

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HİBRİT (KARMA) LİF TAKVİYELİ BETONDAN
ÜRETİLEN DÖŞEME-KOLON BİRLEŞİM ELEMANLARINDA ZİMBALAMA
PERFORMANSININ DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mahmut BAŞSÜRÜCÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

TEMMUZ 2022

**T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HİBRİT (KARMA) LİF TAKVİYELİ BETONDAN
ÜRETİLEN DÖŞEME-KOLON BİRLEŞİM ELEMANLARINDA ZİMBALAMA
PERFORMANSININ DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Mahmut BAŞSÜRÜCÜ
(23617210101)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

TEMMUZ 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle destek olan, yoğun akademik görevlerine rağmen her fırsatta zaman ve ilgisini esirgemeyen, yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kâzım TÜRK'e en derin teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında değerli görüş, bilgi ve katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Paki TURĞUT ve Sayın Doç. Dr. Önder Halis BETTEMİR'e

Deneysel çalışmalarım sırasında yardım ve desteklerinden dolayı değerli arkadaşlarım Öğr. Gör. Dr. Cenk FENERLİ, Dr. Öğr. Üyesi Ceren KINA ile stajyer öğrenciler Hamza BAHAR, Yakup GÖÇMEZ ve Ayça YILMAZ'a,

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi yoğun çalışmalarım sırasında gösterdikleri destek ve anlayış için aileme, sevgili eşim Sinem BAŞSÜRÜCÜ ve oğlum Ahmet'e,

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2019-1974 numaralı doktora tez projesi kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne,

Ayrıca, deneysel çalışmalarım için gerekli olan süperakışkanlaştırıcı temininde vermiş olduğu destekten dolayı Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye,

sonsuz teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Kendiliğinden Yerleşen Hibrit (Karma) Lif Takviyeli Betondan Üretilen Döşeme-Kolon Birleşim Elemanlarında Zımbalama Performansının Deneysel ve İstatistiksel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mahmut BAŞŞÜRÜCÜ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı, Hedefleri ve Özgünlükleri.....	4
1.2 Tezin Ana Hatları	7
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	9
2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Karışım Özellikleri.....	9
2.2 Tek ve Karma Lif Takviyesinin Taze Betonun İşlenebilirlik Özelliklerine Etkisi	10
2.3 Tek ve Karma Lif Takviyesinin Sertleşmiş Betonun Mekanik ve Eğilme Özelliklerine Etkisi	12
2.4 Döşeme-Kolon Birleşim Elemanlarının Zımbalama Dayanımı	15
2.4.1 Beton basınç dayanımı	15
2.4.2 Eğilme donatısı oranı.....	16
2.4.3 Döşeme-kolon boyutları ve şekli.....	16
2.4.4 Zımbalama donatısı	17
2.4.5 Lif takviyesi	20
2.4.6 Zımbalama davranışının istatistiksel ve analitik olarak incelenmesi ile ilgili çalışmalar	29
3. MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
3.1 Malzemeler	34
3.1.1 Çimento ve uçucu kül.....	34
3.1.2 Agregata	35
3.1.3 Kimyasal katkı.....	36
3.1.4 Karışım ve kür suyu.....	36
3.1.5 Lifler	37
3.1.6 Donatı	37
3.2 Deneysel Çalışmalar	38
3.2.1 KYB karışımlarının tasarımı ve oranları	38
3.2.2 Taze beton deneyleri.....	40
3.2.2.1 Taze betonun birim hacim ağırlığı ve hava içeriğinin belirlenmesi ..	40
3.2.2.2 Çökme-yayılma deneyi.....	40
3.2.2.3 J-halkası deneyi	41
3.2.3 Sertleşmiş beton deneyleri.....	42
3.2.3.1 Basınç dayanımı deneyi.....	42
3.2.3.2 Elastisite modülü deneyi.....	43
3.2.3.3 Yarmada çekme dayanımı deneyi.....	44
3.2.3.4 Eğilmede çekme dayanımı deneyi	45
3.2.4 Büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları zımbalama deneyleri ..	46
3.2.4.1 Döşeme-kolon birleşim elemanlarının tasarımı ve üretilmesi.....	46
3.2.4.2 Test ve ölçüm düzeneği	54
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	58

4.1 Taze KYB Özellikleri	58
4.1.1 Taze beton birim hacim ağırlığı (TBHA) ve hava içeriği	58
4.1.2 Çökme-yayıma	60
4.1.3 J-halkası	63
4.2 Sertleşmiş KYB Özellikleri	66
4.2.1 Basınç dayanımı	66
4.2.2 Elastisite modülü	69
4.2.3 Yarmada çekme dayanımı	71
4.2.4 Eğilme performansı	75
4.2.4.1 Eğilmede çekme dayanımı.....	75
4.2.4.2 Yük-açıklık ortası deplasman diyagramları ve çatlak özellikleri	76
4.2.4.3 Eğilme yüklemesi altında lifli KYB numunelerinin çatlak özellikleri	79
4.2.4.4 Eğilme tokluğu ve süneklik özellikleri.....	82
4.3 Büyük Ölçekli Döşeme-Kolon Birleşim Elemanlarının Zımbalama Performansı	86
4.3.1 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı.....	88
4.3.1.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)	88
4.3.1.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)	89
4.3.1.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)	91
4.3.1.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için zımbalama dayanımlarının karşılaştırılması.....	92
4.3.1.5 Farklı zımbalama önlemlerine ait zımbalama dayanımlarının istatistiksel değerlendirilmesi	93
4.3.2 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-açıklık ortası deplasman ve yük-rölatif yer değiştirme davranışı	97
4.3.2.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)	98
4.3.2.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)	100
4.3.2.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)	102
4.3.2.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için yük-açıklık ortası deplasman ve yük-rölatif yer değiştirme davranışının karşılaştırılması	105
4.3.3 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının göçme modu ve çatlak modelleri.....	105
4.3.3.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)	106
4.3.3.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)	110
4.3.3.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)	114
4.3.3.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için döşeme-kolon birleşim elemanlarının göçme modu ve çatlak modellerinin karşılaştırılması	118
4.3.4 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi	119
4.3.4.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)	120
4.3.4.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)	121
4.3.4.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)	122
4.3.4.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	123
4.3.4.5 Farklı zımbalama önlemlerine ait enerji yutma kapasitelerinin istatistiksel değerlendirilmesi	124

4.3.5 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi	128
4.3.5.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)	129
4.3.5.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)	130
4.3.5.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)	131
4.3.5.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için süneklik indekslerinin karşılaştırılması.....	132
4.3.5.5 Farklı zımbalama önlemlerine ait süneklik indekslerinin istatistiksel değerlendirilmesi	133
5. ANALİTİK (AMPİRİK) ÇALIŞMA	138
5.1 Hibrit Lif Takviyeli Döşeme-Kolon Birleşim Elemanlarının Zımbalama Dayanımının Tahmini için Ampirik Formül Geliştirilmesi	138
5.2 Hibrit Lif Takviyeli KYB Kullanılması Durumunda Farklı Şartnamelerde Yer Alan Zımbalama Tasarım İfadeleri için Öneri	140
6. SONUÇLAR VE ÖNERİ	145
KAYNAKLAR	151
ÖZGEÇMİŞ	163

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 : Tez çalışması akış şeması.	7
Çizelge 3.1 : Çimento ve uçucu kül kimyasal kompozisyonları (%).	34
Çizelge 3.2 : Puzolanik reaktivite deneyi için tasarlanan karışım için deney sonuçları	35
Çizelge 3.3 : Çalışmada kullanılacak lif özellikleri.	37
Çizelge 3.4 : Donatı mekanik özellikleri.	38
Çizelge 3.5 : KYB karışım oranları (kg/m ³).	39
Çizelge 3.6 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarının geometriksel boyutları ve zımbalama önlemleri.	49
Çizelge 4.1 : Taze KYB deney bulguları	58
Çizelge 4.2 : Sertleşmiş KYB karışımlarının mekanik özelliklerine ait bulgular.	67
Çizelge 4.3 : 28 günlük numunelerin eğilme tokluğu değerleri.	84
Çizelge 4.4 : 90 günlük numunelerin eğilme tokluğu değerleri.	84
Çizelge 4.5 : Lif takviyeli KYB karışımlarının süneklik indeksi değerleri.	86
Çizelge 4.6 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait deney bulguları.	87
Çizelge 4.7 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait kolon yüzünden ortalama zımbalama göçme yüzeyi mesafesi ve zımbalama açısı değerleri.	106
Çizelge 4.8 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait enerji yutma kapasitesi ve süneklik indeksi değerleri.	119
Çizelge 5.1 : Hibrit lif takviyesi kullanılması durumunda şartnamelerde yer alan zımbalama dayanımı ifadeleri için öneri.	142
Çizelge 5.2 : Hibrit lif takviyesi durumu için farklı şartnamelere ait ifadeler kullanılarak tasarım zımbalama dayanımı tahmini.	143

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Kirişsiz döşeme sistemleri.	1
Şekil 1.2 : Sampoong alışveriş merkezi (Park, 2012).	3
Şekil 2.1 : Farklı zımbalama donatılı döşemelerin performansı (Einpaul ve diğ, 2016). ...	18
Şekil 2.2 : Zig-zag formunda önerilen zımbalama donatısı (Çıtıptıoğlu ve diğ, 1999).	19
Şekil 2.3 : Test numunelerinin yük-deplasman davranışları (Saatcı ve diğ, 2019).	20
Şekil 2.4 : Döşeme numunesi detayları (Harajli ve diğ, 1995).	21
Şekil 2.5 : Döşeme test numunelerinin yük-deplasman davranışları.	22
Şekil 2.6 : Döşeme numuneleri yük-deplasman davranışları (Caratelli ve diğ, 2016).	23
Şekil 3.1 : Agregaya yığınlarının gradasyon eğrileri.....	36
Şekil 3.2 : KYB üretiminde kullanılan liflerin görselleri.....	37
Şekil 3.3 : Çekme deneyi.	38
Şekil 3.4 : KYB numunelerinin üretilmesi.....	39
Şekil 3.5 : KYB karışımlarının hava içeriğinin belirlenmesi.....	40
Şekil 3.6 : Çökme-yayılma deney düzeneği.....	41
Şekil 3.7 : J-Halkası deneyinin yapılması.....	42
Şekil 3.8 : KYB numunelerinin üretilmesi.....	42
Şekil 3.9 : Basınç dayanımı deneyi.....	43
Şekil 3.10 : KYB numunelerinde elastisite modülü tayini deneyi.....	44
Şekil 3.11 : Yarmada çekme dayanımı deneyi.....	45
Şekil 3.12 : Eğilmede çekme dayanımı test düzeneği.....	46
Şekil 3.13 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarının boyut ve donatı detayları.....	48
Şekil 3.14 : Üretilen döşeme-kolon birleşim elemanlarının donatı detayları.....	50
Şekil 3.15 : Gerinim pulu montajı.....	51
Şekil 3.16 : Döşeme-kolon birleşim elemanları üretimi.	52
Şekil 3.17 : Büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları için beton dökümü.	53
Şekil 3.18 : Döşeme-kolon birleşim elemanı üretimi.	54
Şekil 3.19 : Test düzeneğinin hazırlanması.	55
Şekil 3.20 : Test ve ölçüm düzeneği.	56
Şekil 3.21 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarında çatlakların belirginleştirilmesi.	57
Şekil 4.1 : Taze KYB karışımlarının TBHA ve hava içeriği değerleri 59	59
Şekil 4.2 : Taze KYB karışımlarının yayılma çapı ve T_{500} değerleri.....	61
Şekil 4.3 : KYB karışımlarının çökme-yayılma deneyi görselleri.....	62
Şekil 4.4 : Taze KYB karışımlarının J-halkalı yayılma çapı ve ΔH değerleri.....	64
Şekil 4.5 : Taze KYB karışımlarının J-halkalı yayılma çapı ve T_{500j} değerleri.	64
Şekil 4.6 : Taze KYB karışımlarının J-halkalı çökme-yayılma deneyi görselleri.	65
Şekil 4.7 : KYB karışımlarının basınç dayanımı değerleri.	68
Şekil 4.8 : KYB karışımlarının elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri.	70
Şekil 4.9 : KYB numunelerinin elastisite modülü deneyi sonrası görselleri.	71
Şekil 4.10 : KYB karışımlarının yarmada çekme dayanımı değerleri.	72
Şekil 4.11 : KYB karışımlarının lif dağılım görselleri.....	74
Şekil 4.12 : KYB karışımlarının eğilmede çekme dayanımı değerleri.	76
Şekil 4.13 : Tekli, ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli KYB yük-deplasman eğrileri 79	79
Şekil 4.14 : Eğilme yüklemesine maruz bırakılan 7 günlük numunelerin çatlak davranışı görselleri.....	80
Şekil 4.15 : Eğilme yüklemesine maruz bırakılan 28 günlük numunelerin çatlak davranışı görselleri.....	81

Şekil 4.16 : Eğilme yüklemesine maruz bırakılan 90 günlük numunelerin çatlak davranışı görselleri.....	82
Şekil 4.17 : ASTM C1609 standardına göre eğilme tokluğu parametreleri.....	83
Şekil 4.18 : 28 günlük KYB numunelerinin eğilme tokluğu değerleri.	84
Şekil 4.19 : 90 günlük KYB numunelerinin eğilme tokluğu değerleri.	85
Şekil 4.20 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı değerleri.	89
Şekil 4.21 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı değerleri.	90
Şekil 4.22 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı değerleri.	91
Şekil 4.23 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait deneysel ve tahmin edilen zımbalama dayanımı değerleri.....	95
Şekil 4.24 : İkili lif hibridizasyonu durumunda toplam lif miktarı ve mikro lif tipinin zımbalama dayanımına etkisi.....	97
Şekil 4.25 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-açıklık ortası deplasman eğrileri.....	99
Şekil 4.26 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-rölatif yer değiştirme eğrileri.	100
Şekil 4.27 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-açıklık ortası deplasman eğrileri.	101
Şekil 4.28 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-rölatif yer değiştirme eğrileri. ..	102
Şekil 4.29 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-açıklık ortası deplasman eğrileri.	104
Şekil 4.30 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-rölatif yer değiştirme eğrileri. ..	104
Şekil 4.31 : Zımbalama kesme yüzeyi açısının belirlenmesi.	106
Şekil 4.32 : Zımbalama donatısız lifsiz ve lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının alt yüzey çatlak modelleri (Seri I).....	110
Şekil 4.33 : Seri I döşeme-kolon birleşim elemanlarında pik yük değerlerine karşılık çekme donatısında oluşan ortalama birim şekil değiştime değerleri.	110
Şekil 4.34 : Kapalı etriye donatılı lifsiz ve lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının alt yüzey çatlak modelleri (Seri II).....	114
Şekil 4.35 : Seri II döşeme-kolon birleşim elemanlarında pik yük değerlerine karşılık çekme donatısında ve kapalı etriyede oluşan birim şekil değiştime değerleri.	114
Şekil 4.36 : Kesme kaması donatılı lifsiz ve lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının alt yüzey çatlak modelleri (Seri III).	118
Şekil 4.37 : Seri III döşeme-kolon birleşim elemanlarında pik yük değerlerine karşılık çekme donatısında ve kesme kamasında oluşan birim şekil değiştime değerleri.....	118
Şekil 4.38 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi değerleri.....	120
Şekil 4.39 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi değerleri.	122
Şekil 4.40 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi değerleri.	123

Şekil 4.41 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait deneysel ve tahmin edilen enerji yutma kapasitesi değerleri.....	126
Şekil 4.42 : İkili lif hibridizasyonu durumunda toplam lif miktarı ve mikro lif tipinin enerji yutma kapasitesine etkisi.....	128
Şekil 4.43 : Süneklik indeksi hesaplanması.	128
Şekil 4.44 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerleri.....	129
Şekil 4.45 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerleri.....	131
Şekil 4.46 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerleri.....	132
Şekil 4.47 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait deneysel ve tahmin edilen süneklik indeksi değerleri.	135
Şekil 4.48 : İkili lif hibridizasyonu durumunda toplam lif miktarı ve mikro lif tipinin süneklik indeksi değerine etkisi.	137
Şekil 5.1 : Normalize edilmiş zımbalama dayanımı ile lif takviye indeksinin değişimi...	139



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

MAK	: Makro çelik lif
MİK	: Mikro çelik lif
PP	: Polipropilen lif
KYB	: Kendiliğinden yerleşen beton
GSİ	: Görsel stabilite indeksi
ΔH	: J-halkası deneyi yükseklik farkı
FRP	: Lif takviyeli polimer
DKB	: Döşeme-kolon birleşim elemanı
KAMA	: Kesme kaması
KETR	: Kapalı etriye
D_{ϕ}	: Çökme-yayılma çapı
D_j	: J-halkalı çökme-yayılma çapı
E	: Elastisite modülü
f_c	: Beton basınç dayanımı
f_{if}	: Eğilmede çekme dayanımı
P_{cr}	: İlk çatlak yükü
P_u	: Maksimum yük
δ_{cr}	: İlk çatlak yüküne karşılık gelen deplasman
δ_u	: Maksimum yüke karşılık gelen deplasman
Z.D	: Zımbalama dayanımı
TBHA	: Taze beton birim hacim ağırlığı
T_{500}	: Yayılma süresi
T_{500j}	: J-halkalı yayılma süresi
\emptyset	: Donatı çapı
LVDT	: Deplasman ölçer
d	: Döşeme faydalı yüksekliği
mm	: Milimetre
u_p	: Zımbalama çevresi
ρ_1	: Döşemede yer alan her iki yöndeki boyuna donatı oranlarının ortalaması
β	: Döşemenin uzun kenarının kısa kenarına oranı
α_s	: İç, kenar ve köşe kolon olması durumu için değişen katsayı
V_c	: Kirişsiz döşeme sistemine ait zımbalama dayanımı kapasitesi
γ	: Moment etkisi altında zımbalama dayanımını azaltan katsayı
f_{ctd}	: Betonun aksenal tasarım çekme dayanımı

- λ : Moment etkisi altında zımbalama dayanımını azaltan katsayı
 V_f : Lif oranı
 L_f : Lif uzunluğu
 d_f : Lif çapı
 b_0 : Zımbalama çevresi
 $V_f \cdot L_f / d_f$: Lif takviye indeksi



ÖZET

Doktora Tezi

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HİBRİT (KARMA) LİF TAKVİYELİ BETONDAN ÜRETİLEN DÖŞEME-KOLON BİRLEŞİM ELEMANLARINDA ZİMBALAMA PERFORMANSININ DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mahmut BAŞSÜRÜCÜ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

165+XIII sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Kirişsiz döşeme sistemleri, yapı alanlarının etkin kullanılması, düz bir tavan elde edilmesinin yanında kalıp yapımı ve beton yerleştirmesinde sağladığı kolaylık ve dolayısıyla yapım maliyetinin azalması gibi önemli avantajlara sahiptir. Ancak bu döşeme sisteminde, döşeme kalınlığının fazla olması ve yapının servis ömrü boyunca ani bir şekilde göçme riski taşınması gibi bazı sorunlar da yaşanabilmektedir. Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında, döşeme-kolon birleşim elemanlarında zımbalama performansını arttırmak için kontrol ile tekli, ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip toplam 5 adet kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımı tasarlanmıştır. Üretilen KYB karışımlarında, lif kombinasyonunun zımbalama performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, farklı tip (çelik ve sentetik), narinlik ve boyutlarda (makro ve mikro) üç tip lif kullanılmıştır. Ayrıca, KYB karışımlarının taze ve sertleşmiş özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra, sadece lif takviyeli (tekli ve hibrit) veya lif takviyesi ile birlikte farklı zımbalama donatılı (kapalı etriye ve kesme kaması) döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama performansının incelenmesi için büyük ölçekli numuneler üretilerek test edilmiştir. Sonuçta, hibrit lif takviyeli KYB'ye polipropilen (PP) lif ilavesinin işlenebilirliği mikro çelik life kıyasla, olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Hibrit lif takviyesi KYB'nin sertleşmiş özelliklerini olumlu etkilerken, özellikle üçlü hibrit lif takviyesinin en iyi performansa sahip olduğu da bulunmuştur. Aynı zamanda, hibrit lif takviyesinin döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama performansını arttırmada en etkili zımbalama önlemi olduğu belirlenmiştir. Tüm bunlara ek olarak, hibrit lif takviyeli KYB kullanılarak üretilen döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını tahmin etmek için ampirik denklemler geliştirilmiş ve farklı şartnamelerde yer alan zımbalama dayanımı tasarım ifadeleri için öneriler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kirişsiz döşeme, Zımbalama dayanımı, Hibrit lif takviyesi, Kendiliğinden yerleşen beton, Büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanı

ABSTRACT

Phd. Thesis

INVESTIGATION OF PUNCHING PERFORMANCE IN SLAB-COLUMN CONNECTION ELEMENTS PRODUCED FROM SELF-COMPACTING HYBRID FIBER REINFORCED CONCRETE AS EXPERIMENTAL AND STATISTICAL

Mahmut BAŞSÜRÜCÜ

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

165+XIII sayfa

2022

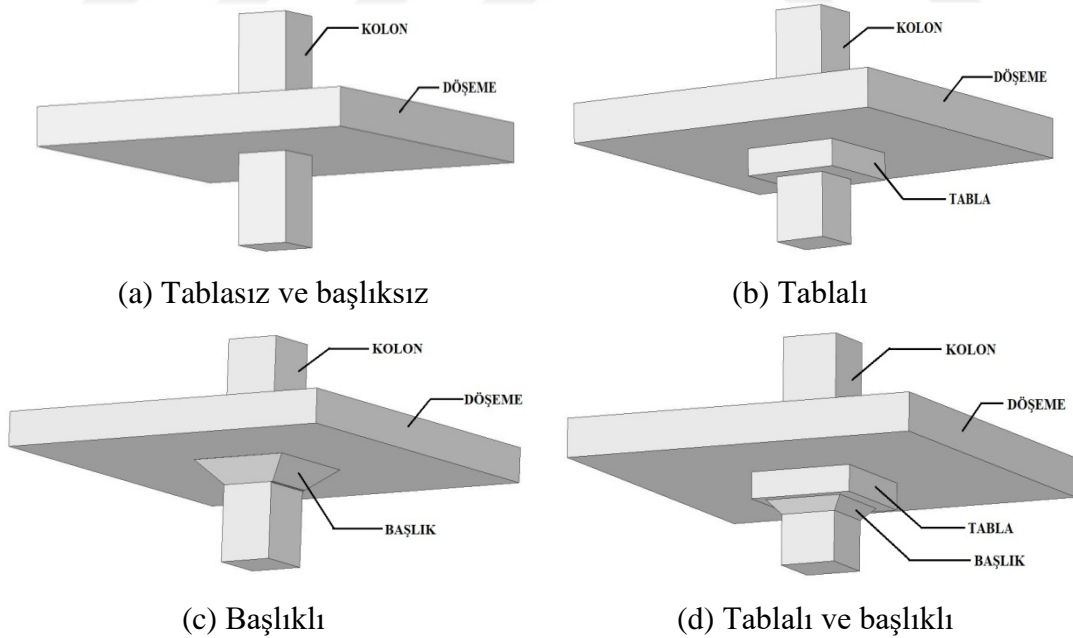
Supervisor: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Flat slab systems have important advantages such as efficient use of building areas, obtaining a flat ceiling as well as ease of formwork and concrete placement and thus resulting in reduction at construction costs. However, in this slab system, there may also be some problems, such as excessive slab thickness and the risk of sudden collapse of the structure throughout its service life. Therefore, in this thesis study, to increase the punching performance of slab-column connection elements a total of five self-compacting concrete (SCC) mixtures were designed, named control, single, binary and ternary fiber reinforced mixtures. Three types fibers having different types (steel and synthetic), aspect ratio and sizes (macro and micro) were used in SCC mixtures produced to examine the effect of fiber combination on punching performance. Moreover, the fresh and hardened properties of SCC mixtures were determined. Then, full-scale specimens were produced and tested to examine the punching performance of slab-column connection elements with only fiber (single and hybrid) or fiber and different punching reinforcement (closed stirrup and shear stud). Finally, it was determined that the addition of polypropylene (PP) fiber into hybrid fiber reinforced SCC negatively affected the workability compared to micro steel fiber reinforcement. However, hybrid fiber reinforcement positively affected the hardened properties of SCC while especially ternary hybrid fiber reinforcement had the best performance. Also, it was determined that hybrid fiber reinforcement is an effective punching measure to increase the punching performance of slab-column connection elements. In addition to all these, empirical equations have been developed to predict the punching strength of slab-column connection elements produced from hybrid fiber reinforced SCC, and suggestions have been made for the punching strength design expressions in different codes.

Keywords: Flat slab, Punching strength, Hybrid fiber reinforcement, Self-compacting concrete, Full scale slab-column connection element

1. GİRİŞ

Betonarme yapıların tasarımında kullanılan kirişli döşeme sistemlerinde kiriş yüksekliğinden dolayı kat yüksekliği önemli miktarlarda azalmaktadır. Yapıda kirişler ile beraber havalandırma ve klima kanallarının bulunması durumunda kat yüksekliğinin daha da azalarak özellikle yapıların etkin kullanım hacminin azalmasına sebep olmaktadır. Kirişsiz döşeme sistemleri özellikle otoparklarda, ticari yapılarda, otellerde ve toplantı salonları gibi estetiğin ön plana çıktığı yapılarda uygulanmaktadır. Kirişsiz döşeme sistemleri, yapı alanlarının etkin kullanılması, düz bir tavan elde edilmesi, kalıp yapımı ve beton yerleştirmesinin kolay olması ve dolayısıyla yapım maliyetinin azalması gibi önemli avantajlara sahiptir. Ancak kirişsiz döşeme sistemlerinin döşeme kalınlığının büyük olması ve döşeme ile kolon veya perde birleşimlerinde oldukça büyük moment ve kesme kuvveti etkisi altında ani ve gevrek zımbalama göçmesi sergilemesi gibi önemli mahsurları vardır (Ersoy ve Özcebe, 2001). Yapıların etkin ve faydalı bir şekilde kullanılma isteği, estetik kaygılar ve uygulama avantajlarından dolayı kirişsiz döşeme sistemleri tercih edilmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 : Kirişsiz döşeme sistemleri.

Dünyada ve ülkemizde kirişsiz döşeme sistemine sahip bazı yapıların yapım veya işletme esnasında çöktüğü veya ağır hasara uğradığıyla ilgili birçok rapor edilen vaka vardır. Bunlardan en feci olanı 1995 yılında çöken, 5 katlı betonarme kirişsiz döşeme sisteminden oluşan ve günde yaklaşık 40.000 kişinin ziyaret ettiği Güney Kore’de bulunan Sampoong Alışveriş Merkezi’dir (Şekil 1.2). Bu yapıda meydana gelen ani çökme sonucunda, yaklaşık 500 kişi ölmüş, 937 kişi ağır yaralanmış ve büyük maddi kayıplar meydana gelmiştir. Uzmanların yapmış olduğu incelemelerde, birçok tasarım ve uygulama hatası ile birlikte yapının beşinci katında kullanım amacı değişikliği nedeniyle yapıya etki eden ilave yüklerin zımbalama göçmesine neden olduğu rapor edilmiştir (Gardner ve diğ, 2002). Kirişsiz döşeme sistemine sahip 4 katlı Parnell Road binasında, dördüncü kat betonu dökümü esnasında zımbalama göçmesi gözlemlenmiştir. Yapılan incelemelerde, döşeme-kolon birleşimleri bitişiğinde zımbalama çevresini azaltan tesisat boşluklarının yer aldığı belirlenmiştir (Özden, 1998). Ankara’da Aselsan binasında ikinci katın beton dökümü esnasında düşük beton kalitesi ve birinci kat kalıp ve dikmelerinin erken alınması nedeniyle zımbalama göçmesi meydana geldiği bildirilmiştir (Ersoy ve diğ, 1981). Diğer taraftan, düşey yüklerden dolayı oluşan zımbalama göçmesinin yanında, 1989 yılındaki Loma Prieta Depremi de Kaliforniya’da bulunan Baybridge Ofis Plaza Binası’nın zımbalama göçmesinden dolayı tamamen yıkılmasına sebep olmuştur (Mitchell ve diğ, 1990). Zımbalama dayanımının yeterince sağlanamamasından kaynaklı göçmeler incelendiğinde, genellikle tasarım ve uygulama hataları, kalıpların erken sökülmesi, yapı kullanım amacı değişikliği ve deprem gibi faktörlerin birarada veya ayrı ayrı oluşturduğu etkiler nedeniyle göçmenin meydana geldiğini göstermektedir. Bu sebeple, kirişsiz döşeme sistemlerinde, döşeme-kolon birleşim bölgesinde zımbalama göçmesine neden olan kesmeye karşı dayanımın ve sünekliliğin artırılmasının oldukça önemli olduğu açıktır. Hâlihazırda, tasarımcılar tarafından zımbalama dayanımını arttırmak için döşeme-kolon birleşim bölgesinde farklı form ve düzenlemelerle özel zımbalama donatıları kullanılmaktadır. Literatürde, döşemelerde iki yönde düzenlenen pilye vb. zımbalama donatılarının, döşemelerin kirişler kadar derin olmaması ve bu nedenle zımbalama donatısının yetersiz kenetlenmesinden dolayı tam olarak etkili olamadıkları belirtilmektedir. Ayrıca, TS 500 (2000) standardında zımbalama donatısı kullanılabilmesi için döşeme kalınlığının en az 250 mm olması gerektiği ve döşeme kalınlığının 250 mm’den büyük olduğu döşemelerde dahi kullanılan zımbalama donatısının %50 etkili olabileceği vurgulanmıştır. Carpenter ve diğ. (1970) yaptıkları çalışmada, kirişsiz döşeme sistemlerinde kapalı etriye zımbalama donatısı takviyesinin daha düşük döşeme

kalınlıklarında etkili olduğunu vurgulayarak, ACI 318-63 yapı şartnamesinde bulunan döşeme kalınlık sınırı ile ilgili öneride bulunmuşlardır. Bunun yanında, kapalı etriye formunda düzenlenen zımbalama donatısının ise pilye ile kıyaslandığında daha etkili olmasına rağmen, uygulaması oldukça zordur (Ersoy ve Özcebe, 2001). Dolayısıyla kirişsiz döşeme sistemlerinde zımbalama donatısı kullanılması durumunda önemli uygulama ve kenetlenme sorunları yaşanabilmektedir (Çıtıptıoğlu ve diğ., 1999). Diğer taraftan, Landler ve Fischer (2021) zımbalama dayanımı üzerine yaptıkları çalışmada, Alman Betonarme Komitesi tarafından yayımlanan “Çelik Lif Takviyeli Beton” kılavuzunda, zımbalama donatısı ile birlikte çelik lif takviyesinin zımbalama dayanımı üzerindeki etkisi ile ilgili bölüm bulunmadığını vurgulamışlardır. Bunun sebebini, çelik liflerin ve zımbalama donatılarının kirişsiz döşeme sistemlerinde birlikte kullanılması ile ilgili yeterli düzeyde araştırma çalışmalarının ve verilerin olmamasına dayandırmaktadırlar.



(a) Zımbalama göçmesi öncesi.



(b) Zımbalama göçmesi sonrası.

Şekil 1.2 : Sampoong alışveriş merkezi (Park, 2012).

Sonuç olarak, genel anlamda ekonomik ve mimari kaygılar esas alınarak gerçekleştirilen yapı tasarımları dikkate alındığında, kirişsiz döşeme sistemlerindeki zımbalama sorunu için alternatif inovatif bir çözüm kaçınılmaz olmuştur. Bu bağlamda, inovatif bir beton türü olan lif takviyeli betonun, döşeme-kolon birleşim elemanlarındaki zımbalama sorununu önlemede önemli avantajlara sahip olacağı düşünülmektedir. Çünkü, literatürden de anlaşılacağı gibi, yapıların inşasında bu tür betonların kullanılması ile birlikte betonarme yapı elemanlarının deprem ve patlama etkisi altında yapıda açığa çıkan enerjiyi sönmüleyerek, yapının gevrek tarzda ani göçmesini önleyeceği açıktır. Bu çalışmada ise geleneksel betonda lif kullanımına kıyasla birçok avantajlara sahip olan hibrit (makro ve mikro) lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak kirişsiz

döşeme sistemlerindeki zımbalama sorununa çözüm getirilmesi amaçlanmaktadır. Böylece, az sayıda makro çatlak oluşumu ve ilerlemesi yerine çok sayıda mikro çatlak oluşumu sağlanarak kolon-döşeme birleşim elemanındaki enerji yutma kapasitesi ve süneklik kapasitesi artırılarak çok gevrek olan zımbalama göçmesi önlenecektir. Ayrıca, farklı lif kombinasyonuna sahip kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kullanılarak uygulama ve kenetlenme sorunlarına neden olan zımbalama donatılarına alternatif çözümler getirilecek ve/veya zımbalama donatısı miktarında azalma sağlanacaktır. Aynı zamanda, makro ve mikro liflerin yönlenimine bağlı olarak kesmeden kaynaklanan asal çekme gerilmelerinin karşılanmasının yanında betonun çekme dayanımının da önemli derecede artırılması ile birlikte gevrek ve ani olan zımbalama göçmesi önlenebilecektir. Tüm bunlara ilaveten, büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları deneylerinden elde edilen bulgular kullanılarak, mevcut şartnamelerdeki zımbalama dayanımı ile ilgili ampirik formüllerin hibrit (karma) lifli betonlara göre revize edilmesi önerilecektir.

Bu tez çalışmasında, tekli, ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip hibrit lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton karışımları tasarlanarak, bu karışımların işlenebilirlik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, zımbalama donatısı (kapalı etriye ve kesme kaması) yerine veya zımbalama donatısı ile birlikte farklı tiplerde (çelik ve sentetik), boyut (makro ve mikro) ve narinliklerdeki liflerin KYB'ye tekli, ikili ve üçlü harmanlama şeklinde dâhil edilmesinin zımbalama performansı üzerindeki etkisini araştırmak için büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları test edilmiştir. Deneylerden elde edilen bulgular kullanılarak, zımbalama donatısı yerine veya zımbalama donatısı ile birlikte kullanılacak en uygun lif hibridizasyonunun tespit edilmesinin yanında mevcut şartnameler esas alınarak hibrit lif takviyeli kirişsiz döşemenin davranışı ile ilgili ampirik bağıntılar geliştirilmiştir.

1.1 Tezin Amacı, Hedefleri ve Özgünlükleri

Tez çalışmasının amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Döşeme-kolon birleşim elemanlarındaki zımbalama davranışının incelenmesi amacıyla, farklı tiplerde (çelik ve sentetik), boyut ve narinliklerde (makro ve mikro) liflerin tekli, ikili ve üçlü hibridizasyonuna sahip kendiliğinden yerleşen

beton tasarlamak için EFNARC (2005)'de belirtilen işlenebilirlik testlerini (çökme-yayıma, T_{500} , ve J-halkası) esas alarak kendiliğinden yerleşme özeliğine sahip karışımlar elde etmek,

- Döşeme-kolon birleşim elemanlarının üretilmesinde kullanılacak kontrol ve lif takviyeli KYB karışımlarının mekanik (basınç, elastisite modülü, yarmada çekme, eğilmede çekme dayanımları ve tokluk) özelliklerini belirlemek,
- Farklı zımbalama donatısı (kapalı etriye ve kesme kaması) ve/veya tekli, ikili ve üçlü lif hibridizasyonu ve farklı lif oranlarına sahip KYB karışımları kullanılarak üretilen büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarını test etmek,
- Ayrıca, hibrit lif takviyeli KYB'nin yönetmelikler tarafından önerilen zımbalama donatılarına alternatif olarak kullanılabilmesi durumunu araştırmak,
- TS 500, ACI 318-19 ve BS8110 yönetmeliklerinde önerilen zımbalama tasarım dayanımı ifadelerine göre lif takviyeli KYB kullanılarak zımbalama dayanımında ne kadar bir artış sağlanabileceğini belirlemek,
- Ani ve gevrek olarak gerçekleşen zımbalama göçmesinin hibrit lif takviyeli KYB ile ne kadar sünekleştirilebileceğini tespit etmek,
- Deneysel bulguların istatistiksel değerlendirilmesinin sonucunda zımbalama davranışında en etkili olan parametreyi belirlemek, lif takviyeli KYB için zımbalama dayanımı ile ilgili ampirik formüller geliştirmek,

Bu amaçlar doğrultusunda tez çalışmasının hedefleri şu şekilde sıralanabilir:

- Ağır yüklerin etkidiği ve/veya açıklıkların çok büyük olduğu yapılarda, kirişsiz döşeme sistemlerindeki döşeme-kolon birleşim elemanlarında zımbalama donatısı yerine veya zımbalama donatısı ile birlikte hibrit lif takviyeli KYB kullanılmasıyla uygulamada karşılaşılan sorunlara çözüm getirmek,

- İlgili şartnamelerde (TS 500, ACI 318 ve BS8110) yer alan mevcut zımbalama tasarım dayanımı ile ilgili ifadeler için zımbalama donatısı yerine veya birlikte hibrit lif takviyeli KYB'nin kullanılması durumunda ilave bir ampirik bağıntı önermek,
- Zımbalama donatısı yerine veya birlikte lif takviyeli KYB'nin kullanıldığı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı ve davranışının incelenmesi ile ilgili literatüre katkı sağlamak.

Bu tez çalışmasının özgünlükleri ise şu başlıklar altında açıklanabilir:

- Uygulama ve kenetleme sorunları olan mevcut zımbalama donatılarına alternatif olarak veya birlikte inovatif bir beton olan karma lif takviyeli KYB kullanılması,
- Böylece, kendiliğinden yerleşebilirlik özelliğine sahip betonda farklı boy ve narinlikteki liflerin (makro çelik, mikro çelik ve sentetik lifler) tekli, ikili ve üçlü harmanlama şeklinde kullanılmasıyla gevrek ve ani olan zımbalama göçmesi yerine daha sünek bir göçmenin sağlanması,
- Ülkelerin şartnamelerinde yer alan zımbalama dayanımı koşulu ile ilgili ampirik bağıntılar normal geleneksel betonlara göre elde edilmiştir. Oysaki beton teknolojisindeki gelişmelerle birlikte inovasyon betonlar günümüzde büyük önem kazanmıştır. Özellikle bu tez çalışmasının da önemli özgün değerlerinden biri olan kendiliğinden yerleşen hibrit lif takviyeli beton kullanımının ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde yer alan zımbalama dayanımı tasarım ifadelerine ne oranda katkı sağlayacağı durumunun ortaya konulması ve açıklanması gereken önemli bir hipotez haline gelmektedir. Bu tez çalışmasıyla birlikte, lif takviyeli (tekli, ikili ve üçlü) KYB kullanımının, şartnamelerde yer alan mevcut zımbalama kesme dayanımı tasarım ifadelerine sağlayacağı ilave katkı ile ilgili bir ampirik bağıntı önerilmesi,
- TS 500'de zımbalama donatısıyla döşemenin zımbalama dayanımını arttırmaktan mümkün olabildiğince kaçınılması önerilmektedir. Bu bağlamda, zımbalama donatısı yerine karma lif takviyeli KYB kullanılması durumunun incelenmesi.

1.2 Tezin Ana Hatları

Yapılan tez çalışması toplam altı bölümden oluşmakta olup, yürütülen deneysel çalışmalar, incelenecek parametreler, kür süresi, numune boyutları ve sayıları Çizelge 1.1’de sunulmuştur.

Birinci bölümde, kirişsiz döşeme sistemleri, zımbalama dayanımı, tezin amacı, hedefleri ve özgünlükleri ile ana hatları verilmiştir.

İkinci bölümde, kendiliğinden yerleşen betonun tarihçesi, taze ve sertleşmiş özelliklerinin yanısıra farklı lif tiplerinin hibridizasyonun betonun işlenebilirlik ve mekanik özelliklerine etkisi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca, kirişsiz döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı ve davranışına etki eden faktörler ile ilgili detaylı bir literatür taraması yapılarak sunulmuştur.

Çizelge 1.1 : Tez çalışması akış şeması.

Taze Beton Deneyleri			
Taze Beton Birim Hacim Ağırlığı (Birim Hacim Ağırlık)			
Hava İçeriği (Hava Miktarı)			
Çökme-Yayımla Deneyi (Yayımla Çapı (D_c) ve Yayımla Süresi (T_{500}))			
J-Halkalı Çökme-Yayımla Deneyi (Yayımla Çapı (D_j), Yayımla Süresi (T_{50j}) ve Yükseklik Farkı (ΔH))			
Sertleşmiş Beton Deneyleri			
Deneyleler	Kür Süresi	Numune Boyutları	Numune Sayısı
Basınç Dayanımı	7, 28, 90 günlük	100x100x100 mm ³	3 adet
Elastisite Modülü	28 günlük	Ø100x200 mm	3 adet
Yarmada Çekme Dayanımı	7, 28, 90 günlük	Ø100x200 mm	3 adet
Eğilmede Çekme Dayanımı	7, 28, 90 günlük	75x100x400 mm ³	2 adet
Büyük Ölçekli Döşeme-Kolon Birleşim Elemanları Zımbalama Deneyleri			
Deneyleler	Kür Süresi	Numune Boyutları	Numune Sayısı
Zımbalama Dayanımı	90 günlük	1300x1300x120 mm ³	30 adet

Tez çalışması kapsamında tasarlanan tüm KYB karışımlarının üretimi için kullanılan malzeme karakteristikleri ve deneme karışımları sonucu elde edilen KYB karışım oranları ile taze ve sertleşmiş KYB karışımlarına ait özellikler ve büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları için yürütülecek testlerle ilgili detaylı bilgiler üçüncü bölümde yer almaktadır.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde, gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular verilmiş olup literatürdeki mevcut çalışmalar ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde, analitik çalışmalar yapılmış olup, hibrit lif takviyeli farklı zımbalama donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını tahmin etmek için ampirik formüller geliştirilmiştir. Ayrıca, TS 500, ACI 318-19 ve BS8110 yönetmeliklerinde önerilen zımbalama tasarım dayanımı ifadelerine katsayılar önerilmiştir.

Tezin son bölümünde ise, deneysel, istatistiksel ve analitik çalışmalardan elde edilen bulgular esas alınarak çıkarılan sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Karışım Özellikleri

İnşaat mühendisliği uygulamalarında inovatif bir beton türü olarak kullanılan KYB, 1980’li yılların sonunda Japonya’da geliştirilmiştir (Ozawa ve diğ, 1989). KYB, çok sık donatılı yapı elemanların da bile herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan, kendi ağırlığı altında kolayca yayılabilen, donatılar arasından geçebilen, terleme veya ayrışmaya uğramadan kalıbı tamamen doldurabilen beton olarak tanımlanmaktadır (Okamura, 1997). Kendiliğinden yerleşen betonun tasarımında, yüksek akma kabiliyeti, yüksek stabilite özelliği ve engeller arasından geçiş yeteneğinin fazla olması ile beraber nakliye ve yerleştirme sırasında betonun ayrışma ve terlemesini önlemek amacıyla süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı, büyük miktarda toz malzeme ve/veya viskozite artırıcılar kullanılmaktadır (Valcuende ve diğ, 2005). KYB karışımlarında süperakışkanlaştırıcı ilavesi, düşük su/bağlayıcı oranı ile hem yüksek işlenebilirlik hem de betonda dayanım artışı sağlamaktadır. Polikarboksilik asit bazlı süperakışkanlaştırıcı katkıları, çimento taneleri etrafında oluşturduğu polimer zincirler ile birbirlerini iten bir mekanizma oluşturarak, çimento tanelerinin beton içerisinde dağılımını sağlamaktadır (Sağlam, 2000). EFNARC (2005)’de KYB karışımları için ince agrega miktarının, toplam agrega ağırlığının %48-%55’i oranında ve maksimum agrega dane çapının ise 10-20 mm aralığında olması önerilmiştir. Ayrıca, KYB’de kullanılan toz malzeme (<125 µm) miktarının EFNARC (2005)’e göre 380-600 kg/m³ ve hacimce su/toz malzeme oranının ise 0.85-1.1 aralığında olması gerektiği belirtilmiştir. KYB üretiminde toz malzeme miktarının yüksek olması gerekliliği 450-500 kg/m³ aralığında çimento dozajı kullanımına sebep olmaktadır. Bu nedenle, KYB’lerin maliyetini azaltmak için toz malzeme olarak çimento ile beraber mineral katkıların (silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) kullanılması kaçınılmazdır. Literatürde, mineral katkıların KYB’lerin maliyetini azaltmakla beraber, betonun taze ve sertleşmiş özelliklerinde de önemli iyileştirmeler yaptığı ilgili birçok çalışmada mevcuttur. KYB karışımlarında uçucu kül kullanılarak çimento miktarının azaltılması ve minimum miktarda hiperakışkanlaştırıcı ilave edilmesi ile beraber düşük maliyetli KYB karışımları elde etmek için bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmada, toz malzeme olarak uçucu kül ilavesinin hedeflenen çökme-yayıma değerini elde etmek için gerekli olan hiperakışkanlaştırıcı miktarını azalttığı belirlenmiştir (Sonebi,

2004). Ayrıca, bazı araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmalarda, KYB’de farklı mineral katkıların portland çimentosu ile yer değiştirilerek kullanımının, KYB’lerin reolojik özelliklerini iyileştirdiği, hidrasyon ısısını azaltarak betonun çatlama riskini azalttığı ve dolayısıyla sadece portland çimentosu ile üretilen betonlara kıyasla dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde olumlu iyileşmelere sebep olduğu sonucuna varılmıştır (Şahmaran ve Li, 2009; Turk, 2012; Turk ve diğ 2010; Turk ve Kina, 2018; Yazicioglu ve diğ, 2006).

2.2 Tek ve Karma Lif Takviyesinin Taze Betonun İşlenebilirlik Özelliklerine Etkisi

Taze KYB’de uygun bir işlenebilirlik sağlamak için EFNARC (2002)’ye göre akıcılık, viskozite ve engeller arasından geçiş yeteneği gibi özelliklerin incelenmesi gerekmektedir. Ancak, tek bir deney ile bu özelliklerin tamamının incelenmesi mümkün değildir. Bu bağlamda, beton karışımının kendiliğinden yerleşebilirliği yanında akıcılık, viskozite ve engeller arasından geçiş yeteneğinin belirlenmesi için çökme-yayılma, T₅₀₀, J-ring, V-hunisi ve L-kutusu işlenebilirlik testleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Literatürde, tek ve karma lif takviyesinin KYB’nin taze özelliklerine etkisi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Turk ve diğ. (2019) tarafından yürütülen çalışmada, makro ve mikro çelik liflerin harmanlanarak kullanımının KYB’nin taze özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, çökme-yayılma, T₅₀₀ ve J-ring testleri yürütülmüş ve KYB karışımlarında, hacimsel olarak %0.25’den fazla mikro çelik lif kullanımının KYB’nin taze özelliklerini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Başka bir çalışmada (Turk ve diğ, 2021) ise, toplamda hacimce %1’den daha fazla lif kullanılması durumunda, farklı oranlarda makro ve mikro çelik lif kombinasyonunun KYB’nin işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, tüm çelik lif takviyeli KYB karışımlarının EFNARC (2002) tarafından önerilen işlenebilirlik şartlarını sağladığı ve KYB karışımlarında toplam lif hacmi ile mikro çelik lif miktarlarının artırılması durumunda işlenebilirliğin azaldığı bulunmuştur. Ayrıca, yüksek narinliğe sahip mikro çelik lifin, makro çelik lif ile yer değiştirildiğinde, KYB’nin akıcılık özelliğini kötüleştirdiği ve mikro çelik lifin topaklanmasının sonucu olarak KYB’nin engeller arasından geçiş yeteneğini azalttığı vurgulanmıştır. Ding ve diğ. (2020) tarafından yürütülen deneysel çalışmada, betona makro polipropilen ve makro çelik lifin tekli yada hibrit ilavesinin taze betonun kıvam ve hava içeriği özelliklerine etkisi incelenmiştir. Sonuçta, lif hacminin artırılmasıyla birlikte

betonun çökme miktarının azaldığı ve hava içeriğinin ise arttığı vurgulanmıştır. Diğer bir çalışmada (Liu ve diğ., 2019) ise, çelik ve polipropilen (PP) liflerin hibridizasyonunun kendiliğinden yerleşen hafif betonun reolojik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Gerçekleştirilen işlenebilirlik testleri (çökme-yayıma, V-hunisi, L-kutusu ve U-kutusu) sonucunda, taze KYB karışımlarının iyi akıcılık, vizkozite ve geçiş yeteneklerine sahip oldukları belirlenmiştir. Ayrıca, PP lif takviyesinin çelik life kıyasla işlenebilirlik özelliklerini daha fazla kötüleştirdiği vurgulanmıştır. Dawood ve Hamad (2015) tarafından yürütülen çalışmada, cam ve PP lif takviyesinin hafif betonun taze özelliklerine etkisini incelemek için akış ve taze birim hacimlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, lif takviyesinin betonun işlenebilirliğini azalttığı ancak cam lif takviyesinin PP life kıyasla betonun işlenebilirliğini daha fazla olumsuz bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda, cam liflerin özgül ağırlığının, PP liflere kıyasla daha fazla olmasından dolayı, cam lif takviyeli betonların taze birim hacim ağırlığının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Aslani ve diğ. (2020), çelik ve PP lif takviyesinin yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen ağır betonun taze özelliklerine etkisini incelemek için çökme-yayıma ve J-halkası deneyleri yapmışlardır. Karışımların tasarımında, çelik lif için %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 ve PP lif için ise %0.1, %0.15, %0.20 ve %0.25 olmak üzere dört farklı lif hacmi seçmişlerdir. Deneysel incelemeler sonucunda, hem çelik hem de PP lif takviyesinin KYB'nin akıcılığını ve geçiş yeteneğini azalttığını belirlemişlerdir. Chu ve diğ. (2018), çelik lif miktarı ve özelliklerinin, betonun taze özelliklerine etkisini araştırarak, karışımdaki lif hacminin artmasıyla beraber taze betonun işlenebilirliğinin azaldığını vurgulamışlardır. Ayrıca, karışımdaki lif hacmi arttıkça, taze beton için istenilen işlenebilirliği sağlamak için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı dozajının artırılması gerektiği belirtilmiştir. Mahapatra ve Barai (2018) tarafından yürütülen çalışmada, kıvrımlı çelik ve PP lif hibridizasyonunun KYB'nin taze özellikleri üzerindeki etkisi deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, KYB karışımlarında kullanılan lif hacminin artması durumunda, çökme-yayıma ve L-kutusu yükseklik değerleri azalırken, T_{500} ve V-hunisi akma sürelerinin ise arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, toplam çelik ve hibrit lif hacmi ile taze betonun özellikleri arasında iyi bir korelasyon ($r = \sqrt{R^2}$) olduğu ($R^2 \cong 0.92$) fakat PP lifin narinliğinin çelik life göre fazla olmasından dolayı toplam PP lif hacmi ile işlenebilirlik arasında iyi bir korelasyon olmadığı ($R^2 \cong 0.17$) vurgulanmıştır. Yürütülen bir diğer çalışmada (Celik ve Bingol, 2020) ise bazalt, cam ve PP lifin hacimsel olarak %0.15, %0.20, %0.25 ve %0.30 oranlarında kullanımının,

KYB'nin taze özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, KYB karışımlarına ilave edilen toplam lif hacminin artması ile birlikte karışımların işlenebilirliğinin önemli ölçüde azaldığı vurgulanmıştır. Ayrıca, en yüksek (%0.3) lif hacmi için, çökme-yayıma değeri, lif takviyesiz kontrol KYB karışımına kıyasla bazalt, cam ve PP lif için sırasıyla, %11, %14 ve %14 oranlarında azalma göstermiştir.

2.3 Tek ve Karma Lif Takviyesinin Sertleşmiş Betonun Mekanik ve Eğilme Özelliklerine Etkisi

Geleneksel betonun diğer taşıyıcı yapı malzemelerine kıyasla çok önemli avantajları olmasına rağmen, özellikle eğilme yükleri altında çekme dayanımının düşük olması ve gevrek davranış sergilemesi önemli dezavantajları olarak kabul edilmektedir. Betonun çekme dayanımı, tokluk ve süneklik özelliklerini geliştirmek için farklı tip (çelik, PP, cam, karbon vb.), boyut (makro ve mikro), narinlik ve işlevlere sahip olan lif kombinasyonları günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Beton karışımlarına lif dahil edilmesi fikri oldukça eski olup, çelik lif takviyesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ilk olarak 1950 ve 1960'lı yıllara dayanmaktadır (Hannant, 1987). Lif takviyeli beton, gelişigüzel yönlene liflerin dahil edildiği beton olarak tanımlanmaktadır (Bentur, 1989). Diğer taraftan, birden çok lif tipinin betona dahil edilmesiyle elde edilen lif takviyeli betona karma lif takviyeli beton denir. Beton karışımında makro ve mikro liflerin birlikte kullanılması şeklinde olan hibrit lif görüşü ilk kez Rossi ve diğ. (1987) tarafından önerilmiştir. Mikro liflerin mikro çatlakların büyümesini kontrol altına alarak köprülediğini ve betonda yüksek çekme dayanımına sebep olarak sonraki aşamada ise makro liflerin yapı elemanlarının hem sünekliğini hem de yük taşıma kapasitesini arttırarak, makro çatlakları kontrol ettikleri belirtilmiştir (Mobasher ve Li, 1996). Böyle bir karma lif takviyeli beton kullanılan yapı elemanında, bir tip lif varlığı diğer lif özelliklerini geliştirdiği için daha üstün mühendislik özellikleri sunmaktadır (Akçay, 2012). Yapılan çalışmalarda, karma lif takviyeli betonun daha iyi performans göstermesinin, büyük ölçüde sinerjik etkiden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Banthia ve Sappakittipakorn, 2007; Turk ve diğ., 2021). Türk ve Kına (2017) tarafından çimento esaslı kompozit karışımlarda en uygun performansa ulaşmada yetersiz olan tek lif takviyesi yerine karma lif kullanımı ile ilgili kapsamlı bir literatür araştırması yapılmış ve farklı boyut, narinlik ve işlevselliğe sahip liflerin betona dahil edilmesinin betonun özelliklerinden daha etkili yararlanabilme ve betonarme elemanların mekanik performansını arttırma imkanı sunduğu belirtilmiştir. Ayrıca, karma lif takviyesinin sağladığı avantajlardan dolayı inşaat sektörü açısından

gelecek vaat ettiği vurgulanarak, kullanım alanlarının genişletilebileceği sonucuna varılmıştır. Başka bir çalışmada (Turk ve diğ, 2021) ise, toplamda hacimce %1'den daha fazla lif kullanılması halinde, farklı oranlarda makro ve mikro çelik lif hibridizasyonunun KYB'nin dayanım ve eğilme tokluğu özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, hibrit lif takviyeli KYB numunelerinin basınç dayanımı, eğilme tokluğu ve düktilite değerlerinin, tek lif takviyeli KYB numunelerine göre daha yüksek oldukları vurgulanarak, %1.2 makro ve %0.3 mikro çelik lif takviyeli KYB karışımının mekanik ve eğilme performansı açısından en iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Başka bir çalışmada (Aslani ve diğ, 2020) ise çelik ve PP lif takviyesinin yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen ağır betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, dört farklı çelik ve PP lif hacmine göre tasarlanan karışımlardan üretilen numunelerde, lif hacmi arttıkça basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının arttığını belirlemişlerdir. Aynı zamanda, yük-deplasman eğrilerinin analizi sonucunda, lif takviyeli numunelerin, liffsiz kontrol numunelerine kıyasla daha sünek bir göçme sergiledikleri vurgulanmıştır. Dawood ve Hamad (2015) tarafından yürütülen çalışmada, cam ve PP lif takviyesinin hafif betonun sertleşmiş özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçta, %0.6 cam lif takviyeli numunelerin basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla, %51 ve %21 oranında arttığı ancak PP lif takviyeli numunelerin basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarında ise küçük bir artış olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, hibrit (%0.4 cam ve %1 PP) lif takviyeli numunelerin eğilme tokluğu performansının en iyi olduğu bulunmuştur. Chu ve diğ. (2018), çelik lif miktarı ve özelliklerinin, betonun sertleşmiş özelliklerine etkisini incelemek için basınç dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı deneyleri yürütmüştür. Sonuçta, lif hacmi arttıkça, basınç dayanımı ve elastisite modülü artarken poisson oranı değerinin ise azaldığı belirlenmiştir. Başka bir çalışmada (Felekoğlu ve diğ, 2009) ise, iki polimer esaslı mikro lif (PP ve polivinil alkol) takviyeli farklı matris yapılarına sahip kompozitlerin mekanik özellikleri (ilk çatlak dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk) incelenmiş ve lif takviyeli yüksek dayanımlı kompozitlerin eğilme dayanımı ve tokluk performansı açısından en iyi performansı sergiledikleri bulunmuştur. Celik ve Bingol (2020) ise %0.15, %0.20, %0.25 ve %0.30 oranlarında bazalt, cam ve PP lif ile takviye edilmiş KYB numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve tokluk indeksi değerlerini araştırmıştır. Sonuçta, karışımlara lif takviyesinin, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını önemli ölçüde arttırdığı fakat basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, PP lif takviyeli numunelerin tokluk değerlerinin bazalt ve cam lif

takviyeli numunelere kıyasla çok daha fazla arttığı belirlenmiştir. Diğer bir çalışmada (Turk ve diğ, 2019) ise makro ve mikro çelik liflerin harmanlanarak kullanımının KYB'nin sertleşmiş özelliklerine etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, KYB karışımlarına mikro lif takviyesinin basınç dayanımı üzerinde pozitif bir etkisi olduğu ve hibrit lif takviyeli karışımlarda yüksek miktarda makro çelik lif kullanımının sehim sertleşmesi davranışı açısından önemli olduğu vurgulanmıştır. Kim ve diğ. (2008) ise dört farklı (yüksek dayanımlı kıvrımlı ve kancalı çelik, polietilen ile polivinil alkol) lif ve iki farklı lif hacmi (%0.4 ve %1.2) kullanılarak üretilen kompozitlerin eğilme davranışlarını incelenmiştir. Sonuçta, kıvrımlı çelik lif takviyeli kompozitlerin yük taşıma kapasitesi, enerji yutma kapasitesi ve çoklu çatlak davranışı açısından en iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Başka bir çalışmada (Liu ve diğ, 2019) ise çelik ve PP liflerin hibridizasyonunun kendiliğinden yerleşen hafif betonun mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkisi incelenerek, çelik ve PP liflerin hibrit olarak kullanımının pozitif sinerjinin sonucu olarak betonun mekanik davranışını ve agrega/hamur ile lif/hamur ara yüzeylerindeki aderans davranışını iyileştirdiği vurgulanmıştır. Başka bir çalışmada (Rashiddadash ve diğ, 2014) ise farklı miktarlarda puzolanik malzeme ile çelik ve PP lif ilavesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçta, %0.75 çelik ve %0.25 PP hibrit lif takviyeli beton numunelerinin tokluk indeksi ve darbe dayanımı değerlerinin diğer hibrit lif takviyeli numunelere kıyasla daha yüksek oldukları belirlenmiştir. Ding ve diğ. (2020) ise betona farklı miktarlarda makro çelik veya PP lif takviyesinin eğilme tokluğu üzerindeki etkisi topografik analiz yöntemi yardımıyla belirlenmiştir. Sonuç olarak, hibrit lif takviyeli betonun eğilme tokluğu değeri çok önemli artışlar göstermiş ve hibrit lif takviyesinin yüksek tokluk ve dürabilite açısından gelecekte önemli bir çözüm olacağı vurgulanmıştır.

Bunun yanında, bazı çalışmalarda (Bassurucu ve Turk, 2019; Kim ve diğ, 2008; Turk ve diğ, 2021) ise makro ve mikro çelik liflerin hibrit olarak uygun oranlarda geleneksel ve kendiliğinden yerleşen betona takviye edilmesi durumunda, eğilme etkisi altındaki elemanların çoklu çatlak oluşumuna sebep olan sehim-sertleşmesi davranışı sergilediğini belirlemiştir. Ayrıca, Kina ve Turk (2021) ve Turk ve Bassurucu (2021) tarafından yürütülen çalışmalarda ise tek ve karma lif takviyesinin aderans dayanımına etkisini incelemek için bindirmeli ekli betonarme kiriş numuneleri dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçta, hibrit lif takviyeli kiriş numunelerinin aderans dayanımının, tek lif takviyeli ve lifsiz kontrol kiriş numunelerine kıyasla en yüksek olduğu bulunmuştur. Diğer taraftan, Öztekin (2019), Sahoo ve diğ. (2015) ise betonarme kirişlerde

hibrit lif takviyesinin kesme davranışı üzerindeki etkisini incelemiş ve lif takviyesiz kontrol ve tek lif takviyeli beton kullanılarak üretilen kiriş numunelerine kıyasla hibrit lif takviyesinin kesme dayanımını önemli miktarda arttırdığını vurgulamıştır.

2.4 Döşeme-Kolon Birleşim Elemanlarının Zımbalama Dayanımı

Zımbalama dayanımının yeterince sağlanamamasından kaynaklı göçmeler ve literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, 1) beton basınç dayanımı, 2) eğilme donatısı oranı, 3) döşeme-kolon boyutları ve şekli, 4) zımbalama donatısı ve tipi ile 5) betona lif takviyesi gibi faktörlerin zımbalama dayanımını etkileyen önemli unsurlar oldukları vurgulanmıştır.

2.4.1 Beton basınç dayanımı

Shin ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, döşeme-kolon numuneleri iç, kenar ve köşe birleşimleri için ayrı ayrı numuneler üreterek eksenel yük altında test etmişlerdir. Deney numunelerinde kolonlar ultra yüksek dayanımlı (200 MPa) betonla, döşemeler ise normal dayanımlı (50 MPa) betonla üretilmiştir. Deney sonuçlarında, döşemenin kısıtlayıcı etkisinin önemli olduğu iç, kenar ve köşe kolonlar için kolon beton basınç dayanımının artmasının zımbalama davranışını iyileştirdiği belirlenmiştir.

Elsayed ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş kaba agrega ve lastik parçaları içeren betonarme döşemelerin zımbalama dayanımını incelemek için 1000x1000x100 mm³ boyutlarında on iki adet test numunesi üreterek test etmiştir. Deneysel sonuçlar, üretilen betonarme döşemelerin zımbalama dayanımı, rijitlik ve tokluk değerlerinin, artan geri dönüştürülmüş kaba agrega ve lastik parçaları içeriğine bağlı olarak azaldığını göstermiştir. Bu da betona geri dönüştürülmüş kaba agrega ve lastik parçaları ilavesinin betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğine dayandırılmıştır.

Ozden ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada, kirişsiz döşemelerde zımbalama davranışını incelemek amacıyla deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Döşeme numuneleri normal ve yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilmiş ve test edilmiştir. Sonuçta, beton dayanımının zımbalama dayanımı ve döşeme rijitliği üzerinde önemli bir rolü olduğu vurgulanmıştır.

2.4.2 Eğilme donatısı oranı

Lee ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada, döşeme-kolon birleşimleri için kolon bölgesi civarında döşeme eğilme donatısı sıklığının dolayısıyla donatı oranının artırılmasının etkisini incelemişlerdir. Sonuçta, döşeme üst eğilme donatısının sıklaştırılmasının üniform donatı dağılımına sahip numunelerle kıyaslandığında daha yüksek zımbalama kesme dayanımı ve daha küçük çatlak genişliklerine sebep olduğu bulunmuştur.

Ozden ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada, kirişsiz döşemelerde eğilme donatısı oranının zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Sonuçta, eğilme donatısı oranı daha yüksek olan döşemelerin zımbalama dayanımlarının arttığı belirlenmiştir.

Sine ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, kirişsiz döşemelerin üst yüzeyine ince bir ultra yüksek performanslı lif takviyeli kompozit tabakası dökmüş ve farklı parametrelerin zımbalama performansına etkisini incelemişlerdir. Aynı kompozit tabakalı ancak farklı eğilme donatısı oranına (%0.17-0.57) sahip numunelerde, yüksek donatı oranına sahip numunelerin zımbalama dayanımının, düşük donatı oranına sahip numunelere kıyasla %10 yüksek olduğu belirlenmiştir.

Zhang ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, betonarme kolon temellerinde eğilme donatısı oranının zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçta, düşük donatı oranına sahip temel numunelerinin gevrek zımbalama göçmesine elverişli olduğu ve eğilme donatısı oranının beton örtüsünün çatlak dağılımı ve dökülmesini etkilediği vurgulanmıştır.

2.4.3 Döşeme-kolon boyutları ve şekli

Husain ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, kolon etrafında döşeme kalınlığını arttırmanın döşemelerin zımbalama performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Döşeme deney numuneleri $1500 \times 1500 \times 180 \text{ mm}^3$ boyutlarında üretilmiştir. Döşeme merkezinde $200 \times 200 \text{ mm}^2$ en kesitli ve 600 mm yüksekliğinde kolon yer almaktadır. Sonuçta, piramit

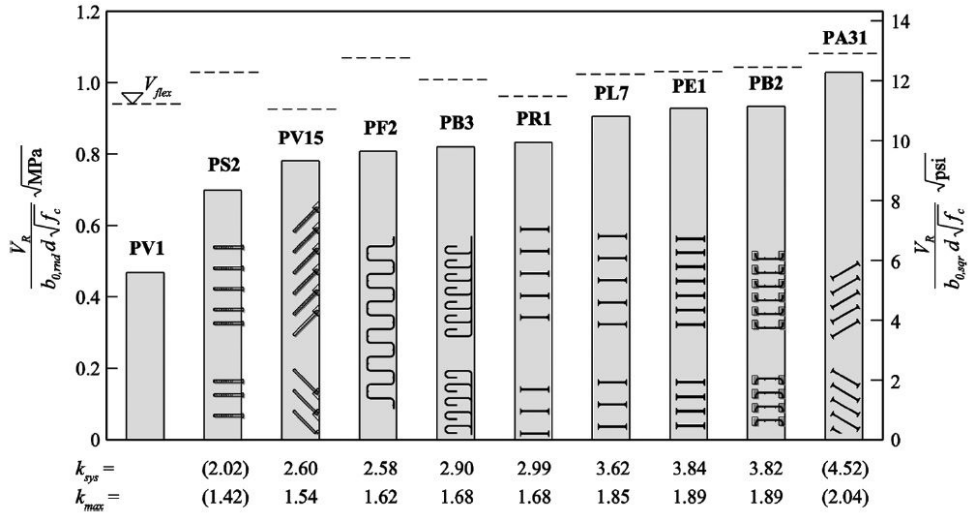
şekilli panel ile üretilen döşeme numunelerinin zımbalama kapasitesi değerinin kontrol numunesine kıyasla %130.77 oranında arttığı belirlenmiştir.

Sine ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, kirişsiz döşemelerde farklı parametrelerin zımbalama performansına etkisini incelemek için yürütülen deneysel çalışmada, yükleme çelik plakalarının şekli kare ve dikdörtgen olarak seçilmiştir. Dikdörtgen plakanın alanı kare plakadan %2 daha küçük, ancak çevresi %5 daha büyüktür. Sonuçta, kare plaka ile yüklenmiş döşemelerin zımbalama dayanımının, dikdörtgen plaka ile yüklenmiş döşemeye kıyasla %7 artış sergilediği bulunmuştur.

Bursac ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, kirişsiz döşemelerde bırakılan boşluğun eksantirik yüklü kolona göre konumunun yanı sıra kolonun şekli ve boyutlarının değiştirilmesinin zımbalama davranışına etkisini incelemişlerdir. Sonuçta, dikdörtgen (150x300 mm²) kolona sahip döşemelerin zımbalama dayanımının, kare (150x150 mm²) kolona sahip döşemelere kıyasla yaklaşık %35 arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, döşemelerde bırakılan boşluğun konumunun, döşemelerin zımbalama dayanımını etkilediği vurgulanmıştır.

2.4.4 Zımbalama donatısı

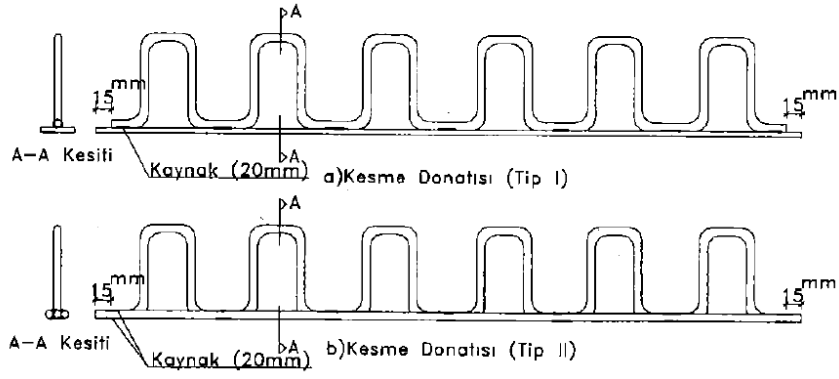
Einpaul ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, 11 farklı zımbalama donatısı takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama davranışını incelemişlerdir. Deneysel numunelerinde, döşeme geometrisi (kare) ve eğilme donatısı oranı (%1.5) sabit olarak tutulmuştur. Kesme donatısı sistemleri, farklı çift başlıklı kamalar, farklı formda etriyeler, bükülmüş donatı ve sonradan ilave edilen takviyeleri içermektedir. Tüm zımbalama donatısı takviyelerinin, döşemelerin hem zımbalama dayanımını hem de deformasyon kapasitesini arttırdığı ancak farklı performanslar sergiledikleri belirlenmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Farklı zımbalama donatılı döşemelerin performansı (Einpaul ve diğ, 2016).

Husain ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, farklı tip zımbalama donatısı (kesme kaması, açık etriye ve kapalı etriye) takviyesinin döşemelerin süneklik ve şekil değiştirme performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Döşeme deney numuneleri 1500x1500 mm² boyutlarında ve 120 mm kalınlığında üretilmiştir. Bütün döşeme numunelerinde alt ve üstte her iki doğrultuda aynı boyuna donatı kullanılmıştır. Kesme kaması, açık etriye ve kapalı etriye takviyesi, döşemelerin yük taşıma kapasitesini kontrol numunesine kıyasla sırasıyla, %53.85, %69.23 oran %87.69 arttırmıştır. Ayrıca, döşemelerin süneklik değeri ise kesme kaması takviyeli numunelerde, kontrol numunesine kıyasla %246, açık etriye takviyeli numunelerde %353 ve kapalı etriye takviyeli numunelerde ise %314 oranlarında arttığı belirlenmiştir.

Çıtıptıoğlu ve diğ. (1999) yaptıkları çalışmada, uygulamada mevcut olarak kullanılmakta olan zımbalama donatılarında kenetlenme, boyutlandırma ve uygulama sorunları yaşandığını belirterek, bu sorunların çözümüne yönelik yeni zig-zag şeklinde bir zımbalama donatısı önermişlerdir (Şekil 2.2). Önerilen zımbalama donatısının şantiyede betonarme donatının sürekli ve zig-zag formunda bükülmesi ile üretilebileceği söylenmiştir. Sonuçta, önerilen zig-zag formundaki zımbalama donatısının döşemelerin zımbalama dayanımı ve sünekliğini artırarak başarılı bir performans sergilediği vurgulanmıştır.



Şekil 2.2 : Zig-zag formunda önerilen zımbalama donatısı (Çıtıptıoğlu ve diğ, 1999).

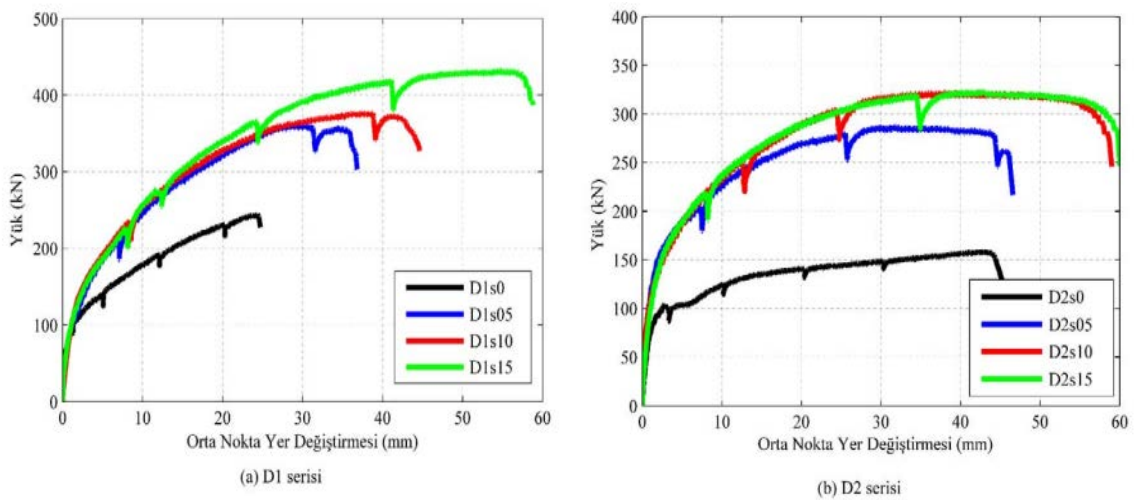
Pérez Caldentey ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada, kirişsiz döşeme sistemlerinde zımbalama donatısı olarak kullanılan kapalı etriyelerin çekme boyuna donatılarını kavramasının önemli olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, kapalı etriye zımbalama donatısı detayının beraberinde getirdiği uygulama zorlukları nedeniyle, bazı ülkelerde çekme donatısını çevrelemeden kapalı etriyeler yerleştirmenin yaygınlaştığını vurgulamışlardır. Yazarlar, dört farklı zımbalama donatısı detayına sahip sekiz döşeme numunesini test ederek, boyuna donatının döşeme-kolon birleşiminden geçmediğinde, döşemelerin zımbalama dayanımında önemli bir azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Vollum ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada, iç kolonlarda zımbalama donatısı olarak ACI tipi etriyelerin kullanımının etkinliğini belirlemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Zımbalama donatısı alanı ve etriyelerin kolon yüzeyinden uygulama uzunluğu değişken olarak seçilmiştir. Sonuçta, ACI 318 tipi etriye zımbalama donatısının, zımbalama donatısı takviyesiz numunelere kıyasla uygulamada genellikle 1.5 kat kadar zımbalama dayanımını arttırabileceği bulunmuştur.

Chen ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, kirişsiz düz betonarme döşeme ve beton dolgulu çelik boru kolondan oluşan kompozit döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca, kompozit döşeme-kolon birleşim elemanları kesme dayanımını arttırmak için kolon etrafında farklı detaylar kullanılarak tasarlanmıştır. Sonuçta, kompozit döşeme-kolon birleşim elemanlarında kolon etrafında oluşan kırılma düzlemi etkili bir şekilde kolondan uzaklaşmış ve dolayısıyla döşemenin zımbalama kapasitesini arttırdığı vurgulanmıştır.

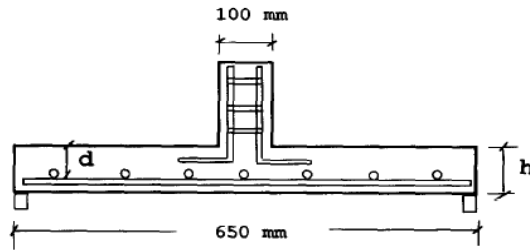
2.4.5 Lif takviyesi

Saatci ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, her iki yönde 0.004 (D1 serisi) ve 0.002 (D2 serisi) oranında farklı boyuna donatı içeren $2150 \times 2150 \times 150 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki iki grup betonarme döşemeyi, hacimce %0, %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında çelik lif takviyesi içeren farklı beton karışımlarıyla üretmişlerdir. Döşeme orta noktalarından statik yükleme altında teste tabi tutmuşlardır. Çelik lif takviyesiz ve yüksek donatı oranına sahip test numunelerinde boyuna donatılarda akma gerçekleşmeden gevrek bir zımbalama geçmesi meydana gelirken, düşük boyuna donatı oranına sahip test numunelerinde ise zımbalama olayı gerçekleşmeden önce daha sünek bir davranış sergiledikleri görülmüştür. Ayrıca, çelik lif takviyesi, her iki boyuna donatı oranına sahip test numunelerinde de zımbalama dayanımını yaklaşık olarak iki kat arttırmıştır. Fakat yüksek boyuna donatı oranına sahip döşemelerde, çelik lif takviyesi maksimum deplasman değerlerini önemli ölçüde artırırken, boyuna donatı oranı az olan döşemelerde ise maksimum deplasman değerlerinde önemli bir fark oluşturmamıştır (Şekil 2.3). Beton karışımlara dahil edilen hacimce çelik lif miktarının artırılması, D1 serisi döşemelerde zımbalama dayanımı ve deplasman değerlerini arttırmıştır. Ancak, D2 serisi döşeme numunelerinde ise hacimce lif miktarının %1'in üzerine çıkması, döşemelerin davranışını önemli ölçüde etkilememiştir. Tüm döşeme numuneleri yüklemenin son aşamalarında zımbalama konisinin oluşması sonucunda göçmüşlerdir. Sonuçta, çelik lif takviyesi, zımbalama olayından önce boyuna donatının aktığı döşemelerde yük taşıma kapasitesini belirgin bir şekilde arttırmakla beraber, deplasmanlara etkisinin sınırlı olduğu vurgulanmıştır.

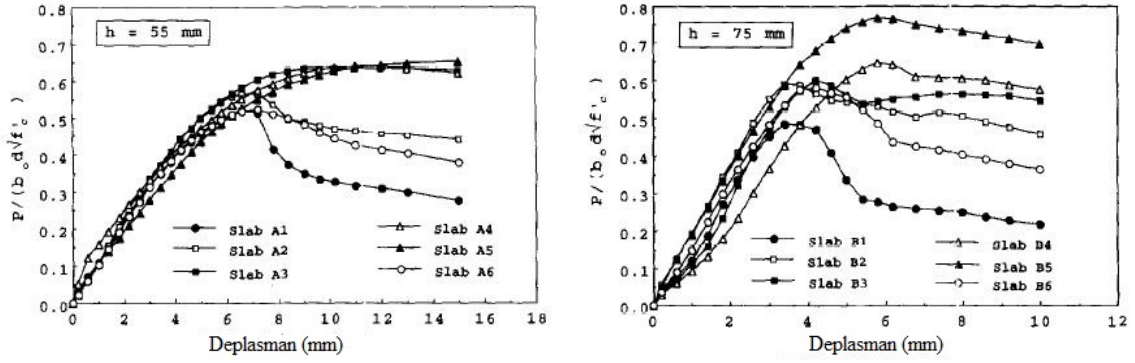


Şekil 2.3 : Test numunelerinin yük-deplasman davranışları (Saatci ve diğ, 2019).

Harajli ve diğ. (1995) yaptıkları çalışmada, döşeme-kolon birleşim elemanlarında, lif takviyesinin zımbalama dayanımına etkisini incelemek için 12 grup küçük ölçekli döşeme numunesi üreterek test etmişlerdir. Çalışmada lif tipi, miktarı, ve narinliği ile döşeme kalınlığı değişken olarak seçilmiştir. Döşeme deney numuneleri, $650 \times 650 \text{ mm}^2$ boyutlarında, döşeme kalınlığı ise 55 mm (A serisi) ve 75 mm (B serisi) olarak tasarlanmıştır (Şekil 2.4). Döşeme deney numuneleri, 40 mm genişliğindeki beton kaidelere dört kenarı boyunca mesnetlenerek döşeme merkezinde yer alan $100 \times 100 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki kare kesitli kolon aracılığıyla aksel olarak yüklenmiştir. Lif takviyesi olarak $\text{Narinlik} = \text{Boy} / \text{Çap} = 30 / .50$ ve $50 / .50$ kancalı çelik lif ve 12.5 mm uzunluğunda PP lif kullanılmıştır. Döşemelerde donatı oranı yüksek seçilerek (%1.12) tüm numunelerin eğilme dayanımına ulaşmadan önce zımbalama göçmesi göstermesi amaçlanmıştır. %0.8 çelik lif takviyeli (A3), %1 çelik lif takviyeli (A4) ve %2 çelik lif takviyeli (A5) test numuneleri dışındaki tüm döşeme numunelerinde zımbalama göçmesi görülmüştür. Döşeme numunelerinin yük deplasman davranışları Şekil 2.5’de verilmiştir. Deney sonuçlarından, %1 ve %2 çelik lif takviyeli döşeme numunelerinde zımbalama dayanımının çelik lif takviyesiz kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla %22 ve %36 arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, döşeme numunelerinin üretiminde farklı narinliğe sahip çelik liflerin aynı oranlarda karışımlara ilave edilmesi durumunda ise zımbalama dayanımı üzerinde bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir. %1 PP lif takviyeli 75 mm kalınlığa sahip (B6) döşeme test numunesinde ise zımbalama dayanımı lif takviyesiz kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %15 artmış ancak PP lif takviyeli 55 mm kalınlığa sahip (A6) test numunesinde kontrol numunesi ile aynı zımbalama dayanımı elde edilmiştir. PP lif takviyeli A6 ve B6 döşeme numunelerinin kontrol numunesine kıyasla süneklikleri artmıştır. Sonuçta, PP lif kullanılan döşeme numunelerinin sünekliği artarken, zımbalama dayanımında belirgin bir artışa sebep olmadığı ve bu sonucun daha fazla deney verisi kullanılarak desteklenmesi gerektiği de vurgulanmıştır.

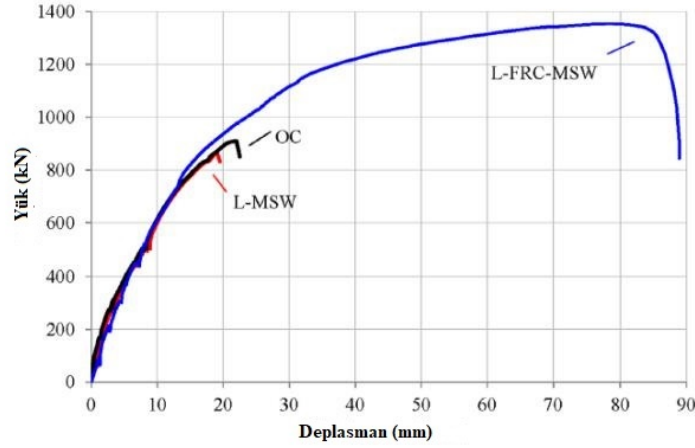


Şekil 2.4 : Döşeme numunesi detayları (Harajli ve diğ, 1995).



Şekil 2.5 : Döşeme test numunelerinin yük-deplasman davranışları (Harajli ve diğ., 1995).

Caratelli ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, döşeme gibi ince betonarme elemanlarda tekil yüklerden dolayı zımbalama etkisi görülebileceğinden bahsetmiştir. Ayrıca, zımbalama etkisiyle oluşacak göçme modunun, genellikle küçük alanlarda yoğunlaşmış ağır yük koşullarına maruz kalan ve azaltılmış bir kalınlık ile tasarlanmış köprü döşemelerinde görülebileceği de belirtilmiştir. Bu tür yapı elemanlarında uygun bir zımbalama donatısı pek uygulanabilir olmadığı için kısa lif takviyesiyle zımbalama dayanımının arttırılabileceği vurgulanmıştır. Köprü döşemelerinde, atık kül içeren beton karışımlara çelik lif ilavesinin zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştirlerdir. Bu amaçla, biri kontrol karışımı (OC) olmak üzere, hafif atık kül ilavesi ile birlikte lifsiz (L-MSW) ve lifli (L-FRC-MSW) olmak üzere toplam üç adet beton karışımı kullanılarak test numuneleri üretilmiştir. Lif takviyeli beton karışımında 30 kg/m^3 miktarında, 30 mm uzunluğunda ve 0.3 mm çapında çelik lifler ile birlikte döşeme numunelerinde 20 mm çaplı donatı kullanılmıştır. 20 mm çapındaki donatılar alt ve üstte her iki doğrultuda 200 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Deneyle 2400x2400 mm² boyutlarında ve 200 mm kalınlığındaki döşeme numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan döşeme deneyleri sonucunda çelik lif takviyeli beton kullanımının zımbalama dayanımını arttırmak için uygun ve etkili bir çözüm olduğu belirlenmiştir. Çelik lif katkılı döşeme numunesi, kontrol numunesine göre %48 oranında zımbalama dayanımı artışına sebep olmuştur. Ayrıca döşemelerin nihai deplasman ve süneklik değerlerini de belirgin bir şekilde arttırmıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Döşeme numuneleri yük-deplasman davranışları (Caratelli ve diğ, 2016).

Lee ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada, çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilen döşeme-kolon birleşim elemanlarının performansını araştırmıştır. Döşeme deney numuneleri $2300 \times 2300 \text{ mm}^2$ boyutlarında 125 ve 150 mm kalınlıklarında üretilmiştir. Kolonun etrafındaki döşeme bölgesinde hacimce %0.5 oranında çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı beton kullanılması durumunda, döşeme-kolon birleşim bölgesindeki performansların önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Lif takviyesi ile birlikte döşeme numunelerinin zımbalama dayanımı ve süneklik değerleri artarken, çatlak genişlikleri ise azalmıştır. Ayrıca, kolon etrafındaki döşeme içerisinde 2d mesafede çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı beton kullanılması durumunda, döşeme-kolon birleşim bölgesindeki zımbalama dayanımı ve davranışının önemli bir iyileşme gösterdiği vurgulanmıştır.

Barros ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, merkezi olarak yüklenmiş döşemelerde çelik lif takviyesinin zımbalama dayanımına etkisini deneysel olarak değerlendirmiştir. Bu amaçla, sekiz adet $2550 \times 2550 \times 150 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahip döşeme deney numunesi üretilmiştir. Çelik lif miktarı 0, 60, 75 ve 90 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Hedef beton basınç dayanımı ise 50 ve 70 MPa olarak belirlenmiştir. Uzunluğu 37 mm, çapı ise 0.55 mm olan çelik lifler kullanılmıştır. Deney sonuçlarından, beton basınç dayanımı 50 ve 70 MPa arasında olan ve yaklaşık %1 oranında çelik lifle takviye edilmiş numunelerde, lif tipi lif kopmasını engelleyecek biçimde seçilirse eğilme göçmesi kapasitesine ulaşabildiği ve oldukça sünek bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak üretilen döşeme numunelerinde, yük taşıma

kapasitesinin %12 ile %24, nihai deplasman değerinin ise %72 ile %102 aralığında arttığı belirlenmiştir.

Nguyen-Minh ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada, ard-germeli döşeme-kolon birleşimlerinde elik lif takviyeli betonun zımbalama davranışı ve dayanımını araştırmışlardır. Çalışma kapsamında, sekiz adet büyük ölçekli 2200x2200x150 mm boyutlarında ard-germeli döşeme numunesi üretilerek test edilmiştir. Döşeme numunelerinde lif miktarı ve beton basınç dayanımı değişken olarak seçilmiştir. Döşeme deney numuneleri farklı beton basınç dayanımlarına (26.5 ve 35.5 MPa) sahip iki gruba ayrılmıştır. Her grupta üç adet elik lif takviyeli ve bir adet elik lif takviyesiz ard-germeli döşeme numunesi kullanılmıştır. elik lif miktarı 0 ile 60 kg/m³ arasında değişkenlik göstermiştir. Sonuçta, elik lif miktarının (30-60 kg/m³) olması durumunda lifsiz kontrol numunelerine göre zımbalama dayanımının %8-26 ve enerji yutma kapasitesinin de %10-40 oranlarında arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek dayanımlı betonlarda elik lif takviyesinin, döşemelerin zımbalama dayanımına katkısının, düşük dayanımlı betonlara oranla daha düşük olduğu grlmştir.

Smadi ve Bani Yasin (2008) yaptıkları çalışmada, düşey ve yatay yükler etkisi altında elik lif takviyeli normal ve yüksek dayanımlı beton karışımları ile üretilen döşeme-kolon birleşimlerinin yapısal davranışını incelemişlerdir. Döşeme numunelerinde beton basınç dayanımı, elik lif oranı, elik lif tipi ve yükleme durumu değişken olarak seçilmiştir. Deney numuneleri iki gruptan oluşmaktadır. Birinci gruptaki numuneler 28 MPa basınç dayanımına sahip normal dayanımlı betondan, ikinci gruptaki numuneler ise 75 MPa basınç dayanımına sahip yüksek dayanımlı betondan üretilmiştir. Her serideki üç adet elik lif takviyeli numune düşey yük ve moment etkisi altında, bir adet elik lif takviyesiz kontrol numunesi sadece düşey yükler altında ve bir adet elik lif takviyesiz kontrol numunesi ise sadece moment etkisi altında test edilmiştir. Çalışmada iki tip elik lif %0.5 ve %1.0 oranlarında kullanılmıştır. Deney numunelerinin üretilmesinde 10 mm ve 14 mm çaplı donatılar kullanılmıştır. Deney sonuçlarında, narinliği 60 olan elik lif takviyesi ile üretilen normal dayanımlı betonda, lif oranının %0.5'den %1'e yükseltilmesi durumunda nihai yük %17, nihai deplasman %26, süneklik ise %30 artmıştır. Aynı lif takviyesi artışının yüksek dayanımlı betonda yapılması durumunda, nihai yük %5, nihai deplasman %8 ve süneklik ise %34 artış göstermiştir. Narinliği 75 olan elik lif takviyeli numuneler, narinliği 60 olan elik lif takviyeli numunelere kıyasla nihai yük, nihai

deplasman ve enerji yutma açısından daha iyi bir davranış sergiledikleri belirlenmiştir. Ancak narinliği 75 olan çelik lifle üretilen beton karışımında karıştırma esnasında topaklanma görülmüş bu açıdan beton karışımında liflerin homojen dağılımını sağlamanın önemli olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak, çelik lif takviyesinin döşeme-kolon birleşimlerindeki zımbalama dayanımını arttırmada pratik ve kolay bir yol olduğu belirtilmiştir.

Teixeira ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, merkezi olarak yüklenmiş çelik lif takviyeli KYB ile üretilen döşemelerin zımbalama davranışını incelemiştirlerdir. Farklı çelik lif miktarı (0, 60, 75 ve 90 kg/m³) ve beton basınç dayanımına (50 ve 70 MPa) sahip numunelerde, zımbalama göçmesinin gerçekleşmesi için tüm döşemelerde nispeten yüksek bir eğilme donatısı oranı seçilmiştir. Ayrıca, döşemelerde çelik lif takviyesinin dışında özel bir zımbalama donatısı kullanılmamıştır. Sonuçta, en yüksek lif miktarıyla (90 kg/m³) üretilen döşemelerin zımbalama dayanımında %12'den %24'e bir artış belirlenmiştir. Ayrıca bu döşeme numunelerinde eğilme göçme modu gözlemlenmiştir.

Nguyen-Minh, Rovňák ve Tran-Quoc (2012) yaptıkları çalışmada, çelik lif takviyeli beton kullanılması durumunda döşeme-kolon birleşimlerinin davranışı ve kapasitesini incelemiştir. Deneysel çalışmada, zımbalama dayanımı üzerinde çelik lif takviyesinin etkisi ve döşemelerin çatlak davranışını incelemek amacıyla toplam 12 adet küçük ölçekli deney numunesi üretilmiştir. Numunelerin üretiminde 60 mm uzunluğunda ve 0.75 mm çapında çelik lif kullanılmıştır. Deney sonuçlarında, döşeme deney numunelerinde çelik lif takviyesinin zımbalama dayanımını %39 arttırdığı, çatlak genişliğini sınır durum için %40 azalttığı ve sünekliği ise önemli miktarda arttırdığı vurgulanmıştır.

Husain ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, polimer lif takviyesinin döşemelerin süneklik ve şekil değiştirme performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. 1 adet kontrol ve 2 adet farklı oranlarda (%0.2 ve %0.3) polimer lif takviyeli beton kullanılarak üretilen döşeme numuneler test edilmiştir. Döşeme deney numuneleri 1500x1500 mm² boyutlarında ve 120 mm kalınlığında tasarlanmıştır. Lif takviyesinin döşemelerin yük taşıma kapasitesi, süneklik, rijitlik ve enerji yutma kapasitelerini arttırdığı belirlenmiştir.

Cheng ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada, üç adet büyük ölçekli (5180x5180x150) mm boyutlarına sahip döşeme-kolon birleşiminden oluşan numuneleri aksel yük ve iki aksel yanal yükler altında test etmişlerdir. Deneysel çalışmada, çelik lif takviyesinin döşeme-kolon birleşim bölgesinde görülen zımbalama dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesine etkileri araştırılmıştır. Numunelerin üretiminde çelik lif olarak 30 mm uzunluğunda 0.55 mm çapında ve 30 mm uzunluğunda 0.38 mm çapında olmak üzere iki tip lif kullanılmıştır. Her iki çelik lif tipi karışımlara %1.5 oranında katılmıştır. Diğer numune ise 2008 Amerikan Beton Enstitüsü Yapı Yönetmeliği'ne göre kesme kamaları kullanılarak üretilmiştir. Çelik lif takviyeli deney numunelerinin, kesme kamaları kullanılarak üretilen numunelere göre üstün şekil değiştirme kapasitesine sahip olduğu söylenmiştir.

Grimaldi ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada, döşeme gibi betonarme yapı elemanlarında tekil yüklerden dolayı oluşan zımbalama göçmesinin nihai kapasiteyi belirlediği belirtilerek, özellikle köprü döşemelerinde küçük alanlarda yük yoğunluğunun fazla olmasından dolayı zımbalama göçmesinin görülebildiği söylenmiştir. Bu gibi yapılarda zımbalama donatısının uygulanabilir olmadığı belirtilerek, bunun yerine kısa lif takviyesinin zımbalama dayanımına etkisi araştırılmıştır. Sonuçta, köprü döşemelerinde %0.5 oranında çelik lif takviyesinin zımbalama dayanımını yaklaşık %30-35 ve enerji sönümleme kapasitesini de önemli miktarda arttırdığı belirtilmiştir.

Ozden ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada, kirişsiz döşemelerde zımbalama davranışını incelemek amacıyla deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Döşeme numuneleri normal ve yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilip, aksel ve eksantrik yükler altında test edilmişlerdir. Çalışmada, eğilme donatısı miktarı ve çelik lif takviyesinin zımbalama dayanımına etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarında, çelik lif takviyesinin döşeme numunelerinin zımbalama dayanımı, rijitlik ve yer değiştirme kapasitelerini önemli oranda arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Vikram ve Sekar (2016) yaptıkları çalışmada, 200 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde dairesel döşeme ile 50 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde kolondan oluşan numuneleri üreterek test etmişlerdir. Deneysel çalışmada karma olarak kullanılan PP ve çelik lif takviyesinin zımbalama davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Karma lif (%0.6 PP ve %1.6 çelik) takviyeli numunenin diğer numunelere kıyasla çok daha iyi

sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ayrıca, PP liflerin döşemelerin tokluk parametresini elik liflerin ise yük taşıma kapasitesini iyileştirdiği vurgulanmıştır.

Gouveia ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, döşeme-kolon birleşim elemanları için betonda elik lif takviyesinin döşemenin zımbalama dayanımı ve deformasyon kapasitesini arttırmasıyla birlikte donatı miktarında da azaltma yapılabilceğini söylemişlerdir. Döşeme deney numunelerinin üretiminde %0, %0.5, %0.75, %1 ve %1.25 oranlarında elik lif takviyesi kullanılmıştır. Sonuçta, elik lif takviyesinin hem döşeme rijitliğini hem de yük taşıma kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, %1.25 elik lif takviyeli döşeme numunesinin yük taşıma kapasitesi, kontrol döşeme numunesine kıyasla %64 artış sergilemiştir.

Binici ve Bayrak (2005) yaptıkları çalışmada, kesme ve moment etkisi altındaki döşeme-kolon birleşim elemanlarının güçlendirilmesine yönelik bir deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Bu amaçla, döşeme-kolon birleşim bölgesi etrafında dıştan karbon lif takviyeli polimer kullanılmıştır. Önerilen bu yöntemin döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını, kontrol numunesine kıyasla yaklaşık olarak %60 arttırdığı belirlenmiştir.

Swamy ve Ali (1982) yaptıkları çalışmada, zımbalama göçmesinin aniden ortaya çıkabileceğini ve felaket sonuçlar meydana getirebileceğini belirterek, lif takviyesinin döşeme-kolon birleşim elemanlarının deformasyon ve dayanım özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçlarında, elik lif takviyesinin tüm yükleme aşamalarında deformasyonları azalttığı, zımbalama dayanımını önemli miktarda arttırdığı ve döşemenin sünek bir davranış göstererek daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir.

Sermet ve Ozdemir (2016) yaptıkları çalışmada, döşeme-kolon birleşiminden oluşan numunelerde beton karışımına elik veya PP ilave ederek zımbalama dayanımına etkisini araştırmışlardır. elik lif takviyesi kontrol numunesine kıyasla zımbalama dayanımını %21.43 ve nihai deplasmanı ise %12.43 arttırmıştır. PP lif takviyesi ise yük taşıma kapasitesini ve nihai deplasmanı, sırasıyla %15.28 ve %20.14 arttırmıştır.

Nguyen-Minh ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada, çelik lif takviyesinin kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımı ve davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çelik lif takviyesiz numunelerde ani ve oldukça gevrek bir göçme, lif takviyeli numunelerde ise daha sünek bir davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca, lif takviyesinin zımbalama dayanımını önemli miktarda arttırdığı ve döşeme-kolon birleşim elemanlarının bütünlüğünü sağladığı belirtilmiştir.

Gouveia ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, çelik lif takviyesinin betonarme döşemelerin zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla, 160 mm kalınlığında, farklı lif hacmi ve eğilme donatısı oranlarına sahip test numuneleri üretilerek test edilmiştir. Sonuçta, lif takviyeli döşemelerin zımbalama dayanımının, lif takviyesiz kontrol numunesine kıyasla yaklaşık olarak %54 arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, bazı durumlarda, lif takviyesinden dolayı döşemelerin göçme mekanizması değişmiş ve zımbalama göçmesi modundan eğilme-zımbalama göçmesi moduna dönüştüğü söylenmiştir.

Xiao ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş agregalı beton ile üretilen döşemelerin zımbalama davranışı üzerinde çelik lif takviyesi miktarının ve geri dönüştürülmüş kaba agrega değiştirme yüzdesinin etkilerini incelemiştir. Sonuçta, geri dönüştürülmüş kaba agrega değiştirme yüzdesinin artmasıyla zımbalama dayanımı, süneklik ve enerji yutma kapasitesinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, çelik liflerin beton karışımlarına dahil edilmesinin yalnızca enerji yutma kapasitesi ve zımbalama dayanımını arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda döşemenin bütünlüğünü etkili bir şekilde iyileştirdiği ve böylece tipik zımbalama göçmesi modundan eğilme-zımbalama göçme moduna dönüştüğü belirlenmiştir.

Nguyen ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, lif yönlenmesinin etkisini göz önünde bulundurarak, zımbalama donatısız yüksek performanslı çelik lif takviyeli döşemelerin zımbalama davranışı üzerine deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Yazarlar, bazı çalışmaları incelemiş ve malzemenin çatlamadan önceki dayanım kapasitesinin büyük ölçüde döküm yönüne ve döküm yöntemine dayanan liflerin yönlenmesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçta, yük-deplasman eğrilerine dayalı olarak ve eğilme donatısı ile birlikte düşünüldüğünde, beton dökümü için en iyi konumun lifin hacmine bağlı olduğu vurgulanmıştır. %0.8 lif hacmi için döşemenin merkezinden yapılan dökümün, %1.6 lif

hacminde ise döşemenin yan taraflarından yapılan döküm ile döşemelerin iyi bir zımbalama davranışı sergiledikleri belirlenmiştir.

Alvarado ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, tekrarlı yükler etkisi altında, çift kancalı uçlu (5D) çelik lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının dinamik zımbalama dayanımı performansını incelemişlerdir. Bu tür yapıların sismik yüklere maruz kaldıklarında göçmeye yatkınlıklarının, büyük ölçüde döşeme-kolon birleşimlerinin yapısal performansına bağlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, çelik lif takviyeli betonarme yapı elemanlarının tekrarlı yükler etkisi altındaki performansı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma olduğu söylenmiştir. Sonuçta, 5D seri çelik lif takviyesinin, enerjiyi dağıtmak için daha büyük bir kapasiteye sahip olduğu ve tekrarlı yükler etkisi altında zımbalama dayanımı ile rijitliği arttırdığı vurgulanmıştır.

2.4.6 Zımbalama davranışının istatistiksel ve analitik olarak incelenmesi ile ilgili çalışmalar

Harajli ve diğ. (1995) yaptıkları deneysel çalışmada, döşeme-kolon birleşim elemanlarında, lif takviyesinin zımbalama dayanımı ve davranışına etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamındaki deneylerden elde edilen bulgular ile literatürde mevcut olan deneysel veriler dikkate alınarak, döşeme-kolon birleşim elemanlarında çelik lif takviyesinden dolayı meydana gelecek zımbalama dayanımı artışını tahmin etmek amacıyla regresyon analizi yardımıyla bir ampirik denklem önerilmiştir. Önerilen tasarım denkleminin, %0.5 ve %1 lif hacmi için geleneksel lif takviyesiz döşemelere kıyasla, zımbalama dayanımında sırasıyla, %15 ve %30'a eşit bir artış öngördüğü belirlenmiştir.

Lee ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada, çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilen döşeme-kolon birleşim elemanlarının performansını deneysel olarak incelemiştir. Aynı zamanda, elde edilen deneysel sonuçlar farklı şartnamelere (ACI (2005), CSA (2004), BSI (1997) and EC2 (2004)) göre tahmin edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ACI ve CSA şartnamelerinde yer alan zımbalama dayanımı ifadelerinde, donatı oranı etkisi göz önüne alınmadığı için zımbalama dayanımının tahmininde farklılıklar olabileceği belirtilmiştir. Bu şartnamelerle, düşük donatı oranlarına sahip döşemelerin zımbalama dayanımının biraz fazla, yüksek donatı oranına sahip döşemelerin

zımbalama dayanımının ise olduğundan daha az tahmin edilebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, BSI ve EC2 şartnamelerindeki ifadelerin ise donatı oranının zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini iyi yansıttığı belirtilerek, BSI ve EC2 şartnameleri ile yapılan tahminlerin, sırasıyla, güvenli ve daha az güvenli olduğu belirlenmiştir.

Ozden ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada, kirişsiz döşemelerde zımbalama dayanımı davranışını incelemek amacıyla deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Ayrıca, deneylerden elde edilen zımbalama dayanımı, Kanada Standartlar Birliği (CSA-A23.3-04) standardında yer alan zımbalama dayanımı ifadesi ile tahmin edilerek karşılaştırılmıştır. Sonuçta, CSA standardında yer alan zımbalama dayanımı ifadesinin lif takviyesiz eksantrik yüklü döşemeler için çok iyi tahmin sağladığı fakat lif takviyesinin etkisini içermediğinden dolayı lif takviyeli döşemeler için zımbalama dayanımı tahmin değerinin deneysel sonuçlara göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Rizk ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada, Kanada şartnamesinde belirtilen zımbalama dayanımı denklemini, deneysel sonuçlardan oluşan bir veri tabanına dayalı olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada aynı zamanda, Kanada ve Avrupa şartnamelerinde yer alan zımbalama dayanımı üzerinde etkiye sahip olan çeşitli parametrelerin bir tartışması da yapılmıştır. Yine bu çalışma kapsamında, donatı oranının zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, farklı donatı oranlarına sahip 10 adet büyük ölçekli döşeme numunesi üretilip test edilerek deneysel bir program yürütülmüştür. Veritabanından elde edilen deneysel sonuçların istatistiksel analizine dayalı olarak basitleştirilmiş bir pratik zımbalama dayanımı denklemi de önerilmiştir. Donatı oranının zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek için literatürde mevcut olan 190 test verisi üzerinde istatistiksel regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan analitik çalışma, donatı oranının zımbalama dayanımı üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, önerilen denklemin Kanada Standartlar Birliği (CSA-A23.3-04) tasarım şartnamesi tarafından kullanılan mevcut zımbalama dayanımı ifadesine bir alternatif olabileceği belirtilmiştir.

Saatçi ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, farklı boyuna donatı ve çelik lif takviyesi oranı ile tasarlanmış, $2150 \times 2150 \times 150 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki betonarme döşemeleri üreterek

test etmişlerdir. Gerçekleştirilen deneyler, kritik kesme çatlağı teorisi yardımıyla analitik olarak modellenmiş ve çelik lif takviyesinin zımbalama dayanımına etkisi incelenmiştir. Sonuçta, döşemelerin zımbalama davranışını modellemede kritik kesme çatlağı teorisinin uygun olduğu belirlenmiştir.

Caratelli ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, köprü döşemelerinde, atık kül içeren beton karışımlara çelik lif ilavesinin zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca, elde edilen deneysel sonuçlar, Model (2013) şartnamesi ile tahmin edilen teorik değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçta, Model (2013) şartnamesinin geleneksel ve lif takviyeli betonlar için zımbalama dayanımı tahmininde etkili olduğu vurgulanmıştır.

Barros ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, döşemelerde çelik lif takviyesinin zımbalama dayanımına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca, döşemelerin zımbalama dayanımını tahmin etmek için Model (2013) şartnamesi tarafından önerilen en son kavramları esas alan bir analitik model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model yardımıyla, test edilen döşemelerin zımbalama dayanımının mükemmel doğruluk ve yaklaşık %5 varyasyon katsayısı ile tahmin edilebildiğini söylemişlerdir.

Nguyen-Minh, Rovňák ve Tran-Quoc (2012) yaptıkları çalışmada, çelik lif takviyesinin döşeme-kolon birleşimlerinin davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada ayrıca, döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımının tahmini için yarı ampirik yeni bir formül de sunulmuştur. Sonuçta, önerilen formülün, literatürdeki mevcut tahmin formüllerine kıyasla lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını yüksek bir doğrulukta tahmin edebildiği vurgulanmıştır.

Chetchotisak ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, çok çeşitli parametreler içeren 342 deneysel sonuçtan oluşan bir veri tabanına dayalı olarak, zımbalama donatısız döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını tahmin etmek için, çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılarak yeni bir ampirik model geliştirmişlerdir. Karşılaştırma yapmak amacıyla, yapay sinir ağı (YSA) ve uluslararası şartnameler de kullanılmıştır.

Sonuçta, çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılarak geliştirilen yaklaşımın, zımbalama dayanımının tahmini için en iyi doğruluk, basitlik ve güvenlik kombinasyonunu sağladığı belirtilmiştir.

Gouveia ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, çelik lif takviyesinin betonarme döşemelerin zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini deneysel ve analitik olarak araştırmıştır. Deneysel sonuçlar, kritik kesme çatlak teorisine dayalı bir fiziksel-mekanik model kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçta, zımbalama dayanımı tahminlerinin deneysel değerlere oldukça yakın olduğu bulunmuştur.

Faridmehr ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, tasarım şartnamelerinin betonarme kirişsiz döşemelerdeki zımbalama geçmesini engellemek için öneriler getirmesine rağmen, bazı yanlışlıklar içerdiğini belirtmiş ve mevcut tasarım ifadeleri ile getirdiği sınırlamaları incelemiştir. Ayrıca, zımbalama kesme dayanımını tahmin etmek için meta-sezgisel Bat algoritması (Bat-YSA) ile birleştirilmiş bir yapay sinir ağı kullanarak hibrit bir model geliştirmişlerdir. Bu hibrit modelin, döşeme faydalı yüksekliği, beton dayanımı, donatı oranı, donatı akma dayanımı ve kare yüklü alanın genişliği olmak üzere zımbalama dayanımını etkileyen temel parametrelerin etkisini değerlendirmek için kullanılabileceği belirtilmiştir. Sonuçta, geliştirilen Bat-YSA modelinin üstün tahmin doğruluğuna sahip olduğu bulunmuştur.

Truong ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, eğilme ve zımbalama donatısı olarak lif takviyeli polimer (FRP) donatı çubuğu kullanılan betonarme döşeme-kolon birleşimlerinin zımbalama dayanımını tahmin etmek için analitik bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada, FRP takviyesinin özelliklerini ele alan bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin doğruluğu ve güvenilirliği, FRP zımbalama takviyesi olan ve olmayan döşeme-kolon birleşim elemanları için mevcut test sonuçları, tasarım şartnameleri ve modellerle karşılaştırılarak belirlenmiştir. Sonuçta, önerilen yöntemin tüm tasarım parametreleri için tutarlı olduğu ve test sonuçlarıyla en iyi şekilde eşleştiği belirlenmiştir.

Nassif ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, makro sentetik lif kullanılarak üretilen betonarme kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımını en üst düzeye çıkarmak için bir deney tasarımı uygulaması önermişlerdir. Çalışmada iki seviyeli faktöriyel tasarım kullanılmış ve üç girdi faktörü olarak belirlenen lif miktarı, döşeme kalınlığı ve çelik donatı oranı iki düzeyde değiştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda ise 1500x1500 mm boyutlarına sahip toplam 17 adet betonarme kirişsiz döşeme üretilerek test edilmiştir. Ayrıca, ana etki grafikleri, Pareto grafiği, etkileşim grafiği, normal olasılık grafiği ve varyans analizi (ANOVA) gibi farklı istatistiksel metotlar kullanılarak, zımbalama dayanımını etkileyen önemli faktörleri belirlemek için deneysel sonuçlar analiz edilmiştir. Sonuçta, döşeme kalınlığının, lif takviyeli kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımını etkileyen en önemli faktör olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, lif takviyeli kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımını en önemli faktörler açısından tahmin etmek için doğrusal bir regresyon modeli geliştirilmiş ve bu modelin zımbalama kesme dayanımını yüksek doğrulukta tahmin edebildiği bulunmuştur.

Yukarıda verilen literatür araştırması, büyük ölçekli betonarme döşeme-kolon birleşim elemanlarında zımbalama dayanımı ve davranışını inceleyen çalışmaların büyük çoğunluğunun geleneksel betona tek lif takviyesinin zımbalama dayanımı ve davranışına etkisinin incelendiğini göstermiştir. Bu tez çalışması kapsamında, ikili ve üçlü lif hibridasyonunun zımbalama donatısı yerine veya birlikte kullanımının, KYB ile üretilen büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarında zımbalama dayanımı ve davranışına etkisinin incelenmesiyle bu alandaki literatüre katkı sağlanacaktır. Döşeme-kolon birleşim elemanlarının üretiminde beton tipi olarak ise liflerin beton içerisindeki homojen dağılımını olumsuz etkileyen vibratör kullanımı gerektirmeyen KYB seçilmiştir. Ayrıca, lif takviyeli KYB karışımlarının tasarımında, EFNARC (2002)'de belirtilen işlenebilirlik şartlarının sağlanması için toplam lif hacminin %1.25 ile sınırlandırılması gerektiği öndeneme karışımlarıyla belirlenmiştir. Diğer taraftan, topaklanmayı engellemek ve KYB karışımlarının üretiminde ön-karıştırma işlemine gerek duymamak için en yüksek mikro PP lif hacmi ise %0.25 olarak sınırlandırılmıştır.

3. MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzemeler

3.1.1 Çimento ve uçucu kül

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek olan çalışmaların tamamında, Elazığ Çimento fabrikası tarafından üretilen CEM IV 32.5 R tipi Puzolanik Çimento kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 2.95 olup, Blaine özgül yüzeyi 4380 cm²/g'dir. Uçucu kül ise termik santrallerde kömürün yakılması sonucu oluşan külün bacalarda filtre vb. toz toplama sistemleriyle toplanmasıyla elde edilen endüstriyel yan üründür. Çalışmada, İsken Sugözü Termik Santrali'nin atık külü kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda uçucu külün F sınıfı olduğu belirlenmiştir. Uçucu külün özgül ağırlığı ve Blaine özgül yüzeyi sırasıyla 2.3 ve 2690 cm²/g'dir. Çimento ve uçucu külün kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Çimento ve uçucu kül kimyasal kompozisyonları (%).

Kompozisyon	Çimento	Uçucu Kül
SiO ₂	29	63.04
Al ₂ O ₃	9.5	21.63
Fe ₂ O ₃	5.5	6.77
CaO	41	1.07
MgO	1.0	-
SO ₃	2.86	0.10
K ₂ O	0.68	-
Na ₂ O	0.60	-
Kızdırma Kaybı	-	2.6

Bu çalışma kapsamında, kullanılan uçucu külün dayanım aktivite indeksini belirlemek için puzolanik reaktivite deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde benzer işlenebilirlik özelliklerine sahip, uçucu kül içermeyen kontrol ve uçucu kül ilave edilmiş olarak tasarlanan iki farklı karışımın 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. ASTM C618 (2019) standardında F sınıfı uçucu kül dayanım aktivite indeksinin en az %75 olması gerektiği belirtilmiştir. Uçucu külün dayanım aktivite indeksi değerlerinin %75'in üzerinde olmasından dolayı deneysel çalışma için uygun olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3.2).

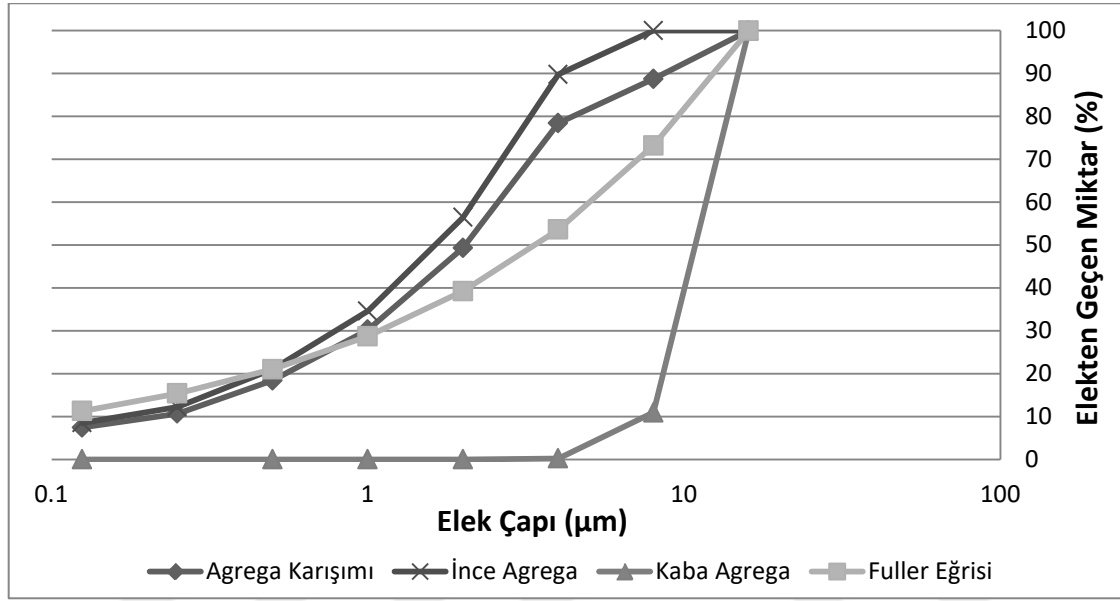
Çizelge 3.2 : Puzolanik reaktivite deneyi için tasarlanan karışım özellikleri ve deney sonuçları.

Bileşen	Kontrol Karışımı	Uçucu Kül Karışımı
Çimento	500 gr	400 gr
Uçucu Kül	-	100 gr
Su	242 ml	242 ml
İnce Agrega	1375 gr	1375 gr
Akışkanlaştırıcı	2.5 gr	2.5 gr
İşlenebilirlik Özellikleri		
Çökme-Yayıma Deneyi (mm)	550	575
T ₅₀₀ (sn)	6	5.4
Puzolanik Reaktivite Deney Sonuçları		
Basınç Dayanımı (MPa) (7 gün)	17.75	13.75
Basınç Dayanımı (MPa) (28 gün)	25.15	23.8
Dayanım Aktivite İndeksi (%) (7 gün)	-	77.46
Dayanım Aktivite İndeksi (%) (28 gün)	-	94.63

3.1.2 Agrega

Tez çalışması kapsamında beton karışımlarının üretiminde ince agregası (0-5 mm) ve kaba agregası (5-15 mm) olmak üzere, iki farklı tip agregası kullanılmıştır. İnce agregasının doygun yüzey kuru özgül ağırlığı 2.39, incelik modülü 3.77 ve su emme kapasitesi ise %2.3 olarak belirlenmiştir. Kendiliğinden yerleşen betonun toz muhtevasına katkı sağlayan ve ince agregası içeriğinde bulunan 0.125 mm'lik elekten geçen toz malzeme miktarı ise %8.53 olarak tespit edilmiştir. Kaba agregasının maksimum agregası tane boyutu 16 mm, doygun yüzey kuru özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi sırasıyla, 2.68 ve %0.40'dır. Tez çalışması kapsamında agregası yığınlarının tane dağılımlarını belirlemek amacıyla, yığınlardan çeyrekleme metoduyla malzemeler alınarak, TS 706 EN 12620 (2003)'e göre seçilen elek çaplarıyla elek analizi yapılmıştır. Bu elek analiziyle, taze beton

karışımlarında en yüksek doluluğu elde etmek, kohezifliği arttırmak, segregasyonu minimize etmek, liflerin beton matrisi içerisinde homojen dağılımını sağlamak, liflerin topaklaşmasını önlemek ve dolayısıyla gerekli işlenebilirliği elde etmek için en uygun granülometri amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ağırlıkça %80 ince agrega ve %20 oranında ise kaba agrega kullanılmış olup, agrega karışımı Şekil 3.1’de görüldüğü gibi Fuller eğrisine uygun bir tane dağılımına sahiptir.



Şekil 3.1 : Agrega yığınlarının gradasyon eğrileri.

3.1.3 Kimyasal katkı

KYB karışımlarının üretilmesinde, karışım suyu miktarını arttırmadan KYB işlenebilirlik şartlarına uygun beton üretmek ve böylece su/bağlayıcı oranını düşürmek amacıyla Sika Yapı Kimyasalları firması tarafından üretilen polikarboksilik esaslı yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yeni nesil süperakışkanlaştırıcının özgül ağırlığı 1.08 ve üretici tarafından önerilen kullanım oranı %0.5-1’dir.

3.1.4 Karışım ve kür suyu

Tez çalışması kapsamında KYB numunelerinin üretiminde ve küründe Malatya şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.5 Lifler

Tez çalışması kapsamında farklı şekil ve narinliklerde lifler kullanılmış olup iki ucu çift kancalı bir tip makro çelik lif ve iki farklı tip mikro (çelik ve PP) lif olmak üzere toplam üç farklı tip lif kullanılmıştır. KYB karışımlarında, çelik lif oranı %1 olarak sabit tutulmuş olup, bazı karışımlarda PP lif dahil edilerek toplam lif hacmi %1.25 olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan liflerin özellikleri Çizelge 3.3’de sunulmuştur. Kancalı makro çelik lif Kemerli Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş., mikro düz çelik lif Bakaert İzmit Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., sentetik polipropilen lif ise Dost Kimya Endüstriyel Ham. San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. Tez kapsamında KYB üretiminde kullanılan liflerin görselleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 : Çalışmada kullanılacak lif özellikleri.

Lif Adı	Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
Kemerix 65/60	Makro Çelik Lif	60	0.90	66	Min 1150	210	7.8
OL 13/.16	Mikro Çelik Lif	13	0.15	87	3000	200	7.2
PP	Mikro PP Lif	6	0.025	240	350	-	0.91



Şekil 3.2 : KYB üretiminde kullanılan liflerin görselleri.

3.1.6 Donatı

Tez çalışması kapsamında tasarlanan büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarının üretiminde kullanılacak olan çelik donatılara TS 708 (2010)’a göre çekme testleri yapılmıştır (Şekil 3.3). Donatıların gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.3 : Çekme deneyi.

Çizelge 3.4 : Donatı mekanik özellikleri.

Donatı Çapı (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
8	592	719
10	529	619
12	473	572

3.2 Deneysel Çalışmalar

3.2.1 KYB karışımlarının tasarımı ve oranları

Tez çalışması kapsamında, lif takviyeli KYB karışımlarında EFNARC (2005) tarafından belirlenen kendiliğinden yerleşebilirlik şartlarının sağlanması ve liflerin beton içerisinde üniform dağılımı ile birlikte özellikle mikro liflerin sebep olduğu topaklanmanın engellenmesi amacıyla deneme-yanılma yöntemi kullanılarak, KYB karışımları üretilmiştir. Ön-deneme karışımlarından sonra lifsiz kontrol, tekli makro çelik ve ikili/üçlü hibrit (makro-mikro çelik lif, makro çelik-PP lif, makro çelik-mikro çelik ve PP) olmak üzere toplam beş farklı tip KYB karışımı tasarlanmıştır. Tüm KYB karışımlarında, su/bağlayıcı oranı, puzolanik çimento, uçucu kül ve su bileşenlerinin miktarları sabit tutulmuş olup sırasıyla, 0.28, 500 kg/m³, 400 kg/m³ ve 250 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, tüm lif takviyeli KYB karışımlarında toplam çelik lif oranı %1 olarak sabit tutulmuş olup, PP lif dahil edilen karışımlarda toplam lif hacmi %1.25 olarak tasarlanmıştır. Diğer taraftan, tüm KYB karışımlarında, toplam agrega miktarının %80'i ince (0-5 mm) ve %20'si ise kaba (5-15 mm) agrega olarak kullanılmıştır. EFNARC (2005)'e göre tavsiye edilen işlenebilirlik sınır değerlerini elde etmek için, süperakışkanlaştırıcı miktarı ise bağlayıcı ağırlığının %0.5-1'i aralığında değiştirilmiştir. Tasarlanan KYB karışımlarına ait malzeme oranları Çizelge 3.5'de sunulmuştur.

Çizelge 3.5 : KYB karışım oranları (kg/m³).

Karışım No	Karışım Adı	Bağlayıcılar		Agrega		SP	Su	Lif		
		Çimento	Uçucu Kül	(0-5) mm	(5-15) mm			Makro Lif	OL13/16	PP
1	KONTROL	500	400	799.32	199.83	4.5	250	-	-	-
2	MAK1.00	500	400	777.82	194.45	5	250	78.5	-	-
3	MAK0.80_MİK0.20	500	400	777.82	194.45	5	250	62.8	14.4	-
4	MAK1.00_PP0.25	500	400	768.05	192.01	8.5	250	78.5	-	2.28
5	MAK0.80_MİK0.20_PP0.25	500	400	766.1	191.52	9	250	62.8	14.4	2.28

KYB karışımlarının etiketlendirilmesinde MAK, MİK ve PP sırasıyla, makro çelik, mikro çelik ve PP lifi temsil etmekte olup, önündeki değer ise hacimce yüzde lif takviyesi miktarını göstermektedir. Örneğin, MAK0.80_MİK0.20_PP0.25 ifadesi, KYB karışımının %0.80 makro ve %0.20 mikro çelik lifin yanı sıra %0.25 PP lif içerdiğini göstermektedir.

Taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesinde kullanılacak olan KYB karışımları, İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı/Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan 50 litre kapasiteli mikser kullanılarak üretilmiştir (Şekil 3.4). KYB karışımları üretilirken öncelikle iri agrega, ince agrega, makro çelik lif ve karışım suyunun üçte ikisi eklenerek toplam 3 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, çimento, uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcı ile karıştırılan karışım suyunun geriye kalan üçte biri miksera ilave edilerek, 7 dakika daha karıştırmaya devam edilmiştir. Mikser dönerken, uniform dağılımı sağlamak için beton karışımına kademeli olarak mikro çelik ve PP lifler eklenmiştir. Böylece, tüm KYB karışımlarına toplam 10 dakikalık karıştırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.4 : KYB numunelerinin üretilmesi.

3.2.2 Taze beton deneyleri

Tez çalışması kapsamında tasarlanan KYB karışımlarının taze özelliklerinin belirlenmesi amacıyla taze birim hacim ağırlığı, hava içeriği, çökme-yayılma ve J-halkası deneyleri yapılmıştır.

3.2.2.1 Taze betonun birim hacim ağırlığı ve hava içeriğinin belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında üretimi gerçekleştirilen KYB karışımlarına ait taze beton birim hacim ağırlığı ve hava içeriği testleri ASTM C138 (2017) standardına göre yapılmıştır. KYB karışımları mikser içerisinden homojen bir şekilde herhangi bir sıkıştırma işlemine tabi tutulmadan silindirik kap içerisine doldurulmuştur (Şekil 3.4). 7 litre kapasiteli silindirik kap, hassas terazide tartılarak karışımların taze beton birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, taze KYB karışımlarının hava içeriğini tayin etmek için ise aynı kaba manometre takılarak deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : KYB karışımlarının hava içeriğinin belirlenmesi.

3.2.2.2 Çökme-yayılma deneyi

Tez kapsamında tasarlanan ve üretilen KYB karışımlarının akıcılığı ve viskozitesi hakkında EFNARC (2002)'ye göre değerlendirme yapmak amacıyla çökme-yayılma ve T_{500} deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Bu deneyde, KYB karışımları mikserden homojen bir şekilde alınmış ve herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmaksızın Abram's konisine doldurulmuştur. Düz bir zemine yerleştirilmiş ve yüzeyi nemlendirilmiş olan tablanın üzerinde bulunan kesik koni yukarı doğru yavaşça kaldırılarak, taze KYB

karışımlarının tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. Taze KYB karışımının yayılma sırasında tabla üzerinde bulunan 500 mm çapındaki daireye ulaşmasına kadar geçen süre kronometre ile ölçülmüştür. Ayrıca, tam olarak yayılan KYB karışımları için çökme-yayılma çapı değeri, iki birbirine dik doğrultudan ölçülen çapların aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Böylece, her bir KYB karışımı için çökme-yayılma çapı (D_c) ve T_{500} değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.6 : Çökme-yayılma deney düzeneği.

3.2.2.3 J-halkası deneyi

Taze KYB karışımlarının engeller arasındaki geçiş yeteneğinin değerlendirilmesi amacıyla J-halkası deneyi gerçekleştirilmiştir. J-halkalı deney düzeneğinde, çökme-yayılma deneyinde kullanılan aparatlara ek olarak, yayılma tablası üzerinde bulunan 300 mm çapındaki daireye J-halkası yerleştirilmiştir. J-halkası üzerinde bulunan metal çubuklar arasındaki mesafe, tez çalışmasında kullanılan en uzun lif boyuna göre ayarlanmıştır (Kına, 2019).

J-halkası deneyinde, çökme-yayılma deneyine benzer olarak, Abram's konisi yukarıya doğru kaldırılarak, KYB karışımının yayılmasını tamamlaması beklenmiştir. Daha sonra, J-halkasının 4 farklı noktasının iç (H_1) ve hemen dış (H_2) tarafındaki KYB yüksekliği ölçülmüş ve böylece, iç ve dış yükseklik farklarının ortalaması J-halkası yükseklik farkı (ΔH) olarak tayin edilmiştir. Ayrıca, taze KYB karışımının 500 mm'ye ulaşmaya kadar geçen süre (T_{500j}) ve yayılma çapı (D_j) değerleri de belirlenmiştir (Şekil 3.7).



(a) Yükseklik farkının belirlenmesi.



(b) Yayılma çapının ölçülmesi.

Şekil 3.7 : J-Halkası deneyinin yapılması.

3.2.3 Sertleşmiş beton deneyleri

Taze KYB karışımları, işlenebilirlik özellikleri belirlendikten sonra kalıplara dökülmüş ve buharlaşmayı önlemek için naylon bir örtü ile sarılarak, 1 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir (Şekil 3.8). Daha sonra, KYB numuneleri kalıptan çıkarılmış ve toplamda 7, 28 ve 90 gün boyunca kür edilmiştir. Üretilen KYB karışımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Üretilen KYB numunelerinin doymun yüzey kuru hali için mekanik özellikleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.8 : KYB numunelerinin üretilmesi.

3.2.3.1 Basınç dayanımı deneyi

KYB karışımlarının basınç dayanımlarının belirlenmesi amacıyla, 100x100x100 mm³ boyutlarında küp numuneler üretilerek 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için test edilmiştir (Şekil 3.9). ASTM C39 (2018) standardına göre gerçekleştirilen basınç deneylerinde pres cihazının yükleme hızı 6 kN/sn olarak ayarlanmıştır. Her bir KYB

karışımı için 3 adet numune üretilmiş olup, elde edilen test sonuçlarının ortalaması alınarak üç farklı kür yaşı için basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.9 : Basınç dayanımı deneyi.

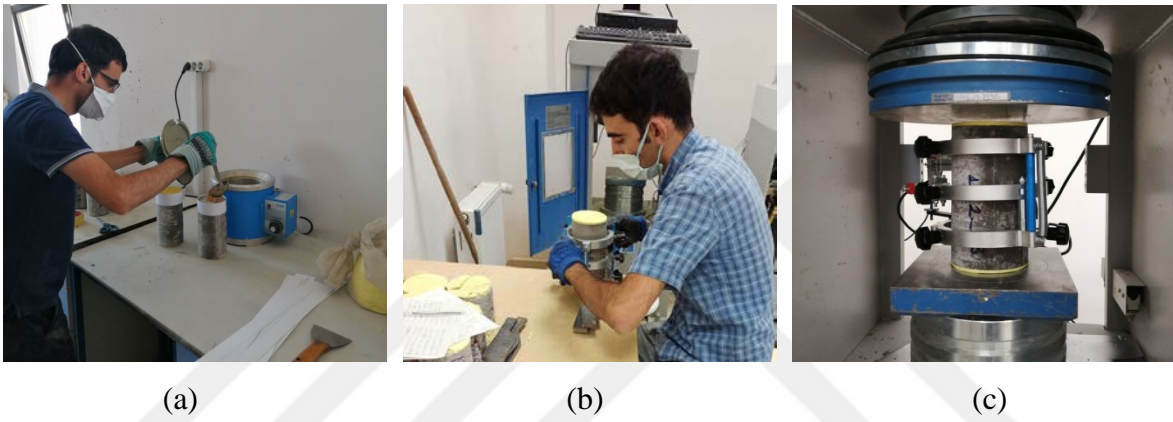
3.2.3.2 Elastisite modülü deneyi

Elastisite modülü, malzemenin şekil değiştirmeye karşı direnç kapasitesini göstermektedir. Malzemeler, yükleme altında belirli bir gerilme değerine kadar lineer elastik davranış sergilemektedir. Ancak, bu gerilme değeri aşıldığı takdirde ise malzeme elastik olmayan yani plastik davranış göstermektedir. Beton veya betonarme yapı elemanlarının tasarımında, elastik sınır içerisinde elde edilen maksimum gerilme değerinin yapı güvenliği ve insanların konforu açısından çok önemli bir rolü bulunmaktadır.

Bu çalışmada, tasarlanan KYB karışımlarının 28 günlük elastisite modülü testleri Ø100x200 mm boyutlarında silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Elastisite modülü deneyleri, ASTM C469 (2002) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, her bir KYB karışımı için üretilen 3 adet numunenin test sonuçlarının ortalaması alınarak elastisite modülü değerleri belirlenmiştir.

Elastisite modülü deneylerinde, Şekil 3.10 (a)'da görüldüğü üzere silindir numunelere uygulanacak yükün, numune kesiti boyunca üniform olarak yayılabilmesi için kükürt başlıklar dökülmüştür. Ayrıca, silindir numuneler tek eksenli basınç yüklemesine

maruz bırakılmadan önce, numune üzerine yatay ve düşey deformasyonu ölçmek için LVDT'ler bulunan kompresometre takılmıştır (Şekil 3.10 (b)). Daha sonra, silindir numuneler yükleme hızı 1.8 kN/sn olacak şekilde basınç dayanımı deneyinde olduğu gibi pres cihazına yerleştirilip yüklemeye tabi tutulmuştur (Şekil 3.10 (c)). Deney başladıktan sonra, yükleme altında silindir numunelerde oluşan yatay ve düşey deplasman değerleri anlık olarak veri toplama ünitesi yardımıyla bilgisayara aktarılmış ve Excel programı yardımıyla gerilme-birim deformasyon ilişkisi belirlenmiştir. Son olarak, ASTM C469 (2002) standardında belirtilen yöntem ile maksimum gerilmenin %40'ı esas alınarak, KYB karışımlarının elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.10 : KYB numunelerinde elastisite modülü tayini deneyi; (a) silindir numunelere kükürt başlık yapılması, (b) kompresometre montajı, (c) silindir numunelerin test edilmesi.

3.2.3.3 Yarmada çekme dayanımı deneyi

Tez çalışması kapsamında, tasarlanan her bir KYB karışımından üretilmiş olan Ø100x200 mm boyutlarındaki silindir numunelere, 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için yarmada çekme deneyleri uygulanmıştır (Şekil 3.11). KYB numunelerinin yarmada çekme deneyleri, ASTM C496 (2011) standardına uygun olarak yürütülmüş olup, pres cihazında yükleme hızı 1.7 kN/sn olacak şekilde ayarlanmıştır. Pres cihazının tablaları arasına yatırılan silindir numunelerin eksenine boyunca çizgisel yük uygulanmasını sağlamak amacıyla, numunelerin alt ve üst kısımlarına kontrplak çita aparatlar yerleştirilmiştir. Her bir KYB karışımı için 3 adet numune test sonucunun ortalaması alınarak 3 farklı kür yaşı için yarmada çekme dayanımı değerleri Denklem (3.1) yardımıyla belirlenmiştir.

$$f_{st} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.1)$$

Burada, P: kırılmaya sebep olan maksimum yükü, L: silindir numunenin boyunu, D ise silindir numunenin çapını ifade etmektedir.



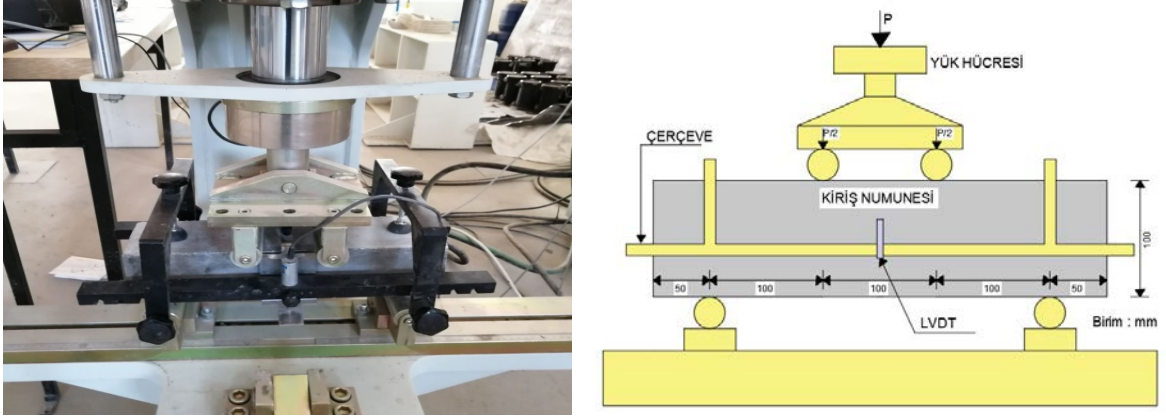
Şekil 3.11 : Yarmada çekme dayanımı deneyi.

3.2.3.4 Eğilmede çekme dayanımı deneyi

75x100x400 mm³ boyutlarındaki prizmatik KYB numunelerine, ASTM C78 (2002) standardına uygun olarak dört noktalı eğilme testi uygulanmış ve her KYB karışımından üretilen 2 adet numunenin 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için eğilme dayanımı değerleri Denklem (3.2) yardımıyla bulunmuştur. Test düzeneğinde tüm prizmatik kiriş numunelerinin net açıklığı 300 mm olarak belirlenmiştir. Dört noktalı eğilme testinde 300 kN kapasiteli servo-kontrollü bir yük çerçevesi kullanılmış olup, yükleme hızı ise 0.003 mm/sn olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, açıklık ortasındaki deplasmanı ölçmek için, kiriş numunelerine 4 adet vida yardımıyla bir çerçeve aparatı takılmış ve bu çerçeve aparatının ön ve arka kısmına toplam 2 adet LVDT yerleştirilmiştir (Şekil 3.12). Uygulanan düşey yük ve açıklık ortası deplasman değerleri, veri toplama sistemi aracılığıyla numunelere ait yük-deplasman eğrilerinin çizilmesi için testler esnasında anlık olarak bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir.

$$f_{ft} = \frac{PL}{bh^2} \quad (3.2)$$

Burada, P: kırılmaya sebep olan maksimum yükü, L: kiriş net açıklığını, b: kiriş kesitinin enini, h ise kiriş kesit yüksekliğini ifade etmektedir.



Şekil 3.12 : Eğilmede çekme dayanımı test düzeneği.

Tüm bunlara ek olarak, lif takviyeli KYB karışımlarının pik yük sonrası davranışı üzerinde lif kombinasyonunun etkisini değerlendirmek amacıyla her bir KYB karışımının eğilme tokluğu değeri belirlenmiştir. Eğilme tokluğunun değerlendirilmesinde kullanılan ASTM C1018 (1997) standardı yerini ASTM C1609 (2005) standardına bırakmıştır. Çünkü, birçok çalışmada (Turk ve diğ., 2021; Yu ve diğ., 2015), yük-deplasman diyagramında ASTM C1018 (1997)'de belirtilen ilk çatlak noktasını doğru belirlemenin oldukça zor olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda bu standardın hibrit lif takviyeli kompozitler gibi inovasyon betonlarda yetersiz kaldığı vurgulanmıştır (Turk ve diğ., 2021). Bu yüzden, bu tez çalışması kapsamında KYB karışımlarının eğilme tokluğu parametrelerinin değerlendirilmesinde, $L/150$ (2 mm) açıklık ortası deplasmanına kadar olan yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanı dikkate alan ASTM C1609 (2005) standardı esas alınmıştır.

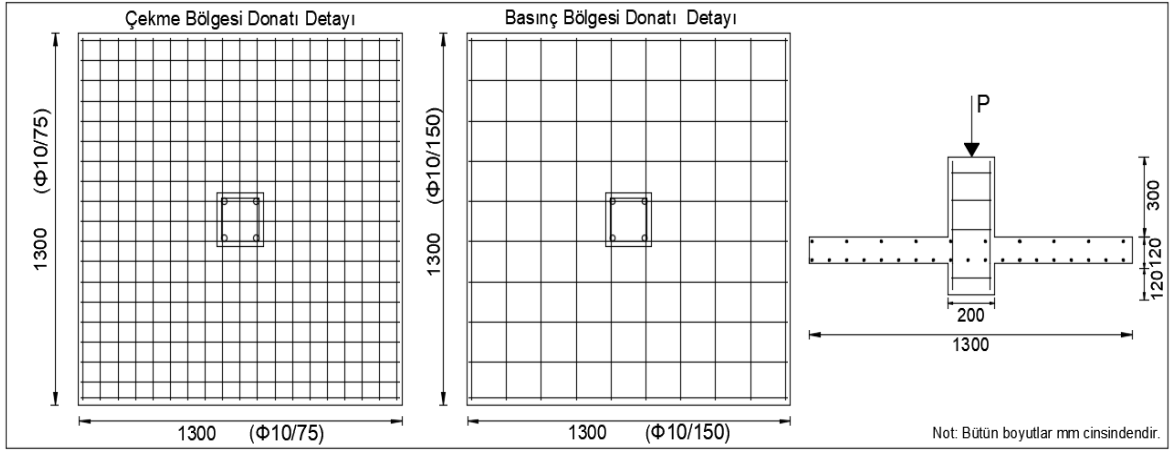
3.2.4 Büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları zımbalama deneyleri

3.2.4.1 Döşeme-kolon birleşim elemanlarının tasarımı ve üretilmesi

Bu tez çalışması kapsamında, KYB'ye hibrit lif takviyesinin ve/veya farklı zımbalama donatılarının (kesme kaması ve kapalı etriye) büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı ve davranışı üzerindeki etkilerini incelemek için her bir karışımdan 2 adet olmak üzere toplam 30 adet numune üretilmiş ve test edilmiştir. Test numuneleri Seri I, Seri II ve Seri III olmak üzere toplam 3 seriden oluşmaktadır. Seri I, 1 adet lifsiz kontrol, 1 adet sadece makro çelik lifden oluşan tek lif takviyeli, 2 adet makro çelik lif ile birlikte mikro çelik veya PP lifden oluşan ikili hibrit

takviyeli ve 1 adet makro çelik, mikro çelik ve PP lifden oluşan üçlü hibrit lif takviyeli olmak üzere toplam 5 adet numuneden oluşmaktadır. Seri II, 1 adet sadece kapalı etriye takviyeli kontrol ve 4 adet de Seri I'de belirtilen lif kombinasyonu takviyelerinin yanında kapalı etriye de içeren numunelerden oluşmaktadır. Seri III ise, 1 adet sadece kesme kaması takviyeli kontrol ve 4 adet de Seri I'de belirtilen lif kombinasyonu takviyelerinin yanında kesme kaması da içeren numunelerden oluşmaktadır. Döşeme-kolon birleşim elemanlarının etiketlenmesi, taze ve sertleşmiş KYB karışımlarının özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan farklı olarak DKB, KETR ve KAMA şeklinde olup, bu ifadeler sırasıyla, döşeme-kolon birleşimi, kapalı etriye ve kesme kamasını ifade etmektedir. Örneğin, DKB_MAK0.8_MİK0.2_PP0.25_KAMA, %0.8 makro çelik, %0.2 mikro çelik, %0.25 PP lif ve kesme kaması takviyeli üretilen döşeme-kolon birleşim elemanını temsil etmektedir.

Döşeme-kolon birleşim elemanlarının geometrik boyutlarına gelince, kare planlı döşemenin kenar uzunluğu 1300 mm ve kalınlığı ise 120 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca döşemenin üst ve alt tarafındaki kolon 200x200 mm enkesit boyutlarına sahip iken yükseklikleri ise üst kolon ve alt kolon için sırasıyla 300 mm ve 120 mm olarak belirlenmiştir. Üretilen döşeme-kolon birleşim elemanlarının boyutları, zımbalama önlemi ve donatı detayları Şekil 3.13 ve Çizelge 3.6'da sunulmuştur. Tüm döşeme-kolon birleşim elemanlarının alt ve üst donatı detayları her iki doğrultuda benzer olarak tasarlanmıştır. Döşemede eğilme donatısı olarak altta $\varnothing 10/75$ mm çekme ve üstte $\varnothing 10/150$ mm basınç donatısı her iki doğrultu için 20 mm pas payı ile kullanılmıştır (Şekil 3.14(a-b)). Alt ve üst kolonlar ise $4\varnothing 12$ mm boyuna donatı ve $\varnothing 8/100$ mm etriye donatısına sahiptir (Şekil 3.14(c)). Döşeme-kolon birleşim elemanlarının tasarımında, test numunelerinin eğilme dayanımının zımbalama dayanımından yüksek olması için çekme donatısı olarak %1.1 gibi yüksek bir donatı oranı seçilmiştir. Çünkü, literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, döşeme-kolon birleşim elemanlarında donatı oranının Harajli ve diğ., (1995) tarafından yapılan çalışmada %1.12 ve Binici ve Bayrak (2005) tarafından yapılan çalışmada ise %0.5 ile %1.2 aralığında olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda, test numunelerinin zımbalama dayanımını azaltmak için yapı kod ve şartnamelerinde belirtilen kolon boyutlarından daha küçük boyutlar belirlenmiştir.



Şekil 3.13 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarının boyut ve donatı detayları.

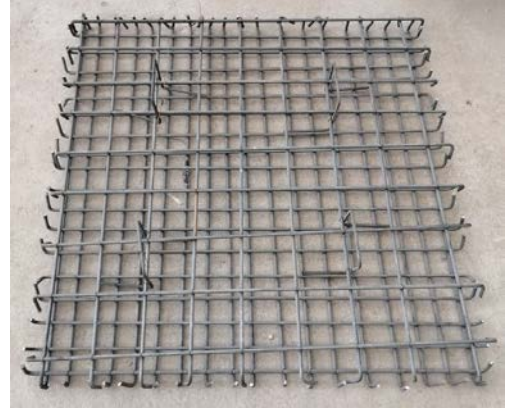
Zımbalama donatısı takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının tasarımında, zımbalama donatısı olarak kapalı etriye ve kesme kaması kullanılmıştır. Kapalı etriye, alt ve üst döşeme donatılarını sarmak şartıyla kolonun dört yüzünden başlayan ve kolon yüzlerine dik olan her doğrultu için 6 adet olmak üzere toplam 24 adet $\text{Ø}8/60$ mm etriye kullanılmıştır (Şekil 3.14(d)). Kesme kaması olarak ise 30 mm çapında dairesel çelik başlıklı 6 adet $\text{Ø}12$ mm donatı çubuğu çelik bir lamaya 60 mm aralıklarla kaynak edilmiş ve böylece 460 mm uzunluğunda ve 80 mm yüksekliğinde kesme kaması şeritleri üretilmiştir. Daha sonra, her bir numune için her bir kolon yüzüne dik doğrultuda 2 adet olmak üzere toplam 8 adet kesme kaması şeridi yerleştirilmiştir (Şekil 3.14(e)).

Çizelge 3.6 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarının geometriksel boyutları ve zımbalama önlemleri.

Seri	Numuneler	Döşeme Boyutları (L ₁ xL ₂ xh) (mm ³)	Üst Kolon Boyutları (L ₁ xL ₂ xh) (mm ³)	Alt Kolon Boyutları (L ₁ xL ₂ xh) (mm ³)	Zımbalama Önlemleri
I	DKB_KONTROL	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	-
	DKB_MAK1.00	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Makro çelik lif
	DKB_MAK0.80_MİK0.20	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Makro ve mikro çelik lif
	DKB_MAK1.00_PP0.25	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Makro çelik ve mikro PP lif
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Makro çelik, mikro çelik ve PP lif
II	DKB_KONTROL_KETR	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kapalı etriye
	DKB_MAK1.00_KETR	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kapalı etriye ve makro çelik lif
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_KETR	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kapalı etriye, makro ve mikro çelik lif
	DKB_MAK1.00_PP0.25_KETR	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kapalı etriye, makro çelik ve mikro PP lif
III	DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KETR	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kapalı etriye, Makro çelik, mikro çelik ve PP lif
	DKB_KONTROL_KAMA	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kesme kaması
	DKB_MAK1.00_KAMA	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kesme kaması ve makro çelik lif
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_KAMA	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kesme kaması, makro ve mikro çelik lif
	DKB_MAK1.00_PP0.25_KAMA	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kesme kaması, makro çelik ve mikro PP lif
DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KAMA	1300x1300x120	200x200x300	200x200x120	Kesme kaması, Makro çelik, mikro çelik ve PP lif	



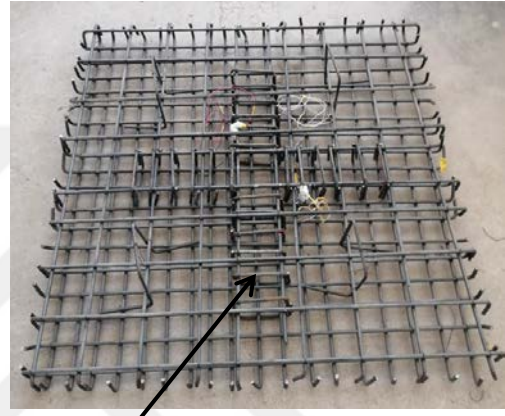
(a)



(b)



(c)



KAPALI ETRİYE (d)



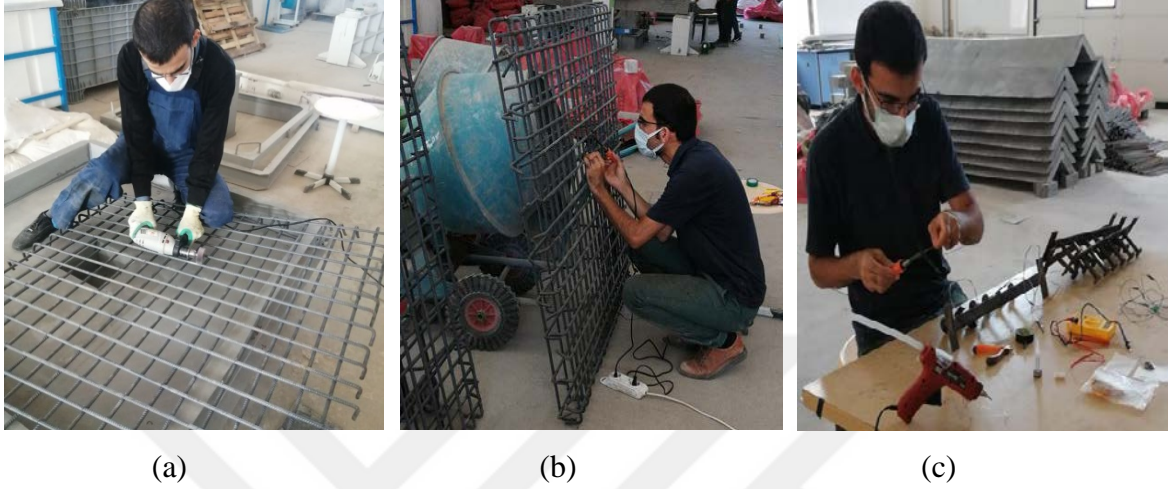
(e)



KESME KAMASI

Şekil 3.14 : Üretilen döşeme-kolon birleşim elemanlarının donatı detayları; (a) eğilme donatısı hazırlanması, (b) kolon donatı detayının hazırlanması, (c) zımbalama donatısız numuneler, (d) kapalı etriyeli numuneler, (e) kesme kamalı numuneler.

Döşeme-kolon birleşim elemanlarının test edilmesi esnasında, döşeme çekme donatısı ve zımbalama donatısında oluşan birim şekil değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla beton dökümünden önce donatılar üzerine strain gauge (gerinim pulu) montajı yapılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : Gerinim pulu montajı; (a) donatı yüzeyinin hazırlanması, (b) çekme donatısı için gerinim pulu montajı, (c) kesme kaması için gerinim pulu montajı.

Betonarme döşeme-kolon birleşim elemanlarının üretimi için rijit çelik profil ve plakalardan oluşan 2 adet çelik kalıp sistemi özel olarak imal edilmiştir (Şekil 3.16 (a)). Her beton dökümünden önce kalıp plaka ve profil birleşim yerlerinden KYB'nin sızmasını engellemek için kalıplara silikon çekilerek geçirimsizlikleri sağlanmıştır (Şekil 3.16 (b)). Ayrıca, kalıptan çıkarma işlemini kolaylaştırmak için kalıp yağı kullanılmıştır. Çelik kalıpların hazırlanma işlemi tamamlandıktan sonra önceden hazırlanan döşeme alt donatılarına plastik pas payı aparatları takılarak eğilme donatıları çelik kalıp içerisine yerleştirilmiş ve daha sonra kolon donatıları bağlanmıştır. (Şekil 3.16 (c-d)).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.16 : Döşeme-kolon birleşim elemanları üretimi; (a) çelik kalıp üretimi (alt görünüş), (b) kalıplara silikon çekilmesi (üst görünüş), (c) kalıpların yağlanması, (d) donatının kalıplara yerleştirilmesi.

Büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarının üretilmesinde kullanılacak olan KYB karışımları, İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı/Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan 350 litre kapasiteli mikser kullanılarak üretilmiştir. KYB karışımları üretilirken öncelikle iri agrega, ince agrega, makro çelik lif ve karışım suyunun üçte ikisi eklenerek toplam 3 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, çimento, uçucu kül ve süperakışlanlaştırıcı ile karıştırılan karışım suyunun geriye kalan üçte biri miksera ilave edilerek, 20 dakika daha karıştırmaya devam edilmiştir. Mikser dönerken, uniform dağılımı sağlamak ve topaklanmayı önlemek için beton karışımına kademeli olarak mikro çelik ve PP lifler eklenmiştir. Böylece, tüm KYB karışımlarına toplam 23 dakikalık karıştırma işlemi uygulanmıştır. Üretilen KYB karışımları kendiliğinden yerleşebilirlik

özelliğine sahip olduğu için sıkıştırma işlemi yapılmadan çelik kalıba yerleştirilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : Büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları için beton dökümü.

Döşeme-kolon birleşim elemanlarının üretilmesinde, kirişsiz döşeme sistemlerinin uygulamalarında olduğu gibi ilk olarak alt kolon ve döşeme monolitik olarak, daha sonra ise üst kolon dökülerek döşeme-kolon birleşim elemanlarının üretimi tamamlanmıştır (Şekil 3.18 (a-c)). Daha sonra, test numuneleri ıslak çuval bezlerle sarılarak plastik naylon örtü altında 90 gün boyunca kür edilmiştir (Şekil 3.18 (d-e)). Döşeme-kolon birleşim elemanları, beton dökümünden 7 gün sonra 15 tonluk gezer vinç yardımıyla numunelere yerleştirilen çelik kancalardan tutularak çelik kalıptan çıkarılmıştır. Ayrıca, her bir test numunesinin üretiminde kullanılan KYB karışımlarının mekanik özelliklerini (basınç ve eğilmede çekme dayanımı) belirlemek için üretilen numuneler, büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları ile beraber aynı koşullar altında kür edilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

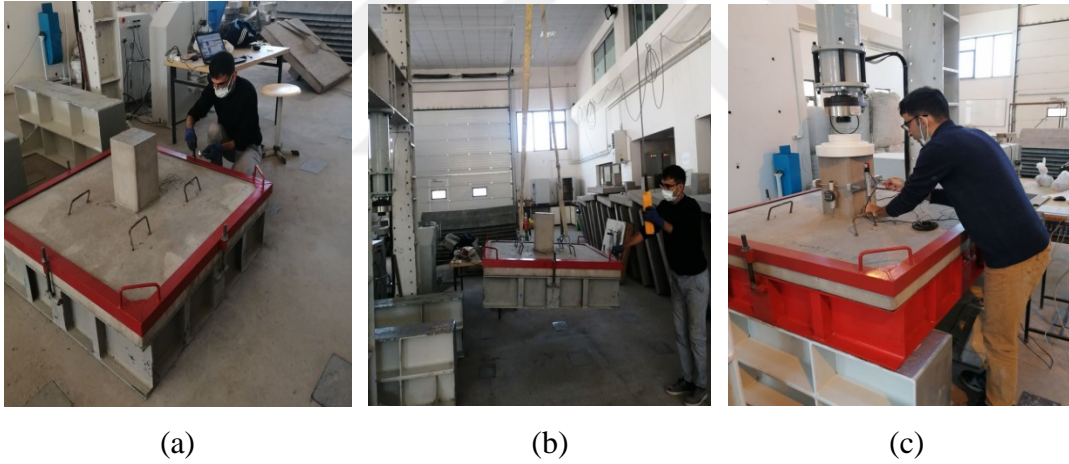
Şekil 3.18 : Döşeme-kolon birleşim elemanı üretimi; (a) döşeme ve alt kolon beton dökümü, (b) üst kolon beton dökümü, (c) numune beton dökümünün tamamlanması, (d) ve (e) kür işlemi.

3.2.4.2 Test ve ölçüm düzeneği

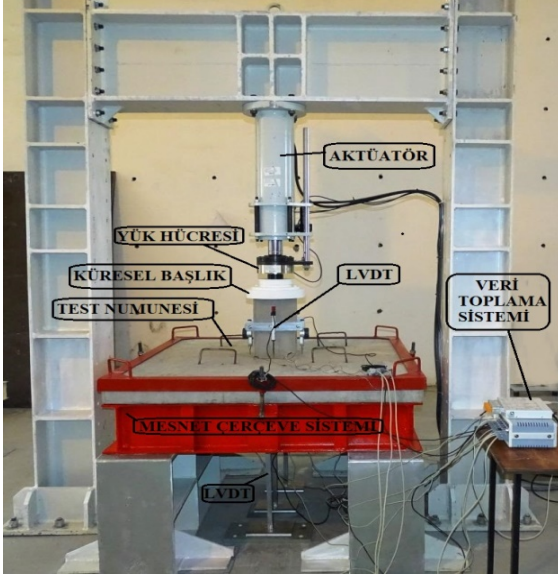
Üretilen tam ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları için test düzeneği olarak, 600 kN kapasiteli yük çerçevesi kullanılmıştır. Mesnetlenme sistemi ise, test numunelerinin üzerine yerleştirileceği birbirlerine kaynaklanmış 4 adet rijit IPE 200 çelik profil elemanlardan ve numunelerinin test esnasında kısmen dönmeye karşı engellenmesi için ankastre mesnetlenmeyi sağlayacak L çelik profillerden oluşturulmuştur (Şekil 3.19 (a)). Numuneler, test düzeneğine yükün uygulandığı aktüatöre göre merkezlenerek yerleştirilmiştir (Şekil 3.19 (b)). Yükleme, servo-kontrollü bir sistem vasıtasıyla 0.2 mm/dakika hızında, deplasman kontrollü olarak üst kolon aracılığıyla döşemelere uygulanmıştır. Uygulanan düşey yük, aktüatöre monte edilen yük hücresi vasıtasıyla ölçülmüştür. Ayrıca, aktüatör ve üst kolon arasına, parazit eğilme momentlerini

engellemek ve zımbalama testinde simetrik ilerlemeyi sağlamak amacıyla küresel mafsal başlık yerleştirilmiştir (Şekil 3.19 (c)).

Şekil 3.20’de döşeme-kolon birleşim elemanları için geliştirilen test ve ölçüm düzeneği verilmiştir. Testlerde döşemenin açıklık ortası ve kolonun döşemeye göre rölatif deplasmanını ölçmek için toplam 9 adet LVDT kullanılmıştır. Bununla beraber, çekme donatısı, kapalı etriye ve kesme kamalarına 10 mm uzunluğunda ve 120 Ω dirence sahip elektriksel gerinim pulları yapıştırılmış ve donatılardaki birim şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Döşemenin çekme donatısına 2 adet ve zımbalama (kapalı etriye, kesme kaması) donatısına 2 adet olmak üzere, kolon yüzünden itibaren sırasıyla, 10 cm ve 12 cm mesafede gerinim pulları yerleştirilmiştir. Uygulanan düşey yük, deplasman ve birim şekil değiştirme değerleri veri toplama sistemi aracılığıyla testler esnasında 125 milisaniye aralıklarla bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir. Veri toplama yazılım programı aracılığıyla alınan tüm okumalar Excel programında düzenlenmiştir.



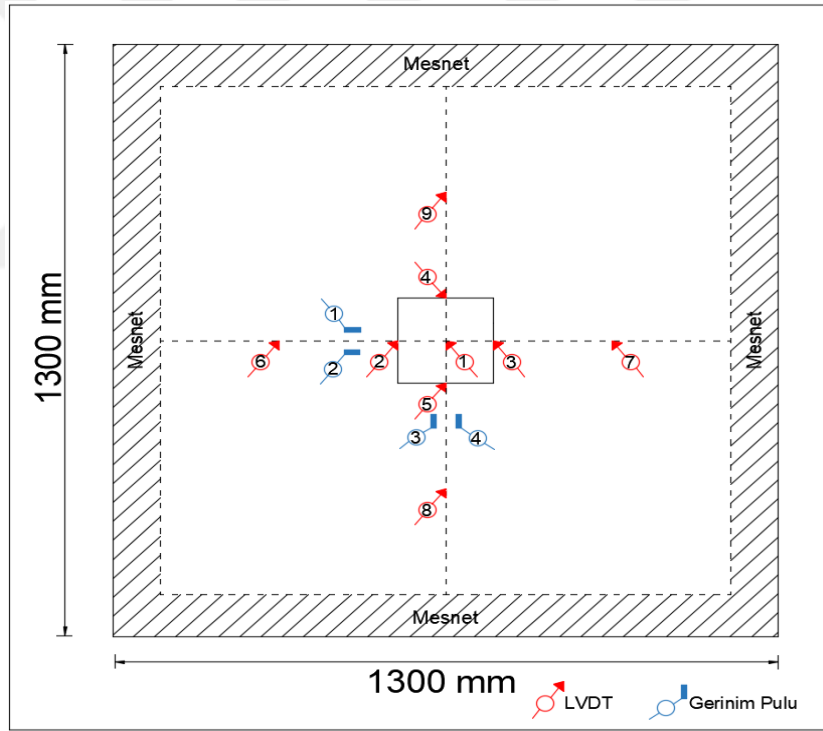
Şekil 3.19 : Test düzeneğinin hazırlanması; (a) test numunesinin mesnetlenmesi, (b) test numunesinin yükleme çerçevesine yerleştirilmesi, (c) küresel başlık ve LVDT’lerin yerleştirilmesi.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.20 : Test ve ölçüm düzeneği; (a) test düzeneği, (b) test düzeneği alt görünüş, (c) deplasman ve birim şekil değıştirme ölçüm düzeni.

Elde edilen deneysel datalar kullanılarak test numunelerinin zımbalama performansı (yük taşıma kapasitesi, yük-deplasman ilişkisi, enerji yutma kapasitesi ve süneklik) değerlendirilmiştir. Ayrıca, deney sonrasında her bir numune için göçme modlarının tespit edilmesi için oluşan çatlaklar kalemle işaretlenerek belirginleştirilmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarında test sonrası çatlakların belirginleştirilmesi.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Taze KYB Özellikleri

Tez çalışması kapsamında, tasarlanan 1 adet lifsiz kontrol ve 1 adet tekli makro çelik ile 2 adet ikili ve 1 adet üçlü hibrit lif takviyeli KYB karışımlarının taze özelliklerinin belirlenmesi amacıyla taze birim hacim ağırlığı, hava içeriği, çökme-yayılma ve J-halkası deneyleri gerçekleştirilmiştir. KYB karışımlarının taze özelliklerine ait deneylerden elde edilen bulgular, Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

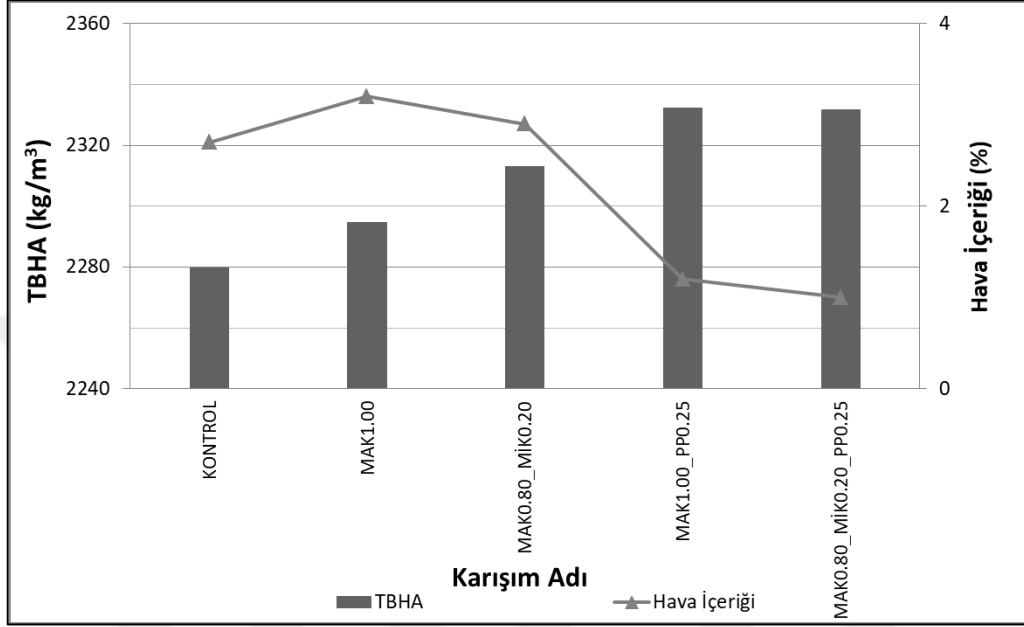
Çizelge 4.1 : Taze KYB deney bulguları.

Karışım No	Karışım Adı	TBHA (kg/m ³)	Hava İçeriği (%)	Çökme-Yayılma Deneyi		J-Ring Deneyi		
				D _c (mm)	T ₅₀₀ (sn)	ΔH (mm)	D _j (mm)	T _{500j} (sn)
1	KONTROL	2280	2.7	790	4.2	1.7	770	5
2	MAK1.00	2295	3.2	775	5.3	3.3	760	6
3	MAK0.80_MİK0.20	2313	2.9	765	5.8	3.4	755	6.3
4	MAK1.00_PP0.25	2332	1.2	750	6.5	7	735	7.2
5	MAK0.80_MİK0.20_PP0.25	2332	1	740	6.8	8	710	8

4.1.1 Taze beton birim hacim ağırlığı (TBHA) ve hava içeriği

Bu çalışma kapsamında tasarlanan KYB karışımlarının elde edilen taze birim hacim ağırlığı ve hava içeriği değerleri Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1’den görüleceği üzere, lifsiz kontrol karışımının TBHA değeri, tüm lif takviyeli karışımlara kıyasla en düşüktür. Bu durumun sebebinin, agregaya ile yer değiştirilerek tüm lif takviyeli KYB karışımlarına toplamda hacimce %1 oranında dahil edilen makro ve mikro çelik liflerin olduğu açıktır. Çünkü, makro ve mikro çelik liflerin özgül ağırlık değerlerinin (7.85 ve 7.2 gr/cm³), ince ve kaba agregaların özgül ağırlık değerlerinden (2.39 ve 2.68 gr/cm³) daha yüksek olması, lif takviyeli KYB karışımlarının TBHA değerlerinin artmasına sebep olmuştur. Diğer taraftan, her ne kadar PP lifinin özgül ağırlık değeri (0.91 gr/cm³), ince ve kaba agregaların özgül ağırlık değerlerine kıyasla oldukça küçük olsa da, hibrit lif takviyeli karışımlarda PP lif hacimce %0.25 gibi düşük bir oranda kullanılmasından dolayı TBHA değerleri üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

Makro ve mikro çelik lif takviyeli MAK0.8_MİK0.20 karışımının TBHA değerinin, MAK1.00 karışımından daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu durum, her ne kadar özgül ağırlığı daha yüksek olan makro çelik lif mikro çelik lif ile yer değiştirirse de, Şekil 4.1'den görüleceği gibi makro çelik lif takviyeli KYB karışımlarının hava içeriği miktarının daha yüksek olmasına dayandırılabilir.



Şekil 4.1 : Taze KYB karışımlarının TBHA ve hava içeriği değerleri.

Ayrıca, PP lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli karışımlarda ise TBHA değerinin, MAK1.00 ve MAK0.8_MİK0.2 karışımlarından fazla olduğu belirlenmiştir. Buradan, makro çelik life kıyasla granülometriye olumlu etkisi nedeniyle mikro çelik ve PP liflerin beton karışımlarındaki doluluk oranını artırarak betonun hava içeriğini azalttığı ve bu nedenle karışımların TBHA değerini arttırdığı söylenebilir. Kına (2019) tarafından yapılan hibrit çelik ve sentetik lif takviyeli KYB karışımlarının TBHA değerleriyle de ilgili olan doktora tez çalışmasında benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Taze beton hava içeriği değerlerinin MAK1.00 karışımında %3.2 ile en yüksek ve MAK0.8_MİK0.2_PP0.25 karışımında ise %1 ile en düşük olduğu görülürken, MAK0.8_MİK0.2 karışımında %2.9 ve MAK1.00_PP0.25 karışımında %1.2 olduğu tespit edilmiştir. Buradan, makro çelik lifin uzun ve düzensiz formunun granülometri bakımından karışımın doluluk oranını olumsuz etkilemesinden dolayı taze betonun hava içeriğinde artışa yol açtığı söylenebilir. Ayrıca, mikro çelik ve PP liflerin makro çelik liflere kıyasla

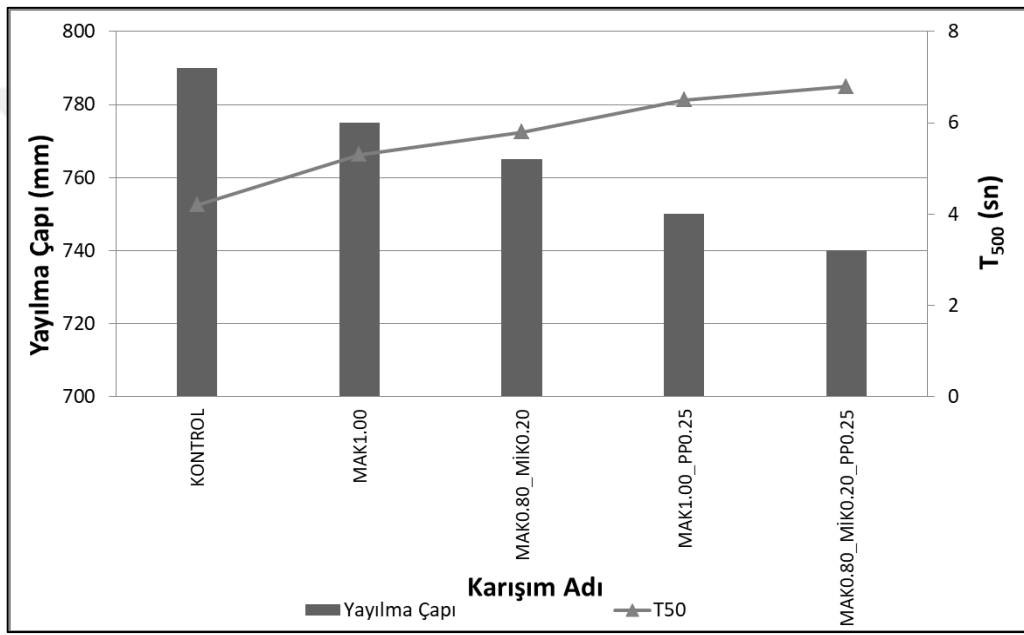
granülometriye olumlu etkisi nedeniyle de karışımların doluluk oranını arttırdığı belirlenmiştir (Şekil 4.1). Çünkü, PP lifin özgül ağırlığının düşük olması nedeniyle birim hacimde daha fazla sayıda lif içermesinin sonucu olarak boşlukları doldurmada mikro çelik life kıyasla daha etkili olabileceği düşünülmektedir. Hibrit lif takviyeli KYB ile ilgili bir doktora tez çalışmasında da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Kına, 2019).

4.1.2 Çökme-yayılma

Tez kapsamında tasarlanan KYB karışımlarının akıcılığı ve viskozitesi hakkında değerlendirme yapmak amacıyla gerçekleştirilen çökme-yayılma deneyinden elde edilen yayılma çapı (D_c) ve yayılma süresi (T_{500}) değerleri Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. KYB karışımlarının çökme-yayılma çapı ve T_{500} değerlerinin sırasıyla, 765 ± 25 mm ve 5.5 ± 1.3 sn aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Buradan, tüm KYB karışımlarının EFNARC (2002)’de belirtilen çökme-yayılma çapı sınır değerlerini (650-800 mm) sağladığı ancak T_{500} sınır değerlerini (2-5 sn) lifsiz kontrol KYB karışımı dışında sağlamadığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, EFNARC (2002) tarafından önerilen işlenebilirlik kriterlerinin lif içermeyen KYB karışımları için geçerli olduğunun da göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Çökme-yayılma ve T_{500} deney bulguları incelendiğinde, tekli makro lif takviyeli MAK1.00 karışımı için, lifsiz kontrol karışımına kıyasla, çökme-yayılma çapı değerinde %1.9 azalma, T_{500} değerinde ise %26.19 artış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ikili lif hibridizasyonuna sahip MAK0.80_MİK0.20 ve MAK1.00_PP0.25 KYB karışımlarının çökme-yayılma çapı değerlerinde ise sırasıyla, %3.16 ve %5.06 oranında azalma, T_{500} değerlerinde ise sırasıyla, %38.1 ve %54.76 oranında artış olduğu bulunmuştur. Buradan, toplam lif ve mikro lif içeriği arttığında, T_{500} değerleri artarken çökme-yayılma çapının azaldığı söylenebilir. Bu durum, mikro lifin yoğunluğunun düşük olması nedeniyle hacim ve yüzey alanında artışa neden olmasına bağlanabilir. Diğer taraftan, lifler KYB karışımlarına dâhil edildiğinde hamur tarafından taşınacak katı madde miktarı da artmıştır. Literatürde (Liu ve diğ, 2019; Turk ve diğ, 2019, Turk ve diğ, 2021) de lif takviyeli KYB karışımlarının akışkanlığının, KYB karışımlarına mikro çelik liflerin eklenmesiyle azaldığı belirtilmiştir. PP lif içeren üçlü hibrit lif takviyeli MAK0.80_MİK0.20_PP0.25 karışımının çökme-yayılma değeri kontrol karışımına kıyasla %6.33 oranında azalırken, bu karışımın T_{500} değeri ise 6.8 sn olarak belirlenmiştir. Buradan, PP lifin hibrit lif takviyeli KYB

karışımlarına dâhil edilmesinin, taze KYB özellikleri üzerinde mikro çelik liften daha olumsuz bir etkiye sahip olduğu açıktır. Bu durum, PP liflerin daha yüksek narinlik ve özgül yüzey ile daha düşük yoğunluğa sahip olmasına ve beton birim hacmine karşılık gelen lif sayısının artmasına bağlanabilir. Li ve diğ. (2001) ve Jabbour ve diğ. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da PP lifin su film kalınlığı ve paketlenme yoğunluğunu önemli ölçüde arttırdığını ve dolayısıyla betonun işlenebilirliğini azalttığını ortaya koymuşlardır. Yürütülen başka bir çalışmada ise hacimce %0.3 PP lif ilavesinin çökme-yayılma çapı değerlerinde azalmaya neden olduğu vurgulanmıştır (Mazaheripour ve diğ, 2011).



Şekil 4.2 : Taze KYB karışımlarının yayılma çapı ve T₅₀₀ değerleri.

ASTM C1611 (2018)'e göre lifsiz kontrol ve tekli makro çelik lif takviyeli KYB karışımlarının görsel stabilite indeksi (GSI) değeri 0 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.3(a-b)). Çünkü, lifsiz kontrol ve tekli makro çelik lif takviyeli KYB karışımlarında, segregasyon gözlemlenmemiş ve beton karışımları homojen olarak yayılmıştır. Ayrıca, ikili lif hibridizasyonuna sahip MAK0.8_MİK0.20 ve MAK1.00_PP0.25 karışımlarında ise yayılan taze beton yüzeyinde hafif bir segregasyon olduğu için görsel stabilite indeksi değeri 1 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.3(c-d)). Görsel stabilite indeksi değeri, üçlü lif hibridizasyonuna sahip MAK0.8_MİK0.20_PP0.25 karışımında ise daha olumsuz bir duruma karşılık gelen 2 olarak değerlendirilmiştir (Şekil 4.3(e)).



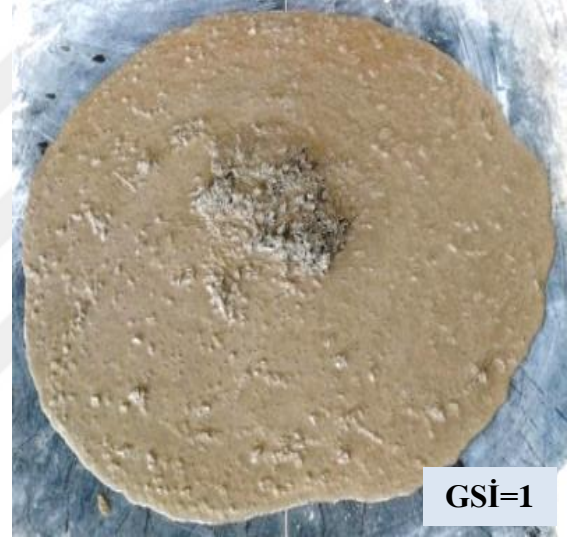
(a) KONTROL



(b) MAK1.00



(c) MAK0.80_MİK0.20



(d) MAK1.00_PP0.25

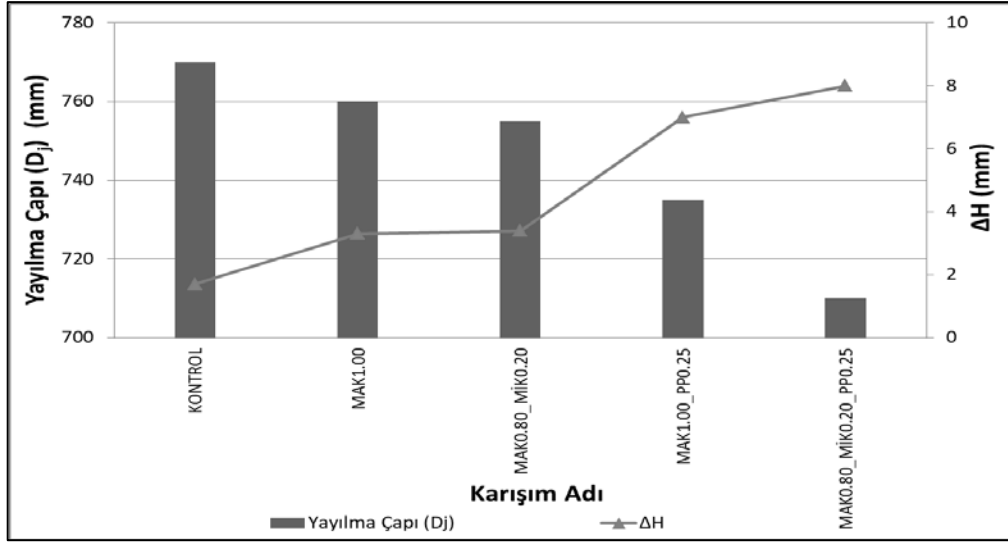


(e) MAK0.80_MİK0.20_PP0.25

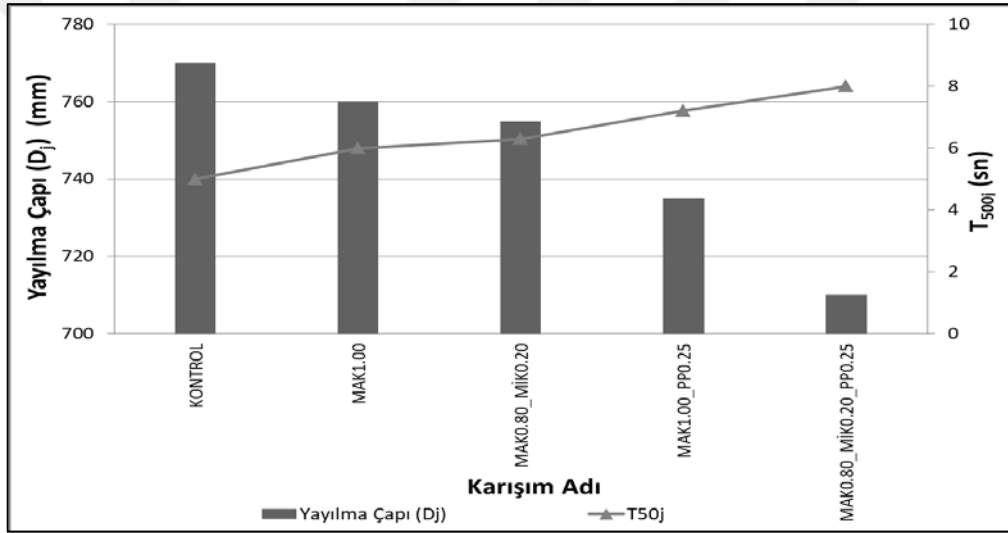
Şekil 4.3 : KYB karışımlarının çökme-yayılma deneyi görselleri.

4.1.3 J-halkası

Tez kapsamında üretilen KYB karışımlarının engeller arasından geçiş yeteneği hakkında değerlendirme yapmak amacıyla gerçekleştirilen J-halkası deneyinden elde edilen yükseklik farkı (ΔH), T_{500j} ve D_j değerleri Çizelge 4.1, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilirken, deney görselleri ise Şekil 4.6'da resimlenmiştir. Çizelge 4.1'den görülebileceği gibi, lif takviyesiz kontrol KYB karışımı için ΔH değeri 1.7 mm iken, tekli/hibrit lif takviyeli KYB karışımlarında ise 3.3-8 mm aralığında değişmiştir. Buradan, KYB karışımlarının yükseklik farkı ΔH değerleri, EFNARC (2002)'de belirtilen sınır değerlerini (0-10 mm) sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, hacimce lif miktarı %1'den %1.25'e arttığında, hibrit lif takviyeli KYB karışımları için ΔH değerinin arttığı deney sonuçlarından görülebilir. Diğer taraftan, mikro lif hacmindeki artış, J-halkası yükseklik farkı değerlerinde artışa neden olurken, PP lifin hem tekli hem de ikili lif hibridizasyonuna sahip KYB karışımlarına dahil edilmesi, ΔH değerlerinde sırasıyla %112 ve %135 artışa neden olmuştur. Bununla birlikte, mikro çelik lifin makro çelik lif ile ikili hibrit olarak kullanılması, ΔH değerleri için MAK1.00 karışımına kıyasla %3.03 artışa neden olmuştur. Sonuçta, lif kombinasyonu, mikro lif tipi ve toplam lif miktarının, J-halkası yükseklik farkı (ΔH) üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve KYB karışımlarına lif takviyesinin taze KYB'nin engeller arasından geçiş yeteneğini önemli ölçüde azaltarak, ΔH değerlerini arttırdığı söylenebilir. Ayrıca, mikro çelik life kıyasla, karışımlara PP lif takviyesi, hibrit lif takviyeli KYB karışımlarının geçiş yeteneğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, en yüksek narinliğe sahip mikro PP liflerin neden olduğu topaklanmaya dayandırılabilir. Turk ve diğ. (2021) ve Turk ve diğ. (2019)'da yaptıkları çalışmada aynı bulguları elde etmişlerdir.



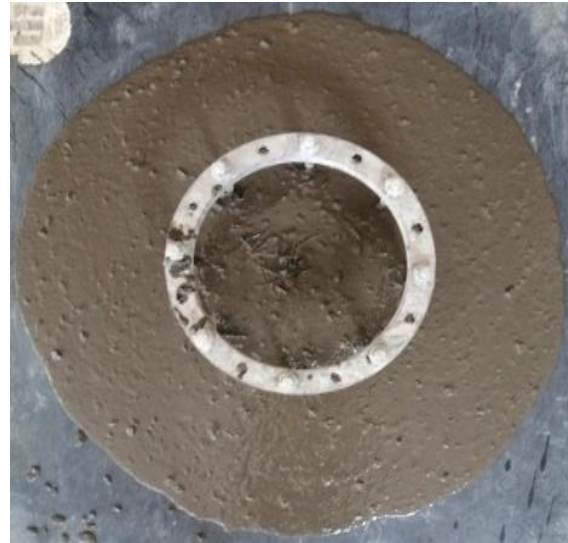
Şekil 4.4 : Taze KYB karışımlarının J-halkalı yayılma çapı ve ΔH değerleri.



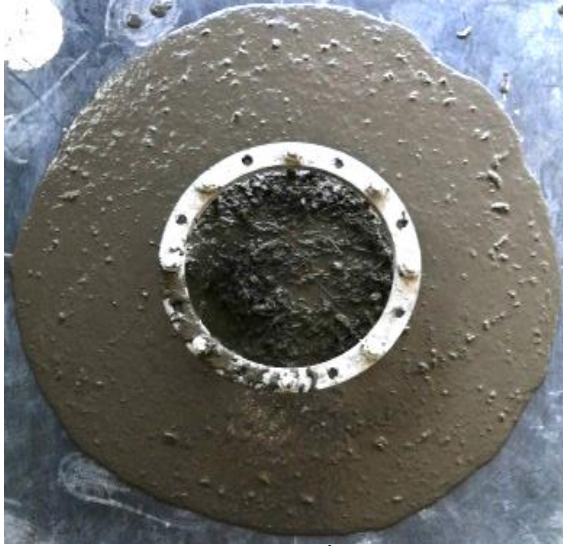
Şekil 4.5 : Taze KYB karışımlarının J-halkalı yayılma çapı ve T_{500j} değerleri.



(a) KONTROL



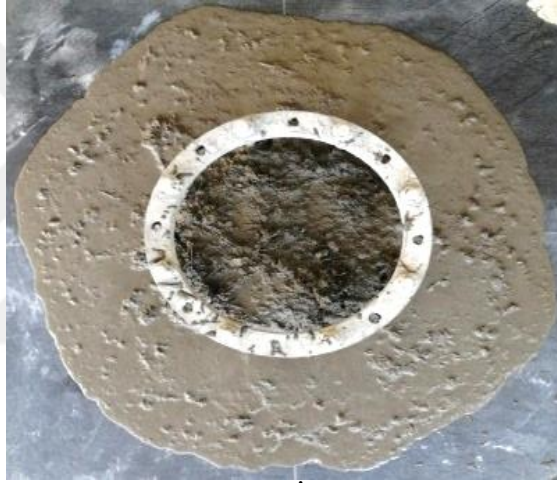
(b) MAK1.00



(c) MAK0.80_MİK0.20



(d) MAK1.00_PP0.25



(e) MAK0.80_MİK0.20_PP0.25

Şekil 4.6 : Taze KYB karışımlarının J-halkalı çökme-yayımla deneyi görselleri.

Tez çalışması kapsamında yürütülen J-halkası deneyinde, KYB karışımları için yükseklik farkı (ΔH) değerlerinin yanında, T_{500j} ve D_j değerleri de belirlenmiştir. KYB karışımlarının D_j ve T_{500j} değerlerinin sırasıyla, 740 ± 30 mm ve 6.5 ± 1.5 sn aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Çizelge 4.1'den görülebileceği üzere, T_{500j} ve D_j değerleri standart çökme-yayımla deneyi sonuçlarıyla benzer eğilimi gösterirken, lif kombinasyonu, mikro lif tipi ve toplam lif miktarının da standart ve J-halkalı çökme-yayımla deney sonuçları üzerindeki etkilerinin aynı olduğu bulunmuştur. Hibrit lif takviyeli KYB ile ilgili bir doktora tez çalışmasında da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Kına, 2019).

4.2 Sertleşmiş KYB Özellikleri

Tez çalışması kapsamında, üretilen lifsiz kontrol ile tekli makro çelik, ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli KYB karışımlarının mekanik (basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımı) özellikleri belirlenmiştir. KYB karışımlarının mekanik özelliklerine ait bulgular, Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

4.2.1 Basınç dayanımı

Tez çalışması kapsamındaki lifsiz kontrol ile tekli, ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip KYB karışımlarından üretilen 7, 28 ve 90 günlük 100x100x100 mm³ boyutlarındaki küp numunelerinin ortalama basınç dayanımı değerleri, Çizelge 4.2 ve Şekil 4.7’de sunulmuştur.

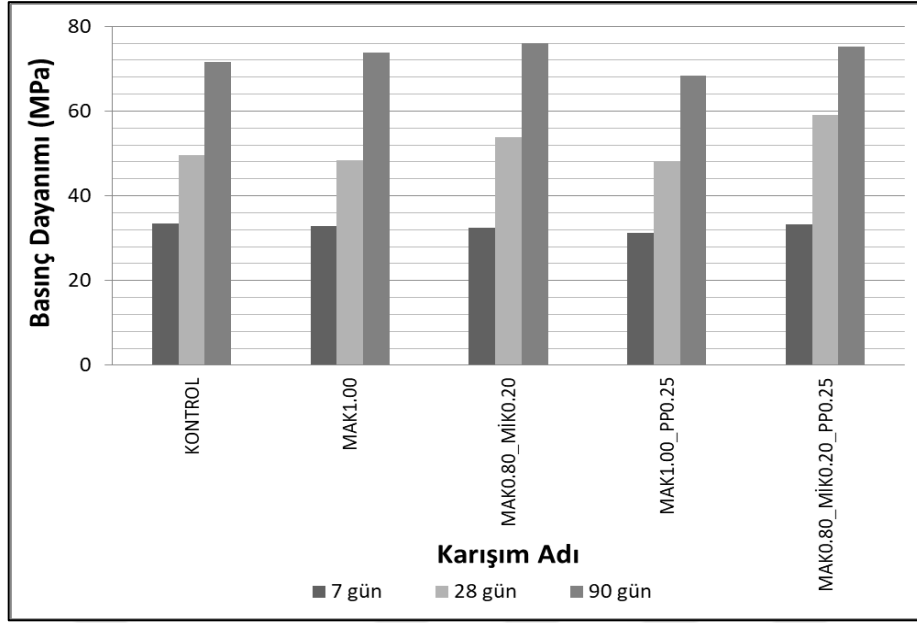
Şekil 4.7’den görüleceği üzere, KYB numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları birbirlerine oldukça yakın çıkarken, 28 gün için 48.2-59.1 MPa, 90 gün için ise 68.3-76.1 MPa aralığında değişmiştir. Çünkü, zamanla gelişen hidrasyon reaksiyonları ile beraber 28 ve 90 günlük matris dayanımı artmış ve böylece lif tipi ve kombinasyonunun etkisi daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Ayrıca, uçucu külün puzolanik etkisinden dolayı, tüm karışımların ortalama 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük basınç dayanımı değerlerine kıyasla %40.88 artış sergilediği belirlenmiştir.

Lifsiz kontrol numunelerinin basınç dayanımı değerleri, 28 ve 90 gün için sırasıyla, 49.6 MPa ve 71.6 MPa olarak ölçülmüştür. %1 makro çelik lif takviyeli KYB numunelerinin basınç dayanımı ise, kontrol numunelerine kıyasla 28 ve 90 gün için sırasıyla, %2.42 ve %3.07 oranında azalmıştır. Bunun sebebi, makro çelik liflerin agregahamur arayüzünde farklı yönlenmesi, homojen olarak yayılmaması ve betonun içerisinde hava boşluğu miktarını arttırmasına dayandırılabilir. Literatürde (Sahmaran ve diğ, 2005; Turk ve diğ, 2019, Turk ve diğ, 2021) de tekli makro çelik lif takviyesinin betonun basınç dayanımını azalttığı ile ilgili benzer sonuçlar mevcuttur.

Çizelge 4.2 : Sertleşmiş KYB karışımlarının mekanik özelliklerine ait bulgular.

Karışım No	Karışım Adı	Basınç Dayanımı (MPa)			Elastisite Modülü (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)			Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)		
		7 gün	28 gün	90 gün	28 gün	7 gün	28 gün	90 gün	7 gün	28 gün	90 gün
1	KONTROL	33.55 (0.07)	49.6 (2.12)	71.6 (1.56)	34662 (2.79)	3.6 (0.05)	4.1 (0.57)	4.95 (1.2)	4.85 (0.28)	6.27 (0.08)	7.62 (0.78)
2	MAK1.00	32.75 (0.07)	48.4 (0.99)	73.8 (3.25)	37097 (1.45)	5.2 (0.49)	5.6 (0.42)	7.1 (1.84)	7.38 (0.74)	10.88 (0.82)	11.14 (0.98)
3	MAK0.80_MİK0.20	32.4 (0.14)	53.85 (1.48)	76.1 (2.12)	37378 (0.28)	5.3 (0.68)	6.2 (0.35)	6.7 (1.56)	6.67 (0.16)	10.02 (0.16)	10.87 (2.36)
4	MAK1.00_PP0.25	31.15 (0.07)	48.2 (1.27)	68.3 (1.56)	34207 (0.8)	5.61 (0.35)	6.35 (0.07)	7.25 (1.63)	8.54 (0.23)	11.58 (0.54)	13.29 (0.69)
5	MAK0.80_MİK0.20_PP0.25	33.3 (0.57)	59.1 (0.42)	75.3 (3.96)	34241 (0.42)	5.45 (0.29)	7.49 (0.52)	8.15 (0.21)	8.03 (0.38)	12.45 (0.85)	14.37 (1.99)

Not: Parantez içerisindeki değer, standart sapmayı göstermektedir.



Şekil 4.7 : KYB karışımlarının basınç dayanımı değerleri.

Makro ve mikro çelik liflerin ikili hibridizasyonuna sahip KYB numunelerinin basınç dayanımı, kontrol numunelerine kıyasla 28 ve 90 gün için sırasıyla, %8.57 ve %6.28 oranlarında artış sergilemiştir. Buradan, mikro çelik liflerin karışıma dâhil edilmesinin basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, mikro liflerin mikro çatlakları köprülemede etkin olduğu sonucuna dayandırılabilir. Diğer taraftan, makro çelik ve PP liflerin ikili hibridizasyonuna sahip KYB numunelerinin basınç dayanımında ise kontrol numunelerine kıyasla 28 ve 90 gün için sırasıyla, %2.82 ve %4.6 oranlarında azalma olduğu belirlenmiştir. Buradan, KYB karışımlarına PP lif takviyesinin basınç dayanımını olumsuz etkilediği görülmüştür. PP lif takviyeli KYB numunelerinin basınç dayanımındaki bu azalma, PP liflerin düşük çekme dayanımına sahip olması (350 MPa) ve yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı kullanımının sonucu olarak betonun iç terleme eğilimi göstermesi olmak üzere iki sebebe bağlanabilir. Bu konuda yapılan bazı çalışmalarda (Chen ve Liu, 2005; Dawood ve Hamad, 2015; Jabbour ve diğ, 2021) da PP lif takviyesinin betonun basınç dayanımını azalttığı vurgulanmıştır.

Üçlü hibrit lif takviyeli KYB numunelerinin basınç dayanımının, kontrol numunelerine kıyasla, 28 ve 90 günlük kür yaşları için sırasıyla, %19.15 ve %5.17 oranlarında diğer lif kombinasyonlarına kıyasla daha önemli bir artışa sebep olduğu belirlenmiştir. Çünkü, üçlü hibrit lif takviyesi durumunda, toplamda hacimce mikro lif (çelik ve PP) miktarının artmasının sonucu olarak mikro lifler, mikro çatlakları

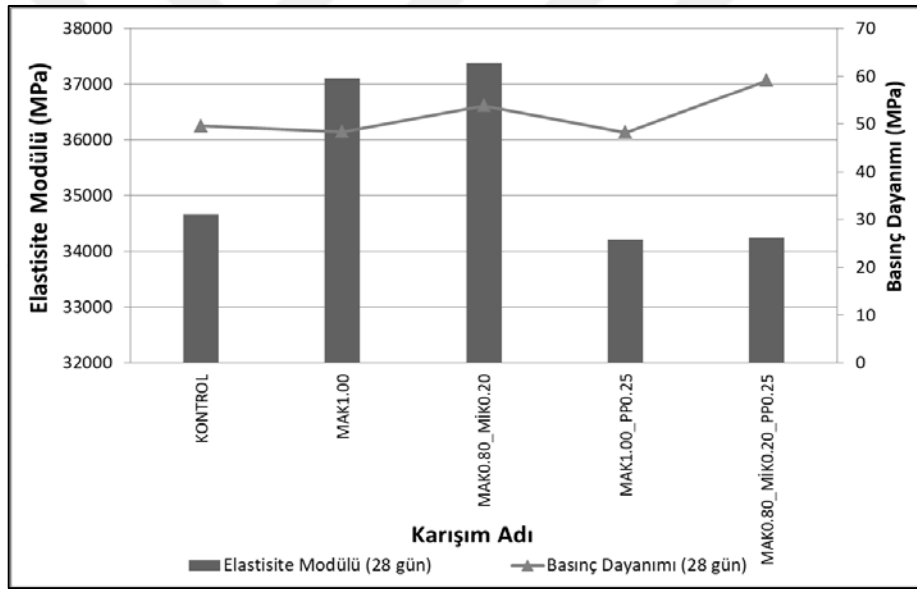
köprüleyerek, çatlak gelişimini geciktirmede ve çatlak ilerlemesini belirli seviyelerde önlemede daha etkin hale gelmiştir (Afroz ve diğ, 2019; Bassurucu ve Turk, 2019; Haddadou ve diğ, 2014; Neves ve Fernandes de Almeida, 2005; Sahmaran ve diğ, 2005; Sahmaran ve Yaman, 2007).

4.2.2 Elastisite modülü

Tasarım aşamasında ve mevcut yapıların performansının değerlendirilmesinde, yük etkisi altındaki betonda oluşan deformasyonların belirlenmesi, yapı güvenliği açısından oldukça önemlidir. Tez çalışması kapsamında tasarlanan lifsiz kontrol ile tekli, ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip KYB karışımlarından üretilen 28 günlük Ø100x200 mm boyutlarındaki silindir numuneler kullanılarak elde edilen ortalama elastisite modülü değerleri, Çizelge 4.2 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Elastisite modülü değerlerindeki artışın 28. günden itibaren oldukça az olduğu ve literatürdeki bazı modeller yardımıyla numunelerin 28 günlük elastisite modülü değerlerinin oldukça iyi bir şekilde tahmin edilebildiği sebeplerinden dolayı sadece bu kür günü tercih edilmiştir (Zhou ve diğ, 1995).

Çizelge 4.2’den görüleceği gibi, lifsiz kontrol KYB numunesinin elastisite modülü değeri 34662 MPa olarak belirlenmiştir. Tekli makro ve ikili çelik lif hibridizasyonuna sahip KYB karışımlarının elastisite modülü değerleri lifsiz kontrol numunesine kıyasla sırasıyla, %7.02 ve %7.84 oranlarında artış sergilemiştir. Buradan, çelik liflerin hacimce %1 oranında tekli ve ikili hibrit olarak KYB karışımlarına dâhil edilmesinin elastisite modülü değerini arttırdığı ancak hibrit lif takviyesinin az da olsa daha olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Bu durum, agrega ile yer değiştirilerek kullanılan çelik liflerin elastisite modülünün agregalara göre oldukça fazla olmasına ve Şekil 4.11 (a) ve (b)’de görüldüğü gibi, özellikle tekli ve ikili hibrit çelik lif takviyeli karışımların işlenebilirliğine bağlı olarak liflerin matris içerisinde homojen dağılmasına dayandırılabilir. Yağmur (2020) tarafından yürütülen çalışmada da benzer sonuçlar bulunmuş olup, hacimce %1 ve daha az çelik lif içeren betonlar için elastisite modülü artarken, %1’den daha fazla çelik lif içeren beton karışımlar için ise elastisite modülü değerinin azaldığı bulunmuştur. Diğer taraftan, PP lifinin ilave edildiği %1 makro ve %0.25 mikro PP lif takviyeli ikili hibridizasyonuna sahip KYB numunelerinin elastisite modülü değerlerinde, sadece %1 makro çelik lif içeren MAK1.00 numunesine kıyasla %7.79 oranlarında azalma olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yine PP lifinin ilave edildiği üçlü hibrit lif hibridizasyonuna sahip KYB karışımının

elastisite modülü değerinde ise MAK0.8_MİK0.2 numunesine kıyasla %8.39 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir. Sonuçta, KYB karışımlarına PP lif takviyesinin elastisite modülü değerini olumsuz etkilediği söylenebilir. PP lif takviyeli KYB numunelerinin elastisite modülü değerindeki azalma, PP liflerin çelik liflere kıyasla düşük elastisite modülüne sahip olmasına ve narinliği fazla olan PP liflerin karışımın işlenebilirlik özellikleri üzerindeki olumsuz etkisinden dolayı liflerin matris içerisinde homojen dağılım gösterememesine bağlanabilir (Bakınız Şekil 4.11 (c) ve (d)). Literatürde (Singh ve Rai, 2021; Topçu ve diğ, 2017) de PP lif takviyesinin betonun elastisite modülü değeri üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu ve farklı lif hibridizasyonuna sahip betonlarda elastisite modülü değerinin liflerin karışım içerisindeki yönelim ve dağılımlarına bağlı olarak liffsiz karışımlara kıyasla $\pm\%25$ oranları aralığında değişebileceği de belirtilmiştir (Fanella ve Naaman, 1985).



Şekil 4.8 : KYB karışımlarının elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri.

Diğer taraftan, makro ve mikro (çelik ve PP) lifler deney sırasında eksenel basınç yükü etkisi altında numunelerde oluşan mikro çatlakları köprüleyerek makro çatlaklara dönüşmesini geciktirerek çatlakların yayılmasını belirli bir yük düzeyine kadar engellediği söylenebilir. Böylece, KYB numunelerinin bütünlüğü liffsiz kontrol numunelerine kıyasla daha uzun süre sağlanarak, numunelerin daha fazla yük taşımasının sağlandığı düşünülmektedir (Şekil 4.9).



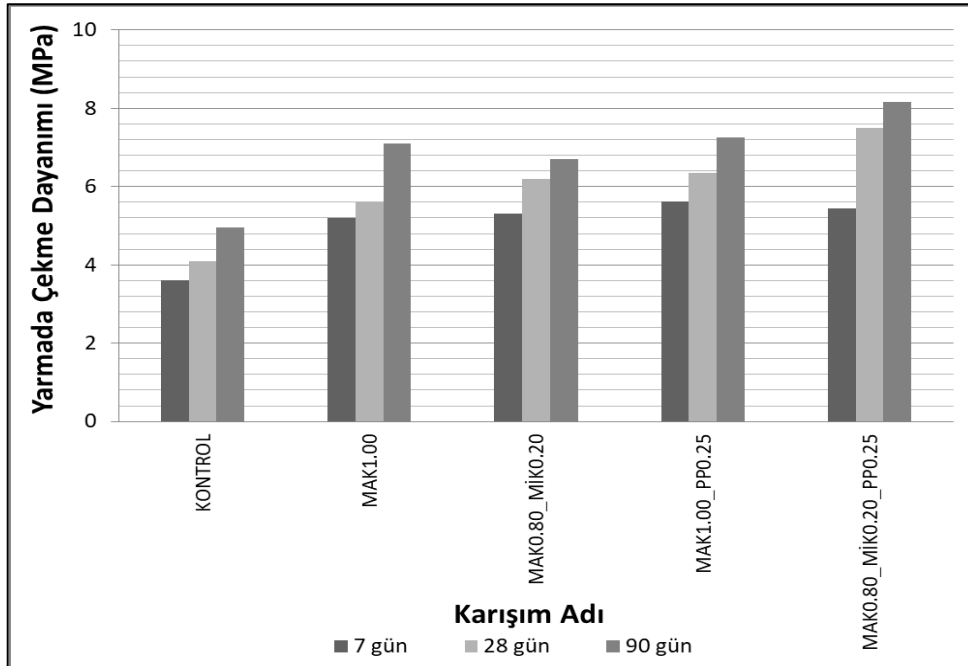
Şekil 4.9 : KYB numunelerinin elastisite modülü deneyi sonrası görselleri.

4.2.3 Yarmada çekme dayanımı

Tez çalışması kapsamında, tasarlanan her bir KYB karışımından (lifsiz kontrol ile tekli, ikili ve üçlü lif takviyeli) üretilmiş olan $\text{Ø}100 \times 200$ mm boyutlarındaki silindir numunelerin 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri, Çizelge 4.2 ve Şekil 4.10'da sunulmuştur. Şekil 4.10'dan görüleceği üzere, tüm KYB karışımlarında kür yaşı arttıkça, numunelerin yarmada çekme dayanımları da artmıştır. KYB karışımlarının ortalama 90 günlük yarmada çekme dayanımı değerleri, puzolanik reaksiyonların etkisiyle, 28 günlük yarmada çekme dayanımı değerlerine kıyasla %14.83 artış sergilemiştir.

KYB'ye tekli, ikili ve üçlü harmanlama şeklinde makro çelik, mikro çelik ve PP liflerin ilave edilmesi, farklı lif hibridizasyonu etkisinin sonucu olarak karışımların yarmada çekme dayanımlarını tüm kür yaşları için önemli ölçüde iyileştirmiştir. Lifsiz kontrol KYB numunelerinin yarmada çekme dayanımı değerleri, 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla, 3.6 MPa, 4.1 MPa ve 4.95 MPa olarak belirlenmiştir. Tekli makro çelik lif takviyeli KYB numunelerinin (MAK1.00) yarmada çekme dayanımı değerlerinde, kontrol numunelerine kıyasla 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla, %44.44, %36.59 ve %43.43 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, mikro çelik lif içeren (MAK0.8_MİK0.2) ikili hibrit karışımların yarmada çekme dayanımı değerlerinde ise kontrol numunelerine kıyasla 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla, %47.22, %51.22 ve %35.35 oranında artış olduğu belirlenmiştir. Buradan, lif takviyeli KYB'de makro çelik liflerin kullanılmasının, KYB'nin yarmada çekme dayanımının artmasında çok önemli bir etkiye sahip olduğu açıktır. Çünkü, hibrit lif takviyeli betonlar için genelde ana bileşen olan makro çelik lif, mikro liflere kıyasla daha

yüksek elastisite modülüne ve daha uzun boya sahip olması nedeniyle çekme gerilmeleri makro çelik liflerle daha etkin bir şekilde aktarılmış ve makro çatlaklar daha etkili bir şekilde köprülenmiştir (Sahmaran ve diğ., 2005; Turk ve diğ., 2019; Turk ve diğ., 2021; Haddadou ve diğ., 2014). Diğer taraftan, PP lif içeren ikili hibrit KYB karışımlarında ise tüm kür yaşları için tekli ve ikili çelik lif takviyeli KYB karışımlarına kıyasla daha yüksek yarmada çekme dayanımları elde edilirken, tüm kür yaşları için en yüksek yarmada çekme dayanımı ise üçlü hibrit lif takviyeli KYB numunelerinden elde edilmiştir. Bu durum, bu karışımda hem makro çelik lif oranının fazla olmasına hem de PP lifinin ilave edilmesine dayandırılabilir. Ayrıca, mikro düz çelik liflerin, yüksek mukavemetli matris durumunda mikro çatlakları daha etkili bir şekilde köprüleyebileceği de bilinmektedir (Bassurucu ve Turk, 2022). Bu durum, toplamda hacimce mikro lif (çelik ve PP) miktarının artmasına ve PP lif yoğunluğunun mikro çelik lifin yoğunluğundan daha düşük olması nedeniyle birim hacimdeki PP lifin filamentlerinin daha fazla olması ile de açıklanabilir. Çünkü, üçlü hibrit lif takviyesi durumunda mikro lifler tarafından daha fazla mikro çatlak köprülenmiştir. Ayrıca, PP lifin hibrit lif takviyeli KYB'lerin yarmada çekme dayanımı üzerinde mikro çelik liften daha olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Literatürde yürütülen bir çalışmada (Bassurucu ve Turk, 2022) da ANOVA analiz sonuçlarına göre yarmada çekme dayanımını en çok etkileyen parametre PP lif olarak bulunmuştur.



Şekil 4.10 : KYB karışımlarının yarmada çekme dayanımı değerleri.

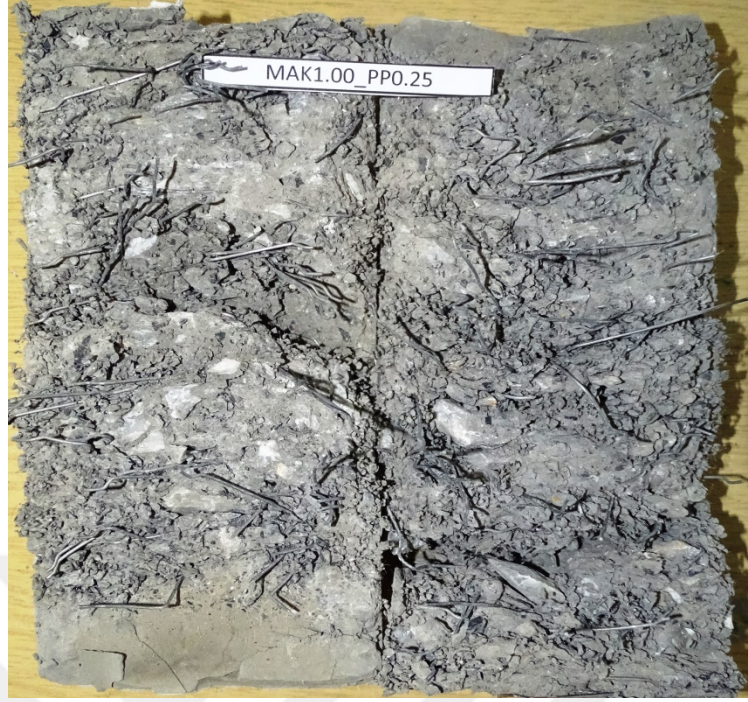
Sonuç olarak, tekli, ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli KYB karışımlarının yarmada çekme dayanımlarının değişiminde lif kombinasyonu, toplam lif hacmi ve mikro lif tipinin etkisi oldukça önemlidir. Diğer taraftan, liflerin yönlendirilmesi ile dağılımın homojenlik düzeyi de göz ardı edilmemelidir (Bakınız Şekil 4.11).



(a) MAK1.00



(b) MAK0.80_MIK0.20



(c) MAK1.00_PP0.25



(d) MAK0.80_MIK0.20_PP0.25

Şekil 4.11 : KYB karışımlarının lif dağılım görselleri.

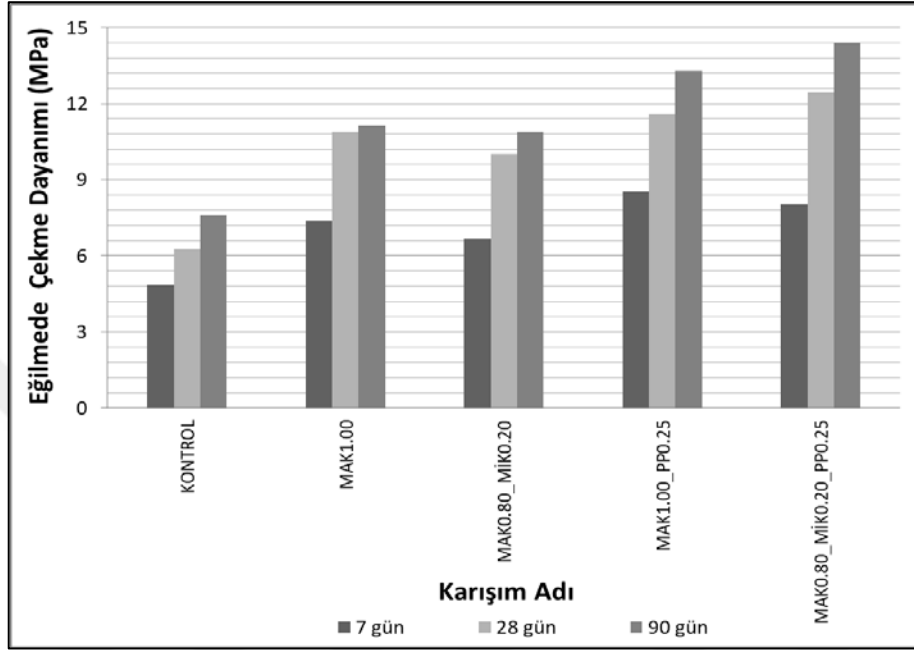
4.2.4 Eğilme performansı

4.2.4.1 Eğilmede çekme dayanımı

Tez çalışması kapsamındaki lifsiz kontrol ile tekli, ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip KYB karışımlarından üretilen 7, 28 ve 90 günlük 75x100x400 mm³ boyutlarındaki prizmatik KYB numunelerinin ortalama eğilmede çekme dayanımı değerleri, Çizelge 4.2 ve Şekil 4.12'de sunulmuştur. Şekil 4.12'den görüleceği üzere, KYB numunelerinin ortalama 90 günlük nihai eğilmede çekme dayanımı değerleri, puzolanik reaksiyonların etkisiyle, 28 günlük standart eğilmede çekme dayanımı değerlerine kıyasla %11.89 oranında arttığı bulunmuştur.

Lifsiz kontrol numunesinin 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri sırasıyla, 4.85 MPa, 6.27 MPa ve 7.62 MPa olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.12'den görüldüğü gibi, makro çelik lif ile mikro lifin (çelik ve/veya PP) kombinasyonu, tüm kür yaşları için KYB numunelerinin eğilmede çekme dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Sadece %1 makro çelik lif takviyeli KYB numunelerinin eğilmede çekme dayanımı, lifsiz kontrol numunelerine kıyasla 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla, %52.16, %73.52 ve %46.19 oranında artış olduğu belirlenmiştir. İkili hibrit çelik lif takviyesi ise 7, 28 ve 90 kür yaşı için lifsiz kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla, %37.53, %59.8 ve %42.65 oranında eğilmede çekme dayanımında artış sağlamıştır. Bu bulgulardan, kancalı uçlu ve daha uzun olan makro çelik lifin hibrit lif takviyeli karışımlar için temel bileşen olduğu ve etkin köprüleme özelliğinden dolayı tüm lif kombinasyonlarında bulunması gerektiği sonucuna varılabilir. Literatürde, Aboutair ve diğ. (2020) tarafından da eğilmede yüksek performans elde etmek için karma lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerde çift kancalı uçlu çelik liflerin varlığının ana parametre olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, diğer yapılan deneysel çalışmalarda (Abu-Lebdeh ve diğ, 2011; Rashiddadash ve diğ, 2014) da tekli kancalı uçlu makro çelik lif takviyesinin, sadece düz lif takviyesine kıyasla eğilme performansı üzerinde daha etkili olduğu vurgulanmıştır. Diğer taraftan, %0.25 PP lifin %1 makro çelik lif ile beraber kullanılması eğilmede çekme dayanımını, lifsiz kontrol numunesine kıyasla 7, 28 ve 90 gün kür yaşları için sırasıyla, %76.08, %84.69 ve %74.4 oranında arttırmıştır. Buradan, makro çelik lif ile birlikte mikro PP lif kullanılmasının mikro çelik life kıyasla eğilmede çekme dayanımı üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu açıktır. Çünkü, PP lifin yoğunluğunun mikro çelik life kıyasla daha düşük olması nedeniyle karışıma daha fazla sayıda PP lif filamentleri dâhil edilmiştir. Sonuçta, daha fazla

sayıda mikro çatlağın PP lif tarafından köprülenmesinin sağlandığı söylenebilir. Bunun yanında, Bassurucu ve Turk (2022) tarafından yapılan istatistiksel çalışmada da eğilmede çekme dayanımı için PP lifin, mikro çelik life kıyasla daha etkili bir deneysel değişken olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.12 : KYB karışımlarının eğilmede çekme dayanımı değerleri.

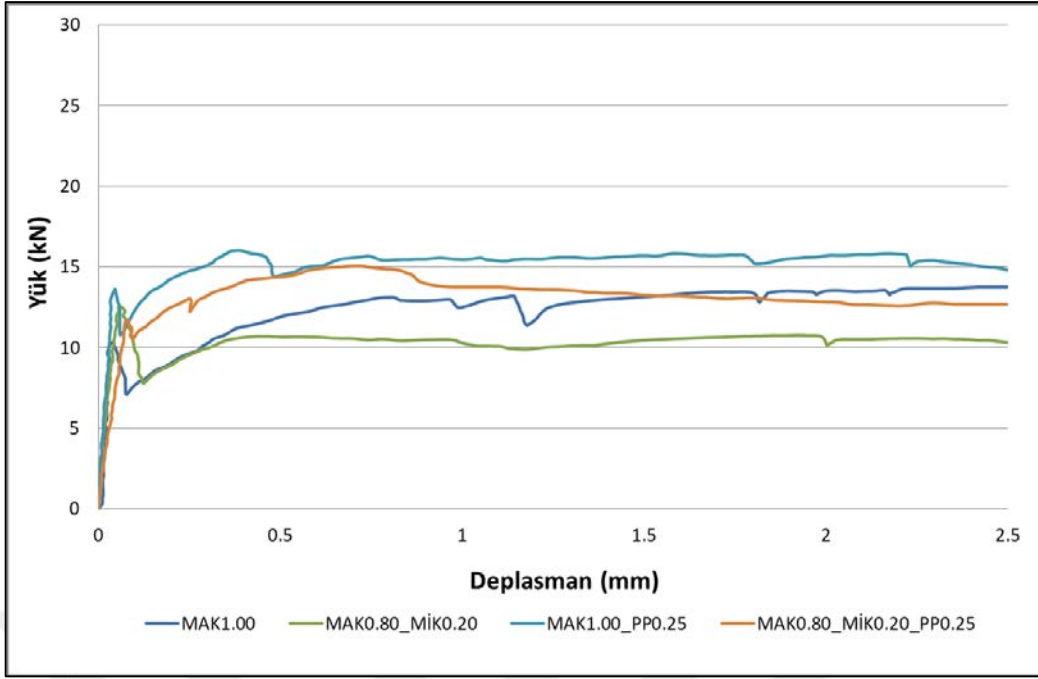
Tüm kür yaşları için lifsiz kontrol numunesine kıyasla, en yüksek eğilmede çekme dayanımı artışı üçlü hibrit lif takviyeli KYB numunelerinden elde edilmiştir. Çünkü, üçlü hibrit karışımın, iki farklı mikro lif (çelik ve PP) içermesi nedeniyle oluşan daha yüksek sinerji sayesinde daha fazla mikro çatlak köprülenmiş ve çatlak gelişimini geciktirmede ve çatlak ilerlemesini belirli seviyelerde önleme açısından avantaj elde edilmiştir. Makro çelik lif ile mikro lif olarak PP'nin birlikte karma olarak kullanılmasının çimento esaslı kompozitlerin eğilmede çekme dayanımını arttırdığı ile ilgili benzer sonuçlara bazı araştırmacılar (Afroz ve diğ., 2019; Liu ve diğ., 2019) tarafından da ulaşılmıştır.

4.2.4.2 Yük-açıklık ortası deplasman diyagramları ve çatlak özellikleri

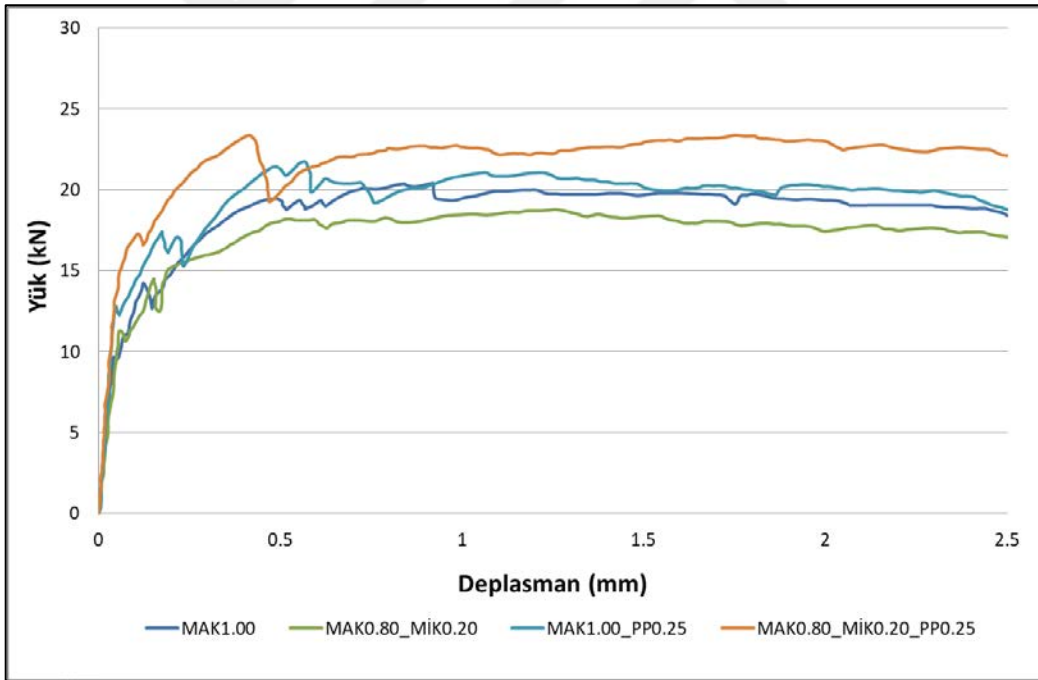
Lif kombinasyonunun eğilme davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için dört noktali eğilme yüklemesine maruz bırakılan farklı kür yaşlarına (7, 28 ve 90 gün) sahip tekli ve hibrit lif takviyeli KYB numunelerine ait yük-açıklık ortası deplasman diyagramları Şekil 4.13'de verilmiştir. Diyagramlar, her bir lif takviyeli KYB karışımı için

dört noktalı eğilme testine maruz bırakılan iki ayrı prizmatik kiriş numunesinden elde edilen değerlerin ortalaması kullanılarak çizilmiştir. Tüm lif takviyeli beton numunelerinde yük-açıklık ortası deplasman diyagramı, doğrusal elastik, sehim-sertleşmesi ve sehim-yumuşaması olmak üzere üç temel bölgeden oluşmaktadır (D. J. Kim ve diğ, 2011). Şekil 4.13'den görüleceği üzere, tüm kür yaşları için lif takviyeli KYB numunelerinde, eğrilerin lineer elastik kısmı benzer iken, 7 günlük MAK0.8_MİK0.2 KYB numunesi hariç tüm lifli numuneler sehim-sertleşmesi davranışı sergilemiştir. Burada, 7 günlük KYB numunelerinin sehim-yumuşaması davranışı, yeterince gelişmemiş matris dayanımına ve dolayısıyla zayıf mikro çelik lif-matris ara yüzeyinin bir sonucu olarak yeterince etkili olmayan çatlak köprüleme mekanizmasına dayandırılabilir. Ayrıca, genelde hibrit lifli karışımların sehim-sertleşmesi davranışının sebebi ise, makro çelik lif oranının en az %0.8 olmasına bağlanabilir. Literatürde, yüksek miktarda makro çelik lif takviyesinin betonun eğilme dayanımını arttırdığı ve sehim-sertleşmesi davranışı için önemli bir faktör olduğu belirtilmiştir (Deng ve diğ, 2017; Gesoglu ve diğ, 2016; Yoo ve diğ, 2017). Diğer taraftan, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında, sehim-sertleşme davranışının, farklı boyut ve narinlikteki liflerin sinerjisinin bir sonucu olarak üçlü hibrit lif takviyeli KYB numuneleri için çok daha belirgin olduğu belirlenmiştir.

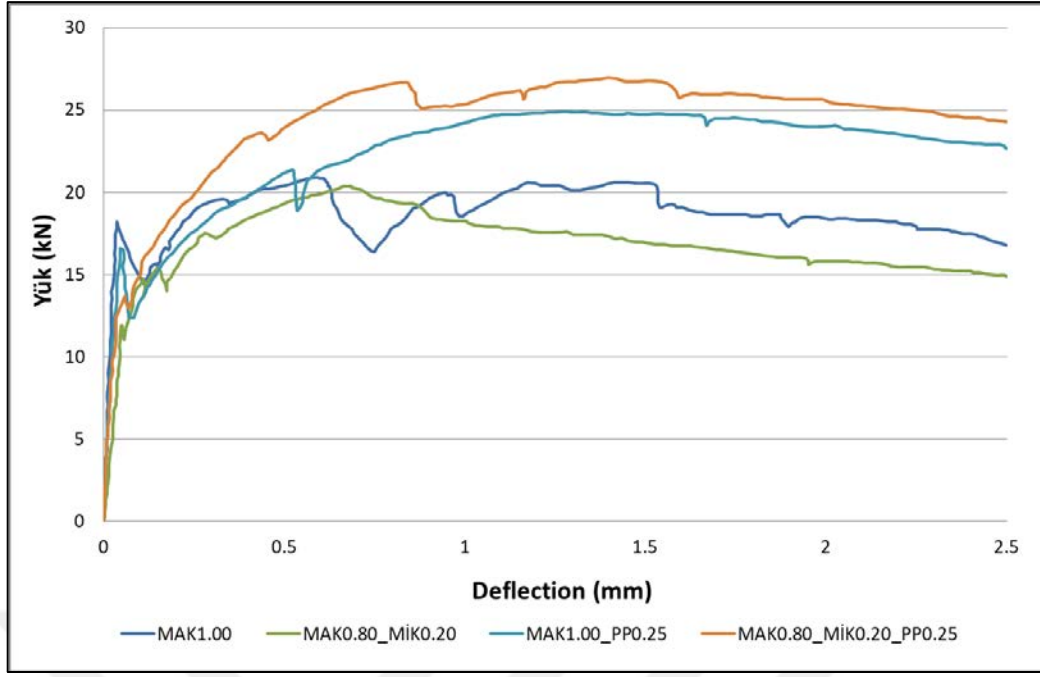
Tez çalışması kapsamında tasarlanan KYB karışımlarının yük-açıklık ortası deplasman eğrileri incelediğinde, 28 ve 90 gün kür yaşları için, en yüksek yük taşıma kapasitesi %0.8 makro çelik, %0.2 mikro çelik ve %0.25 PP lif içeren üçlü hibrit lifli KYB numunelerinden elde edilirken, bunu sırasıyla, %1 makro çelik ve %0.25 PP lif içeren ikili hibrit, %1 makro çelik lif içeren tekli ve en düşük taşıma kapasitesi ise %0.8 makro çelik ve %0.2 mikro çelik lif içeren ikili hibrit KYB karışımı takip etmiştir. Sonuçta, hem üçlü hem de ikili lif hibridizasyonu durumunda da mikro lif olarak PP lif takviyesinin, betonun nihai yük taşıma kapasitesi üzerinde mikro çelik life kıyasla, daha olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Hibrit lif takviyeli betonlarda, mikro (çelik ve PP) liflerin karışımda pozitif bir sinerjinin sonucu olarak nihai yük taşıma kapasitesini olumlu olarak etkilediği ile ilgili benzer sonuçlar diğer araştırmacılar (Afroz ve diğ, 2019; Liu ve diğ, 2019; Rashiddadash ve diğ, 2014; Turk ve diğ, 2021) tarafından da bulunmuştur.



(a) 7 gün



(b) 28 gün



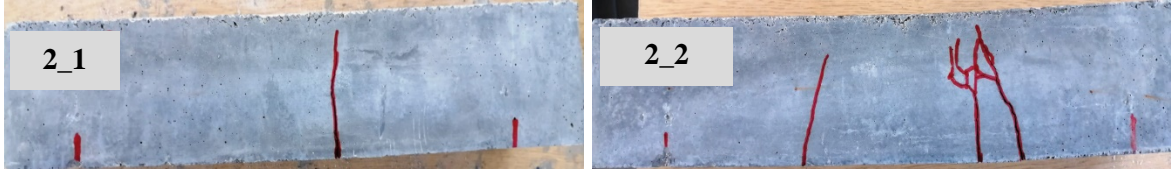
(c) 90 gün

Şekil 4.13 : Tekli, ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli KYB yük-deplasman eğrileri.

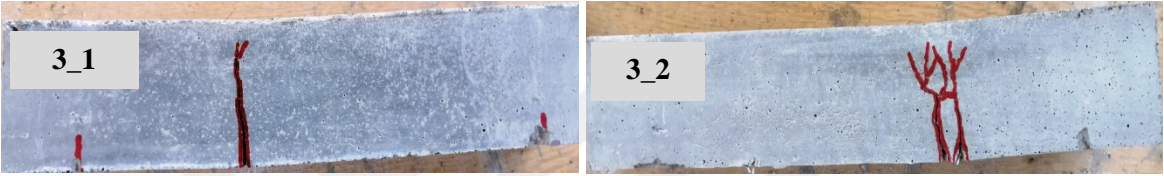
4.2.4.3 Eğilme yüklemesi altında lifli KYB numunelerinin çatlak özellikleri

Lif takviyeli KYB numunelerinin eğilme davranışını anlamak açısından çatlak modelleri oldukça önemlidir. Şekil 4.14-16'dan görüleceği üzere, tekli lif takviyeli KYB numunelerinde ilk çatlağın oluşumundan sonra artan açıklık ortası deplasman değeri ile birlikte tek tip lif köprülemesinin de bir etkisi olarak çatlakların genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, hibrit lif takviyeli KYB numunelerinde ise farklı tip liflerin çatlak köprülemedeki oluşturduğu sinerji etkisi nedeniyle, dört-noktalı eğilme testi esnasında çatlakların yön değiştirdiği ve ana çatlaklardan daha küçük ikincil çatlakların oluştuğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, makro çelik ile mikro çelik ve/veya PP liflerinin KYB karışımlarına eklenmesinin, tüm kür yaşları için hibrit lif takviyeli KYB numunelerinde çoklu çatlak davranışı görülürken, ileri kür yaşlarında daha belirgin çoklu çatlak davranışı gözlemlenmiştir. Yani, 90 günlük PP lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli KYB numunelerinde, ölçülen ortalama çatlak sayısı tekli makro lif takviyeli numuneye kıyasla 2 ile 2.5 kat artarken, buna bağlı olarak çatlak genişlikleri de önemli oranda azalarak, 88 µm ile 150 µm aralığında değiştiği görülmüştür. Bu durum, özellikle PP liflerin çok sayıda ve küçük genişlikte çatlak oluşumunda önemli bir etkiye sahip olmasına ve dolayısıyla makro çatlakların oluşumunu geciktirmesine dayandırılabilir.

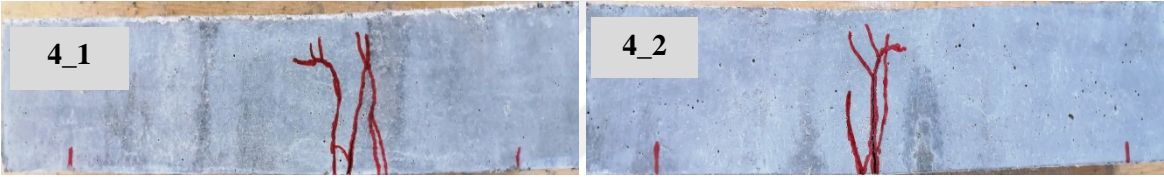
Literatürde yürütülen bir deneysel çalışmada (Niu ve diğ, 2020) da arttırılmış etriye oranı yerine yüksek performanslı PP lif kullanımının çatlak gelişimini daha etkili bir şekilde önlediği vurgulanmıştır. Dolayısıyla, özellikle üçlü hibrit lif takviyeli KYB'nin betonarme yapıların hizmet ömrü açısından önemli bir avantaja sahip olduğu da söylenebilir. Benzer sonuçlar, Sahmaran ve diğ. (2007) ve Şahmaran ve Li (2009) tarafından da bulunmuştur.



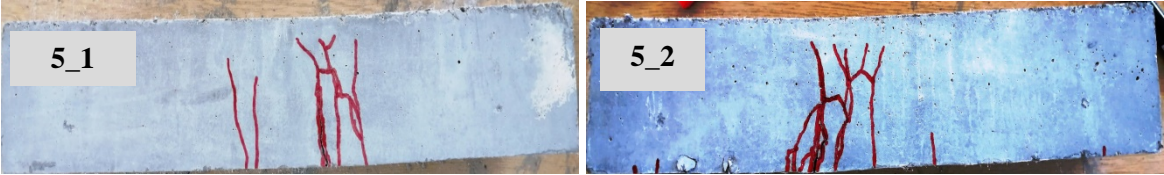
(a) MAK1



(b) MAK0.8_MİK0.2

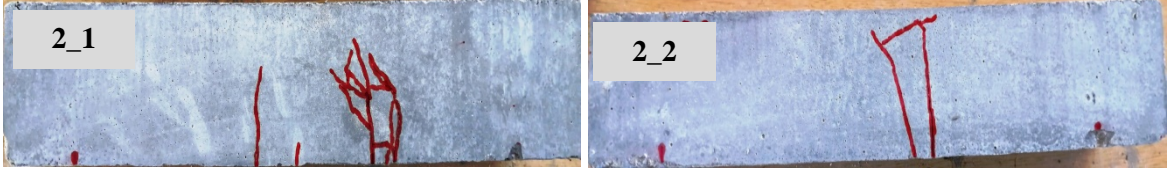


(c) MAK1.00_PP0.25

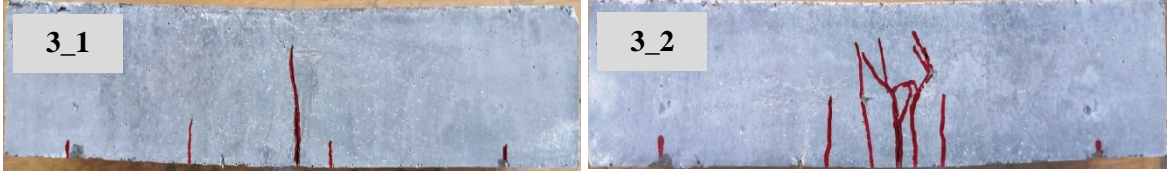


(d) MAK0.80_MİK0.20_PP0.25

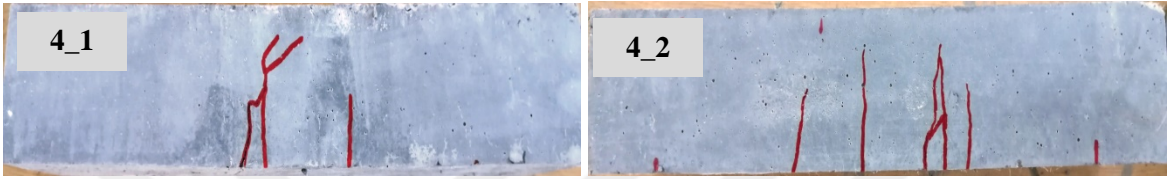
Şekil 4.14 : Eğilme yüklemesine maruz bırakılan 7 günlük numunelerin çatlak davranışı görselleri.



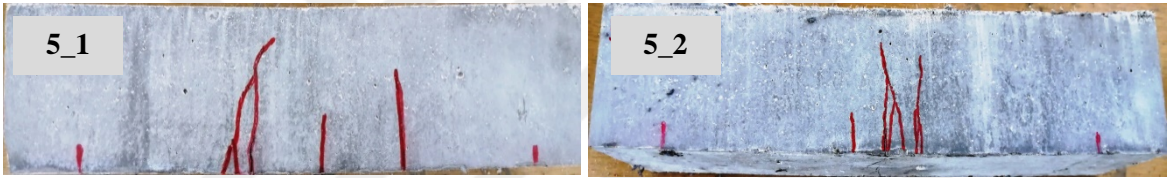
(a) MAK1



(b) MAK0.8_MİK0.2

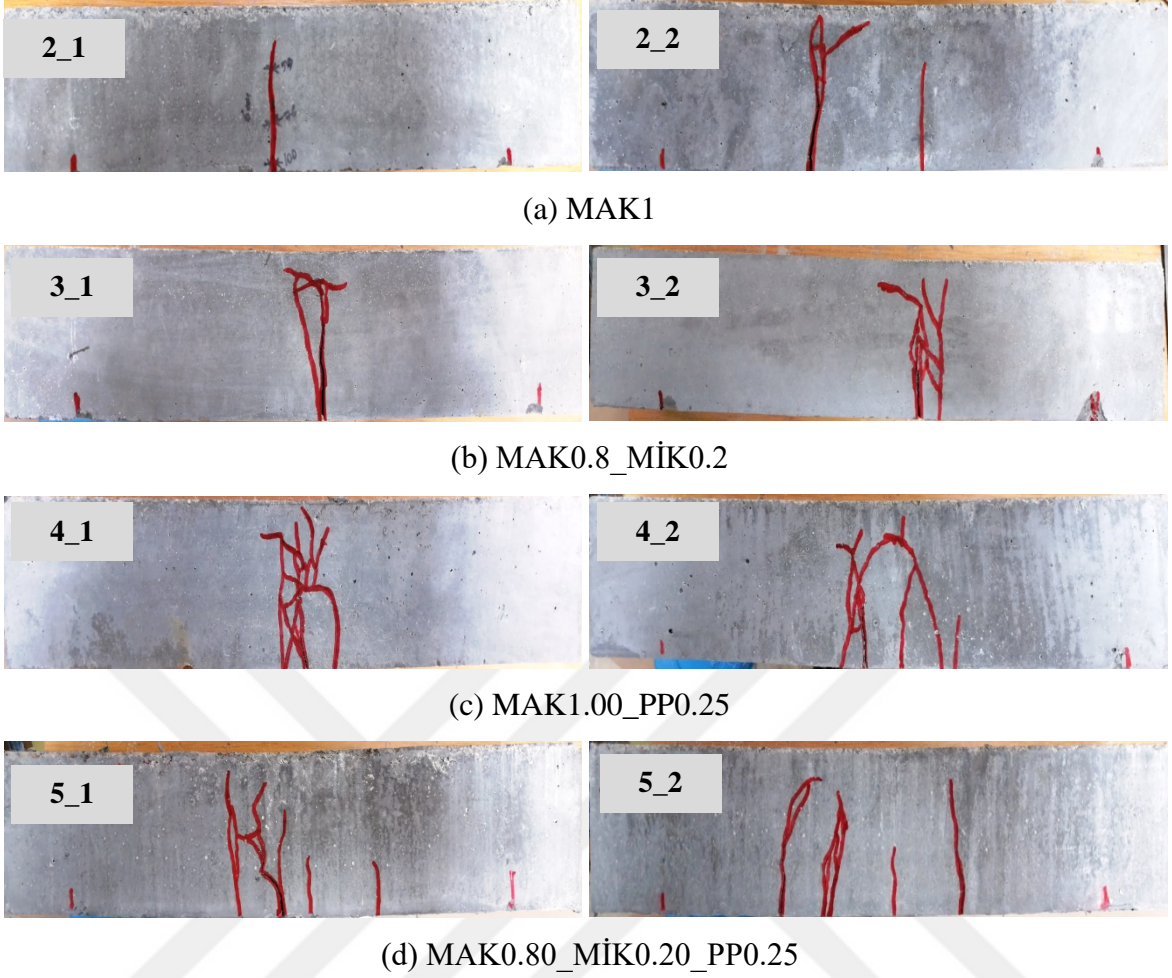


(c) MAK1.00_PP0.25



(d) MAK0.80_MİK0.20_PP0.25

Şekil 4.15 : Eğilme yüklemesine maruz bırakılan 28 günlük numunelerin çatlak davranışı görselleri.

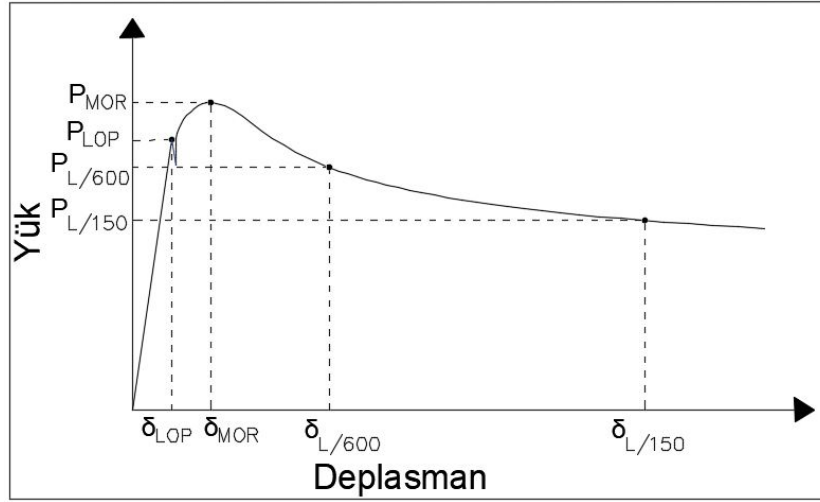


Şekil 4.16 : Eğilme yüklemesine maruz bırakılan 90 günlük numunelerin çatlak davranışı görselleri.

4.2.4.4 Eğilme tokluğu ve süneklilik özellikleri

Özellikle yüksek binaların sismik yüklere ve patlama yüklerine karşı dayanıklılığı açısından, kompozitlerin eğilme tokluğu oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Kompozit malzemelerin tokluk durumunu değerlendirmek için dört-noktalı eğilme testi sonucunda elde edilen, δ_{LOP} ve δ_{MOR} sırasıyla, elastik limit (ilk çatlak yükü) ve maksimum eğilme dayanımına karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerlerini temsil etmektedir (Şekil 4.17). Tüm lif takviyeli KYB numunelerinin δ_{LOP} , δ_{MOR} , $\delta_{L/600}$ (0.5 mm) ve $\delta_{L/150}$ (2 mm) açıklık ortası deplasman (d) değerlerine karşılık gelen eğilme dayanımı (f) ve tokluk (T) değerleri, 28 ve 90 kür günü için, sırasıyla, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de sunulmuştur. 7 günlük KYB numunelerinin eğilme davranışında, diğer kür yaşlarına kıyasla mikro lif açısından henüz yeterince gelişmemiş lif-matris arayüzeyinden dolayı lif hibridizasyonun

etkisi tam olarak görülemediği için eğilme tokluğu ve süneklik indeksi değerleri sadece 28 ve 90 günlük KYB numuneleri için belirlenmiştir.



Şekil 4.17 : ASTM C1609 standardına göre eğilme tokluğu parametreleri.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'dan görüleceği gibi, hem 28 hem de 90 günlük kür yaşları için, PP lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli numuneler, δ_{MOR} , $\delta_{L/600}$ ve $\delta_{L/150}$ açıklık ortası deplasman noktalarında en yüksek eğilme tokluğu değerlerine sahipken, en düşük eğilme tokluğu değerleri ise mikro çelik lif içeren ikili hibrit lif takviyeli numunelerden elde edilmiştir. Buradan, bu çalışmadaki 90 günlük orta derecede yüksek dayanım düzeyindeki KYB karışımlarında, en yüksek eğilme tokluğu değerleri PP lif takviyeli numunelerden elde edilmiş olup, mikro çelik lif içeren ikili hibrit lif takviyeli numunelerin ise eğilme tokluğu açısından öne çıkamadığı söylenebilir. Literatürde, bazı çalışmalarda (Simões ve diğ., 2017; Won ve diğ., 2013) da beton basınç dayanımının düz uçlu mikro lif/matris dayanımını güçlü bir şekilde etkilediği bulunmuştur. Bir başka çalışmada (D. L. Nguyen ve diğ., 2013) ise hibrit lif takviyeli betonun eğilme davranışı üzerinde boyut etkisi araştırılarak özellikle eğilme dayanımı ve tokluk özellikleri açısından boyut etkisi olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, betonun herhangi bir bölümünde çatlak köprüleyen PP lifinin çekme dayanımı aşıldığında ikinci bir çatlak meydana gelerek, karışıma mikro çelik life göre çok sayıda PP lifin ilave edilmesinin sonucu olarak birçok ilave lif köprüsünün oluşması nedeniyle betonun eğilme tokluğunun önemli ölçüde iyileştiği söylenebilir (Felekoğlu ve diğ., 2009). Ayrıca, birçok araştırmacı (Turk ve diğ., 2021; Rashiddadash ve diğ., 2014; Dawood ve Hamad 2015), yaptıkları çalışmalarda hibrit lifli beton karışımlarının, tek lifli beton karışımlarından daha iyi tokluk performansına sahip

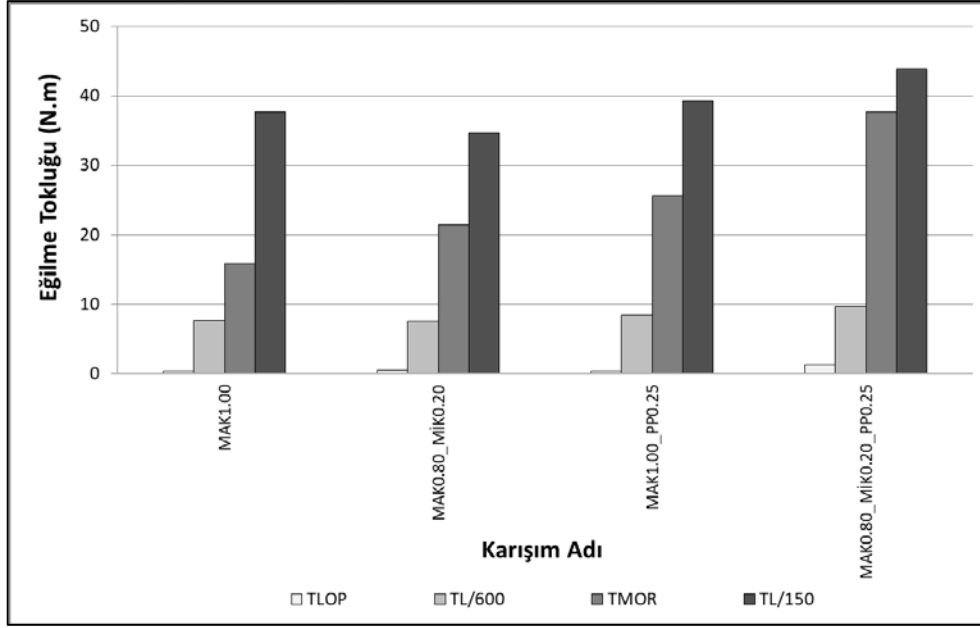
olduğunu bulmuşlardır. Sonuçta, özellikle basınç dayanımının çok yüksek olmadığı küçük ölçekli numunelerde, hibrit lif takviyeli KYB numunelerinin eğilme tokluğunun iyileştirilmesi açısından mikro çelik life kıyasla PP lifin daha da etkili olduğu vurgulanabilir.

Çizelge 4.3 : 28 günlük numunelerin eğilme tokluğu değerleri.

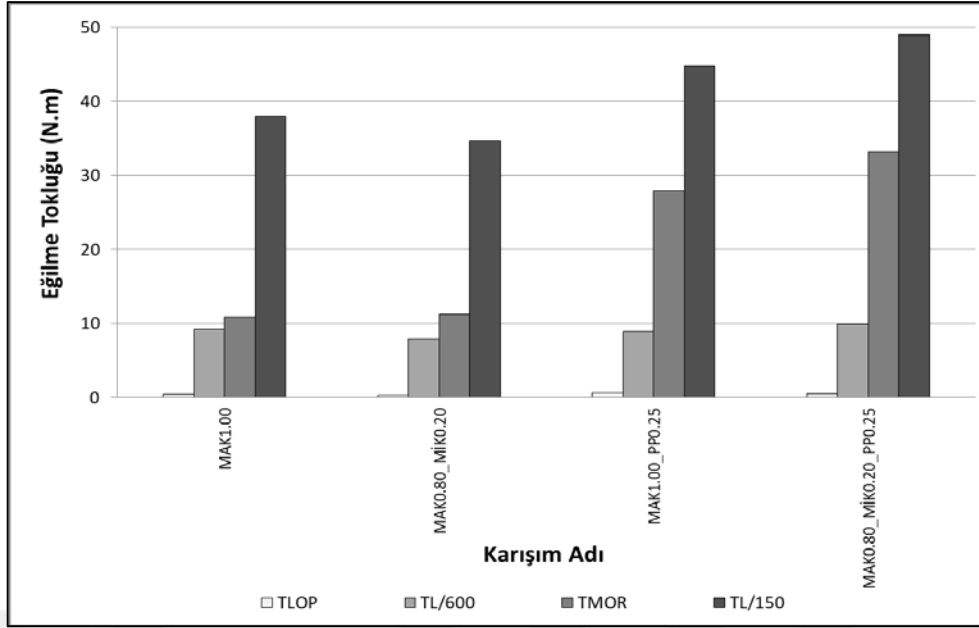
Karışım Adı	d_{L0P}	d_{MOR}	$d_{L/600}$	$d_{L/150}$	f_{L0P}	f_{MOR}	$f_{L/600}$	$f_{L/150}$	T_{L0P}	T_{MOR}	$T_{L/600}$	$T_{L/150}$
MAK1.00	0.04	0.92	0.5	2	5.15	10.88	10.29	10.32	0.29	15.88	7.69	37.73
MAK0.80_MiK0.20	0.06	1.26	0.5	2	5.99	10.02	9.69	9.30	0.40	21.42	7.55	34.70
MAK1.00_PP0.25	0.05	1.33	0.5	2	6.77	11.58	11.32	10.77	0.31	25.63	8.46	39.28
MAK0.80_MiK0.20_PP0.25	0.09	1.75	0.5	2	9.01	12.45	10.62	12.19	1.20	37.71	9.67	43.92

Çizelge 4.4 : 90 günlük numunelerin eğilme tokluğu değerleri.

Karışım Adı	d_{L0P}	d_{MOR}	$d_{L/600}$	$d_{L/150}$	f_{L0P}	f_{MOR}	$f_{L/600}$	$f_{L/150}$	T_{L0P}	T_{MOR}	$T_{L/600}$	$T_{L/150}$
MAK1.00	0.04	0.59	0.5	2	9.50	11.14	10.89	9.82	0.37	10.86	9.21	37.94
MAK0.80_MiK0.20	0.05	0.67	0.5	2	6.35	10.87	10.31	8.42	0.31	11.23	7.94	34.64
MAK1.00_PP0.25	0.05	1.28	0.5	2	8.84	13.29	11.35	12.81	0.57	27.94	8.88	44.83
MAK0.80_MiK0.20_PP0.25	0.05	1.40	0.5	2	6.94	14.37	12.80	13.57	0.48	33.21	9.87	49.05



Şekil 4.18 : 28 günlük KYB numunelerinin eğilme tokluğu değerleri.



Şekil 4.19 : 90 günlük KYB numunelerinin eğilme tokluğu değerleri.

Tüm bunlara ek olarak, Çizelge 4.5’de görüldüğü gibi, tüm lif takviyeli KYB numuneleri için süneklik indeksi değerleri, δ_{MOR} ’daki açıklık ortası deplasman değerinin, ilk çatlak deplasman değerine (δ_{LOP}) oranı olarak hesaplanmıştır (Naaman AE, 1995). Bu indeks değerinin daha yüksek olması durumu, lif takviyeli betonun daha sünek olduğu anlamına gelmektedir. Tüm lif takviyeli KYB numunelerinde, 28 ve 90 gün kür yaşları için, ilk çatlak noktasına karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerlerinin (0.04-0.09 mm arasında) birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Çünkü, ilk çatlak noktasına karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerleri, lif köprülemesi söz konusu olmadığı için matris dayanımından daha fazla etkilenmektedir (Yoo ve diğ, 2017). Çizelge 4.5’den görüleceği üzere, üçlü hibrit lif takviyeli KYB numunelerinin süneklik indeksi değerleri, 28 ve 90 gün için sırasıyla, 19.44 ve 28 ile en yüksek olarak belirlenmiştir. Ayrıca, 28 ve 90 günlük %1 makro çelik ve %0.25 PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli KYB numunelerin süneklik indeksi değerlerinin, %0.8 makro çelik ve %0.2 mikro çelik lif içeren ikili hibrit çelik lif takviyeli KYB numunelerinkinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla, ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli KYB karışımlarına PP lif ilave edilmesinin, mikro çelik liften daha iyi bir süneklik performansına neden olduğu söylenebilir. Literatürde yürütülen bir deneysel çalışmada (Niu ve diğ, 2020) da, kolon numunelerinde arttırılmış etriye oranı yerine sadece yüksek performanslı PP liflerin kullanılması ile kolonların enerji yutma kapasitesinin ve sünekliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5 : Lif takviyeli KYB karışımlarının süneklik indeksi değerleri.

Karışım Adı	28 gün	90 gün
MAK1.00	23	14.75
MAK0.80_MİK0.20	21	13.4
MAK1.00_PP0.25	26.6	25.6
MAK0.80_MİK0.20_PP0.25	19.44	28

4.3 Büyük Ölçekli Döşeme-Kolon Birleşim Elemanlarının Zımbalama Performansı

Bu tez çalışması kapsamında, sadece lif takviyesi ve/veya farklı zımbalama donatısı (kapalı etriye ve kesme kaması) olmak üzere toplam 3 farklı zımbalama önlemini içeren büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama performansı araştırılmıştır. 1 adet lifsiz kontrol ile birlikte farklı tip (çelik ve sentetik), boyut (makro ve mikro) ve narinliklerdeki liflerin KYB'ye tekli (sadece makro çelik), ikili (makro çelik/mikro çelik ve makro çelik/PP) ve üçlü (makro çelik, mikro çelik ve PP) harmanlama şeklinde dâhil edilmesi ile tasarlanan 4 adet lif takviyeli olmak üzere toplam 5 adet KYB karışımı tasarlanmıştır. Tasarlanan her bir KYB karışımı için 2'şer adet olmak üzere toplam 30 adet 1300x1300x120 mm³ boyutlarında büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları üretilerek test edilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, döşeme-kolon birleşim elemanlarında zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ve/veya farklı zımbalama donatılarına (kapalı etriye ve kesme kaması) sahip test numuneleri toplam 3 seri olarak gruplandırılmıştır. Seri I, 1 adet lifsiz kontrol ile zımbalama önlemi olarak farklı lif kombinasyonlarına (sadece tekli ile ikili ve üçlü lif hibridizasyonu) sahip test numunelerinden oluşurken, Seri II ve Seri III ise zımbalama önlemi olarak sırasıyla, 1 adet lifsiz kapalı etriye ve 1 adet lifsiz kesme kaması ile birlikte Seri I'de belirtilen farklı lif kombinasyonlarından oluşan test numunelerini içermektedir. Çizelge 4.6'da, büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımlarının tespiti amacıyla gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen bulgular sunulmuş olup, zımbalama dayanımı, enerji yutma kapasitesi ve süneklik indeksi değerleri için istatistiksel bir değerlendirme de yapılmıştır.

Çizelge 4.6 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait deney bulguları.

Numune	f_c (MPa)	f_{tr} (MPa)	P_{cr} (kN)	δ_{cr} (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	Göçme Modu
SERİ I (ZİMBALAMA ÖNLEMİ OLARAK SADECE LİF TAKVİYESİ)							
DKB_KONTROL	1.Numune	71.7	7.15	91.52	2.92	304	9.64
	2.Numune	68.85	5.81	83.09	1.89	292.5	7.22
	Ortalama	70.28	6.48	87.31	2.41	298.3	8.43
	St. sapma	2.02	0.95	5.96	0.73	8.13	1.71
DKB_MAK1	1.Numune	76.65	10.8	183.85	4.58	430.75	10.20
	2.Numune	74.7	8.14	168.46	5.42	438.24	10.63
	Ortalama	75.68	9.47	176.16	5	434.5	10.42
	St. sapma	1.38	1.88	10.88	0.59	5.3	0.3
DKB_MAK0.8_MİK0.2	1.Numune	79.45	8.65	170.54	4.96	474.5	10.9
	2.Numune	76.05	9.83	182.97	4.33	488.7	10.7
	Ortalama	77.75	9.24	176.76	4.65	481.6	10.80
	St. sapma	2.40	0.83	8.79	0.45	10.04	0.14
DKB_MAK1_PP0.25	1.Numune	70.3	11.64	143.53	4.67	449.7	12.85
	2.Numune	67.3	10.76	160.83	4.88	474.1	9.8
	Ortalama	68.8	11.2	152.18	4.78	461.9	11.33
	St. sapma	2.12	0.62	12.23	0.15	17.25	2.16
DKB_MAK0.8_MİK0.2_PP0.25	1.Numune	73.7	13.4	183.4	5.26	492.66	15.48
	2.Numune	71	11.02	197.5	5.35	485.14	12.95
	Ortalama	72.35	12.21	190.45	5.31	488.9	14.22
	St. sapma	1.91	1.68	9.97	0.06	5.32	1.79
SERİ II (ZİMBALAMA ÖNLEMİ OLARAK LİF VE KAPALI ETRİYE TAKVİYESİ)							
DKB_KONTROL_KETR	1.Numune	69.45	6.7	96.33	2.92	319.67	8.96
	2.Numune	69.75	5.8	103.88	2.17	326.93	10.6
	Ortalama	69.6	6.25	100.08	2.55	323.3	9.78
	St. sapma	0.21	0.64	5.3	0.53	5.13	1.16
DKB_MAK1_KETR	1.Numune	73.4	9.4	168.26	5.36	475.2	13.22
	2.Numune	69.15	8.8	191.17	5.94	486.76	13.86
	Ortalama	71.28	9.1	179.72	5.65	480.98	13.54
	St. sapma	3.01	0.42	16.2	0.41	8.17	0.45
DKB_MAK0.8_MİK0.2_KETR	1.Numune	68.05	9.8	179.97	4.79	497.25	13.43
	2.Numune	63.8	7.44	183.16	5.49	516.74	15.24
	Ortalama	65.93	8.62	181.57	5.14	507	14.34
	St. sapma	3.01	1.67	2.26	0.49	13.78	1.28
DKB_MAK1_PP0.25_KETR	1.Numune	72.25	11.89	176.69	5.69	498.48	15.36
	2.Numune	68.95	9.77	183.76	5.53	491.92	15.95
	Ortalama	70.6	10.83	180.23	5.61	495.2	15.66
	St. sapma	2.33	1.5	5	0.11	4.64	0.42
DKB_MAK0.8_MİK0.2_PP0.25_KETR	1.Numune	60.75	12.17	190.92	5.07	554.19	12.96
	2.Numune	64.2	10.43	184.03	4.98	558.4	14.33
	Ortalama	62.48	11.3	187.48	5.03	556.3	13.65
	St. sapma	2.44	1.23	4.87	0.06	2.98	0.97
SERİ III (ZİMBALAMA ÖNLEMİ OLARAK LİF VE KESME KAMASI TAKVİYESİ)							
DKB_KONTROL_KAMA	1.Numune	62.7	6.75	114.3	4.64	388.6	12.15
	2.Numune	63.75	5.3	132.11	4.09	363.2	11.44
	Ortalama	63.23	6.03	123.21	4.37	375.9	11.8
	St. sapma	0.74	1.03	12.59	0.39	17.96	0.5
DKB_MAK1_KAMA	1.Numune	59.65	7.9	183.16	5.9	534.8	14.85
	2.Numune	55.75	9.4	172.6	4.87	510.6	14.13
	Ortalama	57.7	8.65	177.88	5.39	522.7	14.49
	St. sapma	2.76	1.06	7.47	0.73	17.11	0.51
DKB_MAK0.8_MİK0.2_KAMA	1.Numune	63	9.1	190.42	4.19	562.09	11.09
	2.Numune	65.9	7.96	197.85	5.12	558.51	13.6
	Ortalama	64.45	8.53	194.14	4.66	560.3	12.35
	St. sapma	2.05	0.81	5.25	0.66	2.53	1.77
DKB_MAK1_PP0.25_KAMA	1.Numune	55.2	10.04	174.03	4.28	558.13	12.62
	2.Numune	53.7	10.8	184.91	4.72	556.87	14.34
	Ortalama	54.45	10.42	179.47	4.5	557.5	13.48
	St. sapma	1.06	0.54	7.69	0.31	0.89	1.22
DKB_MAK0.8_MİK0.2_PP0.25_KAMA	1.Numune	60.15	12.14	193.88	4.76	568.45	13.8
	2.Numune	64.8	10.76	182.76	4.1	559.75	11.92
	Ortalama	62.48	11.45	188.32	4.43	564.1	12.86
	St. sapma	3.29	0.98	7.86	0.47	6.15	1.33

4.3.1 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı

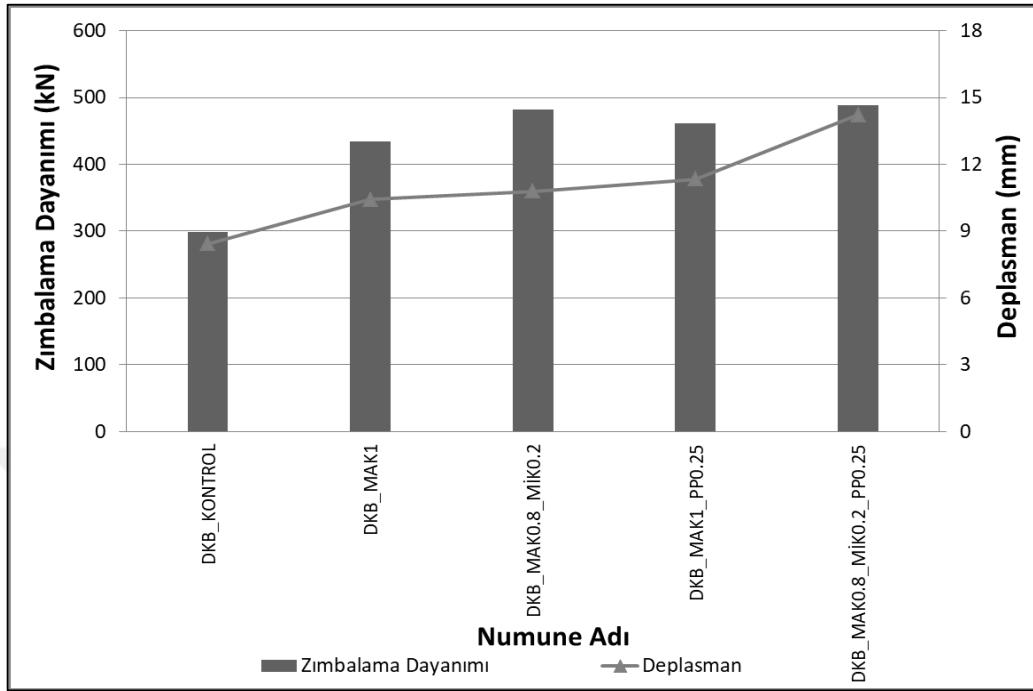
4.3.1.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)

Tez çalışması kapsamında, 90 günlük zımbalama donatısız lifsiz kontrol ile tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait ortalama zımbalama dayanımı değerleri, Çizelge 4.6 ve Şekil 4.20’de verilmiştir. Şekil 4.20’den görüleceği gibi, tüm lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımının, lif takviyesiz kontrol test numunelerine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımında, lifsiz kontrol numunesine kıyasla en düşük artış %45.66 ile sadece tekli %1 makro çelik takviyeli test numunelerinden elde edilmiştir. Diğer taraftan, mikro çelik veya PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımlarının ise lifsiz kontrol numunesine kıyasla sırasıyla, %61.45 ve %54.84 oranlarında arttığı belirlenmiştir. Bu durum, zımbalama bölgesinde makro ve mikro çatlakların sırasıyla, kancalı uçlu ve daha uzun olan makro ve mikro lifler tarafından köprülenmesine ve hibrit lif kombinasyonunun bir sonucu olarak oluşturdukları sinerji ile bu çatlakların oluşumunu ve yayılmasını geciktirmelerine dayandırılabilir. Ayrıca, makro çelik lif ile birlikte mikro çelik lif hibridizasyonunun, PP life kıyasla zımbalama dayanımı üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu vurgulanabilir. Lif takviyesinin döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını arttırdığı ile ilgili literatürde bazı çalışmalar (Caratelli ve diğ, 2016; Harajli ve diğ, 1995; Lee ve diğ, 2008; Saatçı ve diğ, 2019) mevcuttur.

En yüksek zımbalama dayanımı artışı, lifsiz kontrol numunesine kıyasla, %63.9 ile üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarından elde edilmiştir. Çünkü, iki farklı mikro lif (çelik ve PP) içeren üçlü hibrit karışımı, bu sayede sahip olduğu yüksek sinerji sayesinde daha fazla mikro çatlağın köprülenmesi, çatlak gelişiminin geciktirilmesi ve çatlak ilerlemesinin belirli seviyelerde önlenmesi açısından diğer lif kombinasyonlarına kıyasla daha avantajlıdır. Sonuç olarak, tekli lif takviyesi, döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını sınırlı oranda arttırırken, hibrit lif takviyesinin ise oluşan sinerji sayesinde zımbalama dayanımı açısından daha etkili olduğu açıktır. Bunun

yanında, hibrit lif takviyesi durumunda mikro lif tipinin de döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı üzerinde önemli bir role sahip olduğu bulunmuştur.



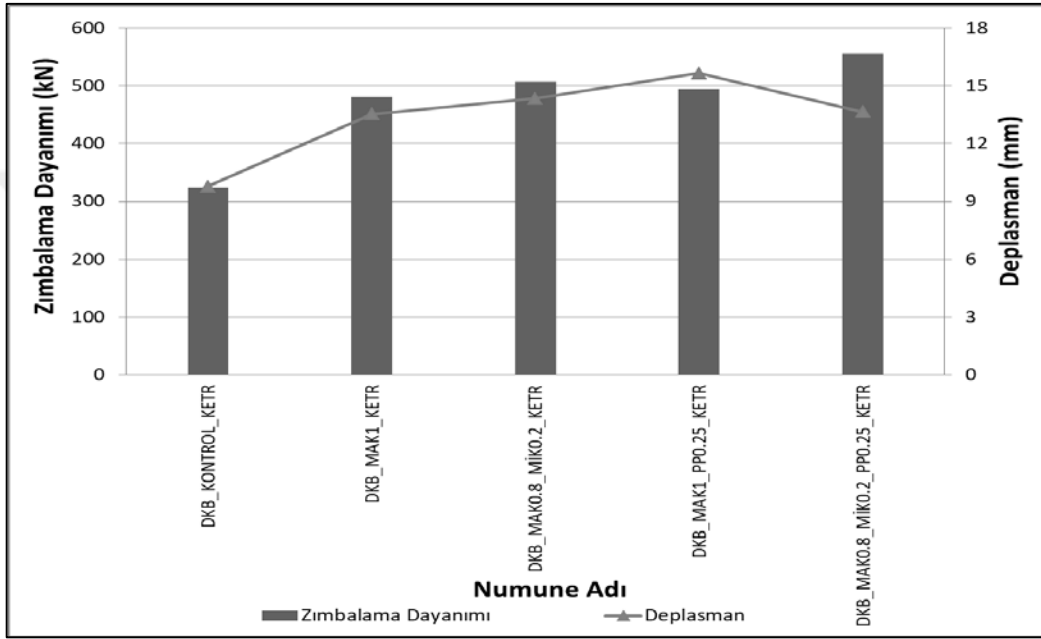
Şekil 4.20 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı değerleri.

4.3.1.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)

90 günlük kapalı etriye donatılı lifsiz kontrol ile kapalı etriye donatılı tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait ortalama zımbalama dayanımı değerleri, Çizelge 4.6 ve Şekil 4.21’de sunulmuştur. Şekil 4.21’den görüleceği üzere, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesi esas alındığında, KYB karışımlarına hem tek hem de hibrit lif takviyesinin, döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını arttırdığı bulunmuştur.

Kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımında, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesine kıyasla, en düşük artış %48.77 ile tekli %1 makro çelik takviyeli test numunelerinden elde edilmiştir. Ayrıca, mikro çelik veya PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımlarının, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesine kıyasla sırasıyla, %56.82 ve %53.17 oranlarında arttığı bulunmuştur. Buradan,

kirişsiz döşeme sistemlerinde lif takviyesinin, zımbalama donatılarının ankraj dayanımına olan pozitif katkısından dolayı daha etkili bir şekilde kesme gerilmesi karşılayabilmelerini sağlayarak, yönetmelikler tarafından belirlenen döşeme kalınlığı sınırlamalarına bir çözüm olacağı sonucuna varılabilir. Ayrıca, zımbalama donatısız döşeme-kolon birleşim elemanlarına benzer şekilde, ikili lif hibridizasyonunda, makro çelik lif ile mikro çelik lif kullanımının, PP life kıyasla kapalı etriyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



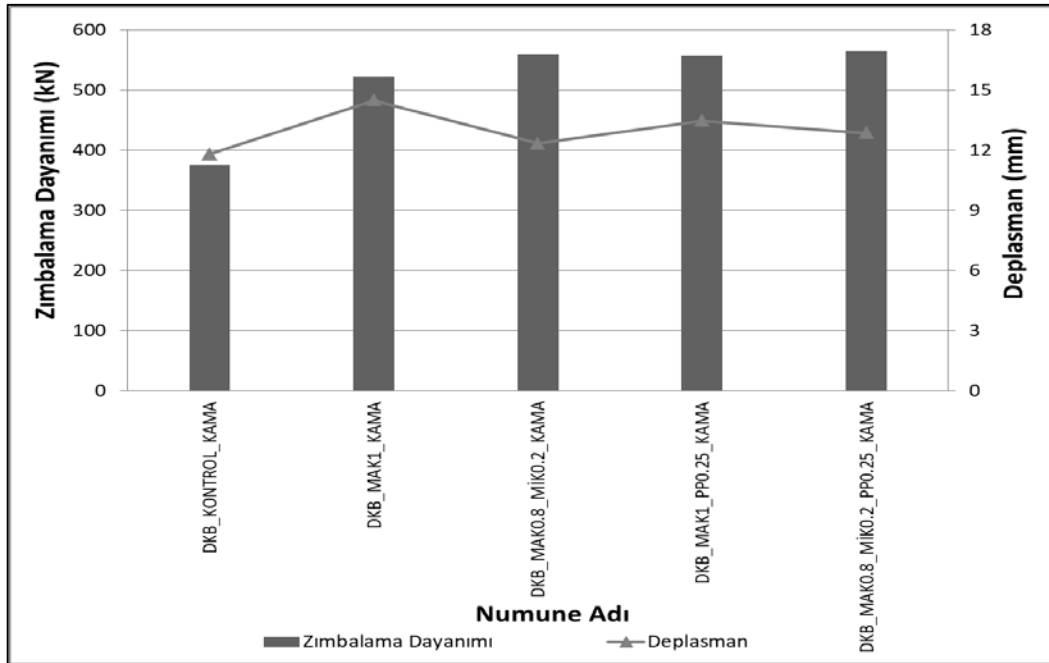
Şekil 4.21 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı değerleri.

Kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları için en yüksek zımbalama dayanımı artışı, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol numunesine kıyasla, iki farklı mikro lifin oluşturduğu yüksek sinerji sayesinde %72.07 ile üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarından elde edilmiştir. Literatürdeki bazı çalışmalarda (Kina ve Turk, 2021; Turk ve Bassurucu, 2021) beton karışımına hibrit lif takviyesinin kenetlenme dayanımını arttırmada en etkili bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır. Dolayısıyla, üçlü lif hibridizasyonunun zımbalama donatılarının ankraj dayanımı üzerinde daha yüksek bir katkı sağlayacağı ve böylece, kirişsiz döşeme sistemlerinde kapalı etriye zımbalama donatısının kesme gerilmelerini karşılamada daha etkili olacağı açıktır.

4.3.1.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)

90 günlük kesme kaması donatılı lifsiz kontrol ile kesme kaması donatılı tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait ortalama zımbalama dayanımı değerleri, Çizelge 4.6 ve Şekil 4.22’de verilmiştir. Şekil 4.22’den görüleceği üzere, KYB karışımlarına lif takviyesinin, lifsiz kesme kaması donatılı kontrol numunesine kıyasla, döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını arttırdığı belirlenmiştir.

Kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımında, lifsiz kesme kaması donatılı kontrol test numunesine kıyasla en düşük artış %39.05 ile sadece %1 makro çelik takviyeli test numunelerinden elde edilmiştir. Diğer taraftan, mikro çelik lif içeren ikili hibrit lif takviyeli kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı, lifsiz kesme kaması donatılı kontrol numunesine kıyasla %49.06 artarken, mikro lif olarak PP lif takviyesi durumunda ise %48.31 oranında arttığı bulunmuştur. Buradan, ikili lif hibridizasyonunda, makro çelik lif ile birlikte hem mikro çelik hem de PP lif ilavesinin kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı üzerinde benzer bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.22 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı değerleri.

Kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında en yüksek zımbalama dayanımı artışı, lifsiz kesme kaması donatılı kontrol numunesine kıyasla, %50.07 ile üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarından elde edilmiştir. Buradan, döşeme-kolon birleşim elemanlarında farklı tip ve hibridizasyonda lif takviyesinin, kesme kamalarının ankraj dayanımını arttırmasından dolayı kesme kamalarında daha yüksek kesme gerilmesi karşılanmasına sebep olduğu sonucuna varılabilir. Dolayısıyla, kesme kaması donatısının yanında tekli veya hibrit lif takviyesinin kullanımı ile birlikte, TS 500 (2000) yapı şartnamesinde kirişsiz döşeme sistemlerinde zımbalama donatısının kullanımı için döşeme kalınlığının en az 25 cm olması koşulunun azaltılarak revize edilebileceği açıktır. Ayrıca, lif takviyeli kesme kaması donatılı Seri III döşeme-kolon birleşim elemanlarında tüm hibrit lif kombinasyonları (ikili ve üçlü) için lifsiz kesme kaması donatılı kontrol numunesine kıyasla, benzer zımbalama dayanımı artışları elde edilmiştir. Buradan, hibrit lif kombinasyonunun kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında önemli bir etkiye sahip olmadığı vurgulanabilir.

4.3.1.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için zımbalama dayanımlarının karşılaştırılması

Ersoy ve Özcebe (2001) tarafından kirişsiz döşeme sistemleri için zımbalama donatısının etkinliği ile ilgili tartışmaların halen sürdüğü ve zımbalama tasarım kuvvetinin tamamen zımbalama donatısına ihtiyaç duyulmadan karşılanması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, lif takviyesinin tek başına veya farklı zımbalama donatıları ile birlikte zımbalama dayanımını arttırmak amacıyla kullanılmasının büyük bir önem arz ettiği açıktır. Tez çalışması kapsamında, lif takviyesi ve zımbalama donatısı içermeyen Seri I kontrol numunesine kıyasla, döşeme-kolon birleşim elemanlarına ikili ve üçlü hibrit lif takviyesinin zımbalama dayanımında ortalama %60, tekli makro çelik lif takviyesinin ise %45 oranında bir artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Seri I kontrol numunesine kıyasla, sadece kesme kamasının zımbalama dayanımında %26.01 ve kapalı etriyenin ise %8.38 oranlarında artışa sebep olduğu görülmektedir. Sonuçta, herhangi bir zımbalama donatısı kullanmadan döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını arttırmak için lif takviyesinin özellikle de ikili veya üçlü lif takviyesinin en iyi önlem olarak kullanılabilmesi vurgulanabilir. Ayrıca, zımbalama önlemi olarak lif takviyesinin kullanılması durumunda, kapalı etriye ve kesme kaması gibi zımbalama donatılarından kaynaklanan uygulama ve kenetlenme sorunları da ortadan kalkmış olacaktır.

Lif takviyesi ile birlikte en etkili zımbalama donatısı tipinin belirlenmesinin de zımbalama dayanımı açısından büyük bir öneme sahip olduğu açıktır. Bu bağlamda, kapalı etriye ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri II ve kesme kaması ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri III numuneleri, sadece farklı lif kombinasyonları içeren Seri I numuneleri ile benzer lif kombinasyonları esas alınarak çapraz karşılaştırılması yapılmıştır. Bu durumda, kapalı etriye donatısı ile birlikte tekli makro çelik lif, ikili hibrit makro/mikro çelik lif, ikili hibrit makro/PP lif ve üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımlarının, sadece lif takviyeli Seri I grubundaki benzer lif kombinasyonlarına sahip numunelere kıyasla, sırasıyla, %10.7, %5.27, %7.2 ve %13.79 oranlarında arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, kesme kaması donatısı ile birlikte tekli makro çelik lif, ikili hibrit makro/mikro çelik lif, ikili hibrit makro/PP lif ve üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımlarının, sadece lif takviyeli Seri I grubundaki benzer lif kombinasyonlarına sahip numunelere kıyasla, sırasıyla, %20.3, %16.34, %20.7 ve %15.38 oranlarında arttığı bulunmuştur. Buradan, zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte zımbalama donatısı olarak kesme kamasının kullanılmasının kapalı etriyeye kıyasla zımbalama dayanımı üzerinde daha önemli bir katkı sağladığı söylenebilir. Bununla birlikte, kesme kaması ile birlikte üçlü lif hibridizasyonunun kullanımının zımbalama dayanımına en az katkı sağlamasının sebebi, işlenebilirliği olumsuz etkileyen mikro lif miktarındaki artışın sonucu olarak betonun kalıba yerleştirilmesi ile ilgili olumsuzluklara dayandırılabilir. Bütün bunlara ilaveten, Seri I'deki hem ikili hibrit makro/mikro çelik hem de üçlü hibrit makro/mikro çelik/PP lif takviyeli zımbalama donatısız döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı, kapalı etriye donatılı ve tekli %1 makro çelik lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımından daha yüksek bulunmuştur.

4.3.1.5 Farklı zımbalama önlemlerine ait zımbalama dayanımlarının istatistiksel değerlendirilmesi

Zımbalama donatısız sadece farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri I, kapalı etriye ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri II ve kesme kaması ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri III numunelerine ait zımbalama dayanımı değerleri kullanılarak, çoklu lineer regresyon analizi yardımıyla her bir zımbalama önlemi için olmak üzere zımbalama dayanımları ($Z.D_I$, $Z.D_{II}$ ve $Z.D_{III}$), hacimce yüzde makro çelik,

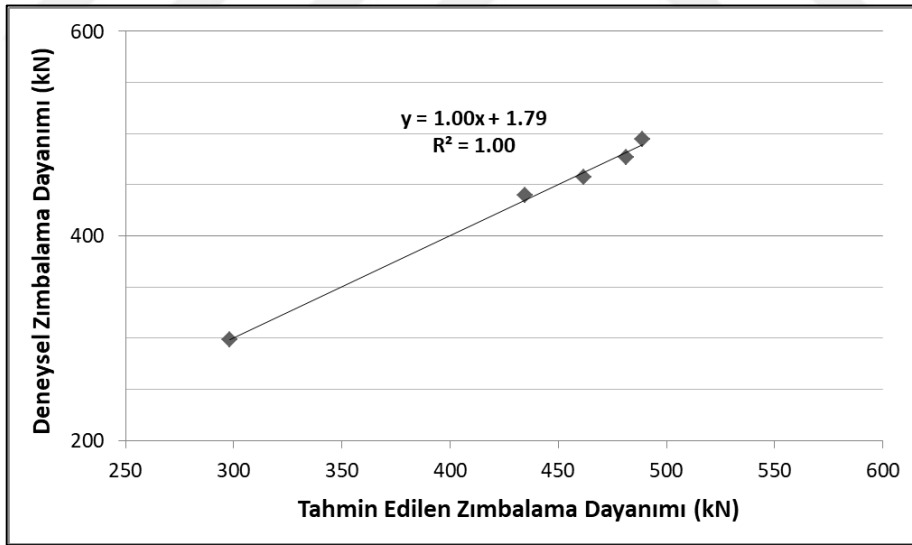
mikro çelik ve PP lif miktarı değişkenlerine bağlı olarak, sırasıyla, Denklem (4.1-3) ile tahmin edilmiştir.

$$Z.D_I = 298.3 + 14122.5 * MAK + 32647.5 * MİK + 6940 * PP \quad (4.1)$$

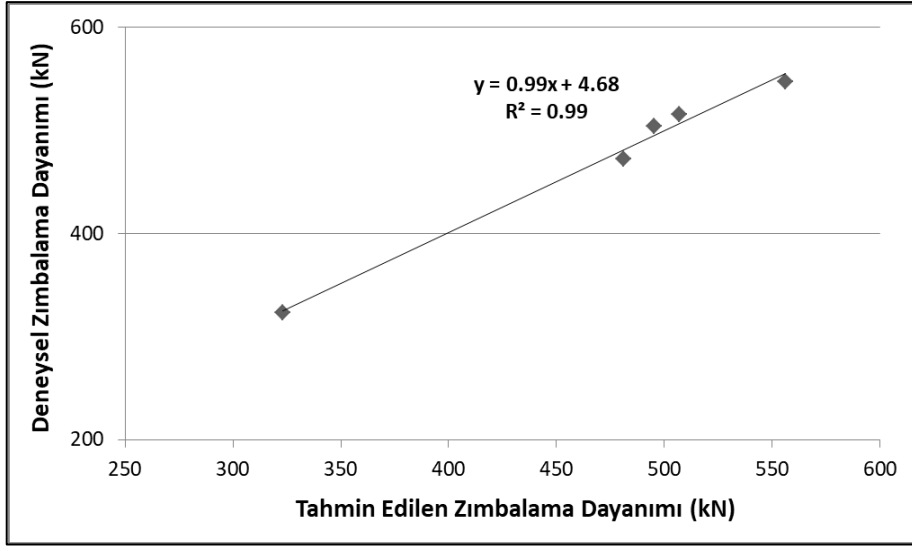
$$Z.D_{II} = 323.3 + 14891 * MAK + 36671 * MİK + 12704 * PP \quad (4.2)$$

$$Z.D_{III} = 375.9 + 15455 * MAK + 26505 * MİK + 7720 * PP \quad (4.3)$$

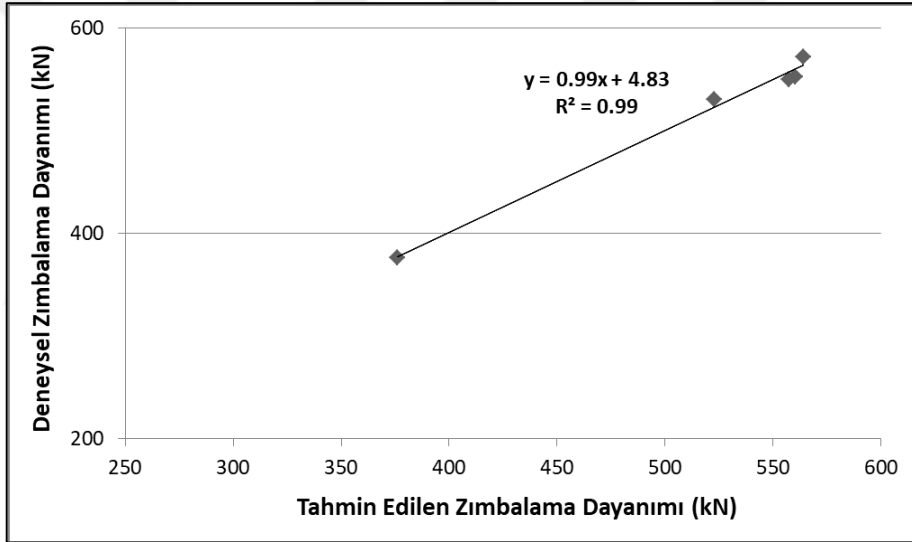
Burada, $Z.D_I$ sadece lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait zımbalama dayanımını (kN), $Z.D_{II}$ kapalı etriye donatılı lifsiz kontrol ile kapalı etriye donatılı lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını (kN) ve $Z.D_{III}$ ise kesme kaması donatılı lifsiz kontrol ile kesme kaması donatılı lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını (kN) sembolize etmektedir. Ayrıca, MAK makro çelik lif oranını (%), MİK mikro çelik lif oranını (%) ve PP ise PP lif oranını (%) ifade etmektedir. Şekil 4.23(a-c)'den görüleceği üzere, farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı değerlerinin yaklaşık %99 ile yüksek doğrulukta tahmin edildiği belirlenmiştir.



(a) Lifsiz kontrol ve lif takviyeli (Seri I)



(b) Kapalı etriye donatılı ve/veya lif takviyeli (Seri II)

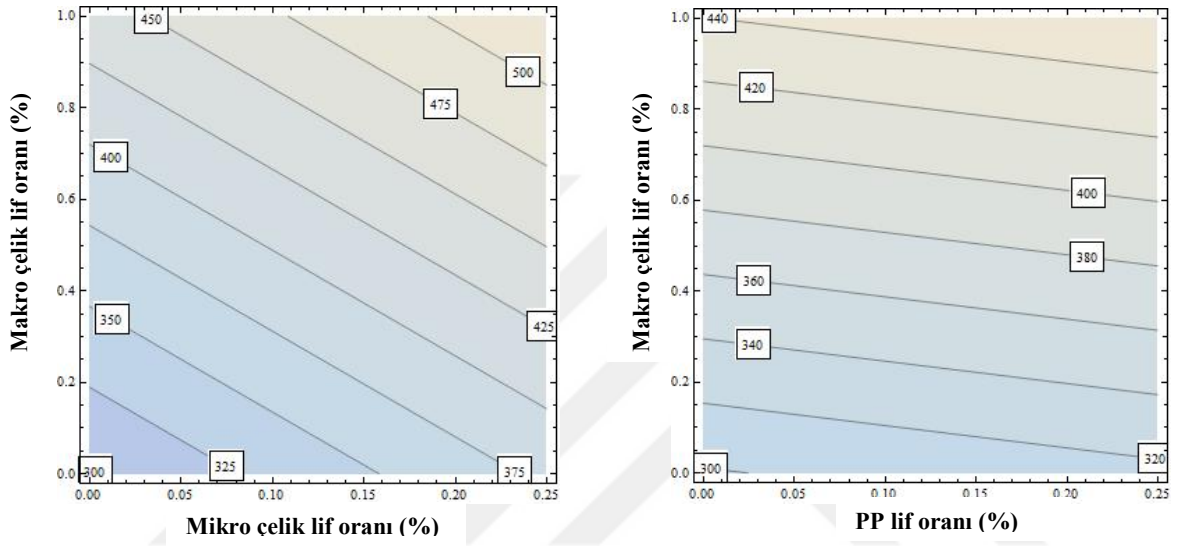


(c) Kesme kaması donatılı ve/veya lif takviyeli (Seri III)

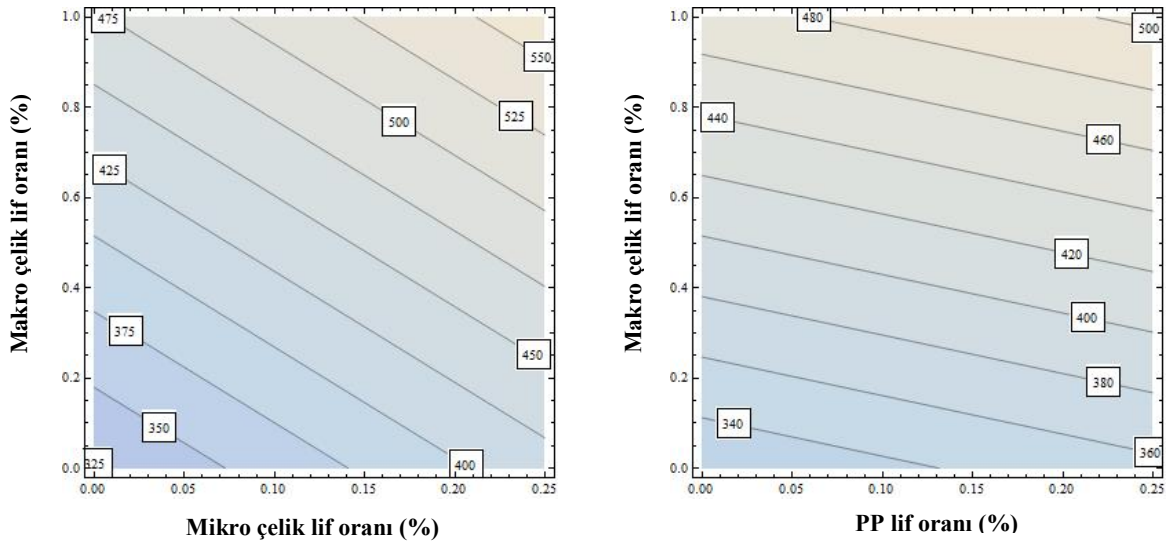
Şekil 4.23 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait deneysel ve tahmin edilen zımbalama dayanımı değerleri.

Diğer taraftan, zımbalama donatısız ikili lif hibridizasyonu durumunda, makro çelik lif miktarı ile mikro çelik lif veya PP lif miktarı esas alınarak, döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı değerini tahmin etmek için grafikler çizilmiştir (Şekil 4.24(a-c)). Bu bağlamda, inovatif hibrit lif takviyeli KYB'nin kirişsiz döşeme sistemlerinde zımbalama dayanımı arttırmak amacıyla kullanılması durumunda, uygulamadaki tasarım mühendisleri ve araştırmacıların en uygun mikro lif tipi seçimi ve optimum makro/mikro lif oranları ile ilgili doğru seçimler yapabilmesi açısından söz konusu bu şekillerin önemli bir yol gösterici olacağı açıktır. Örneğin, aynı oranlarda mikro

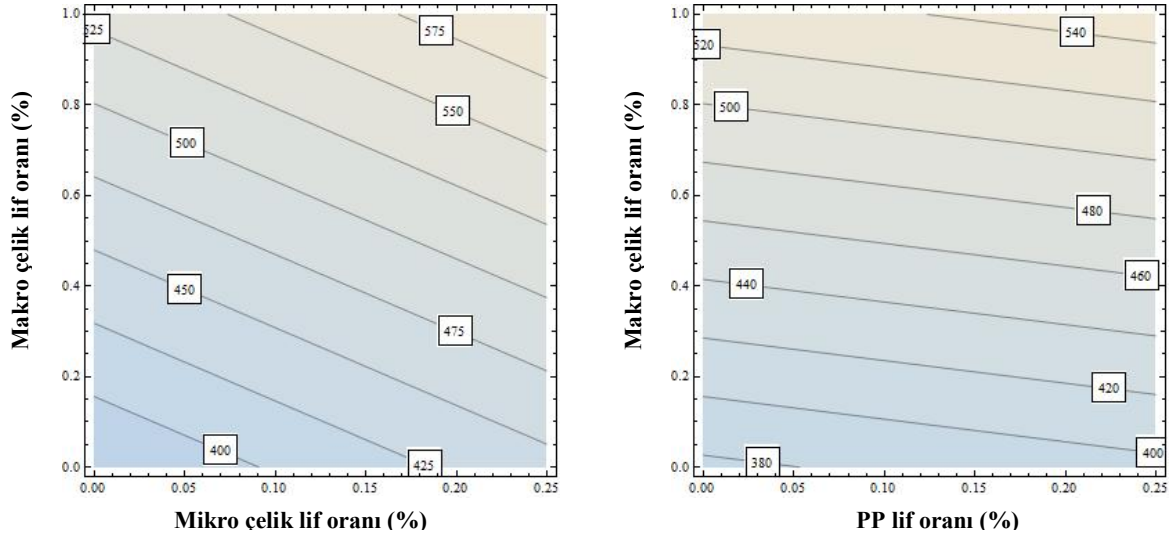
lif içeren (%0.2 mikro çelik veya %0.2 PP lif) ve toplamda eşit lif miktarına sahip ikili hibrit lif takviyeli numunelerin zımbalama dayanımı karşılaştırıldığında, ikili lif hibridizasyonunun hem zımbalama donatısız hem de farklı zımbalama donatılarına (kapalı etriye ve kesme kaması) sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte, mikro çelik lifin PP life kıyasla zımbalama dayanımı üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu bu grafiklerden anlaşılmaktadır.



(a) Zımbalama donatısız



(b) Kapalı etriye donatılı



(c) Kesme kaması donatılı

Şekil 4.24 : İkili lif hibridizasyonu durumunda toplam lif miktarı ve mikro lif tipinin zımbalama dayanımına etkisi.

4.3.2 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-açıklık ortası deplasman ve yük-rölatif yer değiştirme davranışı

Deneysel çalışma kapsamında, tekli, ikili ve üçlü lif takviyesinin, farklı zımbalama donatılarına (kapalı etriye ve kesme kaması) sahip büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen deneylerden elde edilen yük-açıklık ortası deplasman diyagramları Şekil 4.25, 27 ve 29'da ve yük-rölatif yer değiştirme diyagramları ise Şekil 4.26, 28 ve 30'da verilmiştir. Grafiklere ait her bir yüke karşılık gelen deplasman değerleri, açıklık ortası deplasmanı için alt kolon merkezine yerleştirilen 1 nolu LVDT ve rölatif yer değiştirmesi (kolonun döşemeye göre) için ise kolon yüzlerine yerleştirilen 2, 3, 4 ve 5 nolu LVDT'ler yardımıyla ölçülen değerlerin ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir (Bakınız Şekil 3.20). Sonraki bölümlerde, yük-açıklık ortası deplasman eğrileri esas alınarak, her bir zımbalama önlemi için döşeme-kolon birleşim elemanlarının çatlak öncesi ve sonrası deplasman durumları, plastik şekil değiştirme yetenekleri ve sehim sertleşmesi ve yumuşaması davranışları değerlendirilecek olup, yük-rölatif yer değiştirme grafikleri dikkate alınarak da zımbalama önlemlerinin önemi irdelenecektir.

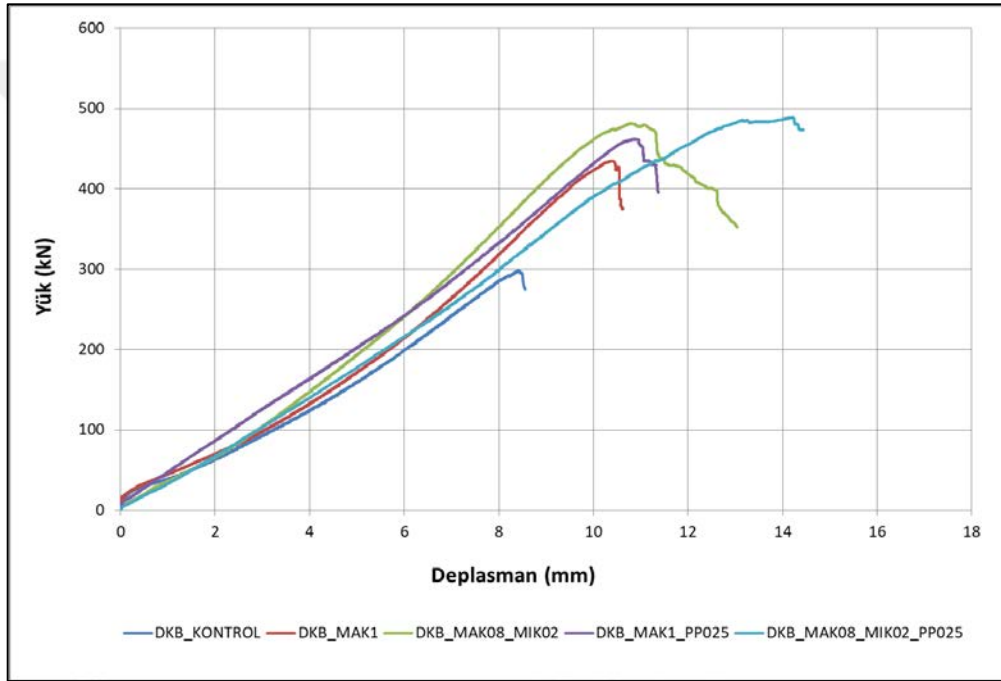
4.3.2.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)

Herhangi bir zımbalama önlemi bulunmayan lifsiz kontrol ile sadece lif takviyeli büyük ölçekli döşeme kolon birleşim elemanlarına ait yük-açıklık ortası deplasman ve yük-rölatif yer değiştirme eğrileri sırasıyla, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir. Şekil 4.25'den görüldüğü gibi, tüm lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları, lif hibridizasyonundan bağımsız olarak ilk çatlak yüküne kadar hemen hemen lineer doğrusal, çatlakların oluşmasıyla birlikte rijitliğin azalmasının sonucu olarak pik yüke kadar doğrusal olmayan ve pik yük sonrası ise yük değerinin kademeli olarak azaldığı bir davranış sergilemiştir. Bununla birlikte, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol test numunesi için davranış ise pik yük sonrası yük değerinin ani ve önemli şekilde azalarak yük taşıma kapasitesinin tamamen kaybedilmesi şeklinde gerçekleşmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.6'dan görüldüğü üzere, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait hem ilk çatlak hem de pik yük ile bu yüklere karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerlerinin en düşük olduğu belirlenmiştir. Bu test numunelerinin göçme durumunun, ani, gevrek ve yüksek sesli zımbalama göçmesi şeklinde meydana geldiği gözlemlenmiş olup, yük taşıma kapasitelerinin ise pik yük sonrası hızlı bir şekilde önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Diğer taraftan, Şekil 4.26'dan görüldüğü üzere, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait pik yüke karşılık gelen rölatif yer değiştirme değerlerinin de ortalama 0.46 mm ile en düşük değere sahip olması, bu numuneler için ani ve gevrek zımbalama göçmesini teyit etmektedir.

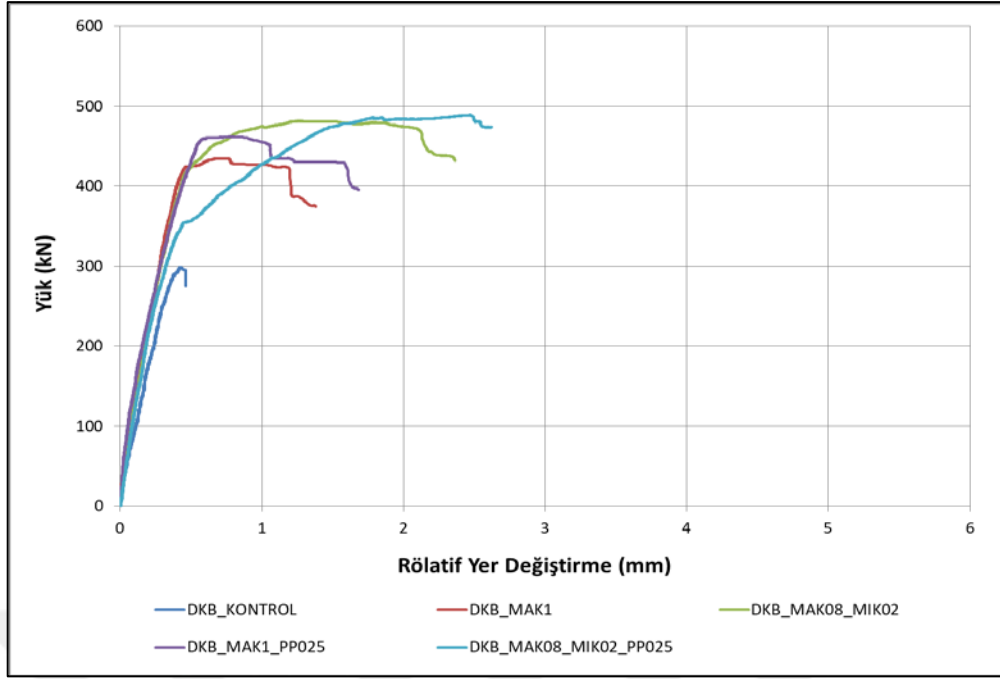
Sadece tekli %1 makro çelik takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının ilk çatlak yükü, pik yük ve bu yüklere karşılık gelen açıklık ortası deplasman ve rölatif yer değiştirme değerlerine gelince, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol numunesine kıyasla tüm lif takviyeli numuneler içerisinde en düşük artışa sahip olduğu bulunmuştur (Çizelge 4.6).

Diğer taraftan, mikro çelik veya PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları ise, sehim-sertleşmesi davranışı sergilemiş olup yük taşıma kapasitelerinde kademeli bir düşüş görülmüştür. Bu durum, yükleme sırasında zımbalama bölgesinde mikro liflerin mikro çatlakları köprülemesi sonucu bu çatlakların büyümesini kontrol ederek betonun çekme dayanımını arttırması ve sonraki aşamalarda ise makro çelik liflerin makro çatlakları köprüleyerek yük taşıma kapasitesi ve sünekliliği arttırmasına

dayandırılabilir. Literatürde bazı çalışmalarda (Hamad ve diğ, 2001; Turk ve diğ, 2021; Mobasher ve Li, 1996) da, ilk çatlak öncesi liflerin betonun çekme dayanımına katkı sağlamadığı fakat çatlak sonrasında liflerin çatlakları köprüleyerek betonun çekme dayanımını arttırdıkları vurgulanmıştır. Ayrıca, PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli numunelerin, ilk çatlak ve pik yük değerlerine karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerlerinin mikro çelik lif içeren ikili hibrit lif takviyeli numunelere kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur. Yürütülen birkaç çalışmada (Harajli ve diğ, 1995; Sermet ve Ozdemir, 2016; Vikram ve Sekar, 2016) da PP liflerin çelik liflere kıyasla döşeme-kolon birleşim elemanlarının sünekliğini arttırmada etkili oldukları vurgulanmıştır.



Şekil 4.25 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-açıklık ortası deplasman eğrileri.



Şekil 4.26 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-rölatif yer değiştirme eğrileri.

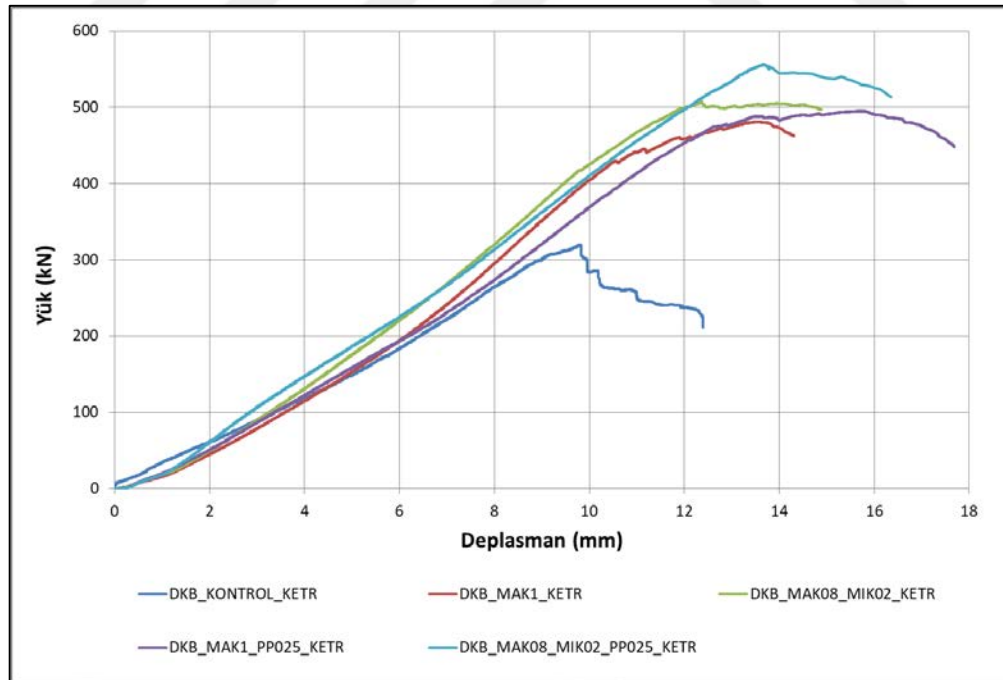
Şekil 4.25 ve 26'dan görüleceği üzere, sehim-sertleşme davranışı sergileyen üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik, ilk çatlak yükü, pik yük ve bu yüklere karşılık gelen açıklık ortası deplasman ve rölatif yer değiştirme değerleri açısından en iyi performansa sahip oldukları belirlenmiştir. Bu durum, mikro çelik ve PP lif içeren üçlü lif hibridizasyonun sahip olduğu yüksek sinerji sayesinde daha fazla mikro çatlakın köprülenmesi, çatlak gelişiminin geciktirilmesi ve çatlak ilerlemesinin belirli seviyelerde önlenmesi açısından diğer lif kombinasyonlarına kıyasla daha etkili olmasına dayandırılabilir. Ayrıca, Şekil 4.26'dan görüleceği üzere, hem ikili hem de üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük taşıma özelliğini kaybetmeden ulaştığı rölatif yer değiştirme değerlerinin yüksek olması, hibrit lif takviyesinin zımbalama performansı açısından etkili bir zımbalama önlemi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

4.3.2.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)

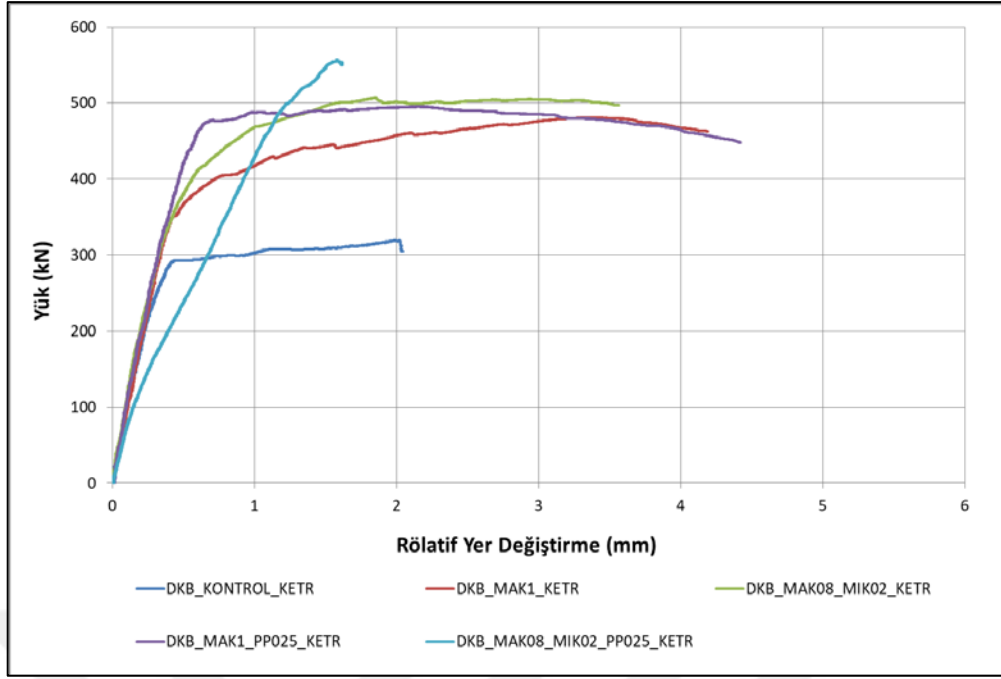
Zımbalama önlemi olarak kapalı etriye donatısı ile birlikte tekli, ikili ve üçlü lif takviyeli (Seri II) döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait yük-açıklık ortası deplasman ve yük-rölatif yer değiştirme eğrileri sırasıyla, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de sunulmuştur. Şekil 4.27'den görüldüğü gibi, lifsiz ve kapalı etriye donatılı kontrol döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait hem ilk çatlak hem de pik yük değerleri ile bu yüklere karşılık gelen

açıklık ortası deplasman değerlerinin en düşük olduğu ve sehim-yumuşaması davranışı sergilediği görülmüştür.

Tekli, ikili ve üçlü lif kombinasyonlarına sahip tüm kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları sehim-sertleşmesi davranışı sergilemiştir. Diğer taraftan, üçlü hibrit lif takviyeli ve kapalı etriye donatılı test numuneleri ilk çatlak yükü ve göçme yükü açısından en iyi değerlere sahipken, ikili hibrit lif hibridizasyonu açısından ise en iyi değerler makro/mikro çelik lif hibridizasyonundan elde edilmiştir. Bunun yanında, lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları içerisinde en düşük ilk çatlak yükü ve göçme yükü değerleri ise sadece tekli makro çelik lif takviyeli test numunelerinden elde edilmiştir. Ayrıca, mikro çelik lif veya PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-deplasman eğrilerinin benzer özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Buradan, işlenebilirlik sorunlarına yol açan PP lif yerine mikro çelik lif kullanılarak elde edilen ikili çelik lif hibridizasyonun, kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama davranışı açısından en uygun ikili lif kombinasyonu olduğu söylenebilir.



Şekil 4.27 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-açıklık ortası deplasman eğrileri.



Şekil 4.28 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-rölatif yer değiştirme eğrileri.

Tüm bunlara ek olarak, Şekil 4.28'den görüleceği üzere, üçlü hibrit lif takviyeli ve kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının ulaştığı rölatif yer değiştirme değerleri en yüksek olarak bulunmuştur. Ayrıca, sadece makro çelik lifli ile hem mikro çelik hem de PP lifli ikili hibrit lif hibridizasyonuna sahip kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının rölatif yer değiştirme değerlerinin de lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sonuçta, kapalı etriye ile birlikte hibrit lif kullanımının zımbalama önlemi olarak büyük bir öneme sahip olduğu yük-rölatif yer değiştirme eğrilerinden de anlaşılmaktadır.

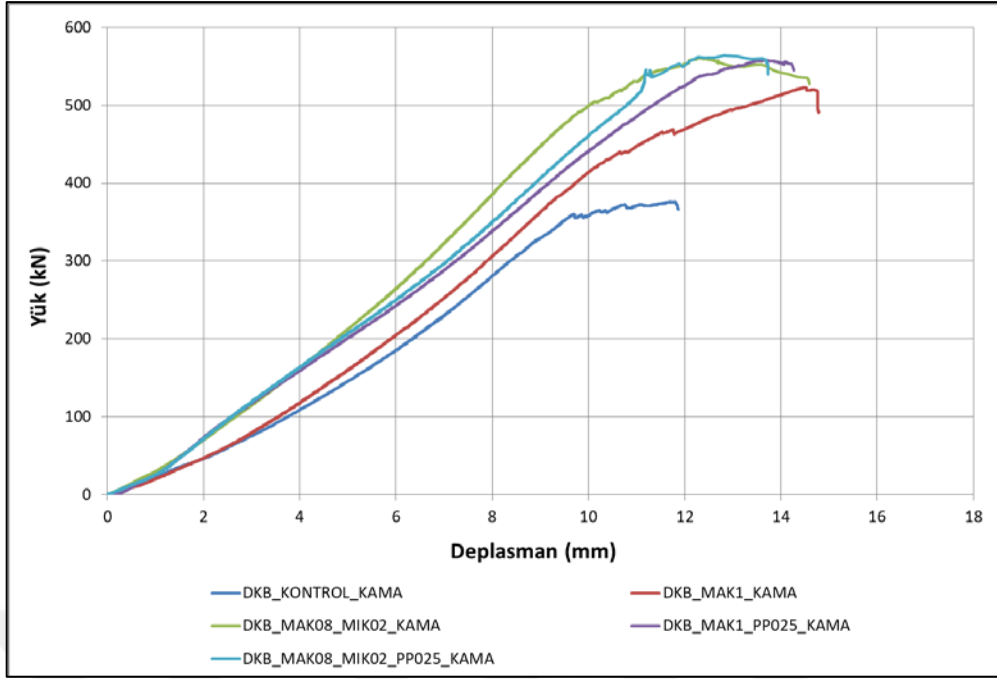
4.3.2.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)

Zımbalama önlemi olarak kesme kaması ile birlikte tekli, ikili ve üçlü lif takviyeli (Seri III) döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait yük-açıklık ortası deplasman ve yük-rölatif yer değiştirme eğrileri sırasıyla, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Şekil 4.29'dan görüleceği üzere, lifsiz ve kesme kaması donatılı kontrol döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait hem ilk çatlak hem de pik yük değerleri ile bu yüklere karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerlerinin en düşük olduğu bulunmuştur. Pik yük sonrası, lifsiz

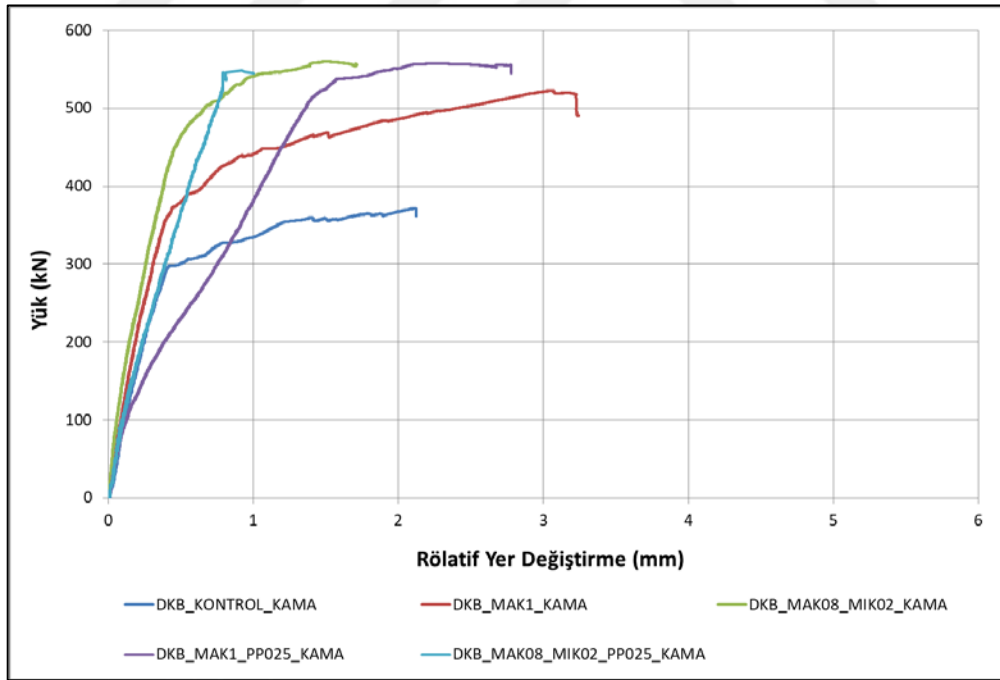
ve kesme kaması donatılı test numunelerinin yük taşıma kapasitesinin kademeli olarak daha fazla plastik deformasyon sergileyerek azaldığı belirlenmiştir.

Diğer taraftan, tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyesi içeren kesme kamalı döşeme-kolon birleşim elemanları ise çoklu çatlak oluşumu sonucunda daha sünek davranışa yol açan sehim-sertleşmesi davranışı sergilemiştir (Bakınız Şekil 4.36(b-e)). Şekil 4.29'dan görüleceği üzere, kesme kaması donatısına sahip ikili makro/mikro çelik ve üçlü hibrit lif takviyeli test numuneleri ilk çatlak ve pik yük değerleri ile bu yüklere karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerleri açısından en iyi zımbalama performansına sahip iken, bu numuneleri, PP lif içeren ikili hibrit ve tekli makro çelik lif takviyeli test numuneleri takip etmiştir. Ayrıca, pik yükten sonra kesme kaması donatısına sahip ikili veya üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-açıklık ortası deplasman davranışının benzer olduğu ve yük değerinin kademeli olarak düştüğü belirlenmiştir. Sonuçta, kesme kaması donatısına sahip hibrit lif (ikili ve üçlü) takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama davranışı açısından yük-deplasman eğrilerinin oldukça benzer eğilimler sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında, toplam lif hacmi ve hibridizasyonunun, ilk çatlak ve pik yük ile bu yük değerlerine karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerleri ve dolayısıyla rijitlik üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Ayrıca, ikili çelik lif hibridizasyonunun, tüm hibrit lif takviyeli karışımlara kıyasla, işlenebilirlik ve ekonomiklik açısından daha avantajlı olması nedeniyle kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında en uygun lif kombinasyonu olabileceği vurgulanabilir.

Tüm bunlara ek olarak, Şekil 4.30'dan görüleceği üzere, kesme kaması donatısına sahip hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait rölatif yer değiştirme değerlerinin lifsiz ve kesme kaması donatılı numunelere kıyasla, düşük olması sebebiyle hibrit lif takviyesinin zımbalama performansı açısından etkili bir zımbalama önlemi olduğunu ayrıca ortaya konulmaktadır. Bunun yanında, kesme kaması donatılı hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait pik yük değerlerinde, kesme kaması donatılı lifsiz ve tek lifli döşeme-kolon birleşim elemanlarına kıyasla artış da gözlemlenmiştir. Bu durum, kesme kaması donatılı hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında, kolon ve döşemenin birbirine göre minimum düzeyde kayma gösterek zımbalamaya uğramadan eğilme şeklinde göçmeye ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.29 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-açıklık ortası deplasman eğrileri.



Şekil 4.30 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının yük-rölatif yer değiştirme eğrileri.

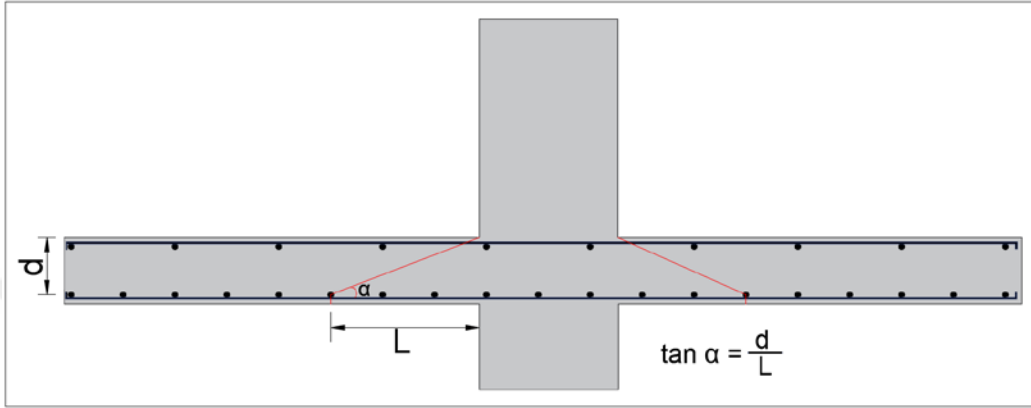
4.3.2.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için yük-açıklık ortası deplasman ve yük-rölatif yer değiştirme davranışının karşılaştırılması

Bu çalışmada, zımbalama donatısız tüm lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları, lifsiz kapalı etriye ve lifsiz kesme kaması donatılı kontrol test numunelerine kıyasla daha yüksek rijitlik, ilk çatlak yükü, pik yük ve bu yüklere karşılık gelen deplasman değerlerine sahipken, zımbalama donatısız üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları ise zımbalama davranışı açısından en iyi performansı sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatısı kullanılmasının kapalı etriyeye kıyasla, zımbalama performansı üzerinde genelde daha olumlu bir katkı sağladığı söylenebilir. Tüm bunlara ek olarak, kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında zımbalama davranışı açısından en iyi performans üçlü hibrit lif takviyeli numunelerde gözlemlenirken, kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında ise ikili hibrit çelik lif takviyeli numunelerden elde edilmiştir.

4.3.3 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının göçme modu ve çatlak modelleri

Tüm döşeme-kolon birleşim elemanları için, ilk çatlak ve döşeme alt yüzeyindeki (eğilme ve kesme) çatlaklara karşılık gelen yük seviyelerinin belirlenmesi amacıyla test boyunca video kamera aracılığıyla kayıt yapılmıştır. Zımbalama testi sonunda, oluşan çatlak modelleri Şekil 4.32, 34 ve 36'da gösterildiği gibi, döşeme-kolon birleşim elemanları üzerinde çizilmiştir. Tüm test numuneleri için ilk çatlaklar, pik yükün yaklaşık %30'u kadar bir yük seviyesinde döşeme altındaki (çekme bölgesi) kolonun kenarlarından dışa doğru gelişti ve daha sonra döşemenin kenarlarına doğru uzayarak yayılmıştır. Pik yükün yaklaşık %80'ine ulaşıldığı yüksek yük seviyesinde, kolon çevresinde merkezden kenarlara doğru oluşan çevresel çatlaklar oluştu. Daha sonra, çevresel çatlaklar eğilme çatlakları ile kesişerek döşemelerin alt yüzeyinde ızgara görünümüne bir çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Bu çatlak oluşumu lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında çok sayıda ve küçük genişlikli çatlaklar şeklinde oluşurken, lif takviyesiz diğer elemanlarda ise genelde az sayıda ve büyük genişlikli şekilde gelişmiştir. Yüklemenin son aşamasında ise yeni çatlakların oluşumunun önemli ölçüde azaldığı, mevcut çatlakların ise dallanma veya sadece çatlak boyunun artması şeklinde yayıldığı ve çatlak genişliklerinin genelde numunenin zımbalama açısından takviye durumuna göre farklı genişliklerde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.7'de tüm döşeme-kolon birleşim elemanları için alt

(çekme bölgesindeki) kolonun her bir yüzeyi ile göçme yüzeyinin en dış kenarı arasındaki dört mesafenin ortalaması olan göçme yüzeyi mesafesi, zımbalama kesme yüzeyi açısı ve zımbalama konisi oluşumu durumu verilmiştir. Zımbalama kesme yüzeyi açısı, göçme yüzeyi mesafesi (L) ve döşeme faydalı yüksekliği (d) esas alınarak, Şekil 4.31’de verildiği gibi hesaplanmıştır.



Şekil 4.31 : Zımbalama kesme yüzeyi açısının belirlenmesi.

Çizelge 4.7 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait kolon yüzünden ortalama zımbalama göçme yüzeyi mesafesi ve zımbalama açısı değerleri.

Seri	Numune Adı	Göçme Yüzeyi Mesafesi (cm)	Zımbalama Kesme Yüzeyi Açısı	Zımbalama Konisi Oluşumu
I	DKB_KONTROL	19	27.76°	Evet
	DKB_MAK1.00	22	24.44°	Evet
	DKB_MAK0.80_MİK0.20	25.04	21.77°	Evet
	DKB_MAK1.00_PP0.25	26.02	21.02°	Evet
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25	30.83	17.97°	Evet
II	DKB_KONTROL_KETR	22.79	23.69°	Evet
	DKB_MAK1.00_KETR	27.38	20.06°	Evet
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_KETR	28.64	19.25°	Evet
	DKB_MAK1.00_PP0.25_KETR	27.34	20.09°	Evet
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KETR	-	-	Hayır
III	DKB_KONTROL_KAMA	24.68	22.05°	Evet
	DKB_MAK1.00_KAMA	30.79	18°	Evet
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_KAMA	-	-	Hayır
	DKB_MAK1.00_PP0.25_KAMA	-	-	Hayır
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KAMA	-	-	Hayır

4.3.3.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)

Zımbalama göçmesinin, kolonun çevresinde merkezden döşeme kenarlarına doğru oluşan çatlaklar birleşerek çevresel çatlakların oluşumu ve ardından kolonun döşemeye zımbalanması ile karakterize edildiği bilinmektedir. Lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol

numunesinde, maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra zımbalama bölgesinde oluşan çevresel çatlakların ardından ani, gevrek ve oldukça sesli bir zımbalama göçmesi oluşmuş ve yük aniden düşmüştür (Şekil 4.32(a)). Ayrıca, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol test numunesinde, çekme donatısındaki birim şekil değıştirme değeri (2283 $\mu\epsilon$), çekme donatısının akma anındaki birim şekil değıştirme değeri (2640 $\mu\epsilon$) kıyasla, daha küçük olduğu ve donatının akmadığı belirlenmiştir (Şekil 4.33). Diğer taraftan, zımbalama donatısız lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında ise lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol test numunelerine kıyasla, daha çok sayıda eğilme çatlakları ile birlikte çevresel çatlakların da oluşmasından dolayı daha sünek bir davranış gözlemlenmiştir (Şekil 4.32(b-e)). Böylece, Şekil 4.33'den de görüleceği üzere, eğilme çatlaklarının yanında lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında çekme donatısındaki birim şekil değıştirme değeri akma birim şekil değıştirme sınırını aşması, ancak, çok sayıda çevresel çatlakların da oluşması sebebiyle göçme modu için zımbalama/eğilme olarak karar verilmiştir. Ayrıca, zımbalama donatısız lif takviyeli test numunelerinde, çatlaklar daha etkin bir şekilde köprülenmiş ve böylece bu numunelerin yükleme esnasındaki bütünlüklerini genelde göçmeye ulaşana kadar korudukları görülmüştür. Diğer taraftan, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol test numunelerinde zımbalama göçmesi beton örtünün ayrılması durumu şeklinde gerçekleşirken, bu durumun lif kombinasyonundan bağımsız olarak tüm lif takviyeli test numuneleri için söz konusu olmadığı gözlemlenmiştir. Gouveia ve diğ. (2018) de yaptıkları çalışmada, döşemelerde çelik lif takviyesinden dolayı göçme mekanizmasının zımbalama göçme modundan zımbalama/eğilme moduna dönüştüğünü vurgulamıştır.

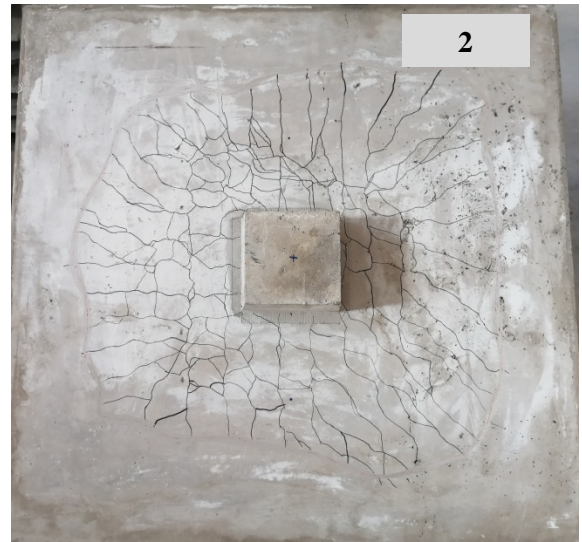
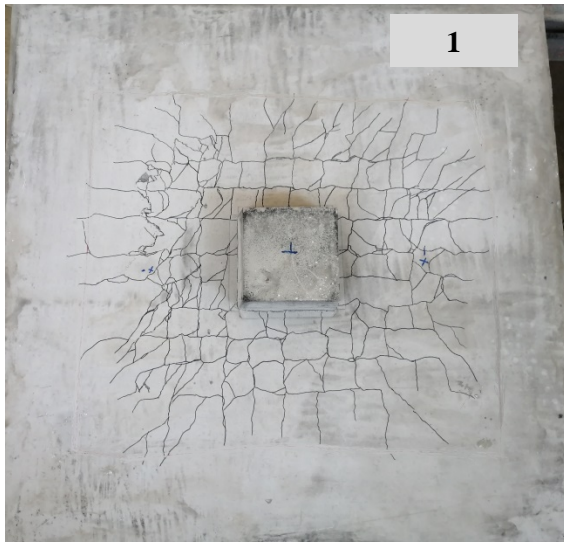
Çizelge 4.7'den görüleceği üzere, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol test numuneleri için, alt kolonun her bir yüzeyi ile göçme yüzeyinin en dış kenarı arasındaki mesafeler ortalama 19 cm iken, lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları için ise tekli makro çelik, ikili hibrit makro/mikro çelik, ikili hibrit makro çelik/PP ve üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları için bu mesafenin sırasıyla, 22 cm, 25.04 cm, 26.02 cm ve 30.83 cm olduğu tespit edilmiştir. Buradan, KYB'ye liflerin dâhil edilmesinin, çekme bölgesindeki göçme yüzeyinin kolon yüzünden döşeme kenarlarına doğru artmasına neden olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, özellikle hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında kolon etrafında oluşan kırılma düzleminin artmasının sonucu olarak zımbalama kapasitesinin arttığı vurgulanabilir. Ayrıca, lifsiz ve zımbalama donatısız

kontrol test numunelerinde, ortalama zımbalama kesme yüzeyi açısı 27.76° iken, tüm lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları için ise tekli makro çelik, ikili hibrit makro/mikro çelik, ikili hibrit makro çelik/PP ve üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları için bu açının sırasıyla, 24.44° , 21.77° , 21.02° ve 17.97° olduğu tespit edilmiştir. Sonuçta, tek ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyesinin döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama yüzey alanını arttırıp ve dolayısıyla zımbalama kesme yüzeyinin açısını azaltırken, hibrit lif takviyesinin ise zımbalama kesme açısını azaltmada en etkili zımbalama önlemi olduğu söylenebilir. Literatürde yürütülen başka bir çalışmada (Harajli ve diğ., 1995) da benzer sonuçlar bulunmuş olup, tekli lif takviyesinin zımbalama yüzey alanını arttırdığı ve zımbalama kesme yüzeyi açısını azalttığı vurgulanmıştır.

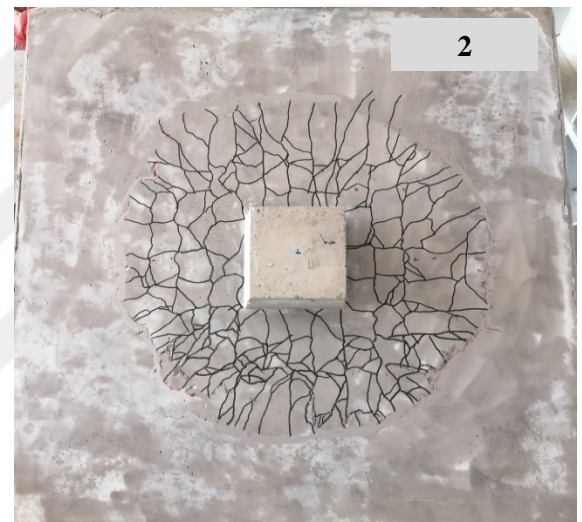
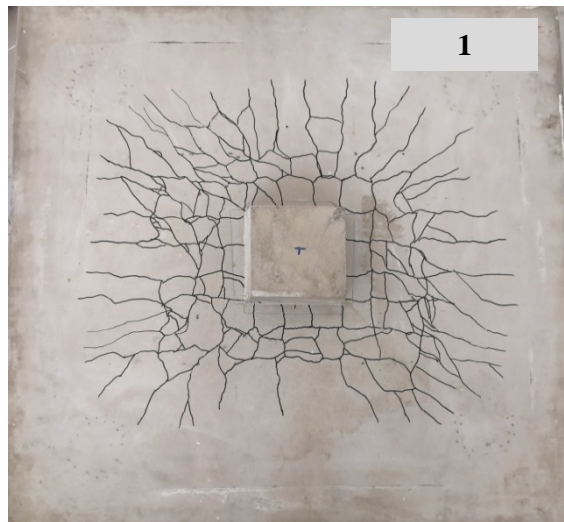
Tüm lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında, liffsiz ve zımbalama donatısız kontrol test numunesine kıyasla, çok sayıda ve daha küçük genişlikli çatlaklar gözlemlenirken, özellikle mikro çelik lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında dallanma şeklinde çoklu mikro çatlak oluşumları da gözlemlenmiştir. Çünkü, lif hibridizasyonu sayesinde, sadece makro çelik lifler ile makro çatlakların değil aynı zamanda mikro lifler ile mikro çatlakların köprülenerek büyümesinin ve yayılmasının ertelendiği düşünülmektedir. Böylece, çok sayıda küçük genişlikte çatlak oluşumu sonucunda çoklu çatlak davranışının sonucu olarak döşeme-kolon birleşim elemanlarının daha sünek bir davranış sergilediği belirlenmiştir (Şekil 4.32(b-e)).



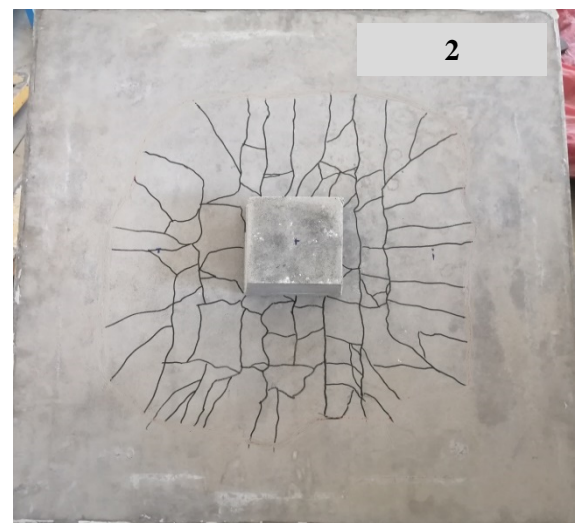
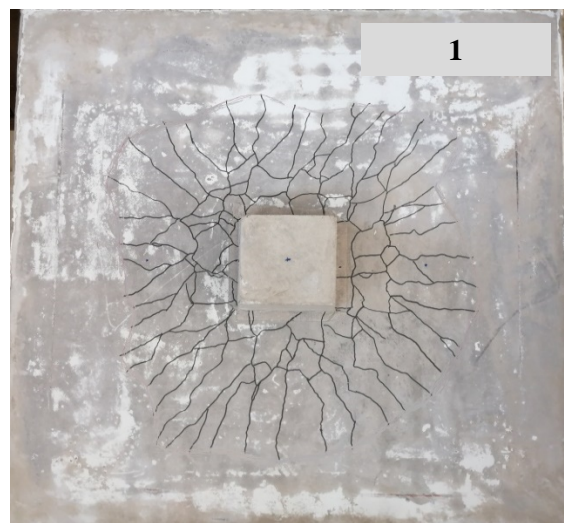
(a) DKB_KONTROL



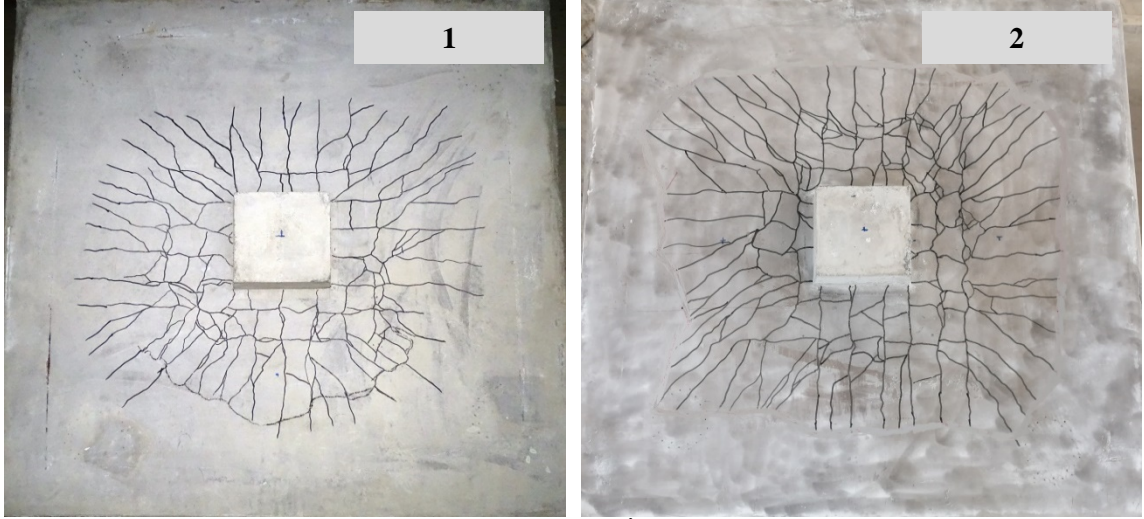
(b) DKB_MAK1.00



(c) DKB_MAK0.80_MIK0.20

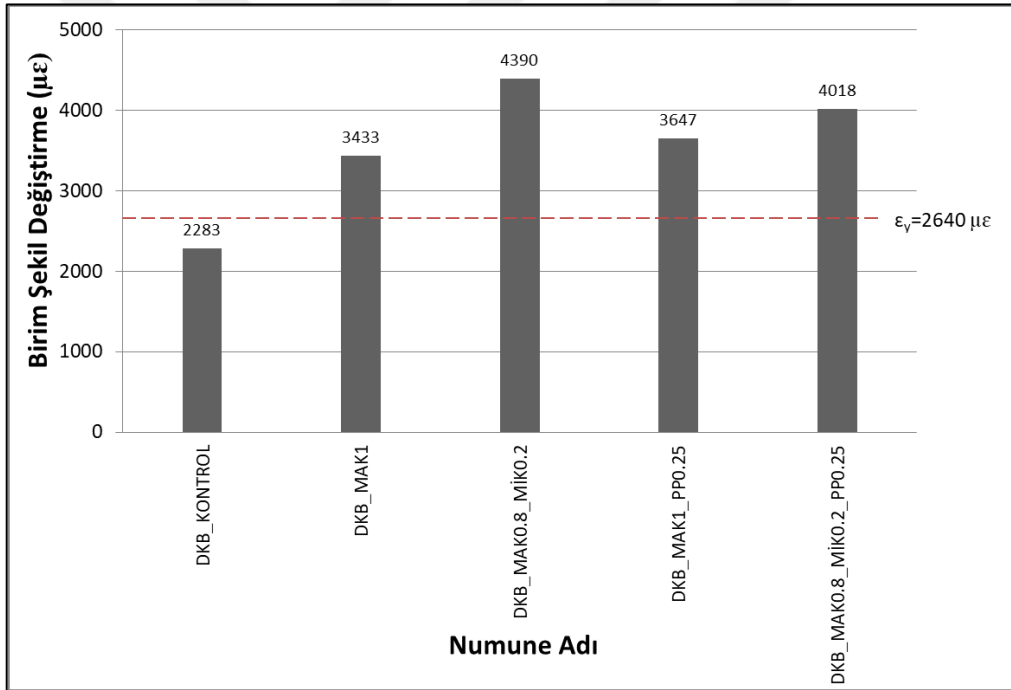


(d) DKB_MAK1.00_PP0.25



(e) DKB_MAK0.80_MIK0.20_PP0.25

Şekil 4.32 : Zımbalama donatısız lifsiz ve lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının alt yüzey çatlak modelleri (Seri I).



Şekil 4.33 : Seri I döşeme-kolon birleşim elemanlarında pik yük değerlerine karşılık çekme donatısında oluşan ortalama birim şekil değişime değerleri.

4.3.3.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)

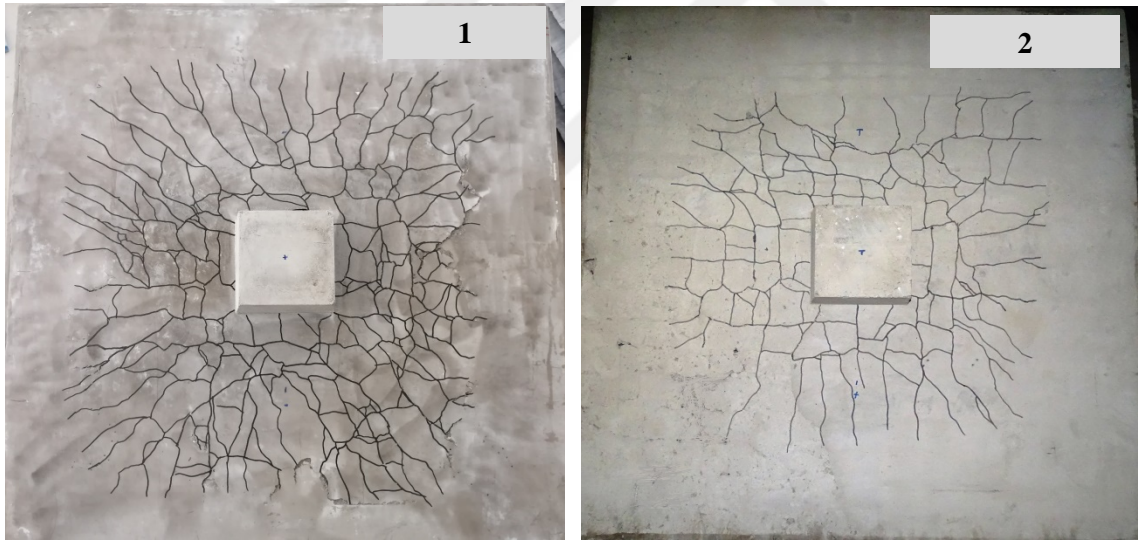
Lifsiz ve kapalı etriye donatılı kontrol numunesinde, maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra zımbalama bölgesinde oluşan çevresel çatlakların ardından zımbalama göçmesi meydana gelmiştir (Şekil 4.34(a)). Ayrıca, lifsiz ve kapalı etriye

donatılı kontrol test numunesinde, çekme donatısındaki birim şekil değıştirme değeri (2327 $\mu\epsilon$), çekme donatısının akma anındaki birim şekil değıştirme değeri (2640 $\mu\epsilon$) kıyasla, daha küçük olduğu ve donatının akmadığı belirlenmiştir (Şekil 4.35). Diğer taraftan, zımbalama önlemi olarak kapalı etriye ile birlikte tekli ve hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında ise lifsiz ve kapalı etriye donatılı kontrol test numunesine kıyasla, daha çok sayıda eğilme çatlakları ile birlikte çevresel çatlakların da oluşmasından dolayı daha sünek bir davranış gözlemlenmiştir. Böylece, Şekil 4.35’den görüleceği üzere, eğilme çatlaklarının yanında tekli ve ikili hibrit lif takviyeli kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında çekme donatısındaki birim şekil değıştirme değeri akma birim şekil değıştirme sınırını aşması, ancak, çok sayıda çevresel çatlakların da oluşması sebebiyle göçme moduna zımbalama/eğilme olarak karar verilmiştir (Şekil 4.34(b-d)). Ayrıca, Şekil 4.34(e)’de gösterilen çatlak modelleri ve Şekil 4.27’deki yük-açıklık ortası deplasman davranışından da görüleceği üzere, üçlü hibrit lif takviyeli kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının eğilmeye maruz kalan iki doğrultuda çalışan betonarme döşeme elemanlarının tipik davranışını sergiledikleri ve dolayısıyla bu numunelerin göçme modunun salt eğilme olduğu belirlenmiştir.

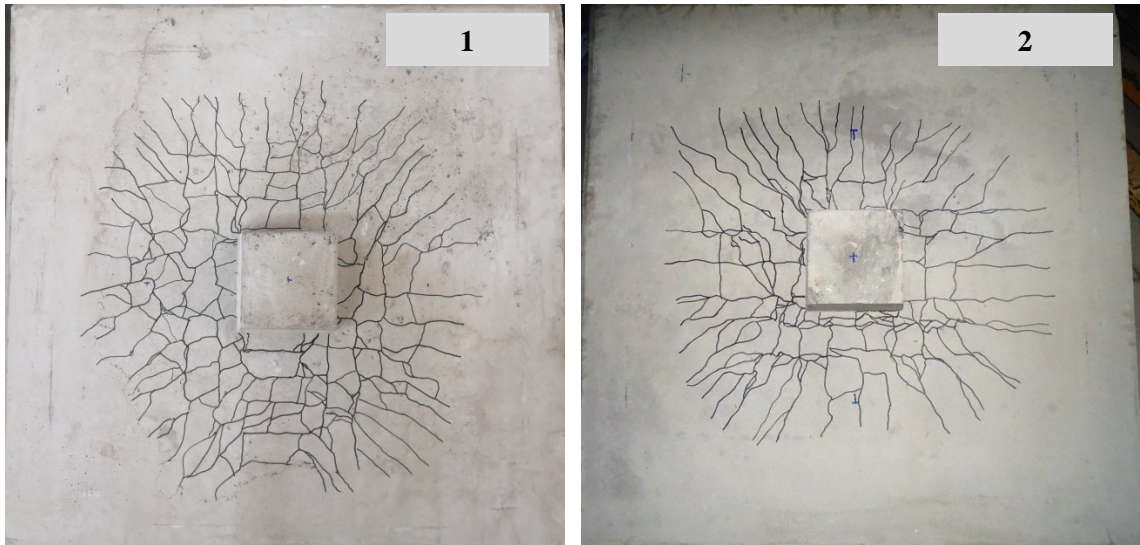
Çizelge 4.7’den görüleceği üzere, lifsiz ve kapalı etriye donatılı kontrol test numuneleri için, alt kolonun her bir yüzeyi ile göçme yüzeyinin en dış kenarı arasındaki mesafeler ortalama 22.79 cm iken, lif takviyeli kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları için ise tekli makro çelik, ikili hibrit makro/mikro çelik ve ikili hibrit makro çelik/PP lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları için bu mesafenin sırasıyla, 27.38 cm, 28.64 cm ve 27.34 cm olduğu tespit edilmiştir. Buradan, kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarına tekli ve hibrit lif takviyesinin, çekme bölgesindeki göçme yüzeyinin kolon yüzünden döşeme kenarlarına doğru artmasına neden olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, tekli ve ikili hibrit lif takviyeli kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında kolon etrafında oluşan kırılma düzleminin artmasının sonucu olarak zımbalama kapasitesinin arttığı hatta üçlü hibrit lif takviyesi ile birlikte eğilme kapasitesine ulaşıldığı vurgulanabilir. Ayrıca, lifsiz ve kapalı etriye donatılı kontrol test numunelerinde, ortalama zımbalama kesme yüzeyi açısı 23.69° iken, tüm lif takviyeli kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları için ise tekli makro çelik, ikili hibrit makro/mikro çelik ve ikili hibrit makro çelik/PP lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları için bu açının sırasıyla, 20.06°, 19.25° ve 20.09° olduğu tespit edilmiştir.

Sonuçta, tek ve ikili hibrit lif takviyesinin kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama yüzey alanını arttırıp ve dolayısıyla zımbalama kesme yüzeyinin açısını azaltırken, üçlü hibrit lif takviyesinin ise en etkili zımbalama önlemi olduğu söylenebilir.

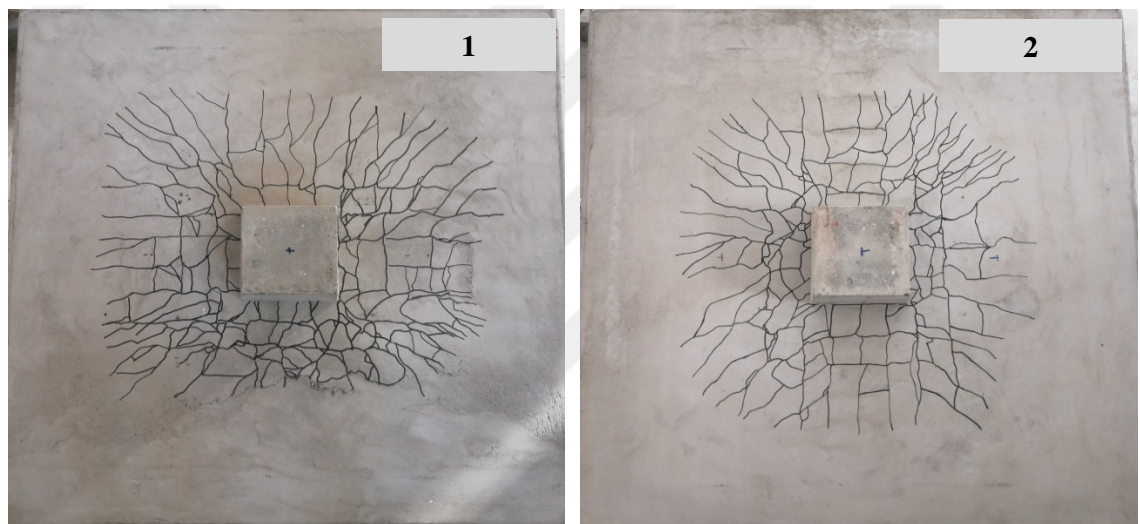
Tüm lif takviyeli kapalı etriye donatılı test numunelerinde, çatlaklar daha etkin bir şekilde köprülenmiş ve böylece bu numunelerin yükleme esnasındaki bütünlüklerini göçmeye ulaşana kadar korudukları görülmüştür. Diğer taraftan, lifsiz ve kapalı etriye donatılı kontrol test numunelerinde zımbalama göçmesi beton örtünün ayrılması durumu şeklinde gerçekleşirken, bu durumun lif kombinasyonundan bağımsız olarak tüm lif takviyeli test numuneleri için söz konusu olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, mikro çelik lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında dallanma şeklinde çoklu mikro çatlak oluşumları da gözlemlenmiştir.



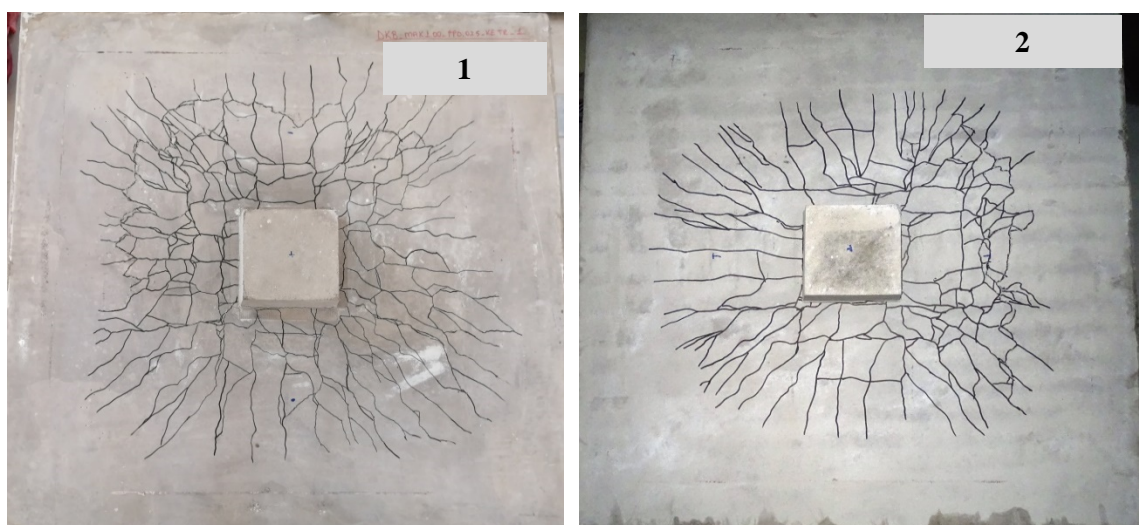
(a) DKB_KONTROL_KETR



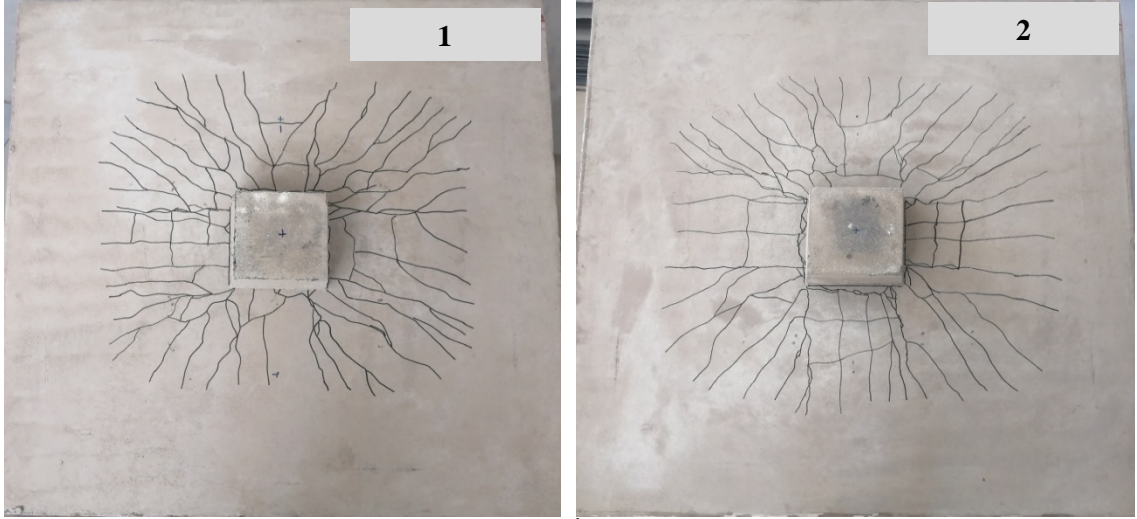
(b) DKB_MAK1.00_KETR



(c) DKB_MAK0.80_MIK0.20_KETR

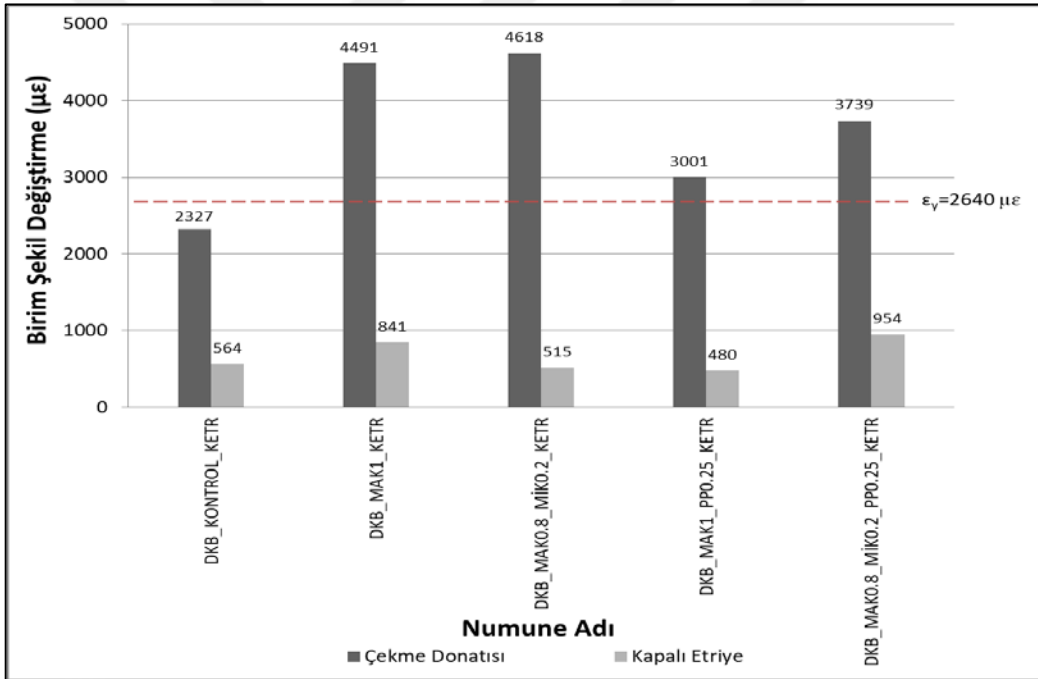


(d) DKB_MAK1.00_PP0.25_KETR



(e) DKB_MAK0.80_MIKO.20_PP0.25_KETR

Şekil 4.34 : Kapalı etriye donatılı lifsiz ve lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının alt yüzey çatlak modelleri (Seri II).



Şekil 4.35 : Seri II döşeme-kolon birleşim elemanlarında pik yük değerlerine karşılık çekme donatısında ve kapalı etriyede oluşan ortalama birim şekil değıştirme değerleri.

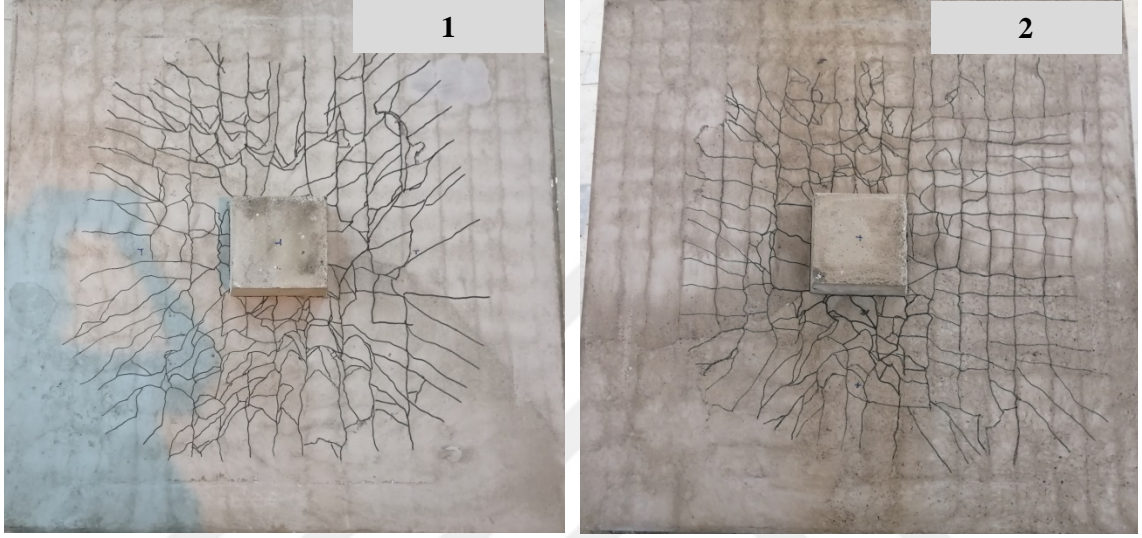
4.3.3.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)

Lifsiz ve kesme kaması donatılı kontrol numunesinde, maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra zımbalama bölgesinde oluşan çevresel çatlakların ardından zımbalama göçmesi meydana gelmiştir (Şekil 4.36(a)). Ayrıca, lifsiz ve kesme kaması donatılı kontrol test numunesinde, çekme donatısındaki birim şekil değıştirme değeri

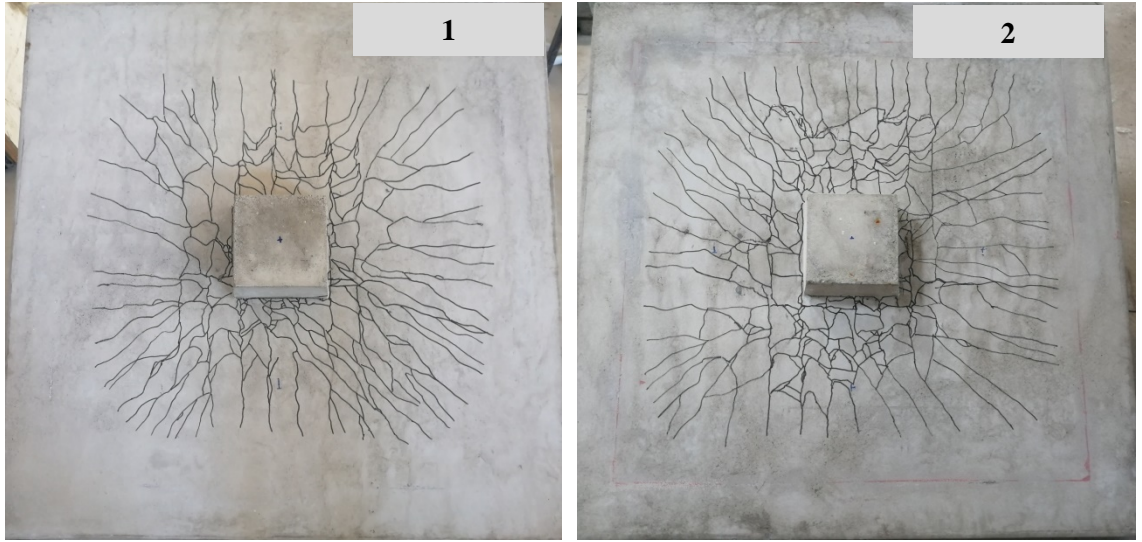
(2391 $\mu\epsilon$), çekme donatısının akma anındaki birim şekil değiştirme değerine (2640 $\mu\epsilon$) kıyasla, daha küçük olduğu ve donatının akmadığı belirlenmiştir (Şekil 4.37). Diğer taraftan, zımbalama önlemi olarak kesme kaması ile birlikte tekli ve hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında ise lifsiz ve kesme kaması donatılı kontrol test numunesine kıyasla, daha çok sayıda eğilme çatlakları ile birlikte çevresel çatlakların da oluşmasından dolayı daha sünek bir davranış gözlemlenmiştir. Böylece, Şekil 4.37'den görüleceği üzere, eğilme çatlaklarının yanında tekli lif takviyeli ve kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında çekme donatısındaki birim şekil değiştirme değerinin akma birim şekil değiştirme sınırını aşması, ancak, az sayıda çevresel çatlakların da oluşması sebebiyle göçme moduna zımbalama/eğilme olarak karar verilmiştir (Şekil 4.36(b)). Ayrıca, Şekil 4.36(c-e)'de gösterilen çatlak modellerinden ve Şekil 4.29'daki yük-açıklık ortası deplasman davranışından da görüleceği üzere, hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının eğilmeye maruz kalan iki doğrultuda çalışan betonarme döşeme elemanlarının tipik davranışını sergiledikleri ve dolayısıyla bu numunelerin göçme modunun salt eğilme olduğu belirlenmiştir. Literatürde yürütülen bir çalışmada (Barros ve diğ., 2015) da benzer sonuçlar bulunmuş olup, beton basınç dayanımı 50-70 MPa aralığında olan ve %1 oranında çelik lifle takviye edilmiş döşeme numunelerinin eğilme kapasitesine erişebildikleri vurgulanmıştır.

Çizelge 4.7'den görüleceği üzere, lifsiz ve kesme kaması donatılı kontrol test numuneleri için, alt kolonun her bir yüzeyi ile göçme yüzeyinin en dış kenarı arasındaki mesafeler ortalama 24.68 cm iken, tekli makro çelik lif takviyeli kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları için ise bu mesafenin 30.79 cm olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, lifsiz ve kesme kaması donatılı kontrol test numunelerinde, ortalama zımbalama kesme yüzeyi açısı 22.05° iken, tekli makro çelik lif takviyeli kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları için ise bu açının 18° olduğu belirlenmiştir. Buradan, tekli makro çelik lif takviyesinin kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama yüzey alanını artırıp ve dolayısıyla zımbalama kesme yüzeyinin açısını azalttığı söylenebilir. Diğer taraftan, kesme kaması ile birlikte ikili ve üçlü hibrit lif takviyesi, döşeme-kolon birleşim elemanlarında göçme modunu salt eğilmeye dönüştürdüğü için bu numunelerde belirgin bir çevresel çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Dolayısıyla, zımbalama önlemi olarak, kesme kaması ile birlikte

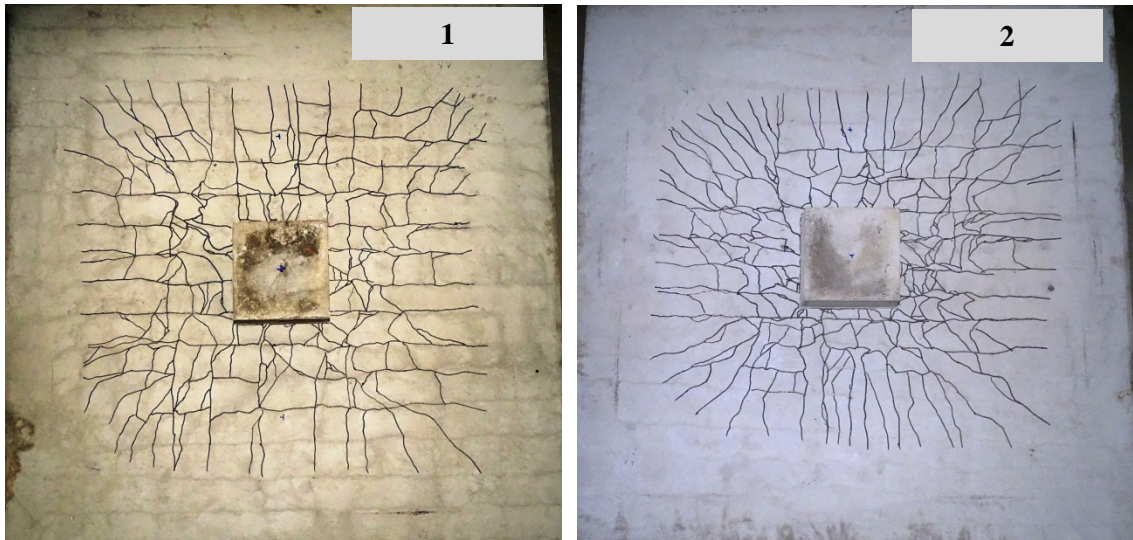
hibrit lif takviyesinin döşeme-kolon birleşim elemanlarını eğilme kapasitesine ulaştırabildiği söylenebilir. Ayrıca, tüm lif takviyeli kesme kaması donatılı test numunelerinin yükleme esnasındaki bütünlüklerini göçmeye ulaşana kadar korudukları ve mikro lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında dallanma şeklinde çoklu mikro çatlak oluşumları da gözlemlenmiştir.



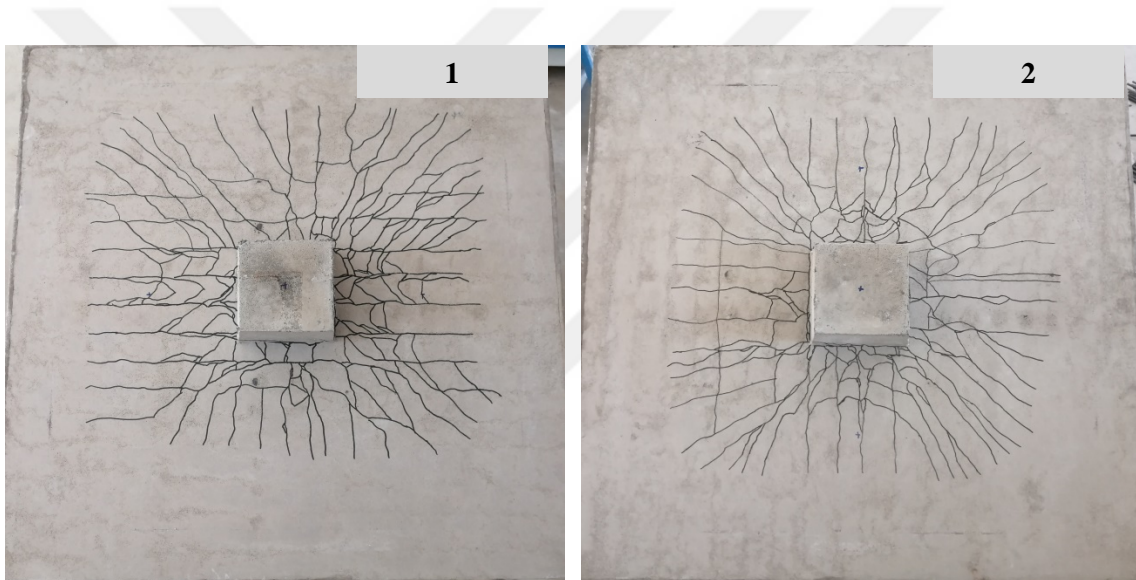
(a) DKB_KONTROL_KAMA



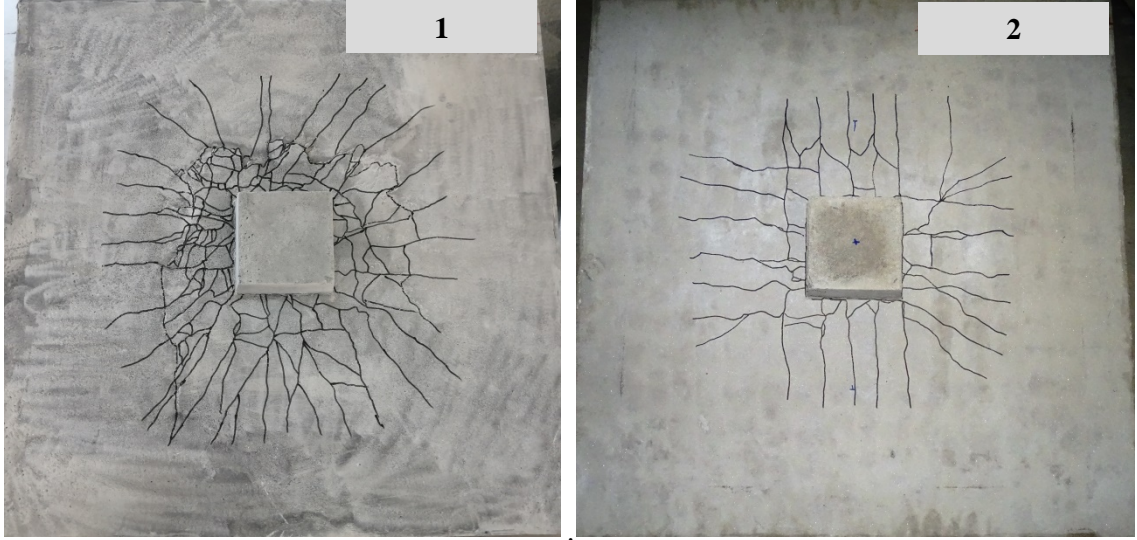
(b) DKB_MAK1.00_KAMA



(c) DKB_MAK0.80_MIK0.20_KAMA

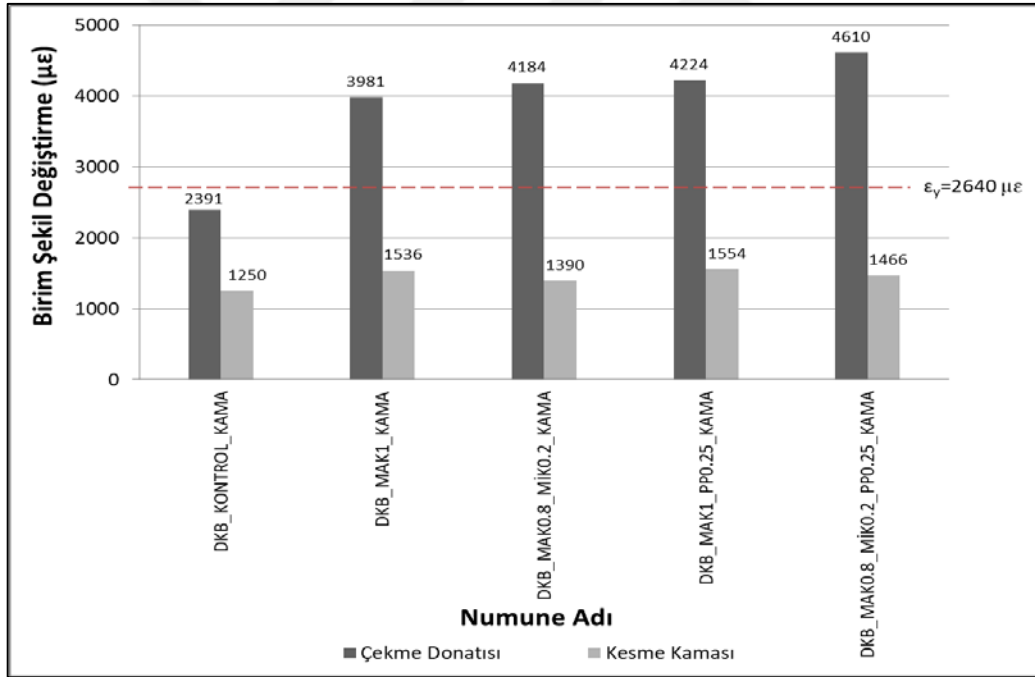


(d) DKB_MAK1.00_PP0.25_KAMA



(e) DKB_MAK0.80_MIK0.20_PP0.25_KAMA

Şekil 4.36 : Kesme kaması donatılı lifsiz ve lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının alt yüzey çatlak modelleri (Seri III)



Şekil 4.37 : Seri III döşeme-kolon birleşim elemanlarında pik yük değerlerine karşılık çekme donatısında ve kesme kamasında oluşan ortalama birim şekil değişime değerleri.

4.3.3.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için döşeme-kolon birleşim elemanlarının göçme modu ve çatlak modellerinin karşılaştırılması

Zımbalama donatısız tüm lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında, lifsiz kapalı etriye ve lifsiz kesme kaması donatılı kontrol test numunelerine kıyasla, genelde

daha yüksek göçme yüzeyi alanı ve çoklu çatlak oluşumu gözlemlenirken, üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanları ise bu açıdan en iyi performansı sergilemiştir. Ayrıca, zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte zımbalama donatısı olarak kesme kamasının kullanılmasının kapalı etriyeye kıyasla, göçme modu, çatlak genişlikleri ve sayısı üzerinde genelde daha olumlu bir katkı sağladığı söylenebilir. Tüm bunlara ek olarak, kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında göçme modu açısından en iyi performans üçlü hibrit lif takviyeli numunelerde gözlemlenirken, kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında ise hem ikili hem de üçlü hibrit lif takviyeli numunelerden elde edilmiştir.

4.3.4 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi

Özellikle kirişsiz döşeme sistemlerin sismik yüklere karşı dayanıklılığı açısından, enerji yutma kapasitesi oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında, döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi, yük-açıklık ortası deplasman eğrileri altındaki alandan hesaplanmıştır. Tüm döşeme-kolon birleşim elemanları için enerji yutma kapasitesi değerleri, Çizelge 4.8’de sunulmuştur.

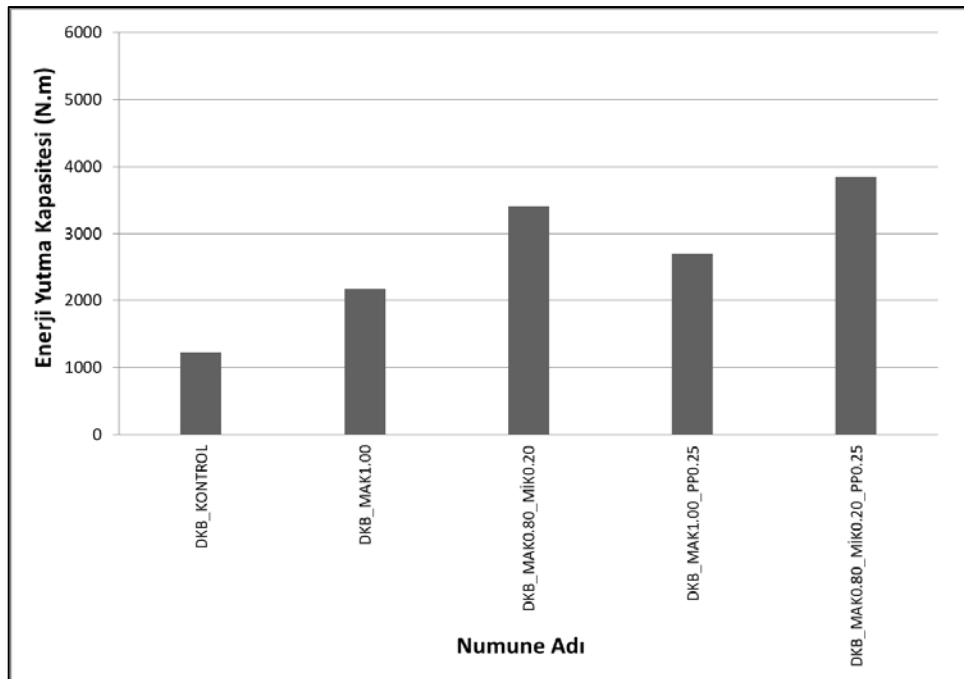
Çizelge 4.8 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait enerji yutma kapasitesi ve süneklik indeksi değerleri.

Seri	Numune Adı	Enerji Yutma Kapasitesi (N.m)	Süneklik indeksi
I	DKB_KONTROL	1228.78	1.9
	DKB_MAK1.00	2169.93	2.12
	DKB_MAK0.80_MİK0.20	3403.16	2.8
	DKB_MAK1.00_PP0.25	2700.93	2.38
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25	3850.91	2.72
II	DKB_KONTROL_KETR	1572.52	1.95
	DKB_MAK1.00_KETR	3652.91	2.53
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_KETR	4237.25	2.89
	DKB_MAK1.00_PP0.25_KETR	5201.46	3.15
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KETR	5128.86	3.23
III	DKB_KONTROL_KAMA	1822.87	2.42
	DKB_MAK1.00_KAMA	4040.57	2.74
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_KAMA	4735.62	3.13
	DKB_MAK1.00_PP0.25_KAMA	4264.86	3.16
	DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KAMA	4108.89	3.1

4.3.4.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)

Tez çalışması kapsamında, zımbalama donatısız lifsiz kontrol ile tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait enerji yutma kapasitesi değerleri, Çizelge 4.8 ve Şekil 4.38’de verilmiştir. Şekil 4.38’den görüleceği üzere, tüm lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi değerlerinin, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol test numunelerine kıyasla, daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesinde, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol numunesine kıyasla, en düşük artış %76.59 ile sadece tekli %1 makro çelik takviyeli test numunelerinden elde edilmiştir. Diğer taraftan, mikro çelik veya PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesinin ise lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol numunesine kıyasla, sırasıyla, %176.95 ve %119.8 oranlarında arttığı belirlenmiştir. Buradan, ikili lif hibridizasyonu açısından makro çelik ile birlikte mikro çelik lif kullanımının PP life kıyasla, enerji yutma kapasitesi üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu vurgulanabilir.



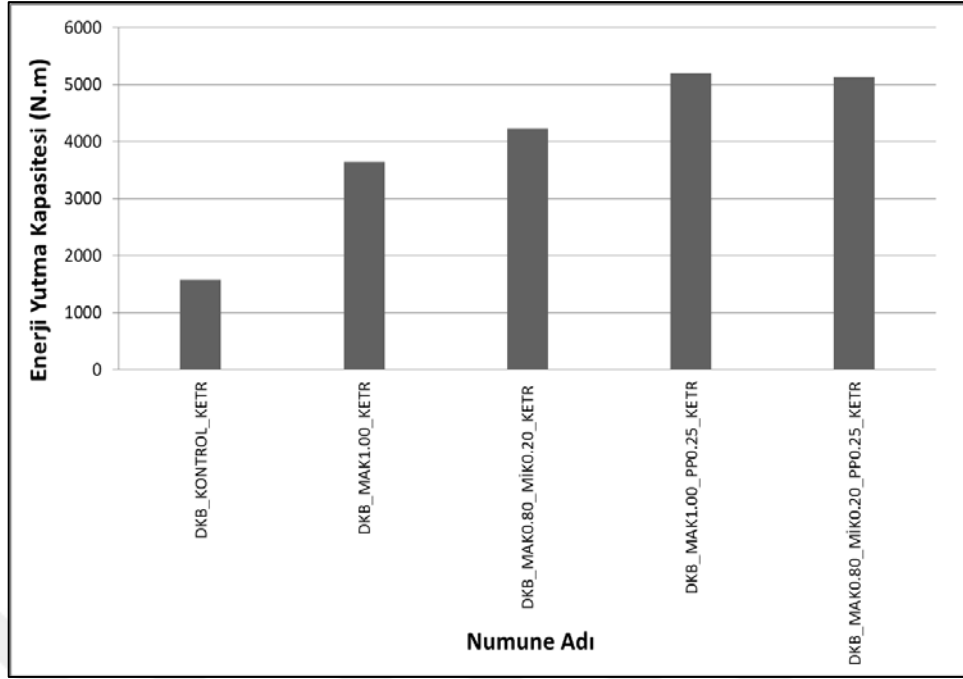
Şekil 4.38 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi değerleri.

En yüksek enerji yutma kapasitesi artışı, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol numunesine kıyasla, %213.39 ile üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarından elde edilmiştir. Sonuç olarak, tekli lif takviyesi, döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesini sınırlı oranda arttırırken, hibrit lif takviyesinin ise oluşan sinerji sayesinde enerji yutma kapasitesi açısından daha etkili olduğu söylenebilir. Literatürde yürütülen bazı çalışmalarda (Smadi ve Bani Yasin, 2008; Xiao ve diğ, 2019) da çelik lif takviyesinin döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesini arttırdığı vurgulanmıştır.

4.3.4.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)

Kapalı etriye donatılı lifsiz kontrol ile kapalı etriye donatılı tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait enerji yutma kapasitesi değerleri, Çizelge 4.8 ve Şekil 4.39'da verilmiştir. Şekil 4.39'dan görüleceği üzere, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesi esas alındığında, KYB karışımlarına hem tek hem de hibrit lif takviyesinin, döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesini arttırdığı bulunmuştur.

Kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesinde, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesine kıyasla, en düşük artış %132.3 ile tekli %1 makro çelik lif takviyeli test numunelerinden elde edilirken, PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli test numunelerinde ise %230.77 ile en yüksek artış olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, mikro çelik içeren ikili ve hem mikro çelik hem de PP lif içeren üçlü hibrit lif takviyeli kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesine kıyasla, sırasıyla, %169.46 ve %226.16 oranlarında arttığı bulunmuştur. Buradan, ikili lif hibridizasyonu açısından makro çelik ile birlikte PP lif kullanımı mikro çelik life kıyasla, kapalı etriyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu vurgulanabilir.



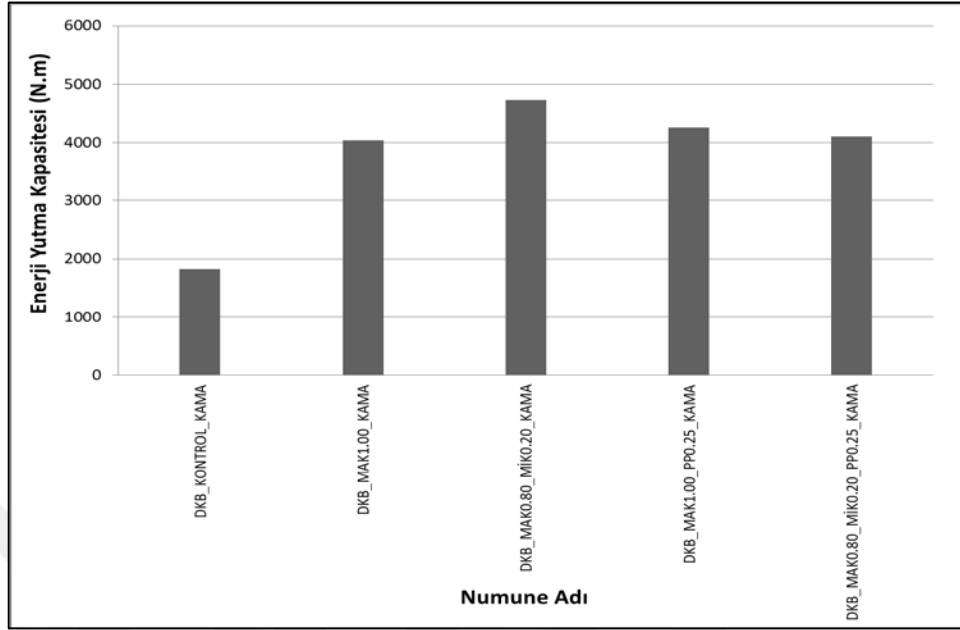
Şekil 4.39 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi değerleri.

4.3.4.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)

Kesme kaması donatılı lifsiz kontrol ile kesme kaması donatılı tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait ortalama enerji yutma kapasitesi değerleri, Çizelge 4.8 ve Şekil 4.40’da sunulmuştur. Şekil 4.40’dan görüleceği üzere, KYB karışımlarına lif takviyesinin, lifsiz kesme kaması donatılı kontrol numunesine kıyasla, döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesini arttırdığı belirlenmiştir.

Kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesinde, lifsiz kesme kaması donatılı kontrol test numunesine kıyasla, en yüksek zımbalama dayanımı artışı ise %159.79 ile ikili hibrit çelik lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarından elde edilirken, bunu %133.96 artış ile PP lif içeren ikili ve %125.41 ile üçlü hibrit lif takviyeli kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları takip etmiştir. Bununla birlikte, en düşük enerji yutma kapasitesi artışının %121.66 ile sadece %1 makro çelik lif takviyeli kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında olduğu belirlenmiştir. Buradan, ikili lif hibridizasyonu açısından makro çelik ile birlikte mikro çelik lif kullanımı PP life kıyasla, kesme kaması donatılı

döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu vurgulanabilir.



Şekil 4.40 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi değerleri.

4.3.4.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında, lif takviyesi ve zımbalama donatısı içermeyen Seri I kontrol numunesine kıyasla, döşeme-kolon birleşim elemanlarına ikili ve üçlü hibrit lif takviyesinin enerji yutma kapasitesinde ortalama %170, tekli makro çelik lif takviyesinin ise %76.59 oranında bir artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Seri I kontrol numunesine kıyasla, sadece kesme kamasının enerji yutma kapasitesinde %48.35 ve kapalı etriyenin ise %27.97 oranlarında artışa sebep olduğu görülmektedir. Sonuçta, döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesini arttırmak için zımbalama önlemi olarak tek başına lif takviyesinin özellikle de ikili veya üçlü hibrit lif takviyesinin kullanılabilceği açıktır.

Enerji yutma kapasitesi açısından lif takviyesi ile birlikte en etkili zımbalama donatısı tipinin belirlenmesinin de büyük bir öneme sahip olduğu açıktır. Bu bağlamda, kapalı etriye ve kesme kaması ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren sırasıyla, Seri II ve Seri III numunelerinin, zımbalama önlemi olarak sadece farklı lif kombinasyonları içeren Seri I numuneleri ile benzer lif kombinasyonları esas alınarak çapraz karşılaştırılması yapılmıştır. Bu durumda, kapalı etriye donatısı ile birlikte tekli ve hibrit

hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitelerinin, sadece lif takviyeli Seri I grubundaki benzer lif kombinasyonlarına sahip numunelere kıyasla, ortalama %48.22 oranında arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, kesme kaması donatısı ile birlikte tekli ve hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitelerinin, sadece lif takviyeli Seri I grubundaki benzer lif kombinasyonlarına sahip numunelere kıyasla, ortalama %42.08 oranında arttığı bulunmuştur. Buradan, zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye kullanılmasının kesme kamasına kıyasla, enerji yutma kapasitesi üzerinde daha olumlu bir katkı sağladığı söylenebilir.

4.3.4.5 Farklı zımbalama önlemlerine ait enerji yutma kapasitelerinin istatistiksel değerlendirilmesi

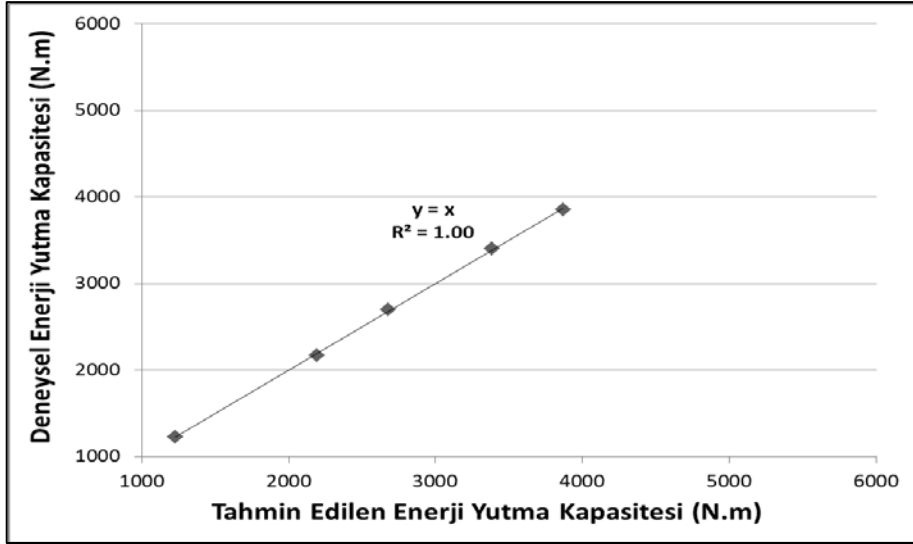
Zımbalama donatısız sadece farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri I, kapalı etriye ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri II ve kesme kaması ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri III numunelerine ait enerji yutma kapasitesi değerleri kullanılarak, çoklu lineer regresyon analizi yardımıyla her bir zımbalama önlemi için olmak üzere enerji yutma kapasitesi değerleri ($E.Y.K_I$, $E.Y.K_{II}$ ve $E.Y.K_{III}$), hacimce yüzde makro çelik, mikro çelik ve PP lif miktarı değişkenlerine bağlı olarak, sırasıyla, Denklem (4.4-6) ile tahmin edilmiştir.

$$E.Y.K_I = 1228.78 + 96196.25 * MAK + 691998.8 * MİK + 195750 * PP \quad (4.4)$$

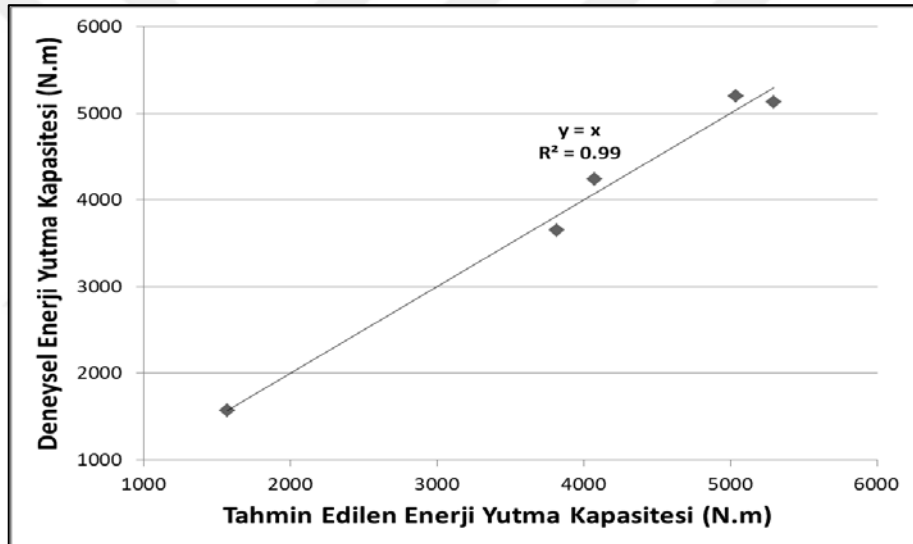
$$E.Y.K_{II} = 1572.52 + 224462.5 * MAK + 352397.5 * MİK + 488032 * PP \quad (4.5)$$

$$E.Y.K_{III} = 1822.87 + 243045.5 * MAK + 377815.5 * MİK - 80488 * PP \quad (4.6)$$

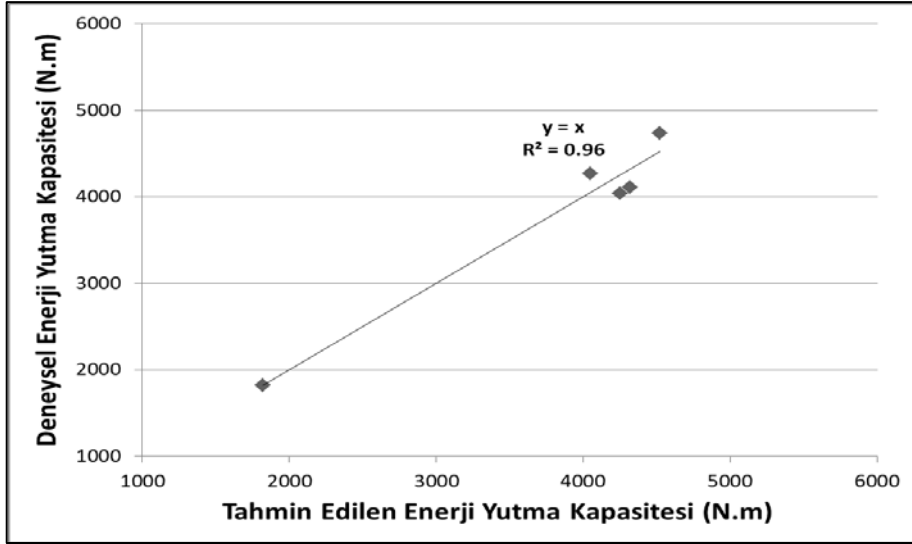
Burada, $E.Y.K_I$ sadece lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait enerji yutma kapasitesini (N.m), $E.Y.K_{II}$ kapalı etriye donatılı lifsiz kontrol ile kapalı etriye donatılı lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesini (N.m) ve $E.Y.K_{III}$ ise kesme kaması donatılı lifsiz kontrol ile kesme kaması donatılı lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesini (N.m) sembolize etmektedir. Ayrıca, MAK makro çelik lif oranını (%), MİK mikro çelik lif oranını (%) ve PP ise PP lif oranını (%) ifade etmektedir. Şekil 4.41(a-c)'den görüleceği üzere, farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi değerlerinin ortalama %98.3 ile yüksek doğrulukta tahmin edildiği belirlenmiştir.



(a) Lifsiz kontrol ve lif takviyeli (Seri I)



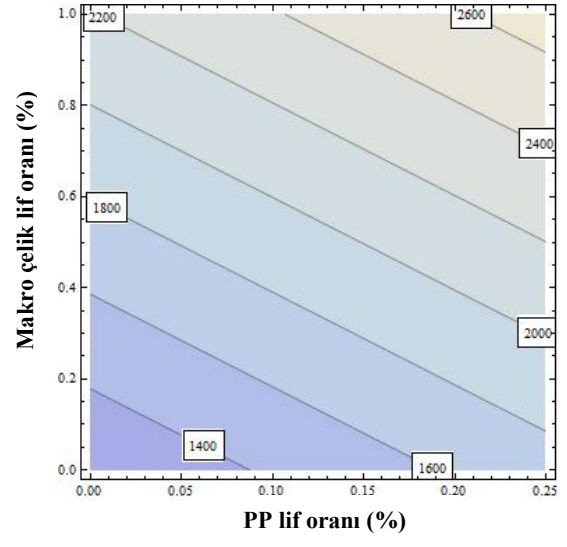
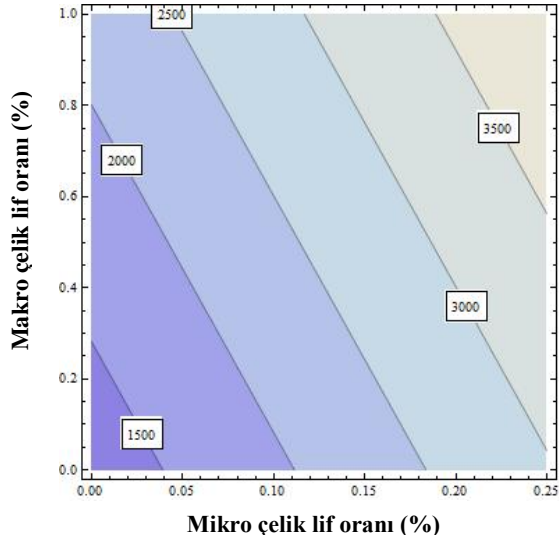
(b) Kapalı etriye donatılı ve/veya lif takviyeli (Seri II)



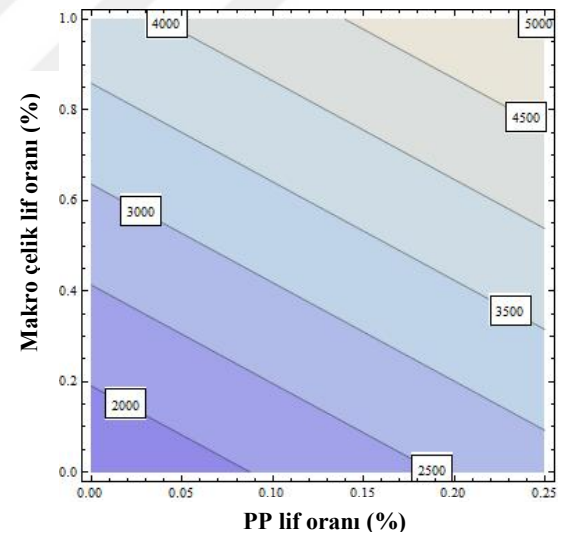
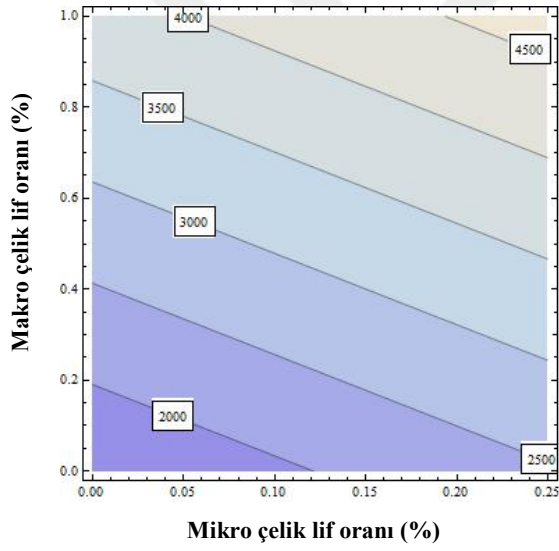
(c) Kesme kaması donatılı ve/veya lif takviyeli (Seri III)

Şekil 4.41 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait deneysel ve tahmin edilen enerji yutma kapasitesi değerleri.

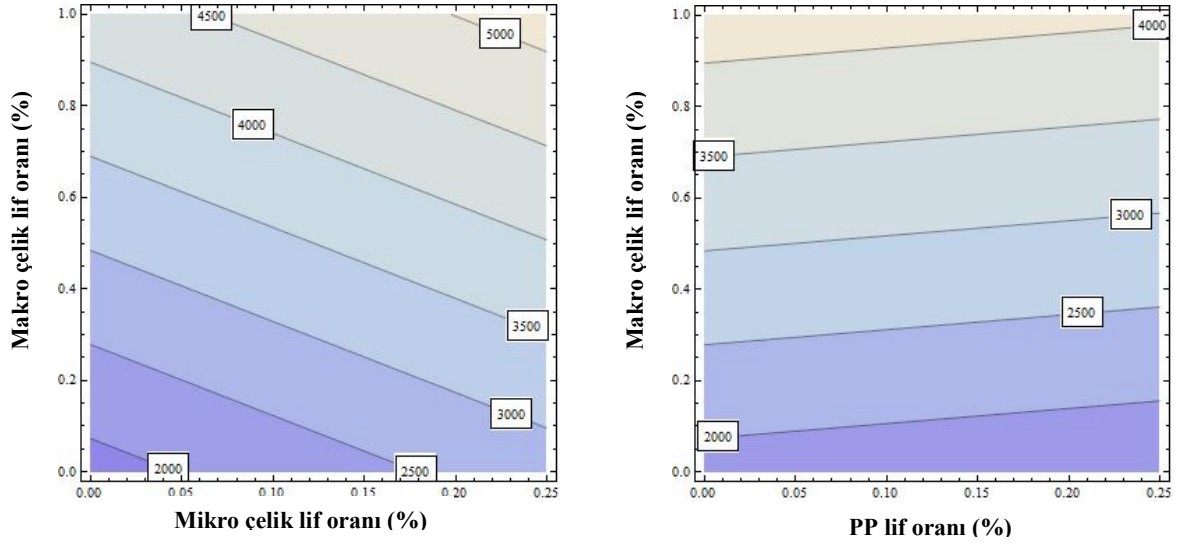
Diğer taraftan, zımbalama donatısız ikili lif hibridizasyonu durumunda, makro çelik lif miktarı ile mikro çelik lif veya PP lif miktarı esas alınarak, döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesi değerini tahmin etmek için grafikler çizilmiştir (Şekil 4.42(a-c)). Bu bağlamda, inovatif hibrit lif takviyeli KYB'nin kirişsiz döşeme sistemlerinde enerji yutma kapasitesini arttırmak amacıyla kullanılması durumunda, uygulamadaki tasarım mühendisleri ve araştırmacıların en uygun mikro lif tipi seçimi ve optimum makro/mikro lif oranları ile ilgili doğru seçimler yapabilmesi açısından söz konusu bu şekillerin önemli bir yol gösterici olacağı açıktır. Örneğin, aynı oranlarda mikro lif içeren (%0.2 mikro çelik veya %0.2 PP lif) ve toplamda eşit lif miktarına sahip ikili hibrit lif takviyeli numunelerin enerji yutma kapasiteleri karşılaştırıldığında, ikili lif hibridizasyonunun hem zımbalama donatısız hem de farklı zımbalama donatılarına (kapalı etriye ve kesme kaması) sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte, mikro çelik lifin PP life kıyasla, kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları hariç, enerji yutma kapasitesi üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu bu grafiklerden anlaşılmaktadır.



(a) Zımbalama donatısız



(b) Kapalı etriye donatılı

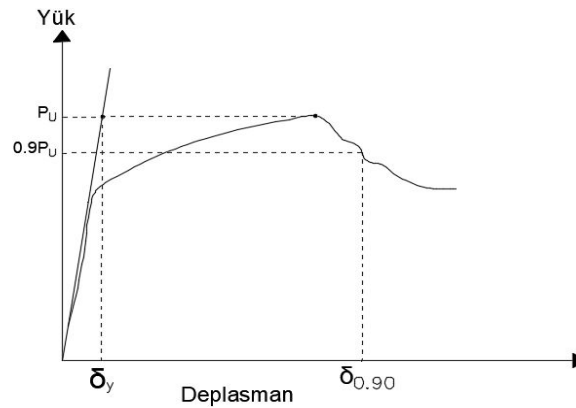


(c) Kesme kaması donatılı

Şekil 4.42 : İkili lif hibridizasyonu durumunda toplam lif miktarı ve mikro lif tipinin enerji yutma kapasitesine etkisi.

4.3.5 Farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi

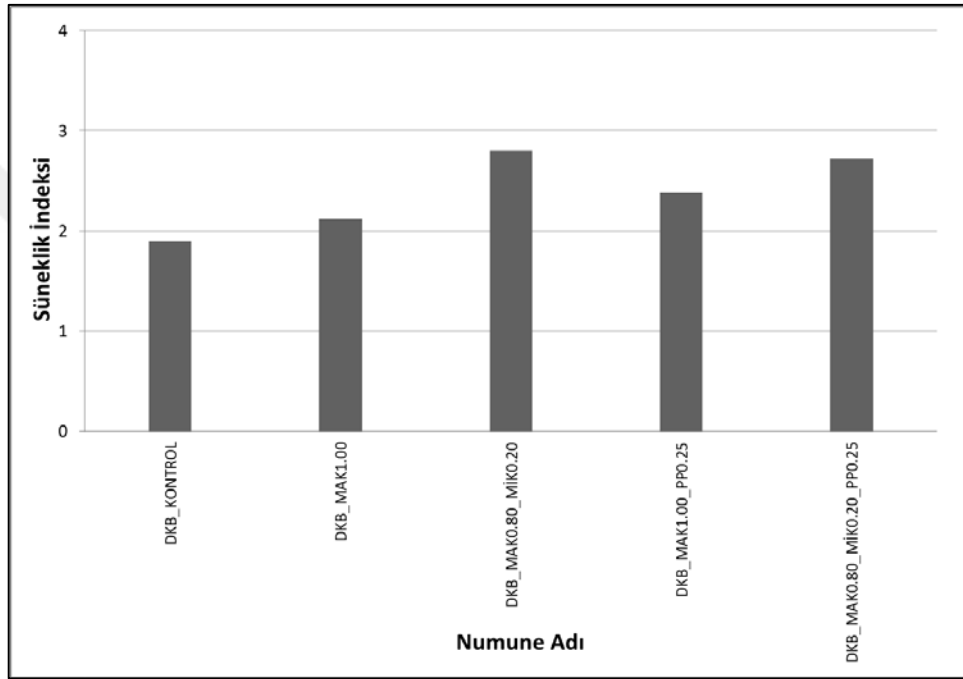
Süneklik indeksi, pik yük sonrası plastik deformasyon kapasitesi ile ilgili olup, yapısal tasarım açısından oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerlerini yorumlamak için Cohn & Bartlett (1982) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır (Şekil 4.43). Süneklik indeksi değerleri, pik yük sonrası maksimum yük taşıma kapasitesinin %90'ına karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerinin, döşeme-kolon birleşim elemanlarının, ilk çatlak açıklık ortası deplasman değerine oranı olarak hesaplanmıştır. Tüm döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerleri Çizelge 4.8'de de sunulmuştur.



Şekil 4.43 : Süneklik indeksi hesaplanması.

4.3.5.1 Sadece lif takviyesi (Seri I)

Tez çalışması kapsamında, zımbalama donatısız lifsiz kontrol ile tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait ortalama süneklik indeksi değerleri, Çizelge 4.8 ve Şekil 4.44’de verilmiştir. Şekil 4.44’den görüleceği üzere, tüm lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerlerinin, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol test numunelerine kıyasla, daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.44 : Zımbalama önlemi olarak sadece lif takviyesine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerleri.

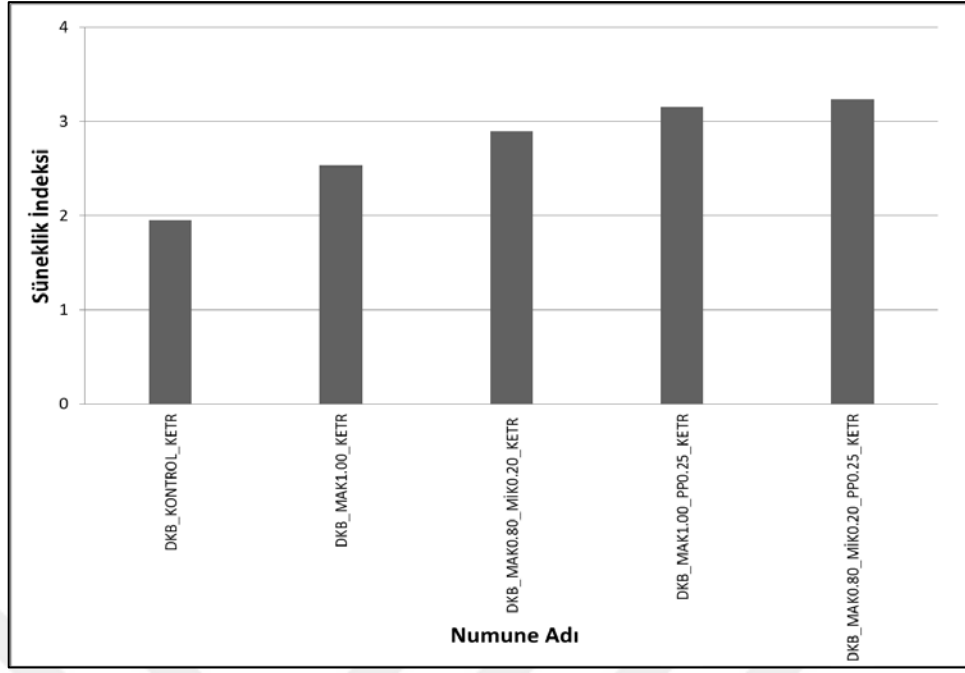
Döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksinde, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol numunesine kıyasla, en düşük artış %11.58 ile sadece tekli %1 makro çelik takviyeli test numunelerinden elde edilmiştir. Diğer taraftan, PP lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indekslerinin ise lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol numunesine kıyasla, sırasıyla, %25.26 ve %43.16 oranlarında arttığı belirlenmiştir. En yüksek süneklik indeksi artışı ise lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol numunesine kıyasla, %47.37 ile ikili hibrit çelik lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarından elde edilmiştir. Buradan, ikili lif hibridizasyonu açısından makro çelik ile birlikte mikro çelik lif kullanımı PP life kıyasla, döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu vurgulanabilir. Sonuç olarak, tekli lif takviyesi, döşeme-kolon birleşim elemanlarının

süneklik indeksini sınırlı oranda arttırırken, hibrit lif takviyesinin ise oluşan sinerji sayesinde süneklik indeksi açısından daha olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Literatürde yürütülen bazı çalışmalarda (Barros ve diğ, 2015; Cheng ve diğ, 2010; Lee ve diğ, 2008; Smadi ve Bani Yasin, 2008) da benzer sonuçlar bulunmuş olup, farklı tip ve narinliğe sahip liflerle takviye edilen döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik özelliğinin lifsiz kontrol test numunesine kıyasla, önemli oranda iyileştiği vurgulanmıştır.

4.3.5.2 Kapalı etriye ile birlikte lif takviyesi (Seri II)

Kapalı etriye donatılı lifsiz kontrol ile kapalı etriye donatılı tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait ortalama süneklik indeksi değerleri, Çizelge 4.8 ve Şekil 4.45’de verilmiştir. Şekil 4.45’den görüleceği üzere, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesi esas alındığında, KYB karışımlarına hem tek hem de hibrit lif takviyesinin, döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerini arttırdığı bulunmuştur.

Kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksinde, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesine kıyasla, en düşük artış %29.74 ile tekli %1 makro çelik takviyeli test numunelerinden elde edilmiştir. Ayrıca, mikro çelik veya PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerlerinin, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesine kıyasla, sırasıyla, %48.21 ve %61.54 oranlarında arttığı bulunmuştur. Buradan, ikili lif hibridizasyonu açısından makro çelik ile birlikte PP lif kullanımının mikro çelik life kıyasla, kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu vurgulanabilir.



Şekil 4.45 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerleri.

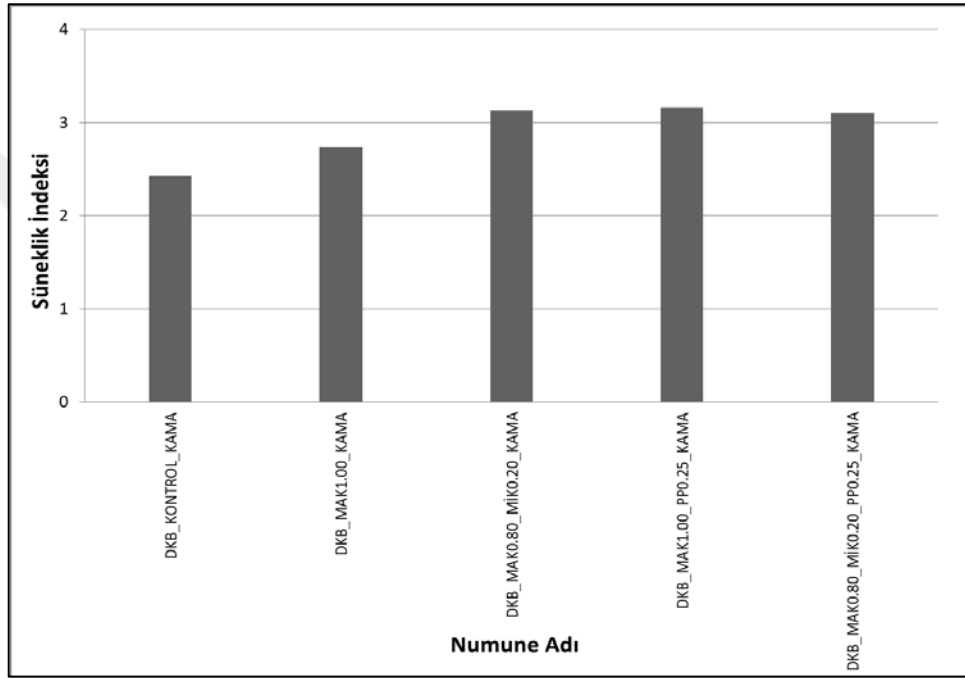
Bunun yanında, en yüksek süneklik indeksi değeri artışı, lifsiz kapalı etriye donatılı kontrol test numunesine kıyasla, %65.64 ile üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarından elde edilmiştir. Çünkü, iki farklı mikro lif (çelik ve PP) içeren üçlü hibrit karışımı, bu sayede sahip olduğu yüksek sinerji sayesinde daha fazla mikro çatlakların köprülenmesi, çatlak gelişiminin geciktirilmesi ve çatlak ilerlemesinin belirli seviyelerde önlenmesi açısından diğer lif kombinasyonlarına kıyasla daha avantajlıdır.

4.3.5.3 Kesme kaması ile birlikte lif takviyesi (Seri III)

Kesme kaması donatılı lifsiz kontrol ile kesme kaması donatılı tekli ve hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait ortalama süneklik indeksi değerleri, Çizelge 4.8 ve Şekil 4.46’da sunulmuştur. Şekil 4.46’ dan görüleceği üzere, lifsiz kesme kaması donatılı kontrol test numunesi esas alındığında, KYB karışımlarına hem tek hem de hibrit lif takviyesinin, döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerini arttırdığı bulunmuştur.

Kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerinde, lifsiz kesme kaması donatılı kontrol test numunesine kıyasla, en düşük artış

%13.22 ile sadece %1 makro çelik lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarından elde edilmiştir. Diğer taraftan, mikro çelik veya PP lif içeren ikili hibrit lif takviyeli kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi, liffsiz kesme kaması donatılı kontrol numunesine kıyasla, sırasıyla, %29.34 ve %30.58 oranlarında artarken, üçlü hibrit lif takviyesi durumunda ise %28.1 oranında artmıştır. Buradan, ikili veya üçlü lif hibridizasyonunun, kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değeri üzerinde hemen hemen benzer bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.46 : Zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerleri.

4.3.5.4 Farklı zımbalama önlemleri durumu için süneklik indekslerinin karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında, lif takviyesi ve zımbalama donatısı içermeyen Seri I kontrol numunesine kıyasla, döşeme-kolon birleşim elemanlarına ikili ve üçlü hibrit lif takviyesinin, süneklik indeksi değerinde ortalama %38.6, tekli makro çelik lif takviyesinin ise %11.58 oranında bir artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Seri I kontrol numunesine kıyasla, sadece kapalı etriyenin süneklik indeksinde %2.63 ve kesme kamasının ise %27.37 oranlarında artışa sebep olduğu görülmektedir. Sonuçta, herhangi bir zımbalama donatısı kullanmadan döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi

değerini arttırmak için lif takviyesinin özellikle hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyesinin en iyi zımbalama önlemi olarak kullanılabilmesi açıktır.

Süneklik indeksi değeri açısından lif takviyesi ile birlikte en etkili zımbalama donatısı tipinin belirlenmesi de oldukça önemlidir. Bu bağlamda, kapalı etriye ve kesme kaması ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren sırasıyla, Seri II ve Seri III numunelerinin, zımbalama önlemi olarak sadece farklı lif kombinasyonları içeren Seri I numuneleri ile benzer lif kombinasyonları esas alınarak çapraz karşılaştırılması yapılmıştır. Bu durumda, kapalı etriye donatısı ile birlikte tekli ve hibrit hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerlerinin, sadece lif takviyeli Seri I grubundaki benzer lif kombinasyonlarına sahip numunelere kıyasla, ortalama %15.35 oranında arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, kesme kaması donatısı ile birlikte tekli ve hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerlerinin, sadece lif takviyeli Seri I grubundaki benzer lif kombinasyonlarına sahip numunelere kıyasla, ortalama %22.06 oranında arttığı bulunmuştur. Buradan, zımbalama önlemi olarak lif takviyesi ile birlikte kesme kaması kullanılmasının kapalı etriyeye kıyasla, süneklik indeksi değeri üzerinde daha olumlu bir katkı sağladığı söylenebilir.

4.3.5.5 Farklı zımbalama önlemlerine ait süneklik indekslerinin istatistiksel değerlendirilmesi

Zımbalama donatısız sadece farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri I, kapalı etriye ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri II ve kesme kaması ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri III numunelerine ait süneklik indeksi değerleri kullanılarak, çoklu lineer regresyon analizi yardımıyla her bir zımbalama önlemi için olmak üzere süneklik indeksleri ($S.I_I$, $S.I_{II}$ ve $S.I_{III}$), hacimce yüzde makro çelik, mikro çelik ve PP lif miktarı değişkenlerine bağlı olarak, sırasıyla, Denklem (4.7-9) ile tahmin edilmiştir.

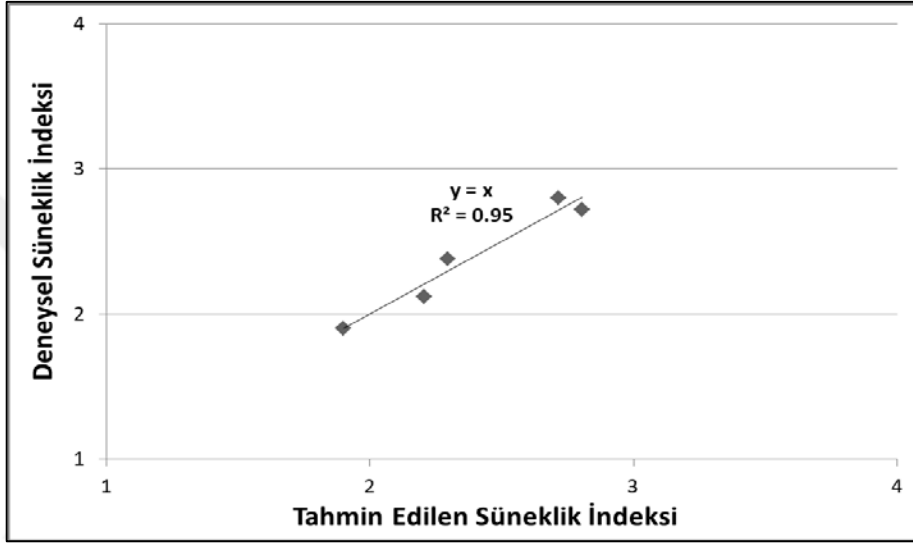
$$S.I_I = 1.9 + 30.5 * MAK + 285.5 * MİK + 36 * PP \quad (4.7)$$

$$S.I_{II} = 1.95 + 65 * MAK + 175 * MİK + 192 * PP \quad (4.8)$$

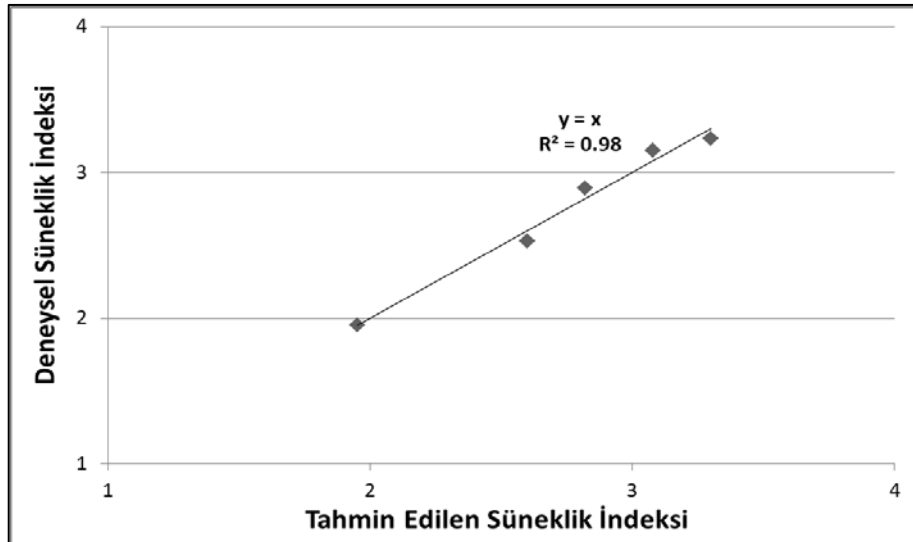
$$S.I_{III} = 2.42 + 43.25 * MAK + 125.75 * MİK + 78 * PP \quad (4.9)$$

Burada, $S.I_I$ sadece lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait süneklik indeksini, $S.I_{II}$ kapalı etriye donatılı liffsiz kontrol ile kapalı etriye donatılı lif takviyeli döşeme-kolon

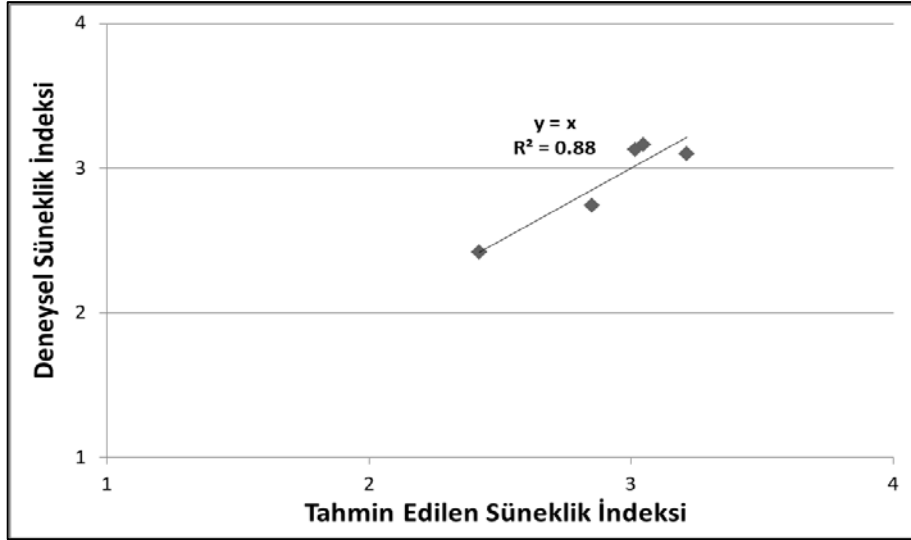
birleşim elemanlarının süneklik indeksini ve S.I_{III} ise kesme kaması donatılı lifsiz kontrol ile kesme kaması donatılı lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksini sembolize etmektedir. Ayrıca, MAK makro çelik lif oranını (%), MİK mikro çelik lif oranını (%) ve PP ise PP lif oranını (%) ifade etmektedir. Şekil 4.47(a-c)'den görüleceği üzere, farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerlerinin ortalama %93.7 ile yüksek doğrulukta tahmin edildiği belirlenmiştir.



(a) Lifsiz kontrol ve lif takviyeli (Seri I)



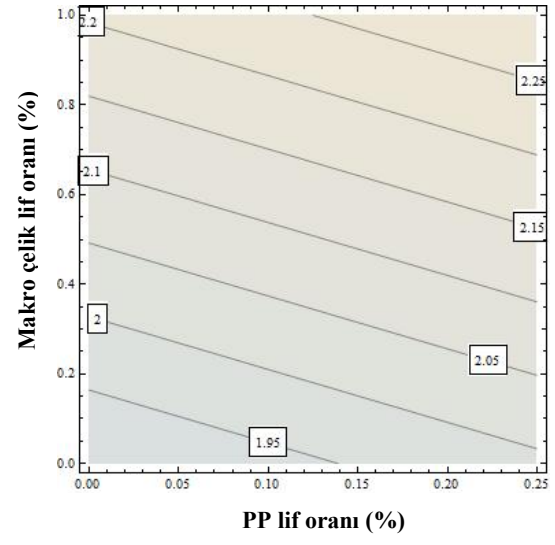
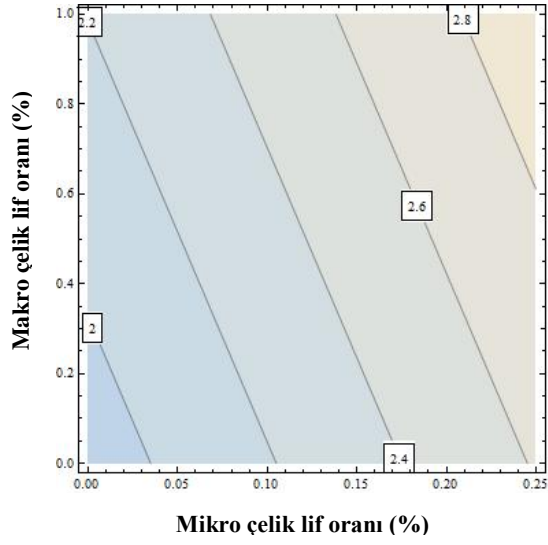
(b) Kapalı etriye donatılı ve/veya lif takviyeli (Seri II)



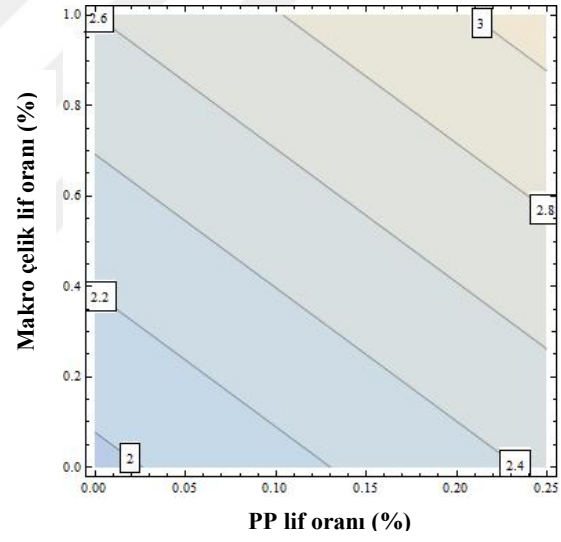
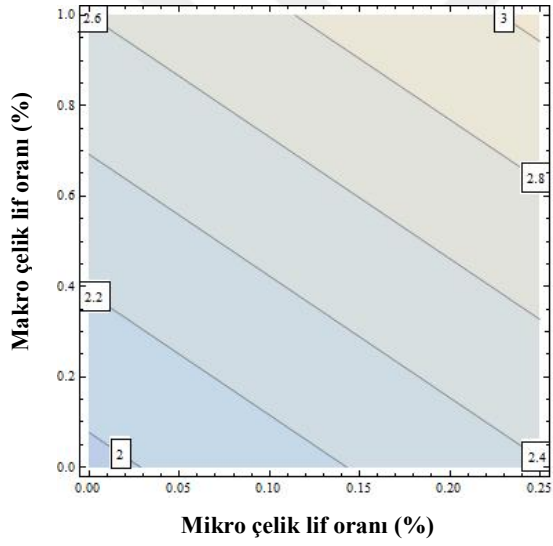
(c) Kesme kaması donatılı ve/veya lif takviyeli (Seri III)

Şekil 4.47 : Döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait deneysel ve tahmin edilen süneklik indeksi değerleri.

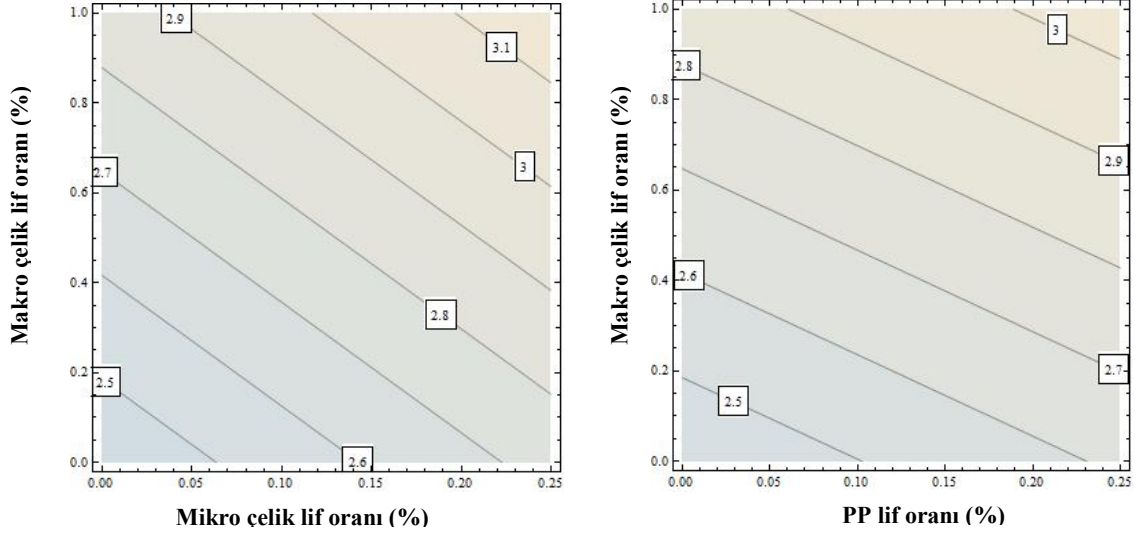
Diğer taraftan, zımbalama donatısız ikili lif hibridizasyonu durumunda, makro çelik lif miktarı ile mikro çelik lif veya PP lif miktarı esas alınarak, döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerini tahmin etmek için grafikler çizilmiştir (Şekil 4.48(a-c)). Bu bağlamda, inovatif hibrit lif takviyeli KYB'nin kirişsiz döşeme sistemlerinde süneklik indeksi değerini arttırmak amacıyla kullanılması durumunda, uygulamadaki tasarım mühendisleri ve araştırmacıların en uygun mikro lif tipi seçimi ve optimum makro/mikro lif oranları ile ilgili doğru seçimler yapabilmesi açısından söz konusu bu şekillerin önemli bir yol gösterici olacağı açıktır. Örneğin, aynı oranlarda mikro lif içeren (%0.2 mikro çelik veya %0.2 PP lif) ve toplamda eşit lif miktarına sahip ikili hibrit lif takviyeli numunelerin süneklik indeksi değerleri karşılaştırıldığında, ikili lif hibridizasyonunun hem zımbalama donatısız hem de farklı zımbalama donatılarına (kapalı etriye ve kesme kaması) sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksi değerini arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte, mikro çelik lifin PP life kıyasla, kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları hariç, süneklik indeksi üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu bu grafiklerden anlaşılmaktadır.



(a) Zımbalama donatısız



(b) Kapalı etriye donatılı



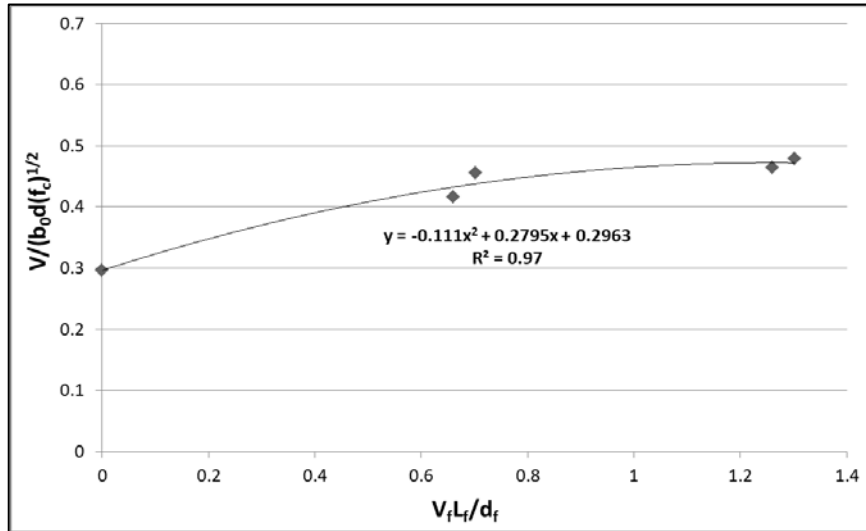
(c) Kesme kaması donatılı

Şekil 4.48 : İkili lif hibridizasyonu durumunda toplam lif miktarı ve mikro lif tipinin süneklik indeksi değerine etkisi.

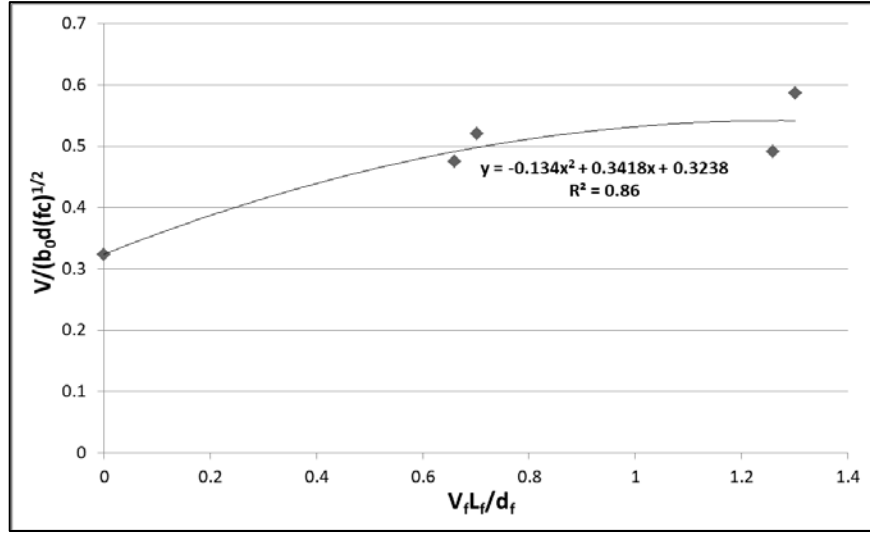
5. ANALİTİK (AMPİRİK) ÇALIŞMA

5.1 Hibrit Lif Takviyeli Döşeme-Kolon Birleşim Elemanlarının Zımbalama Dayanımının Tahmini için Ampirik Formül Geliştirilmesi

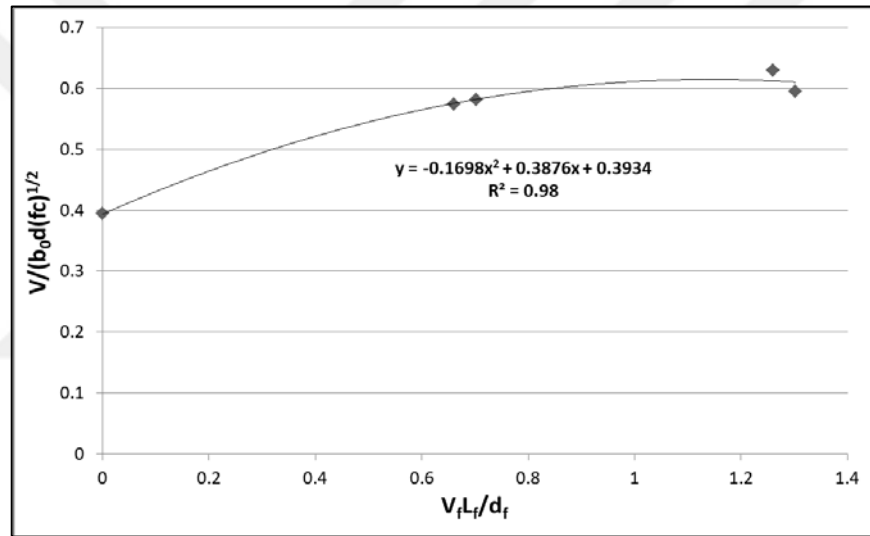
Tez çalışması kapsamında, lif hibridizasyonunun zımbalama dayanımı üzerindeki etkisini yansıtmak amacıyla, farklı zımbalama donatıları (kapalı etriye ve kesme kaması) ile birlikte hibrit lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak üretilen döşeme-kolon birleşim elemanları için ampirik formüller geliştirilmiştir. Lif miktarı ve narinliğine bağlı olarak elde edilen lif takviyesi indeksi ($V_f L_f / d_f$), lif takviyesinin betonun yapısal davranışı üzerindeki etkisini tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla, deneysel bulgular kullanılarak, normalize edilmiş zımbalama dayanımı ile lif takviye indeksinin değişimi elde edilmiştir. Şekil 5.1(a-c)'de zımbalama donatısız, kapalı etriye ve kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanları için normalize edilmiş zımbalama dayanımının, lif miktarı ve narinliği ile değişimi verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere, normalize edilmiş zımbalama dayanımı ile lif takviye indeksi arasında sadece lif takviyesi durumu (Seri I) için $R^2=0.97$, lif takviyeli kapalı etriyeli durumu (Seri II) için $R^2=0.86$ ve lif takviyeli kesme kamalı durumu (Seri III) için $R^2=0.98$ gibi yüksek bir korelasyon ile ikinci dereceden bir ilişki bulunmuştur. Ayrıca, lif takviye indeksinin artmasının, zımbalama dayanımında bir artışa neden olduğu da görülmüştür. Harajli ve diğ. (1995) tarafından yürütülen bir çalışmada da normalize edilmiş zımbalama dayanımı ile lif miktarı arasındaki değişim esas alınarak, tekli lif takviyesi durumu için döşemelerin zımbalama dayanımını tahmin eden ampirik bir formül geliştirilmiştir.



(a) Sadece lif takviyesi (Seri I)



(b) Kapalı etriye ve lif takviyesi (Seri II)



(c) Kesme kaması ve lif takviyesi (Seri III)

Şekil 5.1 : Normalize edilmiş zımbalama dayanımı ile lif takviye indeksinin değişimi.

Bu bağlamda, zımbalama donatısız sadece farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri I, kapalı etriye ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri II ve kesme kaması ile birlikte farklı lif kombinasyonlarını içeren Seri III numunelerine ait zımbalama tasarım dayanımlarını tahmin etmek için sırasıyla, Denklem (5.1), (5.2) ve (5.3) önerilmiştir.

$$Z.D_I = (-0.111 \left(\frac{V_f L_f}{d_f}\right)^2 + 0.2795 \left(\frac{V_f L_f}{d_f}\right) + 0.2963) b_0 d \sqrt{f_c} \quad (5.1)$$

$$Z.D_{II} = (-0.134 \left(\frac{V_f L_f}{d_f}\right)^2 + 0.3418 \left(\frac{V_f L_f}{d_f}\right) + 0.3238) b_0 d \sqrt{f_c} \quad (5.2)$$

$$Z.D_{III} = (-0.1698 \left(\frac{V_f L_f}{d_f}\right)^2 + 0.3876 \left(\frac{V_f L_f}{d_f}\right) + 0.3934) b_0 d \sqrt{f_c} \quad (5.3)$$

Burada, $Z.D_I$ sadece lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarına ait zımbalama dayanımını (N), $Z.D_{II}$ kapalı etriye donatılı lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını (N) ve $Z.D_{III}$ ise kesme kaması donatılı lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını (N) sembolize etmektedir. Ayrıca, V_f lif oranını (%), L_f lif uzunluğunu (mm), d_f lif çapını (mm), b_0 zımbalama çevresini (mm), d döşeme faydalı yüksekliğini (mm), f_c ise betonun küp basınç dayanımını ifade etmektedir.

5.2 Hibrit Lif Takviyeli KYB Kullanılması Durumunda Farklı Şartnamelerde Yer Alan Zımbalama Tasarım İfadeleri için Öneri

Bu tez çalışması kapsamında, farklı zımbalama önlemlerine sahip döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımı kapasiteleri, TS 500 (2000), ACI 318-19 (2019) ve BS8110 (1997) şartnamelerinde yer alan zımbalama dayanımı kapasitesi ifadeleri ile tahmin edilmiştir. Bu şartnamelerdeki zımbalama dayanımı ifadeleri incelendiğinde, TS 500 ve ACI 318-19 şartnameleri benzer parametrelerle zımbalama dayanımı kapasitesini belirlerken, BS8110 şartnamesinde ise farklı olarak eğilme donatısı oranının da dikkate alındığı görülmektedir.

TS 500 (2000) şartnamesinde, kirişsiz döşeme sistemlerinin zımbalama dayanımı kapasitesi ifadesi, Denklem (5.4)'de verilmiştir.

$$V_{pc} = \gamma f_{ctd} u_p d \quad (5.4)$$

Burada, V_{pc} kirişsiz döşeme sisteminin zımbalama dayanımı kapasitesini (N), γ moment etkisi altında zımbalama dayanımını azaltan katsayıyı (eksenel yükleme durumunda $\gamma=1$), f_{ctd} betonun aksel tasarım çekme dayanımını (MPa) ($f_{ctd}=0.35(f_{ck})^{1/2}$), f_{ck} betonun karakteristik basınç dayanımını (MPa), d döşemenin faydalı yüksekliğini (mm) ve u_p ise kolon yüzünden $d/2$ mesafedeki zımbalama çevresini (mm) sembolize etmektedir.

ACI 318-19 şartnamesinde, kirişsiz döşeme sistemlerinin zımbalama dayanımı kapasitesi, Denklem (5.5-7)'de verilen ifadelere göre belirlenmekte olup, bu ifadelerden elde edilen zımbalama tasarım dayanımlarının en küçüğü olarak kabul edilmektedir.

$$V_{c,1} = 0.17(1 + \frac{2}{\beta_c})\lambda(f_c')^{1/2}u_p d \quad (5.5)$$

$$V_{c,2} = 0.083[(\alpha_s d/u_p) + 2]\lambda(f_c')^{1/2}u_p d \quad (5.6)$$

$$V_{c,3} = 0.33\lambda(f_c')^{1/2}u_p d \quad (5.7)$$

Burada, V_c kirişsiz döşeme sisteminin zımbalama dayanımı kapasitesini (N), λ moment etkisi altında zımbalama dayanımını azaltan katsayısı (eksenel yükleme durumunda $\lambda=1$), β döşemenin uzun kenarının kısa kenarına oranını, f_c betonun karakteristik basınç dayanımını (MPa), d döşemenin faydalı yüksekliğini (mm), u_p kolon yüzünden $d/2$ mesafedeki zımbalama çevresini (mm) ve α_s ise iç, kenar ve köşe kolon olması durumu için değişen katsayısı (α_s iç, kenar ve köşe kolon için sırasıyla, 40, 30 ve 20) sembolize etmektedir.

BS8110 şartnamesinde, kirişsiz döşeme sistemlerinin zımbalama dayanımı kapasitesi ifadesi, Denklem (5.8 ve 9)'da verilmiştir.

$$V_c = 0.27k(100\rho_1 f_c)^{1/3}u_p d \quad (5.8)$$

$$k = (400/d)^{1/4} \leq 2 \quad (5.9)$$

Burada, V_c kirişsiz döşeme sisteminin zımbalama dayanımı kapasitesini (N), ρ_1 döşemede yer alan her iki yöndeki boyuna donatı oranlarının ortalamasını ($\rho_1 \leq 0.03$), f_c betonun küp basınç dayanımını (MPa), d döşemenin faydalı yüksekliğini (mm) ve u_p ise kolon yüzünden $1.5d$ mesafedeki zımbalama çevresini (mm) sembolize etmektedir.

Tez çalışması kapsamında, tasarlanan döşeme-kolon birleşim elemanlarının, TS 500 (2000), ACI 318-19 (2019) ve BS8110 (1997) şartnamelerinde yer alan zımbalama dayanımı kapasitesi ifadeleri ile tahmin edilen zımbalama dayanımı değerleri, Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1 : Hibrit lif takviyesi kullanılması durumunda şartnamelerde yer alan zımbalama dayanımı ifadeleri için öneri.

Numune Adı	Deney	TS 500	Deney/TS 500	ACI 318	Deney/ACI 318	BS8110	Deney/BS8110
DKB_KONTROL	298.3	324.62	1.29	306.07	0.97	325.32	0.92
DKB_MAK1.00	434.5	336.86	1.29	317.61	1.37	333.45	1.30
DKB_MAK0.80_MİK0.20	481.6	341.44	1.41	321.93	1.50	336.40	1.43
DKB_MAK1.00_PP0.25	461.9	321.18	1.44	302.83	1.53	323.02	1.43
DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25	488.9	329.37	1.48	310.54	1.57	328.49	1.49
ORTALAMA	433.04	330.69	1.31	311.80	1.39	329.35	1.31
Numune Adı	Deney	TS 500	Deney/TS 500	ACI 318	Deney/ACI 318	BS8110	Deney/BS8110
DKB_KONTROL_KETR	323.3	323.05	1.00	304.59	1.06	324.27	1.00
DKB_MAK1.00_KETR	480.98	326.92	1.47	308.24	1.56	326.86	1.47
DKB_MAK0.80_MİK0.20_KETR	507	314.41	1.61	296.45	1.71	318.47	1.59
DKB_MAK1.00_PP0.25_KETR	495.2	325.36	1.52	306.77	1.61	325.82	1.52
DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KETR	556.3	306.08	1.82	288.59	1.93	312.81	1.78
ORTALAMA	472.56	319.16	1.48	300.92	1.57	321.65	1.47
Numune Adı	Deney	TS 500	Deney/TS 500	ACI 318	Deney/ACI 318	BS8110	Deney/BS8110
DKB_KONTROL_KAMA	375.9	307.91	1.22	290.31	1.29	314.06	1.20
DKB_MAK1.00_KAMA	522.7	294.13	1.78	277.33	1.88	304.62	1.72
DKB_MAK0.80_MİK0.20_KAMA	560.3	310.86	1.80	293.10	1.91	316.07	1.77
DKB_MAK1.00_PP0.25_KAMA	557.5	285.73	1.95	269.40	2.07	298.79	1.87
DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KAMA	564.1	306.08	1.84	288.59	1.95	312.81	1.80
ORTALAMA	516.1	300.94	1.72	283.75	1.82	309.27	1.67

Şartnamelerde yer alan zımbalama tasarım dayanımı ifadeleri kullanılarak elde edilen tahmin değerleri, lif takviyesinin etkisini içermediği için deneysel zımbalama dayanımı değerlerine göre oldukça küçük olarak bulunmuştur. Bu sebeple, Çizelge 5.1'den de görüleceği üzere, TS 500 (2000), ACI 318-19 (2019) ve BS8110 (1997) şartnamelerinde yer alan zımbalama dayanımı kapasitesi ifadelerine, zımbalama donatısız, kapalı etriye ve kesme kaması donatılı hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını tahmin etmek için katsayılar önerilmiştir. Bu katsayılar, deneysel zımbalama dayanımı değerlerinin şartnamelerden elde edilen tasarım zımbalama dayanımı değerlerine oranlarının ortalamasıdır. Sonuç olarak, TS 500 şartnamesinde bulunan kirişsiz döşeme sistemleri için mevcut zımbalama dayanımı ifadesinin, zımbalama donatısız, kapalı etriye ve kesme kaması donatılı hibrit lif takviyeli KYB kullanılması durumlarında sırasıyla, 1.31, 1.48 ve 1.72 katsayıları ile çarpılması önerilmektedir. Ayrıca, bu katsayılar, ACI 318-19 şartnamesinde yer alan zımbalama dayanımı tasarımı ifadesi için zımbalama donatısız, kapalı etriye ve kesme kaması donatılı hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında sırasıyla, 1.39, 1.57 ve 1.82 ve BS8110 için ise 1.31, 1.47 ve 1.67 olarak tavsiye edilmektedir. Çizelge 5.2'de, bu çalışma kapsamında farklı zımbalama önlemleri için geliştirilen ampirik denklemlerin ve hibrit lif takviyesi durumu için modifiye edilmiş farklı şartnamelerin tasarım zımbalama dayanım ifadelerine ait tahmin değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Hibrit lif takviyesi durumu için farklı şartnamelere ait ifadeler kullanılarak tasarım zımbalama dayanımı tahmini.

Sadece lif takviyesi (Seri I)				
Numune Adı	Denklem (5.1)	1.31*(TS500)	1.39*(ACI 318)	1.31*(BS8110)
DKB_MAK1.00	451.41	441.29	441.48	436.82
DKB_MAK0.80_MİK0.20	463.25	447.28	447.48	440.77
DKB_MAK1.00_PP0.25	470.05	420.75	420.93	423.16
DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25	481.82	431.47	431.66	430.32
Lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye donatılı (Seri II)				
Numune Adı	Denklem (5.2)	1.48*(TS500)	1.57*(ACI 318)	1.47*(BS8110)
DKB_MAK1.00_KETR	497.46	483.84	480.48	480.48
DKB_MAK0.80_MİK0.20_KETR	484.95	465.33	468.15	468.15
DKB_MAK1.00_PP0.25_KETR	546.22	481.53	478.95	478.95
DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KETR	513.79	452.99	459.84	459.84
Lif takviyesi ile birlikte kesme kaması donatılı (Seri III)				
Numune Adı	Denklem (5.3)	1.72*(TS500)	1.82*(ACI 318)	1.67*(BS8110)
DKB_MAK1.00_KAMA	524.36	505.91	504.74	508.72
DKB_MAK0.80_MİK0.20_KAMA	560.50	534.69	533.44	527.83
DKB_MAK1.00_PP0.25_KAMA	542.09	491.46	490.31	498.99
DKB_MAK0.80_MİK0.20_PP0.25_KAMA	578.80	526.45	525.23	522.40

Bu çalışma kapsamında, hibrit lif takviyeli zımbalama donatısız, kapalı etriyeli ve kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımının tahmininde önerilen ampirik denklemler ve şartnameler tarafından verilen zımbalama dayanımı ifadelerinin hibrit lif durumu için modifiye edilmesinde kullanılacak katsayılar;

- KYB kullanılması
- Basınç dayanımı $f_c \geq 60$ MPa
- En fazla % 1.25 lif hacmi oranı
- Çelik liflerin ortalama narinlik (L_f/d_f) değerlerinin en az 60 olması

koşulu durumları için geçerlidir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİ

Bu tez çalışması kapsamında, sadece lif takviyesi ve/veya farklı zımbalama donatısı (kapalı etriye ve kesme kaması) olmak üzere toplam 3 farklı zımbalama önlemini (Seri I, Seri II ve Seri III) içeren ve kendiliğinden yerleşen betondan üretilen büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama performansı araştırılmıştır. Büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanlarının üretiminde kullanılacak karışımlara ait taze ve sertleşmiş özellikler, sırasıyla, EFNARC ve ASTM standartları esas alınarak incelenmiştir. Daha sonra, 1 adet lifsiz kontrol ile birlikte farklı tip (çelik ve sentetik), boyut (makro ve mikro) ve narinliklerdeki liflerin KYB'ye tekli (sadece makro çelik), ikili (makro çelik/mikro çelik veya PP) ve üçlü (makro çelik, mikro çelik ve PP) harmanlama şeklinde dâhil edilmesi ile tasarlanan 4 adet lif takviyeli olmak üzere toplam 5 adet KYB karışımı tasarlanmıştır. Her bir KYB karışımı için 2'şer adet olmak üzere toplam 30 adet 1300x1300x120 mm³ boyutlarında büyük ölçekli döşeme-kolon birleşim elemanları üretilerek test edilmiştir. Bu deneysel bulgulardan ve söz konusu bulguların istatistiksel ve analitik olarak irdelenmesinden aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

Taze Beton

- PP lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli KYB karışımlarının taze beton birim hacim ağırlığı değerleri, lifsiz kontrol karışımına kıyasla en yüksek iken, bu lif kombinasyonları için taze beton hava içeriği değerleri en düşük olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, mikro PP lifin boşlukları doldurmada ve dolayısıyla karışımların doluluğunu arttırmada mikro çelik life kıyasla daha etkili olduğu vurgulanabilir.
- İkili hibrit lif takviyeli KYB karışımlarından, daha düşük narinliğe sahip mikro çelik lif içeren karışımın, diğer tüm hibrit lif takviyeli KYB karışımlara kıyasla, çökme-yayıma çapı değeri en yüksek, T₅₀₀ değeri ise en düşük olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan, hibrit lif takviyeli KYB karışımlarında toplam lif ve mikro lif içeriği arttığında, T₅₀₀ değerleri artarken çökme-yayıma çapı değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.
- KYB karışımlarına lif takviyesinin taze KYB'nin engeller arasından geçiş yeteneğini önemli ölçüde azaltırken, lif kombinasyonunun, mikro lif tipinin ve

toplam lif miktarının, J-halkası yükseklik farkı (ΔH) üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Sertleşmiş Beton

- İkili lif hibridizasyonu durumunda KYB numunelerinin basınç dayanımının, lifsiz kontrol numunelerine kıyasla, mikro çelik liflerin karışıma dâhil edilmesi durumunda basınç dayanımı artarken, KYB karışımlarına PP lif takviyesinin ise basınç dayanımını olumsuz etkilediği görülmüştür. Diğer taraftan, üçlü hibrit lif takviyesinin, tüm lif kombinasyonlarına kıyasla, KYB numunelerinin basınç dayanımında önemli bir artışa sebep olduğu belirlenmiştir.
- PP lifinin ilave edildiği ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip KYB numunelerinin elastisite modülü değerleri, KYB karışımlarına hacimce %1 oranında tekli ve ikili hibrit olarak çelik lif dâhil edilmesine kıyasla, elastisite modülü değerlerinde azalmaya sebep olduğu bulunmuştur.
- Tüm kür yaşları için, üçlü hibrit lif takviyeli KYB numuneleri, en yüksek yarmada çekme dayanımına sahipken, en düşük yarmada çekme dayanımı ise ikili hibrit çelik lif takviyeli KYB karışımlarından elde edilmiştir.
- Tüm kür yaşları için, üçlü hibrit lif takviyeli KYB numuneleri en yüksek eğilmede çekme dayanımı ve tokluk değerlerine sahipken, ikili lif hibridizasyonu durumunda, PP lifinin kullanılmasının eğilmede çekme dayanımı ve tokluk üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
- 28 ve 90 günlük kür yaşlarında, farklı boyut ve narinlikteki liflerin sinerjisinin bir sonucu olarak ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli KYB numunelerinin dört noktalı eğilme altında sehim-sertleşmesi davranışı sergiledikleri belirlenmiş olup, tüm hibrit lif takviyeli KYB numunelerinde daha belirgin çoklu çatlak davranışı gözlemlenmiştir.
- 90 günlük PP lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli KYB numunelerinde, ölçülen ortalama çatlak sayısı tekli makro lif takviyeli numuneye kıyasla, 2 ile 2.5 kat artarken, buna bağlı olarak çatlak genişlikleri de önemli oranda azalarak, 88 μm ile 150 μm aralığında değiştiği görülmüştür. Bununla birlikte, kontrol test numunesinde ise çatlak genişliği oldukça fazla olan bir adet çatlak gelişmiştir.

Zımbalama Performansı

- Zımbalama donatısız döşeme-kolon birleşim elemanlarında (Seri I), hibrit lif takviyesi ile farklı tip ve narinlikte liflerin bir arada kullanılmasının kazandırdığı sinerji sayesinde zımbalama dayanımı açısından daha etkili olurken, üçlü hibrit lif takviyesinin en iyi performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ikili lif hibridizasyonu durumunda ise mikro çelik lif kullanımının PP life kıyasla, daha olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, bu lif hibridizasyonunun sağladığı etkili gerilme aktarımının sonucu olarak döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama yüzey alanını arttırmasına ve dolayısıyla zımbalama kesme yüzeyinin açısını azaltmasına dayandırılabilir.
- Kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında (Seri II) da en yüksek zımbalama dayanımı artışı, üçlü lif hibridizasyonu durumunda elde edilirken, ikili lif hibridizasyonu durumunda ise mikro çelik lif kullanımının PP life kıyasla, daha olumlu bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında (Seri III) en yüksek zımbalama dayanımı artışı, üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarından elde edilirken, ikili lif hibridizasyonunda ise makro çelik lif ile birlikte hem mikro çelik hem de PP lif ilavesinin benzer bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.
- TS 500 (2000) yapı şartnamesinde kirişsiz döşeme sistemlerinde zımbalama donatısının (kapalı etriye ve kesme kaması) tekli veya hibrit lif takviyesi ile birlikte kullanımının, zımbalama donatılarının ankraj dayanımını arttırmasından dolayı, döşeme kalınlığının en az 25 cm olması koşulunun azaltılarak revize edilebileceği önerilmektedir.
- Zımbalama önlemi olarak sadece tekli veya hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyesi içeren zımbalama donatısız (Seri I) döşeme-kolon birleşim elemanlarının ilk çatlak yükü, pik yük ve bu yüklere karşılık gelen açıklık ortası deplasman ve rölatif yer değiştirme değerleri, zımbalama önlemi olarak sadece zımbalama donatılı (kapalı etriye (Seri II) veya kesme kaması (Seri III)) test numunelerine kıyasla, daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bunun yanında, üçlü hibrit lif takviyeli zımbalama donatısız test numunelerinin (Seri I), zımbalama davranışı açısından en iyi performansa sahip olduğu belirlenmiştir.

- Kapalı etriye ve kesme kaması donatısı ile birlikte ikili çelik lif hibridizasyonu kullanımının, döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama davranışı açısından en uygun lif kombinasyonu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kesme kaması donatısı ile birlikte ikili çelik hibridizasyonu, tüm numuneler içerisinde en iyi zımbalama davranışı performansı sergilemiştir.
- Tüm lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında, lifsiz ve zımbalama donatısız kontrol test numunesine kıyasla, çok sayıda ve daha küçük genişlikli çoklu çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Bunun yanında, özellikle mikro çelik lif içeren ikili ve üçlü hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında dallanma şeklinde yoğun çoklu çatlak oluşumu yanında çevresel çatlakların eğilme çatlakları ile kesişimi şeklinde yoğun ızgara görünümlü bir çatlak modeli görülmüştür.
- Kapalı etriye donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında göçme modu açısından en iyi performans üçlü hibrit lif takviyeli numunelerden elde edilirken, kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında ise hem ikili hem de üçlü hibrit lif takviyeli numunelerin en iyi performansa sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Zımbalama donatısız, kapalı etriye ve kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesinde, kontrol numunelerine kıyasla, en yüksek artış hibrit lif takviyeli test numunelerinden elde edilmiştir. Ayrıca, ikili lif hibridizasyonu durumunda, hem zımbalama donatısız (Seri I) hem de kesme kaması donatılı (Seri III) numunelerde, mikro çelik lif kullanımının PP life kıyasla, daha olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenirken, kapalı etriye donatılı (Seri II) test numunelerinde ise PP lif kullanımının enerji yutma kapasitesine daha olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, hibrit lif takviyesi ile birlikte kapalı etriye kullanılmasının kesme kamasına kıyasla, enerji yutma kapasitesi üzerinde genelde daha olumlu bir katkı sağladığı belirlenmiştir.
- Herhangi bir zımbalama donatısı kullanmadan döşeme-kolon birleşim elemanlarının enerji yutma kapasitesini arttırmak için hibrit (ikili ve üçlü) lif takviyesinin en iyi önlem olarak kullanılabileceği bulunmuştur. Böylece, deprem açısından riskli bölgelerde kirişsiz döşeme sistemlerinin enerji yutma kapasitesini arttırmak açısından hibrit lif takviyesinin önemli bir avantaj sağlayacağı açıktır.

- Zımbalama donatısız, kapalı etriye ve kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarının süneklik indeksinde, kontrol numunelerine kıyasla, en yüksek artış hibrit lif takviyeli test numunelerinden elde edilmiştir. Ayrıca, zımbalama donatısız numunelerde, ikili lif hibridizasyonu durumunda mikro çelik lif kullanımının PP life kıyasla, daha olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenirken, kapalı etriye ve kesme kaması donatılı döşeme-kolon birleşim elemanlarında ise PP lif kullanımının süneklik indeksinde artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan, hibrit lif takviyesi ile birlikte kesme kaması kullanılmasının kapalı etriyeye kıyasla, süneklik indeksi üzerinde genelde daha olumlu bir katkı sağladığı belirlenmiştir.
- İnovatif hibrit lif takviyeli KYB'nin kirişsiz döşeme sistemlerinde kullanılması durumunda, zımbalama dayanımı, enerji yutma kapasitesi ve süneklik indeksi değerleri açısından en uygun mikro lif tipi seçimi ve optimum makro/mikro lif oranlarının belirlenmesinde, uygulamadaki tasarımcı mühendisler ve araştırmacılar için diyagramlar geliştirilmiştir.
- Farklı zımbalama donatıları (kapalı etriye ve kesme kaması) ile birlikte hibrit lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak üretilen döşeme-kolon birleşim elemanlarının zımbalama dayanımını tahmin etmek için ampirik formüller geliştirilerek, yapı şartnamelerinde (TS 500, ACI 318-19 ve BS8110) yer alan zımbalama dayanımı kapasitesi ifadelerine katsayılar önerilmiştir. Bu doğrultuda, TS 500 şartnamesinde bulunan mevcut zımbalama dayanımı ifadesinin, zımbalama donatısız, kapalı etriye ve kesme kaması donatılı hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında sırasıyla, 1.31, 1.48 ve 1.72 katsayıları ile çarpılması önerilmektedir. Ayrıca, bu katsayılar, ACI 318-19 şartnamesinde yer alan zımbalama dayanımı tasarımı ifadesi için zımbalama donatısız, kapalı etriye ve kesme kaması donatılı hibrit lif takviyeli döşeme-kolon birleşim elemanlarında sırasıyla, 1.39, 1.57 ve 1.82 ve BS8110 için ise 1.31, 1.47 ve 1.67 olarak tavsiye edilmektedir.
- Tüm bunlara ek olarak, geleneksel betonda yeterli yerleştirme ve sıkıştırmanın sağlanması için vibrasyon uygulama gerekliliğinin liflerin üniform dağılımı üzerindeki olumsuz bir etki oluşturacağı açıktır. Bu bağlamda, herhangi bir dış müdahale olmadan kendi ağırlığı altında yerleşebilen KYB'ye hibrit lif takviyesinin daha iyi bir zımbalama performansı sağlayacağı sonucuna varılabilir.

Yapı şartnamelerinde zımbalama donatılı kirişsiz döşeme sistemlerinde yer alan döşeme kalınlığı sınırının kesin olarak belirlenmesi açısından özellikle farklı döşeme kalınlığı, zımbalama donatısı, hibrit lif takviyesi ve beton tipi (geleneksel ve KYB) değişkenlerini esas alan bir çalışmanın yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Aboutair, A., Chaid, R., & Molez, L. (2020). Physico-mechanical and microstructural characterization of concretes ultra-high performance matrix fiber. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(12), 2032–2045.
- Abu-Lebdeh, T., Hamoush, S., Heard, W., & Zornig, B. (2011). Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites. *Construction and Building Materials*, 25(1), 39–46.
- ACI Committee, (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). In *American Concrete Institute*.
- Afroz, M., Venkatesan, S., & Patnaikuni, I. (2019). Effects of hybrid fibers on the development of high volume fly ash cement composite. *Construction and Building Materials*, 215, 984–997.
- Akçay, B. (2012). Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete. *Composites Part B*, 43(2), 766–778.
- Alvarado, Y. A., Torres, B., Buitrago, M., Ruiz, D. M., Torres, S. Y., & Álvarez, R. A. (2022). Dynamic punching shear tests of flat slab-column joints with 5D steel fibers. *Structural Engineering and Mechanics*, 81(3), 281–292.
- ASTM C 138 / C138M-12 (2012). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Aslani, F., Hamidi, F., Valizadeh, A., & Dang, A. T. N. (2020). High-performance fibre-reinforced heavyweight self-compacting concrete: Analysis of fresh and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 232.
- ASTM C1018-97 (1997). Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C78 (2002). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with. In *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

- ASTM C 1609/C 1609M-05 (2005). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 496/C 496M (2011). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C39 (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1611/C1611M-18 (2018). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C469-02 (2002). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618 (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Banthia, N., & Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366–1372.
- Barros, J. A. O., Moraes Neto, B. N., Melo, G. S. S. A., & Frazão, C. M. V. (2015). Assessment of the effectiveness of steel fibre reinforcement for the punching resistance of flat slabs by experimental research and design approach. *Composites Part B: Engineering*, 78, 8–25.
- Bassurucu, M., & Turk, K. (2019). Effect of curing regimes on the engineering properties of hybrid fiber reinforced concrete. *The International Journal of Energy & Engineering Sciences*, 4(2), 26–42.
- Bassurucu, M., & Turk, K. (2022). An experimental and statistical investigation on the fresh and hardened properties of HFR-SCC: the effect of micro fibre type and fibre hybridization. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1–25.
- Bentur, A. (1989). Fiber-reinforced cementitious materials. In J. Skalny (Ed.), *Material Science of Concrete*. The American Ceramic Society.

- Binici, B., & Bayrak, O. (2005). Upgrading of slab-column connections using fiber reinforced polymers. *Engineering Structures*, 27(1), 97–107.
- British Standards Institution (1997). *Structural use of concrete — Part 1: Code of practice for design and construction - BS 8110-1: 1997*. London.
- Bursać, S., Bešević, M., Vojnić Purčar, M., Kozarić, L., & Đurić, N. (2021). Experimental analysis of punching shear strength of eccentrically loaded slab with the opening along the face of the internal column. *Engineering Structures*, 249, 1–9.
- Caratelli, A., Imperatore, S., Meda, A., & Rinaldi, Z. (2016). Punching shear behavior of lightweight fiber reinforced concrete slabs. *Composites Part B: Engineering*, 99, 257–265.
- Carpenter, J. E., Karr, P. H., & Hanson, N. W. (1970). Proposed Revision of ACI 318-63 Building Code Requirements for Reinforced Concrete. *Journal of American Concrete Institute*, 68, 696–697.
- Celik, Z., & Bingol, A. F. (2020). Mechanical properties and postcracking behavior of self-compacting fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, 21, 2124–2133.
- Chen, B., & Liu, J. (2005). Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 913–917.
- Chen, C. C., Giduquio, M. B., Liu Chang, S. C., & Cheng, M. Y. (2020). Punching shear capacity of RC slab-CFT column connections. *Engineering Structures*, 218, 1–8.
- Cheng, M.-Y., Parra-Montesinos, G. J., & Shield, C. K. (2010). Shear Strength and Drift Capacity of Fiber-Reinforced Concrete Slab-Column Connections Subjected to Biaxial Displacements. *Journal of Structural Engineering*, 136(9), 1078–1088.
- Chetchotisak, P., Ruengpim, P., Chetchotsak, D., & Yindeesuk, S. (2018). Punching Shear Strengths of RC Slab-Column Connections: Prediction and Reliability. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(8), 3066–3076.
- Chu, S. H., Li, L. G., & Kwan, A. K. H. (2018). Fibre factors governing the fresh and hardened properties of steel FRC. *Construction and Building Materials*, 186, 1228–1238.

- Çıtıptıoğlu, E., Tankut, T., & Altın, S. (1999). Yeni Bir Zımbalama Donatısı. *Türkiye İnşaat Mühendisliği XV. Teknik Kongresi*, 255,272.
- Cohn, M. Z., & Bartlett, M. (1982). Computer-Simulated Flexural Tests of Partially Prestressed Concrete Sections. *Journal of the Structural Division*, 108(ST12), 2747–2765.
- Dawood, E. T., & Hamad, A. J. (2015). Toughness behaviour of high-performance lightweight foamed concrete reinforced with hybrid fibres. *Structural Concrete*, 16(4), 496–507.
- Deng, Z., Daud, J. R., & Gao, L. (2017). Flexural toughness performance of hybrid fiber-reinforced RPC. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(1), 279–288.
- Ding, Y., Zeng, W., Wang, Q., & Zhang, Y. (2020). Topographical analysis of fractured surface roughness of macro fiber reinforced concrete and its correlation with flexural toughness. *Construction and Building Materials*, 235.
- EFNARC (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. *Report from EFNARC*, European project group, UK.
- EFNARC (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete*.
- Einpaul, J., Brantschen, F., Fernández Ruiz, M., & Muttoni, A. (2016). Performance of punching shear reinforcement under gravity loading: Influence of type and detailing. *ACI Structural Journal*, 113(4), 827–838.
- Elsayed, M., Tayeh, B. A., Mohamed, M., Elymany, M., & Mansi, A. H. (2021). Punching shear behaviour of RC flat slabs incorporating recycled coarse aggregates and crumb rubber. *Journal of Building Engineering*, 44.
- Ersoy, U., Erdoğan, T., & Tankut, T. (1981). *Investigation Report on the Failure of ASELSAN Building Submitted to Court*.
- Ersoy, Uğur, & Özcebe, G. (2001). *Betonarme*. Evrim Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- Fanella, D. A., & Naaman, A. E. (1985). Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression. *Journal of the American Concrete Institute*, 82(4), 475–483.

- Faridmehr, I., Nehdi, M. L., & Hajmohammadian Baghban, M. (2022). Novel informational bat-ANN model for predicting punching shear of RC flat slabs without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 256, 1–16.
- Felekoğlu, B., Tosun, K., & Baradan, B. (2009). Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites. *Cement and Concrete Research*.
- fib (2013). fib Model Code for Concrete Structures 2010. In *fib Model Code for Concrete Structures 2010*.
- Gardner, N. J., Huh, J., & Chung, L. (2002). Lessons from the Sampoong department store collapse. *Cement and Concrete Composites*, 24(6), 523–529.
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Muhyaddin, G. F., & Asaad, D. S. (2016). Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: Effect of fiber type and concentration. *Composites Part B: Engineering*, 103, 74–83.
- Gouveia, N. D., Fernandes, N. A. G., Faria, D. M. V., Ramos, A. M. P., & Lúcio, V. J. G. (2014). SFRC flat slabs punching behaviour - Experimental research. *Composites Part B: Engineering*, 63, 161–171.
- Gouveia, N. D., Lapi, M., Orlando, M., Faria, D. M. V., & Ramos, A. M. P. (2018). Experimental and theoretical evaluation of punching strength of steel fiber reinforced concrete slabs. *Structural Concrete*, 19(1), 217–229.
- Grimaldi, A., Meda, A., & Rinaldi, Z. (2013). Experimental behaviour of fibre reinforced concrete bridge decks subjected to punching shear. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 811–820.
- Haddadou, N., Chaid, R., Ghernouti, Y., & Adjou, N. (2014). The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete. *J. Build. Mater. Struct*, 1, 65–76.
- Hamad, B. S., Harajli, M. H., & Jumaa, G. (2001). Effect of fiber reinforcement on bond strength of tension lap splices in high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, 98(5), 638–647.
- Hannant, D. (1987). *Fiber Cements and Fiber Concrete*. Wiley.

- Harajli, M. H., Maalouf, D., & Khatib, H. (1995). Effect of fibers on the punching shear strength of slab-column connections. *Cement and Concrete Composites*, 17(2), 161–170.
- Husain, M., Eisa, A. S., & Roshdy, R. (2017). Alternatives to Enhance Flat Slab Ductility. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 161–169.
- Jabbour, R., Assaad, J. J., & Hamad, B. (2021). Cost-to-performance assessment of polyvinyl alcohol fibers in concrete structures. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 0(0), 1–20.
- Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., & Koh, K. T. (2011). Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4144–4155.
- Kim, D. joo, Naaman, A. E., & El-Tawil, S. (2008). Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*.
- Kina, C., & Turk, K. (2021). Bond strength of reinforcing bars in hybrid fiber-reinforced SCC with binary, ternary and quaternary blends of steel and PVA fibers. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 54(4).
- Landler, J., & Fischer, O. (2021). Durchstanztragverhalten stahlfaserverstärkter Flachdecken mit Durchstanzbewehrung. *Beton- Und Stahlbetonbau*, 116(5), 348–359.
- Lee, J.-H., Yoon, Y.-S., Lee, S.-H., Cook, W. D., & Mitchell, D. (2008). Enhancing Performance of Slab-Column Connections. *Journal of Structural Engineering*, 134(3), 448–457.
- Li, V. C., Wang, S., & Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Materials Journal*, 98(6), 483–492.
- Liu, X., Wu, T., Yang, X., & Wei, H. (2019). Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 226, 388–398.
- Mahapatra, C. K., & Barai, S. V. (2018). Hybrid fiber reinforced self compacting concrete with fly ash and colloidal nano silica: A systematic study. *Construction and Building Materials*, 160, 828–838.

- Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. H., & Hosseinpour, I. (2011). The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(1), 351–358.
- Mitchell, D., Tinawi, R., & Redwood, R. G. (1990). Damage to buildings due to the 1989 Loma Prieta earthquake - a Canadian code perspective. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(5), 813–834.
- Mobasher, B., & Li, C. Y. (1996). Mechanical properties of hybrid cement-based composites. *ACI Materials Journal*, 93(3), 284–292.
- Naaman AE, R. H. W. (1995). Characterization of high performance fiber reinforced cement composites. *Proceedings of the Second International RILEM Workshop USA*, 1–24.
- Nassif, N., Zeiada, W., Al-Khateeb, G., Haridy, S., & Altoubat, S. (2022). Assessment of Punching Shear Strength of Fiber-reinforced Concrete Flat Slabs Using Factorial Design of Experiments. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 16(1), 139–154.
- Neves, R. D., & Fernandes de Almeida, J. C. O. (2005). Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Structural Concrete*, 6(1), 1–8.
- Nguyen-Minh, L., Rovňák, M., Tran-Quoc, T., & Nguyen-Kim, K. (2011). Punching shear resistance of steel fiber reinforced concrete flat slabs. *Procedia Engineering*, 14, 1830–1837.
- Nguyen-Minh, Long, Rovňák, M., Tran-Ngoc, T., & Le-Phuoc, T. (2012). Punching shear resistance of post-tensioned steel fiber reinforced concrete flat plates. *Engineering Structures*, 45, 324–337.
- Nguyen-Minh, Long, Rovňák, M., & Tran-Quoc, T. (2012). Punching Shear Capacity of Interior SFRC Slab-Column Connections. *Journal of Structural Engineering*, 138(5), 613–624.
- Nguyen, D. L., Kim, D. J., Ryu, G. S., & Koh, K. T. (2013). Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1104–1116.
- Nguyen, T. N., Nguyen, T. T., & Pansuk, W. (2017). Experimental study of the punching shear behavior of high performance steel fiber reinforced concrete slabs considering casting directions. *Engineering Structures*, 131, 564–573.

- Niu, J., Bian, Y., & Zuo, F. (2020). Study on the seismic performance of high-performance polypropylene fiber-reinforced lightweight aggregate concrete columns. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1–19.
- Okamura, H. (1997). Self-Compacting High-Performance Concrete. *Concrete International*, 19(7).
- Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M., & Okamura, H. (1989). Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures. *Proceeding of the Second East - Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC - 2)*, 1, 445–450.
- Özden, Ş. (1998). *Punching Behavior of Normal and High-Strength Concrete Flat-Plates*. Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Ozden, S., Ersoy, U., & Ozturan, T. (2006). Punching shear tests of normal- and high-strength concrete flat plates. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(11), 1389–1400.
- Öztekin, E. (2019). *Karma çelik lif içeren kendiliğinden yerleşen betonun kesme davranışının incelenmesi*. İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye.
- Park, T. W. (2012). Inspection of collapse cause of Sampoong Department Store. *Forensic Science International*, 217(1–3), 119–126.
- Pérez Caldentey, A., Padilla Lavaselli, P., Corres Peiretti, H., & Ariñez Fernández, F. (2013). Influence of stirrup detailing on punching shear strength of flat slabs. *Engineering Structures*, 49, 855–865.
- Rashiddadash, P., Ramezani pour, A. A., & Mahdikhani, M. (2014). Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice. *Construction and Building Materials*, 51, 313–320.
- Rizk, E., Marzouk, H., Hussein, A., & Hossin, M. (2011). Effect of reinforcement ratio on punching capacity of RC plates. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(7), 729–740.
- Rossi, P., Acker, P., & Malier, Y. (1987). Effect of steel fibres at two different stages: The material and the structure. *Materials and Structures*, 20(6), 436–439.

- Saatci, S., Yaşayanlar, S., Yaşayanlar, Y., & Batarlar, B. (2019). Çelik Fiber Katkısının Farklı Boyuna Donatı Oranına Sahip Betonarme Döşemelerin Zımbalama Davranışı Üzerinde Etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 1045–1059.
- Sağlam, A. R. (2000). Süperakışkanlaştırıcı ve viskozite arttırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi, *Sika Teknik Bülten*, 2000/4, 9-16.
- Sahmaran, M., Li, M., & Li, V. C. (2007). Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Materials Journal*, 104(6), 604–611.
- Şahmaran, M., & Li, V. C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1033–1043.
- Sahmaran, M., & Yaman, I. O. (2007). Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Construction and Building Materials*, 21(1), 150–156.
- Sahmaran, M., Yurtseven, A., & Ozgur Yaman, I. (2005). Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. *Building and Environment*, 40(12), 1672–1677.
- Sahoo, D. R., Maran, K., & Kumar, A. (2015). Effect of steel and synthetic fibers on shear strength of RC beams without shear stirrups. *Construction and Building Materials*, 83, 150–158.
- Sermet, F., & Ozdemir, A. (2016). Investigation of Punching Behaviour of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Slabs under Normal Load. *Procedia Engineering*, 161, 458–465.
- Shin, H. O., Yoon, Y. S., & Mitchell, D. (2017). Axial load transfer in non-slender ultra-high-strength concrete columns through normal-strength concrete floor slabs. *Engineering Structures*, 136, 466–480.
- Simões, T., Octávio, C., Valença, J., Costa, H., Dias-da-Costa, D., & Júlio, E. (2017). Influence of concrete strength and steel fibre geometry on the fibre/matrix interface. *Composites Part B: Engineering*, 122, 156–164.
- Sine, A., Pimental, M., & Nunes, S. (2022). Experimental investigation on punching shear behaviour of RC-(R)UHPFRC composite flat slabs without transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 255, 1–16.

- Singh, N. K., & Rai, B. (2021). Assessment of synergetic effect on microscopic and mechanical properties of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, 22(1), 516–534.
- Smadi, M. M., & Bani Yasin, I. S. (2008). Behavior of high-strength fibrous concrete slab-column connections under gravity and lateral loads. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1863–1873.
- Sonebi, M. (2004). Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete Research*, 34, 1199–1208.
- Swamy, R. N., & Ali, S. A. R. (1982). Punching Shear Behavior of Reinforced Slab-Column Connections Made With Steel Fiber Concrete. *ACI Structural Journal*, 79(5), 392–406.
- Teixeira, M. D. E., Barros, J. A. O., Cunha, V. M. C. F., Moraes-Neto, B. N., & Ventura-Gouveia, A. (2015). Numerical simulation of the punching shear behaviour of self-compacting fibre reinforced flat slabs. *Construction and Building Materials*, 74, 25–36.
- Topçu, İ. B., Enes Demirel, O., & Uygunoğlu, T. (2017). Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. *Journal of Polytechnic*, 20(1), 91–96.
- Truong, G. T., Choi, K. K., & Kim, C. S. (2022). Punching shear strength of interior concrete slab-column connections reinforced with FRP flexural and shear reinforcement. *Journal of Building Engineering*, 46, 1–22.
- TS 500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. *TS Standardı, Ankara*.
- TS 706 EN 12620 (2003). Beton Agregaları. *TS Standardı, Ankara*.
- TS 708 (2010). Betonarme için Donatı Çeliği. *Türk Standardı, Ankara*.
- Turk, K. (2012). Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 37, 326–334.
- Turk, K., & Bassurucu, M. (2021). Bond strength of full-scale beams with blended short and long steel fiber. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(3), 274–280.

- Turk, K., Bassurucu, M., & Bitkin, R. E. (2021). Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber. *Construction and Building Materials*, 266, 120944.
- Turk, K., Karatas, M., & Ulucan, Z. C. (2010). Effect of the use of different types and dosages of mineral additions on the bond strength of lap-spliced bars in self-compacting concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 43(4), 557–570.
- Turk, K., & Kina, C. (2018). Freeze-thaw resistance and sorptivity of self-compacting mortar with ternary blends. *Computers and Concrete*, 21(2), 149–156.
- Türk, K., & Kına, C. (2017). Çimento Esaslı Kompozitlerde Karma Lif Kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 671–678.
- Turk, K., Oztekin, E., & Kina, C. (2019). Self-compacting concrete with blended short and long fibres: experimental investigation on the role of fibre blend proportion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Valcuende, M., Parra, C., & Benlloch, J. (2005). Permeability, porosity and compressive strength of self-compacting concretes. *Mater Construcc*, 55(280), 17–25.
- Vikram, J., & Sekar, K. (2016). Punching of slag based concrete incorporating polymeric and nonpolymeric fibres. *Polymers and Polymer Composites*, 24(7), 573–578.
- Vollum, R. L., Abdel-Fattah, T., Eder, M., & Elghazouli, A. Y. (2010). Design of ACI-type punching shear reinforcement to Eurocode 2. *Magazine of Concrete Research*, 62(1), 3–16.
- Won, J. P., Hong, B. T., Lee, S. J., & Choi, S. J. (2013). Bonding properties of amorphous micro-steel fibre-reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 102, 101–109.
- Xiao, J., Wang, W., Zhou, Z., & Tawana, M. M. (2019). Punching shear behavior of recycled aggregate concrete slabs with and without steel fibres. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(3), 725–740.
- Yağmur, E. (2020). Elastic Modulus Prediction for Fiber-Reinforced Concretes. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(6), 1098–1109.

- Yazicioglu, S., Caliskan, S., & Turk, K. (2006). Effect of curing conditions on the engineering properties of Fiber Reinforced Concrete. In *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* (Vol. 13, Issue 1).
- Yoo, D. Y., Kim, S. W., & Park, J. J. (2017). Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers. *Construction and Building Materials*, 132, 219–229.
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2015). Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*, 79, 273–282.
- Zhang, W. X., Li, B., Hwang, H. J., Zhang, J. Y., Xiao, L. J., Yi, W. jian, & Park, H. G. (2019). Punching shear strength of reinforced concrete column footings under eccentric compression: Experiment and analysis. *Engineering Structures*, 198, 1–19.
- Zhou, F. P., Lydon, F. D., & Barr, B. I. G. (1995). Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 177–186.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mahmut BAŞSÜRÜCÜ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2013, Mustafa Kemal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2013-2018: Öğretim Görevlisi, İnönü Üniversitesi, Darende Bekir Ilıcak MYO, İnşaat Bölümü.
- 2018-Devam Ediyor: Öğretim Görevlisi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Darende Bekir Ilıcak MYO, İnşaat Bölümü.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- **Bassurucu, M., & Turk, K. (2022)**. An experimental and statistical investigation on the fresh and hardened properties of HFR-SCC: the effect of micro fibre type and fibre hybridization. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-25, <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2042396>, (Early Access).

ULUSLARARASI HAKEMLİ DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER

- **Turk, K., & Bassurucu, M. (2022)**. An investigation on the effect of hybrid fiber reinforced on the flexural behavior of RC beams having different lap-spliced lengths. *Structural Concrete*, 10.1002/suco.202200106, (Early Access).
- **Turk, K., Bassurucu, M., & Bitkin R. E. (2021)**. Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber. *Construction and Building Materials*, 266(A), 120944.
- **Turk, K., & Bassurucu, M. (2021)**. Uzun ve kısa çelik lif takviyeli tam ölçekli kirişlerin aderans dayanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 274-280.
- **Turk, K., & Bassurucu, M., & Oztekin E. (2021)**. Investigation of shear strength of SCC beams with hybrid fiber as experimental and statistical. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, (In Press).
- **Bassurucu, M., & Turk, K. (2019)**. Effect of curing regimes on the engineering properties of hybrid fiber reinforced concrete. *The International Journal of Energy and Engineering Sciences*, 4(2), 26-42.

ULUSAL HAKEMLİ DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER

- **Başsürücü, M., & Türker, H. (2013).** Profillenmiş çelik sac beton kompozit döşeme sistemlerinin boyuna kayma dayanımının deneysel olarak belirlenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2(1), 17-26.

ULUSLARARASI BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN BİLDİRİLER

- **Bassurucu, M., & Turk, K. (2021).** The effect of fiber hybridization on the splice length of tensile reinforcing bars in conventional concrete. 14th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2020-21), (pp. 912-919).
- **Turk, K., & Bassurucu, M. (2019).** Effect of curing conditions on the mechanical properties of conventional concrete with hybrid fiber. 4th International Energy Engineering Congress, (pp. 244-257).
- **Turk, K., & Bassurucu, M. (2017).** The effect of Darende limestone powder on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17), (pp. 1561-1567).

ULUSAL BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN BİLDİRİLER

- **Türker, H., & Başsürücü, M. (2013).** Profillenmiş çelik sac beton kompozit döşeme sistemlerinin taşıma gücünün deneysel incelenmesi. 5. Çelik Yapılar Sempozyumu (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum).
- **Türker, H., & Başsürücü, M. (2013).** Kompozit döşeme sistemlerinin boyuna kayma dayanımının deneysel olarak belirlenmesi. Ulusal Yapı Mekaniği Laboratuvarları 4. Toplantısı (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum).

PROJE ÇALIŞMALARI

- Kâzım Türk (Proje Yürütücüsü) ve Mahmut Başsürücü (Araştırmacı), Kendiliğinden yerleşen karma lif takviyeli betondan üretilen döşeme-kolon birleşim elemanlarında zımbalama kesme dayanımının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, 22/10/2019- (Devam Ediyor).
- Kâzım Türk (Proje Yürütücüsü) ve Mahmut Başsürücü (Araştırmacı), Büyük ölçekli betonarme kirişlerde bindirme boyu üzerinde karma lif etkisinin incelenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, 14/09/2017 - 23/07/2020.
- Hakan Türker (Proje Yürütücüsü) ve Mahmut Başsürücü (Bursiyer), Profillenmiş çelik sac beton kompozit döşeme sistemlerinin taşıma kapasitesinin deneysel ve teorik olarak belirlenmesi, TÜBİTAK Projesi, 01/02/2012 - 01/02/2013.

ÖDÜLLER

- Mühendislik Fakültesi Birinciliği (2010).
- İnşaat Mühendisliği Bölüm Birinciliği (2010).

