betonda kullanılan lif çeşitleri (Buttignol ve diğ., 2017).

UYPLB standart kür koşulları altında 100-150 MPa arası basınç dayanımına ulaşabilmekteyken, özel kür koşulları altında (ısı ve basınç) bu değer 150 MPa üzerine çıkabilmektedir. UYPLB aksenal basınç altında dayanımın yaklaşık % 70~80'ine kadar lineer elastik bir davranış göstermektedir. Elastisite modülü ise 45 000~55 000 MPa değerine ulaşabilmektedir (Fehling ve diğ., 2014). Şekil 3.4'de aksenal basınç yükü etkisi altında UYPLB ve UYPB arasındaki davranış farkı gösterilmektedir. Aksenal basınç altında lif takviyesiz UYPB lineer bir gerilme şekil değiştirme eğilimi gösterip belirli bir şekil değiştirmeden sonra tamamen dağılmaya uğramaktayken, UYPLB, UYPB'nin tamamen dağıldığı gerilme altında sünek bir davranış göstererek şekil değiştirmesine devam etmektedir.



**Şekil 3.4:** Soldaki şekilde lif takviyesiz UYPB'nin, sağdaki şekilde ise UYPLB'nin aynı gerilme altındaki davranışı gösterilmektedir (Fehling ve diğ., 2005).

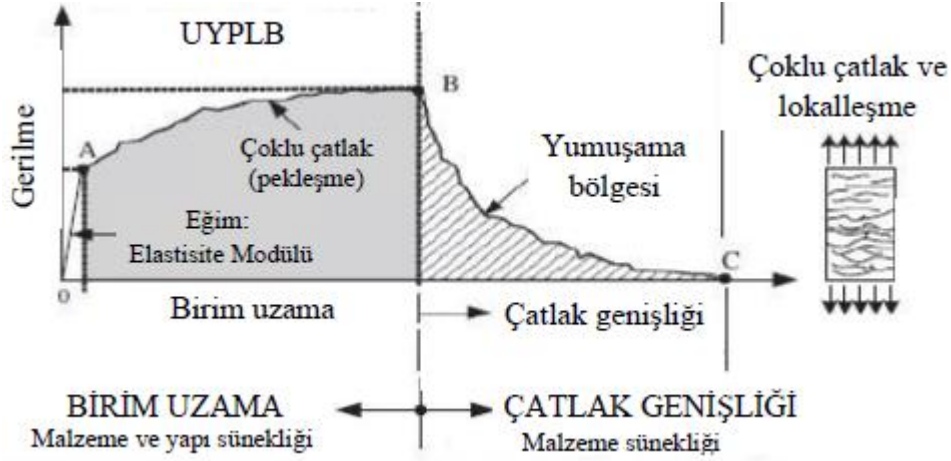
Şekil 3.5'de iki farklı çalışmada (Fehling ve diğ., 2004; Reineck ve Greiner, 2004) UYPLB'lerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri gösterilmektedir. Bu çalışmalarda UYPB içinde kullanılan liflerle gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki pik noktasından sonra meydana gelen davranışta çok büyük iyileşmenin olduğu gözlemlenmektedir. Fakat UYPLB'larda kullanılan liflerin oranı, tipleri ve lif pozisyonlarına bağlı olarak pik sonrası meydana gelen davranışta da büyük farklılıklar olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.5:** UYPLB'nin basınç altındaki Gerilme-Şekil Değiştirme grafiği; a) Farklı tip ve farklı lif oranları için deneysel çalışmalar (Schmidt ve diğ., 2008; Reineck ve diğ., 2003), b) Farklı lif tip, oran ve dağılımlarına göre çıkarılan şematik gösterim (Schmidt ve diğ., 2008)

UYPLB'ler geleneksel (normal dayanımlı) lifli betonlara oranla çok daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. UYPLB'ler aksenal çekme altında farklı tip lif takviyelerine göre farklı davranışlar sergilese de, genel olarak kullanılan lifler ilk çatlak sonrası oluşan mikro düzeydeki çatlaklar arasında bir bağ sağlayarak çatlakların genişlemesini önlemekte ve betonun yük taşımaya olanak sağlamaktadır. Bu aşamada beton pekleşme davranışı sergilemektedir. Bu aşamadan sonra çok sayıda mikro düzeyde çatlak oluşmakta en yüksek

gerilme düzeyine ulaşıldığında ise çatlak genişlikleri artmakta ve liflerde sıyrılmalar başlamaktadır. Bu durumda çatlaklar bir bölgede yoğunlaşarak tek ve büyük bir çatlak oluşturmaktadır. Çatlak genişliği arttıkça dayanım da hızlı bir şekilde azalmaya uğramaktadır. Şekil 3.6’da ultra yüksek performanslı lifli betonun aksenal çekme altındaki davranışı gösterilmektedir.



**Şekil 3.6:** Ultra yüksek performanslı lifli betonun aksenal çekme altındaki davranışı (Naaman, 2007).

UYPLB birçok alanda rahatça kullanılabilir. Örneğin ciddi çevresel ve mekanik yüklere maruz kalan köprü üstyapı elemanları, rüzgar türbinlerinin yapısal elemanları, yüksek binalar, köprü tabliyeleri, ağır yüklere ve donatı korozyonuna uğrayan kıyı yapıları, mevcut asfalt yolların onarımı, yeni beton yolların yapımı gibi birçok alanda UYPLB’lerin kullanılma olanağı mevcuttur. UYPLB’nin uygulama alanlarına ait örnekler Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



**Şekil 3.7:** Ultra yüksek performanslı lifli betonun uygulama alanları (Gültekin, 2020).

Yüksek süneklik ve durabilite özellikleri, prefabrik elemanların ıslak birleşimlerinde ve çevre koşullarına maruz betonarme köprü, viyadük, iskele, liman, baraj vb. yapıların onarım ve takviyesinde UYPLB'nin tercih edilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte UYPLB içerdiği lifler dolayısıyla kesme dayanımı açısından da geleneksel betonlara oranla daha iyi performans sergilediğinden perdelerin bağ kirişleri gibi yüksek kesme kuvvetlerine maruz elemanlarda ve yapısal eleman güçlendirmelerinde kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Ülkemizde ise UYPLB'nin pratikteki kullanımı henüz rögar kapağı, mazgal gibi yapısal olmayan elemanlarla ve durabilite amaçlı bazı uygulamalarla sınırlıdır.

UYPLB veya UYPLB'li betonarme elemanların davranışları geleneksel betonarme elemanlara oranla önemli farklılıklar gösterdikleri için bu tip elemanların tasarımında mevcut tasarım standartları yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle UYPLB'nin kullanımının yaygınlaştığı Fransa (AFGC, 2013), Japonya (JSCE, 2008), İsviçre (SIA 20152, 2016) gibi ülkelerde UYPLB için özel standartlar geliştirilmeye başlanmıştır. Günümüzde UYPLB'nin üretim prosedürleri, test metotları, tasarım esasları vb. konularda uluslararası düzeyde kabul görmüş standart bir yaklaşım bulunmamasına karşın, bu konular tartışılmakta ve geliştirilmektedir (Perry, 2015). UYPLB'de betonun basınç dayanımının yanı sıra çekme dayanımının ve şekil değiştirme kapasitesinin davranışta etkili olması ve bunun da kullanılan lif içeriği (malzemesi/tipi/boyutu/oranı), beton içindeki doğrultusu, beton matrisinin yapısı, donatılar ile etkileşimi vb. birçok etkene bağlı olması genel bir standart oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle daha çok beton firmaları (Ductal, BCV, Dura gibi) tarafından hazırlanan belirli özelliklere sahip özel UYPLB karışımları ve bunlara ait tasarım kılavuzları kullanılmaktadır (Gowripalan ve Gilbert, 2000). Lif içeriği ve üretim prosedürleri bakımından büyük çeşitlilik gösteren UYPLB ile ilgili mevcut tasarım standartlarının gelişmesi ve buna bağlı olarak UYPLB'nin kullanımının yaygınlaşabilmesi için çok sayıda deneysel ve nümerik çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Türker ve diğ., 2021).

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Ultra yüksek performanslı lifli betonların asfalt üzeri beton kaplama veya yeni yapılacak yollarda aşınma tabakası olarak kullanılması durumunda betonun bazı durabilite özelliklerinin ve beton yollara yapısal katkısının belirlenmesi amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirilmiş ayrıca UYPLB'ler ile geleneksel betonlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu bağlamda hem geleneksel ve UYPLB'lerden oluşturulan beton numuneler için basınç dayanım deneyleri, çekme dayanımı deneyleri, dört noktalı eğilme deneyleri, aşınma deneyleri, plak deneyleri ve donma-çözünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Beton aşınma, basınç dayanımı, plak, eğilme ve çekme dayanımı deneyleri Balıkesir Üniversitesi Şerif Saylan Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılmış olup donma-çözünme deneyleri Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü yapı malzemesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Balıkesir Üniversitesi Şerif Saylan Yapı Mekaniği Laboratuvarı Şekil 4.1'de, Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Laboratuvarında kullanılan donma çözülme test cihazı ise Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



**Şekil 4.1:** Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Şerif Saylan Yapı Mekaniği Laboratuvarı.



**Şekil 4.2:** Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı.



#### 4.1 UYPLB İçeriklerinin Belirlenmesi

UYPLB üretiminde kullanılan bileşenler Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3: UYPLB üretiminde kullanılan bileşenler.

##### 4.1.1 Çimento

UYPLB’lerin üretiminde, geleneksel beton üretiminde kullanılan çimento kullanılmıştır.

##### 4.1.2 Agregalar

UYPLB’lerde kaba agregalar kullanılmadığı için beton daha iyi sıkışabilmekte ve bu durum betonun işlenebilirliği ve dayanımına oldukça etki etmektedir. UYPLB’lerde kullanılan ince agregalar, beton yüksek taşıma kapasitelerine ulaştığında stabilitesini korumada yardımcı olmaktadır. UYPLB matrisinde en büyük boyutlu malzemeler agregalar olup agregalar silika kum, kuvars veya doğal kumdan oluşabilir. Betonda ince agrega olarak 0-0.8 mm (Agrega-1) ve 1-3 mm (Agrega-2) tane çaplarında iki ayrı kuvars agregası kullanılmıştır.

##### 4.1.3 Silis Dumanı

Silis dumanı için Elkem 92 marka kullanılmıştır. Silis dumanı silisyum metali ve ferrosilikon alaşımlarının üretiminde fırın dumanından çıkan atık bir yan ürün malzemesidir. Silis dumanı parçacıkları çimento parçacıklarından 100 kat daha küçük bir malzeme olup geniş yüzey alanı ve yüksek  $\text{SiO}_2$  içeriği nedeniyle çok aktif bir puzolondur. Bu özellikleri nedeniyle betonun basınç dayanımını, aderansını ve aşınma direncini arttırmaktadır. Beton içeriğinde silis dumanının kullanılmaması durumunda 81 MPa’ya kadar basınç dayanımı elde edilebilmekteyken silis dumanının kullanılmasıyla bu oran hızla artmaktadır. Bu malzemenin dezavantajlarından biri son derece ince parçacıklara sahip olduğunda karışım

için daha fazla su gerektirmesidir. Fakat bu durum da süper akışkanlaştırıcılar kullanılarak çözülebilir.

#### 4.1.4 Yüksek Fırın Cürufu

Betonun işlenebilirliğini arttırmak, boşluk miktarını azaltmak ve çimento miktarını azaltmak için kullanılmaktadır. Fırın cürufu Bolu çimentodan (Erdemir) temin edilmiştir.

#### 4.1.5 Çelik Lifler

UYPLB içeriğinde geleneksel betonda kullanılan çelik liflerin aynıları kullanılmıştır.

#### 4.1.6 Katkı Maddeleri

UYPLB’lerde geleneksel betonlara oranla düşük su içeriği bulunduğundan betonun işlenebilirliği azalmaktadır. Bu nedenle, UYPLB’lerde işlenebilirliği istenilen düzeyde tutmak amacıyla ASTM C 494 F tipi polikarboksilat esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

### 4.2 Geleneksel Beton İçeriklerinin Belirlenmesi

Geleneksel beton üretimi için literatürde yaygın olarak kullanılan bileşenler seçilmiş olup 28 günlük ortalama basınç dayanımı olarak 30 MPa (C30) hedeflenmiştir. Geleneksel beton için sözü edilen bileşenlerin özellikleri ve kullanım oranları aşağıda özetlenmiştir.

#### 4.2.1 Çimento

Kullanılan çimento Bolu Çimento fabrikasında üretilen CEM I 42.5 R türü olup özgül ağırlığı 3.15 g/cm<sup>3</sup>, özgül yüzey 4 166 cm<sup>2</sup>/g’dır. Çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 4.1’de, fiziksel özellikleri Tablo 4.2’de, mekanik özellikleri ise Tablo 4.3’de sunulmaktadır.

**Tablo 4.1:** Çimentonun kimyasal özellikleri.

Bileşen	Bileşen (%)
Kızdırma Kaybı	3.59
SiO <sub>2</sub>	18.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.36
CaO	63.59
MgO	1.57
SO <sub>3</sub>	2.65
Na <sub>2</sub> O	0.40

**Tablo 4.1**(devam)

Bileşen	Bileşen (%)
K <sub>2</sub> O	0.77
Cl	0.0238

**Tablo 4.2:** Çimentonun fiziksel özellikleri.

Bileşen	Bileşen (%)
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	4166
90 mikronluk Elekte Kalan (%)	0.10
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.15
Priz Başlangıcı (dk)	150.00
Priz Sonu (dk)	185.00

**Tablo 4.3:** Çimentonun mekanik özellikleri.

Mekanik Özellikler		
Basınç Dayanımı (MPa)	7 Günlük	28 Günlük
	43.10	56.10

#### 4.2.2. Agrega

Geleneksel beton üretiminde Balıkesir Şamlı mahallesinde kurulu olan Altıntaş taş ocağından temin edilen 0-3 mm kırma kum (Kırma Kum-I), 0-4 mm kırma kum (Kırma Kum-II), 4-1.2 mm kırmataş (Kırmataş-I) ve 11.2-22.4 mm gruplarına sahip kırmataş (Kırmataş-II) agregalar kullanılmıştır. Kırmataş-I ve Kırmataş-II agregalarının fiziksel özellikleri Tablo 4.4’de, Kırma Kum-I ve Kırma Kum-II agregalarının fiziksel özellikleri ise Tablo 4.5’de gösterilmektedir.

**Tablo 4.4:** Kırmataş-I ve Kırmataş-II agregalarının fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Kırmataş-I (4-11.2 mm)	Kırmataş-II (11.2-22.4 mm)
Sıkı Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1564	1547
Gevşek Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1381	1352
Görünen Özgül Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2700	2710
Su Emme (%)	0.80	0.80
Çok İnce Malzeme Muhtevası (%)	0.92	0.55
Yassılık İndeksi (%)	-	9
Los Angeles Aşınma (%)	-	21.9

**Tablo 4.5:** Kırma Kum-I ve Kırma Kum-II agregalarının fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Kırma Kum-I (0-3 mm)	Kırma Kum-II (0-4 mm)
Sıkı Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1554	1823
Gevşek Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1246	1540
Görünen Özgül Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2640	2690
Su Emme (%)	1.10	1.10
İncelik Modülü	2.04	3.51
Çok İnce Malzeme Muhtevası (%)	0.6	10.94
Kum Eşdeğer Yüzde (%)	92	76

#### 4.2.3. Çelik Lifler

Dramix marka çelik lifler kullanılmıştır. Donatısız beton doğası gereği gevrek olduğundan ve oluşan çatlaklar durdurulamadığından kırılmaya yatkın olmaktadır. Bu nedenle, çatlak oluşumuna karşı iyi bir direnç ve daha iyi bir çekme mukavemeti ve kırılmaya karşı daha iyi bir direnç sağlamak amacıyla UYPLB’lerde çelik lifler kullanılmıştır. Deneylerde UYPLB karışımında farklı oranlarda çelik lifler bulunmakta olup 13 mm düz, 30 ve 60 mm kancalı olmak üzere üç farklı çelik lif kullanılmıştır.

#### 4.2.4. Katkı Maddeleri

Betonda ASTM C-494 Tip F, TS EN 934-2’ye uygun olan, Draco Yapı Kimyasalları firmasından temin edilen Fluicon 274 W kodlu akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

#### 4.3 Geleneksel Beton ve UYPLB Üretimi

Çalışmalarda geleneksel betonlarda çimento dozajı 370 kg/m<sup>3</sup>, su/ çimento oranı 0.50 olan beton karışımı kullanılmıştır. UYPLB’lerde çimento dozajı 690 kg/m<sup>3</sup>, su/çimento oranı 0.29 ve su/ bağlayıcı oranı 0.18 olan beton karışımı oluşturulmuştur. Geleneksel betonun bileşenleri Tablo 4.6’da, UYPLB’lerin bileşenleri ise Tablo 4.7’de sunulmuştur.

**Tablo 4.6:** Geleneksel betonun bileşenleri.

Beton Bileşenleri (Geleneksel) 1 m <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	
Su	185
Çimento	370
Agrega	
0-3 mm Kırma Kum	750
0-4 mm Kırma Kum	205
4-11.2 mm Kırma Taş	200
11.2-22.4 mm Kırma Taş	640
Çelik Lif	0
Akışkanlaştırıcı	3.5
Toplam	2353.5

**Tablo 4.7:** UYPLB'nin bileşenleri.

Beton Bileşenleri (UYPLB)	1 m <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
Su	198.72
Çimento	690
Silis Dumanı	138
Yüksek Fırın Cürufu	276
Agrega-I	700
Agrega-II	400
Çelik Lif	78
Akışkanlaştırıcı	17.25
Toplam	2497.97

Geleneksel betonlar için gerekli malzemeler Tablo 4.6'da gösterildiği karışım oranlarında hazırlanarak kuru olarak mikser içerisine bir miktar karıştırılmıştır. Daha sonra karışım için gerekli olan su ve akışkanlaştırıcı eklenerek karışım bir süre daha karıştırılmaya devam edilmiştir. Daha sonra karışıma gerekli çelik lif yavaş yavaş eklenerek homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılarak liflerin topaklanması engellenmiştir. Şekil 4.4'de beton karıştırılma işinde kullanılan mikser, Şekil 4.5'de ise mikserden çıkarılmış çelik lifli beton karışımı gösterilmektedir.



**Şekil 4.4:** Beton karıştırılma işinde kullanılan mikser.



**Şekil 4.5:** Çelik lifli geleneksel beton karışımı.

UYPLB üretiminin ilk aşamasında, UYPLB'ler için gerekli bileşenler Tablo 4.7'de gösterilen oranlarda hazırlandıktan sonra çimento, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, ve agregalar mikserde kuru olarak 5 dakika boyunca karıştırılarak homojen bir kuru karışım

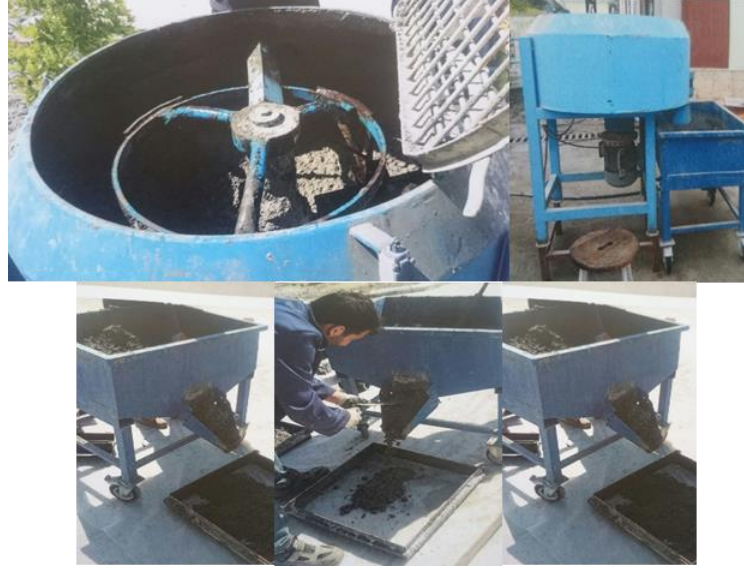
elde edilmiştir. İkinci aşamada ise karışıma gerekli su ve akışkanlaştırıcının yarısı ilave edilerek aynı hızda olacak şekilde üç dakika daha karıştırılmaktadır. Üçüncü aşamada, karışım plastik kıvamını aldıktan sonra akışkanlaştırıcının geri kalan yarısı da karışıma eklenerek 3 dakika daha karıştırma işlemi devam ettirilmektedir. Dördüncü aşamada ise karışıma gerekli çelik lif miktarları eklenerek homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırmaya devam edilmektedir. Şekil 4.6'da ULPLB'lerin karışımında kullanılan malzemeler gösterilmektedir.



**Şekil 4.6:** UYPLB'lerin üretiminde kullanılan malzemelerin görünümü.

#### **4.4 Test Numunelerinin Hazırlanması**

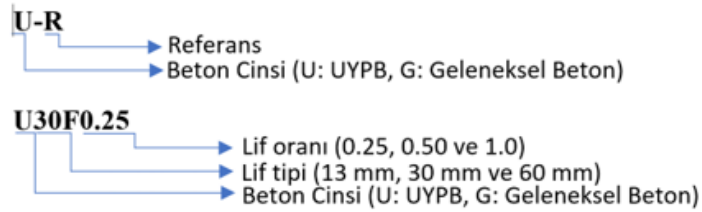
Beton testleri iki farklı durum için gerçekleştirilmiştir. Birincisi C30 dayanımına sahip geleneksel betonlar ve ultra yüksek performanslı beton (lifli/lifsiz) üzerinde yapılan deneyler. İkincisi ise geleneksel bir beton üzerine whitetopping kaplaması olarak atılan UYPLB'nin davranışlarının incelendiği diğer deney çalışmalarıdır. Katmanlı beton 60x60x7.5 (cm) geleneksel beton üzerinde 2.5 cm kalınlığında UYPLB uygulamasını ifade etmektedir.



**Şekil 4.7:** Test numunelerinin üretimi.

#### 4.4.1 Test Numune Kodlarının Verilmesi

Test numune kodları, deneyi yapılacak numunenin lif boyutu ve lif yüzdesine göre belirlenmiştir. Numune kod açılımları Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



**Şekil 4.8:** Numune kod açılımları.

#### 4.4.2 Test Numuneleri

Beton basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kiriş eğilme, aşınma, donma çözünme ve plak eğilme deneyleri için farklı tip ve boyutlarda test numuneleri hazırlanmıştır. Geleneksel beton deneylerinde kullanılmak üzere, beton basınç dayanım testi için 15x15x15 (cm) boyutlarında ve donma-çözülme deneyi için 10x10x10 (cm) boyutlarında küp numuneler, yarmada çekme ve aşınma deneyleri için 10x20 (cm) boyutlarında silindir numuneler üretilmiştir. UYPB numunelerin mekanik özelliklerini belirlenmesi için 10x10x10 (cm) boyutlarında ve donma-çözülme deneyi için 10x10x10 (cm) boyutlarında küp numuneler, yarmada çekme ve aşınma deneyleri için 10x20 (cm) boyutlarında silindir numuneler, kiriş eğilme testleri için ise 10x10x40 (cm) boyutlarında prizma numuneleri üretilmiştir. Katmanlı numunelerin davranışını belirlemek için ise 60x60x10 (cm) boyutlarında plak numuneler üretilmiştir. Hazırlanan numunelerin kalıp içerisindeki görünümleri Şekil 4.9’da, kalıptan çıkarılmış halleri ise Şekil 4.10~11’de gösterilmektedir.





**Şekil 4.9:** Dökümü yapılmış bir set deney numuneleri.



**Şekil 4.10:** Mekanik özelliklerin belirlenmesi için üretilen deney numuneleri.



**Şekil 4.11:** Plak deney numune örnekleri.

## 4.5 Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

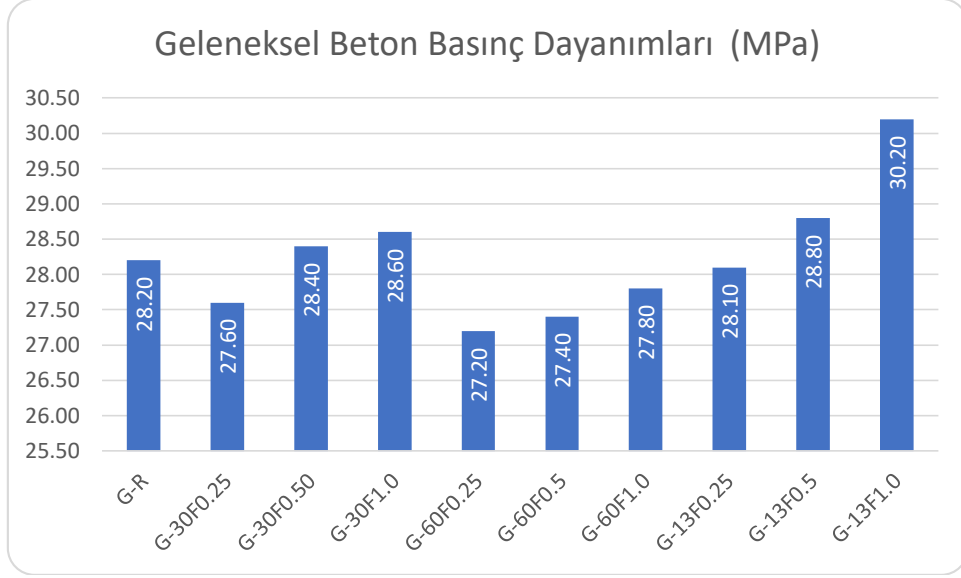
### 4.5.1 Beton Basınç Deneyleri

Geleneksel beton ve ultra yüksek performanslı betonların basınç dayanımları Tablo 4.8’de verilmiştir. Geleneksel beton basınç dayanımlarının belirlenmesi için 6 adet 15x15x15 (cm) silindir numune test edilip ortalamaları alınmıştır. Ultra yüksek performanslı betonlarda ise 6 adet 10x10x10 (cm) küp numunenin ortalama basınç dayanımları verilmiştir.

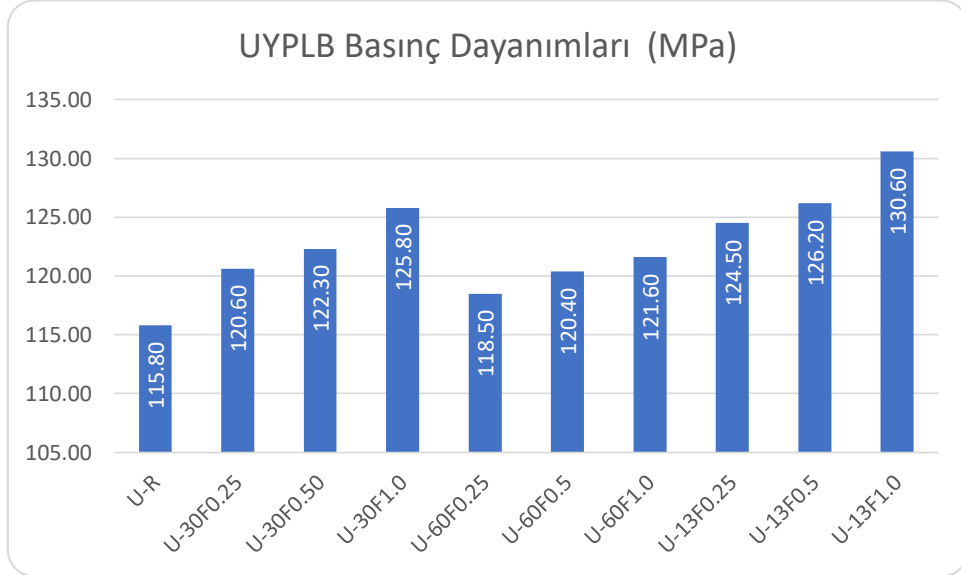
Geleneksel betonda lifin beton basınç dayanımına katkısı belirsizken, UYPLB’de lifin basınç dayanımına katkısı % 10 mertebesindedir. En fazla katkı % 1 lif oranına sahip 13 mm mikro lifli karışımda gözlenmiştir. UYPLB numunelerinde beklenen basınç değerlerine ulaşılmıştır (115.80 MPa ~ 130.60 MPa).

**Tablo 4.8:** Beton basınç dayanımları.

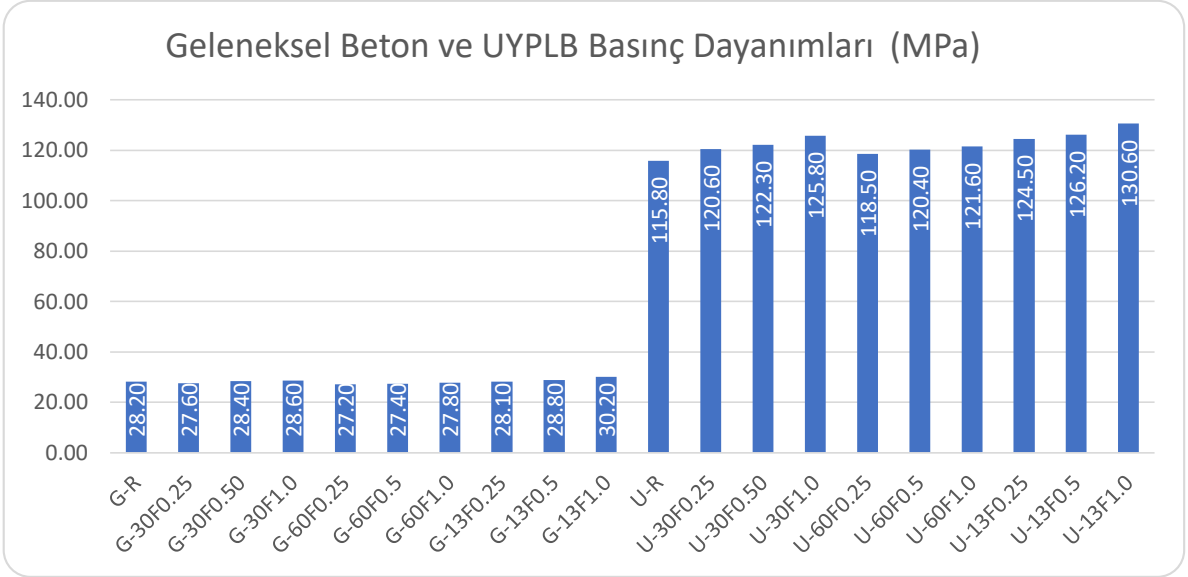
Lif Tipi	Narinlik	Kod	Lif İçeriği (kg/m <sup>3</sup> )	2 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	
-	-	G-R	0	---	28.2	
		G-30F0.25	20	---	27.6	
ZP305	55	G-30F0.50	40	---	28.4	
		G-30F1.0	80	---	28.6	
G	RC	G-60F0.25	20	---	27.2	
		G-60F0.5	40	---	27.4	
		G-60F1.0	80	---	27.8	
	13 mm Micro	80	G-13F0.25	20	---	28.1
			G-13F0.5	40	---	28.8
			G-13F1.0	80	---	30.2
			U-R	0	42.3	115.8
		U-30F0.25	20	45.2	120.6	
ZP305	55	U-30F0.50	40	45.0	122.3	
		U-30F1.0	80	51.3	125.8	
UYPLB	RC	U-60F0.25	20	44.8	118,5	
		U-60F0.5	40	43.8	120.4	
		U-60F1.0	80	48.4	121.6	
	13 mm Micro	80	U-13F0.25	20	55.3	124.5
			U-13F0.5	40	58.6	126.2
			U-13F1.0	80	61.3	130.6



**Şekil 4.12:** Geleneksel Beton lifsiz ve farklı lif ve lif oranlarındaki basınç dayanımlarının grafik gösterimi.



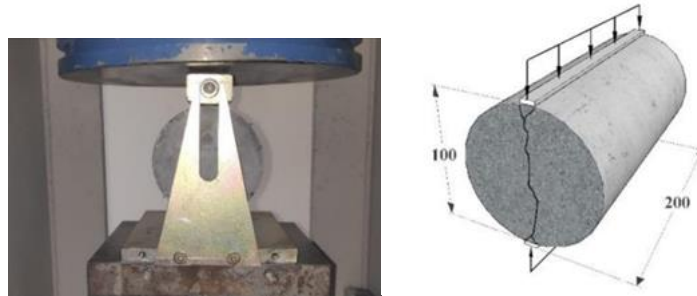
**Şekil 4.13:** UYPLB lifsiz ve farklı lif ve lif oranlarındaki basınç dayanımlarının grafik gösterimi.



**Şekil 4.14:** Geleneksel Beton ve UYPLB lifsiz ve farklı lif ve lif oranlarındaki basınç dayanımlarının grafik gösterimi.

#### 4.5.2 Beton Çekme Dayanımı Deneyleri

Beton çekme dayanımının belirlenmesi direkt çekme, eğilmede ve yarmada çekme yöntemleri yardımıyla yapılabilmekteyken bu çalışma kapsamında yarmada çekme yönteminden yararlanılmıştır. Brezilya deneyi olarak da bilinen yarmada çekme deneyinde Şekil 4.15’de görüldüğü üzere, beton numune metal ya da ahşap şeritler yardımıyla karşılıklı yanal yüzeylerden yüklenir. Yük, çap doğrultusunda yarılmayla parçalanma oluncaya kadar arttırılmaya devam edilir. Bu deneyde, betonda meydana gelen basınç gerilmeleri çekme gerilmelerinden daha yüksek olmakta fakat betonun çekmeye karşı direnci çok daha düşük olduğundan betonda meydana gelen kırılmalar çekme kuvvetleri nedeniyle olmaktadır.



**Şekil 4.15:** Yarmada çekme deney düzeneği.

TS EN 12390-6 standardına uygun olarak yarmada çekme deneyleri çapı 100 mm ve yüksekliği 200 mm olan silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yarmada çekme dayanımları denklem 4.1’de gösterilen bağıntı yardımıyla hesap edilmiştir.

$$f_{sp} = \frac{2P_{maks}}{\pi DL}$$

4.1

$f_{sp}$ : Yarmada çekme dayanımı (N/mm<sup>2</sup>),

$P_{maks}$ : Maksimum yük (N),

D: Silindirin çapı (mm),

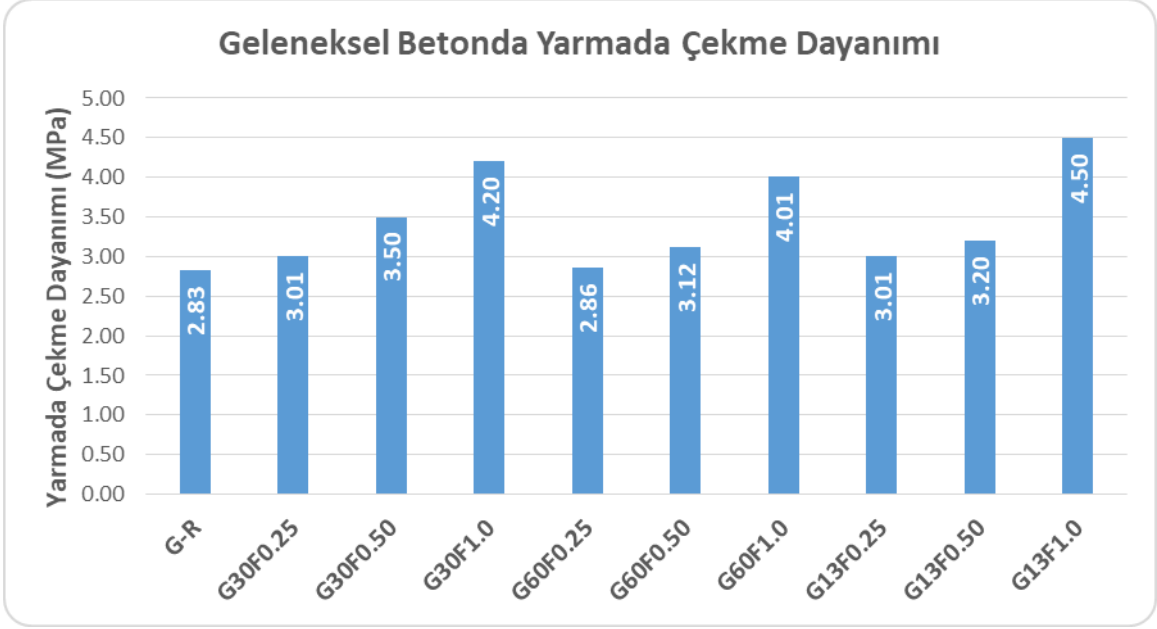
L: Silindirin yüksekliği (mm)

Tablo 4.9’da yarmada çekme dayanımları verilmiştir. Farklı lif boyutu, şekil ve oranlara sahip geleneksel ve UYPLB’ler için gerçekleştirilen yarmada çekme dayanımı sonuçlarının karşılaştırmaları Şekil 4.13~4.15’de gösterilmektedir.

Lifsiz referans geleneksel beton numunesinin yarmada çekme dayanımı 2.83 MPa elde edilmiştir. Lif tipinden bağımsız olarak lif oranı arttıkça yarmada çekme dayanımları artmıştır. En büyük yarmada çekme dayanımı % 1.0 lif oranına sahip 13 mm mikro lifli G13F1.0 numunesinde 4.5 MPa olarak elde edilmiştir. Bu lif tipi ve oranının yarmada çekme dayanımına katkısı yaklaşık 1.6 kattır.

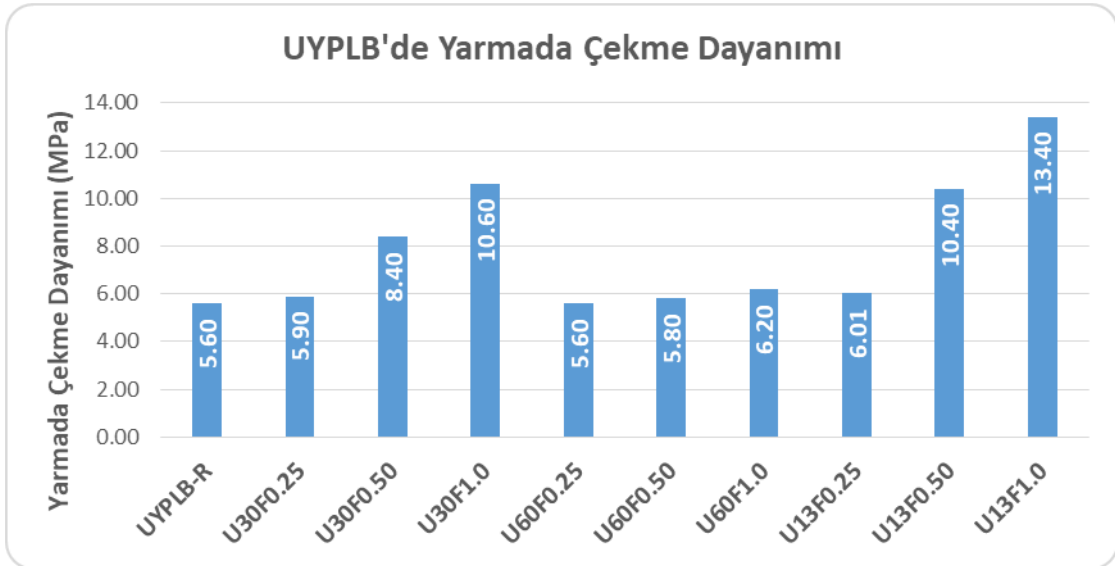
**Tablo 4.9:** Yarmada çekme dayanımları.

	Lif Tipi	Narinlik	Kod	Lif İçeriği (kg/m <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)
<b>G</b>	-	-	G-R	0	2.83
	ZP305	55	G-30F0.25	20	3.01
			G-30F0.50	40	3.5
			G-30F1.0	80	4.2
	RC 65/60	65	G-60F0.25	20	2.86
			G-60F0.5	40	3.12
			G-60F1.0	80	4.01
			G-13F0.25	20	3.01
	13 mm Micro	80	G-13F0.5	40	3.2
			G-13F1.0	80	4.5
-			-	U-R	0
<b>UYPLB</b>	ZP305	55	U-30F0.25	20	5.9
			U-30F0.50	40	8.4
			U-30F1.0	80	10.6
	RC 65/60	65	U-60F0.25	20	5.6
			U-60F0.5	40	5.8
			U-60F1.0	80	6.2
			U-13F0.25	20	6.01
	13 mm Micro	80	U-13F0.5	40	10.4
			U-13F1.0	80	13.4

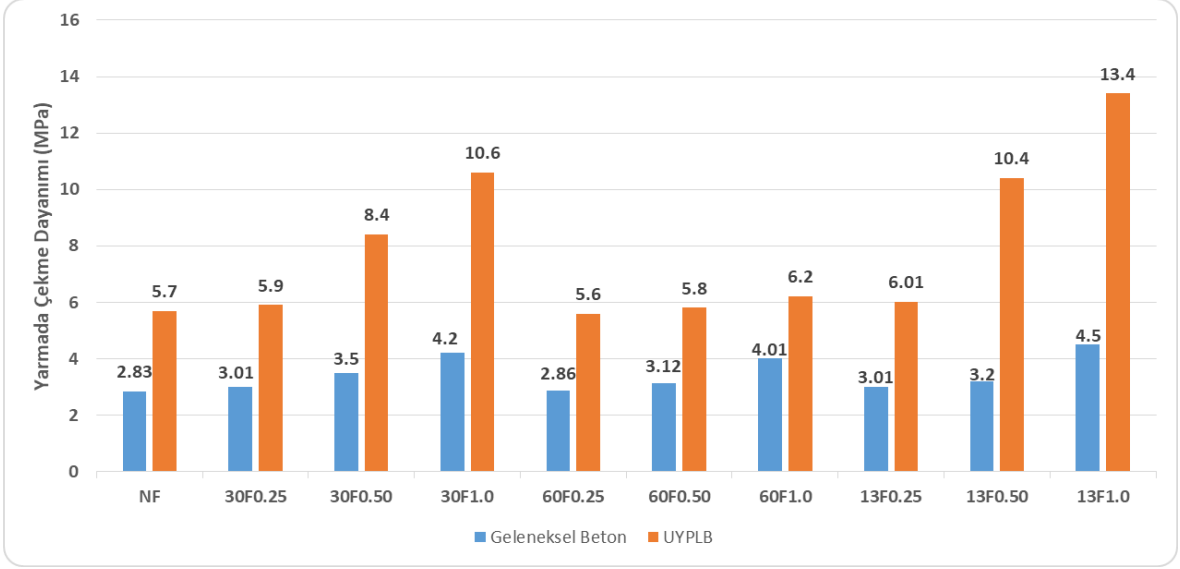


**Şekil 4.16:** Geleneksel betonda yarmada çekme dayanımları.

UYPLB’de da benzer bir durum söz konusudur. Lif oranı artışı ile yarmada çekme dayanımında artış olmaktadır. En büyük artış U13F1.0 gözlenmiştir. Lifsiz referans numunesine göre artış yaklaşık 2.4 kattır.



**Şekil 4.17:** UYPLB’lerde yarmada çekme dayanımları.

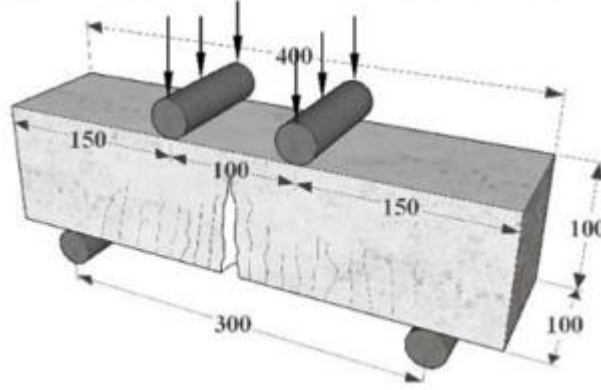
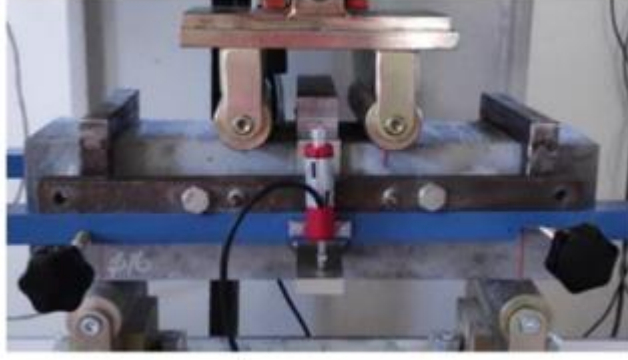


**Şekil 4.18:** Geleneksel ve UYPLB’lerde yarmada çekme dayanımları.

Geleneksel lifli betonda en düşük değer 2.86 MPa ile G60F0.25 numunesinde, UYPLB’da en düşük değer 5.6 MPa ile U60F0.25 numunesine ölçülmüştür. Yarmada çekme dayanımlarında en düşük değerlere bakıldığında geleneksel betonun UYPLB’ye göre % 50 oranında daha düşük olduğu Tablo 4.9 ve Şekil 4.18’den görülebilir.

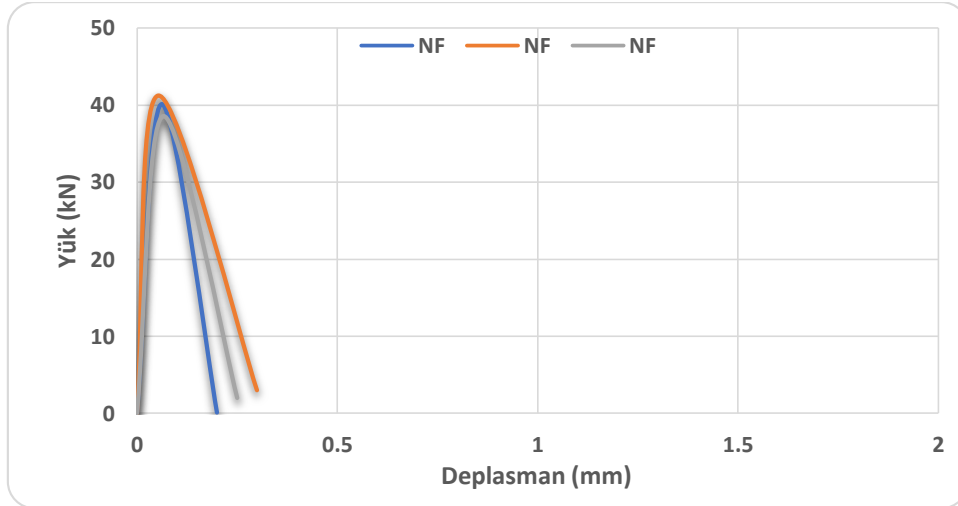
#### 4.5.3 Dört Noktalı Eğilme Deneyleri

Çalışma kapsamında hazırlanan lifsiz ve farklı lif içeriklerine sahip UYPLB karışımlarının eğilme davranışları, 200 kN kapasiteli ve yer değiştirme kontrollü eğilme test düzeneği yardımıyla yapılmıştır. ASTM C1609 yönetmeliğinde ayrıntıları verilen deney yöntemine uygun olarak hazırlanan 10x10x40 (cm) boyutlarındaki prizma numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Düzenekte 30 cm açıklıkta sabit ve kayıcı mesnetler üzerine yerleştirilen prizma numunesine aralarında kesit yüksekliği kadar (10 cm) mesafe bulunan iki tekil yük uygulanmaktadır. Deneylerde yükleme hızı olarak 0.2 mm/dk uygulanmıştır. Nihayetinde sisteme verilen yük ile numunenin iki tarafında yer alan deplasman ölçerlerden alınan deplasmanların ortalamaları alınarak Yük-Deplasman grafikleri çizdirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4.19’da gösterilmektedir.



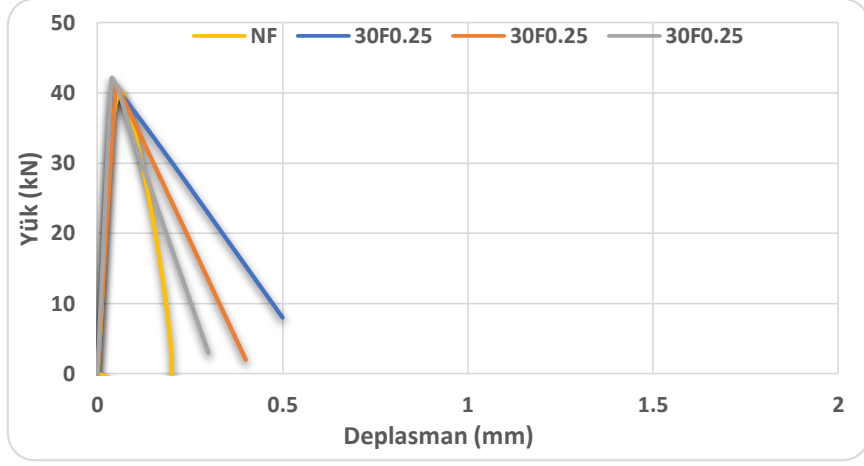
**Şekil 4.19:** Dört noktalı eğilme deneylerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği.

UYPLB'ler için gerçekleştirilen dört noktalı eğilme deney sonuçları Şekil 4.20~4.29'da gösterilmektedir.

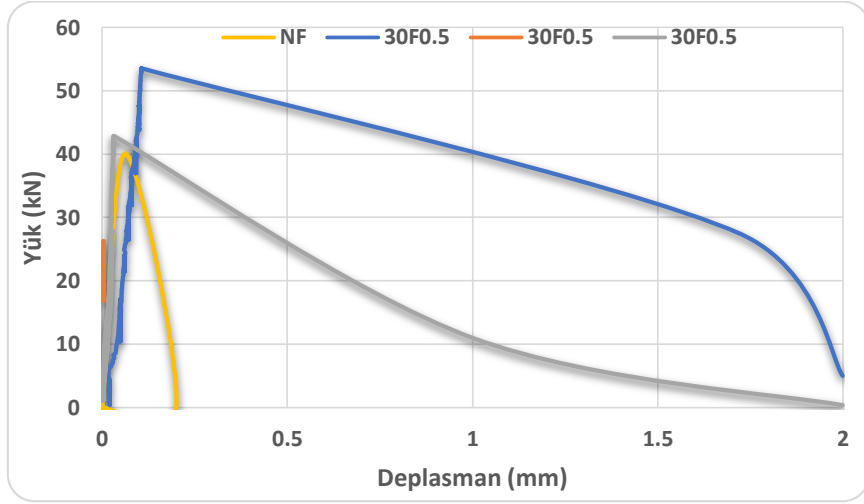


**Şekil 4.20:** Çelik lifsiz UYPB eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

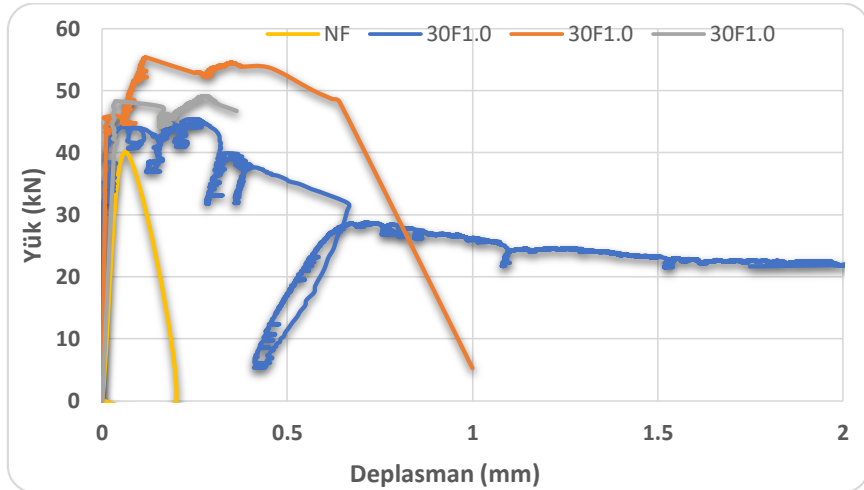




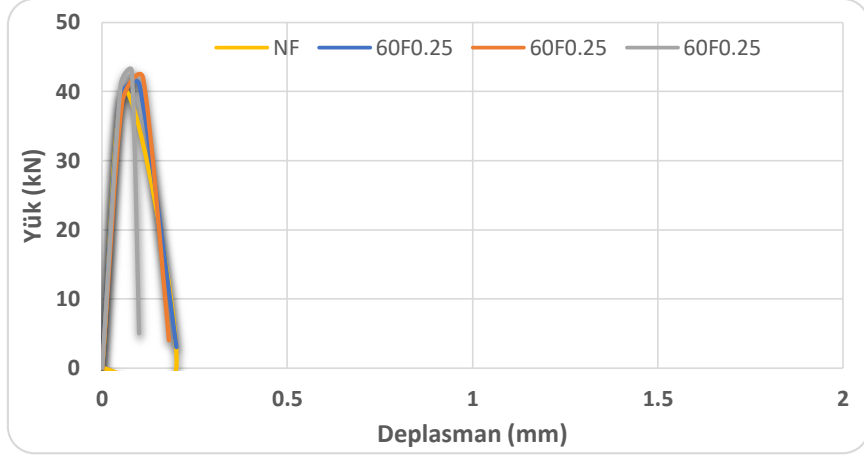
Şekil 4.21: 30 mm uzunluk % 0.25 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



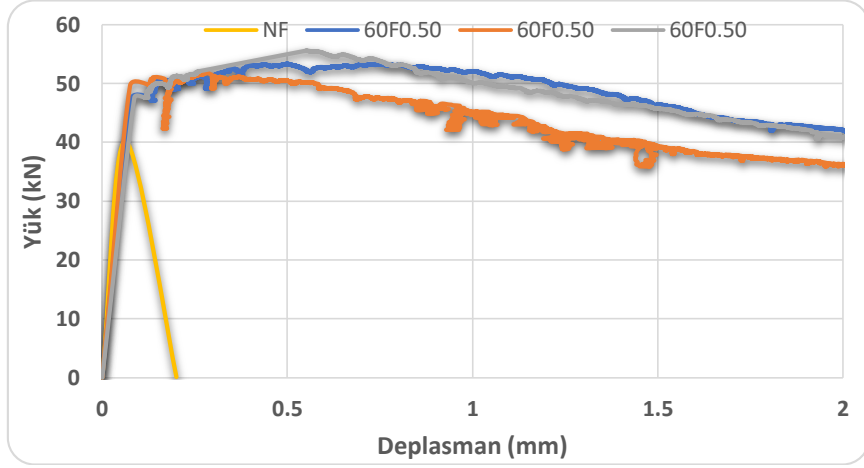
Şekil 4.22: 30 mm uzunluk % 0.50 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



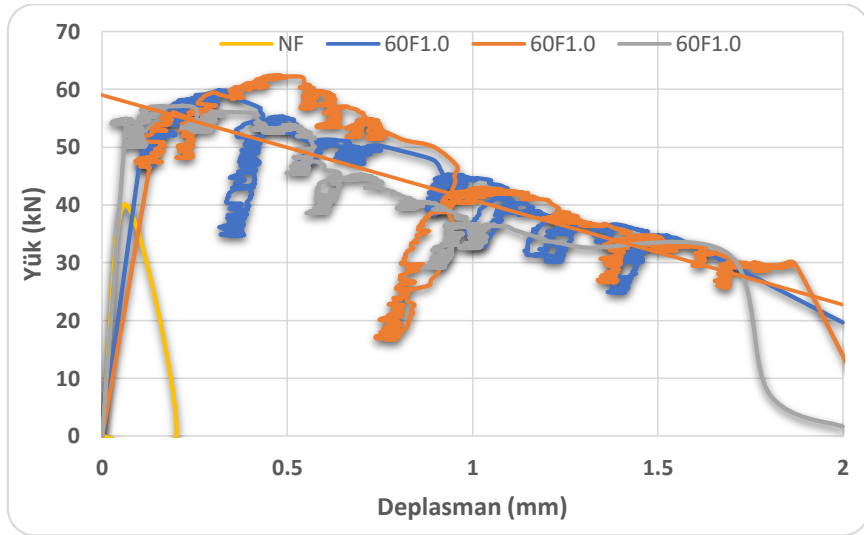
Şekil 4.23: 30 mm uzunluk % 1.00 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



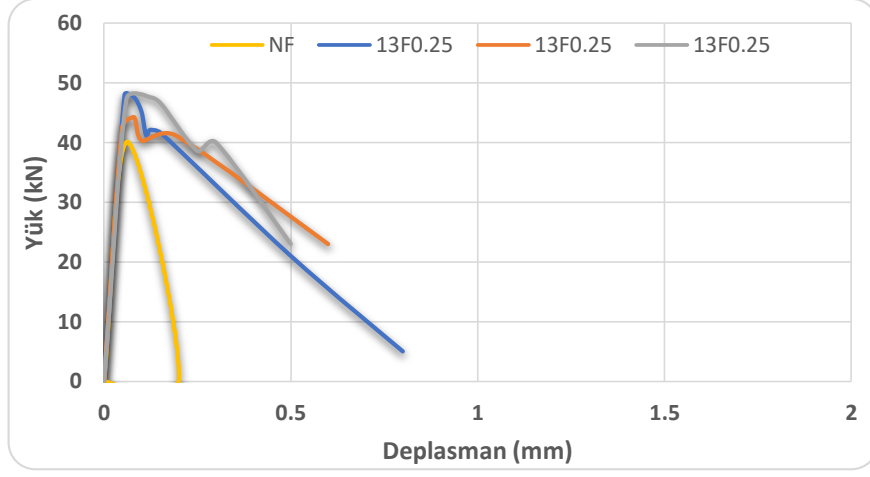
Şekil 4.24: 60 mm uzunluk % 0.25 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



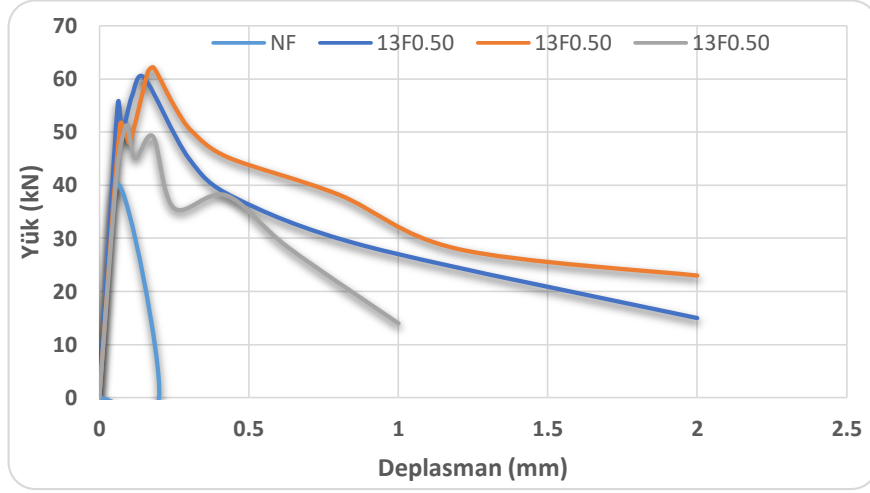
Şekil 4.25: 60 mm uzunluk % 0.50 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



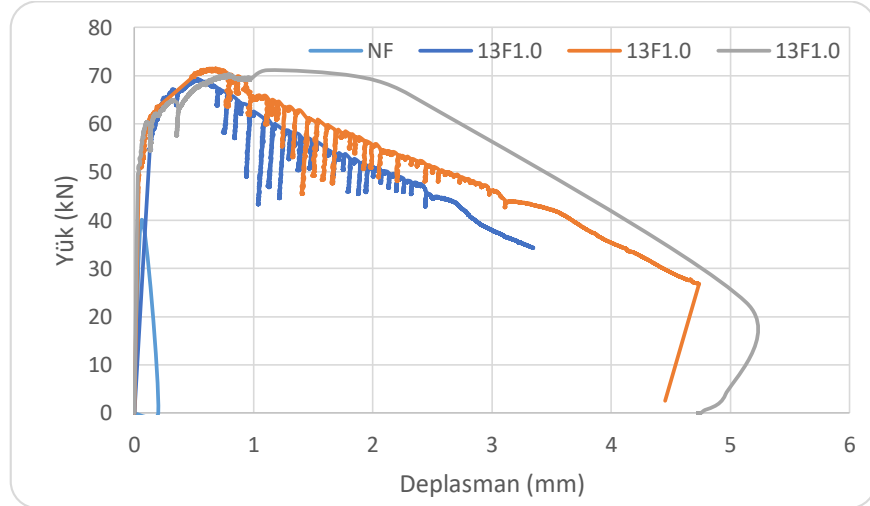
Şekil 4.26: 60 mm uzunluk % 1.00 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



**Şekil 4.27:** 13 mm uzunluk % 0.25 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



**Şekil 4.28:** 13 mm uzunluk % 0.50 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



**Şekil 4.29:** 13 mm uzunluk % 1.00 çelik lifli UYPLB prizma için eğilme deneyi sonucunda elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

#### 4.5.4 Beton Aşınma Deneyleri

Beton aşınma dayanımı 10x20 cm boyutlarındaki silindirik numuneler yardımıyla ASTM C 944-99 metoduna uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Her bir numune deneye başlanmadan önce tartılarak ilk ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra numuneler, ilgili standarda uygun olacak şekilde deney düzeneğine yerleştirilerek 197 N'lik kuvvet altında 200 devir/dakika hızında dönen aşındırıcılarla 2 dakika 3 tur aşınmaya tabi tutulmuş ve her turda numune tartılarak ağırlıkları kaydedilerek ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. UYPLB ile üretilen numunelerde aşınma değeri çok küçük olduğu için deney 5 tur tekrar edilmiştir. Her tip numuneden ikişer adet deneye tabi tutulmuş ve ortalama değerleri alınmıştır. ASTM C 944-99 metodunda kullanılan ekipmanlar Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de gösterilmektedir.

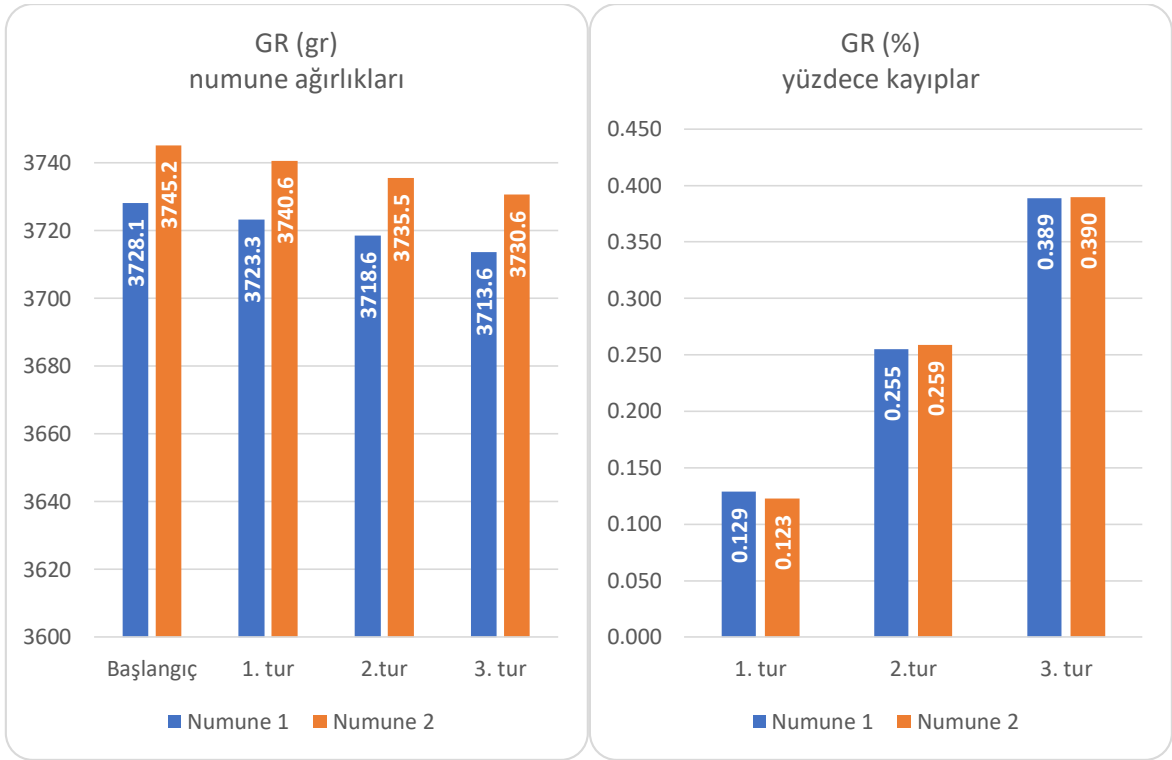


Şekil 4.30: Deney aparatı.

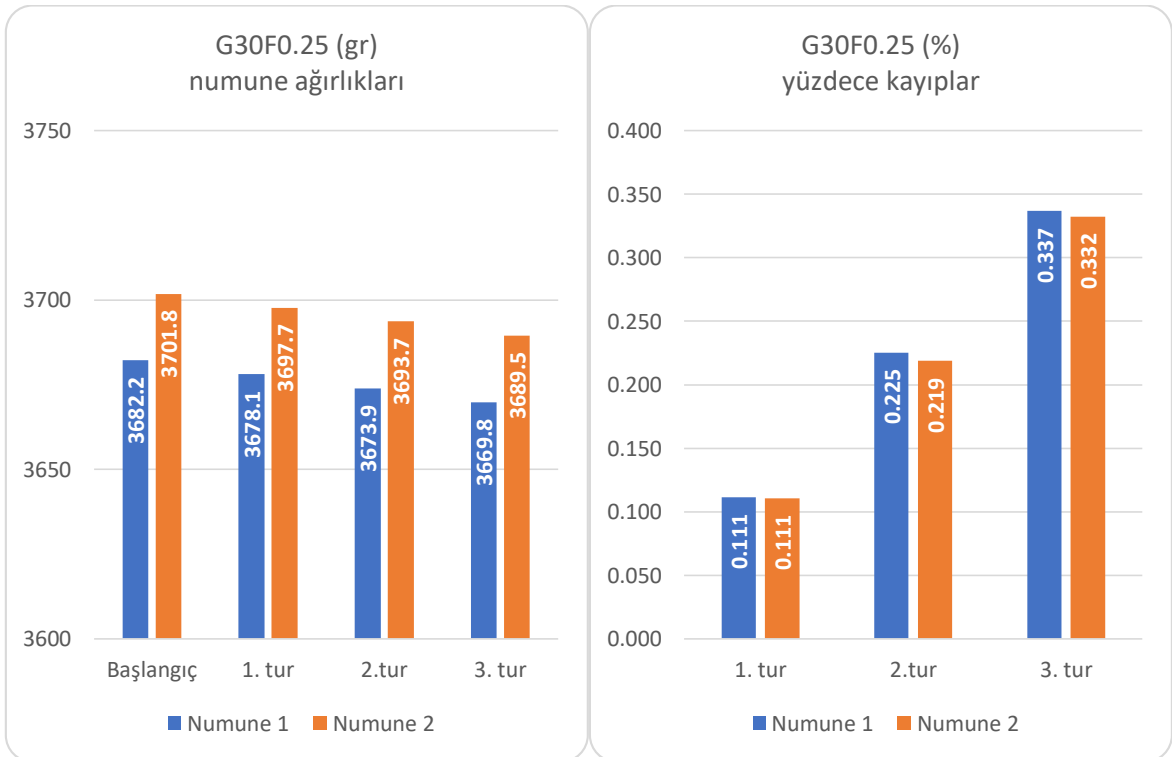


Şekil 4.31: ASTM C 944-99'a uygun aşınma deneyi ekipmanı.

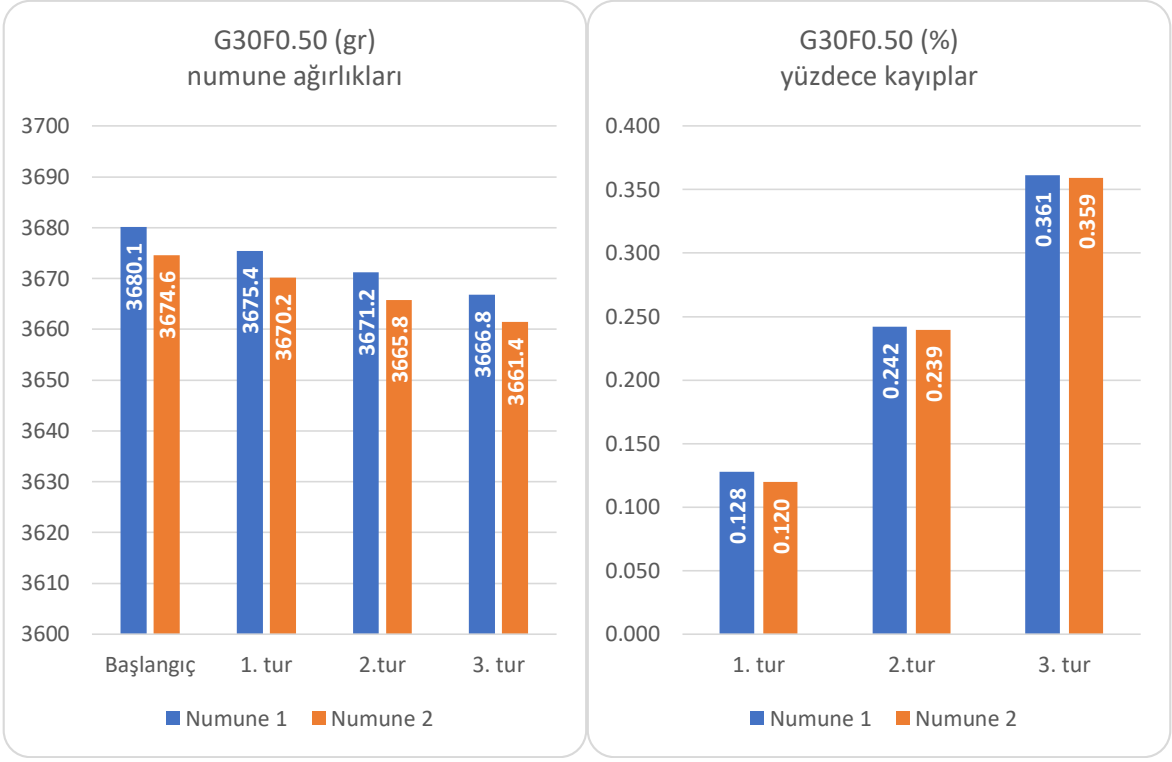
Beton aşınma deneyi sonuçları Şekil 4.32~Şekil 4.54'de gösterilmektedir.



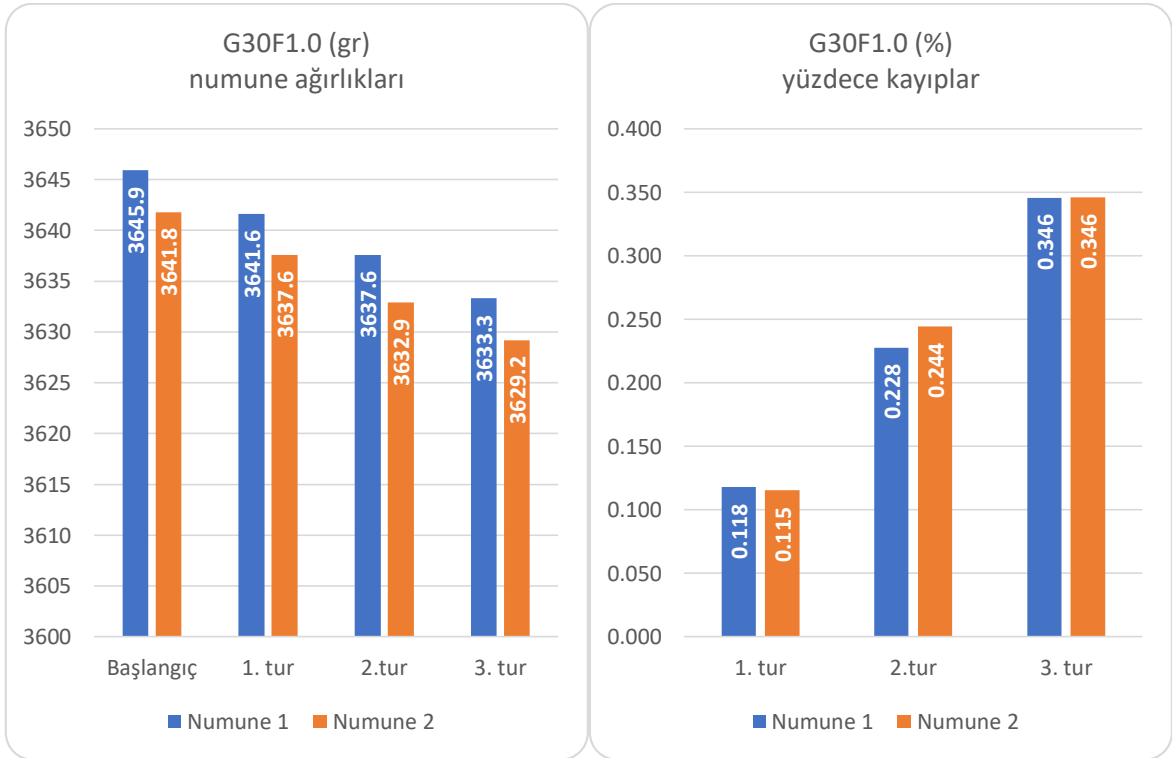
Şekil 4.32: Geleneksel beton referans numune, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



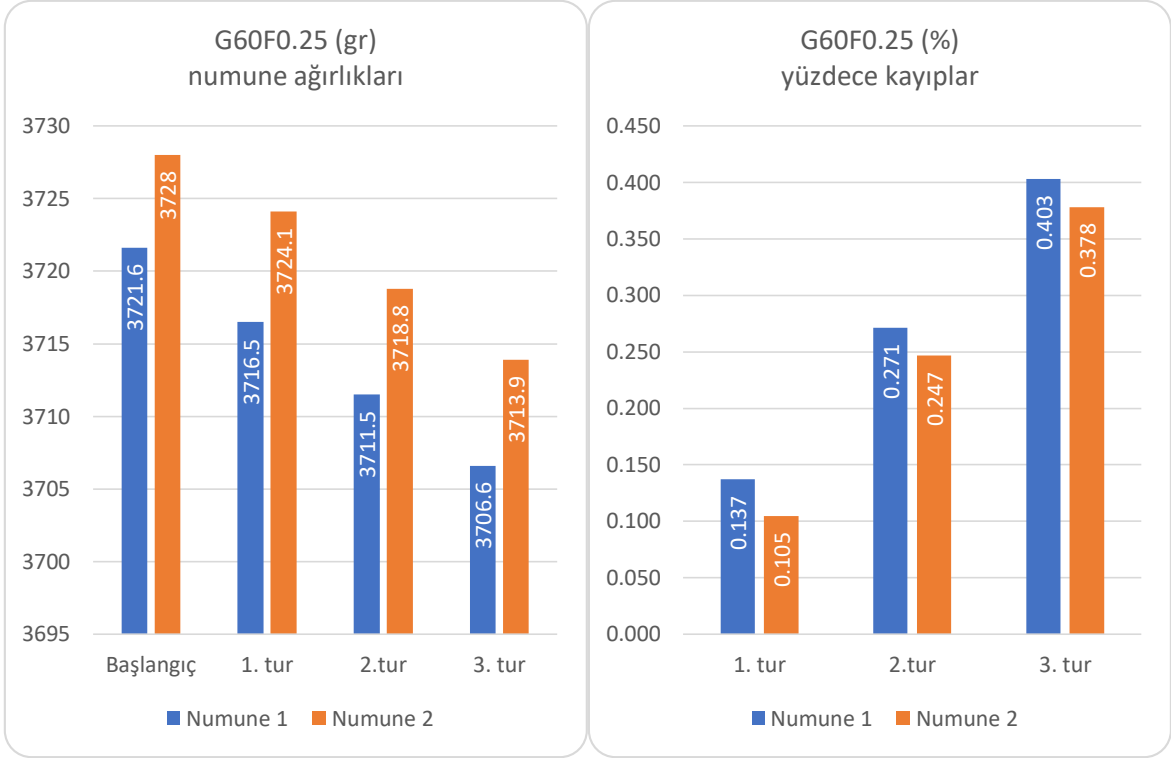
Şekil 4.33: % 0.25 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



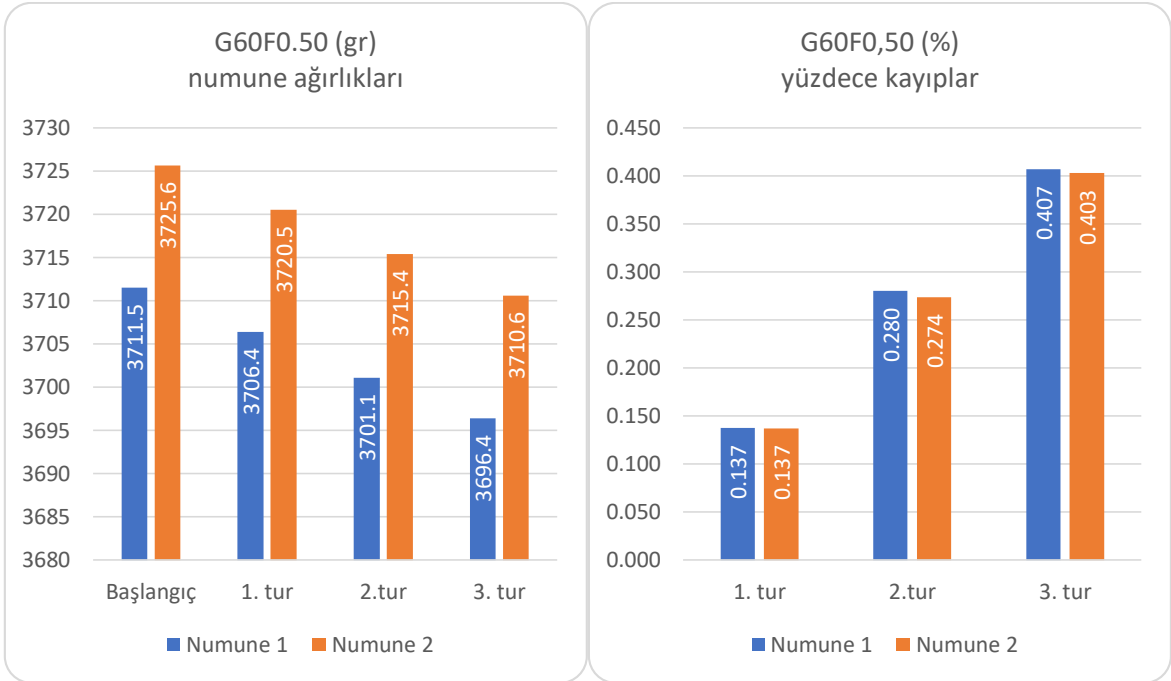
**Şekil 4.34:** % 0.50 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



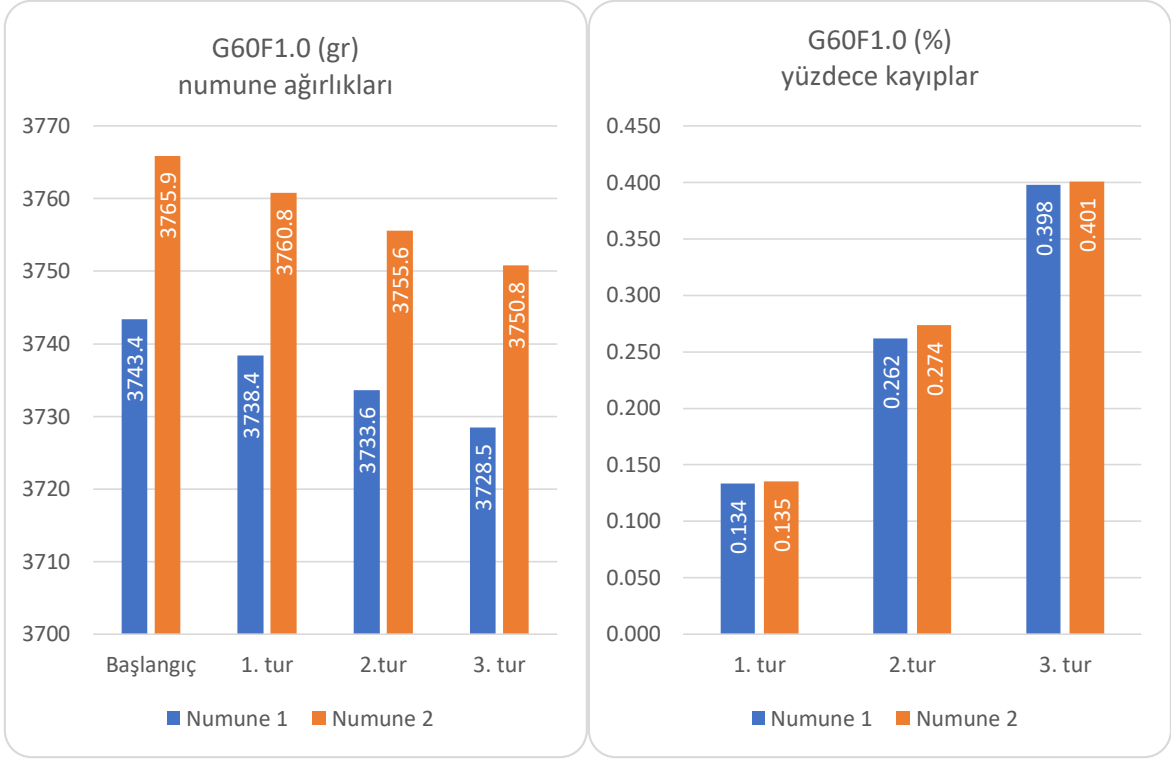
**Şekil 4.35:** % 1.0 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



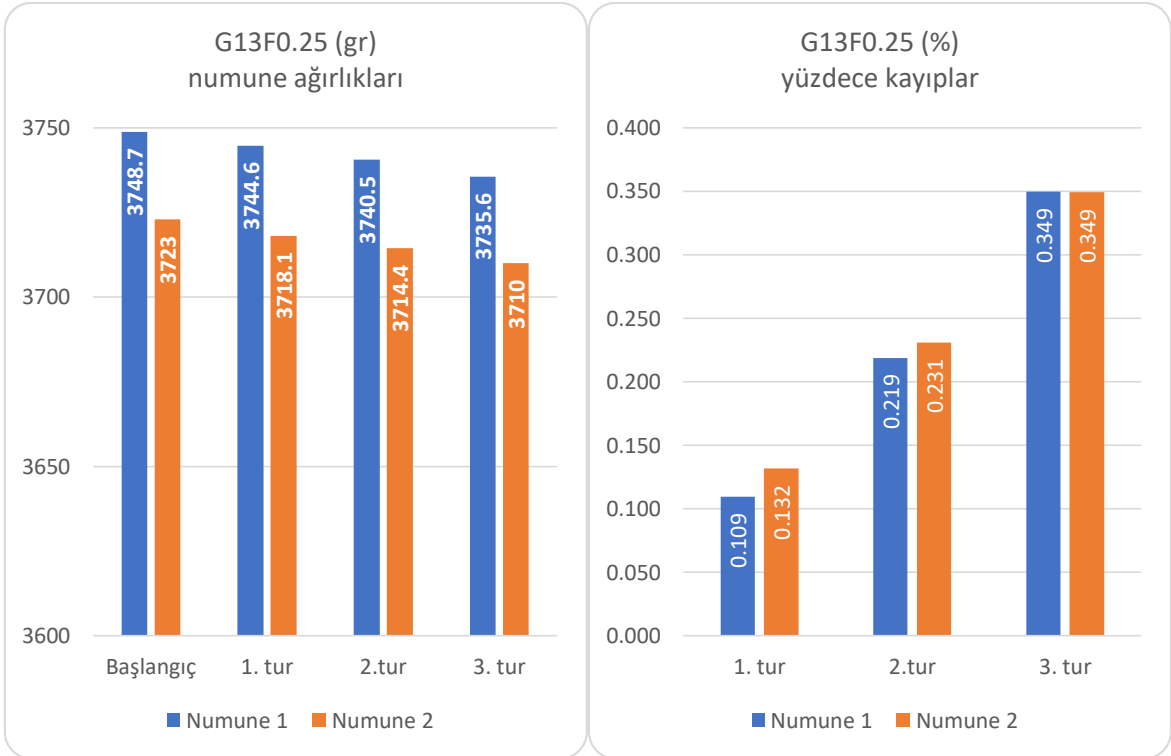
**Şekil 4.36:** % 0.25 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



**Şekil 4.37:** % 0.50 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.

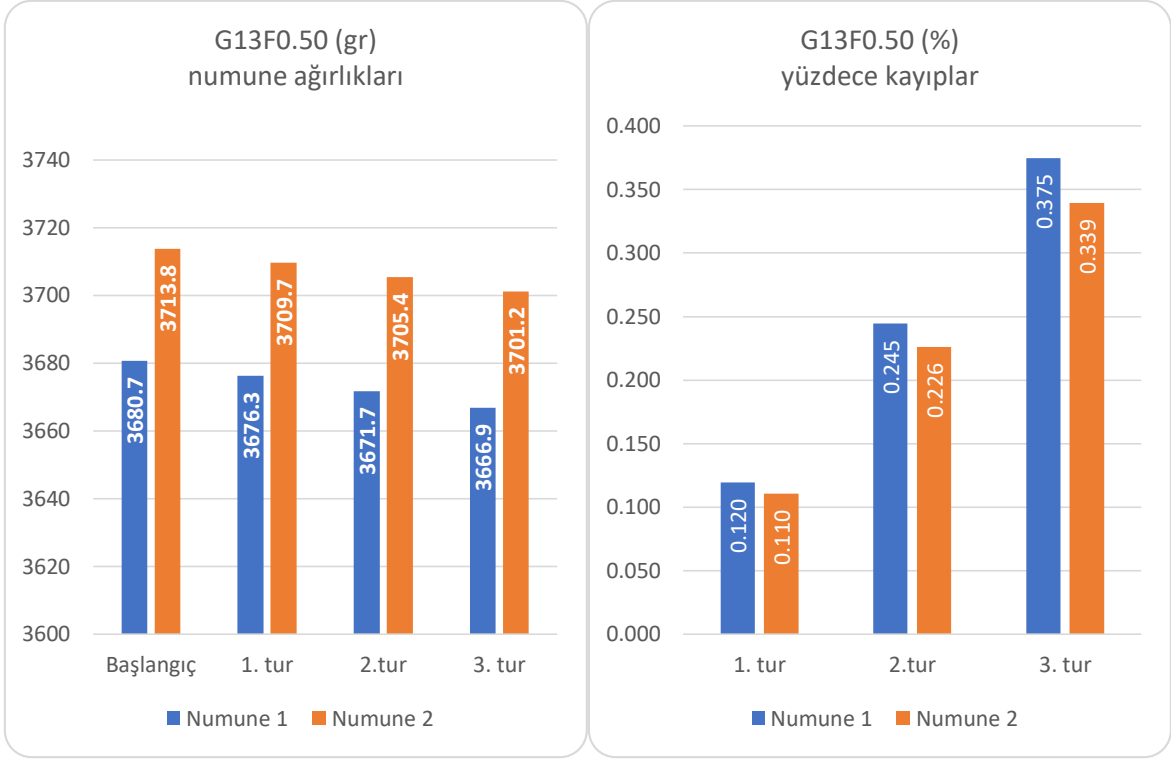


**Şekil 4.38:** % 1.0 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.

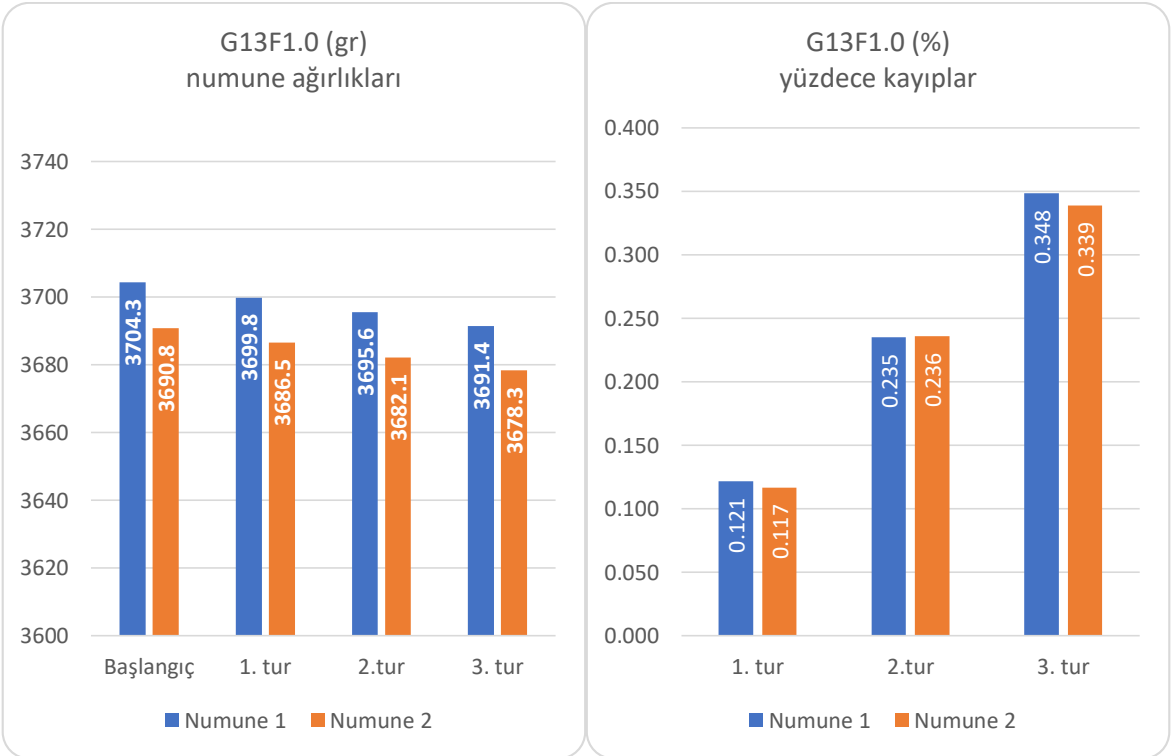


**Şekil 4.39:** % 0.25 oranlı 13 mm düz çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.

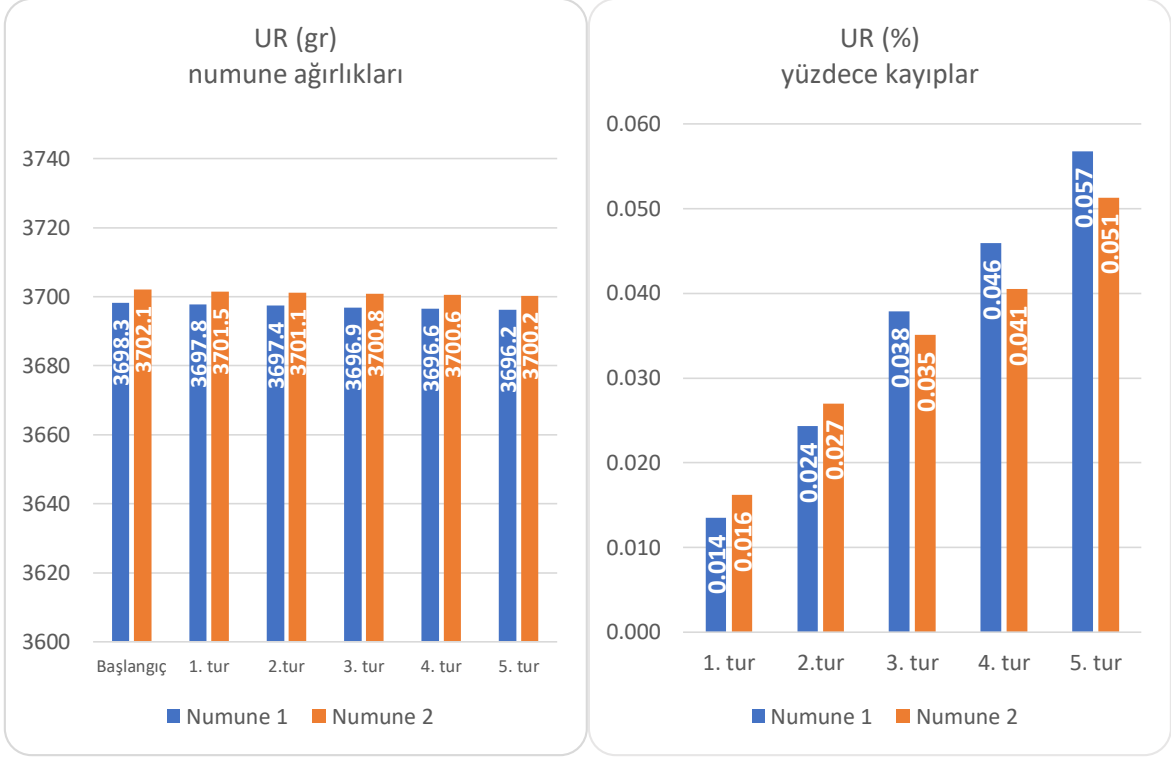




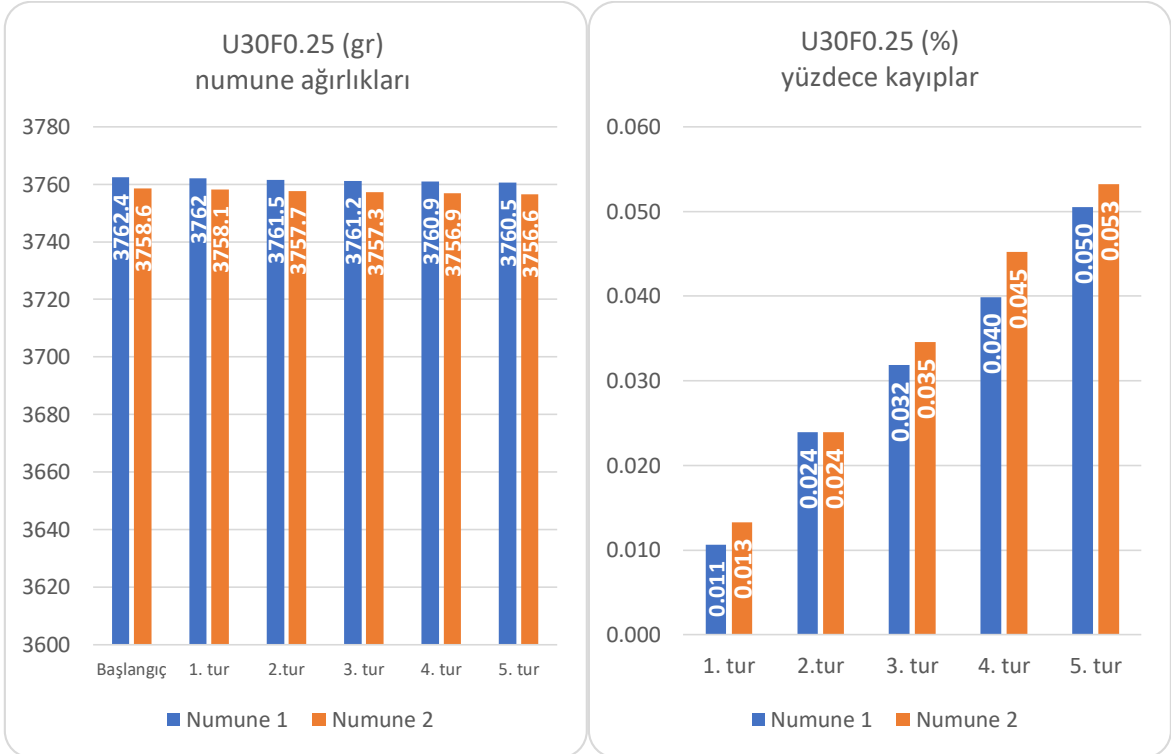
**Şekil 4.40:** % 0.50 oranlı 13 mm düz çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



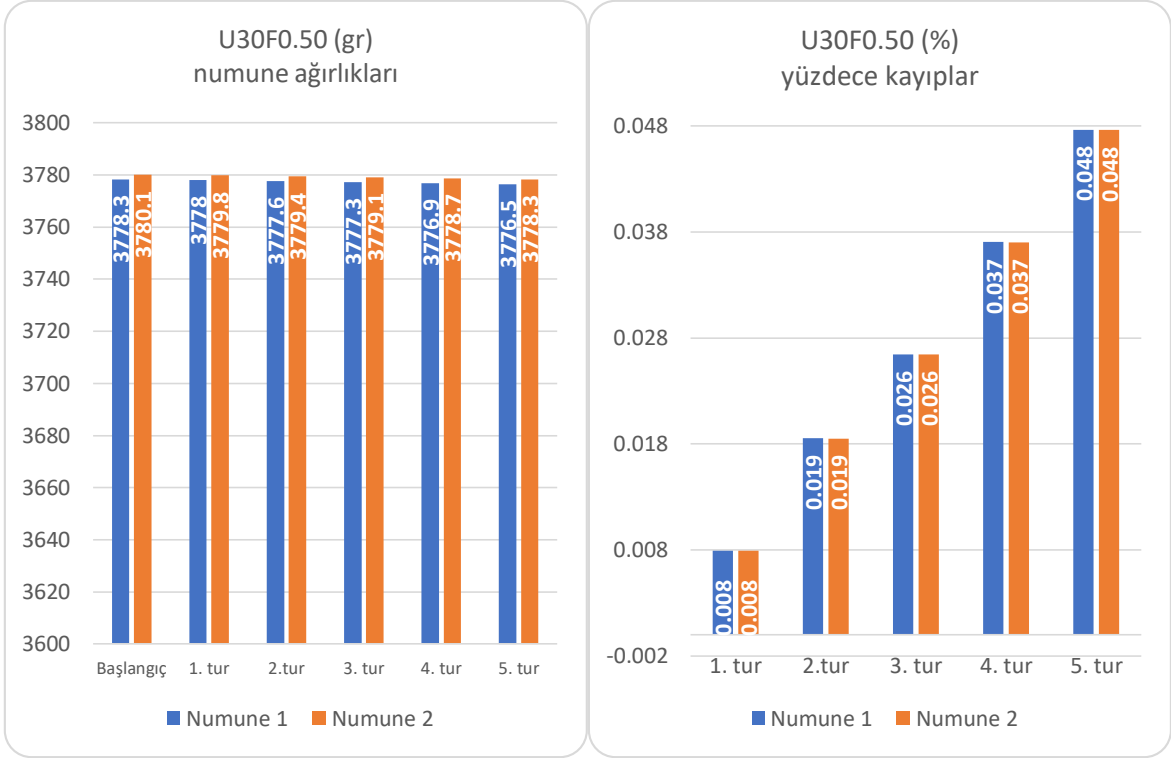
**Şekil 4.41:** % 1.0 oranlı 13 mm düz çelik lifli geleneksel beton, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



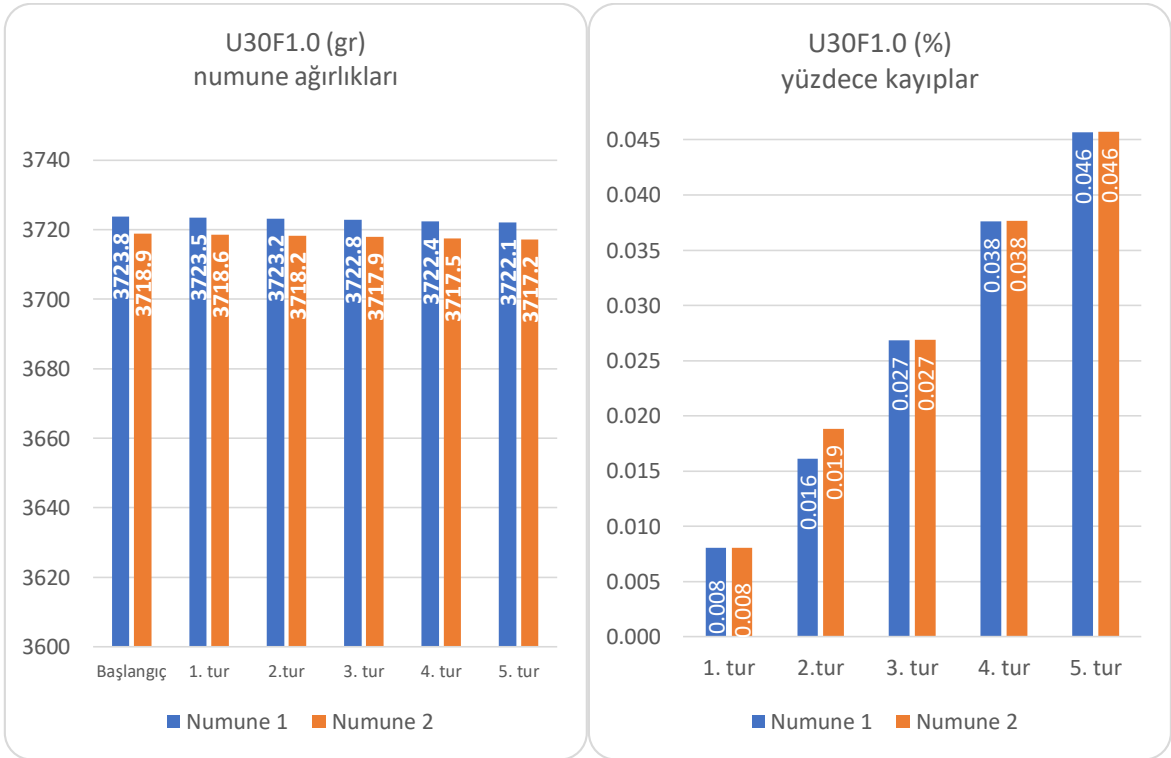
**Şekil 4.42:** UYPLB beton referans numune, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



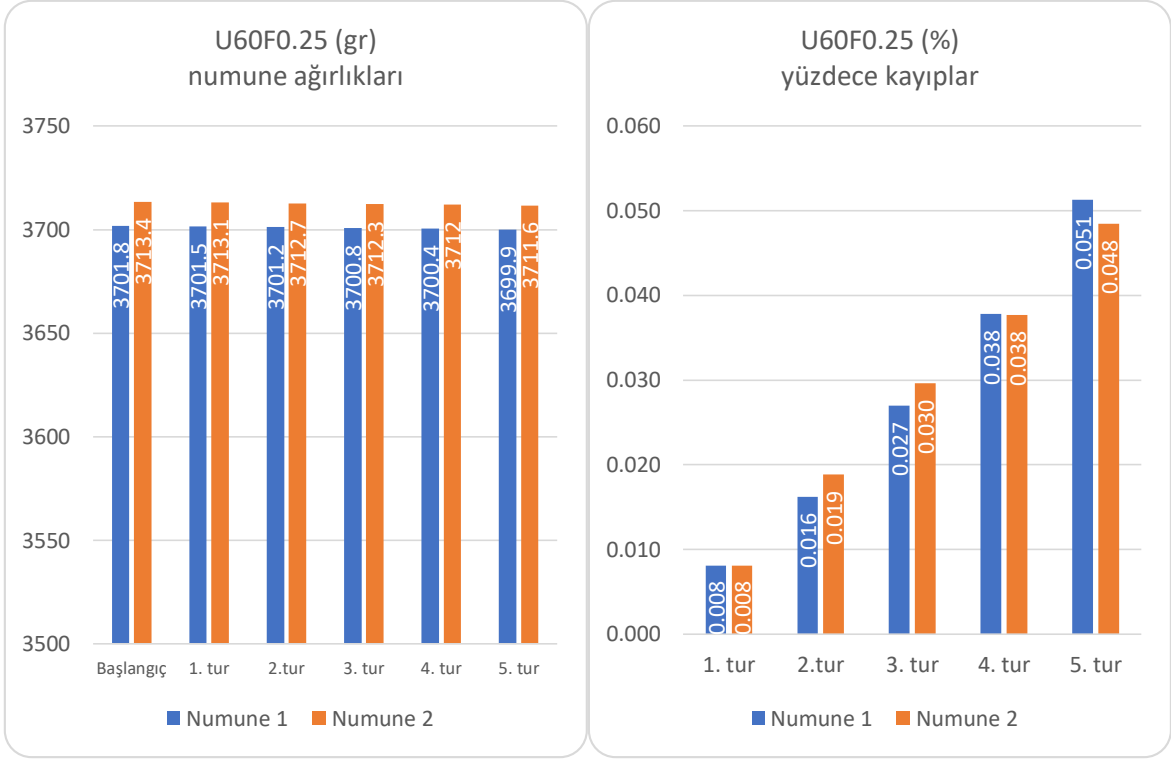
**Şekil 4.43:** % 0.25 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



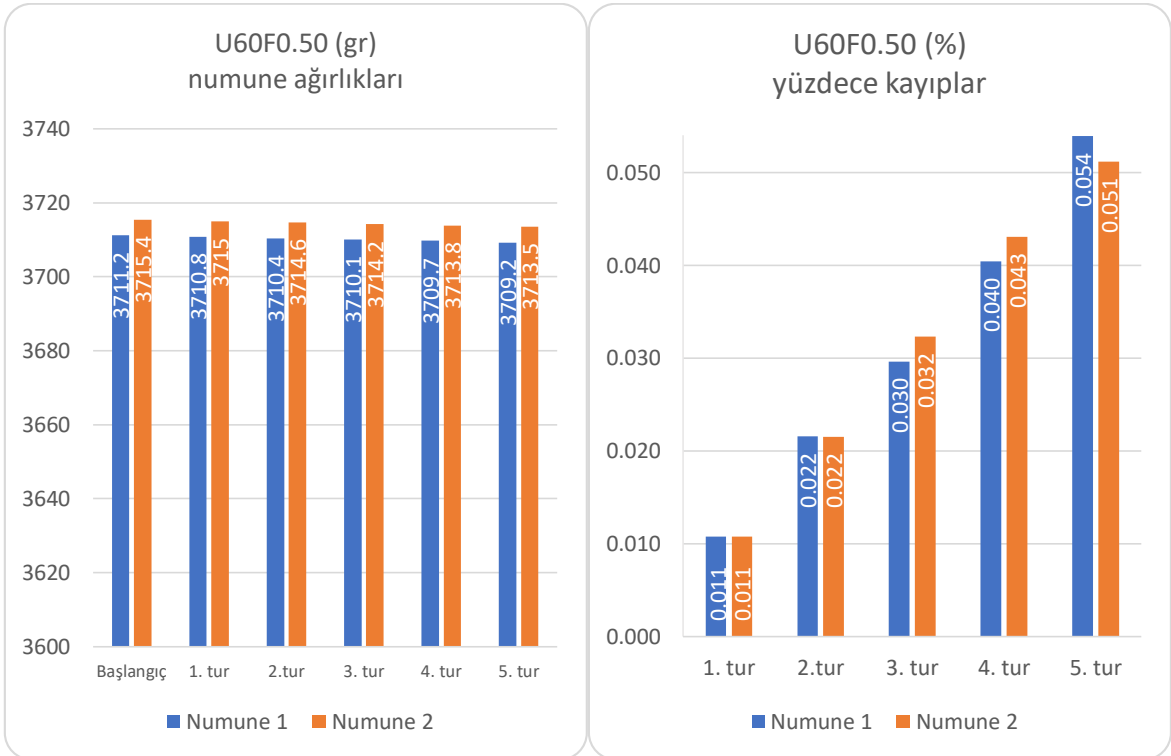
**Şekil 4.44:** % 0.50 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



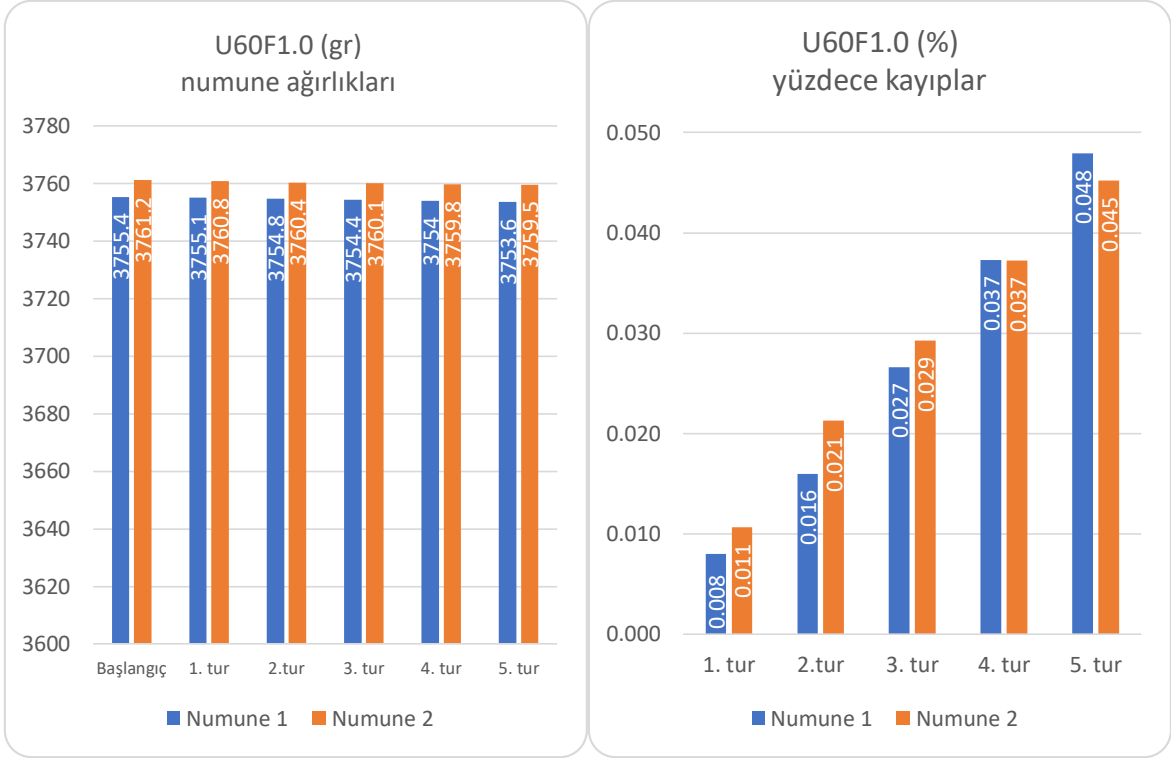
**Şekil 4.45:** % 1.0 oranlı 30 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



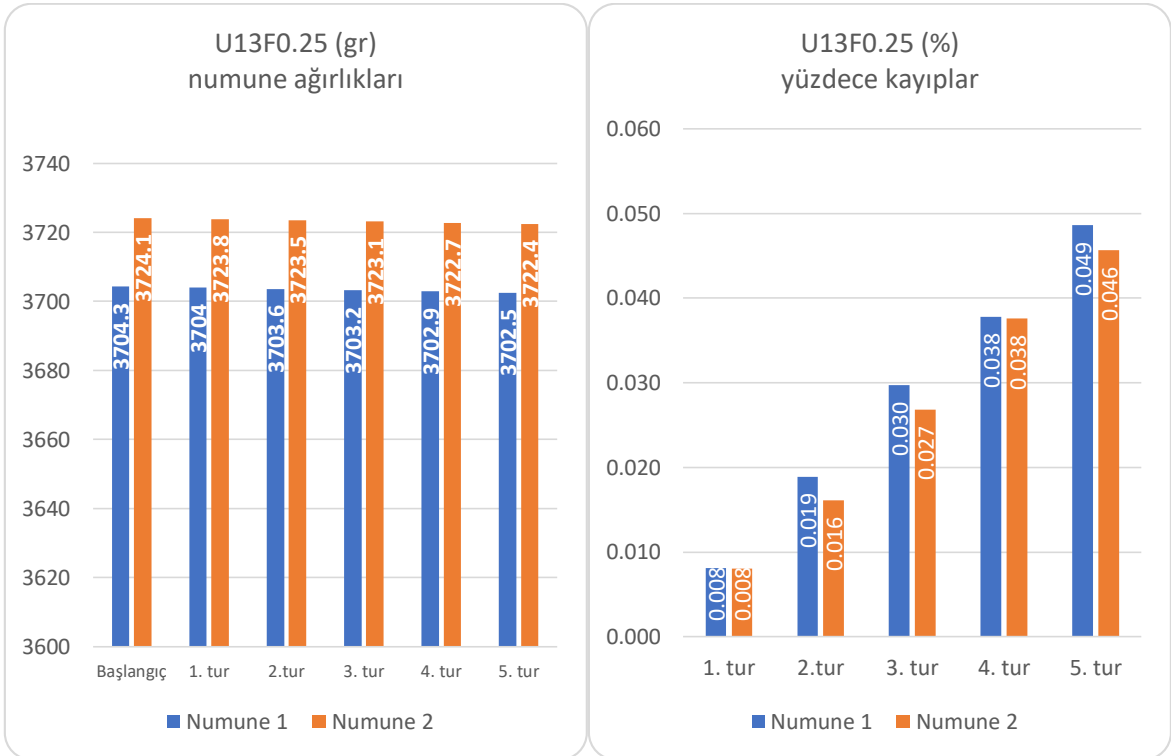
**Şekil 4.46:** % 0.25 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



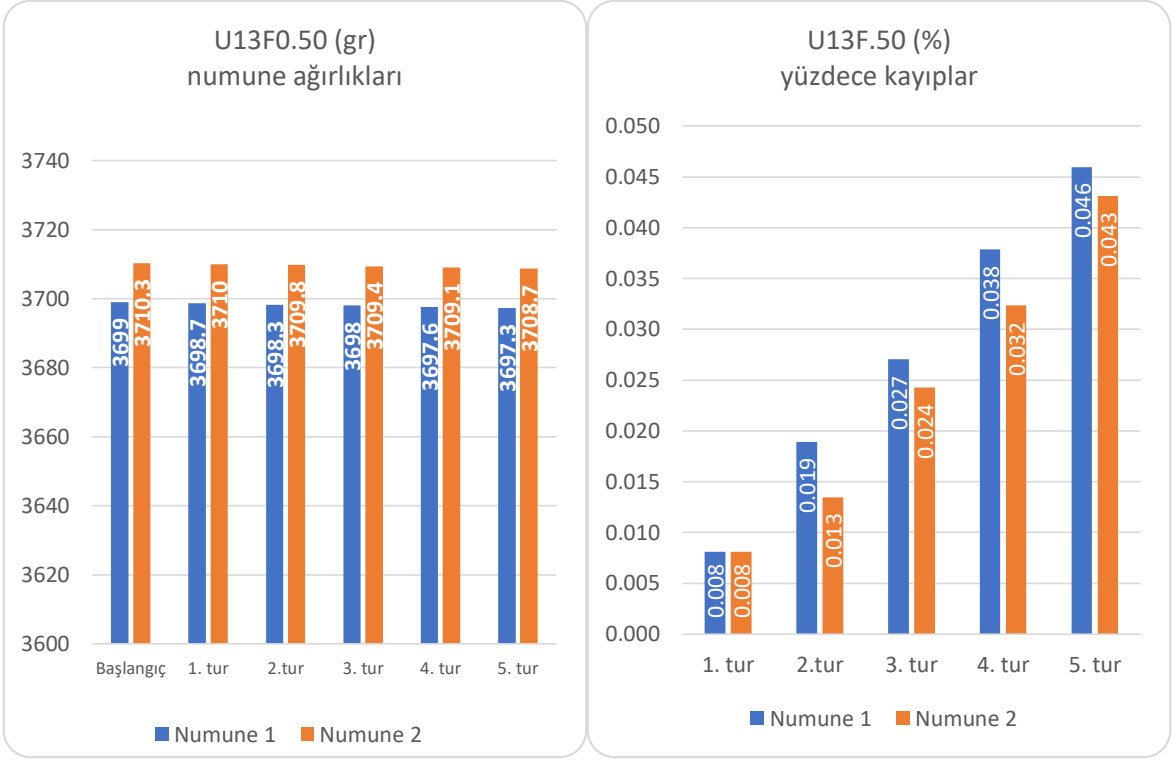
**Şekil 4.47:** % 0.50 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



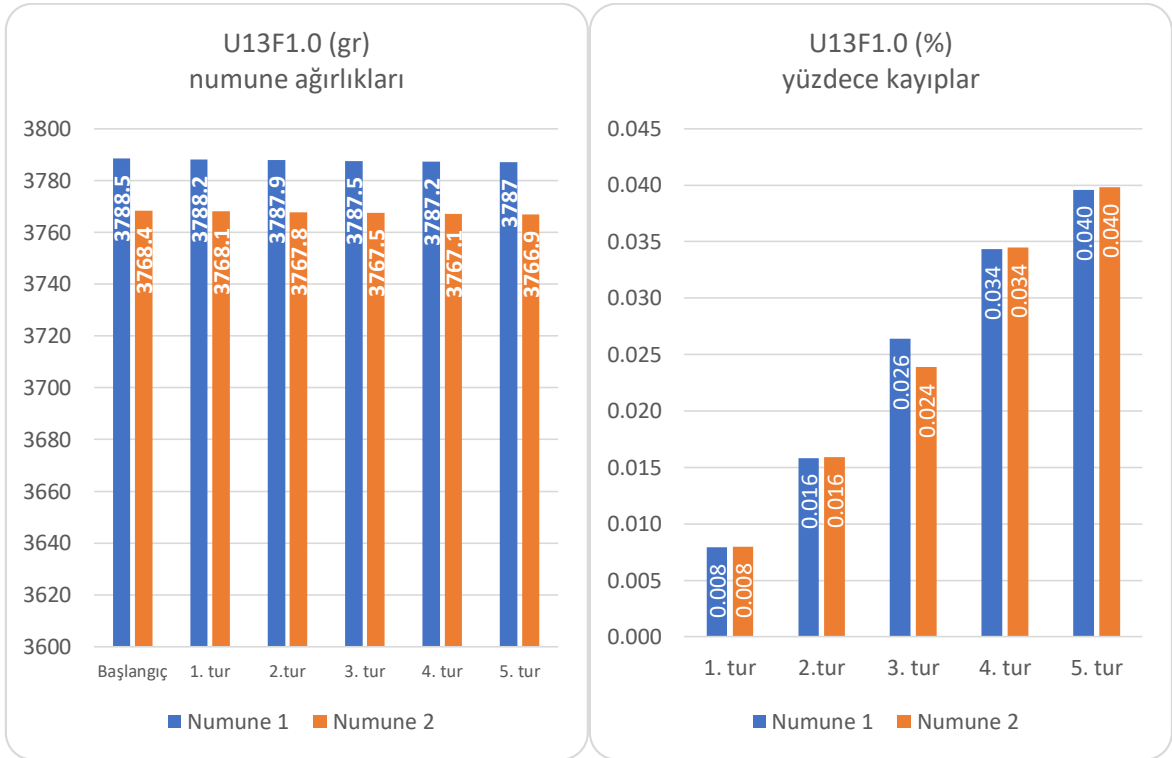
**Şekil 4.48:** % 1.0 oranlı 60 mm çift kancalı çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



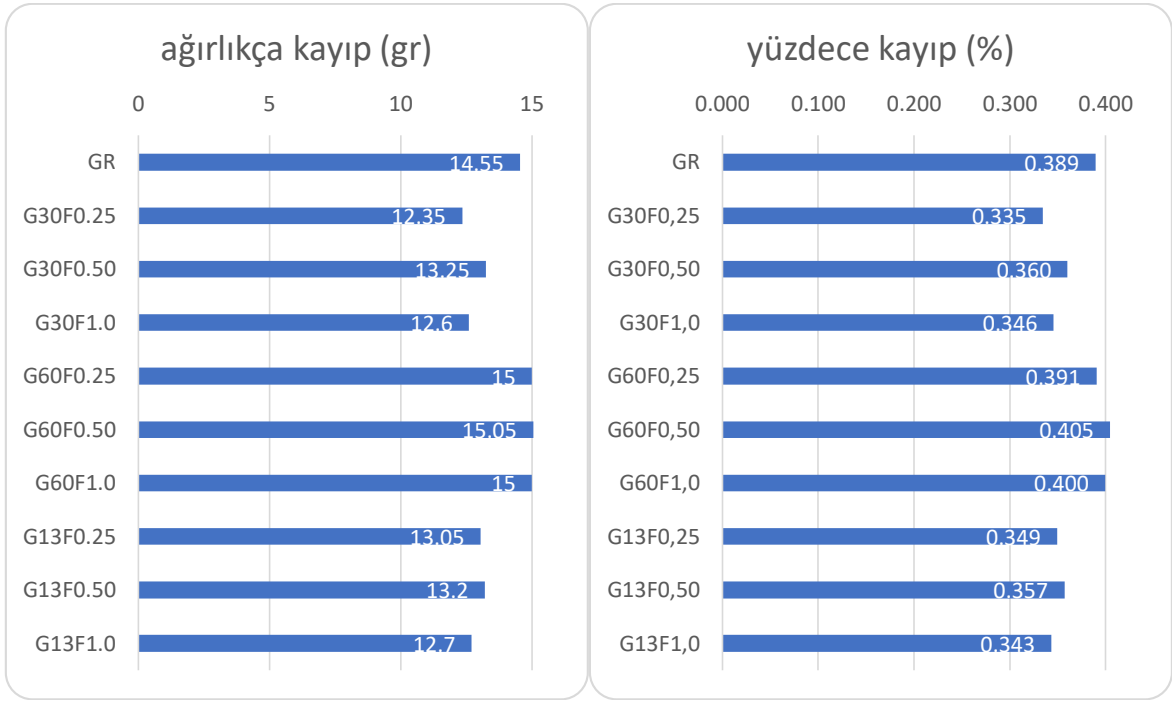
**Şekil 4.49:** % 0.25 oranlı 13 mm düz çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



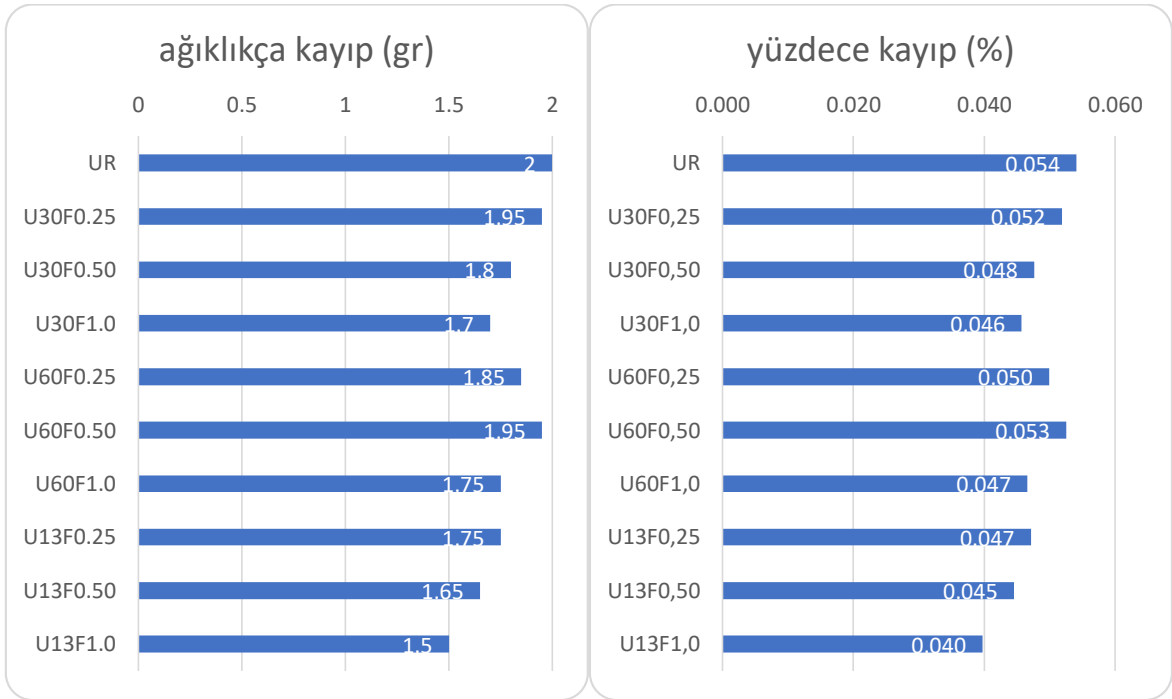
**Şekil 4.50:** % 0.50 oranlı 13 mm düz çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



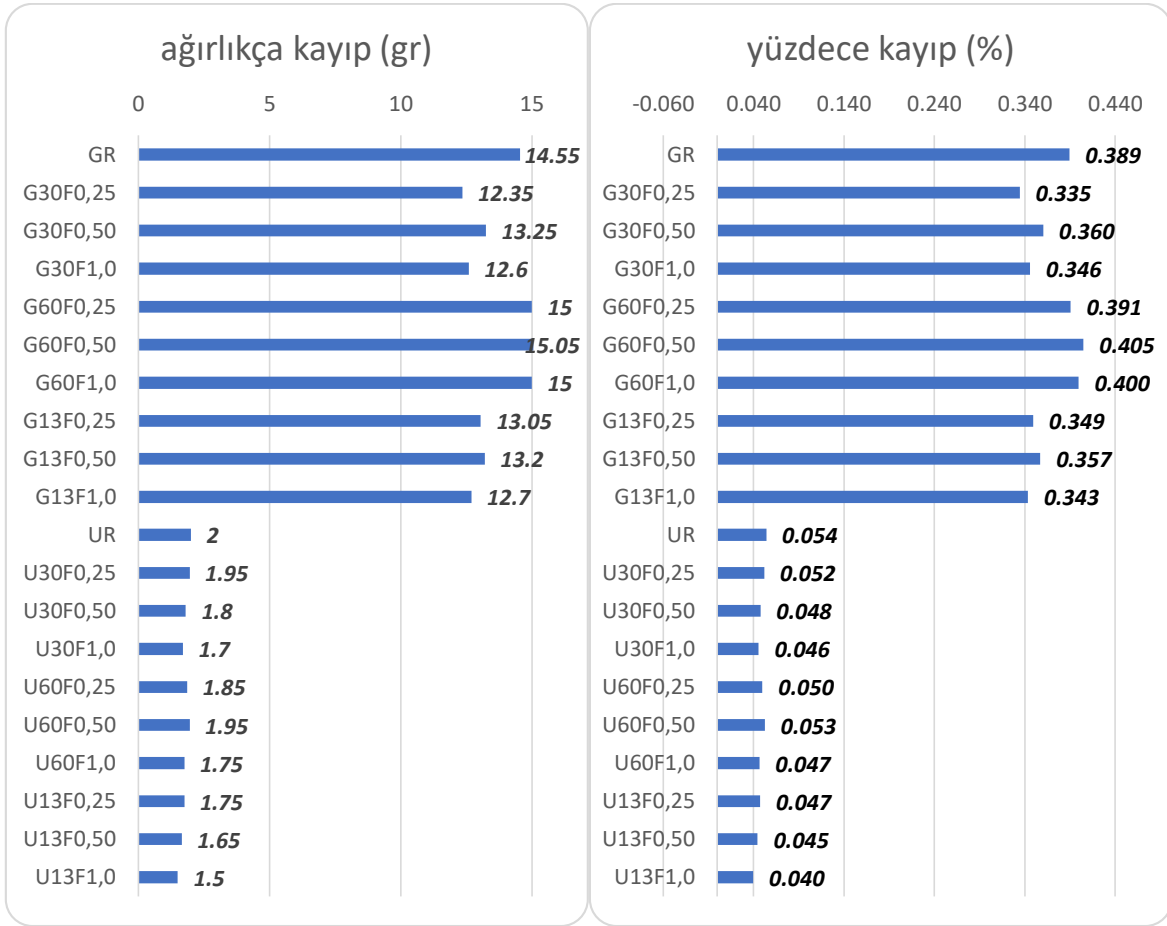
**Şekil 4.51:** % 1.0 oranlı 13 mm düz çelik lifli UYPLB, başlangıç ve her bir tur sonundaki numune ağırlıkları, % kayıpları.



**Şekil 4.52:** Geleneksel beton numunelerinin ortalama değerlerine göre, deney sonunda meydana gelen ağırlıkça ve yüzdece kayıplar.



**Şekil 4.53:** UYPLB numunelerinin ortalama değerlerine göre, deney sonunda meydana gelen ağırlıkça ve yüzdece kayıplar.



**Şekil 4.54:** Geleneksel beton ve UYPLB numunelerinin ortalama değerlerine göre, deney sonunda meydana gelen ağırlıkça ve yüzdece kayıpların tek grafik üzerinde gösterilmesi.

Aşınma deneylerinin sonuçları Şekil 4.32-4.54 arasında verilmiştir. Geleneksel beton ile üretilmiş karışımlarda aşınma deneyi 3 tur olarak yapılmış ve her tur sonunda numunenin ağırlığı tartılmıştır. Geleneksel betonlu karışımlarda en büyük kütle kaybı % 0.405 oranında ve 15.05 gr ile G60F0.50 kodlu % 0.5 lif oranına sahip 60 mm'lik çift kancalı makro lifli numunede gerçekleşmiştir. En az kütle kaybı ise % 0.335 oranında ve 2.35 gr ile G30F0.25 kodlu numunede gerçekleşmiştir. Lifin geleneksel betonda aşınmaya katkısı bir miktar olmakla birlikte önemli mertebelerde olmadığı görülmüştür.

UYPLB ile üretilmiş numunelerin aşınmadan dolayı kütle kayıpları çok az gerçekleşmiştir. O nedenle geleneksel betondan farklı olarak aşındırma testi 5 tur tekrar edilmiştir. 5 tur aşındırma sonucunda bile maksimum kütle kaybı 2 gr ve % 0.054 oranı ile UR kodlu liffsiz referans numunesinde ölçülmüştür. Bu değer geleneksel betonun minimum (3 turda elde edilen) değerinden bile yaklaşık 6.1 kat küçüktür. En az aşınma kaybı % 0.040 oranında



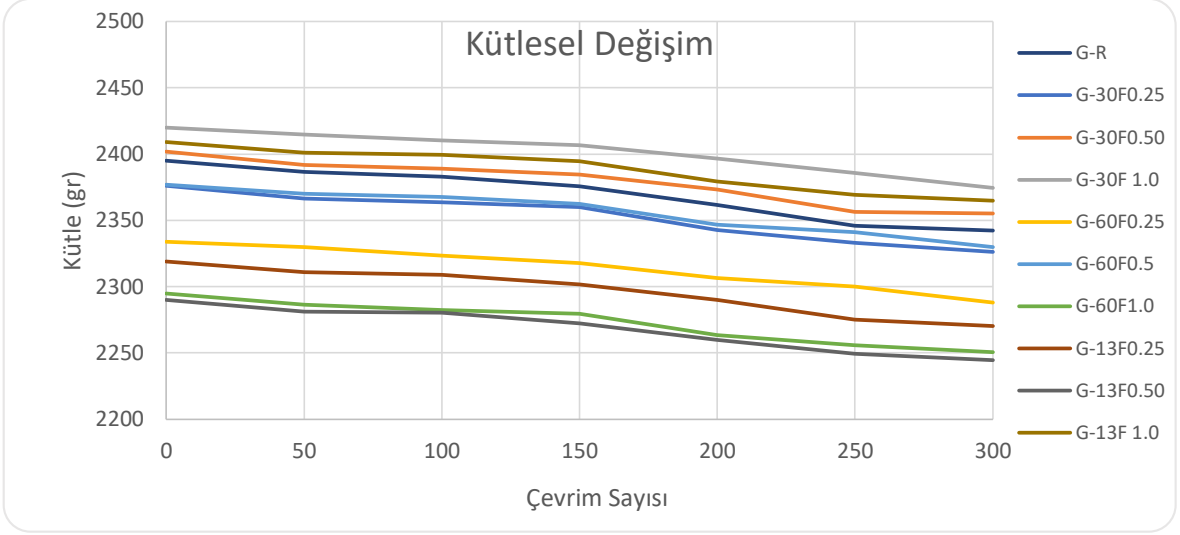
U13F1.0 kodlu % 1.0 lif oranına sahip 13 mm'lik mikro lifte elde edilmiştir. Bu değer maksimum değerden % 30 daha küçüktür. UYPLB'lu karışımlarda lif oranı arttıkça kütle kayıpları da azalmıştır. Beton yollar için çok önemli olan aşınma davranışı açısından düşünüldüğünde UYPLB'nun aşınma tabakası olarak kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

#### **4.5.5 Donma Çözünme Deneyleri**

Betonun dayanıklılığını azaltan önemli faktörlerden biri de donma-çözünme etkileridir. Donma çözülmenin betona etkileri daha çok kapiler boşluklardaki suyun donması ve bu esnada hacminin yaklaşık % 8 oranında artması sonucu oluşan hidrolik basınç nedeniyle olmaktadır (Richardson, 2002). Betonda kapiler boşluklar ne kadar az olursa donma çözünme nedeniyle meydana gelen etkiler de o denli düşük olmaktadır. Kapiler boşlukların büyüklüğü ise çimento hamurunun geçirimsizliğine, doygunluk derecesine, betonda boşlukların aralık faktörüne ve buz oluşum oranına bağlıdır.

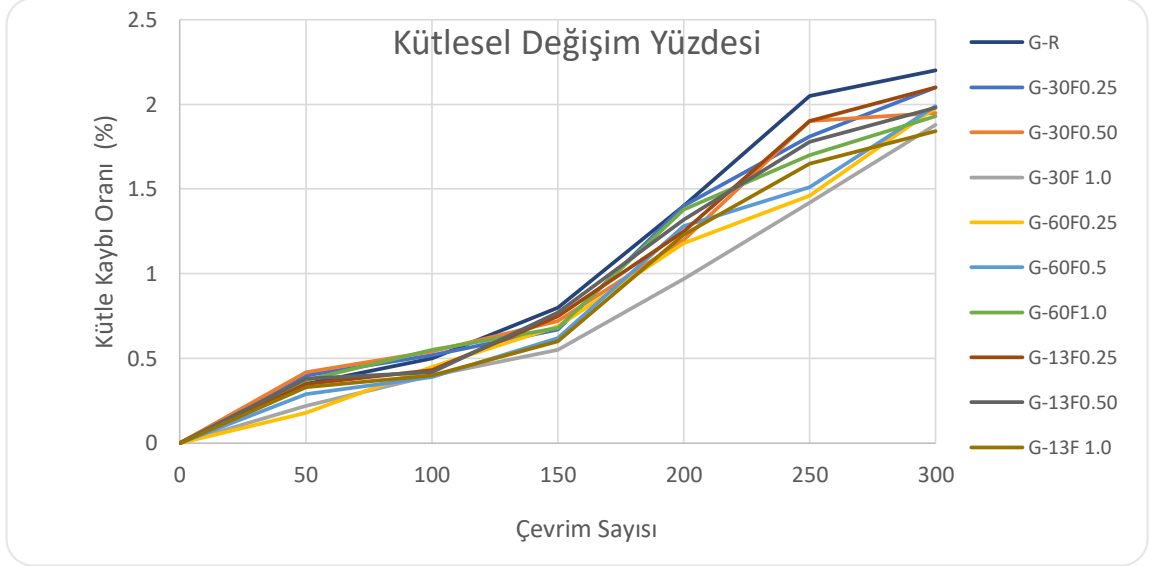
Donma-çözülme deneyi için 10x10x10 (cm) boyutunda küp numuneler üretilmiş ve 28 gün kürlenmiştir. Farklı oranlarda ve farklı geometriye sahip geleneksel ve UYPB numuneler üretilmiştir. Test numuneleri ASTM C666 standardının B prosedürüne göre hızlı donma-çözülme deneyi uygulanmıştır. Her bir numune grubundan 3 numune test edilip bu numunelerin ortalamaları değerlendirilmiştir. Donma çözülme testleri Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır. Üretilen test numuneleri donma-çözülme kabineye yerleştirildikten sonra  $-18\pm 2$  °C'de havada dondurulmuş ve  $5\pm 2$  °C'de suda çözdürülecek şekilde toplamda 300 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır. Numuneler 50 çevrimde bir tartılarak ağırlık değişimleri tespit edilmiştir.

Donma-Çözülme deneyleri sonucunda geleneksel ve UYPB numunelerde meydana gelen kütle değişimleri Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'de, kütleli değişimin yüzdesi ise Şekil 4.57 ve Şekil 4.58'de gösterilmektedir.

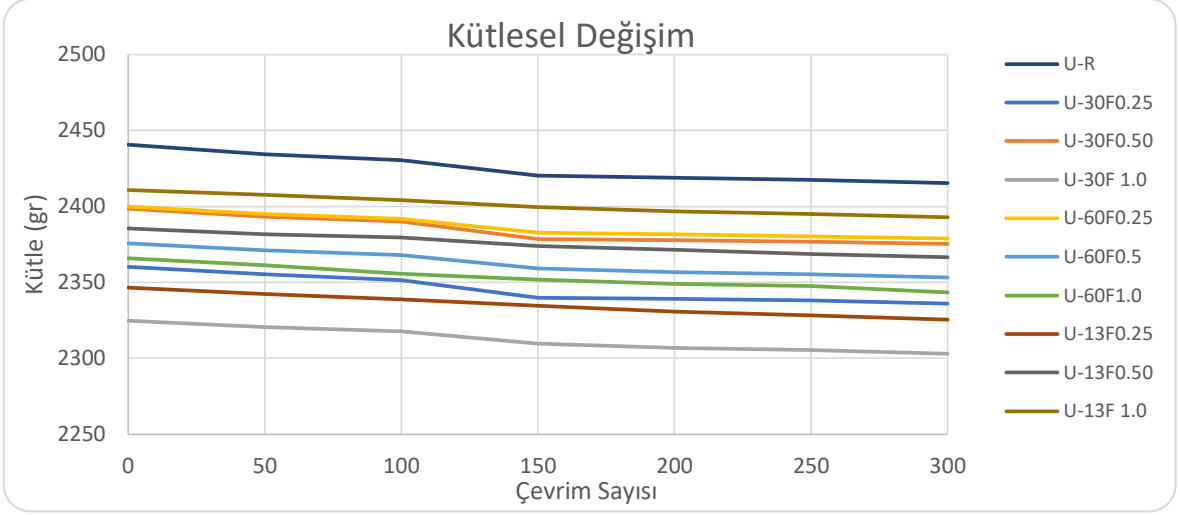


**Şekil 4.55:** Donma çözülme deneyleri sonucunda geleneksel beton karışımlarında meydana gelen kütleli değişim.

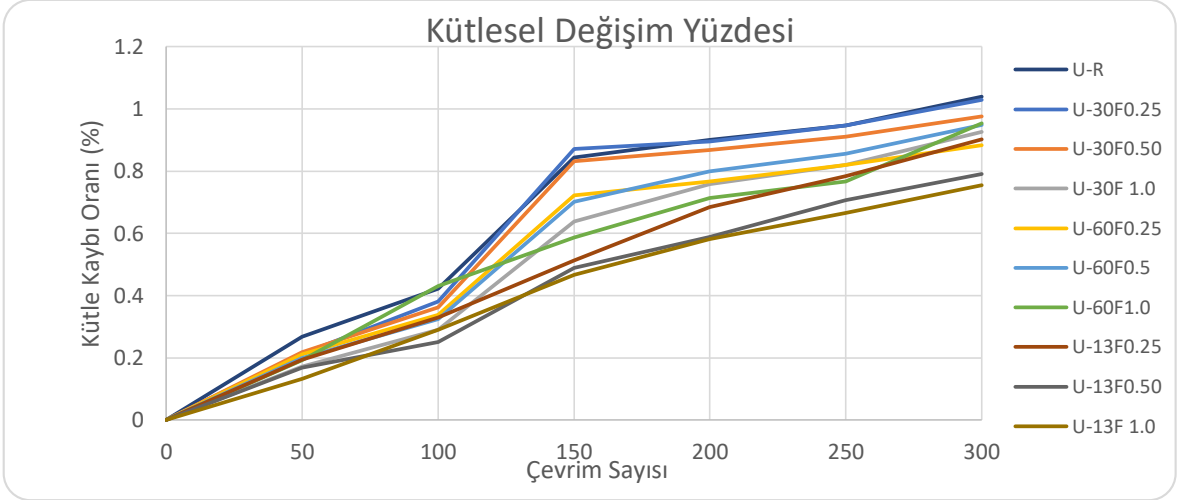
Geleneksel lifli betonun donma çözülme davranışı incelendiğinde ise lifin donma çözülmeye olumlu bir katkısı olduğu Şekil 4.55’den görülebilir. 300. çevrimde lifsiz referans geleneksel betonda donma çözülme kütle azalım oranı lifli numunelere göre yaklaşık 1.5 kat daha fazladır (Şekil 4.56).



**Şekil 4.56:** Donma çözülme deneyleri sonucunda geleneksel beton karışımlarında meydana gelen kütleli değişim yüzdesi.



**Şekil 4.57:** Donma çözünme deneyleri sonucunda UYPLB'lerde meydana gelen kütleli değişim.

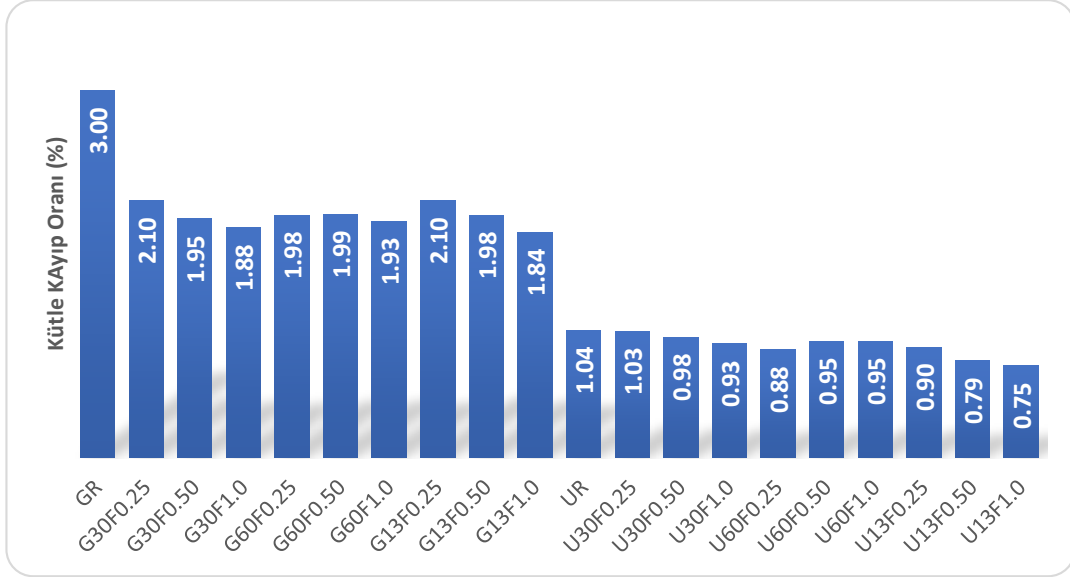


**Şekil 4.58:** Donma çözünme deneyleri sonucunda UYPLB'lerde meydana gelen kütleli değişim yüzdesi.

UYPLB'da en yüksek çevrim sayısı olan 300 çevrimde bile kütle azalım oranında bir değişim gözlenmemiştir. Lifin donma çözülmeye katkısı sınırlı kalmıştır. Bunu en önemli sebebi UYPLB'nun çok sıkı bir içyapıya sahip olmasıdır. Suyun numuneler içine işlemesi çok sınırlı kalmıştır. Şekil 4.57'den de görülebileceği gibi kütle değişim yüzdesi 150 çevrimde daha fazla artmasına rağmen ilerleyen çevrimlerde azalım neredeyse lineer kalmıştır.

Tüm test numunelerinin 300. çevrimdeki kütle değişim oranları Şekil 4.58'da verilmiştir. UYPLB ile geleneksel betonlar arasındaki kütle değişim oranı yaklaşık 2 kattır. UYPLB'da en az kütle azalımı % 0.75 ile U13F1.0 numunesinde olduğu görülmektedir. Bu liflerin

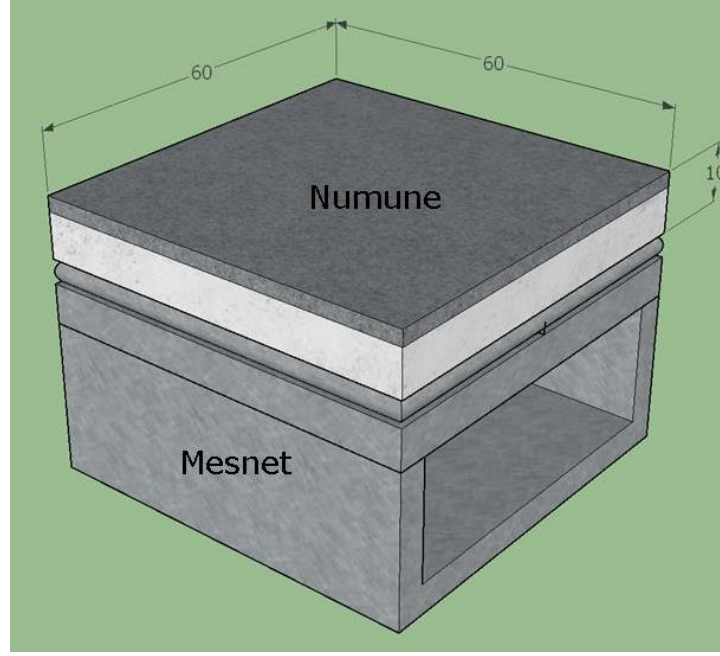
numunenin dağılıp kütle kaybının oluşumunu engellemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüm UYPLB numuneleri incelendiğinde ise ağırlık değişiminin çok sınırlı kaldığı görülmektedir. Geleneksel betonda ise en büyük kütle kaybı lifsiz referans (G-R) numunede olduğu görülmektedir. Lif tipinin kütle kaybına etkisi gözükmemektedir. Lif oranının kendi içindeki değişimi ile kütle kaybı çok sınırlı azalmıştır. UYPLB’de olduğu gibi en az kütle değişimi G13F1.0 numunesinde gözlemiştir.



**Şekil 4.59:** 300 çevrim sonucunda deney numunelerinde meydana gelen kütleli değişim yüzdesi.

#### 4.5.6 Katmanlı Beton Plak Deneyleri

Çelik tel donatılı betonun yapısal davranışını belirlemek amacıyla Fransa’da yer alan bir tünel inşaatında SNCF ve Alpes Essais Laboratuvarı tarafından bir test yöntemi geliştirilmiştir (Rivaz, 2012). EFNARC tarafından da önerilerinde yayınlanan ve Avrupa püskürtme beton standardı EN 14487’ye dahil edilen bu plak testinde plak, orta noktasından yüklenerek bu yük karşısında meydana gelen sehim değerleri gözlemlenir. Gözlemlenen sehim değeri en az 25 mm’lik bir değere ulaşıncaya kadar teste devam edilir.



**Şekil 4.60:** Mesnet üzerine oturtulmuş katmanlı beton.

Şekil 4.60’de görüldüğü üzere 60x60x10 cm boyutlu deney numuneleri üretilmiştir. Plak numuneler iki katmanlı olarak üretilmiştir. Plağın alt bölgesinde 7.5 cm kalınlığında geleneksel beton, üst bölgesinde ise 2.5 cm kalınlığında UYPLB mevcuttur. Önce geleneksel beton dökümleri yapılmıştır. Geleneksel betonun dökümünden 24 saat sonra UYPLB’li katmanın dökümü gerçekleştirilmiştir. Her iki katmanda da kullanılan lif tipleri ve oranları aynıdır. Katmanlı plak numuneler özel bir kür işlemine tabii tutulmamışlardır. Laboratuvarın dışında kürlenmeleri sağlanmıştır. Her bir lif tipi ve oranı için 2’şer adet plak üretilmiştir.

Katmanlı test numuneleri yükleme düzeneğine dört kenarından serbestçe oturtulmuş ve deformasyon kontrollü teste tabii tutulmuştur. Plak testlerinden numunelerin altına, merkeze yerleştirilen bir potansiyometrik cetvel ile sehim ölçülürken, hidrolik yük veren ucundaki 50 ton kapasiteli yük hücresi ile yükler belirlenmiştir. 8 kanallı bir veri toplama sistemi ile yük ve orta nokta sehimi eş zamanlı olarak kaydedilip her numune için yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Yükleme deformasyon kontrollü yapılmıştır. Yükleme hızı 1 mm/dk’dır. Plak ortasındaki sehim değeri 25 mm değerine ulaştığında deney sonlandırılmıştır. Hidrolik yük veren ile plak arasına 10x10x5 cm boyutlarında bir çelik plaka yerleştirilerek lokal ezilmelerin önüne geçilmiş, yükün 10x10 cm’lik bir alana yayılması sağlanmıştır. Şekil 4.61’de plaka eğilme testlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği gösterilmektedir.



**Şekil 4.61:** Plaka eğilme testlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği.

Deneyle Prof. Dr. Şerif SAYLAN Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda yer alan kiriş eğilme cihazında yürütülmüş olup plakaların deney düzeneğine yerleştirilmesi için laboratuvarında yer alan 20 ton kapasiteli vinçten yararlanılmıştır. Ayrıca plakaları mesnetlere yerleştirebilmek için özel raylı bir platform oluşturulmuştur (Şekil 4.62).



**Şekil 4.62:** Numunenin test düzeneğine yerleştirilmesi.

Lifsiz ve farklı lif tipi ve oranlarına sahip katmanlı beton numuneleri üzerinde gerçekleştirilen plaka eğilme deneylerine ait ve oluşan kırılma Őekillerine için örnek fotoğraflar Şekil 4.63 - 4.65’de verilmiştir.



Şekil 4.63: Plak eğilme testi örnekleri.



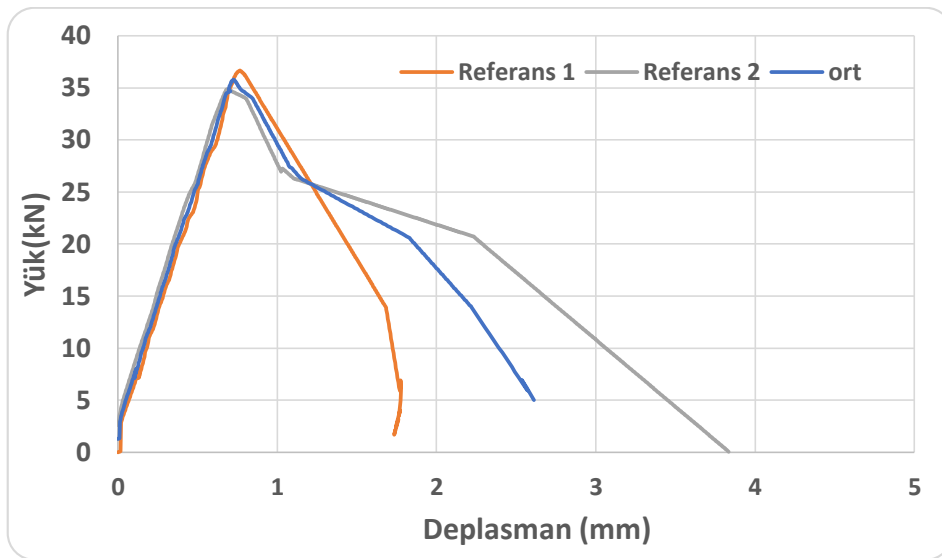
Şekil 4.64: Plak eğilme testi rnekleri.



**Şekil 4.65:** Plak eğilme testi örnekleri.

Her bir numune grubu için (lif oranı ve lif tipi için) üretilen ikiz plakların testleri yapılmış ve yük sehim eğrileri elde edilmiştir. Bu grafiklerin ortalamaları alınarak her bir lif tipi ve oranı için karşılaştırılmaları yapılmıştır. Ortalama yük-sehim eğrilerinden ilk çatlak yükü, deplasmanı ile maksimum yük ve maksimum yükün olduğu deplasmanlar elde edilerek Tablo 4.11’de verilmiştir. Ayrıca yine ortalama yük sehim eğrilerinin altında kalan alanlar 5, 10, 15, 20 ve 25 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ve plak tarafından yutulan enerji seviyeleri Tablo 4.13’de sunulmuştur.

Plak deneyleri sonucunda elde edilen Yük-Deplasman eğrileri ise Şekil 4.66~4.84’de sunulmaktadır.

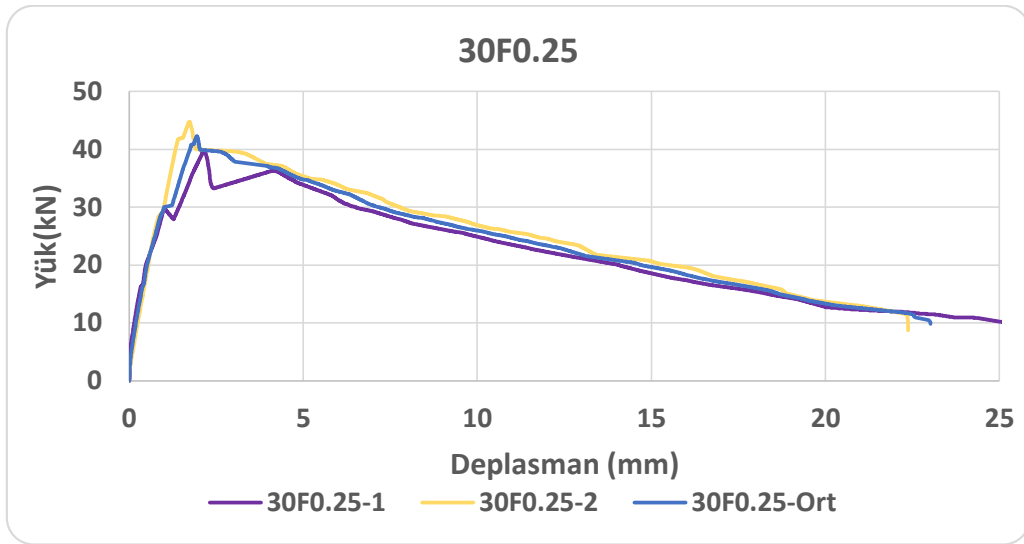


**Şekil 4.66:** Çelik lifsiz katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

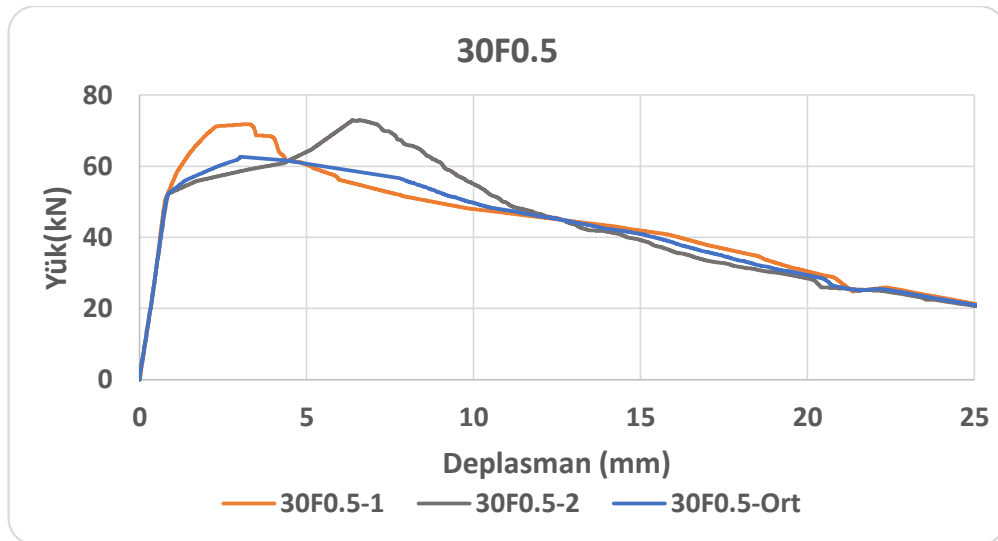


Lifsiz katmanlı numunelerin yük sehim grafiği incelendiğinde kırılmanın gevrek olduğu görülmektedir. Deney sonunda numune 4 parçaya ayrılmıştır (Şekil 4.64). Her iki numunede de kırılma 35 kN civarında ve yaklaşık 0.8 mm sehimde oluşmuştur (Şekil 4.66).

Çift kancalı 30 mm boya sahip ZP305 liflerin kullanıldığı plaklardan % 0.25 lif oranına sahip numunelere ait yük sehim grafikleri Şekil 4.67’de verilmiştir. Maksimum yük taşıma kapasiteleri her iki numune içinde yaklaşık 1.75 mm civarında oluşmuş ve grafikler uyumlu çıkmıştır. Her iki numunede sünek bir davranışa sahiptir. Ancak lif sıyrılması nedeniyle maksimum yükten sonra ani yük düşmeleri gözlenmiştir.

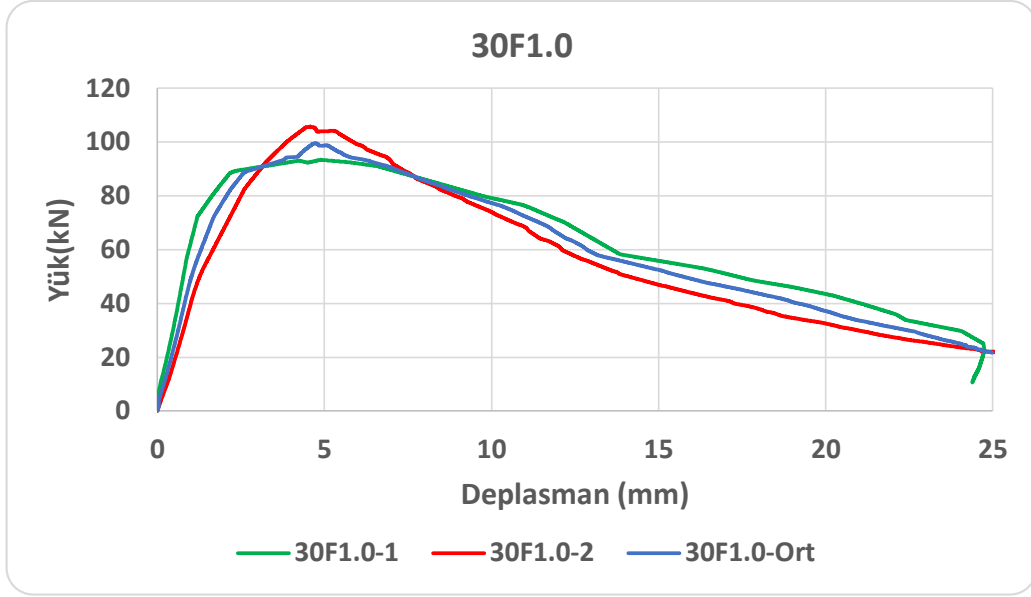


Şekil 4.67: 30 mm uzunluk % 0.25 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



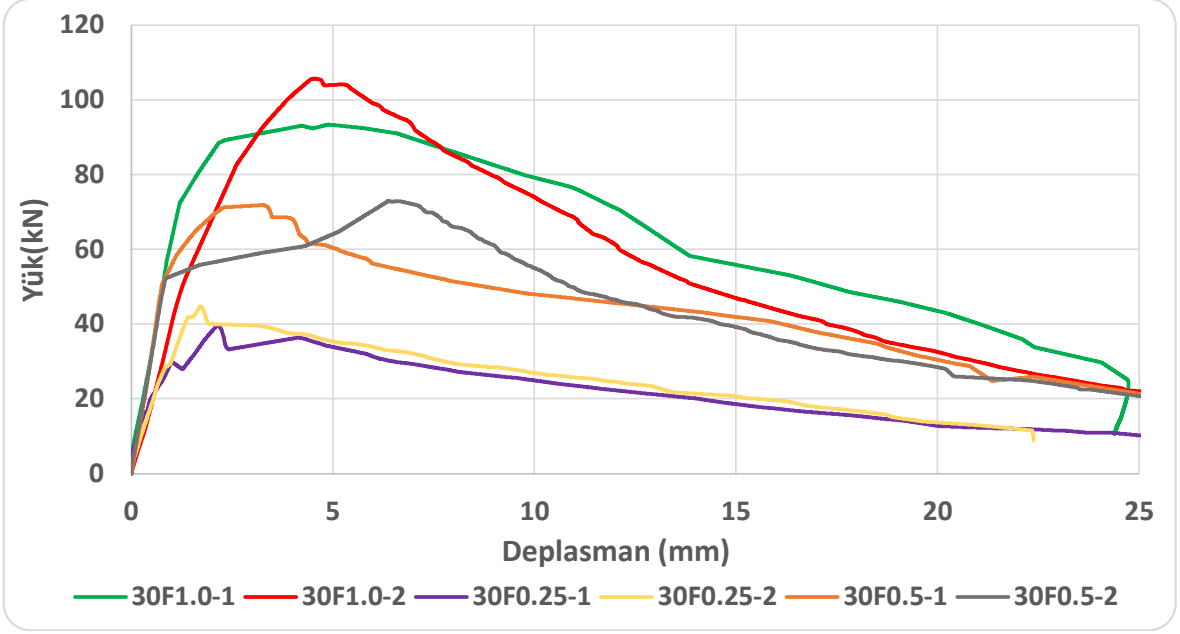
Şekil 4.68: 30 mm uzunluk % 0.50 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

30F1.0 kodlu % 1.0 çift kancalı lifli numenlere ait yük sehım grafikleri Şekil 4.69'da verilmiştir. Liflerin plak içindeki dağılımlarının düzgün olması nedeni ile her iki numuneye ait maksimum yükler yaklaşık 5 mm sehımdede oluşmuştur. Ancak maksimum yükler arasında 30kN civarında bir fark vardır.



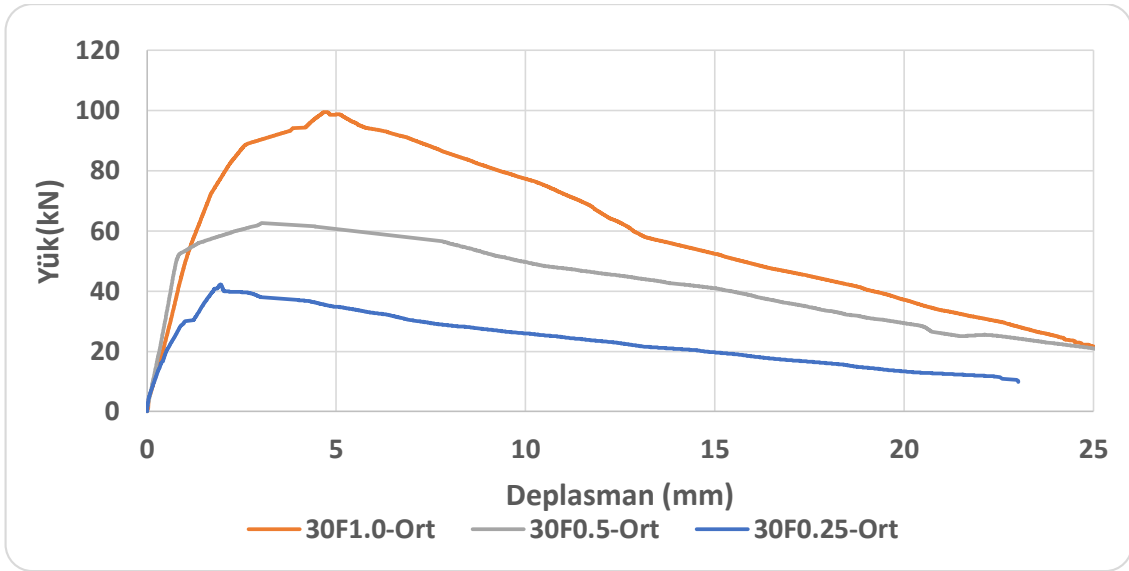
Şekil 4.69: 30 mm uzunluk % 1.00 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

30 mm makro lifli numunelerin tamamına ait yük sehım grafikleri Şekil 4.70'de verilmiştir. 30F0.5 ve 30F1.0 kodlu numunelerin maksimum sehımdede taşıdıkları yük 30F0.25 numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesinden daha yüksektir. Her üç farklı koda ait altı numunede oldukça sünek bir eğilme davranışına sahiptir.



**Şekil 4.70:** 30 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

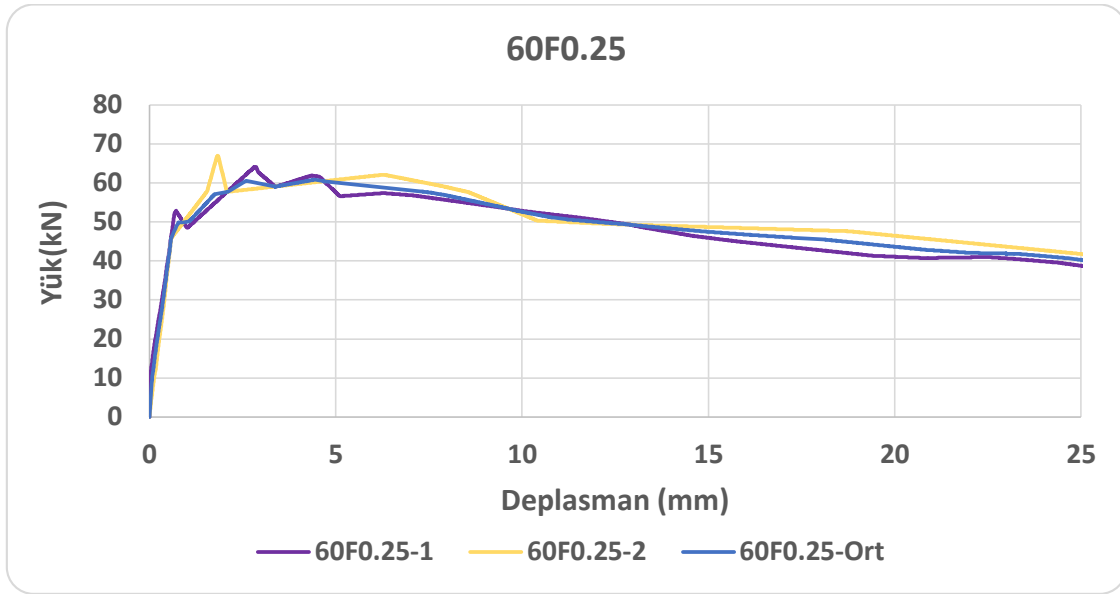
Çift kancalı 30 mm'lik makro lifli plakların ortalama yük sehim grafikleri Şekil 4.71'de verilmiştir. Üç ortalama grafiğinde de şekil değiştirme yumuşaması izlenebilmektedir. Farklı oranda liflere sahip plakların maksimum yükleri de farklı deplasmanlarda oluşmuştur.



**Şekil 4.71:** 30 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).

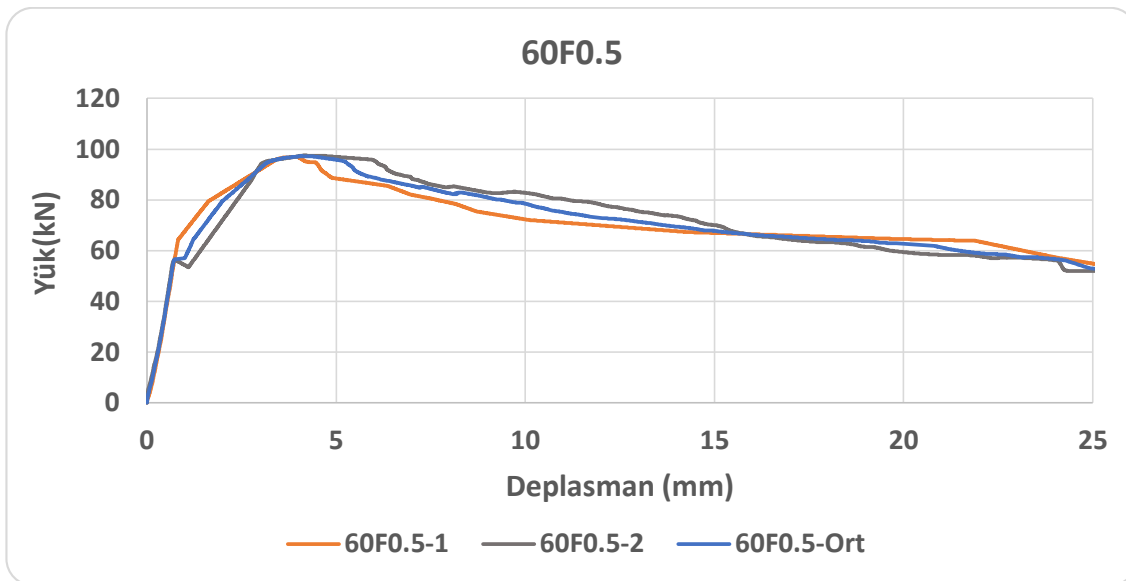
Çift kancalı 60 mm'lik % 0.25 makro lifli plakların davranışı Şekil 4.72'de verilmiştir. Lif oranı çok düşük olmasına rağmen her iki plağında maksimum yük taşıma kapasitesi yaklaşık 60 kN civarındadır ve maksimum sehimdeki yük taşıma kapasitesi maksimum yükün % 65'i

civarındadır. Deneye devam edildiğinde hala yük taşımaya devam etmektedir. Davranış oldukça sünektir.

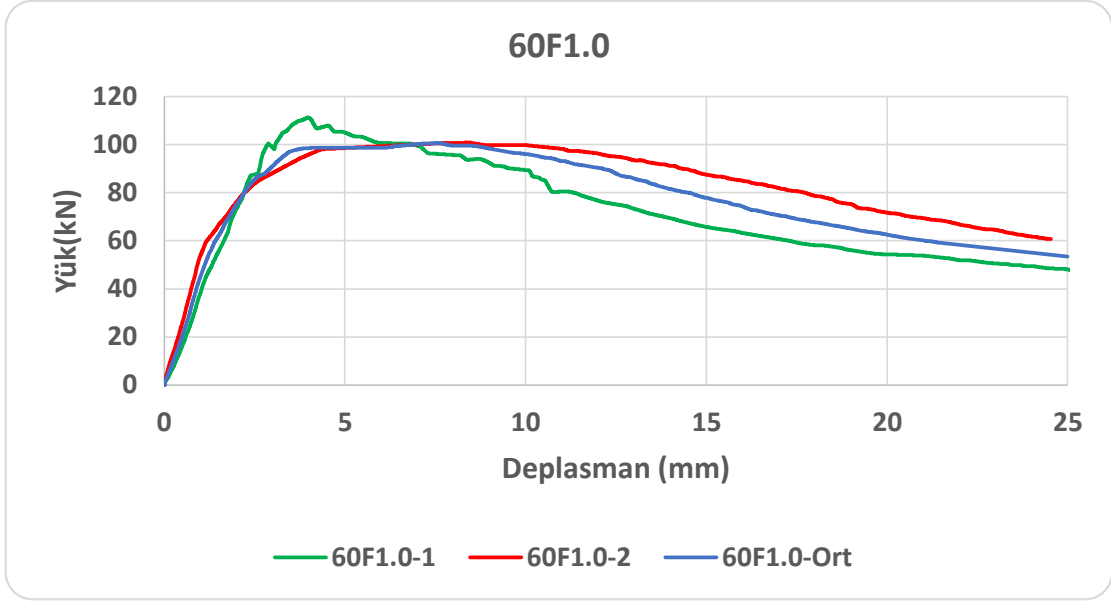


Şekil 4.72: 60 mm uzunluk % 0.25 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

Lif oranı arttıkça yük taşıma kapasiteleri de artmaktadır. 60F0.5 kodlu numunelerinde yük sehim eğrileri Şekil 4.73’de verilmektedir. 25 mm sehimde plakların üzerindeki yük taşıma kapasitelerinin % 60’ı civarındadır.

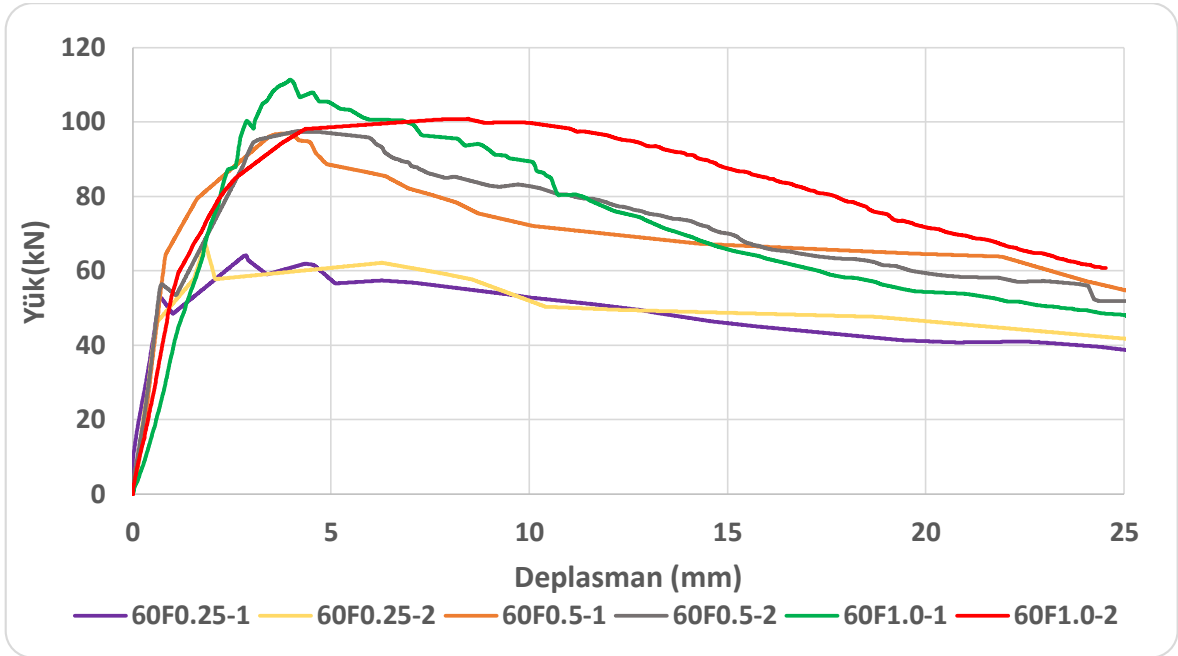


Şekil 4.73: 60 mm uzunluk % 0.50 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

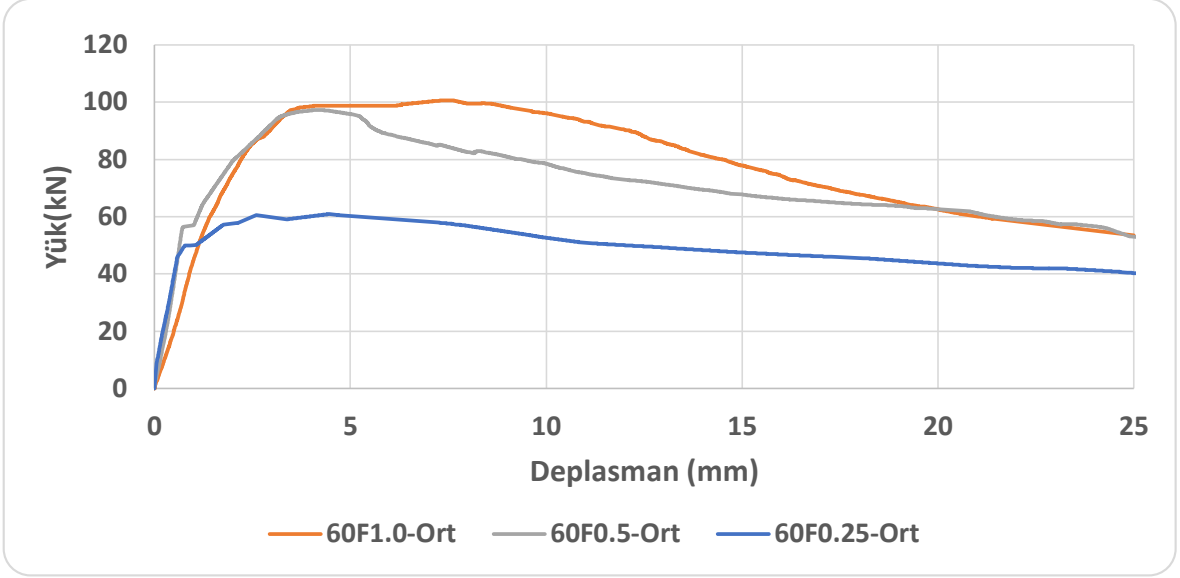


**Şekil 4.74:** 60 mm uzunluk %1.00 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

60F1.0 kodlu numunelerin yük sehim davranışları Şekil 4.74’de verilmiştir. Bu numunelerin maksimum yük taşıma kapasitelerine farklı deplasmanlarda ulaşılmıştır. 60 mm’lik makro lifli beton karışımlarında lif oranı arttıkça liflerde topaklanma gözlemlenmiştir.

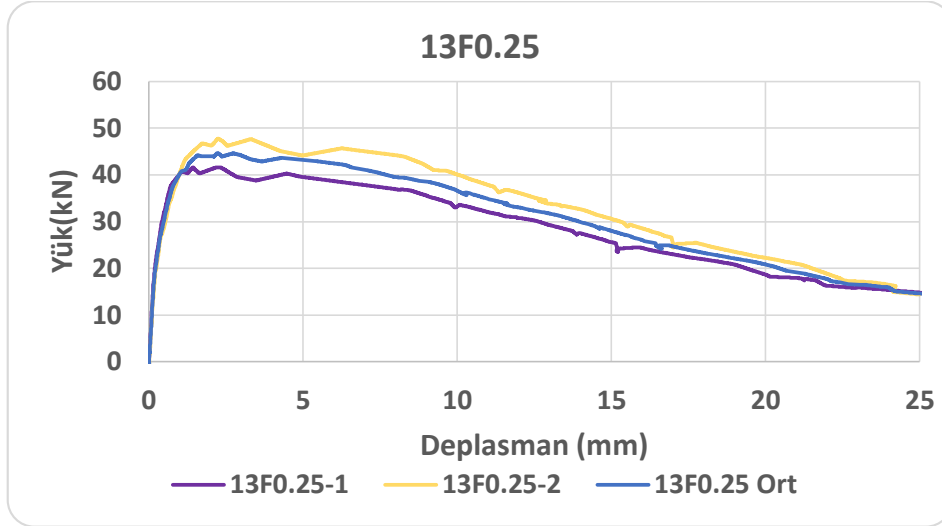


**Şekil 4.75:** 60 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



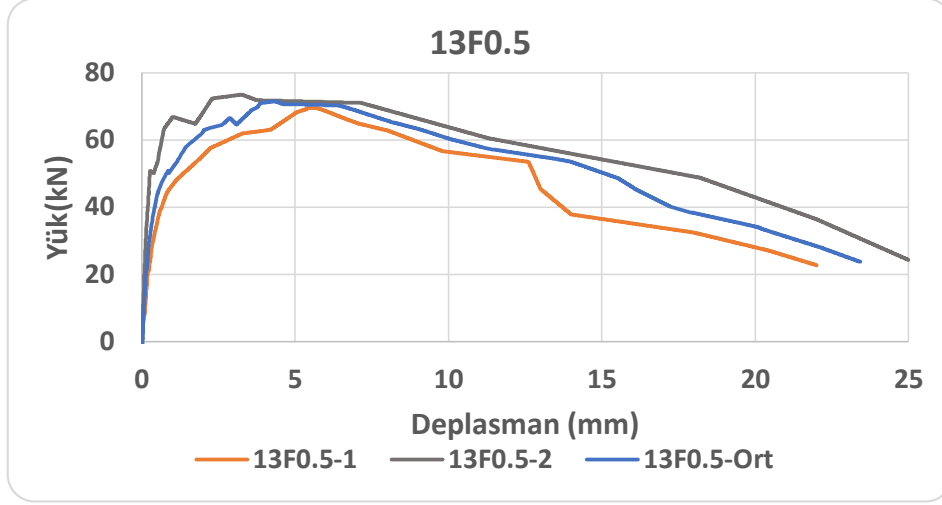
**Şekil 4.76:** 60 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).

Mikro lifli numunelerde % 0.25 lif oranına sahip numuneler ait yük sehim grafikleri Şekil 4.77’de verilmiştir. Lifsiz numunelere göre çok küçük bir lif oranı için bile oldukça sünek bir davranış elde edilmiştir. Maksimum sehim olan 25 mm’de bile maksimum yükün yaklaşık % 30’u civarında yük taşımaya devam etmektedir. Alt bölümdeki beton çatlamış, çatlak üst tabakaya ulaşmamıştır.



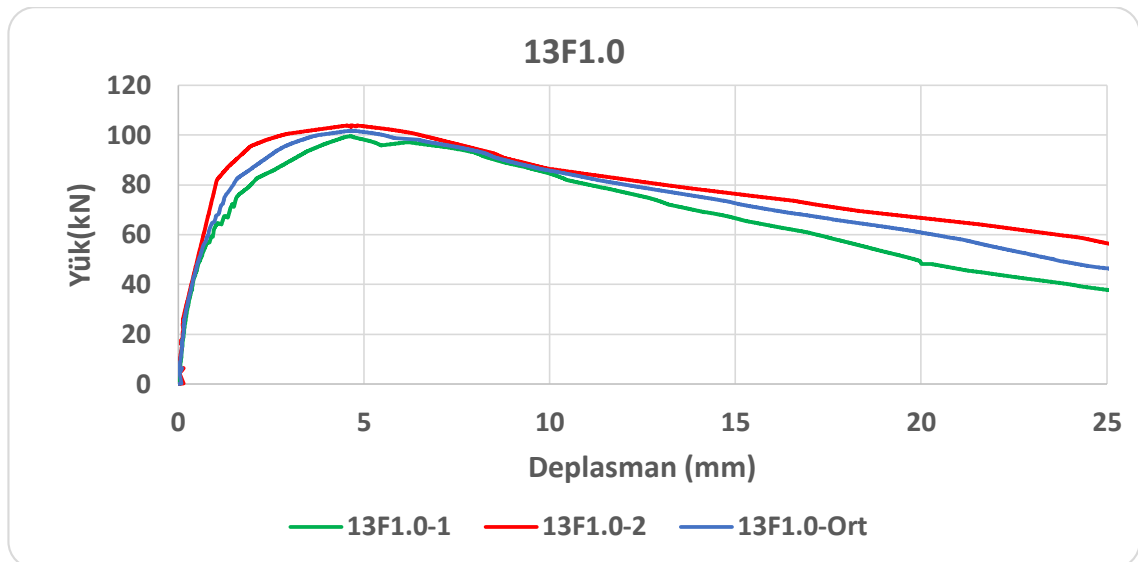
**Şekil 4.77:** 13 mm uzunluk % 0.25 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

13F0.5 kodlu % 0.50 lif oranına sahip mikro lifli numunelere ait yük sehim grafikleri Şekil 4.78'de verilmiştir. Lif oranının artması ile maksimum yük taşıma kapasitesinde artma gözlenmiştir. Numunelerden birinde maksimum sehime ulaşmadan deney sonlandırılmıştır.



Şekil 4.78: 13 mm uzunluk % 0.50 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

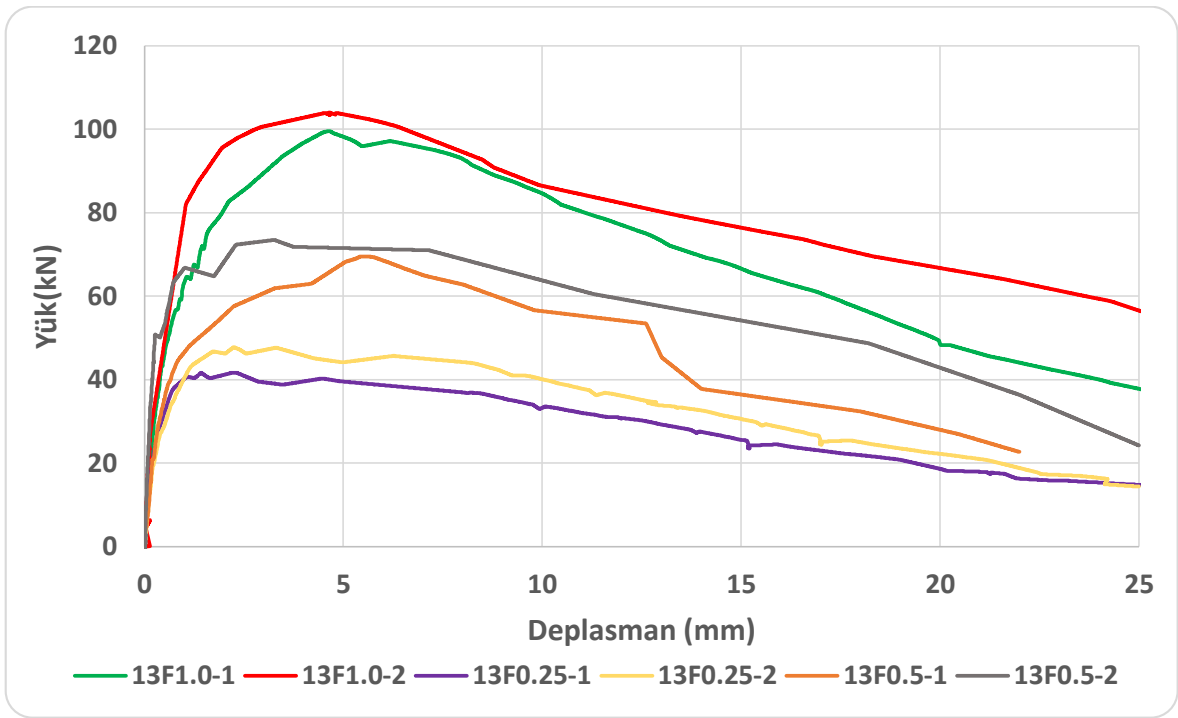
13F1.0 kodlu % 1.0 lif oranına sahip 13 mm'lik mikro lifli plakların yük sehim eğrileri Şekil 4.79'da verilmiştir. Lif oranının artması ile yük taşıma kapasitesi 100 kN civarına yükselmiştir. Her iki plak birbirine çok benzer bir davranış göstermiştir. Maksimum sehime seviyesinde plakların taşımaya devam ettiği yük 13F0.25 kodlu numunenin maksimum yük taşıma kapasitesinden daha fazladır.



Şekil 4.79: 13 mm uzunluk % 1.00 çelik lif oranına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.

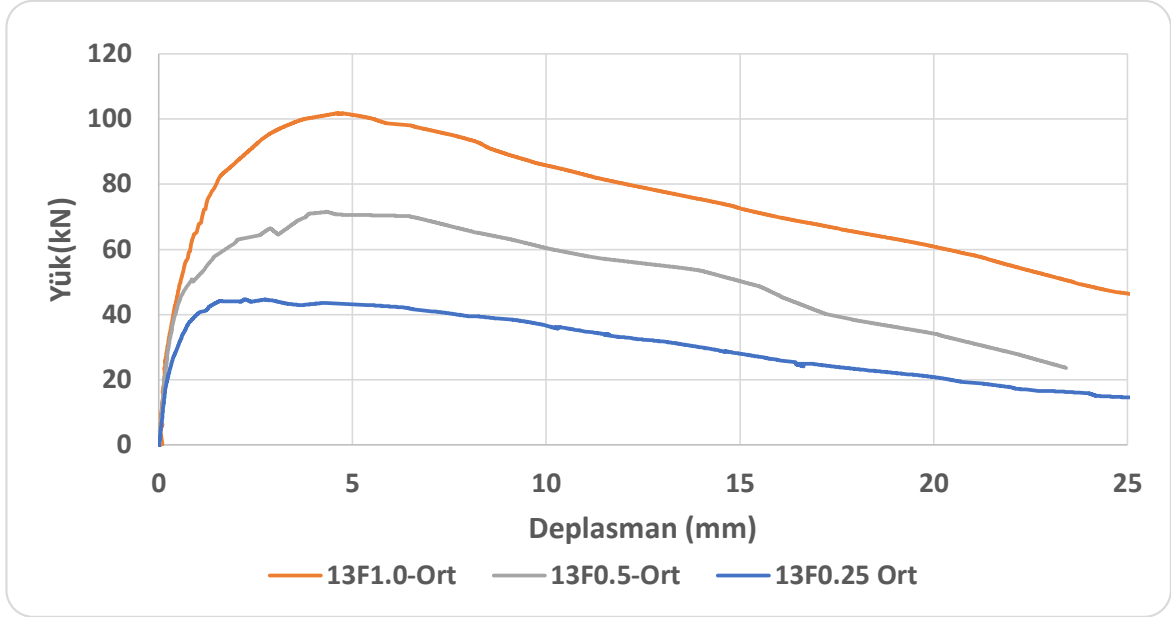
Mikro lifli numunelerin tamamına ait yük sehim grafikleri Şekil 4.80’de verilmiştir. 13F0.5 ve 13F1.0 kodlu numunelerin maksimum sehimde taşıdıkları yük 13F0.25 numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesinden daha yüksektir. Her üç farklı koda ait altı numunede oldukça sünek bir eğilme davranışına sahiptir.

Mikro lifli plakların ortalama yük sehim grafikleri Şekil 4.81’de verilmiştir. Üç ortalama grafiğinde de şekil değiştirme pekleşmesi izlenebilmektedir. Mikro liflerin sayısının çok fazla olması ve karışım içinde düzgün dağılması nedeniyle yük sehim grafiklerinde lif sıyrılması kaynaklı ani yük düşmeleri gözlenmemiştir.



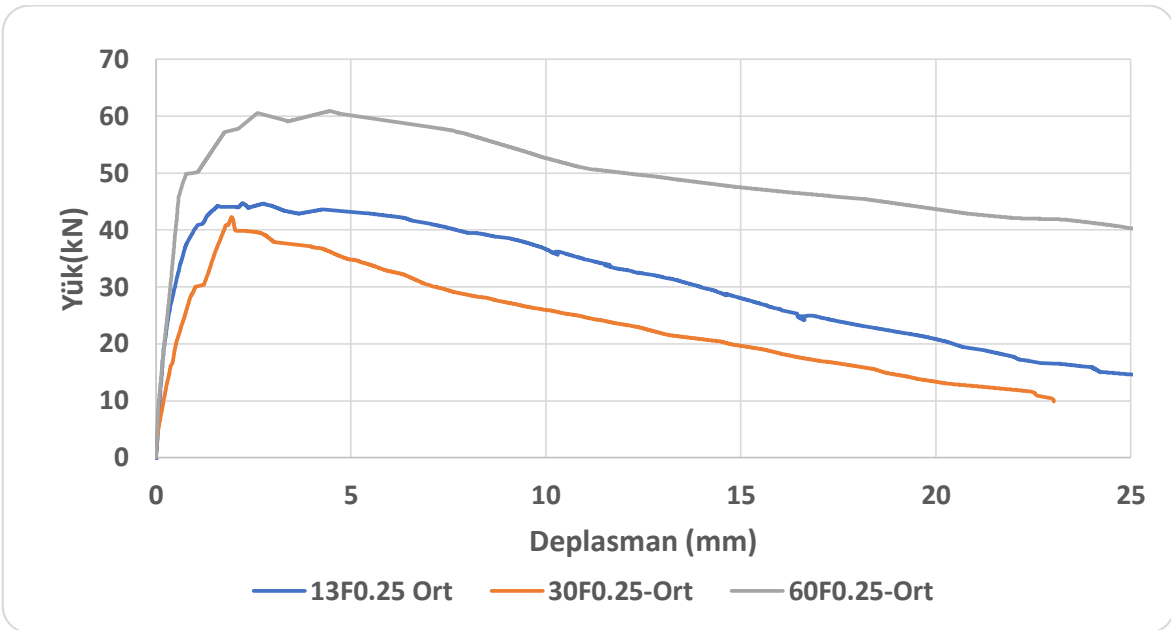
**Şekil 4.80:** 13 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği.



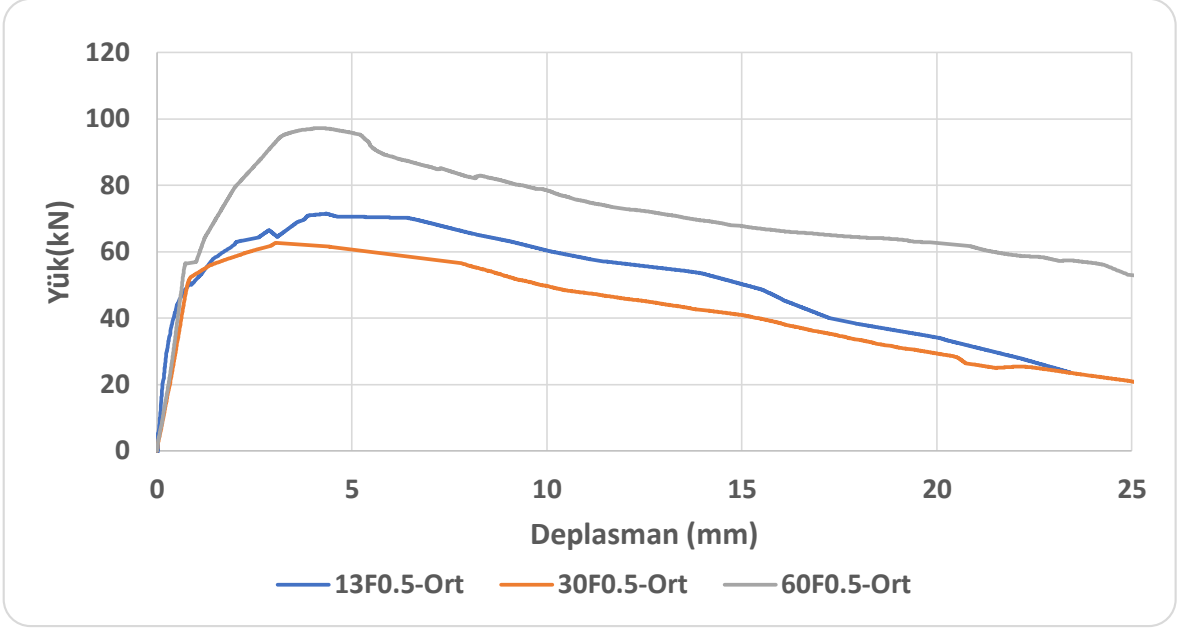


**Şekil 4.81:** 13 mm uzunluk ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).

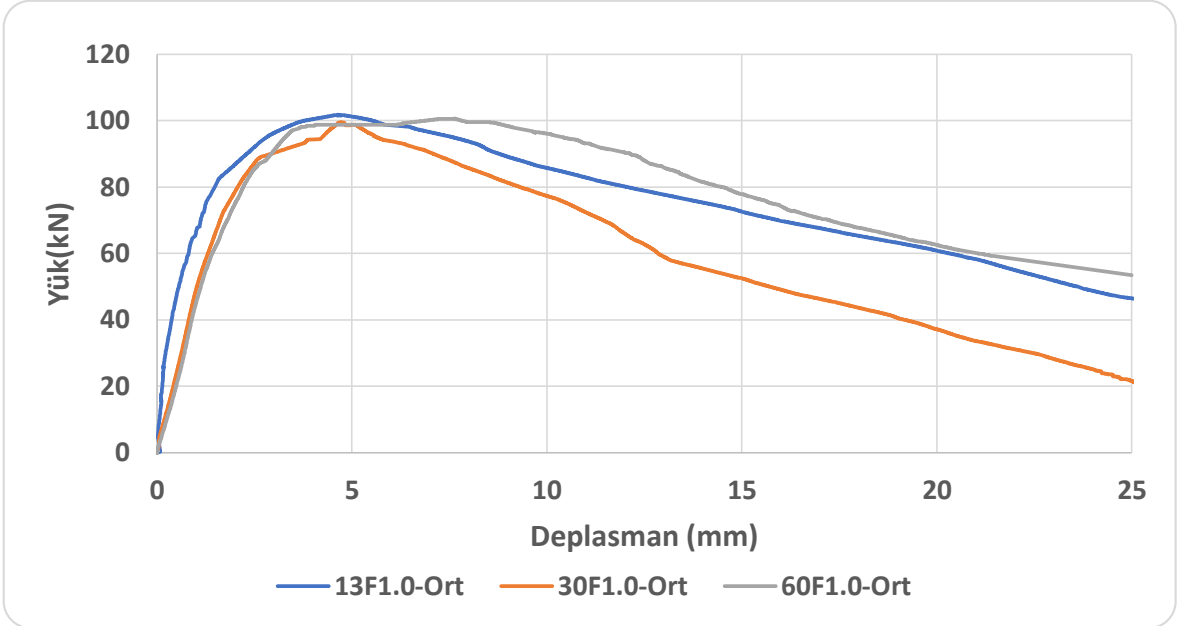
Farklı lif tipi ve % 0.25 ve % 0.5 lif içeriğine sahip katmanlı plakların davranışı incelendiğinde 60 mm'lik çift kancalı lifin davranışa katkısı Şekil 4.82 ve 4.83'den çok net görülebilmektedir. Hem tepe yükü hem de tokluk açısından en iyi yük deplasman davranışı 60 mm'lik çift kancalı lifte görülmektedir. Ancak Şekil 4.84'den de görülebileceği gibi % 1.0 lif oranında her üç lifinde davranışı çok benzerdir. Tokluk açısından 30 mm'lik lifin katkısının kabul edilebilir mertebede az olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.82:** Farklı lif uzunluklarına ve % 0.25 çelik lif oranı sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).



**Şekil 4.83:** Farklı lif uzunluklarına ve % 0.50 çelik lif oranı sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).



**Şekil 4.84:** Farklı lif uzunluklarına ve % 1.00 çelik lif oranı sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen Yük-Deplasman grafiği (ortalama değerler).

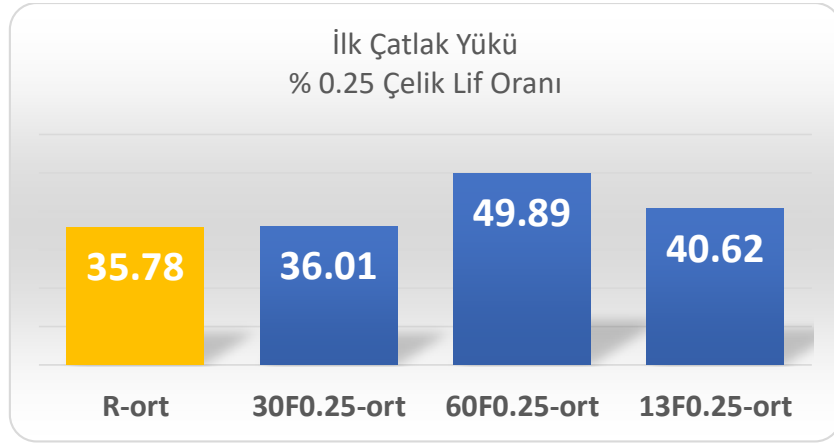
Eğilme deneylerinde ilk çatlak yükü, ilk çatlak yüküne karşılık gelen deplasman, maksimum yük ve maksimum yüke karşılık gelen deplasmanlar özet olarak Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de, deney sonuçları ise ayrıntılı karşılaştırmalı olarak Şekil 4.85~Şekil 4.96'de sunulmaktadır.

**Tablo 4.10:** Plak Eğilme deneylerinde ilk çatlak yükü, deplasmanı, maksimum yük ve maksimum yüke karşılık gelen deplasmanlar.

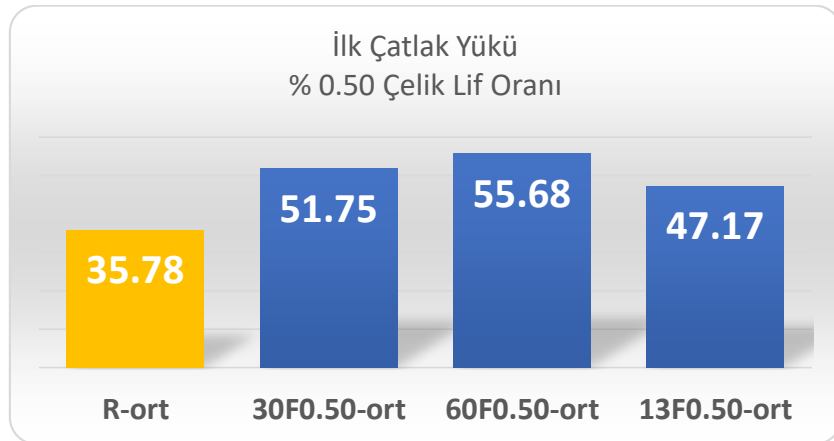
Numune Kodu	İlk Çatlak Yükü (kN)	İlk Çatlak Deplasmanı (mm)	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yükün Deplasmanı (mm)
R-1	36.73	0.77	36.73	0.77
R-2	34.9	0.68	34.9	0.68
R-ort	35.78	0.73	35.78	0.73
30F0.25-1	29.62	1.04	39.81	2.16
30F0.25-2	28.85	0.82	44.75	1.72
30F0.25-ort	29.98	1.01	42.27	1.94
30F0.50-1	50	0.75	71.85	3.28
30F0.50-2	51.31	0.87	72.97	6.36
30F0.50-ort	51.75	0.83	62.64	3.03
30F1.0-1	72.97	1.24	93.52	4.83
30F1.0-2	82.4	2.6	105.74	4.5
30F1.0-ort	87.94	2.55	99.51	4.73
60F0.25-1	52.64	0.72	64.15	2.82
60F0.25-2	45.06	0.59	67.03	1.84
60F0.25-ort	49.89	0.77	60.92	4.46
60F0.50-1	63.51	0.83	97.18	4.01
60F0.50-2	56.05	0.78	97.59	4.18
60F0.50-ort	55.68	0.71	97.23	4.09
60F1.0-1	87.23	2.41	111.4	3.97
60F1.0-2	60.48	1.21	100.85	8.46
60F1.0-ort	87.27	2.65	100.62	7.67
13F0.25-1	37.53	0.7	41.66	1.43
13F0.25-2	42.49	1.12	47.81	2.24
13F0.25-ort	40.62	1.04	44.72	2.22
13F0.50-1	43.84	0.8	69.55	5.44
13F0.50-2	50.4	0.35	73.46	3.25
13F0.50-ort	47.17	0.65	71.48	4.35
13F1.0-1	64.58	1.07	99.56	4.65
13F1.0-2	81.57	1.03	104.04	4.63
13F1.0-ort	82.45	1.59	101.79	4.64

**Tablo 4.11:** Plak Eğilme deneylerinde ilk çatlak yükü, deplasmanı, maksimum yük ve maksimum yüke karşılık gelen deplasmanlar (ortalama değerler).

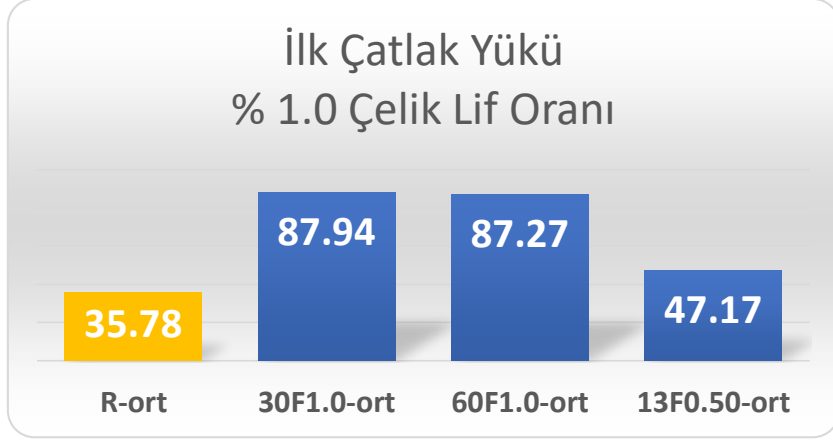
Numune Kodu	İlk Çatlak Yükü (kN)	İlk Çatlak Deplasmanı (mm)	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yükün Deplasmanı (mm)	Maksimum Yükteki Artış
R-ort	35.78	0.73	35.78	0.73	100
30F0.25-ort	36.01	1.01	42.27	1.94	118.14
30F0.50-ort	51.75	0.83	62.64	3.03	175.07
30F1.0-ort	87.94	2.55	99.51	4.73	278.12
60F0.25-ort	49.89	0.77	60.92	4.46	170.26
60F0.50-ort	55.68	0.71	97.23	4.09	271.74
60F1.0-ort	87.27	2.65	100.62	7.67	281.22
13F0.25-ort	40.62	1.04	44.72	2.22	124.99
13F0.50-ort	47.17	0.65	71.48	4.35	199.78
13F1.0-ort	82.45	1.59	101.79	4.64	284.49



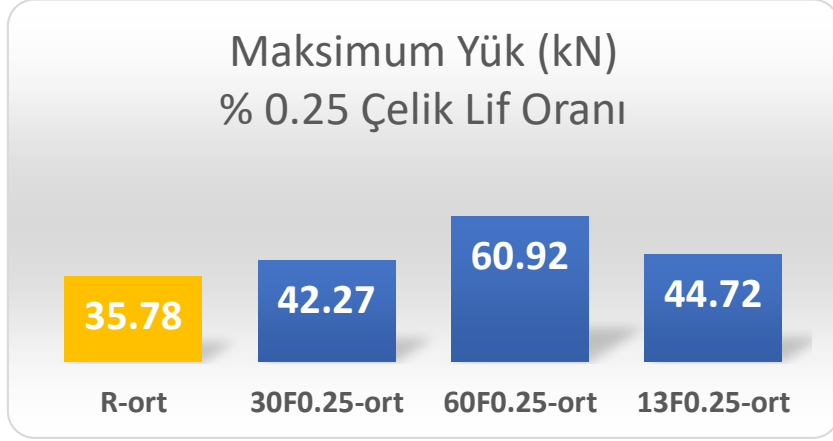
**Şekil 4.85:** % 0.25 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen ilk çatlak yükleri (ortalama değerler).



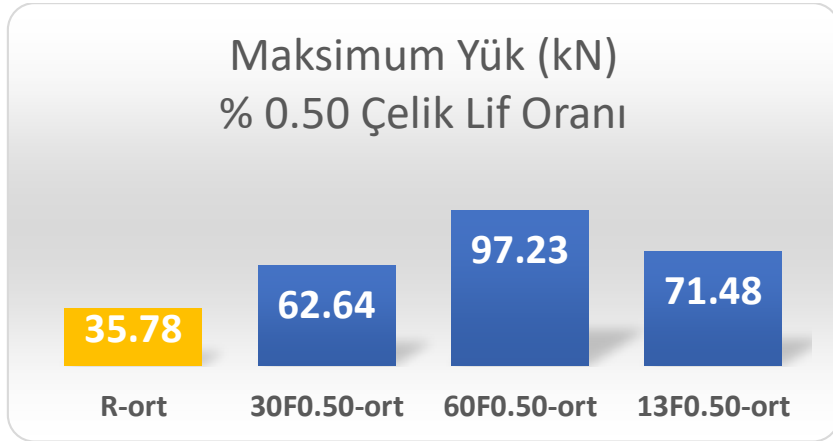
**Şekil 4.86:** % 0.50 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen ilk çatlak yükleri (ortalama değerler).



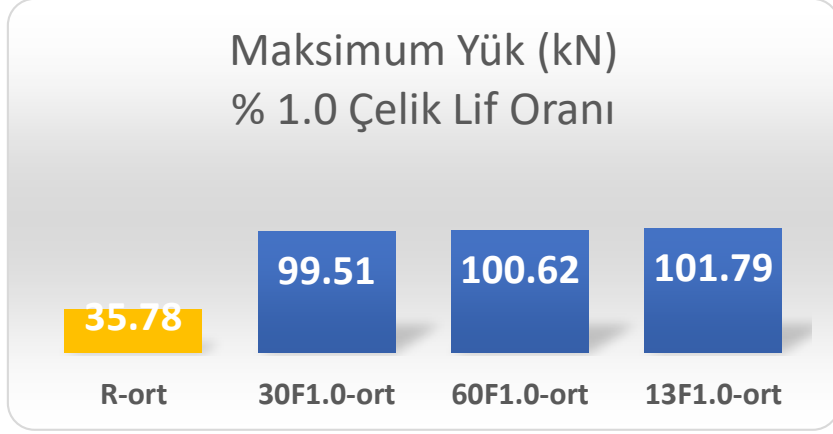
**Şekil 4.87:** % 1.00 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen ilk çatlak yükleri (ortalama değerler).



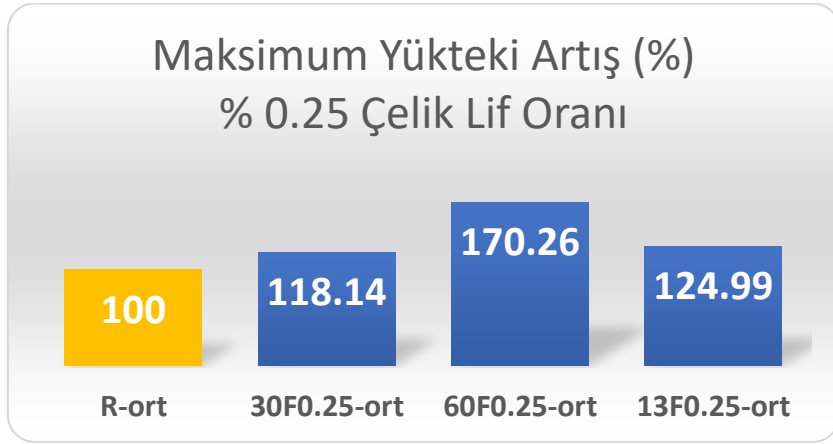
**Şekil 4.88:** % 0.25 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen maksimum yükler (ortalama değerler).



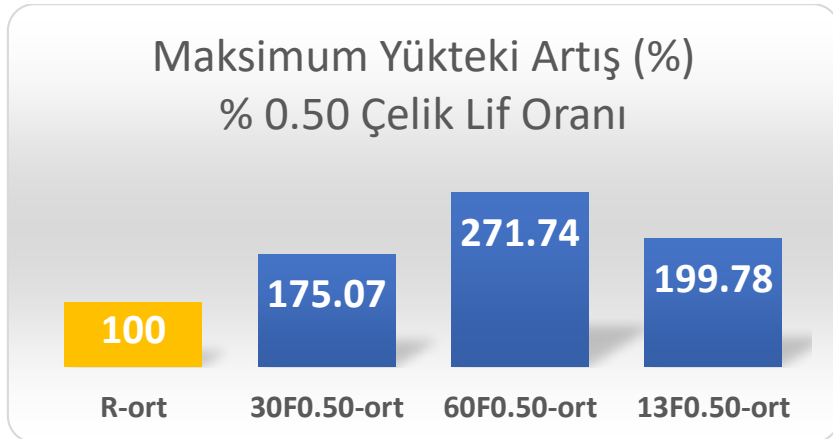
**Şekil 4.89:** % 0.50 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen maksimum yükler (ortalama değerler).



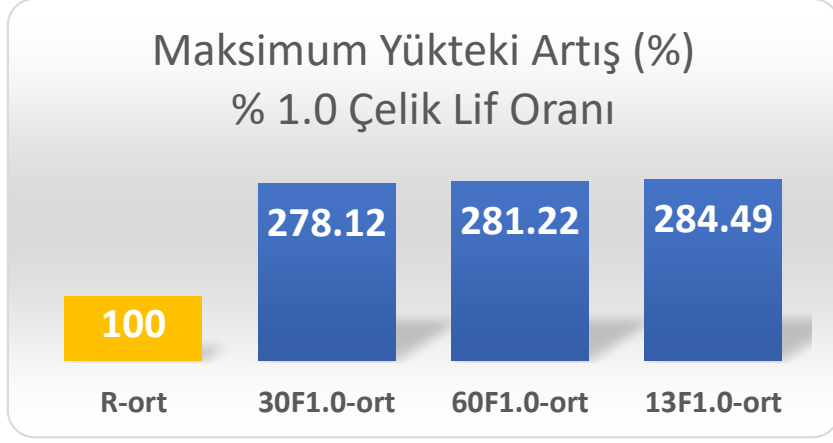
**Şekil 4.90:** % 1.00 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen maksimum yükler (ortalama değerler).



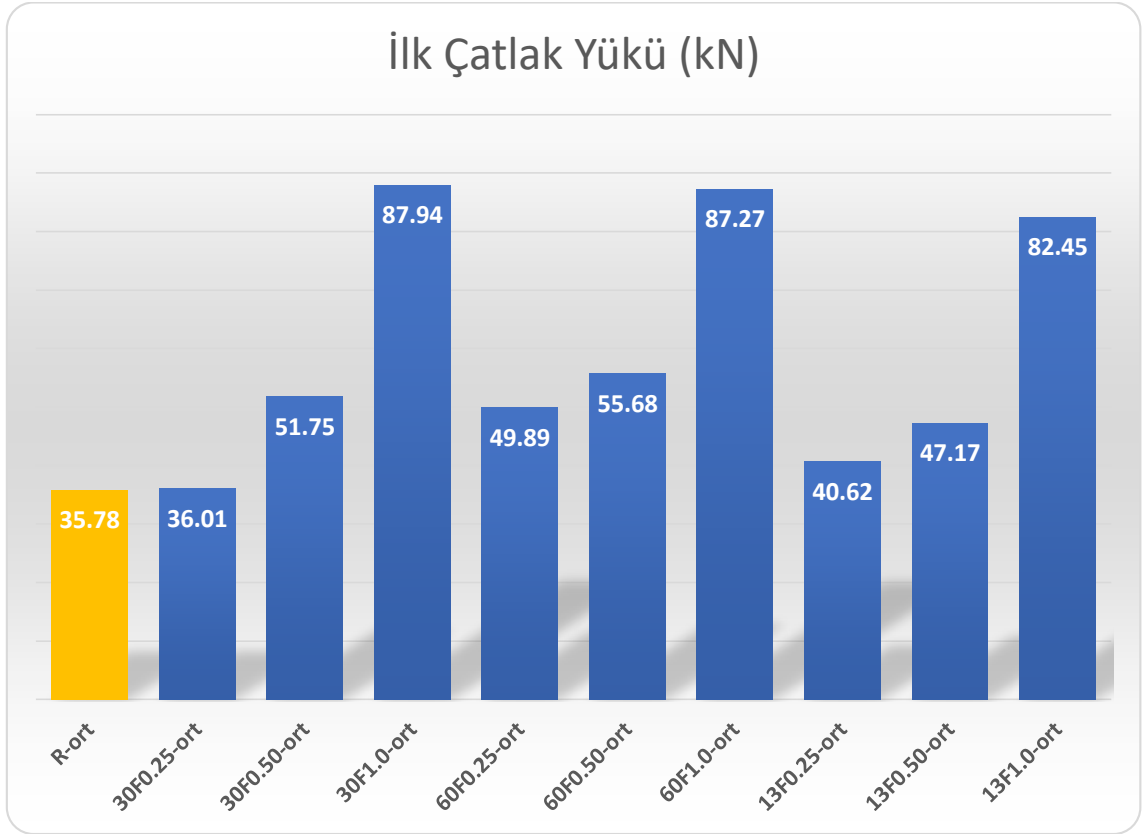
**Şekil 4.91:** % 0.25 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ile lifsiz beton arasındaki maksimum yükteki artış oranlarının yüzdesi (ortalama değerler).



**Şekil 4.92:** % 0.50 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ile lifsiz beton arasındaki maksimum yükteki artış oranlarının yüzdesi (ortalama değerler).



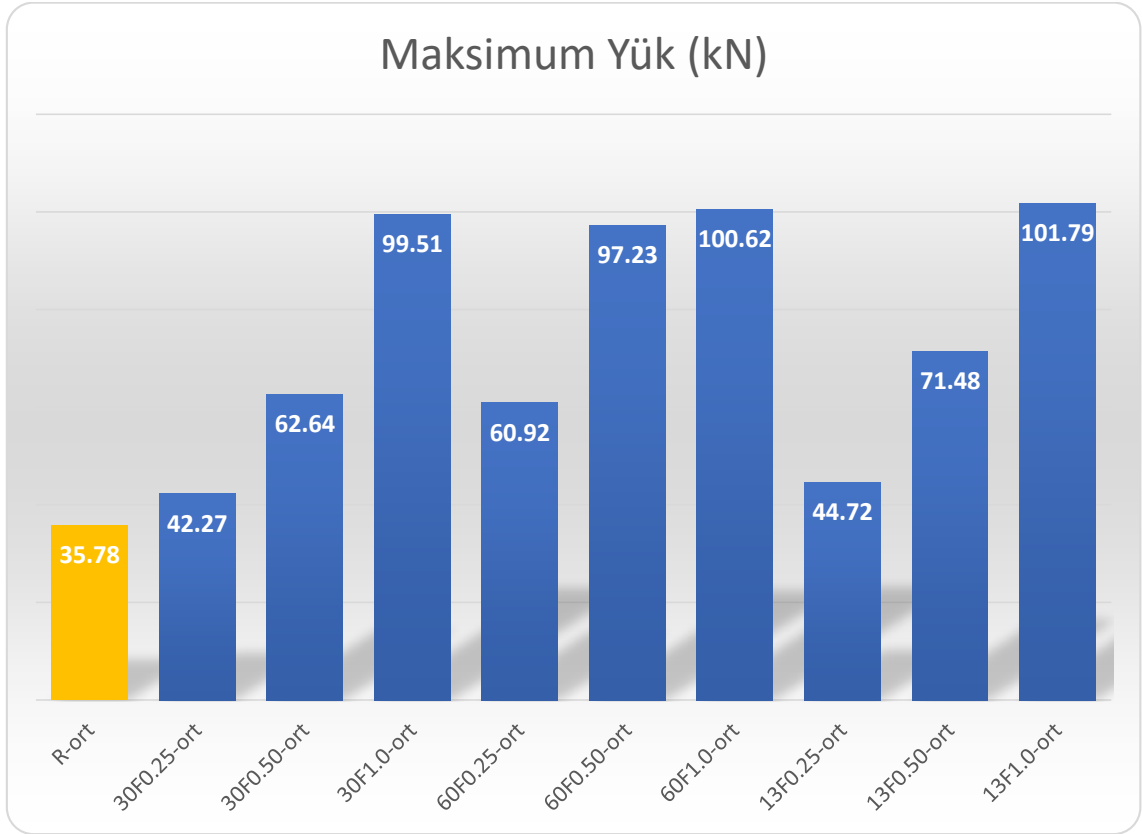
**Şekil 4.93:** % 1.00 çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ile lifsiz beton arasındaki maksimum yükteki artış oranlarının yüzdesi (ortalama değerler).



**Şekil 4.94:** Farklı çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen ilk çatlak yükleri (ortalama değerler).

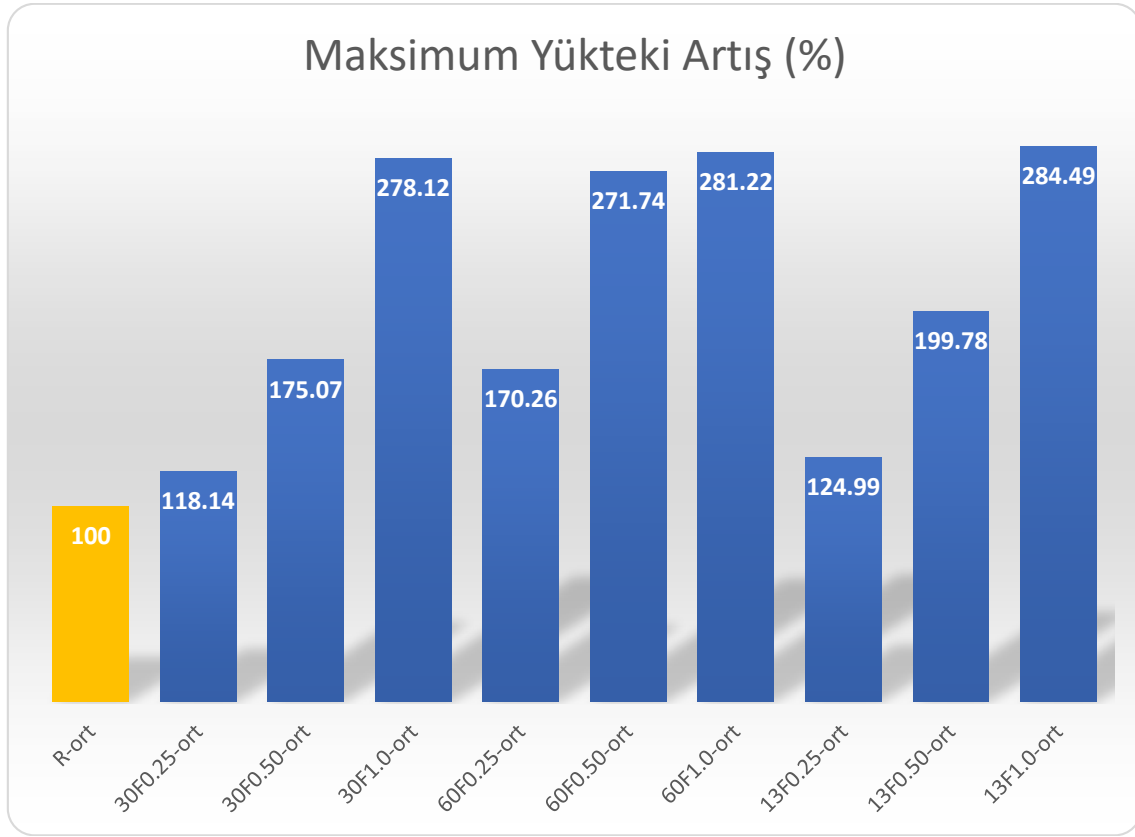
İlk çatlak yüküne lifin katkısı Şekil 4.94’de verilmiştir. Lif oranı arttıkça ilk çatlak yükü de artmıştır. En büyük artış % 1 lif oranında gözlenmiştir. % 0.25 lif oranı 30 mm’lik çift kancalı karışımda etkili olmazken, 13 mm mikro lifin katkısı ise sınırlı kalmıştır. İlk çatlak yükü açısından en etkili liflerin çift kancalı lifler olduğu Şekil 4.94’den görülebilmektedir.

Plakların maksimum yük taşıma kapasiteleri Şekil 4.95’de verilmiştir. İlk çatlak yükünde olduğu gibi plakların maksimum yük taşıma kapasiteleri lif oranı ile artmaktadır. % 0.25 lif oranı için 13 ve 30 mm’lik liflerin katkısı sınırlı kalırken, 60 mm’lik lifin katkısı oldukça fazladır. Maksimum lif oranı olan % 1.0’de ise üç lifte benzer bir davranış göstermiştir. % 1.0 lifli katmanlı plakların, lifsiz katmanlı plaklara göre maksimum yük taşıma kapasitesi % 280 civarında artış göstermiştir. % 0.5 lifli 60 mm’lik lifli plaklarda ise bu oran % 270 civarındadır (Şekil 4.96).



**Şekil 4.95:** Farklı çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı betonda plak eğilme deneyi sonucu elde edilen maksimum yükler (ortalama değerler).





**Şekil 4.96:** Farklı çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ile lifsiz beton arasındaki maksimum yükteki artış oranlarının yüzdesi (ortalama değerler).

Plak Eğilme deneylerinde farklı çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ve lifsiz katmanlı betonda meydana gelen sehimlere karşılık gelen enerji değerleri tüm numuneler için Tablo 4.12’de, ortalama değerler ise Tablo 4.13’de ve karşılaştırmalı olarak Şekil 4.98~Şekil 4.104’de sunulmaktadır.

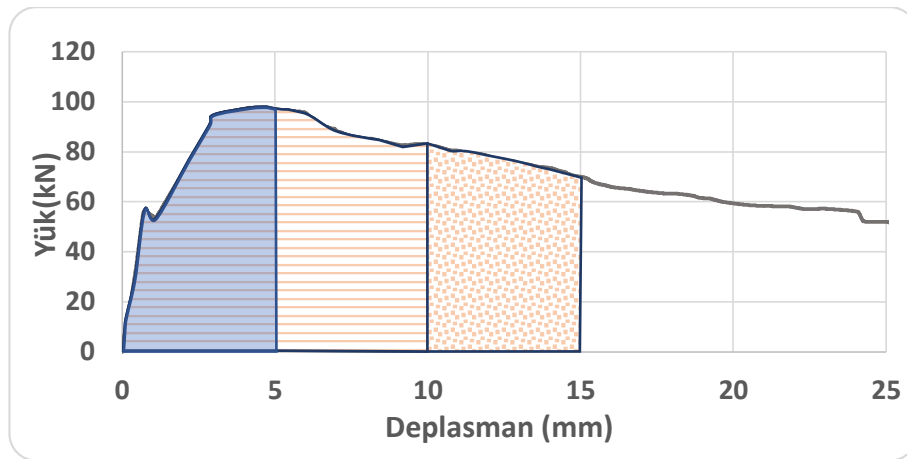
**Tablo 4.12:** Plak Eğilme deneylerinde farklı çelik lif oranı ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı beton ve lifsiz katmanlı betonda meydana gelen sehimlere karşılık gelen enerji değerleri.

Numune Kodu	Enerji (Joule)				
	5	10	15	20	25
R-1	37.06	37.06	37.06	37.06	37.06
R-2	71.44	71.44	71.44	71.44	71.44
R-ort	53.25	53.25	53.25	53.25	53.25
30F0.25-1	95.55	238.22	346.32	424.94	483.18
30F0.25-2	172.7	327.88	446.3	532.23	562.35
30F0.25-ort	166.99	316.45	430.03	512.56	549.93
30F0.50-1	294.66	551.97	769.13	947.88	1073.86
30F0.50-2	158.65	488.87	716.77	881.94	1003.06
30F0.50-ort	271.16	551.86	777.29	950.56	1079.02
30F1.0-1	378.13	805.73	1140.84	1393.75	1551.31

**Tablo 4.12** (devam)

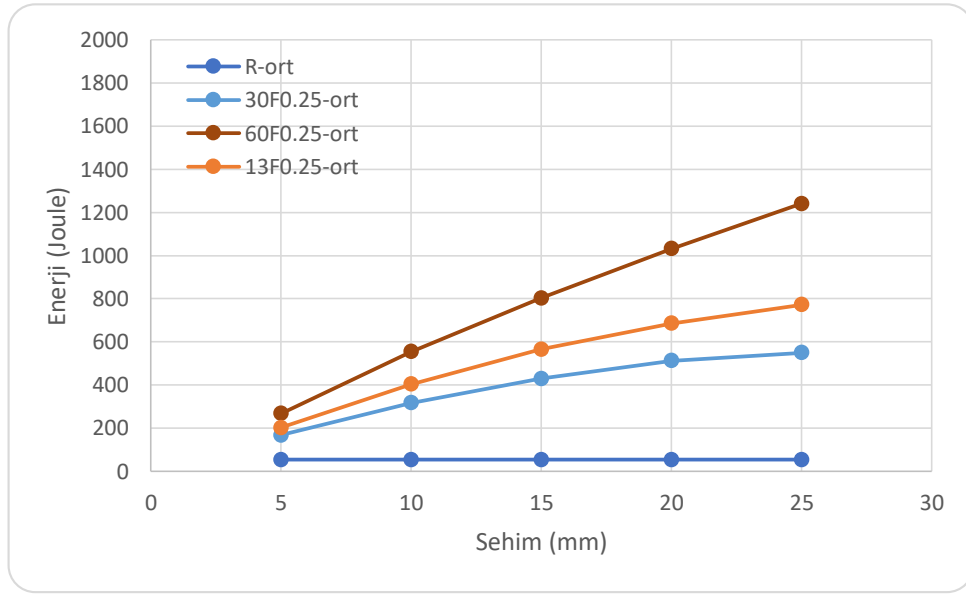
Numune Kodu	Enerji (Joule)				
	5	10	15	20	25
30F1.0-2	344.41	787.11	1072.71	1272.22	1343.98
30F1.0-ort	362.24	801.47	1119.54	1344.06	1491.52
60F0.25-1	267.16	543.1	807.95	1023.5	1225.63
60F0.25-2	260.73	548.33	795.54	1034.34	1251.42
60F0.25-ort	268.01	554.02	802.47	1031.23	1241.31
60F0.50-1	377.58	769.96	1103.26	1421.95	1720.72
60F0.50-2	373.03	813.28	1196.95	1516.85	1800.92
60F0.50-ort	385.01	810.03	1171.73	1496.54	1789.21
60F1.0-1	369.21	853.51	1227.5	1524.74	1780.9
60F1.0-2	359.75	855.6	1328.11	1729.75	2058.25
60F1.0-ort	359.9	854.12	1292.23	1640	1928.27
13F0.25-1	189.87	375.8	525.13	637.31	719.76
13F0.25-2	210.76	429.92	605.66	735.4	827.04
13F0.25-ort	201.83	403.68	565.65	686.12	772.59
13F0.50-1	268.83	587.3	831.22	994.89	1045.57
13F0.50-2	332.05	677.11	969.98	1223.81	1389.55
13F0.50-ort	298.79	632.54	910.71	1114.84	1243.64
13F1.0-1	388.89	851.34	1225.01	1516.43	1728.22
13F1.0-2	431.81	905.37	1308.12	1664.48	1972.83
13F1.0-ort	413.65	885.28	1280.57	1613.33	1880.78

Katmanlı plakların yük sehimi grafiklerinin altında kalan alan plakların enerji yutma kapasitesini belirlemektedir. 0-5, 0-10, 0-15, 0-20 ve 0-25 mm arasında grafiğin altında kalan alanlar Şekil 4.97’de gösterilmektedir.

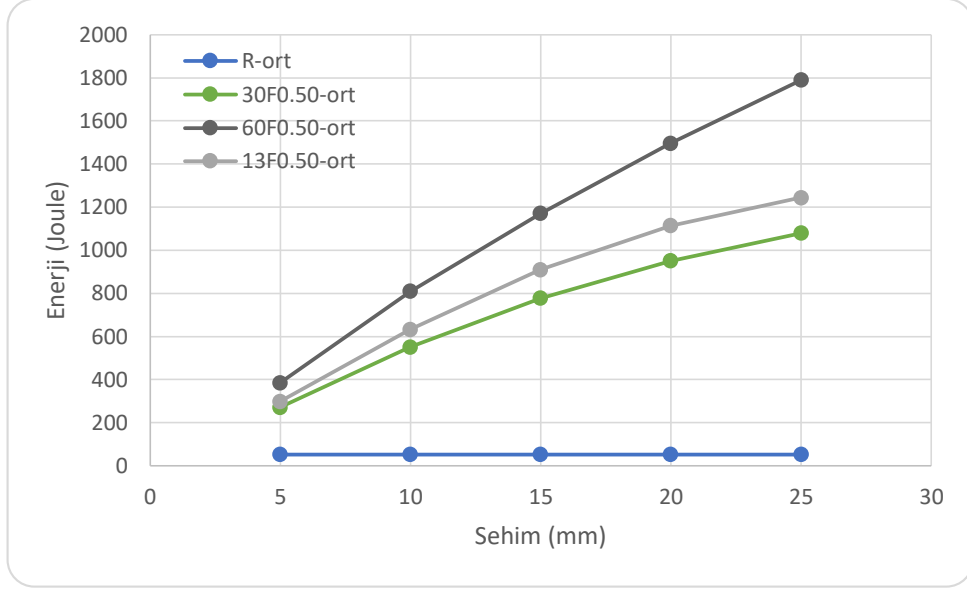
**Şekil 4.97:** Enerji yutma kapasitelerinin elde edilmesi.

**Tablo 4.13:** Katmanlı plaklarda farklı sehimlere karşılık gelen ortalama enerji yutma kapasiteleri.

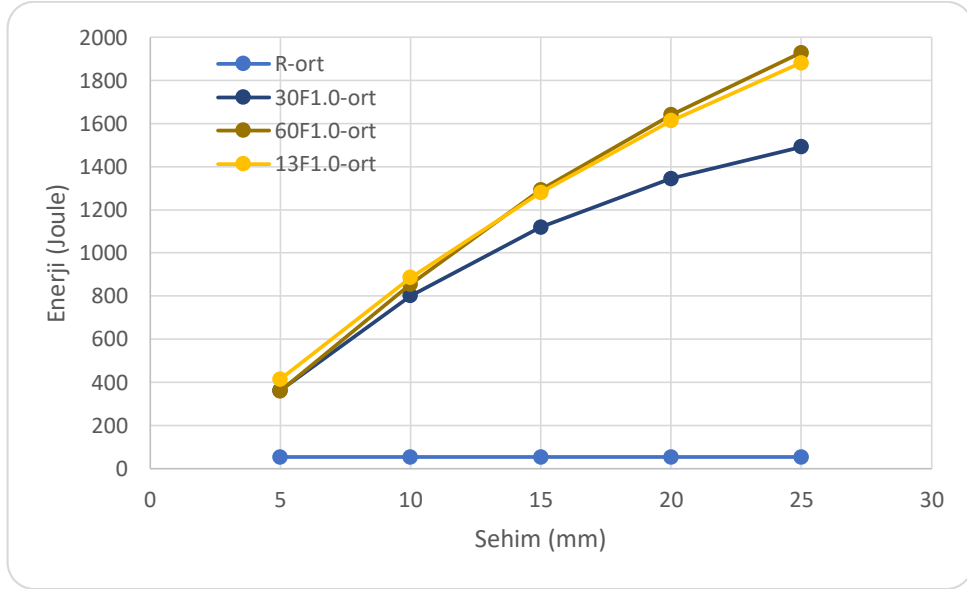
Numune Kodu	Enerji (Joule)				
	5	10	15	20	25
R-ort	53.25	53.25	53.25	53.25	53.25
30F0.25-ort	166.99	316.45	430.03	512.56	549.93
30F0.50-ort	271.16	551.86	777.29	950.56	1079.02
30F1.0-ort	362.24	801.47	1119.54	1344.06	1491.52
60F0.25-ort	268.01	554.02	802.47	1031.23	1241.31
60F0.50-ort	385.01	810.03	1171.73	1496.54	1789.21
60F1.0-ort	359.9	854.12	1292.23	1640	1928.27
13F0.25-ort	201.83	403.68	565.65	686.12	772.59
13F0.50-ort	298.79	632.54	910.71	1114.84	1243.64
13F1.0-ort	413.65	885.28	1280.57	1613.33	1880.78



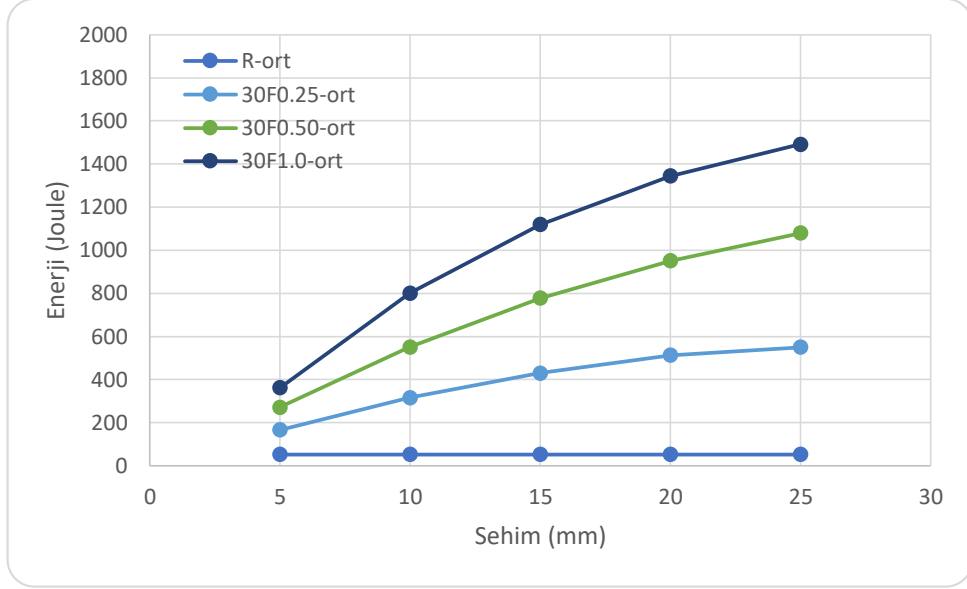
**Şekil 4.98:** % 0.25 çelik lif oranına ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi.



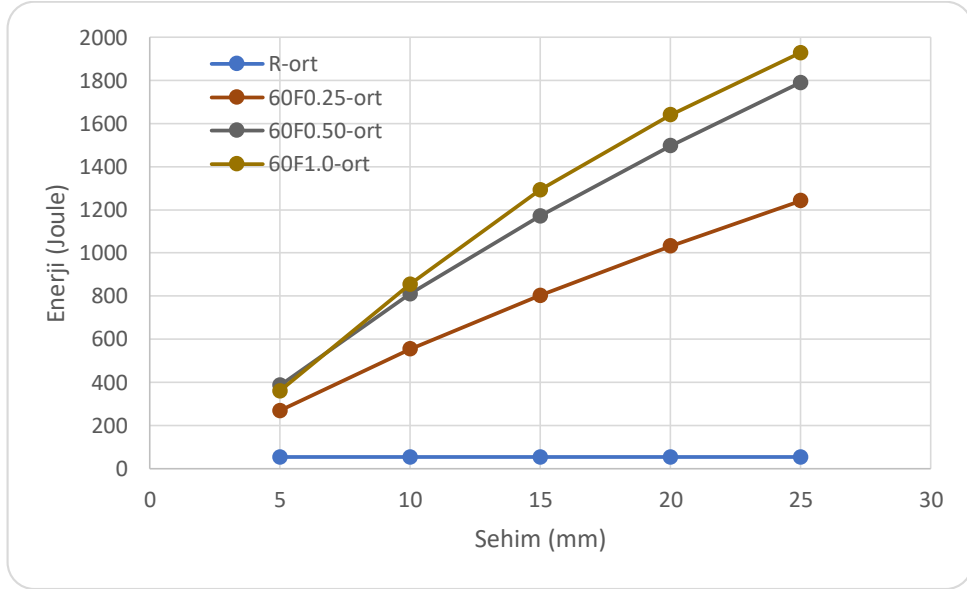
**Şekil 4.99:** % 0.50 çelik lif oranına ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi.



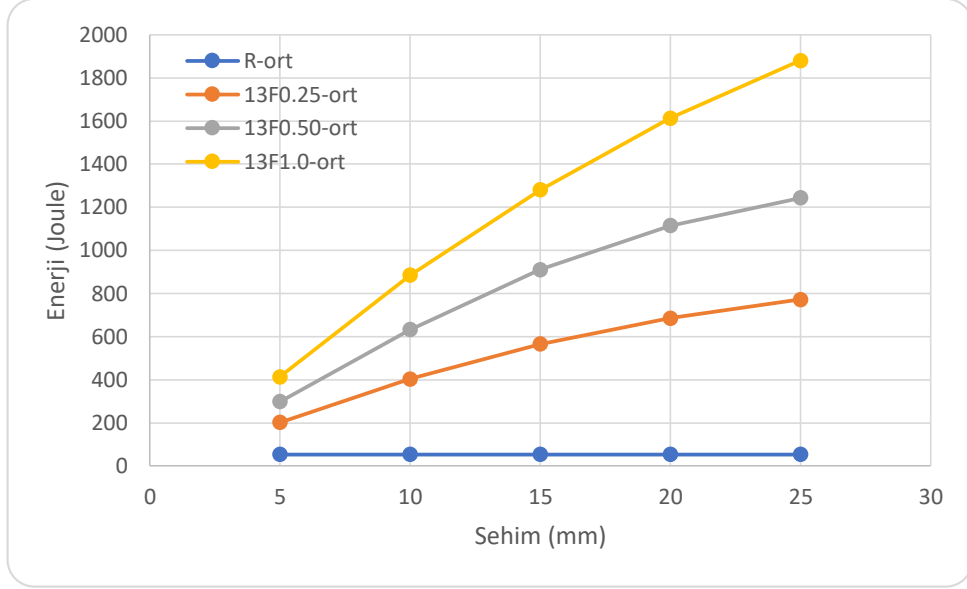
**Şekil 4.100:** % 1.00 çelik lif oranına ve farklı lif uzunluklarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi.



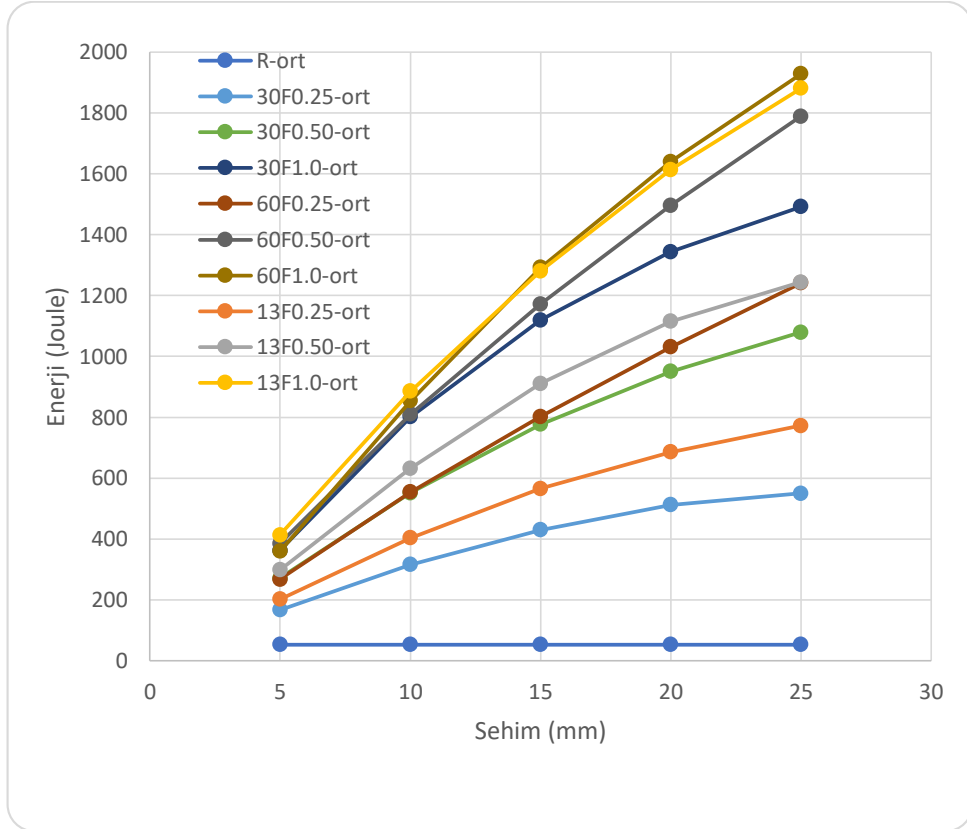
**Şekil 4.101:** 30 mm lif uzunluğuna ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi.



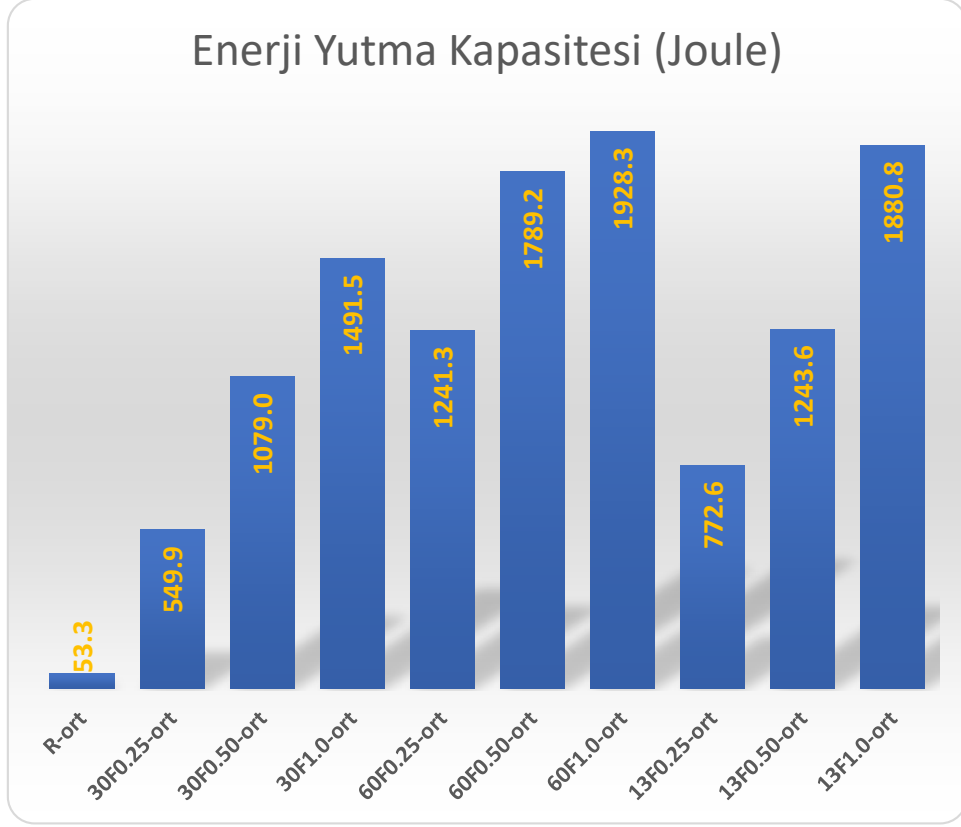
**Şekil 4.102:** 60 mm lif uzunluğuna ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi.



**Şekil 4.103:** 13 mm lif uzunluğuna ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi.



**Şekil 4.104:** Farklı lif uzunluğu ve farklı çelik lif oranlarına sahip katmanlı plaklarda farklı sehimlerde enerji değerleri yutma kapasitelerinin değişimi.



**Şekil 4.105:** Katmanlı plakların ortalama enerji yutma kapasiteleri.

Katmanlı plakların 5 mm’de bir elde edilen enerji yutma kapasiteleri Şekil 4.98-4.104 arasında verilmiştir. Lifin kullanılmadığı referans numunesi gevrek bir kırılma şekline sahip olduğu için en az düşük enerji yutma kapasitesine sahiptir. Lif oranının artımı ile yutulan enerji kapasitesinde değişim Şekil 4.105’den görülmektedir. En büyük enerji yutma kapasitesi 60F1.0 kodlu numunede gözlenmiştir. En düşük lif katkısı 549.9 joule ile 30F0.25 kodlu plakta elde edilmiştir. Bu numune de yutulan enerji bile lifsiz numunenin 10 katından daha fazladır.

## 5. SONUÇLAR

Yolların yapısal performansı, üstyapının mevcut ve gelecek trafik yüklerine karşı dayanımı ve çevresel etkilere karşı koyabilme kabiliyeti olarak özetlenebilir. Beton yolların esnek yollara göre başta gelen avantajlarından biri sınanmış uzun hizmet ömürleri ve üstün dayanıklılıklarıdır. Bu doktora tezi kapsamında, yeni yapılacak beton yollarda aşınma tabakası (whitetopping) olarak UYPLB'lerin kullanımı durumunda, UYPLB tabakasının bazı durabilite özellikleri ve beton yollara yapısal katkısı araştırılmıştır.

Durabilite açısından UYPLB'nin aşınma direnci ve donma-çözülme etkisi beton yollar için önemlidir. UYPLB'nin bu durabilite özelliklerini belirlemek için üç farklı lif tipi ve oranına sahip dokuz farklı beton karışımı üretilmiştir. Bu karışımların mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için basınç testi, yarmada çekme testi ve prizma eğilme testleri yapılmıştır. Durabilite özelliklerinin belirlenmesi için ise donma-çözülme ve aşınma testleri yapılmıştır. UYPLB'nin beton yolun yapısal davranışına katkısını belirlemek için ise her bir karışım için katmanlı plaklar üretilmiş ve test edilmiştir.

Donatısız beton doğası gereği gevrek olduğundan ve oluşan çatlaklar durdurulamadığından kırılmaya yatkın olmaktadır. Bu nedenle, çatlak oluşumuna karşı iyi bir direnç ve daha iyi bir çekme mukavemeti ve kırılmaya karşı daha iyi bir direnç sağlamak amacıyla UYPLB'lerde çelik lifler kullanılmıştır. Deneylerde UYPLB karışımında farklı oranlarda çelik lifler bulunmakta olup 13 mm düz, 30 ve 60 mm kancalı olmak üzere üç farklı çelik lif kullanılmıştır.

Beton basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kiriş eğilme, aşınma, donma çözünme ve plak eğilme deneyleri için farklı tip ve boyutlarda test numuneleri hazırlanmıştır. Geleneksel beton deneylerinde kullanılmak üzere, beton basınç dayanım testi için 15x15x15 (cm) boyutlarında, donma-çözülme deneyi için 10x10x10 (cm) boyutlarında küp numuneler, yarmada çekme ve aşınma deneyleri için 10x20 (cm) boyutlarında silindir numuneler üretilmiştir. UYPLB numunelerinin mekanik özelliklerini belirlenmesi için 10x10x10 (cm) boyutlarında, donma-çözülme deneyi için 10x10x10 (cm) boyutlarında küp numuneler, yarmada çekme ve aşınma deneyleri için 10x20 (cm) boyutlarında silindir numuneler, kiriş eğilme testleri için ise 10x10x40 (cm) boyutlarında prizma numuneleri üretilmiştir. Katmanlı numunelerinin davranışını belirlemek için ise 60x60x10 (cm) boyutlarında plak numuneler üretilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıda yer alan sonuçlar elde edilmiştir:



- ❖ Gerçekleştirilen basınç testleri sonucunda geleneksel betonda lifin beton basınç dayanımına katkısının belirsiz olduğu tespit edilirken, UYPLB’de lifin basınç dayanımına etkisi % 10 mertebesinde olmuştur. UYPLB’ler ise geleneksel betonlara oranla yaklaşık 4.3 kat daha yüksek basınç dayanımına sahiptir.
- ❖ Yarmada çekme deneyleri sonucunda, geleneksel ve UYPLB’lerin yarmada çekme dayanımları karşılaştırıldığında geleneksel betonun yarmada çekme dayanımının UYPLB’ye oranla % 50 oranında düşük olduğu gözlemlenmiştir. UYPLB’de lif oranının artışı ile yarmada çekme dayanımlarında artış olmaktadır. En büyük artış U13F1.0 numunesinde gözlemlenmiştir. Lifsiz referans numunesine göre artış yaklaşık 2.4 kattır.
- ❖ Çalışma kapsamında hazırlanan lifsiz ve farklı lif içeriklerine sahip UYPLB karışımlarının eğilme davranışları, 200 kN kapasiteli ve yer değiştirme kontrollü eğilme test düzeneği yardımıyla, ASTM C1609 yönetmeliğinde ayrıntıları verilen deney yöntemine uygun olarak hazırlanan 10x10x40 (cm) boyutlarındaki prizma numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyinde lifsiz UYPLB ortalama 0.25 mm deplasman sonucunda taşıma kapasitesini tamamen yitirirken, farklı lif boy ve oranlarına bağlı olarak deplasman değerleri artmakta ve beton eğilme etkisi altında çok daha sünek bir davranış sergilemektedir. Örneğin 60 mm uzunluk ve % 0.50 çelik lif oranına sahip UYPLB’de 2 mm deplasmana kadar maksimum taşıma kapasitesinin sadece % 20’si oranında azalma meydana gelmektedir. Yani deplasman artarken taşıma kapasitesinde ani düşüş görülmeden sünek bir davranış görülmektedir.
- ❖ Beton aşınma dayanımı 10x20 (cm) boyutlarındaki silindirik numuneler yardımıyla ASTM C 944-99 metoduna uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Geleneksel beton ile üretilmiş karışımlarda aşınma deneyi 3 tur olarak yapılmış ve her tur sonunda numunenin ağırlığı tartılmıştır. UYPLB ile üretilen numunelerde ise aşınma değeri çok küçük olduğu için deney 5 tur tekrar edilmiştir. Geleneksel betonlu karışımlarda en büyük kütle kaybı 15.05 gr ile G60F0.25 kodlu % 0.25 lif oranına sahip 60 mm’lik çift kançalı makro lifli numunede gerçekleşmiştir. En az kütle kaybı ise 13.35 gr ile G30F0.25 kodlu numunede gerçekleşmiştir. Lifin geleneksel betonda aşınmaya bir katkısı gözlenmemiştir. UYPLB’de 5 tur aşındırma sonucunda bile maksimum kütle kaybı 2 gr ile U-R kodlu lifsiz referans numunesinde ölçülmüştür. Bu değer geleneksel betonun minimum (3 turda elde edilen) aşınma değerinden bile yaklaşık 6.1 kat küçüktür. UYPLB’lu karışımlarda lif oranı arttıkça kütle kayıpları da azalmıştır.

❖ Betonun dayanıklılığını azaltan önemli faktörlerden biri de donma-çözünme etkileridir. Donma-çözülme deneyi için 10x10x10 (cm) boyutunda küp numuneler üretilmiş ve 28 gün kürlenmiştir. Farklı oranlarda ve farklı geometriye sahip çelik life sahip geleneksel ve UYPB numuneler üretilmiştir. Üretilen test numuneleri donma-çözülme kabinine yerleştirildikten sonra  $-18\pm 2$  °C’de havada dondurulmuş ve  $5\pm 2$  °C’de suda çözdürülecek şekilde toplamda 300 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır. Numuneler 50 çevrimde bir tartılarak ağırlık değişimleri tespit edilmiştir. Geleneksel lifli betonun donma çözülme davranışı incelendiğinde lifin donma çözülmeye olumlu bir katkısı olduğu, 300. çevrimde lifsiz referans geleneksel betonda donma çözülme kütle azalım oranı lifli numunelere göre yaklaşık 1.5 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Lif tipinin ise kütle kaybına etkisi gözükmemektedir. UYPLB’da en yüksek çevrim sayısı olan 300 çevrimde bile kütle azalım oranında bir değişim gözlenmemiştir. Lifin donma çözülmeye katkısı sınırlı kalmıştır. Bunu en önemli sebebi UYPLB’nun çok sıkı bir içyapıya sahip olmasıdır. Suyun numuneler içine işlemesi çok sınırlı kalmıştır. UYPLB ile geleneksel betonlar arasındaki kütle değişim oranı yaklaşık 2 kattır.

❖ Plak eğilme deneyi için, plak numuneler iki katmanlı olarak üretilmiştir. Plakın alt bölgesinde 7.5 cm kalınlığında geleneksel beton, üst bölüme ise 2.5 cm kalınlığında UYPLB mevcuttur. Önce geleneksel beton dökümleri yapılmıştır. Geleneksel betonun dökümünden 24 saat sonra UYPLB’li katmanın dökümü gerçekleştirilmiştir. Her iki katmanda da kullanılan lif tipleri ve oranları aynıdır. Her bir numune grubu için (lif oranı ve lif tipi için) üretilen ikiz plakların testleri yapılmış ve yük sehim eğrileri elde edilmiştir. Bu grafiklerin ortalamaları alınarak her bir lif tipi ve oranı için karşılaştırılmaları yapılmıştır. Ortalama yük-sehim eğrilerinden ilk çatlak yükü, deplasmanı ile maksimum yük ve maksimum yükün oluştuğu deplasmanlar elde edilmiştir.

Lifsiz katmanlı numunelerin yük karşısındaki davranışları incelendiğinde kırılmanın gevrek olduğu her iki numunede de 35 kN civarında ve yaklaşık 0,8 mm sehimde kırılma görülerek numunenin 4 parçaya ayrıldığı gözlemlenmiştir.

Mikro lifli numunelerde lif oranının artmasıyla yük taşıma kapasitesinin lifsiz betona göre oldukça arttığı, maksimum sehimde dahi yükün yaklaşık % 30’u civarında yük taşımaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Lifli numunelerin hepsinde oldukça sünek bir davranışın meydana geldiği görülmektedir.

13 mm'lik mikro liflerin kullanıldığı numunelerde lif oranı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığı ve daha sünek bir eğilme davranışı gözlemlenmiştir. Mikro liflerin sayısının çok fazla olması ve karışım içinde düzgün dağılması nedeniyle yük sehimi grafiklerinde lif sıyrılması kaynaklı ani yük düşmeleri gözlenmemiştir.

30 mm'lik makro liflerin kullanımında, 30F0.5 ve 30F1.0 kodlu numunelerin maksimum sehimde taşıdıkları yük, mikro lifli numunelerde de olduğu gibi 30F0.25 numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesinden daha yüksektir. Her üç farklı koda ait altı numunede oldukça sünek bir eğilme davranışına sahiptir.

60 mm'lik makro lifli beton karışımlarında lif oranı arttıkça liflerde topaklanma gözlemlenmiştir. Farklı lif tipi ve lif içeriklerine sahip katmanlı plakların davranışı incelendiğinde; özellikle % 0.25 ve % 0.50 lif içeriğine sahip katmanlı betonda 60 mm'lik çift kancalı lifin davranışa etkisi oldukça yüksektir. % 1.0 lif oranında ise her üç lifin de davranışı çok benzerdir. Tüm farklı lif yüzdelerinde 30 mm'lik makro liflerin maksimum yük taşıma kapasiteleri 13 mm ve 60 mm'lik liflere oranla daha düşük, deplasmana bağlı taşıma kapasitesindeki düşüş ise en yüksektir. Tokluk açısından 30 mm'lik lifin katkısının kabul edilebilir mertebede az olduğu görülmektedir.

Lif oranı arttıkça ilk çatlak yükü de artmıştır. En büyük artış % 1 lif oranında gözlenmiştir. % 0.25 lif oranı 30mm'lik çift kancalı karışımda etkili olmazken, 13 mm mikro lifin katkısı ise sınırlı kalmıştır. İlk çatlak yükü açısından en etkili liflerin çift kancalı lifler olduğu tespit edilmiştir. İlk çatlak yükünde olduğu gibi plakların maksimum yük taşıma kapasiteleri lif oranı ile artmaktadır. % 0.25 lif oranı için 13 ve 30 mm'lik liflerin katkısı sınırlı kalırken, 60 mm'lik lifin katkısı oldukça fazladır. Maksimum lif oranı olan % 1.0'de ise üç lifte benzer bir davranış göstermiştir. % 1.0 lifli katmanlı plakların, liffsiz katmanlı plaklara göre maksimum yük taşıma kapasitesi % 280 civarında artış göstermiştir. % 0.5 lifli 60 mm'lik lifli plaklarda ise bu oran % 270 civarındadır.

Lifin kullanılmadığı referans numunesi gevrek bir kırılma şekline sahip olduğu için en az düşük enerji yutma kapasitesine sahiptir. Lif oranı arttıkça enerji yutma kapasitesinde de artış meydana gelmektedir. En büyük enerji yutma kapasitesi 60F1.0 kodlu numunede gözlenmiştir. En düşük lif katkısı 549.9 joule ile 30F0.25 kodlu plakta elde edilmiştir. Bu numune de yutulan enerji bile liffsiz numunenin 10 katından daha fazladır. UYPLB ile inşa edilmiş yollarda çatlaklar meydana gelse dahi çatlak sonrası enerji yutma kapasiteleri

geleneksel betona ya da esnek yol tiplerine göre oldukça yüksek olduğundan yolun kullanılmaz hale gelmesi diğer yol kaplamalarına göre çok daha uzun sürede olacaktır. Bu durum düzenli bakım maliyetlerini oldukça düşürecek ya da bakım maliyet aralıklarını oldukça uzatacaktır.

- ❖ Lif kullanımının UYPLB'nin basınç dayanımına, yarmada çekme dayanımına, plaklarda maksimum yük taşıma kapasitesine, ilk çatlak yüküne ve plak tarafından yutulan enerjiye ciddi katkısı olmaktadır. Aşınma ve donma-çözülme davranışına da olumlu katkısı mevcuttur. Yapılan çalışmalar neticesinde, kullanılan lif oranının artmasıyla davranışa katkının da arttığı gözlemlenmiştir.
- ❖ Beton yolların yani rijit üstyapıların esnek (asfalt) üstyapılara oranla dayanıklılık, onarım sıklığı, seyir konforu vb. gibi birçok avantajının bulunması yanında beton yollarda aşınma katmanı olarak UYPLB'nin kullanılması durumunda mekanik özellikler, durabilite ve trafik seyri açısından tüm parametrelerde oldukça büyük ve önemli gelişmeler olduğu tespit edilmiştir. UYPLB'nin 2 günlük basınç dayanımının çok yüksek olması nedeniyle esnek üstyapıların rijit üstyapılara oranla belki de tek avantajı olan trafiğe çabuk açılabilme özelliği de UYPLB'nin kullanımı ile ortadan kalkacaktır.
- ❖ UYPLB havaalanlarında pist onarımlarında ve yeni pist yapımlarında da kullanılabilir. Yüksek yük kapasiteli pistlerde katman kalınlığı 25 cm ile 130 cm arasında tasarlanmaktadır. UYPLB ile bu kalınlıklarından çok daha ince kalınlıklarda yüksek dayanım sağlanabilecektir. Geleneksel beton pist ya da asfalt betonu pistlere göre çok daha uzun hizmet ömrü olacağı da öngörülmektedir. Ayrıca askeri havaalanlarında saldırıya maruz kalınması halinde pistler yüksek dayanıma sahip olacağından herhangi bir tahribata maruz kalması zorlaşacaktır.
- ❖ Mevcut bir asfalt betonu kaplamada 5 cm. kalınlığında aşınma tabakasının 1 m<sup>2</sup> sinin yenilenme maliyeti 74.32 ₺ dir. Asfalt betonu yerine 2.5 cm. kalınlığında UYPLB yapılacak olursa deneylerde kullandığımız her bir lif ve lif oranlarında sırasıyla 1 m<sup>2</sup> sinin maliyeti; U-30F0.25 119.75 ₺, U-30F0.50 136.25 ₺, U-30F1.0 168.00 ₺, U-60F0.25 119.75 ₺, U-60F0.50 136.25 ₺, U-60F1.0 168.00 ₺, U-13F0.25 128.00 ₺, U-13F0.5 152.00 ₺, U-13F1.0 201.25 ₺ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan maliyetler 2022 yılı Haziran ayı güncel fiyatlar ile bulunmuştur 30 mm ve 60 mm lik kancalı liflerin kg birim fiyatları aynı olduğundan maliyetleri de aynı bulunmuştur.

## 6. KAYNAKLAR

- AFGC, (2013). Recommendation: Ultra high performance fibre reinforced concretes, Association Française de Génie, France.
- Ağar, E., Süttaş, İ. ve Öztaş, G., (1998). Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları), İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Ağar, E., Taşdemir, Y., (2007). Silindir ile Sıkıştırılabilen Beton Yollar, Türkiye Hazır Beton Birliği, www.thbb.org.
- Buttignol, T., E., Sousa, J., L., Bittencourt, T., (2017) UltraHigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPRFC): a review of material properties and design procedures. REvista IBRACON de Estrururas e Materiais, Vol. 10, Issue 4, Page 957-971.
- Camacho, E., J.Á. López, & P. Serna, (2012) Definition of three levels of performance for UHPRFC-VHPRFC with available materials, in Proceedings of Hipermat. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials. Kassel University Press: Kassel, Germany.
- Çetin, O. (2009). *Beton yollarda yeni teknolojiler silindirle sıkıştırılan beton* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 251324).
- Cussigh, F., (2007), SCC in practice: opportunities and bottlenecks, Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 21 – 27.
- Darter, M. I., (1993). Report on The 1992 U.S. Tour of European Concrete Highways, Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-012, Washington, DC.
- Eide, M. B.,and Hisdal, J. M. (2012). Ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC) –State of the art: FA 2 Competitive constructions: SP 2.2 Ductile high strength concrete (Report No: 3D005950). Oslo: SINTEF Building and Infrastructure.

- Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher & T. And Frönlich, S. (2014). Ultra-High Performance Concrete UHPC, Beton kalender, Wilhelm Ernst&Sohn.
- Fehling, E. and Bunje, K., Leutbecher, T., (2004), Design relevant Properties of hardened Ultra High Performance Concrete, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany, pp 327-338.
- Gowripalan N. & Gilbert I. (2000) Design guidelines for ductal prestressed concrete beams, VSL, Australia.
- Gültekin, C. (2020). *Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) İçeren Enkesitli Kirişlerin Eğilme Davranışının Deneysel ve Nümerik İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 629593).
- Işıkdag, B. (2009). *Atık Asfalt Kırıklarının Beton Yollarda Agregaya Yerine Kullanılmasının Araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 244435).
- JSCE, Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC), Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo-Japan, 2008.
- Kadioğlu, T. (2020). *Beton ve asfalt yolların dayanım, dayanıklılık (durabilite) ve maliyet değişimlerinin karşılaştırılması: Trabzon örneği* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 636179).
- Khayat, K.H., Hu, C., Monty, H., 1999, Stability of self compacting concrete, advantages, and potential applications, First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Stockholm, Sweden pp. 143 – 152.
- Kınay, F. (2020). *Beton yol kaplama inşasında bazaltın kullanılabilirliği* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 632714).

- Kızılelma, R. (2021). *Beton yol performansına makro ve mikro fiberlerin etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 689789).
- Mutyılmaz, S. (2014). *Using of self-compacting concrete with fibers on concrete pavements* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 10031952).
- Naaman, A. E. & K. Wille (2012). The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): Five decades of progress, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials. Kassel, Germany.
- Naaman, A. E. (2007). High performance fiber reinforced cement composites classification and applications, CBM-C1 International Workshop (pp. 389-400). Karachi, Pakistan.
- Perry V., (2015). Ultra – High – Performance – concrete advancements and industrialization-the need for standard testing, *Advances in Civil Engineering Materials*, 4 (2), 1-16,.
- Reineck, K.H., Greiner, S. & Lichtenfels, A. 2003. Wasserspeicheraus UHFB – Bemessung (waterreservoirs made from UHPC – design). *Innovationen im Bauwesen: Ultrahochfester Beton*, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, 257–268.
- Reineck, K.-H., Greiner, S., (2004), Dichte Heißwasser-Wärmespeicher aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton, Research report BMBF-Project 0329606 V. Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, University of Stuttgart, 2004.
- Richardson, M. G. (2002). *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*, First Edition, Spon Pres, pp. 51, 77, 101, 133, 160-179, 194.
- Schmidt, M., Bunje, K. And Dehn, F. (2008). Sachstandsbericht ultrahochfester beton (UHPC – state of the art report), German Committee for Structural Concrete (DAfStb), No. 561, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- SIA 20152, (2016). Ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHPFRC): Construction material, dimensioning and application, Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland.

- Şengün, E., ve Yaman İ., Ö., (2019) Beton Yollar...Neden Olmasın? Concrete Road...Why Not?. 10. International Concrete Congress. Bursa, Turkey.
- Şengün, E., Kıran, E., Yaman, I., Ö., (2017) Türkiye’de Beton Yol ve Beton Bariyer Fırsatları, Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi, İstanbul.
- Tanyıldızı, M. M. (2010). *AASHTO metodunda rijit üstyapı beton kaplama kalınlığına etki eden parametrelerin irdelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 284771).
- Türker, K., Birol, T., Yavaş, A., Hasgül, U. & Yazıcı, H. (2019). Ultra yüksek performanslı lifli beton ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışı. *Teknik Dergi*, 30(1), 8777-8801.
- Türker, K., Yavaş, A., Birol, T. & Gültekin, C. (2021) Evaluation of using ultra-high performance fiber reinforced concrete in I section RC beam, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3), 1431-1448.
- Uçar, G. (2022). *İki farklı polipropilen lifin rijit kaplamalarda hibrit olarak kullanılabilirliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 708102).
- Uzarowski, L., and I. Bashir. (2007) A Rational Approach for Selecting the Optimum Asphalt Pavement Preventive and Rehabilitation Treatments – Two Practical Examples from Ontario. In Proceedings of the Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Saskatoon, Canada.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ayhan ARIK

Doğum tarihi ve yeri : 30-11-1971 İstanbul

e-posta : arik.ayhan@gmail.com

### Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaatMühendisliği	1998
Lisans	Uludağ Üniversitesi/Balıkesir Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği	1994
Lise	Salihli Endüstri Meslek Lisesi/Elektrik Bölümü	1989