

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

**ÇELİK LİFLİ KYB İLE ÜRETİLEN V-ŞEKİLLİ BETONARME KATLANMIŞ
PLAK ELEMANLARIN KALINLIĞI ÜZERİNDE FARKLI LİF
KOMBİNASYONUNUN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metin KATLAV

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

NİSAN-2022

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

**ÇELİK LİFLİ KYB İLE ÜRETİLEN V-ŞEKİLLİ BETONARME KATLANMIŞ
PLAK ELEMANLARIN KALINLIĞI ÜZERİNDE FARKLI LİF
KOMBİNASYONUNUN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Metin KATLAV
(36193621015)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kâzım TÜRK
Eş Danışman: Prof. Dr. Paki TURĞUT**

NİSAN-2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında benden hiçbir yardımını esirgemeyen, bilgi ve deneyimi ile yanımda olan ve kıymetli vaktini ayırarak beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kâzım TÜRK'e,

Çalışma sürecinde bana her konuda yardımcı olan ve karşılaştığımız tüm olumsuzlukları bilgi ve deneyimi sayesinde aşmamızı sağlayan eş danışman hocam Sayın Prof. Dr. Paki TURĞUT'a,

Çalışmanın ilerlemesinde katkısı olan değerli arkadaşım Mohammad Aqbal AZİZ ve TÜBİTAK STAR bursiyerlerimiz Hamza ATEŞ ve Nezir DOĞAN'a,

Bu günlere gelmemde en büyük motivasyon kaynağım ve destekçim olan başta annem, babam ve kardeşlerim olmak üzere tüm aile fertlerime

teşekkür ederim.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1002 Hızlı destek Programı (MAG-121M024) ve İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi (FYL-2020-2298) tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve deneysel çalışmalar için sağladıkları desteklerden dolayı SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye teşekkürü borç bilirim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Çelik Lifli KYB ile Üretilen V-Şekilli Betonarme Katlanmış Plak Elemanların Kalınlığı Üzerinde Farklı Lif Kombinasyonunun Etkisi” 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.

İnş. Müh. Metin KATLAV



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	viii
ÖZET.....	1
ABSTRACT	2
1. GİRİŞ.....	3
1.1 Tezin Özgünlüğü	6
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	7
2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)	7
2.1.1 KYB tasarımı.....	8
2.1.2 KYB reolojisi.....	11
2.1.3 İşlenebilirlik testleri.....	12
2.1.3.1 Çökme-yayılma deneyi.....	13
2.1.3.2 J-halkası deneyi	16
2.1.3.3 V-hunisi deneyi	17
2.2 Lif Takviyeli Betonlar	18
2.2.1 Liflerin kullanım şekilleri.....	23
2.2.1.1 Tek tip lif takviyeli beton	23
2.2.1.2 Karma lif takviyeli beton.....	23
2.3 Katlanmış Plaklar	27
2.3.1 Katlanmış plaklar ve çalışma prensipleri	27
2.3.2 Betonarme katlanmış plakların kiriş ve döşemelerle karşılaştırılması	29
2.3.3 Katlanmış plakların malzeme bakımından karşılaştırılması.....	31
2.4 Geleneksel ve Lif Takviyeli Betonarme Kirişlerin Tasarım Yöntemlerine Göre Moment Taşıma Kapasitelerinin Hesaplanması	36
2.4.1 Geleneksel betondan üretilen çift donatılı betonarme kirişlerin moment taşıma kapasitesi	37
2.4.2 Lif takviyeli geleneksel betondan üretilen betonarme kirişlerin moment taşıma kapasitesi	39
2.4.3 Lif takviyeli KYB'den üretilen V-şekilli betonarme katlanmış plakların moment taşıma kapasitesi.....	41
3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE YÖNTEM	42
3.1 Malzemeler	42
3.1.1 Çimento	42
3.1.2 Uçuşu kül.....	42
3.1.3 Agregası	43
3.1.4 Kimyasal katkı.....	43
3.1.5 Karışım suyu.....	44
3.1.6 Donatı	44
3.1.7 Lifler	45
3.2 Karışımların tasarımı ve oranları.....	45
3.2.1 Taze KYB karışımlarının hazırlanması	47
3.3 Taze Beton Deneyleri	49
3.3.1 Çökme-yayılma ve T ₅₀₀ deneyi	49

3.3.2 J-halkası deneyi	50
3.3.3 V-hunisi deneyi	51
3.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri	52
3.4.1 Basınç dayanımı	52
3.4.2 Yarmada çekme dayanımı	53
3.4.3 Dört noktalı eğilmede çekme dayanımı deneyi	54
3.5 Büyük Ölçekli V-Şekilli Betonarme Katlanmış Plakların Üretimi ve Test Düzenegi	56
3.5.1 Numunelerin üretimi	56
3.5.2 Test düzenegi	63
3.5.3 V-şekilli betonarme katlanmış plakların eğilme performansının değerlendirilmesi	65
3.6 V-Şekilli Betonarme Katlanmış Plakların Moment Taşıma Kapasitesinin Hesabı	66
4. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA	69
4.1 Taze Beton Deneylerine Ait Bulgular	69
4.1.1 Çökme-yayıma ve T_{500} deneyi	69
4.1.2 J-halkası deneyi	71
4.1.3 V-hunisi deneyi	73
4.2 Sertleşmiş Beton Deneylerine Ait Bulgular	75
4.2.1 Basınç dayanımı	75
4.2.2 Yarmada çekme dayanımı	76
4.2.3 Eğilmede çekme dayanımı	77
4.3 Büyük Ölçekli V-Şekilli Betonarme Katlanmış Plakların Eğilme Yükleme Altındaki Davranışı	80
4.3.1 V-şekilli betonarme katlanmış plakların eğilme performansı	80
4.3.2 V-şekilli betonarme katlanmış plakların yük-sehim eğrileri	81
4.3.3 V-şekilli betonarme katlanmış plakların tokluk ve sünekliği	84
4.3.4 V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlak modelleri	87
4.3.5 V-şekilli betonarme katlanmış plakların moment taşıma kapasitesinin analitik hesabı	92
5. SONUÇLAR	96
KAYNAKÇA	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: EFNARC tarafından önerilen karışım oranları	9
Çizelge 2.2: EFNARC (2002)'in önerdiği işlenebilirlik test yöntemleri ve belirlenen karakteristik özellikler	13
Çizelge 2.3: EFNARC (2005)'e göre yayılma çapı sınıfları	14
Çizelge 2.4: KYB karışımlarının stabilite durumlarına göre VSI tanımlaması	15
Çizelge 2.5: EFNARC (2005)'e göre V-hunisi akış süresi sınıfları	17
Çizelge 2.6: EFNARC'ın farklı elemanlar için önerdiği KYB sınıfları	18
Çizelge 2.7: Betonda yaygın kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri	21
Çizelge 2.8: Korumasız yapı malzemelerinin yangındaki performansı	33
Çizelge 3.1: Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler	42
Çizelge 3.2: Uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler	42
Çizelge 3.3: Donatının mekanik özellikleri	44
Çizelge 3.4: Çalışmada kullanılacak liflerin özellikleri	45
Çizelge 3.5: Karışım oranları (kg/m^3)	46
Çizelge 4.1: Karışımlara ait işlenebilirlik test sonuçları	69
Çizelge 4.2: KYB karışımlarına ait mekanik özellikler	75
Çizelge 4.3: V-şekilli betonarme katlanmış plakların dört noktalı eğilme yüklenmesinden ve beton dayanım testlerinden elde edilen bulgular	80
Çizelge 4.4: Tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait tokluk ve süneklik indeksi değerleri	84
Çizelge 4.5: Deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması	93

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Taze haldeki KYB'nin üç temel özelliği için tasarımda alınacak önlemler	8
Şekil 2.2: Geleneksel beton ve KYB'nin karışım oranları.....	10
Şekil 2.3: Amaca uygun bir KYB karışımının elde edilebilmesi için temel yöntem.....	11
Şekil 2.4: Bingham modeline ait parametreler.....	12
Şekil 2.5: Çökme-yayıma test aparatları ve boyutları.....	14
Şekil 2.6: VSI değerlerinin tanımlanması	15
Şekil 2.7: J-halkası test aparatları ve boyutları	16
Şekil 2.8: V-hunisi ait test aparatı ve boyutları.....	17
Şekil 2.9: Lif takviyesinin betonun özelliklerinde sağladığı artış.....	19
Şekil 2.10: Lif takviyeli betonların kullanım gerekçeleri	20
Şekil 2.11: Liflerin serbest suyu azaltma etkisi	22
Şekil 2.12: Karma lif takviyeli kırışte lif ve çatlak gösterimi	26
Şekil 2.13: Trapez ve kavisli katlanmış plak kesitleri.....	27
Şekil 2.14: Katlanmış plak elemanları	28
Şekil 2.15: Katlanmış plakların çalışma prensibi.....	28
Şekil 2.16: Betonarme katlanmış plakların uzay kiriş olarak çalışması.....	29
Şekil 2.17: Katlanmış plak ve döşemelerin karşılaştırılması	30
Şekil 2.18: Betonarme döşeme ve katlanmış plakların hesap açıklığı.....	31
Şekil 2.19: Galvani Pili	32
Şekil 2.20: Katlanmış ve kavisli plak elemanların yük-sehim eğrileri (Stark ve diğ., 2017)	35
Şekil 2.21: Betonarme kirişlerin şekil değiştirme ve gerilme diyagramları.....	37
Şekil 2.22: Lif takviyeli betonarme kirişlerin tasarıma esas şekil değiştirme ve gerilme diyagramları.....	40
Şekil 3.1: Agregası karışım granülometri eğrisi ile TS 802 sınır eğrileri.....	43
Şekil 3.2: Donatı çekme deneyi	44
Şekil 3.3: Çalışmada kullanılacak lif görselleri; a) Mikro lif b) Makro lif.....	45
Şekil 3.4: Karışımların hazırlanmasında takip edilen adımlar	47
Şekil 3.5: Karışımlara uygulanan taze ve sertleşmiş beton deneyler	48
Şekil 3.6: Çökme-yayıma deney düzeneği.....	49
Şekil 3.7: Çökme-yayıma deneyi	50
Şekil 3.8: J-halkası deney düzeneği	50
Şekil 3.9: J-halkası deneyi	51
Şekil 3.10: V-hunisi deneyi.....	52
Şekil 3.11: Deney numunesi boyutları ve basınç dayanımı deneyi	53
Şekil 3.12: Deney numunesi boyutları ve yarmada çekme dayanımı deneyi	54
Şekil 3.13: Test numunesi ve düzeneği.....	55
Şekil 3.14: Dört noktalı eğilme altında oluşan kesme ve moment diyagramları	55
Şekil 3.15: V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için kalınlığı ayarlanabilen bir döküm çelik kalıp sistemi	57
Şekil 3.16: V-şekilli betonarme katlanmış plakların donatılarının hazırlanması.....	58
Şekil 3.17: V-şekilli betonarme katlanmış plakların beton dökümü.....	59
Şekil 3.18: V-şekilli betonarme katlanmış plakların çelik kalıptan çıkarılma adımları.....	61
Şekil 3.19: V-şekilli betonarme katlanmış plakların kür işlemi.....	62
Şekil 3.20: V-şekilli betonarme katlanmış plakların dört noktalı eğilme test düzeneği	64
Şekil 3.21: V-şekilli betonarme katlanmış plakların eğilme davranışı ve süneklik açısından değerlendirilmesi	65

Şekil 3.22: V-şekilli betonarme katlanmış plakların tasarıma esas şekil değiştirme ve gerilme diyagramları	68
Şekil 4.1: Karışımların çökme-yayıma ve T_{500} değerleri..	69
Şekil 4.2: KYB karışımlarına ait VSI değerlendirmesi.....	71
Şekil 4.3: Karışımların J-halkası çökme-yayıma ve yükseklik farkı değerleri	72
Şekil 4.4: Karışımların J-halkası testine ait görselleri	73
Şekil 4.5: Karışımların V-hunisi akış süreleri ve T_{500} değerleri	73
Şekil 4.6: Makro çelik liflerin KYB karışımlarının V- hunisi akış mekanizmasına etkisinin şematik gösterimi.....	74
Şekil 4.7: Karışımlara ait basınç dayanımı değerleri	76
Şekil 4.8: Karışımlara ait yarmada çekme dayanım değerleri	77
Şekil 4.9: Karışımlara ait eğilmede çekme dayanımı değerleri	78
Şekil 4.10: Karışımlara ait 3, 28 ve 90 günlük yük-sehim eğrileri	79
Şekil 4.11: Tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait açıklık ortası yük-sehim eğrileri.....	83
Şekil 4.12: V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait tokluk değerleri.....	85
Şekil 4.13: V-şekilli betonarme katlanmış plakların tokluğu ile deneysel moment taşıma kapasitesi arasındaki ilişki	86
Şekil 4.14: V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait süneklik indeksi değerleri	87
Şekil 4.15: 60 mm kalınlıklı V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlak modelleri	89
Şekil 4.16: 70 mm kalınlıklı V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlak modelleri	91
Şekil 4.17: 80 mm kalınlıklı V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlak modelleri	92
Şekil 4.18: Tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için deneysel ve nominal moment taşıma kapasitesi değerleri.....	94
Şekil 4.19: Çelik lif takviyeli KYB'den üretilen V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığının tahmini için önerilen denklem.....	95

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing Materials
IBC	: The International Building Code
EC	: EuroCode
EFNARC	: European Federation of National Trade Associations
RC	: Reinforced concrete
SCC	: Self-compacting concrete
SFR-SCC	: Steel fiber reinforced self-compacting concrete
LVDT	: Linear variable differential transformers
VISI	: Visual Stability Index
KYB	: Kendiliğinden yerleşen beton
UYPLTB	: Ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton
UPLFB	: Ultra performanslı lif takviyeli beton
τ_0	: Eşik kayma değeri
μ	: Plastik viskozite
γ	: Kayma hızı
τ	: Kayma gerilmesi
T₅₀₀	: Yayılma süresi
T_{500j}	: J-halkalı yayılma süresi
ΔH	: Yükseklik farkı
D_ç	: Çökme-yayılma çapı
D_j	: J-halkalı çökme-yayılma çapı
R²	: Korelasyon katsayısı
S/B	: Su/Bağlayıcı oranı
PÇ	: Portland çimentosu
UK	: Uçucu kül
MAK	: Makro çelik lif (65/60)
MİK	: Mikro çelik lif (OL 13/.16)
DYK	: Doygun yüzey kuru
LVDT	: Deplasman ölçer
f_e	: Eğilmede çekme dayanımı

f_{yc}	: Yarmada çekme dayanımı
M	: Açıklık ortasına ait maksimum moment
P	: Maksimum yük
L	: İki mesmet arasındaki hesap açıklık
b	: Numunenin genişliği
h	: Numunenin yüksekliği
y	: Tarafsız eksen derinliği (Prizma numuneler için)
I	: Kesitin atalet momenti
P	: Kesitin taşıyabileceği maksimum yük
L	: Numunenin uzunluğu
D	: Numunenin çapı
S_i	: Süneklik indeksi
δ_y	: İlk akma sehim
a_k	: Kesme açıklığı
P_{max}	: Betonarme katlanmış plakların maksimum yük taşıma kapasitesi
δ	: Betonarme katlanmış plakların maksimum yüke karşılık gelen açıklık ortası sehim
F_c	: Basınç blok derinliğinin oluşturduğu kuvvet
F_s	: Boyuna donatının çekme kuvveti
F_{ct}	: Lifli betonun çekme kuvveti
F_s'	: Basınç donatısının oluşturduğu kuvvet
f_c	: Beton basınç dayanımı
f_y	: Boyuna çekme donatının akma dayanımı
f_s'	: Boyuna basınç donatısının akma dayanımı
A_s	: Çekme donatısının kesit alanı
A_s'	: Basınç donatısının kesit alanı
b_w	: Kiriş gövde genişliği
a	: Basınç blok derinliği
d	: Faydalı yükseklik
d'	: Paspayı
h_{fp}	: V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığı
c	: Tarafsız eksen derinliği
ϵ_{cu}	: Betonun nihai basınç birim şekil değiştirmesi

ϵ_y	: Donatının nihai birim şekil değiştirmesi
ϵ_s'	: Boyuna basınç donatısının birim şekil değiştirmesi
M_n	: Nominal moment taşıma kapasitesi
M_d	: Deneysel moment taşıma kapasitesi
e	: En dış beton basınç lifinden lifli betonun çekme gerilme bloğunun tepesine kadar olan mesafedir
ϵ_s (lif)	: Lifli betonun çekme gerilme bloğunun başlamasına karşılık gelen birim şekil değiştirmesi
σ_t	: Lifli betondaki çekme dayanımı
l_f	: Lif uzunluğu
d_f	: Lif çapı
ρ_f	: Hacimce lif miktarı
F_{be}	: Lif aderans verimi faktörü
τ_f	: Aderans gerilmesi
A_c	: Basınç bloğunun alanı
b_0	: Katlanmış plakların kalınlığının yataydaki izdüşümü
x	: Basınç blok derinliğinin ağırlık merkezi
LOP	: Orantı sınırı
MOR	: Kırılma modülü
δ_u	: Kiriş elemanın nihai açıklık ortası sehimini
Std.	: Standart sapma
CoV	: Varyasyon katsayısı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇELİK LİFLİ KYB İLE ÜRETİLEN V-ŞEKİLLİ BETONARME KATLANMIŞ PLAK ELEMENLARIN KALINLIĞI ÜZERİNDE FARKLI LİF KOMBİNASYONUNUN ETKİSİ

Metin KATLAV

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

117+X sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Kâzım TÜRK
Eş Danışman: Prof. Dr. Paki TURĞUT

Katlanmış plaklar, doğal rijitlikleri ve yüksek yük taşıma kapasitelerinin yanı sıra ekonomik avantajları ve estetik görünüşleri nedeniyle bazı yapılarda (endüstriyel yapılar, depo, yüzme havuzları vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür betonarme taşıyıcı elemanların uzun açıklıklı yapıların çatı taşıyıcı sisteminde kullanılması yapının hem daha hafif hem de daha ekonomik olmasına sağlayabilir. Bununla birlikte, betonarme katlanmış plakların kalınlığı, eğilme performansı açısından önemli bir parametredir. Kalınlığının eğilme performansı üzerindeki etkisi ile ilgili literatürde herhangi bir deneysel çalışma olmamasına rağmen, katlanmış plakların sayısal analizi üzerine yeterince araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmada, çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betondan (KYB) üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığı üzerinde lif kombinasyonunun etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, kontrol, tek lifli ve karma lifli KYB karışımları, deneme-yanılma yoluyla elde edilmiş olup basınç, yarmada ve eğilmede çekme dayanımı testleri 3, 28 ve 90 günlük numuneler üzerinde belirlenmiştir. Daha sonra, KYB'den üretilen üç farklı plak kalınlığına (60, 70 ve 80 mm) sahip toplam on sekiz adet liffsiz, tek ve karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunesi hazırlanmıştır. 90 günlük V-şekilli betonarme katlanmış plaklar dört noktalı eğilme yüklemesine maruz bırakılarak, yük taşıma kapasitesi, yük-sehim davranışı, tokluk ve süneklik değerlerinin yanı sıra çatlak dağılımları bulunmuştur. Sonuç olarak, V-şekilli betonarme katlanmış plakların üretiminde özellikle karma çelik lif takviyeli KYB kullanımının plak kalınlığının azaltılması ve eğilme performansının iyileştirilmesi açısından önemli avantajlar sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığının tahmini için regresyon analizi ile elde edilen ampirik bir formül önerilmiş ve bu formülün $R^2=0.97$ ile yüksek doğrulukta bir tahmine sahip olduğu görülmüştür. Bununla beraber ACI 544 esas alınarak bazı varsayımlar ile çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların nominal moment taşıma kapasitesini tahmin etmek için bir tasarım yöntemi de önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karma çelik lif, V-Şekilli betonarme katlanmış plaklar, Plak kalınlığı, Eğilme Performansı, KYB

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF DIFFERENT FIBER COMBINATION ON THE THICKNESS OF V-SHAPED REINFORCED CONCRETE FOLDED PLATE ELEMENTS PRODUCED WITH STEEL FIBER REINFORCED SCC

Metin KATLAV

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

117+X sayfa

2022

Supervisor: Prof. Dr. Kâzım TÜRK
Co- Supervisor: Prof. Dr. Paki TURĞUT

Folded plates are widely used in some buildings (industrial buildings, hangars, warehouses, swimming pools, etc.) due to their natural rigidity and high load bearing capacity, as well as their economic advantages and aesthetic appearance. The use of such reinforced concrete (RC) load-bearing elements in the roof carrier system of long-span structures may provide a lighter and more economical. However, the thickness of RC folded plates is an important parameter for flexural performance. Although there is no experimental study in the literature on the effect of thickness on flexural performance, studies on its numerical solution are sufficient. In this study, the effect of fiber combination on the thickness of V-shaped RC folded plates produced from steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFR-SCC) was investigated. For this purpose, control, single and hybrid steel fiber self-compacting concrete (SCC) mixtures were obtained by trial & error method and then, compressive, splitting and flexural tensile strength tests were performed on 3-, 28- and 90-day specimens. After that, a total of eighteen plain, single and hybrid steel fiber reinforced V-shaped RC folded plate samples having three different plate thicknesses (60, 70 and 80 mm) produced from SCC were prepared. 90-day V-shaped RC folded plates were subjected to four-point bending loading. Load bearing capacity, load-displacement behavior, toughness and ductility values as well as cracking patterns for all specimens were found. In conclusion, it has been determined that the use of SFR-SCC in the production of V-shaped RC folded plates provided significant advantages in terms of reducing the plate thickness. In particular, it has been observed that the thickness of V-shaped RC folded plates could be effectively reduced and the flexural performance could be improved by using hybrid steel fibers. In addition, an empirical formula obtained by regression analysis is proposed for the estimation of the thickness of V-shaped RC folded plates produced from SFR-SCC, and this formula has a high accuracy estimation with $R^2=0.97$. In addition to all these, a design method is also proposed to estimate the nominal moment bearing capacity of V-shaped RC folded plates with some assumptions based on the ACI 544 regulation.

Keywords: Hybrid steel fiber, V-shaped RC folded plates, Plate thickness, Flexural performance, SCC

1. GİRİŞ

Endüstriyel yapılar, hangar, depo, yüzme havuzları, spor salonları ve kütüphaneler gibi yapılar geniş bir alanı daha etkin ve rahat kullanabilmek amacıyla büyük açıklıklı olarak tasarlanırlar. Bu geniş alanlı yapıların örtülmesi, genellikle çelik konstrüksiyonla yâda farklı betonarme taşıyıcı elemanlar ile yapılmaktadır. Fakat çelik malzemesi ile üretilmiş bu taşıyıcı sistemin, projelendirme, imalat, yapım ve bakım aşamaları hem zahmetli ve uğraştırıcı hem de kalifiye eleman bulma bakımından betonarmeye kıyasla daha zordur. Bunun yanında, normal dayanımlı betonarme elemanların dayanım/ağırlık oranının çok küçük olması sebebiyle, hem sınırlı bir açıklığın örtülebilmesi mümkün olmakta hem de büyük açıklıklar geçmek için daha büyük kesit boyutlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yapılar, özellikle betonarme yapı sistemi ile tasarlandığında elemanların zati ağırlığı büyük önem taşımaktadır. Zira yapı sistemini oluşturan elemanların zati ağırlığının düşük olması, ekonomik ve mimari-estetik bir yapı tasarımının yanında zati yükteki azalmaya bağlı olarak yapının deprem davranışında iyileşme sağlaması bakımından avantajlı imkânlar sunmaktadır.

Uzun hizmet ömrüne sahip ve deprem gibi dinamik yüklere karşı dayanıklı zati ağırlığı daha düşük yapısal elemanlara yönelik artan ihtiyaç, inşaat endüstrisinin bu alanlarda yenilikçi malzemeler ve taşıyıcı elemanlar bulma arayışında itici bir güç olmuştur (Saidani ve diğ, 2021). Bilindiği üzere, yapıların taşıyıcı elemanları (kolon, perde, kiriş ve döşemeler) çoğunlukla dikdörtgen kesitlere sahipken büyük açıklıklı yapıların geçilmesinden önemli bir alternatif olan kabuk yapılar ise farklı kesit (V-şekilli katlanmış plak, silindirik kabuk, hiperbolik kabuk gibi) geometrilerine sahiptirler (Stark, 2017; Shams, 2015). Kabuk yapılar, bu farklı geometrik formları sayesinde aynı anda birkaç talebi karşılayan taşıyıcı elemanlar oluşturmak için oldukça etkili olabilirler. Zira düşük zati ağırlıkları, yüksek yük taşıma kapasitelerinin yanı sıra ısı ve ses yalıtımı gibi avantajlı fiziksel özellikleri de sağlamaktadırlar (Stark ve Hegger, 2021; Sharei ve diğ, 2017). Bu gibi yararlarından ötürü çatı taşıyıcılar için oldukça popülerdirler. Kabuk yapıların özel bir sınıfı olan katlanmış plaklar, taşıyıcı sistem olarak çağdaş mühendislikte ve mimarlıkta kullanılmaları oldukça yenidir. 20. yüzyılın başlarında betonarmenin bilimsel esaslarının gelişmesiyle birlikte, katlanmış plakların uygulama deneyiminin arttığı ve bu tür yapıların modern mimarlıkta ve mühendislikte yerini almaya başladığı bilinmektedir (Varghese, 2010; Wilby, 2008). Katlanmış plaklar, düzlem yüzeysel taşıyıcı

plakların bir açı altında birleştirilerek oluşturdukları uzaysal taşıyıcı sistemlerdir (Aka ve diğ, 1981). Başka bir deyişle, biçimsel açıdan katlanmış plaklar, en az iki düzlemsel taşıyıcı elemanların eğik açı yapacak şekilde birleşiminden oluşmaktadır. Böylece en kesiti V, Λ , VT veya U olabilen uzaysal bir taşıyıcı sistem geometrisine sahiptir (Türkçü, 2003). Katlanmış plaklar geniş açıklıkları geçmede hem ekonomiklik hem de yük taşıma kapasitesi bakımından önemli bir alternatiftir.

Genel olarak, yapı endüstrisindeki çatı uygulamaları çelik levhalardan, betonarme döşemelerden veya kabuk elemanlardan yapılmaktadır. Çatı uygulamalarında en çok tercih edilen kabuk yapılardan olan V-şekilli betonarme katlanmış plaklar, düşük kalınlıklarda bile yüksek rijitlik ve yük taşıma kapasitesi sağlamaktadır (Varghese, 2010). Bunun gibi ince cidarlı betonarme taşıyıcı elemanları çeşitli kalınlıklarda ve formlarda elde edebilmek için, yüksek performanslı çimento esaslı kompozitler kullanmak oldukça avantajlı olacaktır.

Mükemmel şekil değiştirebilirliğe ve ayrışmaya karşı yüksek dayanıklılığa sahip kendiliğinden yerleşen beton (KYB), beton endüstrisinde yıllar içinde gelişmiş yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerden biridir. 20.yüzyılın sonlarına doğru Japon bilim insanı H. Okamura tarafından, özellikle deprem bölgelerindeki yapı elemanlarında çok sık aralıklarla atılan donatılardan dolayı beton yerleştirilmesi sırasında ortaya çıkabilecek sorunları çözmek amacıyla geliştirilmiştir (Okamura, 2003). Taze halde ki KYB'nin mekanik herhangi bir sıkıştırmaya gerek olmaksızın donatılar arasından geçebilme ve kalıpları doldurma kabiliyetinin yanında, mekanik özellikleri ve dayanıklılığı gibi bazı üstün özelliklerinden dolayı da yapı mühendisliğindeki kullanım popülerliğini arttırmaktadır (Ma ve diğ, 2017; Khaloo ve diğ, 2014, Rajhans ve diğ, 2019). Ayrıca, prefabrik üretilen elemanlar ile köprülerde, büyük oranlarda donatı bulunması nedeniyle bu elemanlarda beton ile donatı arasındaki aderans problemini ortadan kaldırmak açısından en iyi çözüm üstün taze özelliklerinden dolayı KYB'dir (García Calvo ve diğ, 2016; Ramezianpour ve diğ, 2014).

Bununla birlikte, KYB genel olarak yüksek basınç dayanıma sahip olduğundan çatlama karşı oldukça hassastır. Dolayısıyla düşük çekme dayanımı nedeniyle beklenmedik hasarlara neden olabilir. Birçok çalışmada (Kwon ve diğ, 2014; Türk ve diğ, 2019; Türk ve diğ, 2020; Sulthan ve Salomo, 2019; Abbas, 2013; Siddique ve Kaur, 2016; Gencel ve diğ, 2011; Teng ve diğ, 2018), liflerin KYB karışımına tek veya karma ilave edilmesiyle elde edilen lif takviyeli KYB, yukarıda belirtilen bu dezavantajları ortadan

kaldırmak için pratik bir yol sunmaktadır. Betonda lif kullanımı, betonun gevrek kırılmasını önemli ölçüde azaltarak, özellikle basınç, çekme ve patlatma yükleri altında daha sünek davranış sergilemesini sağlayacaktır (Khaloo ve diğ, 2014). Betona lif takviyesi olarak çelik, cam, naylon, karbon lifler ile polipropilen (PP) ve polivinil alkol (PVA) gibi sentetik lifler kullanılmaktadır (Wang ve diğ, 2021). Lifler betonun çekme dayanımını arttırarak eğilme performansında iyileştirmeler sağlamanın yanı sıra çatlakların başlaması ve ilerlemesini kontrol ederek yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Ayrıca, lif takviyeli betonun mekanik ve eğilme performansının en etkin şekilde, farklı tip ve narinlikteki liflerin karma olarak ilave edilmesiyle yararlanabileceği belirtilmiştir (Türk ve diğ, 2019; Rossi ve diğ, 2005). Günümüzde lif takviyeli KYB, binalar, yol kaplamaları, kaldırımlar, köprüler, tünel segmentlerinin kaplamaları ve kabuk yapılar gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, KYB'den üretilmiş olan V-şekilli betonarme katlanmış plak elemanların, zati ağırlığını azaltmaya yönelik olarak farklı lif kombinasyonlarının farklı plak kalınlıkları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Dört noktalı eğilme yüklemesi altında test edilen büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plak elemanların yük taşıma kapasitesi, yük-sehim eğrileri, tokluk, süneklik ve çatlak modelleri irdelenmiştir. Ayrıca, çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığının tahmini için ampirik bir formül ve ACI 544 (2009) şartnamesine dayalı bazı varsayımlar ile nominal moment taşıma kapasitesinin analitik hesabı için bir tasarım yöntemi de önerilmiştir.

1.1 Tezin Özgünlüğü

Büyük açıklıklı yapılarda (Endüstriyel yapılar, hangar, depo, kütüphaneler gibi) mekânların amacına uygun ve etkin bir şekilde kullanılabilmesi için çatı taşıyıcı sistemi olarak V-şekilli betonarme katlanmış plaklar tercih edilmektedir. Özellikle, bu katlanmış plakların malzemesi ve üretim metodu büyük öneme sahiptir. Bilindiği gibi, katlanmış plakların üretiminde beton en uygun malzemedir. Çünkü beton ile üretilecek elemanların tek bir parça halinde üretilebilmesi mümkündür ve uygulama açısından önemli bir avantaja sahiptir. Fakat ülkemizde çatı taşıyıcı sistem olarak betonarme katlanmış plak elemanlar, üretim ve yapım tekniğindeki zorlukları bakımından kullanımı çok nadir görülmektedir. Bu tez çalışmasında, “V şekilli birdöküm çelik kalıp sistemi” kullanılarak inşaat sektöründe bu tür elemanların üretim ve yapım tekniğindeki zorluklara çözüm getirebilmek amaçlanmıştır. Böylece, inşaat süresinin kısalması ve düzlemsel plak şeklinde imal edilmiş parçaların birleştirilmesine kıyasla, V-şekilli bir döküm betonarme katlanmış plakların taşıyıcı sisteminin hiperstatiklik derecesini artırarak daha emniyetli bir yapı sağlanacaktır.

Ayrıca, literatürdeki betonarme katlanmış plaklarla ilgili çalışmalar incelendiğinde, bu konu üzerine yapılan çalışmaların (Thakur ve diğ, 2021; Thakur ve diğ, 2020; Qin ve diğ, 2018; Swatilekha, 2013; Naveen, 2014; Nayak ve diğ, 2013; Haldar ve diğ, 2011; Lai ve diğ, 2002; Samanta ve diğ, 1999) tamamına yakını sadece sayısal modelleme şeklinde olduğu bilinmektedir. Bu deneysel çalışmayla birlikte, lif takviyeli KYB ile bir döküm olarak üretilecek büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plak elemanlara ait yük taşıma kapasitesi, yük-sehim davranışı, tokluk ve süneklik değerlerinin yanı sıra çatlak modelleri belirlenerek ilgili literatürdeki deneysel veri eksikliği giderilecektir. Tüm bunlara ilaveten, DIN 1045-1 (2008) standardı dışında betonarme katlanmış plaklar ile ilgili sınır değerler veya yapım metotlarıyla ilgili herhangi bir şartname yoktur. Bu tez çalışmasıyla birlikte, ileride güncellenmesi muhtemel olan ilgili ulusal/uluslararası şartname ve yönetmeliklerde çelik lif takviyeli KYB’den üretilecek V-şekilli betonarme katlanmış plakların üretimi ve optimum plak kalınlığı ile ilgili yer verilmesi beklenmektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)

Yapı endüstrisinin sürekli gelişimi ve yapılar için artan gereksinimler, yeni nesil betonların gelişimini tetiklemiştir. Yeni nesil betonlardan biri olan KYB, herhangi bir mekanik vibrasyon işlemi olmaksızın, kendi ağırlığı altında akabilen ve yerleştirildiği kalıbı tamamen dolduran ve bu esnada da stabilitesini kaybetmeyen, ayrışmaya karşı dirençli yüksek performanslı bir beton türü olarak tanımlanır (Okamura, 2003; Schutter ve diğ, 2008; Khayat ve diğ, 2010). KYB yüksek akıcılığı nedeniyle betonun yerleştirilmesi esnasında kendiliğinden seviyelenmesinin yanı sıra, üretimi veya nakliyesi sırasında oluşan hava kabarcıklarının kendiliğinden giderilmesini de sağlar (Le ve diğ, 2015; Gesoğlu ve diğ, 2009). Normal betonlara göre, dayanım ve dayanıklılık açısından daha iyi özellikler sunarlar. Zira kendi ağırlığının etkisi ile kalıp içerisindeki boşlukları minimize ederek yerleştiği ve düşük su/bağlayıcı oranlarında üretilebilmesinden dolayı yüksek geçirimsizliği ve dolayısıyla yüksek durabiliteye sahip servis ömrü uzun olan kararlı bir kompozittir (Dybel ve Kucharska, 2020). Ayrıca, kiriş - kolon birleşim gibi çok sık donatılı bölgelerde KYB'nin donatı çubuklarını daha iyi sarması sayesinde beton ile donatı arasındaki aderansın iyileştirilmesinin sonucu olarak betonarme elemanların mekanik performansını ciddi derecede artırmaktadır (Felekoğlu, 2003). Diğer yandan, KYB'nin yerleştirilmesi sırasında vibratör kullanılmaması nedeniyle nitelikli personele fazla ihtiyaç duyulmaması, enerji tasarrufu, döküm hızının artması, gürültü probleminin azaltılması gibi pek çok avantajı da beraberinde getirmektedir (Nehdi ve diğ, 2004). Böylece, betonarme yapı elemanlarının (döşeme, kiriş ve kolon gibi) %20 oranında daha kısa sürede üretilmesine olanak sağlamaktadır (Semioli, 2001).

2.1.1 KYB tasarımı

KYB'lerin performansları ile taze beton özellikleri arasında önemli bir ilişki vardır. İşlenebilirlik ve reoloji parametreleri KYB'nin uygulamadaki kullanım performansını ciddi anlamda etkilemektedir. Bu inovatif betonun kendiliğinden yerleşme yeteneğini üç parametre ile ifade edebilmek mümkündür; doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve engeller arasından geçiş yeteneğinin olmasıdır (Skarendahl ve diğ, 2000).

KYB karışımları tasarlanırken, kullanılacak malzeme ve oranları özenle seçilmelidir. Zira KYB'nin dar veya sık donatılı kesitlerden stabilitesini bozmadan yüksek akıcılık ve geçiş kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Bu özellikleri sağlamak için, yeterli viskozite ve olabildiğince düşük akma gerilmesi gereklidir. Taze haldeki KYB için önemli olan üç temel özelliğin sağlanması için tasarımda alınacak önlemler Şekil 2.1'de verilmiştir (Gürdal ve Yüceer, 2004)



Şekil 2.1: Taze haldeki KYB'nin üç temel özelliği için tasarımda alınacak önlemler

KYB karışımlarında ideal kohezyon ve segregasyon direnci elde etmek için hamur hacminin geleneksel betona kıyasla yüksek olması gerekmektedir. EFNARC (European Federation of National Trade Associations) (2005) komitesi tarafından su/bağlayıcı malzeme oranı hacimsel olarak 0.85 – 1.10 değerleri arasında, hamur hacmi 30 – %38 aralığında ve toz malzemenin ise 125 mikrondan küçük olması önerilmektedir.

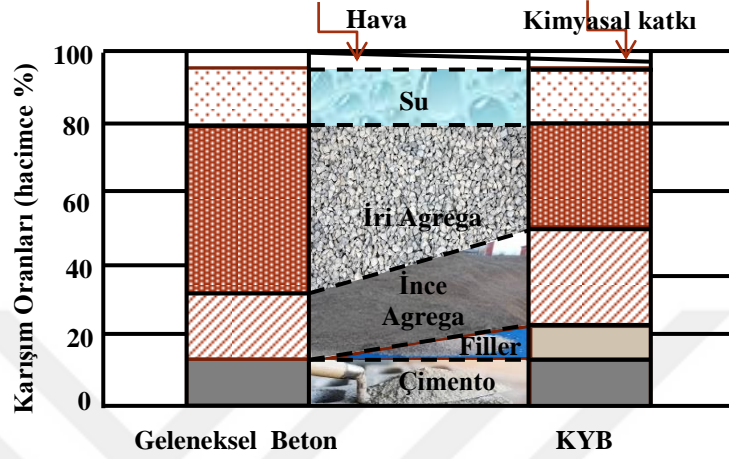
Bununla birlikte, KYB karışımındaki ince malzeme miktarını artırmak amacıyla puzolanik mineral katkıları veya inert toz malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler betonun hem reolojik özelliklerini hem de dayanım ve dayanıklılığını olumlu yönde etkilemektedirler. Taze betonun yerleştirilmesi esnasında iri agregaların beton içinde çarpışma ve sürtünmesi ile birlikte iç gerilmelerde artış meydana gelmektedir. Bu da betonun akış enerjisini önemli ölçüde düşürmektedir. Özellikle yoğun donatı durumunda ve dar kesitlerde iri agregaların sürtünme ve çarpışma etkisi daha da artmakta ve böylece, segregasyon oluşma riski de artmaktadır. Yeterli miktarda filler malzemelerin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi) kullanılması ile birlikte hamur/harç hacminin artmasının sonucu olarak iri agregalar arasındaki mesafe de artmaktadır. Böylece, viskozite belli değerlerde tutularak ayrışma riski düşürülmekte, iri agrega taneleri arasındaki sürtünme azaltılarak betonun akıcılığı artırılmakta ve aynı zamanda, daha kompakt bir yapı sağlanarak geçirimsizlik azaltılabilmektedir. Bu da elemanın servis ömrü boyunca maruz kalacağı dış etkilere karşı daha dirençli olmasını sağlayacaktır (Shi ve diğ., 2002; Okamura ve Ouchi, 1998). Ayrıca, fazla miktarda toz malzeme içeren KYB’de su miktarını arttırmadan hem yüksek işlenebilirlik hem de ayrışmaya karşı direnç sağlamak amacıyla, yeni nesil kimyasal katkı maddeleri kullanılmaktadır (Hollingsworth, 2002). EFNARC (2005) tarafından tavsiye edilen KYB karışım oranları Çizelge 2.1 verilmiştir.

Çizelge 2.1: EFNARC tarafından önerilen karışım oranları

Bileşenler	Tipik Ağırlık Oranları (kg/m ³)	Tipik Hacimsel Oranları (litre/m ³)
Toz Malzeme	380-600	
Çimento hamuru	-	300-380
Su	150-210	150-210
İnce agrega	Genel olarak toplam agrega ağırlığının % 48 – 55’i	
İri agrega	750-1000	270-360
Su/Toz malzeme (hacimce)	-	0.85-1.10

EFNARC (2005) komitesine göre, dar kesitlerden veya çok sık aralıklarla atılan donatılar arasından betonun geçişini sağlamak için iri agrega miktarını ve maksimum agrega dane çapının sınırlandırılması veya azaltılması gerekmektedir. Çünkü azaltılmış iri agrega oranı, karışımın ayrışma riskini düşürür ve betonun akış enerjisini artırır. EFNARC tarafından önerilen iri agrega hacmi %27 – %36 aralığında iken, maksimum agrega dane

boyutu ise 12 mm – 20 mm arasındadır. KYB ve geleneksel beton karışımlar, temelde aynı malzemeler kullanılarak elde edilmektedir. Ancak, KYB'nin karışımını geleneksel beton karışımından ayıran bazı etkenler bulunmaktadır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi geleneksel beton ile KYB'yi oluşturan malzemelere bakıldığında, KYB karışımlarının iri agrega oranı ve su/bağlayıcı malzeme oranı daha düşüktür (Holschemacher ve Klug, 2002).

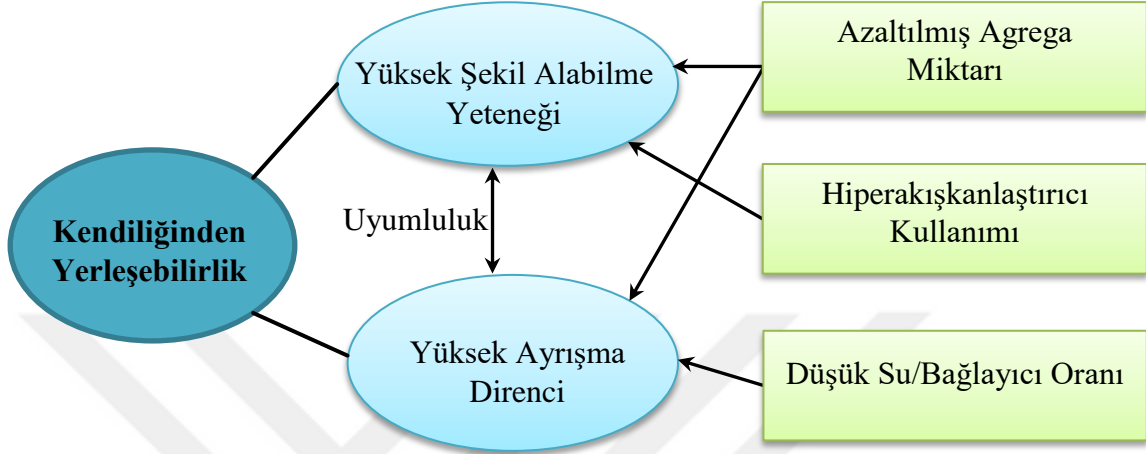


Şekil 2.2: Geleneksel beton ve KYB'nin karışım oranları

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, KYB karışımında geleneksel betona kıyasla iri agrega oranı azaltılırken ince agrega oranı artırılmıştır. Bununla birlikte KYB karışımında filler olarak belirtilen, inert veya puzolanik toz malzemeler kullanılmaktadır (Toyoharu ve diğ., 1998). Bu malzemelerin miktarını arttırmak, karışımın viskozitesini artırarak eşik kayma gerilmesini düşürmektedir. Buradaki temel hedef, her bir iri agrega tanesinin, harç tarafından sarılmasının sağlanması ve betonun herhangi bir dış müdahale olmadan kendi ağırlığı altında yerleşebilmesini sağlamaktır (Skarendahl ve Petersson, 2003; Topçu ve diğ., 2008).

KYB'nin işlenebilirlik özellikleri açısından ince agrega/iri agrega oranı oldukça önemlidir. Zira KYB karışımında iri agrega oranı arttıkça karışımın akıcılığı ve kendiliğinden yerleşebilirliği azalmaktadır (Toyoharu ve diğ., 1998). Karışımında ince agrega miktarının artırılması ise karışımın akıcılığını arttırmakta ve engeller arasından geçerken ayrışma riskini düşürmektedir. Buna ilaveten, sınırlandırılmış iri agrega miktarı, dar veya sık donatılı kesitler arasından ayrışmadan geçiş yeteneği sağlamanın yanı sıra hamur hacmini de arttırmaktadır. İnce malzemenin artmasına bağlı olarak hamur hacmi de artarak KYB karışımına yüksek akıcılık özelliği kazandırmaktadır (Gürdal ve Yüceer, 2004; Toyoharu ve diğ., 1998; Yardımcı, 2007).

KYB'lerin yüksek şekil alabilme yeteneklerinin geliştirilebilmesi, karışımın su/toz oranı düşük seviyelerde tutularak uygun bir süperakışkanlaştırıcının kullanımıyla sağlanabilir. Şekil 2.3'te şematize edilen bir KYB karışımının amaca uygun bir performans gösterebilmesi için malzeme oranları ve kullanımlarının dengeli bir şekilde tasarlanması önemlidir. (Okamura ve Ozawa, 1995).



Şekil 2.3: Amaca uygun bir KYB karışımının elde edilebilmesi için temel yöntem

2.1.2 KYB reolojisi

Reoloji bilimi, malzemelerin gerilme altında akış ve deformasyon davranışını ve gerilme, birim şekil değiştirme, birim şekil değiştirme hızı ve zaman parametreleri arasındaki ilişkileri inceleyen bir bilim dalıdır (Hackley ve Ferraris, 2001). Su gibi çok akıcı sıvılara uygulanan kayma gerilmesi (τ) ile kayma hızı ($\dot{\gamma}$) arasında sabit bir oran vardır. Bu parametreler arasındaki sabit oran ise plastik viskozite olarak tanımlanmaktadır. Böyle bir akış davranışı sahip malzemeler Denklem 2.1'deki gibi kayma eşikleri sıfırdır ve gerilme ile şekil değiştirme grafikleri lineerdir. Bu model Newtoniyen modeli olarak adlandırılmaktadır.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

burada;

τ : Kayma gerilmesini,

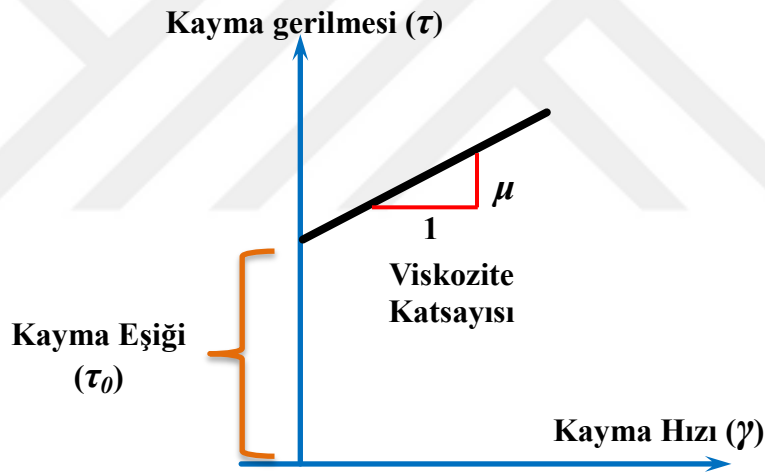
$\dot{\gamma}$: Kayma hızını,

μ : Plastik viskoziteyi ifade eder.

Denklem 2.1’de görüldüğü gibi Newtoniyen davranışına sahip malzemelerde, malzemenin akışa geçebilmesi için aşması gereken bir eşik gerilme değeri bulunmamaktadır. Fakat çoğu malzeme, akış davranışı itibariyle Newtoniyen modeline uymaz. Genelde malzemelerin akışa geçebilmesi için aşması gereken bir eşik gerilme değeri vardır. Bu tip malzemelere ait akış davranışını tanımlamak için Bingham modeli kullanılır ve bu modele ait Denklem 2.2 aşağıda verilmiştir.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (2.2)$$

Burada eşik kayma değeri (τ_0), malzemenin akışa geçmesi için gerekli olan kuvveti, plastik viskozite (μ) ise, malzemenin eşik kayma değerini geçtikten sonra akmaya karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. KYB karışımlarında akışa geçebilmesi için aşması gereken bir eşik kayma gerilmesi değeri vardır. Bundan dolayı KYB tasarımlarında genellikle Şekil 2.4’te verilen Bingham modeli kullanılmaktadır (Özkul, 2005).



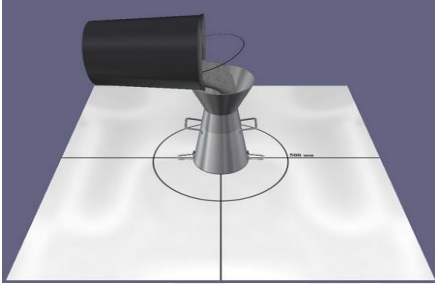
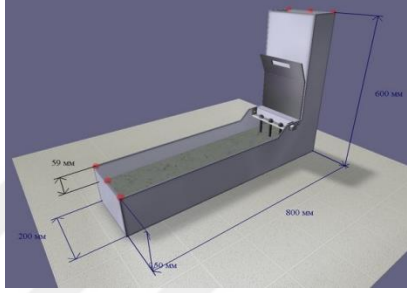
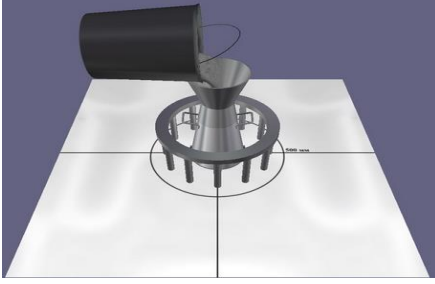
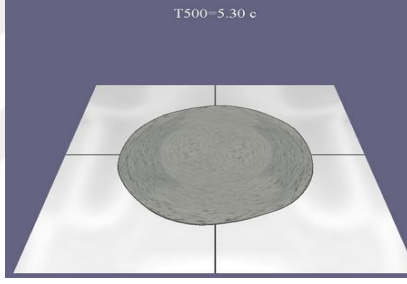
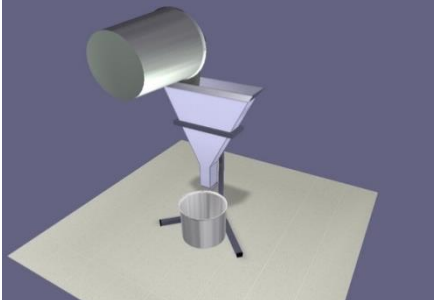

Şekil 2.4: Bingham modeline ait parametreler

2.1.3 İşlenebilirlik testleri

İşlenebilirlik, taze betonun karakteristik özelliği olup, betonun homojenliğini kaybetmeden karıştırılabilmesini, yerleştirilebilmesini, sıkıştırılabilmesini, pompalanabilmesini ve akıcılığını gösteren kolektif bir parametredir. Taze KYB’nin akıcılık, doldurma ve engeller arasından geçiş kabiliyeti ile ayrılmaya karşı direnç gibi reolojik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Fakat tek bir test yöntemi ile tüm bu özelliklerin tespiti zor ve gerçeğe yakın bir sonuç vermesi mümkün değildir. EFNARC (2002) komitesi tarafından tavsiye edilen bazı test yöntemleriyle taze haldeki KYB

karışımların bu özellikleri hakkından göreceli olarak fikir edilebilir (Çizelge 2.2). KYB karışımlarına ait bu özelliklerin tam olarak belirlenebilmesi için Çizelge 2.2’de verilen çökme-yayılma, T₅₀₀, J-halkası, V-hunisi, L-kutusu ve U-kutusu testlerinin yapılması gerekmektedir.

Çizelge 2.2: EFNARC (2002)’ın önerdiği işlenebilirlik test yöntemleri ve belirlenen karakteristik özellikler

Test Yöntemi	Karakteristik	Test Yöntemi	Karakteristik
Çökme-yayılma		L-kutusu	
	→Akışkanlık →Doldurma Kabiliyeti		→Geçiş Kabiliyeti
J-halkası		T ₅₀₀	
	→Geçiş Kabiliyeti →Doldurma Kabiliyeti		→Viskozite →Akışkanlık
V-hunisi		U-kutusu	
	→Viskozite →Akışkanlık		→Geçiş Kabiliyeti

2.1.3.1 Çökme-yayılma deneyi

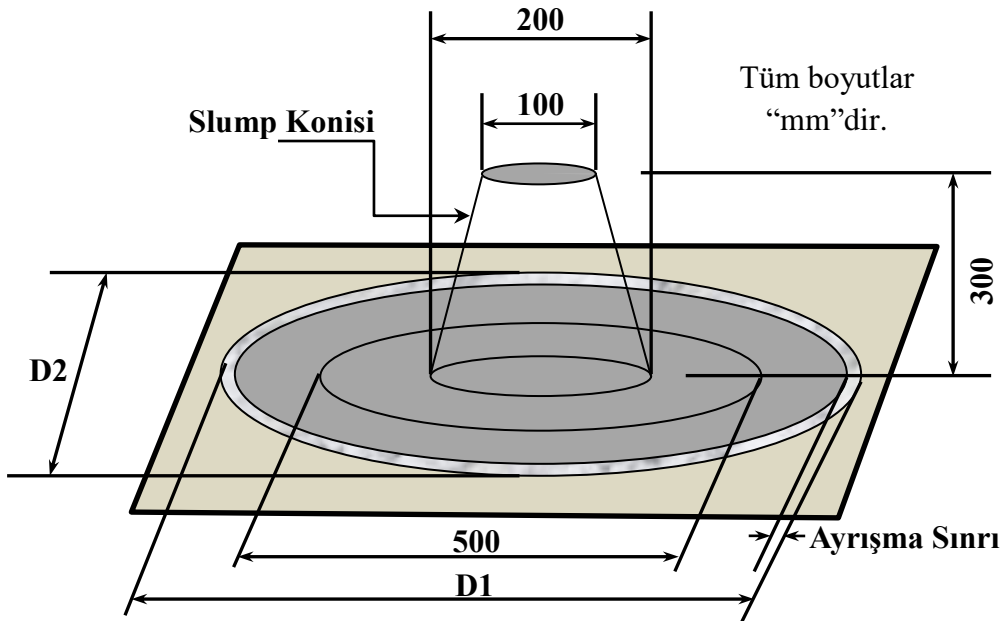
Çökme-yayılma deneyi, taze KYB karışımların akıcılığını belirlemek için kullanılan bir işlenebilirlik test yöntemidir. Bu deney yöntemi ilk defa Japonya’da su altında dökülen beton uygulamalarında betonun akıcılık özelliğini tespit etmek amacıyla kullanılmıştır (Japan Society of Civil Engineers, 1992). Çökme-yayılma deneyinde, temel amaç, beton karışımının herhangi bir dâhili ve harici etki olmaksızın kendi ağırlığı altında yayılmasını sağlayacak olan betonun doldurma kabiliyetinin belirlenmesidir. Ayrıca, taze

KYB karışımın tabla üzerinde belirlenmiş olan 500 mm çapına ulaşana kadar geçen süre ölçülerek elde edilen T_{500} akma süresi de tespit edilmektedir. Daha sonra, tabla üzerinde yayılma tamamlandığında birbirine dik iki yönde olmak üzere D1 ve D2 çapları ölçülerek ortalaması alınır ve böylelikle taze KYB karışımının yayılma çapı belirlenmiş olur. Çizelge 2.3’de görüldüğü gibi EFNARC (2005) komitesi tarafından KYB karışımları çökme-yayılma çapına göre 3 kategoriye ayırmıştır.

Çizelge 2.3: EFNARC (2005)’e göre yayılma çapı sınıfları

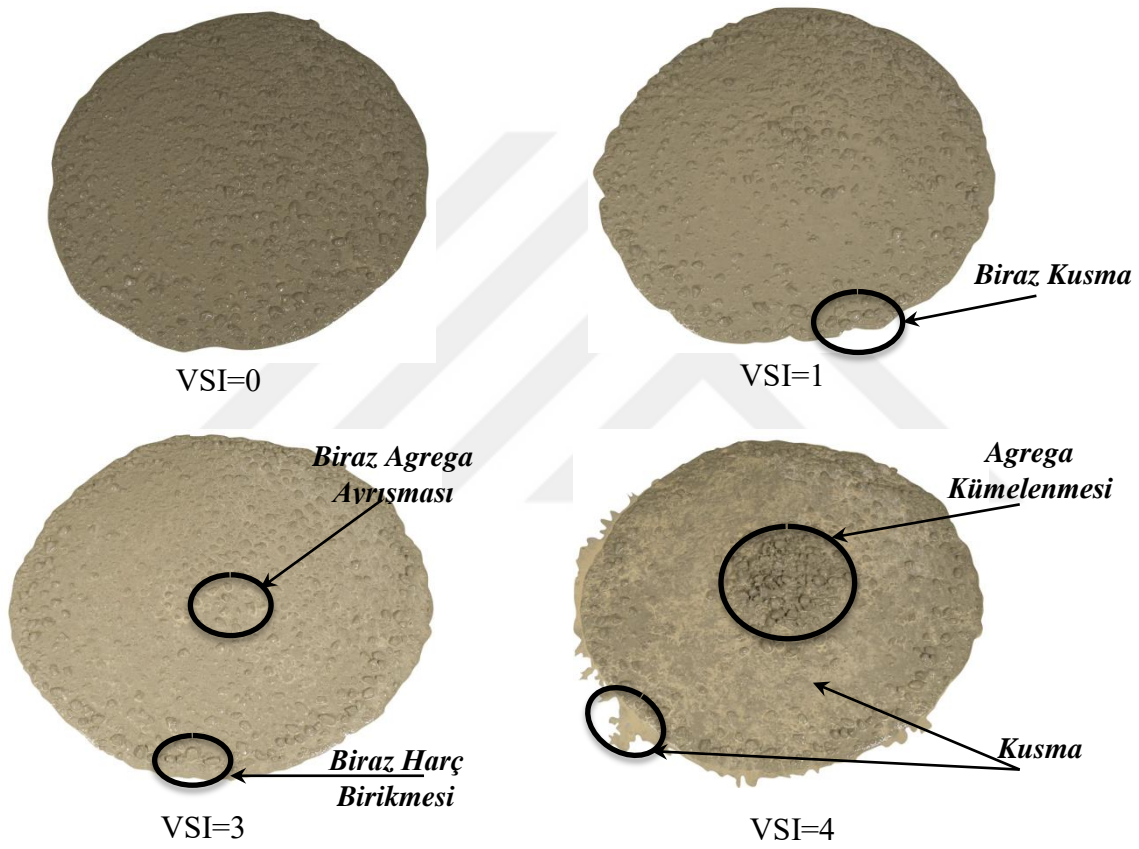
KYB Sınıfı	Yayılma Çapı (mm)
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850

Bunun yanında çökme-yayılma deneyinde kullanılacak aparatların EN 12350-2 standardına uygun olmalıdır. Standardına göre slump konisi, üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm ve yüksekliği ise 300 mm olmalıdır. Alt taban plakası ise et kalınlığı en az 2 mm olacak şekilde neme karşı dayanıklı malzemeden üretilmiş en az 900 mm × 900 mm boyutlarında olmalıdır. Ayrıca, alt taban plakası üzerinde 200 mm ve 500 mm çaplara denk gelen daireler çizilerek işaretlenmelidir. Çökme-yayılma deneyi ait test aparatları ve boyutları Şekil 2.5’da gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Çökme-yayılma test aparatları ve boyutları

Çökme-yayıma deneyi uygulanıp taze KYB karışımının yayılması bittikten sonra, yayılan KYB karışımının stabilitesi ile ilgili ASTM C1611 (2018) şartnamesinde bazı indeksler tanımlanmıştır. Visual Stability Index (VSI) olarak belirtilen bu yöntemde, yayılması tamamlanan KYB karışımının ayrılmaya karşı kararlılığıyla ilgili Şekil 2.6'da belirtilen bazı görseller ile karar verilmektedir. Burada, karışımların ayrılmaya karşı potansiyel durumuna göre 0-3 kadar VSI değerleri tanımlanmaktadır. İlgili şekilde belirtilen bu durumları ifade eden VSI değerleri Çizelge 2.4'de verilmektedir (Daczko ve Kurtz, 2001).



Şekil 2.6: VSI değerlerinin tanımlanması

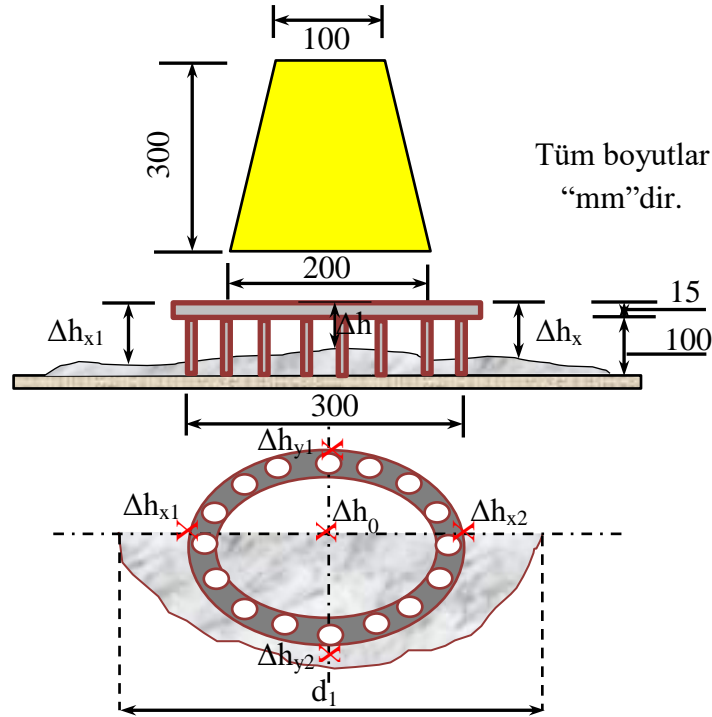
Çizelge 2.4: KYB karışımlarının stabilite durumlarına göre VSI tanımlaması

VSI	Şartlar
0 = Çok kararlı	Kusma ve ayrışma yok.
1 = Kararlı	Ayrışma yok, biraz kusma var.
2 = Kararlı değil	10 mm'den az olacak şekilde birikmesi var ve/veya karışımın orta bölgesinde biraz agregaya ayrışması var.
3 = Hiç kararlı değil	10 mm'den fazla ve belirgin şekilde harç toplanması var ve karışımın ortasında geniş agregaya kümelenmesi mevcut.

2.1.3.2 J-halkası deneyi

J-halkası deneyi, KYB karışımının dar kesitlerden ve engeller arasından geçiş yeteneğini belirlemek amacıyla uygulanır. Bu test yöntemi, J-halkası aparatının içine yerleştirilen slump konisiyle yapılmaktadır. J-halkası aparatında, donatıları temsil eden çelik çubukların çapı veya aralarındaki mesafe betonun kullanılacağı uygulama tipine göre ayarlanabilir. Slump hunisi yayılma tablasının merkezine yerleştirildikten sonra, taze KYB karışımı ile doldurularak dik bir şekilde yavaşça yukarıya doğru kaldırılır. Daha sonra, halkadaki çubukların hemen iç ve dış kısmındaki beton seviyeleri dört noktadan ölçülüp seviye farkları hesaplanıp ortalaması alınır. Böylece, taze KYB karışımının dar kesitlerden ve engeller arasından geçiş kabiliyeti hakkında bilgi edinilebilir. Ayrıca, karışımın yayılması bittikten sonra birbirine dik doğrultuda olmak üzere yayılma çapı ölçülerek ortalaması alınır. Böylece J halkası deneyinde karışımın yayılma çapı belirlenmiş olur. Buna ilaveten karışımın, slump hunisinin kaldırılması ile taban plakası üzerindeki işaretli 500 mm'lik yayılma çapına ulaştığı an ile geçen süre olan T_{500j} de belirlenebilir.

J-halkası test aparatı 100 mm yüksekliğe ve 300 mm çapa sahiptir. Test aparatındaki çelik çubukların çapı ve aralarındaki mesafe, betonun kullanım amacına göre değişiklik gösterebilmektedir. J-halkasına ait test aparatları ve boyutları Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



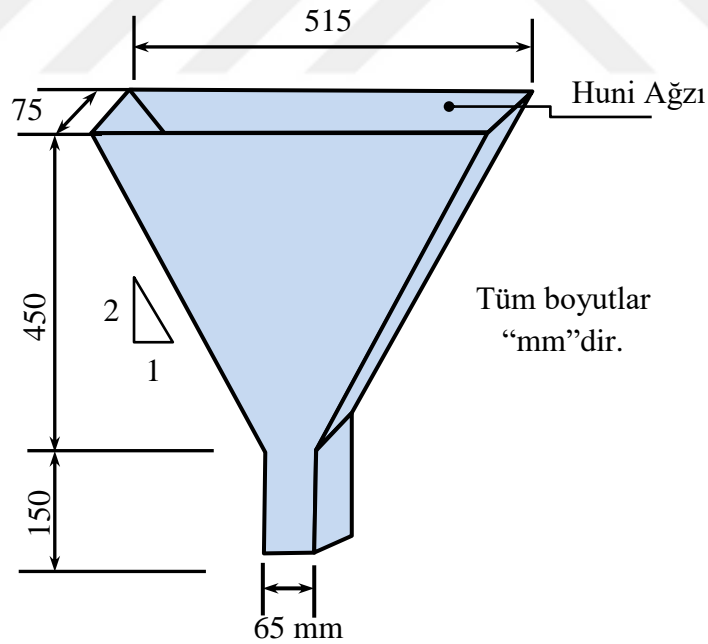
Şekil 2.7: J-halkası test aparatları ve boyutları

2.1.3.3 V-hunisi deneyi

V-hunisi deneyi, taze KYB karışımların akıcılığını ve vizkozitesini belirlenmek amacıyla geliştirilmiş bir test yöntemidir. Şekil 2.8’de test aparatı ve boyutları gösterilen V-hunisine yaklaşık olarak 12 litre karışım doldurularak 10 saniye beklenir. Daha sonra deney aparatının alt kısmındaki kapak açılarak KYB karışımının akması sağlanır. Alt kapağın açıldığı an ile üstten bakılacak şekilde huninin altında ışığın ilk görüldüğü an arasında geçen süre süreölçer vasıtasıyla ölçülerek karışımın V-hunisi akış süresi belirlenir. Burada V-hunisi akış süresinin düşük olması, akıcılığın fazla vizkozitenin düşük olduğunu göstermektedir. Çizelge 2.5’te EFNARC (2005) komitesi karışımları V-hunisi akış sürelerine göre 2 kategoriye ayırmıştır.

Çizelge 2.5: EFNARC (2005)’e göre V-hunisi akış süresi sınıfları

KYB Sınıfı	V-Hunisi Akış Süresi (s)
VF1	≤ 8
VF2	9 – 25



Şekil 2.8: V-hunisi ait test aparatı ve boyutları

Kendiliğinden yerleşebilen karışımların reolojik özellikleri açısından birbirlerinden oldukça farklı olabilmektedir. Bu durum yapı elemanlarında her KYB karışımının kullanılamayacağını göstermektedir (Yardımcı, 2007). Örneğin, kolon-kiriş birleşim bölgesi gibi çok sık donatılı kesitler veya betonarme katlanmış plak gibi ince cidarlı kabuk elemanlarında oldukça akıcı (SF2 veya SF3) ve akış hızı yüksek (VS1 / VF1) karışımlar gereklidir. Buna karşılık, hiçbir engelin (sık donatılı ya da dar kesitli) bulunmadığı bir elemanda çökme-yayılma sınıfı olarak düşük yayılma çapına (SF1) sahip ve akış hızı daha düşük olan bir KYB karışımı yeterli olabilecektir. Bu gibi sebeplerden ötürü EFNARC (2005) komitesi tarafından, Walraven (2003)'in yaptığı çalışmalar esas alınarak viskozite, ayrışma direnci/geçiş yeteneği ve çökme-yayılma değerleri optimize edilerek farklı elemanlar için farklı işlenebilirlik sınıflarında KYB'ler önerilmiştir (Çizelge 2.6).

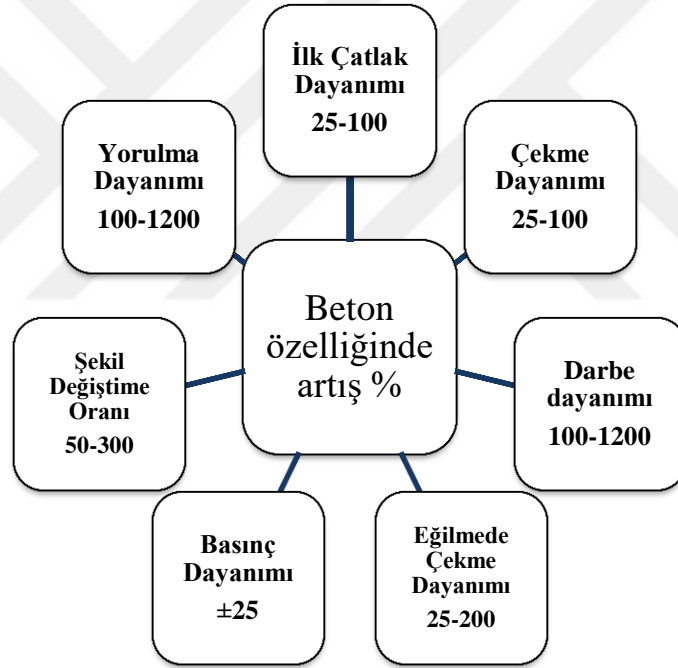
Çizelge 2.6: EFNARC'ın farklı elemanlar için önerdiği KYB sınıfları

Viskozite				Ayrışmaya karşı direnç / Geçiş yeteneği
VS2 VF2				SF1 ve 2 için geçiş Yeteneği tanımlanmalı
VS1 veya 2 VF1 veya 2 Yâda hedef değer				SF3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
VS1 VF1	Yer betonları ve döşemeler			SF2 ve 3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
	SF1	SF2	SF3	
	Çökme - yayılma			

2.2 Lif Takviyeli Betonlar

Beton ve çimento esaslı kompozitler, en uygun maliyet/dayanım oranına sahip olduğu için yapı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Joshaghani ve diğ, 2018; Sánchez ve diğ, 2013; Sahmaran ve diğ, 2005). Fakat bu tür malzemeler düşük çekme dayanımları nedeniyle, çatlamaya karşı oldukça hassastırlar (Li ve Zhang, 2005). Dolayısıyla, sertleşmiş betonun doğal gevrekliği sonucu beklenmedik hasarlara neden olabilirler. Bu gibi sorunları çözüme kavuşturmak amacıyla 20. yüzyılın ortalarına doğru ilk olarak betona çelik lif takviyesi yapılarak betonun mekanik özelliklerinin ne düzeyde etkilendiği incelenmiştir (Hannant, 1987). Betona lif takviyesi, yukarıda bahsedilen kusurları çözenin yanında betonun mekanik performansını ciddi oranda iyileştirmek için

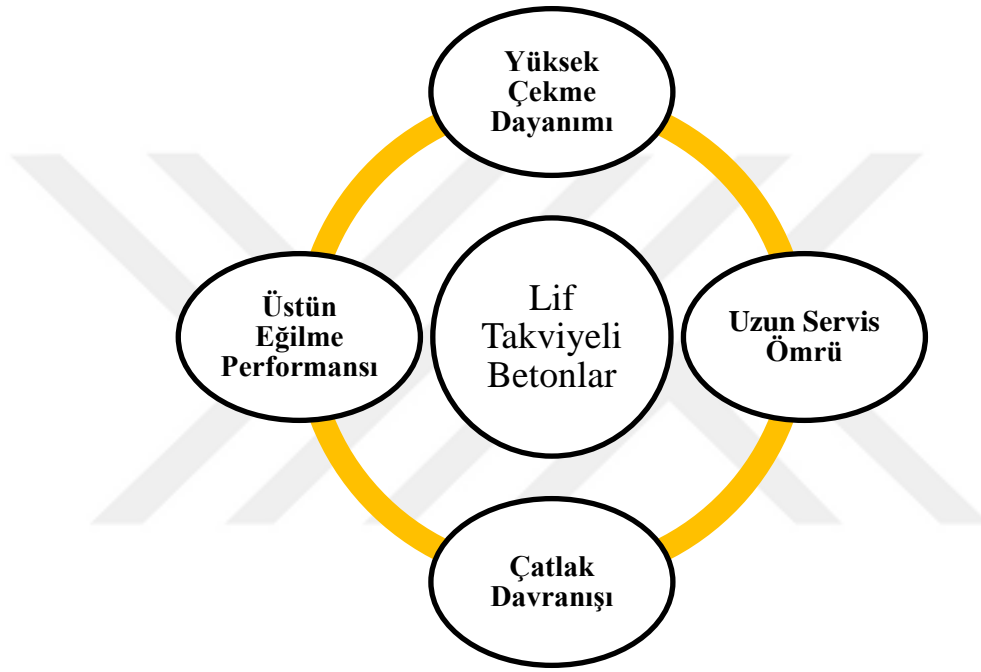
önemli pratik bir yol sunmuştur (Lu ve diğ, 2015; Kaufmann ve diğ, 2004; Hannawi ve diğ, 2016). Lif kullanımının, betonun özellikle eğilme, çekme ve kesme dayanımı gibi yapısal özelliklerini önemli ölçüde iyileştirilebileceği kanıtlanmıştır (Wang ve diğ, 2021; Gueciouer ve diğ, 2019; Boulekbache ve diğ, 2010). Literatürdeki birçok çalışmada (Meng ve Khayat, 2017; Cao ve diğ, 2017; Ozyurt ve diğ, 2007; Altun ve diğ, 2007; Shah ve Rangam, 1971; Köksal ve diğ, 2002; Cao ve diğ, 2017; Silva ve diğ, 2017; Ahmad ve Umar, 2018; Shah ve Ribakov, 2011; Kazemi ve diğ, 2017; Sirijaroonchai ve diğ, 2010; Lee, 2017; Bencardino ve diğ, 2010) liflerin, betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azaltmasının yanında şekil değiştirme kapasitesi, tokluk, süneklik, yorulma, darbe direnci, azaltılmış sünme, büzülme çatlama, geçirgenlik ve betonun çatlama sonrası davranışında önemli gelişmeler sağladığı tespit edilmiştir. Lif takviyeli edilen betonların bazı özelliklerinde görülen artışın yaklaşık değerleri Şekil 2.9'da verilmiştir (Sarı, 2013).



Şekil 2.9: Lif takviyesinin betonun özelliklerinde sağladığı artış

Süreksiz ve kılcal mikro çatlakların birleşerek, betonu/betonarme elemanı zararlı çevresel etkilere maruz bırakacak veya taşıma kapasitesini azaltacak makro düzeyde çatlak oluşumuna sebep olduğu bilinmektedir. Lifler ise, matraste oluşturduğu bağ kuvvetleri sayesinde, mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesini kontrol ederek betonun hem yük taşıma kapasitesini hem de dayanıklılığını artıracaktır (Mindess, 2007). Lifsiz betonlarda, ilk çatlak oluşumundan sonra göçme meydana gelirken, lif takviyeli betonlarda ise artan sehim ile birlikte çatlaklar oluşmasına rağmen elemanın yük taşımaya devam

ettiği görülmüştür (Arısoy, 2005). Sonuçta, yüksek binalar, uzun açıklıklı köprüler ve deniz suyuna maruz kalan yapıların inşasında, lif takviyeli beton kullanılması, yapının yük taşıma kapasitesi, tokluk ve dayanıklılık gibi özelliklerini iyileştirmede önemli avantajlar sağlayacaktır. Lif takviyeli betonlar, şu anda sadece normal ve endüstriyel yapılarda değil, aynı zamanda havaalanı pistleri, otoyol kaldırımları, sismik ve darbeye dayanıklı yapılar, tüneller, köprüler ve hidrolik yapılar gibi birçok uygulamada da kullanılmaktadır (Prisco ve diğ, 2009; Martini ve diğ, 2010). Şekil 2.10'da lif takviyeli betonların kullanım amaçları verilmiştir.



Şekil 2.10: Lif takviyeli betonların kullanım gerekçeleri

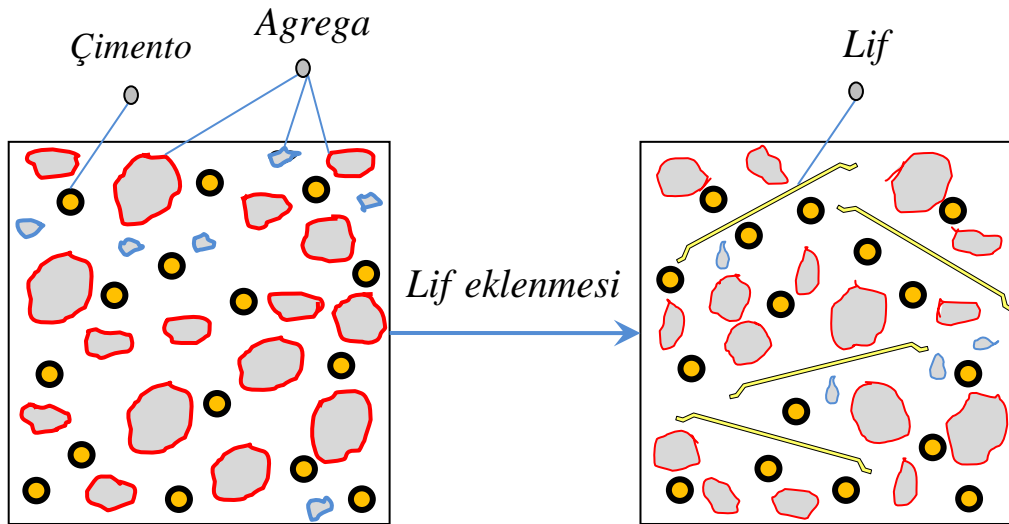
Betonda farklı tipe lifler kullanılması, betona farklı mühendislik özellikleri kazandıracığı bilinmektedir. Betonun dayanım ve tokluğunu arttırmak amacıyla, elatisitesini modülü yüksek olan lifler (karbon, cam ve çelik lifleri gibi) çatlama karşı dayanıklılığı arttırırken, elatistisite modülü düşük olan lifler (polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil-alkol (PVA) gibi) ise sünekliği arttırmaktadır (Tavakoli ve diğ, 2016; Banthia ve Gupta, 2004; Lawler ve diğ, 2005; Kawamata ve diğ, 2003). Ancak, beton ile olan yüksek aderansı ve tokluğunun yüksek olması bakımından çelik lifler daha çok tercih edilmektedir (Holschemacher ve diğ, 2010). Çelik liflerin, betonun yük taşıma kapasitesi, eğilmede çekme dayanımı, tokluk ve sünekliğinde çok önemli derecede iyileştirmeler yaptığı bulunmuştur (Şahmaran ve Yaman, 2007; Türk ve diğ, 2019; Türk ve diğ, 2021; Türk ve diğ, 2020). Ayrıca, rastgele dağılmış çelik lifler kompozitin dayanım özelliklerinin

yanında bilhassa çatlama sonrası davranışını iyileştirmede büyük önem arz etmektedir. Zira çelik lifler, çatlak yayılmasını mikro düzeyde kontrol etmeye başlayarak, büyük çatlakların oluşmasını geciktirdiği bu da eğilme rijitliğini artırarak kiriş gibi elemanların yük altında eğilmesini azaltmaktadır. Diğer taraftan, çelik liflerin en önemli işlevlerinden biri de, çekme gerilmelerini çatlak boyunca aktararak artık dayanım sağlamasıdır (ACI 544, 2009; Olivito ve Zuccarello; 2010; Soutsos ve diğ, 2012; Caggiano ve diğ, 2012; Chi ve diğ, 2014). Çelik liflerin yukarıda bahsedilen üstün performanslarının yanında, betonun işlenebilirliğini azaltabilmesi, yüksek fiyatı ve zayıf korozyon direnci gibi dezavantajlarının olduğu da bilinmektedir (Mohammadi ve diğ, 2008; Gu ve Ozbakkaloglu, 2016; Grünwald ve Walraven, 2001). Lif takviyeli betonda çelik liflerin yerine plastik veya cam liflerde kullanılabilir. Plastik lifler genellikle çelik liflerden daha iyi dayanım/ağırlık oranı ve uzama davranışı gösterebilirler (Tavakoli ve diğ, 2016). Cam lifler ise, maliyeti, hafifliği ve yüksek çekme dayanımı nedeniyle lif takviyeli betonlarda son yıllarda popüler olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar (Sivakumar ve diğ, 2017; Beigi ve diğ, 2013; Jiang ve diğ, 2018) da, bu liflerin matrisle eklenmesinin büzülme çatlaklarını engellediğini, betonun eğilme ve çekme dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir. Son yıllarda betonda yaygın olarak kullanılan liflerin özellikleri Çizelge 2.7’de görülmektedir (Iyer, 2014; Pyo ve diğ, 2016; Wang ve diğ, 2021)

Çizelge 2.7: Betonda yaygın kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Lif tipi	Çap (µm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)	Uzama (%)
Çelik	5-500	7.84	200	0.5-2	0.5-3.5
PP	20-400	0.9-0.95	3.5-10	0.45-0.76	15-25
PVA	35-48	1.29-1.30	20-42.8	1.1-1.6	6-7
PE	25-1000	0.92-0.96	5	0.08-0.6	3-100
Cam	9-15	2.6	70-80	2-4	2-3.5
Bazalt	9-23	2.6-2.7	90-110	4.15-4.80	2.5-3.15
Karbon	8-9	1.6-1.7	230-380	2.5-4	0.5-1.5
Naylon	23-400	1.14	4.1-5.2	0.75-1	16-20

Tüm bunlara ilaveten, lif takviyeli betonların gelişmesi ve ilerlemesinde işlenebilirlik önemli rol oynamaktadır (Kuder ve diğ, 2007; Yardımcı ve diğ, 2014; Paja ve diğ, 2013). Zira taze haldeki betonda liflerin üniform dağılmaması ve topaklanması gibi sorunlar sertleşmiş betondan istenen düzeydeki özelliklerin elde edilmesini zorlaştıracaktır. Bunun nedeni, lifler ile iri agrega arasındaki boyutsal uyumluluğun parçacıklarının göreceli hareketliliğini etkilemesidir (Figueiredo ve Ceccato, 2015). Ayrıca, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi, liflerin, ıslatılması gereken yüzey alanını arttırarak çimento tanelerini hidrate etmek için gereken serbest su miktarını azaltabilirler (El-Dieb ve Taha, 2012; Centonze ve diğ, 2016). Bu gibi işlenebilirlikteki azalmalar, matris bileşenlerine, kullanılan liflerin tipine, geometrisine, narinliğine, miktarına ve yönlenmesine bağlıdır (El-Dieb ve diğ, 2012; Figueiredo ve diğ, 2015; Silva ve diğ, 2017; Mazaheripour ve diğ, 2011). Bu sebeplerden dolayı, lif takviyeli betonun etkin bir şekilde kullanılabilmesi için, liflerin çimento esaslı malzemelerin ve betonun taze haldeki reolojik performansı üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç vardır. Diğer taraftan, bu soruna çözüm açısından, bir yüksek lisans tez çalışmasında (Dönmez, 2020) karma lif takviyeli KYB'nin işlenebilirlik ve mekanik özellikleri üzerinde, çimento yerine ikameli edilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kireçtaşı tozu içeren ikili, üçlü ve dörtlü harmanlı bağlayıcı sistemlerin etkisi araştırılmıştır. Sonuçta, karma lif takviyeli KYB'ler için işlenebilirlik açısından en iyi harmanlamanın çimentoyla yer değiştirilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kireç taşı tozundan oluştuğu bulunmuştur.



Şekil 2.11: Liflerin serbest suyu azaltma etkisi

2.2.1 Liflerin kullanım şekilleri

Mekanik olarak gevrek bir malzeme olan betonun mühendislik özelliklerinin en uygun performansa ulaşabilmesi için betonda farklı tip, uzunluk ve narinlikte lifler kullanılmaktadır. Betonda kullanılacak lifler farklı mekanik ve geometrik özellikleri açısından oldukça geniş bir yelpazede değişmektedir. Örneğin, bazı lifler (makro ve mikro çelik lifler) genellikle betonun enerji yutma kapasitesi ile çatlağın başlaması ve ilerlemesini kontrol etmek amacıyla, bazıları (polipropilen lifler) ise yüksek sıcaklıktan dolayı meydana gelebilecek patlamaları önlemek veya plastik rötre çatlaklarını sınırlandırmak amacıyla kullanılır (Bentur ve Mindess, 1990). Çimento esaslı kompozitler üzerine yürütülen çalışmalarda lifler, tek tip veya birden fazla lif tipinin bir arada karma olarak tasarlanmasıyla kullanılabilir.

2.2.1.1 Tek tip lif takviyeli beton

Çimento esaslı kompozitlerde, özellikle betonda genellikle tek tip lif takviyesi kullanılmaktadır. Kullanılan lifin mekanik özellikleri ve hacimce miktarı ilave edilen betonun karakteristiğini etkilemektedir. Yüke maruz betonun göçmesinin, mikro çatlakların birleşip makro çatlakları oluşturması ve makro çatlakların da büyüyerek kırılmaya sebep olması şeklinde çok aşamalı olduğu düşünüldüğünde, tek tip lif takviyesinin sadece sınırlı bir boyuttaki çatlakları köprülemede etkili olacaktır (Banthia ve Soleimani, 2005; Türk ve diğ, 2021).

2.2.1.2 Karma lif takviyeli beton

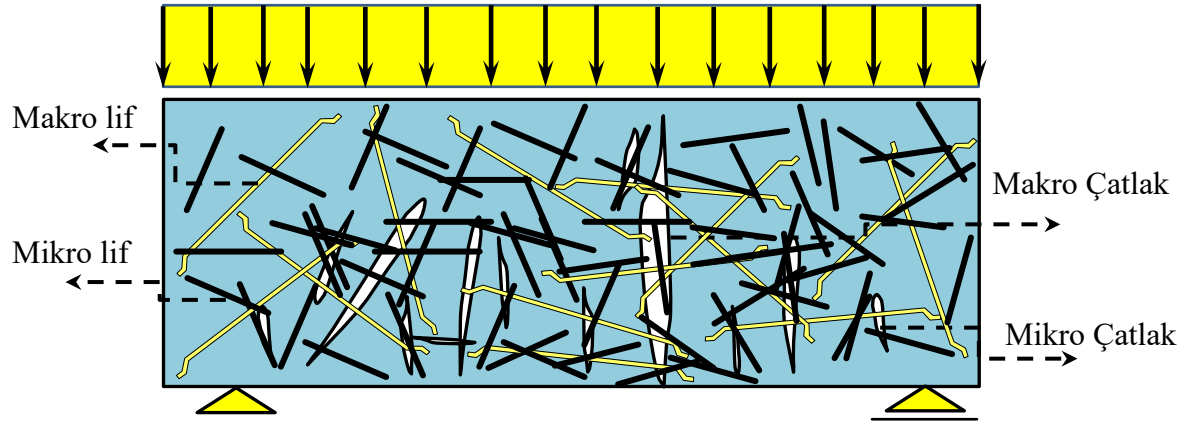
Birden fazla süreksiz lif tipinin bir arada kullanılarak elde edildiği karma lif takviyeli betonlar, tek tip lif kullanımı yerine betonun zayıf olan yönlerini iyileştirebilmek amacıyla birden fazla, farklı tip, boyut ve narinliklerde liflerin birlikte kullanılmasıyla elde edilen kompozitlerdir (Taşdemir ve diğ, 2005; Rossi, 2000). Farklı tip ve boyuttaki liflerin beton karışımına ilavesi ile üretilen karma lif takviyeli betonlarda yük altında oluşan makro ve mikro çatlakların köprülenmesi, mikro çatlakların diğer mikro çatlaklarla birleşerek makro çatlak oluşturmasının önlenmesi veya geciktirilmesi amaçlanır. Son yıllarda yapılan çok sayıda çalışmada (Kwon ve diğ, 2014; Hasan-Nattaj ve Nematzadeh, 2017; Teng ve diğ, 2018; Sulthan ve Salomo, 2019; Türk ve diğ, 2021; Türk ve diğ, 2020; Pakravan ve diğ, 2017), lif takviyeli betonlarda birden fazla lif tipinin karma olarak kullanılmasının, betonun özelliklerinden daha etkin bir şekilde yararlanabileceği vurgulanmıştır. Çünkü tek tip lif takviyeli betonlarda makro ve mikro çatlakların önlenmesi sınırlı seviyede

kalmaktadır. Karma lif takviyeli betonlarda ise, düz mikro liflerin çatlakları sınırlama bakımından elastik bölgede etkili olarak çatlakları azalttığı, böylelikle çekme dayanımını arttırdığı, ileri düzeyde şekil değiştirmelerin olduğu plastik bölgede ise makro liflerin daha etkili olarak yük taşıma kapasitesini, tokluğu ve sünekliği arttırdığı belirlenmiştir (Yoo ve diğ, 2013; Kim ve diğ, 2011; Marković, 2006; Banthia ve Gupta, 2004). Ayrıca, liflerin betonda böyle karma olarak kullanılması sinerji etkisi oluşturmakta ve tek tip lif kullanımına kıyasla elde edilen performans, daha az miktarda liflerin karma olarak kullanılmasıyla elde edilebilmektedir (Abdou ve diğ, 1988). Bundan dolayı, eğilme davranışı genelinde daha iyi bir performans elde etmek için karma lif kullanımı önerilmektedir (Marković, 2006; Rossi ve diğ, 2005; Türker ve diğ, 2021; Türk ve diğ, 2019; Türk ve diğ, 2021; Türk ve diğ, 2020). Türk ve Kına (2017) tarafından karma lif takviyeli çimento esaslı kompozitler üzerine yapılan geniş kapsamlı bir derleme çalışmasında, tek tip liflerin sadece sınırlı bir bölgede etkili olabildiğini ve en uygun performansa ulaşmada karma lif takviyesinin daha ilgi çekici mühendislik özellikleri sunacağını bildirmektedirler. Bentur ve Mindess (1990) yaptıkları çalışmada betonda farklı tiplerdeki liflerin (çelik ve PP) bir arada kullanılmasıyla üstün mekanik özelliklere sahip kompozitler elde etmişlerdir.

Betonarme elemanların mekanik performanslarını geliştirmek için çimento esaslı kompozitlere farklı yapısal tepkileri, boyutları ve işlevsellikleri olan karma lif kombinasyonlarının betona ilave edilmesinin betonunun özelliklerinden daha etkili yararlanabilme imkânı sunacağı belirtilmektedir (Türker ve diğ, 2021). Kına (2019), doktora tez çalışmasında, karma lif takviyeli KYB'den üretilen kirişler üzerinde yaptığı aderans deneyleri sonucunda, özellikle deprem gibi dinamik yüklerden ötürü kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşan enerjinin absorbe edilmesi ve bu bölgelerdeki sık aralıklarla atılan donatılar sebebiyle betonun yerleşmesinde oluşabilecek problemlerin aşılması açısından karma lif takviyesinin büyük bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Dolayısıyla, karma lif takviyeli çimento esaslı kompozitler yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduklarından, özellikle deprem sırasında karma lif takviyeli betonla üretilen elemanların enerji yutabilme kabiliyetinin artması ile birlikte deprem kuvvetinin sönümlenmesi anlamında katkısının büyük olacağı açıktır. Yine bu konuda yapılan bazı çalışmalarda (Lawler ve diğ, 2002; Kına ve Türk, 2021), mikro olarak PVA lifler ile makro olarak çelik lifleri bir arada kullanarak betonun kırılma süreci kontrollü bir şekilde gözlemlenmiştir. Deneylerden elde edilen yük-sehim eğrilerine göre, karma lifli betonarme

numuneler yüksek yük taşıma kapasitesinin yanında çoklu-çatlak (bir tane geniş çatlak yerine çok sayıda küçük boyutlu çatlak) davranışı sergilediği ve böylece daha fazla enerji yutarak kırıldığı bulunmuştur. Bunlara ilaveten, lifler betondaki asal çekme çatlaklarını sınırlayarak kesmeye karşı dayanımı da arttırmaktadır (Bertram ve Hegger, 2008; Voo ve diğ, 2010). Öztekin (2019) yüksek lisans tez çalışmasında büyük ölçekli kiriş elemanların üretiminde, KYB'ye katılan farklı boyuttaki karma çelik liflerin, kesme davranışı üzerinde olumlu yönde etkiye sahip olduğunu ve lifsiz numunelere kıyasla karma lif takviyesinin kirişlerin kesme dayanımını önemli oranda arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca, ACI 318 (2019) şartnamesine göre belirli düzeydeki kesme kuvvetlerini sadece çelik lifler ile karşılanmasına izin verilmektedir.

Betonda karma lif takviyesinin çalışma prensibi en basit haliyle şöyle ifade edilebilir; Şekil 2.12'deki gibi eğilme yüklemesi altında olan bir basit mesnetli bir kiriş düşünelim. Bu kirişin gerek üretimi sırasında hidrasyondan kaynaklanan gerekse de içsel gerilmelerden kaynaklı oluşan mikro düzeydeki çatlaklar, kiriş elemanı yük taşımaya başladıktan sonra büyümeye başlayacaktır. Mikro çatlağın büyümesini sağlayan gerilme enerjisi, öncelikle mikro lifler tarafından karşılanmaya başlanacaktır. Lifler mikro düzeydeki çatlaklar arasında adeta bir köprü vazifesi görerek mikro çatlakların başlamasını ve büyümesini geciktirecektir. Fakat makro lifler arasındaki mesafe fazla olduğundan bu liflerin mikro düzeydeki çatlaklar için etkisi çok azdır. Makro lifler, ancak mikro çatlakların büyüüp makro düzeye eriştiği zaman daha etkili olabilirler (Qian ve diğ, 2000). Mikro lifler, çimento esaslı kompozitin hemen hemen her bölgesine dağılabilecek kadar küçük olduklarından dolayı makro liflerin etkili olamadığı ara bölgelerdeki mikro çatlakların başlamasını ve büyümesini sınırlandırarak betona yüksek çekme dayanımı sağlarlar. Ayrıca, kompozitin her bölgesine dağılmış mikro lifler, mikro düzeydeki çatlakların birleşimini geciktirdiği zaman kompozitin farklı noktalarındaki mikro çatlaklar birleşerek çoklu çatlak davranışını ortaya çıkarırlar. Yük aktarılan mikro lifler, çatlağın ilerlemesini sağlayan gerilme enerjisini karşılamada yetersiz kaldığında, mikro lifler ya kopacak ya da betondan sıyrılacaktır. Mikro lifler koptuktan veya sıyrıldıktan sonra, betona aktarılan gerilme enerjisi tekrar bir mikro life gelene kadar ilerlemeye devam edecektir. Mikro çatlaklar artık büyüyerek makro çatlakları oluşturacağı zamanda mikro lifler etkisini büyük oranda yitirecektir. Bu anda makro lifler devreye girerek makro çatlakları köprülemeye başlayarak elemanın yük taşıma kapasitesini, tokluğunu, sünekliğini ve plastik şekil değiştirme bölgesindeki çatlak davranışını iyileştirecektir.



Şekil 2.12: Karma lif takviyeli kirişte lif ve çatlak gösterimi

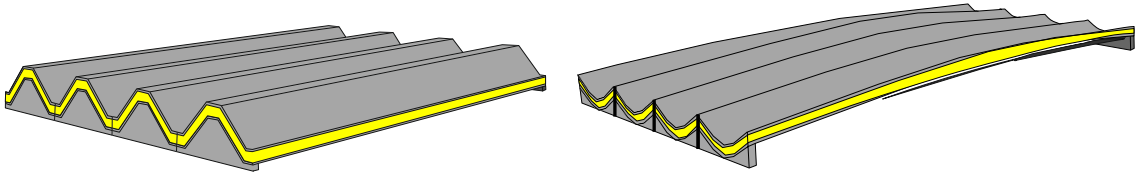


2.3 Katlanmış Plaklar

2.3.1 Katlanmış plaklar ve çalışma prensipleri

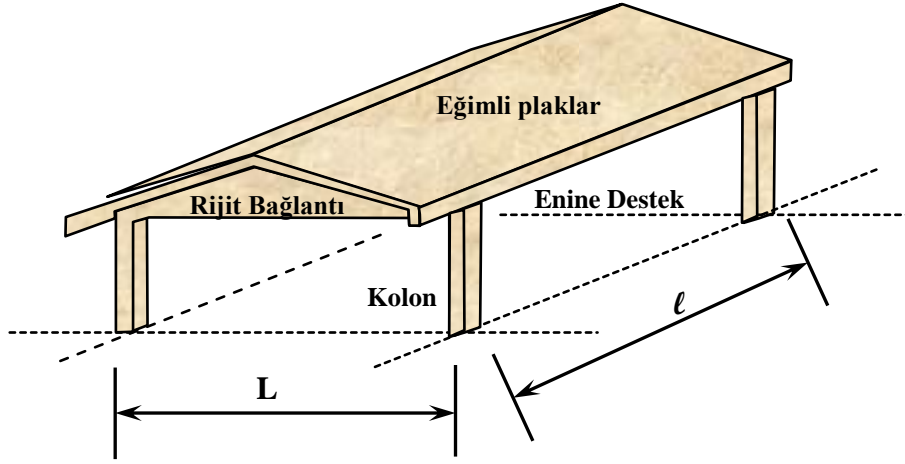
Katlanmış plaklar, yüksek yük taşıma kapasiteleri, ekonomiklik ve estetik görünümleri gibi bazı öne çıkan avantajları nedeniyle son yıllarda dikkatleri üzerine çekmiştir. Kabuk yapıların özel bir sınıfı olan katlanmış plaklar, belirli bir açığa sahip düzlem yüzey plaklardan oluşan mekânsal taşıyıcı sistemlerdir. Katlanmış plaklar malzeme gereksiniminde bir artış olmaksızın doğal rijitlikleri sonucu daha geniş alanları örtebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özelliklerinden dolayı daha az malzeme ve basit kalıp kullanarak büyük açıklıklı alanları daha ucuz ve kolay örtebilirler (Varghese, 2010; Wilby, 2008; Aka ve diğ., 1981).

Bu elemanların çağdaş mühendislik ve mimaride taşıyıcı sistem olarak kullanımı, büyük açıklıklı alanları kapatmak için hafif yapılara ihtiyaç duyulması nedeniyle ortaya çıkmış ve halen popülerliğini korumaktadır (Swatilekha, 2013). Betonarme katlanmış plakların ilk kullanımı 1925'te Almanya'da kömür bunkerlerini kapatmak için olmuştur. Ayrıca, 1930'larda ABD'de büyük ticari ve endüstriyel depolarının çatı taşıyıcı sistemlerini inşa etmek için de betonarme katlanmış plaklar tercih edilmiştir. Avrupa'da bu yapıların kullanımı, avantajları ve faydaları nedeniyle 1950'lerin başına kadar hızla yayılmıştır (Varghese, 2010; Wilby, 2008). Katlanmış plaklar daha çok sanayi yapıları, hangar depoları, yüzme havuzları, spor salonları, kütüphaneler, ofisler, alışveriş merkezleri, bina girişleri, tüneller vb. büyük açıklıklı yapılarda kullanılmıştır. Λ , V, Z, oluk tipi, trapez şekilli vb. gibi geometrik kesit şekli açısından birçok katlanmış plak türü vardır (Şekil 2.13).



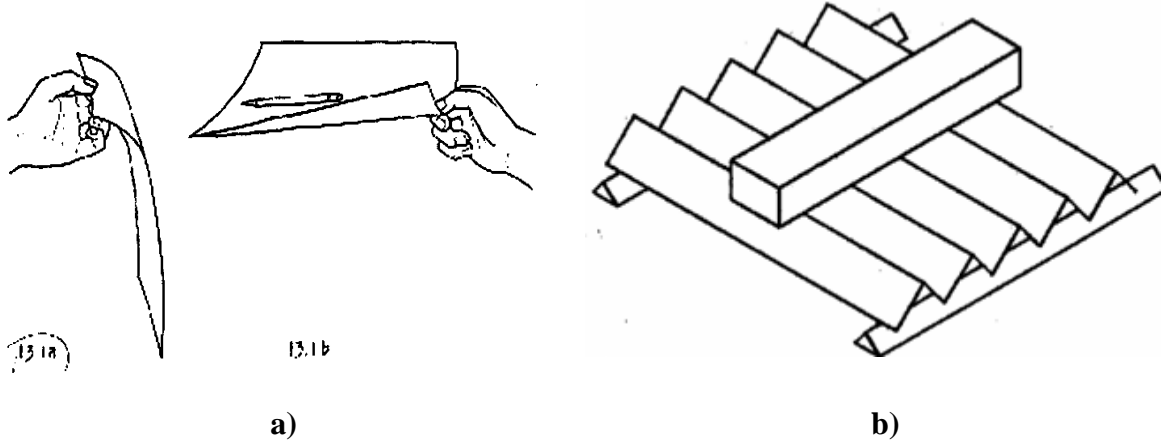
Şekil 2.13: Trapez ve kavisli katlanmış plak kesitleri

Bir betonarme katlanmış plak taşıyıcı sistemi, eğik plaklar, plakları rijitleştiren kenar elemanlar, yükleri mesnetlere aktaran enine destekler ve sistemi mesnetlendiren kolonlar olmak üzere dört ana parçadan oluşur (Şekil 2.14) (Aka ve diğ., 1981).



Şekil 2.14: Katlanmış plak elemanları

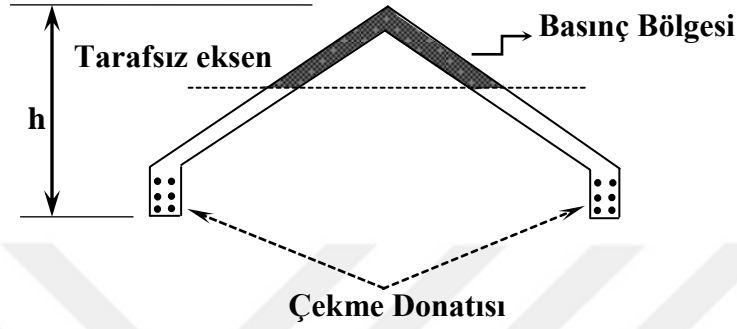
Katlanmış plakların çalışma prensibi en basit haliyle şöyle açıklanabilir; Şekil 2.15.a'daki gibi elde tutulan bir kâğıt bir kenarından düz olarak tutulduğunda kolayca eğilir ve kendi ağırlığını bile taşıyamaz. Aynı kâğıt kıvrılarak, hafifçe yukarı doğru eğri bir biçim alacak olursa, kendi ağırlığına ek olarak belirli bir düzeyde yük de taşıyabilir. Bu yük taşıma kapasitesi, kullanılan malzemenin kalite ve boyutlarını arttırarak değil, aynı malzemeye uygun bir şekil vererek artırılabilir. Kâğıda geometrik olarak yukarı doğru eğrilik verilerek, diğer bir ifadeyle basınca çalıştırılarak tabaka kâğıdın rijitliği ve yük taşıma kapasitesi arttırılmıştır (Schierle, 2006).



Şekil 2.15: Katlanmış plakların çalışma prensibi

Şekil 2.15.b'de ise katlanma sayısının artmasıyla sözü edilen kâğıt daha da dirençli hale gelmiştir. Bunun nedeni, boyuna doğrultudaki levha çalışması, bütün sistem birlikte düşünüldüğünde Şekil 2.14'de gösterildiği gibi, l açıklığında uzay kiriş gibi göz önüne alınabilir. Şekil 2.16'da gösterildiği gibi, iki noktadan mesnetlenmiş bir uzay kiriş

kesitinde düşey doğrultuda etkiyen yükler altında oluşan tarafsız eksenin üst kısmında basınç ve alt kısmında ise çekme bölgeleri oluşmaktadır. Buradan, iki düzlem elemanın belli bir açı altında birleştirilmeleri ile oluşan sistemin bir uzay yüzeysel taşıyıcı olarak çalıştığından dolayı, yük taşıma kapasitesinin aynı elemanların yatay kullanılmaları durumuna kıyasla daha çok artmaktadır (Aka ve diğ, 1981).



Şekil 2.16: Betonarme katlanmış plakların uzay kiriş olarak çalışması

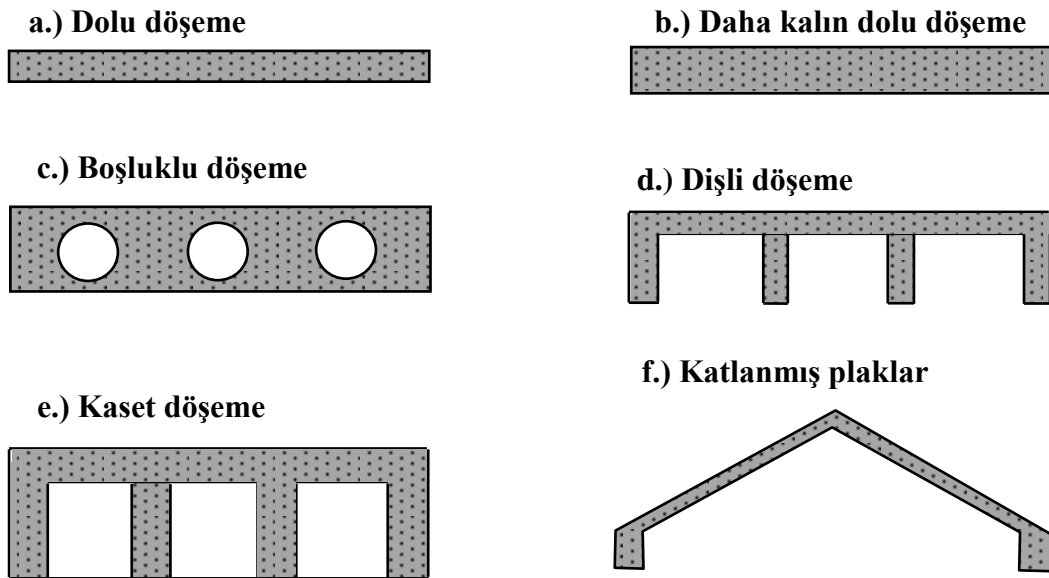
Diğer taraftan betonarme katlanmış plaklar hem düzlemsel hem de kayma gerilmelerine maruz kaldığından enine eğilmeye ek olarak boyuna doğrultuda eğik kirişler olarak dikkate alınırlar (Naveen, 2014; Aka ve diğ, 1981). Winter ve Pei (1947) tarafından betonarme katlanmış plakların açıklığı, genişliğinin üç katından daha fazla olduğu durumda kiriş teorisinin bu plaklarda uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, betonarme katlanmış plaklarda iki düzlemsel plağın birleşim noktası, plakları bir arada tuttuğu için kayma etkisi çok önemlidir (P.C. Varghese, 2010). Bundan dolayı bu bölgeye ek kayma donatıları yerleştirilir.

2.3.2 Betonarme katlanmış plakların kiriş ve döşemelerle karşılaştırılması

Bilindiği üzere, eğilmeye maruz bir kiriş elemanın atalet momenti ve dolayısıyla yük taşıma kapasitesi yüksekliğin karesi ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla, yüksekliği arttıkça atalet momenti ile birlikte kirişin ağırlığı da artmaktadır. Bu nedenle, büyük açıklıkları geçmede dayanım/ağırlık oranı çok düşük olan betonarmeden üretilmiş kirişler, belli açıklıklardan ($l > 7$ m) sonra kendi ağırlıkları altında aşırı sehim yaptıklarından dolayı, uygulanabilirlikleri mümkün değildir. Betonarme katlanmış plaklar ise, kirişlere kıyasla daha büyük yüksekliğe sahip olmasına rağmen zati ağırlığı dolu gövdeli bir kiriş elemana göre daha azdır. Bu da betonarme katlanmış plakları hem taşıyıcı olarak hem de büyük açıklıklı alanları örtmede daha avantajlı hale getirmektedir (Aka ve diğ, 1981).

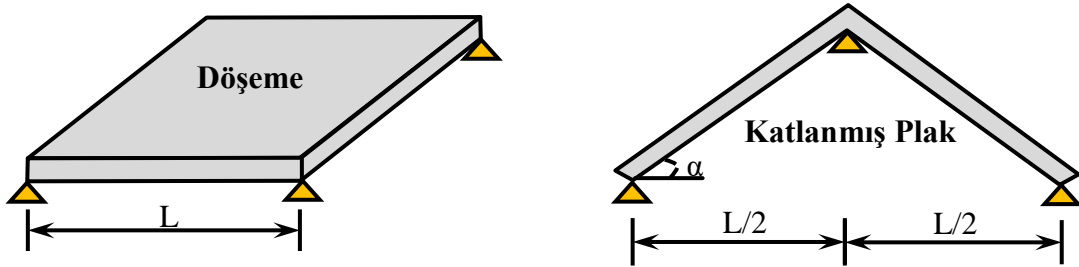
Prefabrike bir takım kiriş örneklerinde gövdenin yük taşımaya katkısı olmayan beton kısımlarında boşluk (kutu kesit kiriş elemanlar) oluşturularak kirişin zati ağırlığını azaltma çabası göze çarpmakta ise de, büyük açıklıkları geçmede uzay levha taşıyıcı olarak çalışan betonarme katlanmış plağın sahip olduğu performansa ulaşmamaktadır (Türkçü, 2003). Bununla ilgili olarak literatürde belirtildiği gibi “Bir katlanmış plak aynı yüksekliğe sahip ve kalınlığının iki katındaki bir kiriş kadar yük taşır” (Salvadori, 1966).

Estetik ve uygulama kolaylığı bakımından geniş alanları örtmede sıkça kullanılan, bir doğrultuda çalışan kirişli (Şekil 2.17.a), kirişsiz (Şekil 2.17.b), boşluklu döşemeler (Şekil 2.17.c), dişli (Şekil 2.17.d) ve kaset- kiriş (Şekil 2.17.e) gibi uygulamalar belli açıklıktan sonra ekonomiklik bakımından tartışılır hale gelmektedir (Türkçü, 2003). Döşemeler eğilme elemanları olduklarından dolayı üzerine etkiyen sabit ve hareketli yükleri kirişler aracılığıyla veya kirişsiz döşemelerdeki gibi doğrudan kolon ve/veya perde taşıyıcı elemanlara aktarmaktadır. Bu da özellikle çok geniş açıklığa sahip döşemelerde, döşeme serbest açıklığı arttıkça eğilme altında çok fazla sehim yapmaması için plak kalınlığını artması gerekmektedir. Büyük açıklıkları bu denli kalın bir plak ile geçmek ise ekonomik değildir. Bunun yanında, binanın yatay rijitliğini de azaltan bu tür döşemeler (kirişsiz, dişli, kaset-kiriş döşemeler) deprem esnasındaki davranışları bakımından da uygun değildir. Çünkü özellikle dişli döşemeler hiç deprem riski olmayan Almanya gibi ülkelerden taklit edilmiştir.



Şekil 2.17: Katlanmış plak ve döşemelerin karşılaştırılması

Bunların yanında betonarme katlanmış plaklar (Şekil 2.17.f), geniş açıklıkları geçmede hem ekonomiklik hem de yük taşıma kapasitesi bakımından önemli bir alternatiftir. Zira bilindiği üzere, eğilmeye çalışan elemanların yük taşıma kapasitesini arttırmak için basınç blok derinliğini artırmak amacıyla daha fazla donatı takviyesi gerekmektedir. Fakat betonarme katlanmış plaklar kesitleri itibariyle sahip oldukları yüksek rijitliklerinin sonucu olarak eğilme altında daha yüksek basınç blok derinliğine sahiptirler. Bu da betonarme katlanmış plak elemanların, benzer kesit ve donatıya sahip kirişlere kıyasla daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olmalarını mümkün kılmaktadır. Diğer taraftan, betonarme katlanmış plakların kalınlığı yukarıda bahsi geçen tüm döşemelere kıyasla daha düşük olduğu bilinmektedir. Şöyle ki; bir L açıklığını herhangi bir döşeme tipi ile geçmek bakımından, tek katlanması olan katlanmış plak ile karşılaştırıldığında, katlanmış plakların yük taşımada daha etkin olacağı açıktır. Bunun nedeni, katlanma kenarlarının (katlanma açısı $\alpha > 20^\circ$ olmak şartıyla) bir mesnet gibi çalışmasından dolayı, geçilecek serbest açıklık yaklaşık $L/2$ 'ye düşmektedir (Şekil 2.18). Geçilecek açıklık sabit ve plak kalınlığı değişken olarak alındığında, katlanmış bir yüzeyin katlanma sayısı arttıkça, plak kalınlığının azalacağı açıktır (Türkçü, 2003). Bu da katlanmış plakların, yatay plaklara kıyasla hem yük taşıma kapasitesi hem de ekonomiklik bakımından avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

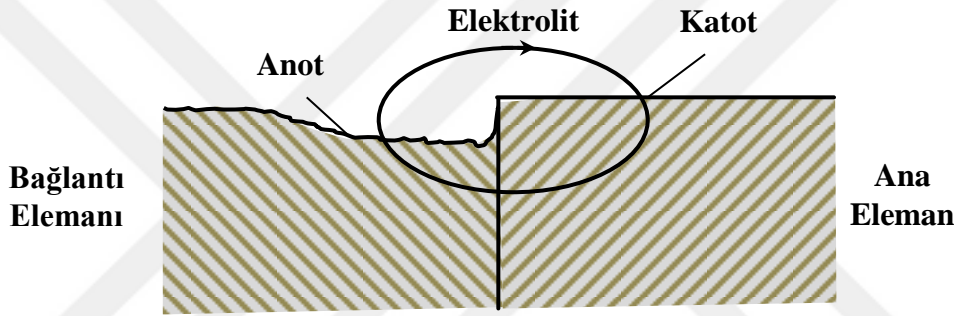


Şekil 2.18: Betonarme döşeme ve katlanmış plakların hesap açıklığı

2.3.3 Katlanmış plakların malzeme bakımından karşılaştırılması

Özellikle sanayi ve hangar tipi yapılar, geniş bir alanı daha etkin ve rahat kullanmak amacıyla büyük açıklıklı olarak inşa edilmektedir. Genellikle bu yapıların çatı taşıyıcı sistemi betonarme, çelik veya ahşap malzemeden yapılmaktadır. Günümüzde ise büyük açıklığa sahip bu tür yapılar genellikle taşıyıcı sistem olarak çelik malzemeden veya öngermeli prefabrik betonarme elemanlardan yararlanılarak inşa edilmektedir. Fakat büyük alanların örtülmesinde kullanılan çelik yapı elemanlarının atmosferik korozyona maruz

kalması kaçınılmazken, öngermeli betonarme elemanların tasarımı, üretimi ve uygulaması iyi bir mühendislik hizmeti ve zorlu bir süreç gerektirir. Korozyon, çelik yapılarda periyodik bakımlar gerektirmesi açısından önemli bir problem olup, ciddi maddi kayıplara sebep olmaktadır (Wua ve diğ, 2022; Samie ve diğ, 2007; Morcillo ve diğ, 2013; Antonio ve diğ, 1999; Corvo ve diğ, 2007). Çelik elemanlarda oluşabilecek çok önemli diğer bir sorun ise Şekil 2.19’de görüldüğü gibi bağlantı elemanlarının (bulon, perçin gibi) anot olma tehlikesidir. Bilindiği üzere, anot tarafındaki metal korozyona uğrarken katot taraftaki metal korunmaktadır. Bağlantı elemanların anot olması ile iyonlar anottan katoda doğru bir akış göstermektedir. Bu da zamanla bağlantı elemanların kesit kaybına ve yapının lokal veya tamamen göçmesine sebebiyet vermektedir. Bu durum hem maddi kayıplara hem de can kayıplarına neden olmaktadır (Wua ve diğ, 2022).



Şekil 2.19: Galvani Pili

Özellikle çelik konstrüksiyon yapılarda, projelendirme aşaması bu alanda bir uzmanlık gerektirmektedir. Bunun yanında, bu tür yapıların uygulama aşamasında, bağlantı elemanlarının montajı ve kaynağı gibi önemli işler için kalifiye elemene ihtiyaç duyulmakta ve bu durum teknik eleman ücret giderlerini arttırmaktadır. Bir diğer husus ise, çeliğin yangına dayanıklılığının düşük olmasıdır. Çünkü yanıcı olmamasına rağmen çeliğin 80-100 °C sıcaklıklarda mekanik özellikleri olumsuz etkilenmeye başlamaktadır.

Günümüzde çok büyük açıklıklı yapıların (köprü, hangar ve sanayi vb.) örtülmesinde kullanılan çelik elemanların yanında yaygın olarak öngermeli ve ardgermeli yapı elemanlar da kullanılmaktadır (Karaesmen, 2015; Keyder, 2013). Öngermeli ve ardgermeli olarak üretilen elemanların avantajlarının yanında bazı dezavantajları da olduğu bilinmektedir. Örneğin, ardgerme tekniği ile yapılan elemanlarda uç ankraj kullanılır. Uç ankrajlar pahalı olduklarından ardgermeli kirişlerin üretim maliyetini arttırmakta ve aynı zamanda ankrajlar her istendiğinde kolayca bulunamayabilmektedir. Bunun yanında, öngermeli ve ardgermeli yapı elemanların kesit biçimleri (I kesit, kutu kesit, U kesit gibi),

yerinde dökme yapıların betonarme kesitleri ile karşılaştırıldığında çok karmaşıktır. Bu durum, uygulamada bazı zorluklara sebebiyet vermekte ve dolayısıyla maliyeti arttırmaktadır. Şöyle ki, dikdörtgen olmayan kesitlerde, servis yüklerinin sebebiyet verdiği karmaşık bir gerilme dağılımı söz konusu olacağından, tüm bu kesit içi gerilmelerini dengeleyecek ve çok pahalı olan ardgerme halatlarının kesitin hem alt hem de üst kısmına yerleştirilme zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (Karaesmen, 2015). Dolayısıyla, uygulama zorluklarına bağlı olarak, kalıp ve tüm işçilik giderleri artmaktadır. Tüm bunların sonucunda, öngermeli ya da ardgermeli yapı elemanların tasarım ve yapımında hem deneyimli teknik elemanlara hem de kalifiye elemanlara ihtiyaç doğmaktadır.

Bu bağlamda, sanayi ve hangar tipi yapılar ile konferans salonu ve spor tesisleri gibi yapılardaki çok büyük açıklıkların geçilmesinde betonarme katlanmış plak kullanmak, yukarıda bahsedilen çelik ve öngörme ile tasarlanmış çatı sisteminde söz konusu olumsuz yönleri bertaraf etmek açısından daha avantajlı olacaktır. Çünkü betonarme yapılar yangın tehlikesi durumunda yüksek sıcaklığa karşı çeliğe göre çok daha iyi bir dayanıklılığa sahiptirler. Çünkü betonun 250-300 °C sıcaklıklara kadar dayanabildiği bilinmektedir (Fares ve diğ, 2009; Khatip, 2008). Bu sebeple, betonarme yapılar genellikle yangın esnasında ani olarak göçme göstermezler. Sonuçta, büyük açıklıkların geçilmesinde malzemesi betonarme olan katlanmış plakların kullanılması ile yukarıda bahsedilen muhtemel sorunları minimize edecek ve dolayısıyla maliyeti en aza indirmek mümkün olacaktır. Çizelge 2.8’de çatı taşıyıcı sisteminde kullanılan malzemelerin yangındaki performansları verilmiştir (ASBL, 2007).

Çizelge 2.8: Korumasız yapı malzemelerinin yangındaki performansı

Korumasız Yapı Malzemesi	Yangına Dayanıklılık	Yanıcılık	Yangın Yükünü Artırma Etkisi	Belli Bir Kesitte Isı Artış Oranı	Yangına Karşı Kendiliğinden Koruma	Yangın Sonrası Onarılabilirlik
Ahşap	Düşük	Yüksek	Yüksek	Çok düşük	Çok yüksek	Yok
Çelik	Çok düşük	Yok	Yok	Çok yüksek	Düşük	Düşük
Beton	Yüksek	Yok	Yok	Düşük	Yüksek	Yüksek

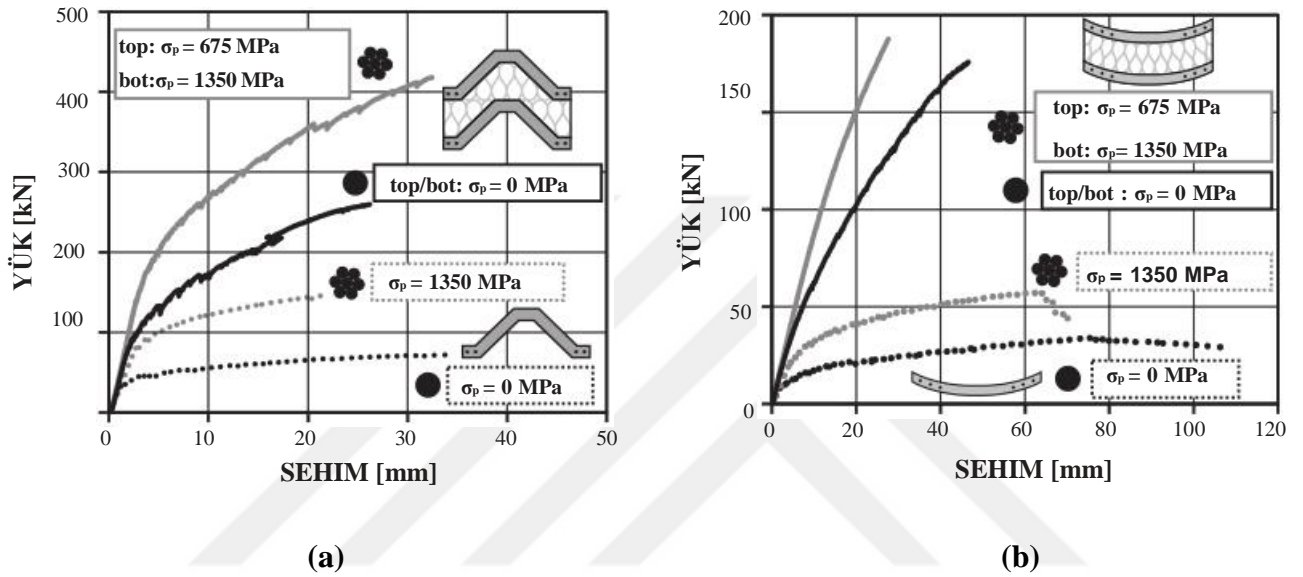
Betonarme yapıların çevresel etkilere ve neme olan dayanıklılığı, özellikle çelik yapılara kıyasla çok daha iyi olduğundan dolayı daha uzun bir servis ömrüne de sahiptirler. Ayrıca, mühendislik uygulamalarında ekonominin önemli bir parametre olduğu göz

önünde bulundurulduğunda, betonun, çimento, kum, çakıl ve su gibi genelde ucuz ve yöresel olan malzemeler ile üretilmesi çeliğe kıyasla önemli bir ekonomiklik sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında da KYB'nin önemli bileşenlerinden olan ve endüstriyel atık olarak ortaya çıkan uçucu kül gibi puzolanik özelliğe sahip malzemelerin de çimento yerine kullanılacak olması ucuz ve çevre dostu bir betonun elde edilmesini sağlayacaktır.

Hem geleneksel hem de kendiliğinden yerleşen karma lif takviyeli beton ile üretilmiş bir döküm V veya Λ betonarme katlanmış plak elemanların deneysel olarak incelenmesi üzerine literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, sandviç tipli yâda kutu kesitli ve tek lif takviyeli betonlardan üretilmiş katlanmış plak elemanlarla ilgilidir. Literatürde yer alan lif takviyeli betondan üretilen katlanmış plak elemanlarla ilgili çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Stark ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton (UYPLTB) ile üretilmiş öngermeli katlanmış ve kavisli plak beton sandviç elemanların, uzun açıklıklı çatı yapılar için bazı önemli fikirler ve üretim tekniği sunmak için bu çalışmayı gerçekleştirdiklerini ileri sürmektedirler. Büyük ölçekli üretilen katlanmış ve kavisli plak beton sandviç elemanları sırasıyla, 2.5 m ve 4.1 m uzunluğa sahiptirler. Deneysel çalışma sürecinde, katlanmış plak beton elemanların üretiminde kullanılacak olan çelik lif takviyeli betonun taze, mekanik ve dayanıklılık özellikleri açısından bazı şartları yerine getirmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu amaçla, UYPLTB karışımının bileşenleri, bağlayıcı olarak 825 kg/m^3 çimento ile 175 kg/m^3 silis dumanı, agrega olarak 200 kg/m^3 kuvars tozu ile 975 kg/m^3 0.125-0.5 mm boyutunda kum, 9 mm uzunluğunda ve ortalama 0.16 mm çapında 70.7 kg/m^3 çelik liften oluşurken, su/(çimento+silis dumanı) 0.175 ve istenilen işlenebilirliğin sağlanması için süperakışkanlaştırıcı miktarı 7.5 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, karışıma daha yüksek oranlarda çelik lif eklenmesi, özellikle işlenebilirlik açısından olumsuz bir etki oluşturacağı için bu oran % 0.9 ile sınırlandırılmıştır. Çünkü lifli beton karışımın katlanmış plaklar gibi ince cidarlı elemanların kalıplarına yerleşebilme yeteneğinin büyük öneme sahip olduğu dikkate alınmıştır. Katlanmış ve kavisli plak elemanların üretiminde kullanılan çelik lif takviyeli betonun mekanik özellikleri ile ilgili deneylerden, 28 günlük basınç dayanımı 170 MPa, elastisite modülü yaklaşık 45.000 MPa ve eğilme dayanımı 18–20 MPa olarak belirlenmiştir. Üretilen 2.50 m uzunluğa sahip büyük ölçekli katlanmış plak ile 4.1 m uzunluğa sahip kavisli plak elemanları üç ve dört noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir.

Sonuç olarak, ultra yüksek performanslı betona takviye edilen lifler sayesinde çatlakların köprülenmesinden dolayı çatlak genişliklerinin çok küçük boyutlarda kalmasını sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Şekil 2.20.a ve b’de görüldüğü gibi, ısı ve ses yalıtım için arasına poliüretan yerleştirilmiş ikiyüzlü katlanmış ve kavisli plakların, tek katlanmış ve kavisli plaklara kıyasla yük taşımada yaklaşık 3-4 katına kadar daha fazla yük taşıdığı sonucuna varmışlardır. Bunun yanında, katlanmış plakların kavisli plaklara göre yaklaşık 2 kat daha fazla yük taşıdığını tespit etmişlerdir.



Şekil 2.20: Katlanmış ve kavisli plak elemanların yük-sehim eğrileri (Stark ve diğ., 2017)

Farzad ve diğ. (2019) tarafından hızlandırılmış köprü uygulamalarında ultra performanslı lif takviyeli beton (UPLFB) kullanarak çelik-UPLFB sandviç olarak isimlendirilen bu inovatif sistemin davranışını değerlendirmek için deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirmişlerdir. Büyük ölçekli üretilen çelik-UPLFB sandviç elemanları 6.1 m uzunluğa sahiptir. İnovatif olan bu sistemde, tablasız bir kiriş oluşturmak amacıyla katlanmış iki ince paslanmaz çelik plak arasına UYPLTB yerleştirilmiştir. Bu UYPLTB karışımının bileşenleri, bağlayıcı olarak 720 kg/m^3 portland çimento ve 234 kg/m^3 silis dumanı, agrega olarak 213 kg/m^3 kuvars tozu ile 1032 kg/m^3 ince kum ve 13 mm uzunluğunda çekme mukavemeti 2800 MPa olan 157.8 kg/m^3 çelik liften oluşmaktadır. Ayrıca, istenilen işlenebilirliğin sağlanması için süperakışkanlaştırıcı miktarı 31.08 kg/m^3 ve hızlı priz alması için 30.3 kg/m^3 priz hızlandırıcı kullanılmıştır. Hızlandırılmış köprü uygulamaları için üretilen elemanlarda kullanılacak UYPLTB için mekanik özellikleri ile ilgili deneylerden, 28 günlük basınç dayanımı 174 MPa, elastisite modülü yaklaşık 52.000 MPa ve doğrudan çekme dayanımı 9.7 MPa olarak bulunmuştur. Sonuç

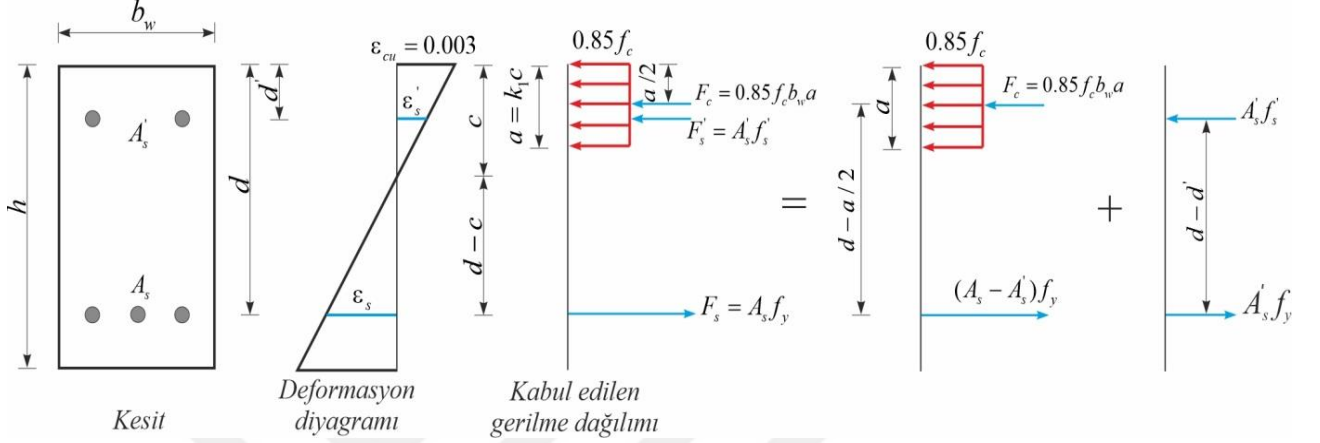
olarak, katlanmış plak formundaki (çelik-beton-çelik sandviç) kesitlerin UYPLTB kullanılarak oluşturulmasıyla geleneksel köprü tasarım ve yapımındaki eksikliklerin giderilmesinde etkili olabileceği belirtilmiştir. Diğer taraftan, UYPLTB'nin ilk maliyeti yüksek olmasına rağmen, betonun yerleştirilmesi sırasında herhangi bir harici vibratöre ve kalifiye elemana ihtiyaç duyulmaması, betonun geçirimsiz özelliğinden dolayı agresif çevresel etkilere karşı dayanıklı olması ve böylece servis ömrünün geleneksel betona göre daha avantajlı olmasının önemine dikkat çekilmiştir. Üretim tekniği üzerine yapılan fizibilite çalışmalarında ise, hem inşaat aşamasını kolaylaştırabildiği hem de hızlandırabildiğinin kanıtlandığı ve inanılmaz derecede sünek davranış sergilediği deneysel verilerin yanı sıra sayısal değerlerle de doğrulanmıştır.

2.4 Geleneksel ve Lif Takviyeli Betonarme Kirişlerin Tasarım Yöntemlerine Göre Moment Taşıma Kapasitelerinin Hesaplanması

Mevcut tasarım kodlarında (ACI 318, EC), geleneksel betonarme yapılar için geliştirilen tasarım ilkeleri tanıtılmış ve uygulamada başarıyla kullanılmıştır. Ancak, lif takviyeli KYB'nin basınç, çekme ve sehim sertleşmesi davranışları geleneksel betondan farklı olduğundan, bu ilkeler lif takviyeli KYB ile üretilmiş betonarme elemanların moment taşıma kapasitesi hesabında doğrudan uygulanamaz. Zira beton gerilme bloğunun şekli, liflerin geometrik özellikleri (tip, boyut, narinlik gibi), liflerin hacimsel oranı ve liflerin matriste olan yönlendirme durumu gibi birçok parametreler lif takviyeli KYB ile üretilmiş betonarme elemanların moment taşıma kapasitesi üzerinde etkilidir. Bununla birlikte, yüksek dayanımlı lif takviyeli betonarme elemanların moment taşıma kapasitenin hesaplanması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Khalil ve Tayfur, 2013; Fehling ve diğ., 2008; Dancygier, 2006; Qi ve diğ., 2018; Imam ve Vandewalle, 1995; Xia ve diğ., 2018). Bu çalışmaların, sadece tekli çelik lif kullanımına odaklandığı ve birden fazla lif türünün beton karışımında karma olarak kullanılmasının moment taşıma kapasitesi hesabında nasıl dikkate alınacağı ile ilgili herhangi bir sayısal yaklaşım veya öneri sunmadığı görülmektedir. Ayrıca yüksek dayanımlı lif takviyeli betonarme elemanların moment taşıma kapasitesine ilişkin bazı öneriler (Khalil ve Tayfur, 2013; Ning ve diğ., 2015; Amin ve diğ., 2017; Danha, 2015) sunulsa da, bu yaklaşımlar henüz American Concrete Institute (ACI), International Building Code (IBC) ve EuroCode (EC) gibi bir tasarım standardına ve koduna dahil edilmemiştir.

2.4.1 Geleneksel betondan üretilen çift donatılı betonarme kirişlerin moment taşıma kapasitesi

Park ve Paulay'a (1975) göre, çift donatılı dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin moment taşıma kapasitesi, Şekil 2.21'de gösterildiği gibi, beton çekme dayanımı ihmal edilerek gerilme ve şekil değiştirme diyagramı kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 2.21: Betonarme kirişlerin şekil değiştirme ve gerilme diyagramları

Bu değeri belirlemek için, tarafsız eksenin (c) konumunu verecek olan bir yatay denge denklemi yazılır. Bu denklemi yazmak için, kirişin çekme bölgesindeki kuvvet, basınç bölgesindeki kuvvetlere eşitlenir. Başlangıçta, basınç bölgesindeki donatının aktığı ve gerilmenin $f'_s = f_y$ olduğu varsayımı yapılır. Şekil 2. 21'deki kuvvet diyagramından kuvvetleri birbirine eşitleyip Denklem 2.1 elde edilir. Denklem 2.1'de basınç blok derinliği (a) yerine Denklem 2.2 yazılır ve düzenlenirse Denklem 2.3 elde edilir. Burada sayısal değerler yerine yazılırsa tarafsız eksen derinliği bulunabilir.

$$F_c + F'_s = F_s \rightarrow 0.85 f_c \times b_w \times a + A'_s \times f_y = A_s \times f_y \quad (2.1)$$

$$a = k_1 \times c \quad (2.2)$$

$$c = \frac{(A_s - A'_s) \times f_y}{0.85 f_c \times b_w \times k_1} \text{ bulunur.} \quad (2.3)$$

Burada k_1 Denklem 2.4 ile hesaplanır:

$$k_1 = (1.05 - 0.007 \times f_c) \geq 0.65 \quad (\text{ACI 318, 2019}) \quad (2.4)$$

Daha sonra basınç bölgesindeki donatının birim şekil değıştirme değeri Denklem 2.5 ile hesaplanır ve donatının nihai birim şekil değıştirme değeri ile karşılaştırılır. Eğer, $\varepsilon_s' > \varepsilon_y$ ise yapılan varsayım geçerlidir. Buna göre kirişin moment taşıma kapasitesi Denklem 2.6 ile hesaplanır:

$$\varepsilon_s' = \frac{c-d'}{c} \times \varepsilon_{cu} > \varepsilon_y \quad (2.5)$$

burada, f_y boyuna çekme donatının akma dayanımı, f_s' boyuna basınç donatısının akma dayanımı, c tarafsız eksen derinliği, ε_{cu} betonun nihai basınç birim şekil değıştirmesi, ε_y donatının nihai birim şekil değıştirmesi, ε_s' boyuna basınç donatısının birim şekil değıştirmesi ve d' paspayıdır.

$$M_r = F_c \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + F_s' \times (d - d') = 0.85 \times f_c \times b_w \times a \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \times f_y \times (d - d') \quad (2.6)$$

burada, F_c basınç blok derinliğinin oluşturduğu kuvvet, F_s' basınç donatısının oluşturduğu kuvvet, f_c beton basınç dayanımı, b_w kiriş gövde genişliği, a basınç blok derinliği, A_s' basınç donatısının kesit alanı ve d faydalı yüksekliktir.

Eğer $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ ise, basınç donatısı akıyor ve yukarıda hesaplanan c doğru değildir. $f_s' < f_y$ varsayımı yapılarak ve yeni bir yatay denge denklemi yazılmalıdır. Denklem 2.8'de f_s' yerine Denklem 2.7 yazılıp Denklem 2.8'in düzenlenmesinden elde edilen Denklem 2.9 ile kirişin tarafsız eksen derinliği bulunur.

$$f_s' = E \times \varepsilon_s' = E \times \frac{c-d'}{c} \times \varepsilon_{cu} \quad (2.7)$$

$$0.85 \times f_c \times b_w \times c \times k_1 + A_s' \times E \times \frac{c-d'}{c} \times \varepsilon_{cu} = A_s \times f_y \quad (2.8)$$

$$(0.85 \times f_c \times b_w \times k_1) \times c^2 + (\varepsilon_{cu} \times E \times A_s' - A_s \times f_y) \times c - A_s' \times \varepsilon_{cu} \times E \times d' = 0 \quad (2.9)$$

Daha sonra kirişin moment taşıma kapasitesi Denklem 2.10 ile hesaplanabilir.

$$M_r = F_c \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + F_s' \times (d - d') = 0.85 \times f_c \times b_w \times a \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \times E \times \frac{c-d'}{c} \times \varepsilon_{cu} \times (d - d') \quad (2.10)$$

2.4.2 Lif takviyeli geleneksel betondan üretilen betonarme kirişlerin moment taşıma kapasitesi

Geleneksel beton eğilme teorisinde (Park ve Paulay, 1975; ACI 318, 2019), betonarme kirişlerin moment taşıma kapasitesi hesaplanırken, betonun çekme dayanımı genellikle ihmal edilir. Bunun nedeni betonun çekme dayanımı basınç dayanımına kıyasla çok daha düşük olmasıdır. Geleneksel betona kıyasla yüksek çekme dayanımına sahip olan çelik lif takviyeli beton, betonun düşük çekme dayanımını gidermek için geliştirilmiştir (Hannant, 1987). Zira çelik lif takviyeli beton, çatlaklar arasında bir bağ kurarak her iki çatlak yüzü arasında belirli bir düzeyde gerilme transferi ile artık dayanım sağlar. Sağlanan bu artık dayanımla matris çatlaması meydana geldikten sonra da eleman yük taşımaya devam eder. Sağlanan bu artık dayanımın büyüklüğü lif, matris ve lif-matris ara yüzeyi özelliklerine bağlıdır (Ding ve diğ., 2012; Ning ve diğ., 2015). Bu nedenle, moment taşıma kapasitesinde betonun çekme dayanımı, ACI 318'e göre geleneksel betondan üretilen yapı elemanları için ihmal edilirken, çelik lif takviyeli beton elemanları için liflerin katkısı dikkate alınarak ACI 544 (2009) tasarım şartnamesi ile hesaplanabilir (Şekil 2.22). Şekil 2.22'de F_{ct} lifli betonun çekme kuvveti ve F_s boyuna donatının çekme kuvvetidir. ACI 544 göre nominal moment taşıma kapasitesi M_n şu şekilde tanımlanır:

$$M_n = F_s \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + F_{ct} \times \left(\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$M_n = A_s \times f_s \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t \times b \times (h - e) \times \left(\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (2.12)$$

burada, e en dış beton basınç lifinden lifli betonun çekme gerilme bloğunun tepesine kadar olan mesafedir ve Denklem 2.13'deki gibi hesaplanır:

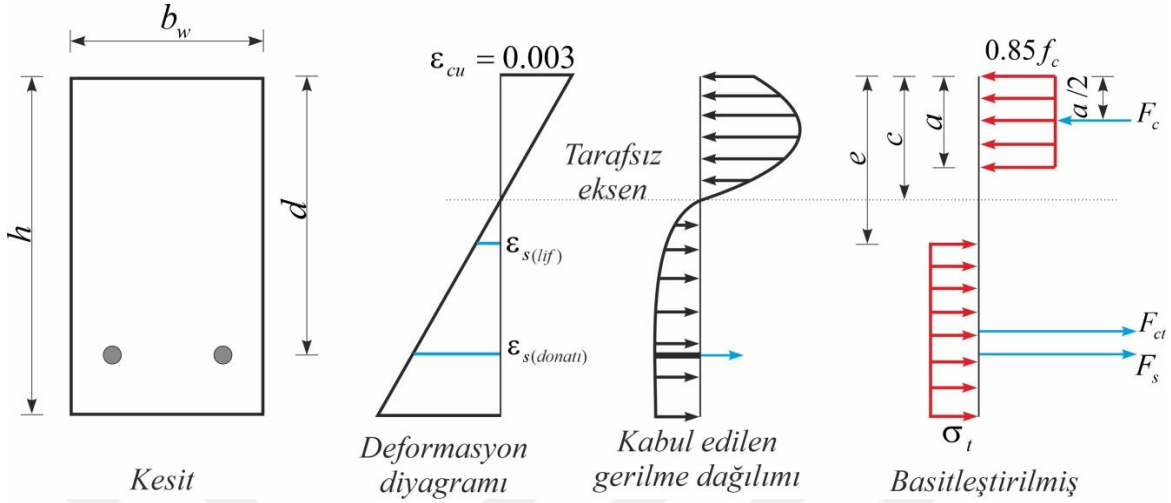
$$e = \frac{(\varepsilon_{s(lif)} + \varepsilon_{cu})}{\varepsilon_{cu}} \times c \quad (2.13)$$

burada, $\varepsilon_{s(lif)}$ lifli betonun çekme gerilme bloğunun başlamasına karşılık gelen birim şekil değiştirmesidir.

Bunun yanında, lifli betondaki çekme dayanımı (σ_t) Denklem 2.14 ile bulunabilir.

$$\sigma_t = 0.00772 \times \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \times \rho_f \times F_{be} \text{ (MPa)} \quad (2.14)$$

burada, l_f lifin uzunluğu, d_f lifin çapı, ρ_f hacimce lif miktarı ve F_{be} lif aderans verimi faktörüdür. F_{be} faktörü, lif özelliklerine bağlı olarak 1.0'dan 1.2'ye değişir (ACI 544, 2009).



Şekil 2.22: Lif takviyeli betonarme kirişlerin tasarıma esas şekil değiştirme ve gerilme diyagramları

Ayrıca, lifli betonun çekme dayanımını doğrudan etkileyen aderans gerilmesi (τ_f), büyük ölçüde beton ile çelik lif arasındaki kayma gerilmelerine ve betonu oluşturan karışım bileşenlerine bağlı olduğundan büyük önem arz etmektedir. ACI 544'te geleneksel çelik lifli normal dayanımlı betonlar için bu değer $\tau_f = 2.30$ MPa alınmıştır. Lif takviyeli yüksek dayanımlı betonlarda, normal dayanımlı betonlara göre karışımda daha fazla toz malzeme kullanıldığından dolayı beton içerisindeki boşluk oranı daha az olduğu için aderans gerilmesi daha yüksek olmaktadır (Imam ve diğ., 1997). Literatürdeki bir çalışmada, lif takviyeli yüksek dayanımlı betondan üretilen betonarme kirişlerin nominal moment taşıma kapasitesi hesabında aderans gerilmesi $\tau_f = 4.15$ MPa olarak dikkate alınmıştır (Al-Ta'an ve Al-Feel. 1990). Ayrıca, bazı araştırmalarda (Dancygier ve Savir, 2006; Hannant, 1978; Khalil ve Tayfur, 2013; Türker ve diğ., 2019a) aderans gerilmesinin su/bağlayıcı oranı, kür koşulları, lif yüzey özellikleri ve geometrisi ile betonun kür yaşı gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu lif takviyeli betonlar için bu değer 3 ile 8.3 MPa arasında alınabileceği belirtilmiştir.

2.4.3 Lif takviyeli KYB'den üretilen V-şekilli betonarme katlanmış plakların moment taşıma kapasitesi

V-şekilli betonarme katlanmış plakların nominal moment taşıma kapasitesi, geleneksel çift donatılı betonarme kesitler için kullanılan uygunluk ve denge koşullarına ilaveten betonun çekme bölgesindeki liflerin çekme katkısı da dikkate alınarak hesaplanmıştır. Analitik çözümde, ACI 544 (2009) şartnamesinin temel esaslarının yanında, kesitin çift donatılı ve karma çelik lif takviyesi durumları da dikkate alınmıştır. Bu tez çalışmasında, hesaplamalar sırasında yapılan varsayımlar ve analitik hesaplamalarda dikkate alınan gerilme ve şekil değiştirme durumları ilgili formüller Bölüm 3.6.4'de verilmiştir.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE YÖNTEM

3.1 Malzemeler

3.1.1 Çimento

Çalışma kapsamında yapılan tüm deneylerde ÇİMKO Çimento ve Beton San. Tic. A.Ş firmasından temin edilen CEM I 42.5 R tipli Portland çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	19.40
Al ₂ O ₃	5.36
Fe ₂ O ₃	3.79
CaO	64.3
MgO	2.25
SO ₃	2.47
Na ₂ O	0.09
K ₂ O	0.90
Kızdırma kaybı	1.44
Fiziksel Özellikler	
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3480
Özgül ağırlık	3.15

3.1.2 Uçuş küllü

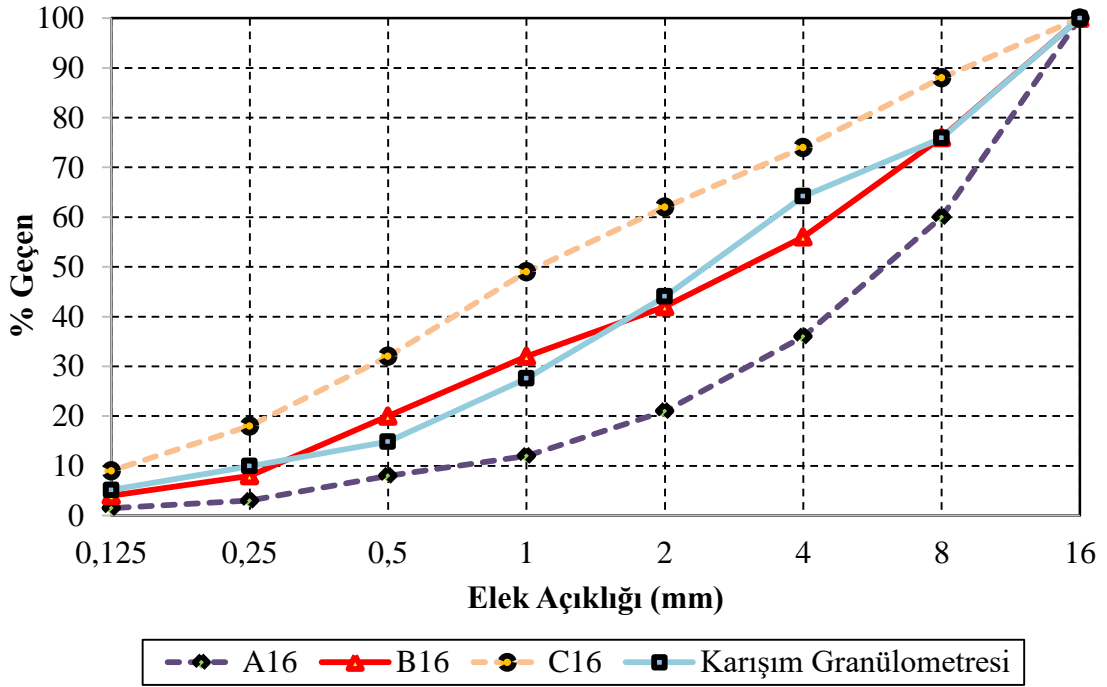
Çalışma kapsamında bağlayıcı malzeme olarak çimento yerine ikame edilen İskenderun Termik Santraline ait olan F sınıfı uçucu küllü kullanılmıştır. Uçucu küllü fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Uçucu küllü ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	63.09
Al ₂ O ₃	21.63
Fe ₂ O ₃	6.77
CaO	1.07
MgO	-
SO ₃	0.10
Na ₂ O	2.79
K ₂ O	-
Kızdırma kaybı	2.68
Fiziksel Özellikler	
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	2900
Özgül ağırlık	2.30

3.1.3 Agreg

Tez çalışması kapsamındaki tüm karışımlarda ince agrega olarak kırma taş ocağından elde edilmiş (0-4 mm) kırma kum, iri agrega olarak (4-16 mm) ise kırma agrega olmak üzere iki farklı tipte agrega kullanılmıştır. Kırma kumun doygun yüzey kuru (DYK) özgül ağırlığı 2.43 ve su emme kapasitesi % 0.7 olup incelik modülü 3.65 olarak bulunmuştur. Kırma kumun 0.125 mm elekten geçen malzeme miktarı ise %7.4'dür. İri agrega olarak, DYK özgül ağırlığı 2.62 ve ağırlıkça su emme kapasitesi % 0.5 olan kırma taş kullanılmıştır. Lifli KYB'nin EFNARC'ın önerdiği işlenebilirlik şartlarını sağlamak amacıyla, tüm karışımlarda %30 oranında kırma çakıl ve %70 oranında kırma kum kullanılmıştır. Lifli KYB karışımların üretiminde kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi ve TS 802'de tanımlanan sınır değerlerine ait eğriler Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Agreg karışım granülometri eğrisi ile TS 802 sınır eğrileri

3.1.4 Kimyasal katkı

Tüm karışımlar için kendiliğinden yerleşebilirliğin sağlanmasının yanı sıra su/bağlayıcı oranını da düşürmek amacıyla, TS EN 934-2 standardına uygun, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından temin edilen yoğunluğu 1.06 g/cm^3 olan ViscoCrete Hi-Tech 51 modifiye polikarboksilat esaslı hiperakışkanlaştırıcı tercih edilmiştir.

3.1.5 Karışım suyu

Tüm karışımlarda karma suyu olarak Malatya şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.6 Donatı

V-şekilli betonarme katlanmış plak elemanların üretiminde, TS 708 (2016)'a uygun olarak üretilmiş 8 mm çapında, minimum karakteristik akma dayanımı $f_y = 420 \text{ N/mm}^2$ ve minimum çekme dayanımı $f_{su} = 500 \text{ N/mm}^2$ olan S420 donatısı kullanılmıştır. Donatıların mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla üçer adet numune alınarak çelik çekme deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.2). Deney sonunda elde edilen sonuçlara ait ortalama değerler Çizelge 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.2: Donatı çekme deneyi

Çizelge 3.3: Donatının mekanik özellikleri

Donatı	Çapı (mm)	Kesit Alanı (mm ²)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Toplam Uzama (%)
φ8	8	50.24	591	738	17.01

3.1.7 Lifler

Bu çalışmada, makro ve mikro çelik olmak üzere iki farklı boyutta lif kullanılmıştır. Her iki ucu kancalı 60 mm uzunluğunda ve narinliği 65 olan KMX 65/60 BG kodlu makro çelik lif, kemerli Metal San. Tic. A.Ş. firmasından ve düz 13 mm uzunluğunda ve narinliği 87 olan DRAMIX OL13/.16 kodlu mikro çelik lif ise Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Liflere ait görseller, Şekil 3.3'de, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.4'de verilmiştir.



a) OL 13/.16

b) KMX 65/60

Şekil 3.3: Çalışmada kullanılacak lif görselleri; a) Mikro lif b) Makro lif

Çizelge 3.4: Çalışmada kullanılacak liflerin özellikleri

Lif Tipi	Boy (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yoğunluk (gr/cm ³)
KMX 65/60	60	65	1300	200	7.85
OL 13/.16	13	87	3000	200	7.20

3.2 Karışımların tasarımı ve oranları

Büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plakların üretiminde kullanılacak olan lif takviyeli KYB karışımlar deneme-yanılma yöntemiyle EFNARC (2005) esas alınarak tasarlanmıştır. Karışımlarda benzer işlenebilirlik sağlanması için hiperakışkanlaştırıcı miktarı değiştirilmiştir. Bunun yanında, karışımlara lif ilave edilmesinden dolayı betonun işlenebilirliği üzerinde oluşacak olumsuz etkiyi azaltmak amacıyla bağlayıcı malzeme oranı ve ince agrega miktarı yüksek tutulmuştur. Sonuçta, tüm karışımlarda, bağlayıcı

malzeme miktarı 900 kg/m³ (çimento miktarı 550 kg/m³ ve uçucu kül miktarı da 350 kg/m³), su/bağlayıcı malzeme oranı ise 0.25 olarak sabit tutulurken, kırma taş ve kırma kum sırasıyla, %30 ve %70 oranlarında kullanılmıştır. Kontrol karışımı dışındaki lifli karışımlarda lif içeriği hacimce %1 olarak belirlenmiştir.

Hacimce toplam %1 lif miktarına sahip makro çelik lifli ile makro ve mikro çelik liften oluşan karma çelik lifli 2 adet ve lifsiz kontrol karışımı olmak üzere toplam 3 adet KYB karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımların isimlendirmesinde kullanılan ifadelerin ne anlama geldiği şu şekildedir;

KONTROL: Kendiliğinden yerleşen lifsiz beton

MAK: 60 mm uzunluğundaki makro çelik lif (65/60)

MİK: 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lif (OL 13/.16)

MAK ve MİK'in sağ tarafına yazılan rakamlar karışıma ilave edilen çelik liflerin hacimce oranlarını ifade etmektedir. Örneğin; MAK0.80_MİK0.20 şeklinde isimlendirilen karışım, hacimce %0.80 oranında 60 mm uzunluğa sahip makro çelik lif, %0.20 oranında 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lifi içermektedir.

Çalışma kapsamında kullanılacak karışım oranları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5: Karışım oranları (kg/m³)

Karışım Adı	PÇ	UK	SU	S/B*	HA**	Agrega		Çelik Lif	
						(0-4)	(4-16)	KMX	DRMX
						mm	mm	65/60	OL 13/.16
KONTROL	550	350	223	0.25	4.50	768	329	-	-
MAK1.00	550	350	223	0.25	5.00	750	321	78.5	-
MAK0.80_MİK0.20	550	350	223	0.25	5.25	750	321	62.8	14.5

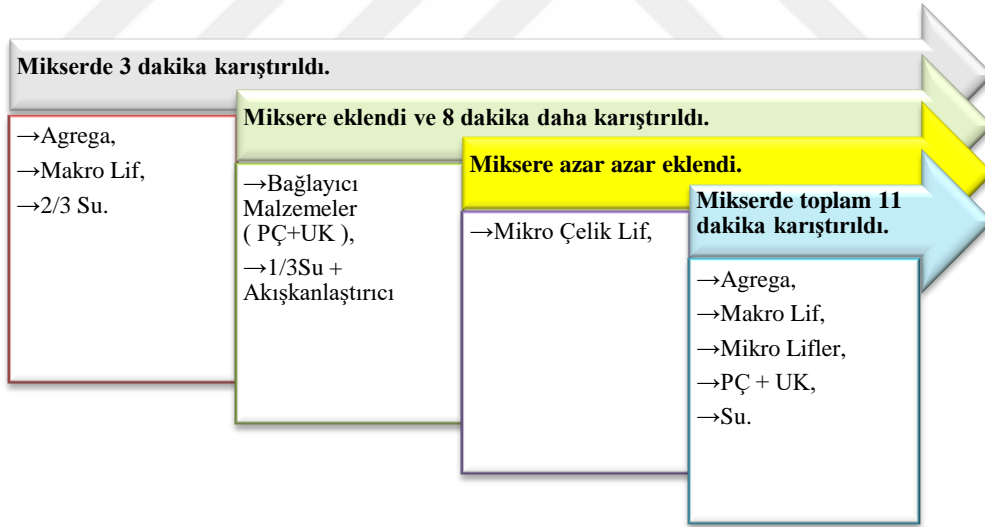
* S/B : Su/bağlayıcı malzeme oranı

** H.A.: Hiperakışkanlaştırıcı

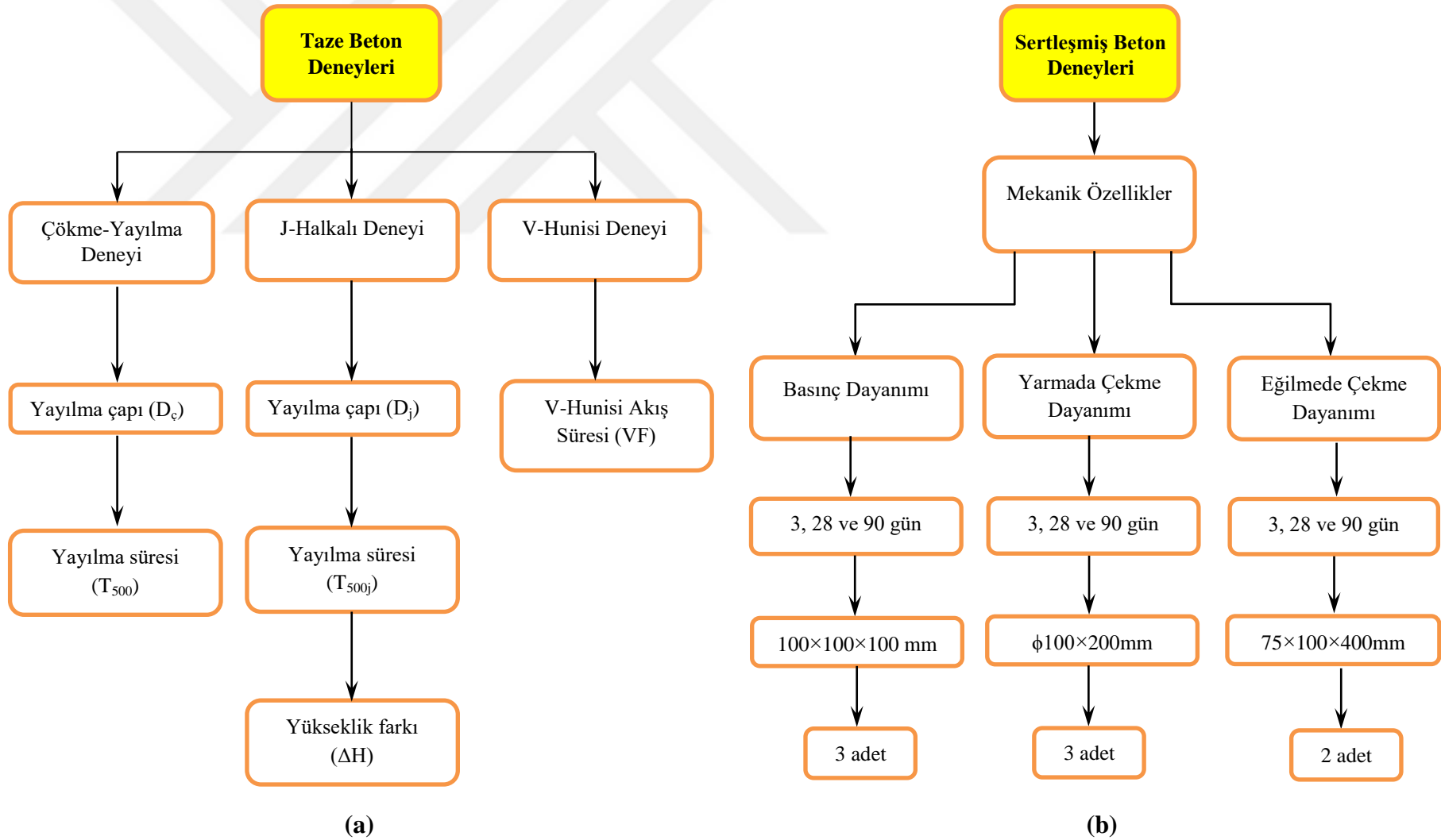
3.2.1 Taze KYB karışımlarının hazırlanması

V-şekilli betonarme katlanmış plakların üretiminde kullanılacak tüm karışımların benzer işlenebilirliğe sahip olması hedeflenerek, çökme-yayıma değerleri EFNARC (2005) komitesinin önerdiği SF2 (660mm-750mm) sınıfı esas alınarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında tüm KYB karışımların hazırlanmasında 30 dm³ kapasiteli düşey eksenli mikser kullanılmıştır. Karışımların hazırlanış aşamasında uygulanan adımlar şu şekildedir:

- İlk olarak tüm agregalar (0-4 ve 4-16) ile varsa makro lifler mikserde karışım suyunun 2/3'ü eklenerek 3 dakika boyunca karıştırılmıştır.
- Daha sonra geriye kalan karışım suyu ve akışkanlaştırıcı ayrı bir kap içerisinde karıştırılarak homojen bir hale getirildikten sonra bağlayıcı malzemeler (çimento ve uçuşu kül) ile birlikte mikserde eklenerek 8 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Mikro lifler ise topaklanmayı engellemek amacıyla mikser dönerken yavaş yavaş eklenmiştir. Böylece, toplamda 11 dakika karıştırma süresi sonrasında KYB karışımları hazırlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Karışımların hazırlanmasında takip edilen adımlar



Şekil 3.5: Karışımlara uygulanan taze ve sertleşmiş beton deneyler

3.3 Taze Beton Deneyleri

Hazırlanan KYB karışımlarına uygulanan taze beton deneyleri Şekil 3.5.a'da gösterilmiştir. Tüm taze beton deneyleri EFNARC (2005) komitesi tarafından önerilen şartlar ve sınır değerlere uygun olarak yürütülmüştür.

3.3.1 Çökme-yayılma ve T_{500} deneyi

Lifsiz kontrol ve lifli KYB karışımlarının herhangi bir dâhili ve harici etki olmaksızın kendi ağırlığı altında yayılması esaslı çökme-yayılma deneyi ile akışkanlık ve doldurma kabiliyeti belirlenirken karışımın viskozitesinin belirlenmesi için ise T_{500} deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyde Şekil 3.6'daki gibi 1000 mm × 1000 mm boyutlarındaki çelikten üretilmiş olan taban plakası ile alt çapı, üst çapı ve yüksekliği sırasıyla 200 mm, 100 mm ve 300 mm uzunluklara sahip olan kesik koni kullanılmıştır.



Şekil 3.6: Çökme-yayılma deney düzeneği

Deney aparatları nemli bir bezle silindikten sonra mikserdeki karışımdan yeterli miktarda ve mümkün olduğunca homojen olacak şekilde numune alınarak kesik koniye herhangi bir mekanik etki olmaksızın doldurulmuştur. Kesik koniye yerleştirilen taze beton 30 saniye içerisinde yukarı doğru dik bir şekilde kaldırılmıştır. Kesik koninin kaldırılması ile birlikte karışımın alt taban plakası üzerindeki işaretli 500 mm'lik çapa ulaşma süresi süreölçer ile kaydedilerek T_{500} süresi bulunmuştur. Daha sonra, Şekil 3.7'deki gibi tabla üzerinde yayılma tamamlandığında birbirine dik iki yönde olmak üzere D_1 ve D_2 çapları ölçülerek ortalaması alınmıştır. Böylece taze KYB karışımının yayılma çapı belirlenmiştir.



Şekil 3.7: Çökme-yayılma deneyi

3.3.2 J-halkası deneyi

Lifsiz kontrol ve lifli KYB karışımlarının dar kesitlerden ve donatılar arasından geçiş kabiliyetini belirlemek amacıyla J-halkası deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyde alt çapı, üst çapı ve yüksekliği sırasıyla 200 mm, 100 mm ve 300 mm uzunluklara sahip olan kesik koni ile düşeyde yerleştirilmiş olan 105 mm aralıklı toplam 8 adet 12 mm çapındaki çubuklardan oluşan ve üst çapı 300 mm olan J-halkası aparatı kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: J-halkası deney düzeneği

J-halkası aparatı, 1000 mm × 1000 mm boyutlarındaki çelikten üretilmiş olan taban plakası üzerindeki 300 mm çaplı dairenin üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra, J-halkası

içerisine taban plakası üzerindeki 200 mm çapındaki işaretli daire üzerine kesik koni yerleştirilmiştir. Daha sonra çökme-yayılma deneyinde yapılan işlem adımları takip edilmiştir. Lifsiz ve lifli KYB karışımları, tabla üzerinde yayılması tamamlandığında dört farklı noktada J-halkasının hemen iç kısmı (h_1) ve dış kısmından (h_2) ölçülen yükseklik farklarının ortalaması alınarak J-halkası yükseklik farkı (ΔH) belirlenmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: J-halkası deneyi

3.3.3 V-hunisi deneyi

Tüm KYB karışımlarının doldurma kabiliyetini ve viskozitesini tespit etmek amacıyla V-hunisi deneyi gerçekleştirilmiştir. Her karışım için hazırlanan lifsiz ve lifli taze KYB karışımları V-hunisi aparatına herhangi bir sıkıştırılma işlemi yapılmadan tamamen doldurulmuştur. Doldurma işleminin akabinde 10 saniye beklendikten sonra, huninin alt kapağının açılması ile alt kapaktan ışığın ilk görüldüğü an ile arasında geçen beton akış süresi (VF) süreölçer yardımıyla yanı sıra video çekilerek de kaydedilmiştir (Şekil 3.10).



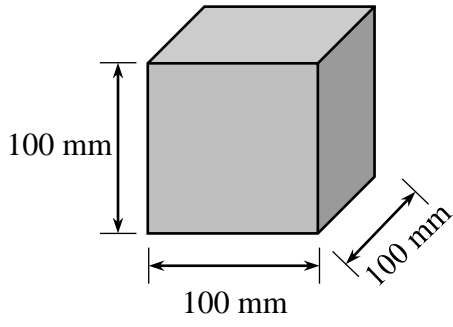
Şekil 3.10: V-hunisi deneyi

3.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri

KYB karışımları ile hazırlanan numunelere uygulanan sertleşmiş beton deneyleri Şekil 3.5.b’de gösterilmiştir.

3.4.1 Basınç dayanımı

V-şekilli betonarme katlanmış plakların üretiminde kullanılacak tüm KYB karışımların farklı kür yaşları için basınç dayanımlarını tespit etmek amacıyla Şekil 3.11.a’daki gibi $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ boyutlarında her bir karışım için üçer adet olmak üzere toplamda 27 adet küp numune üretilmiştir. Üretilmiş numuneler kirece doymun $23 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de su içerisinde 3, 28 ve 90 gün kür edilmiştir. Basınç dayanım deneyi ASTM C39 (2018) standardına uygun olarak yapılmıştır. Basınç dayanım testi, aksenal olarak yük uygulayan 3000 kN kapasiteli pres cihazı ile sabit 6 kN/sn yükleme hızında yapılmıştır. Her bir karışımın basınç dayanımı değeri, numunenin taşıyabileceği maksimum yükün, test edilen numunenin kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır (Şekil 3.10.b).



a)



b)

Şekil 3.11: Deney numunesi boyutları ve basınç dayanımı deneyi

3.4.2 Yarmada çekme dayanımı

Tüm KYB karışımlarına ait farklı kür yaşları için yarmada çekme dayanımlarını tespit etmek amacıyla her bir karışım için Şekil 3.12.a'daki gibi $\phi 100 \times 200$ mm boyutlarında üçer adet olmak üzere toplamda 27 adet silindir numune üretilmiştir. Üretilmiş numuneler kirece doygun 23 ± 2 °C'de su içerisinde 3, 28 ve 90 gün kür edilmiştir. Deney esnasında yükün numune boyunca üniform bir şekilde uygulanabilmesi amacıyla, numune ile presin alt ve üst başlıkları arasında 5 mm kalınlığında 20 mm genişliğinde sert mukavva yerleştirilmiştir (Şekil 3.11.b). ASTM C496 (2017) standardına uygun olacak şekilde, 3000 kN kapasiteli pres cihazı vasıtasıyla sabit 1.6 kN/s hız ile artan yük uygulanarak yarmada çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen deney bulguları Denklem 3.1 kullanılarak her bir karışıma ait 3, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları test edilen numunelerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

$$f_{yç} = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \quad (3.1)$$

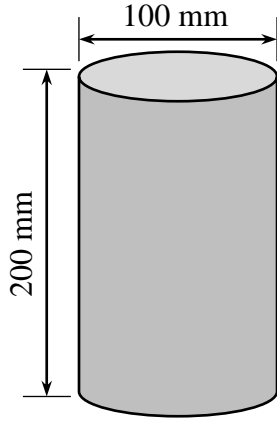
Burada:

$f_{yç}$: Yarmada çekme dayanımı (MPa)

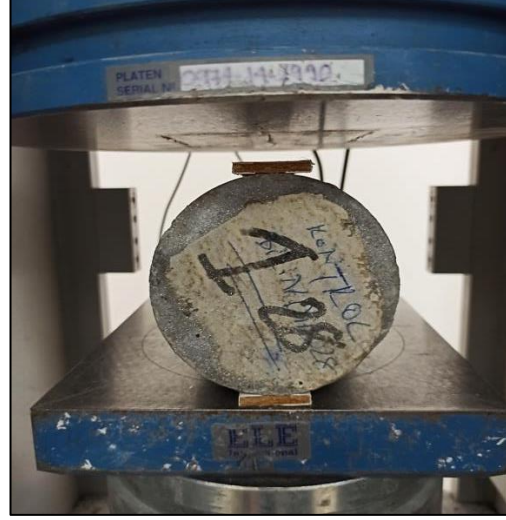
P: Kesitin taşıyabileceği maksimum yük (N)

L: Numunenin uzunluğu (mm)

D: Numunenin çapı (mm)



a)

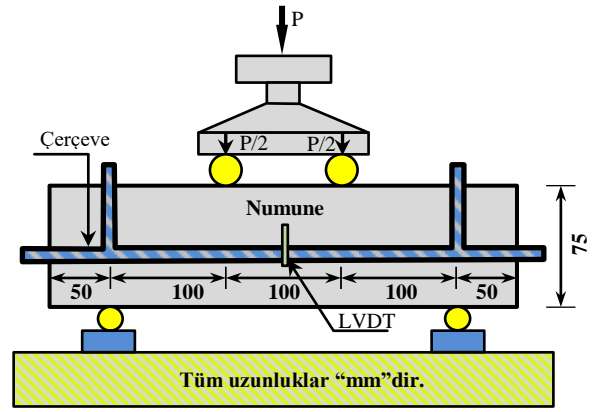


b)

Şekil 3.12: Deney numunesi boyutları ve yarmada çekme dayanımı deneyi

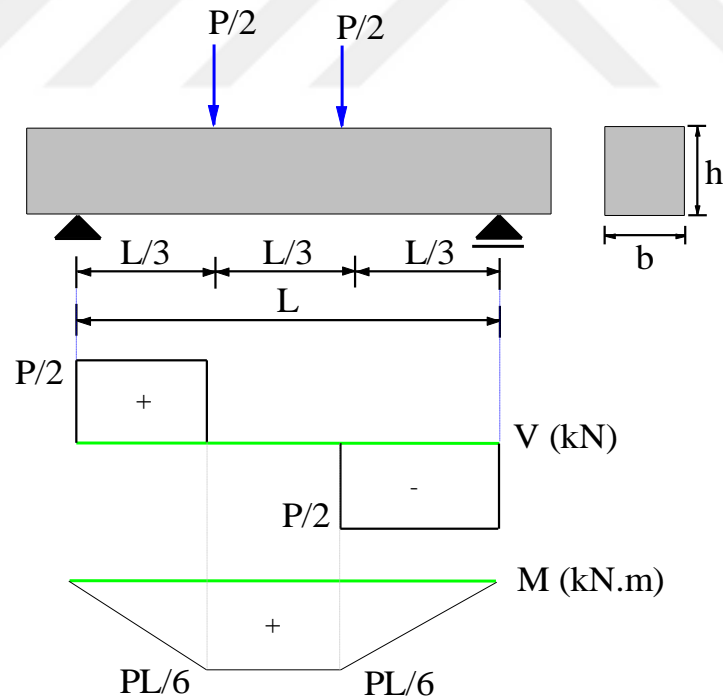
3.4.3 Dört noktalı eğilmede çekme dayanımı deneyi

Çalışma kapsamında tasarlanan tüm KYB karışımlarına ait farklı kür yaşları için eğilmede çekme dayanımlarını belirlemek için Şekil 3.13'deki gibi 100 mm × 75 mm × 400 mm boyutlarında her bir karışım için iki adet olmak üzere toplamda 18 adet prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilmiş numuneler kirece doygun 23 ± 2 °C'de su içerisinde 3, 28 ve 90 gün kür edilmiştir. Prizmatik numuneler planlanan deney gününde, ASTM C1609 (2019)'a göre dört noktalı eğilme testine maruz bırakılmıştır. Şekil 3.13'den görüldüğü gibi test numunesi, oturacağı iki mesnet arası mesafe 300 mm ve yük uygulanacak üst mesnetler arası mesafede 100 mm olacak şekilde deney çerçevesine yerleştirilmiştir. Daha sonra, numunelerin açıklık ortasına ait sehim değerini ölçmek amacıyla açıklık ortasında dikey olacak şekilde karşılıklı 2 adet Linear variable differential transformers (LVDT) yerleştirilmiş ve yük-sehim eğrilerinin çizilmesinde ortalama sehim değeri dikkate alınmıştır. Numuneler sehim değeri 2.5 mm'ye ulaşana kadar deneye devam edilmiştir.



Şekil 3.13: Test numunesi ve düzeneği

Dört noktalı eğilme deneyi sırasında elde edilen yük-sehim verileri dataloger vasıtasıyla bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan her bir numuneye ait yük-sehim verileri, excel programı vasıtasıyla eğriler haline getirilmiştir. Daha sonra, Şekil 3.14'deki gibi maksimum yüke göre çizilen moment diyagramındaki maksimum moment ile kesit özellikleri kullanılarak Denklem 3.2 yardımıyla, numunelerin eğilmede çekme dayanımları hesaplanmıştır.



Şekil 3.14: Dört noktalı eğilme altında oluşan kesme ve moment diyagramları

$$f_e = \frac{M}{I} \times y = \frac{\frac{P \times L}{6}}{b \times h^3} \times \frac{h}{2} \rightarrow 2 \times \frac{P \times L}{b \times h^3} \times \frac{h}{2} = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (3.2)$$

Burada:

f_e : Eğilmede çekme dayanımı (MPa)

M: Açıklık ortasına ait maksimum moment (N.mm)

P: Kesitin taşıyabileceği maksimum yük (N)

L: İki mesnet arasındaki hesap açıklığı (mm)

b, h: Numuneye ait kesit boyutları (mm)

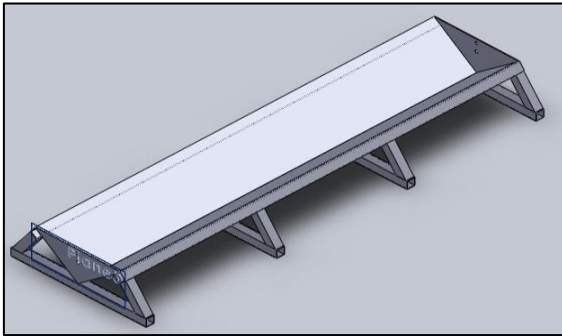
y: Tarafsız eksen derinliği (mm)

I: Kesitin atalet momenti (mm⁴)

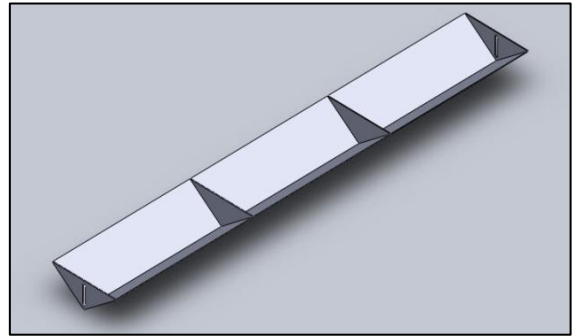
3.5 Büyük Ölçekli V-Şekilli Betonarme Katlanmış Plakların Üretimi ve Test Düzenegi

3.5.1 Numunelerin üretimi

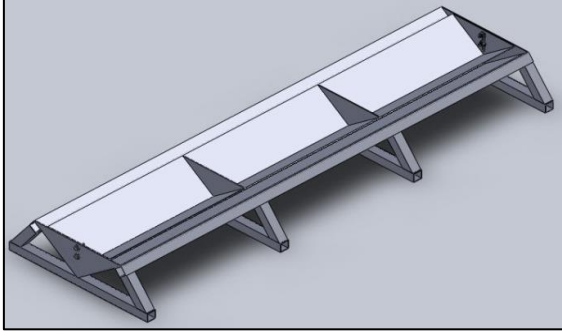
Çalışma kapsamında, çelik lif takviyesinin V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, her karışım için 2 adet olmak üzere üç farklı plak kalınlığına (60, 70 ve 80 mm) sahip lifsiz kontrol ile iki farklı lif kombinasyonuna sahip KYB karışımlarından üretilmiş toplam 18 adet büyük ölçekli V-şekilli katlanmış plak deney numunesi hazırlanmıştır. V-şekilli betonarme katlanmış plakların üretimi için Şekil 3.15'deki gibi plak kalınlıkları ayarlanabilen ve bu çalışma için özel olarak tasarlanan V şeklindeki bir döküm çelik kalıp sistemi kullanılmıştır. Alt ve üst kalıptan oluşan V-şekilli bir döküm çelik kalıp sistemi, farklı kalınlıklarda (50,60,70,80,90 ve 100 mm) ayarlanabilen, 3000 mm uzunluğa, 220 mm yüksekliğe ve 640 mm genişliğe sahip olması itibarıyla özeldir.



a) Alt parça



b) Üst parça



c) Parçaların birleştirilmesi



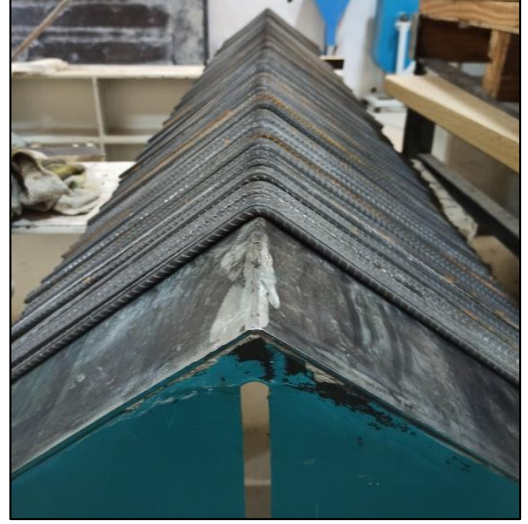
d) V-şekilli bir döküm çelik kalıp

Şekil 3.15: V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için kalınlığı ayarlanabilen bir döküm çelik kalıp sistemi

V-şekilli betonarme katlanmış plakların donatılarını hazırlanmak amacıyla üst kalıp üzerinde çamdan üretilmiş 3000 mm uzunluğunda ve 30 mm kalınlığındaki tahta, silikon ile yapıştırılarak donatı bağlama şablonu hazırlanmıştır. Daha sonra, boyuna ve enine donatılar gerekli boylarda kesilmiştir. Hazırlanan boyuna ve enine donatıların her iki yönde kalıp boyunca 200 mm aralıklarla yerleştirilebilmesi amacıyla, çam tahtasının yüzeyinde 10 mm çapında oluklar açılmıştır. Daha sonra, donatılar bu oluklara yerleştirilip sıkıca bağlanmıştır. V-şekilli betonarme katlanmış plakların donatısı, boyuna doğrultuda çekme ve basınç bölgelerine 2'şer adet olmak üzere toplam 4 adet $\phi 8$, enine doğrultuda ise $\phi 8/200$ aralıklarla toplam 15 adet tek parça nervürlü donatı yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.16. a, b, c ve d). Hazırlanan tüm numunelerde aynı donatı düzeni kullanılmış ve böylece çelik lif takviyesinin V-şekilli betonarme plakların kalınlığı üzerindeki etkisini incelemede değişken olarak alınmamıştır. Ayrıca, bağlanan donatılar beton dokümü öncesinde üst kalıba alttan bağlanarak ters çevrilip yerleştirilmiştir. Böylelikle donatıların V-şekilli betonarme katlanmış plakların beton dökümü esnasında herhangi bir yer değiştirmesi engellenmiştir (Şekil 3.16. e).



a) Enine donatıların bükülmesi



b) Hazırlanan enine donatılar



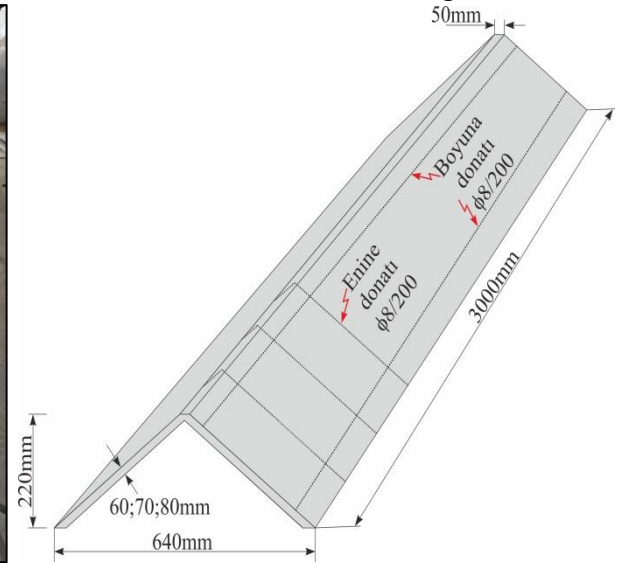
c) Donatıların şablona yerleştirilmesi



d) Donatıların sıkıca bağlanması



e) Donatıların beton dökümüne hazır hale gelmesi



Şekil 3.16: V-şekilli betonarme katlanmış plakların donatılarının hazırlanması

Tüm V-şekilli betonarme katlanmış plakların üretimi, İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. V-şekilli betonarme katlanmış plakların üretiminde kullanılacak tüm karışımlar, 350 litre kapasiteli betoniyer kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle, tüm agregalar, varsa makro çelik lif ve karışım suyunun 2/3'ü betoniyere doldurularak 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra, akışkanlaştırıcı ve geriye kalan su bir kaptaki karıştırıldıktan sonra çimento ve uçucu kül ile birlikte betoniyere eklenmiş ve karıştırma işlemine 8 dakika daha devam edilmiştir. Karışımda mikro çelik lif varsa, topaklanmayı engellemek amacıyla betoniyer dönerken karışıma yavaş yavaş eklenmişlerdir. Tüm karışımlara, toplamda 11 dakika karıştırma işlemi uygulanmıştır.

Betoniyer yardımıyla elde edilen karışımlar el arabasıyla V-şekilli bir döküm çelik kalıba yerleştirilmiştir. Tüm karışımlar, kendiliğinden yerleşebilme özelliğine sahip olduklarından V-şekilli bir döküm kalıba yerleştirilirken herhangi bir mekanik sıkıştırma işlemi yapılmamıştır (Şekil 3.17). Bununla birlikte, büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin basınç ve eğilmede çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla her bir karışım ve plak kalınlığı için 3 adet olmak üzere sırasıyla 100 mm boyutunda küp ve 100 mm × 75 mm × 400 boyutlarında prizma numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plaklar ve karışımlara ait mekanik özelliklerin belirlenmesi için küçük boyutlu kalıplara dökülen numuneler 24 saat beklendikten sonra kalıplarından çıkarılmıştır.



Şekil 3.17: V-şekilli betonarme katlanmış plakların beton dökümü

Beton dökümünden 24 saat sonra büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plaklar ve küçük boyutlu numuneler kalıptan çıkarılmıştır. Büyük ölçekli numunelerin kalıptan çıkarılması işlemi öncelikle, V-şekilli bir döküm çelik kalıbın üst parçasının çıkarılması, vinç yardımıyla kancalara bağlanan ipin yukarıya doğru kaldırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.18. a ve b). Daha sonra, V-şekilli bir döküm kalıbın alt parçasının çıkarılması, yine vinç yardımıyla tüm numune alt kalıp parçasıyla birlikte askıya alınıp yan kısımlarındaki vidaların gevşetilmesiyle birlikte numunenin 2 adet plastik tekerlek üzerine emniyetli bir şekilde düşmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.18. c).



a) Kalıptan çıkarılacak V-şekilli betonarme katlanmış plak numune



b) V-şekilli bir döküm kalıbın üst parçasının sökülmesi



c) V-şekilli bir döküm kalıbın alt parçasının sökülmesi

Şekil 3.18: V-şekilli betonarme katlanmış plakların çelik kalıptan çıkarılma adımları

Kalıptan çıkarılan tüm büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plak numuneler ve mekanik özellikleri belirlemek amacıyla hazırlanan küçük numuneler laboratuvarında 90 gün boyunca aynı şartlarda plastik örtüler altında nemli çuval bezi ile sarılarak kür edilmiştir (Şekil 3.19. a, b ve c).



a) Kalıptan çıkarılmış numuneler



b) Numunelerin nemli bezle sarılıp su kürü uygulanması



c) Numunelerin nemli kalması için plastik örtü ile üstünün kapatılması

Şekil 3.19: V-şekilli betonarme katlanmış plakların kür işlemi

3.5.2 Test düzeneği

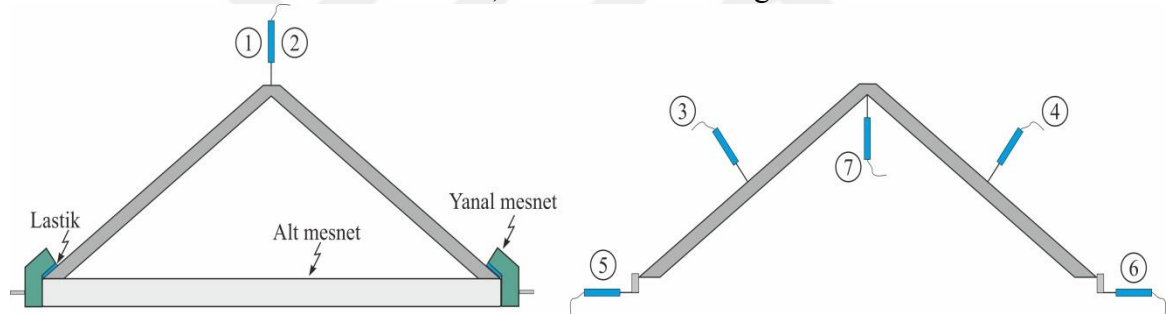
Farklı plak kalınlıklarına sahip büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plak numuneler, yükleme hızı 1.20 mm/dakika olacak şekilde dört noktalı eğilme yüklemesiyle sehım kontrollü olarak test edilmiştir. V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin üzerine, uç kısmında yük hücresi olan aktüvator tarafından uygulanan yükü eşit olarak dağıtmak için rijit I profili yerleştirilmiştir. İki tekil yük arasındaki mesafe, net açıklığın (2800 mm) 1/3'ü (933 mm) olacak şekilde belirlenmiştir. V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin dört noktalı eğilme yüklemesi test düzeneği Şekil 3.20'de gösterilmiştir.

V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerde oluşacak sehım değerleri, plaklara yerleştirilen LVDT'ler kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 3.20.a'da gösterilen LVDT 1 ve 2 mesnette oluşan oturmayı, LVDT 3 ve 4 açıklık ortası eğimli plakların sehimini, LVDT 5 ve 6 yanıl ötelenmeyi ve LVDT 7 açıklık ortası sehimi ölçmek üzere toplamda 7 adet LVDT kullanılmıştır. 3, 4, 5, 6 ve 7 nolu LVDT'ler yükleme sırasında sarsılmayacak şekilde üretilmiş özel sehıplar üzerine sabitlenmiştir (Şekil 3.20. c ve d). Testler esnasında, yük ve sehım değerleri ise anlık olarak Şekil 3.20.a'da 9 numara ile gösterilen datalogger aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Test işlemleri durdurulduktan sonra mikro çatlakların kapanarak fark edilememesi durumuna karşın, bu çatlakların çizilme işlemleri dört noktalı eğilme yüklemesi devam ederken yapılmıştır.

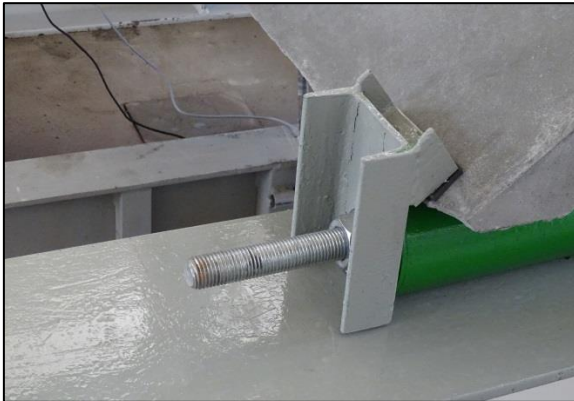
Tüm büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait yük-sehım eğrileri ve çatlak modelleri belirlendikten sonra, lif kombinasyonu ve plak kalınlığının yük taşıma kapasitesi, tokluk ve süneklığe etkisi incelenmiştir. Ayrıca, büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plaklar, hem düzlemsel hem de kayma gerilmelerine maruz kaldığından, betonarme davranışı ve hesaplamaları bakımından boyuna doğrultuda eğik bir kiriş gibi dikkate alınmıştır.



a) Genel test düzeneği



b) V-şekilli betonarme katlanmış plakların uç ve açıklık ortası kesiti



c) Yanal destek mesneti



d) Şehim ölçüm aparatı

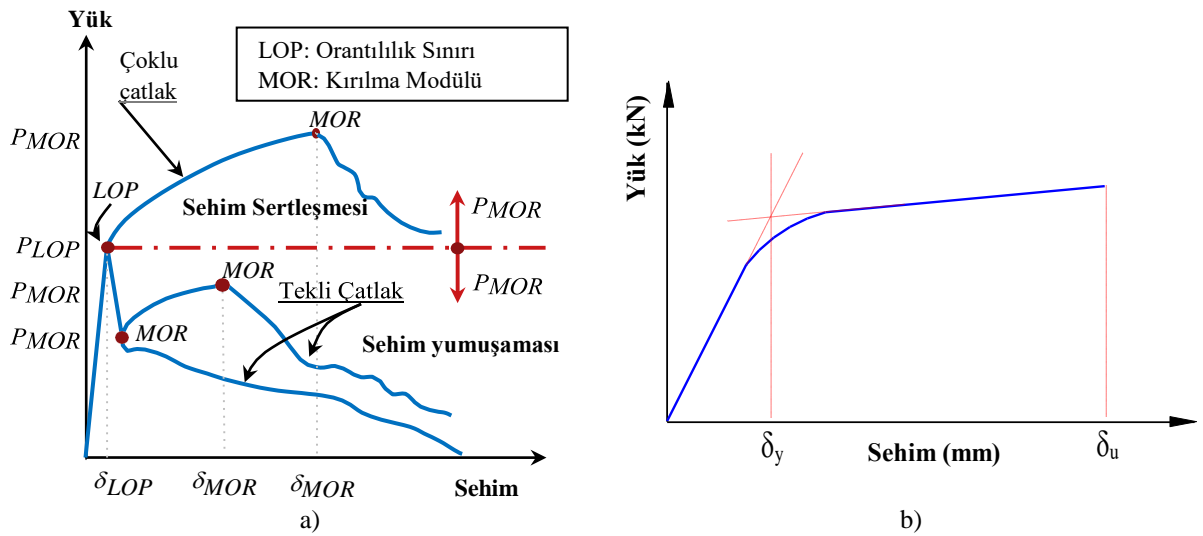
1 ve 2: Mesnet oturmaları, **3 ve 4:** Açıklık ortası eğimli plakların sehimi, **5 ve 6:** Yanal açılmalar, **7:** Açıklık ortası düşey şehim, **8:** Yük hücresi, **9:** Dataloger, **10:** Şehim kontrollü hidrolik ünite

Şekil 3.20: V-şekilli betonarme katlanmış plakların dört noktalı eğilme test düzeneği

3.5.3 V-şekilli betonarme katlanmış plakların eğilme performansının değerlendirilmesi

Eğilme tokluğu, betonarme elemanların enerji yutma kapasitesinin bir ölçüsü ve çatlama karşı direnme yeteneği olarak tanımlanabilir (Li ve diğ., 2017; Türk ve Nehdi, 2021; Park ve diğ., 2017). Tokluk, çimento esaslı kompozitlere lif takviyesinin, çatlak sonrası davranışa olan katkısını değerlendirmede önemli bir parametredir. Bu çalışmada, tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için tokluk hesabı 30 mm'lik sehime karşılık gelen yük-sehim eğrisi altındaki alan dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çünkü tüm yük-sehim eğrileri, yük taşıma kapasitesi açısından 30 mm'lik sehimden sonra genel olarak yatay bir davranış sergilemiştir.

V-şekilli betonarme katlanmış plakların eğilme davranışını yorumlamak amacıyla, Kim ve diğ. (2008) tarafından çimento esaslı lif takviyeli kompozitlerin için önerilen yük-sehim eğrileri kullanılmıştır. Şekil 3.21.a'da gösterildiği gibi, çimento esaslı lif takviyeli kompozitlerin eğilme davranışı, i) sehime sertleşmesi; ii) sehime yumuşaması şeklinde karakterize edilmiştir. Sehime sertleşmesi davranışında ilk çatlak oluşumundan sonra daha yüksek bir yük taşıma kapasitesi gözlenirken, sehime yumuşamasında ise ilk çatlak oluşumundan sonra yük taşıma kapasitesinde azalma meydana gelmiştir. Şekil 3.21.a'da orantılılık sınırı (LOP), yük-sehim eğrisinin doğrusallığının bozulmaya başladığı ilk çatlama noktası olarak tanımlanırken LOP noktasından sonra sehime sertleşmesi veya yumuşamasının oluşmaya başladığı yer ise kırılma modülü (MOR) olarak tanımlanır.



Şekil 3.21: V-şekilli betonarme katlanmış plakların eğilme davranışı ve süneklik açısından değerlendirilmesi

Ayrıca, bu çalışma kapsamında çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerinin süneklik indeksi değeri (S_i) Azizinamini ve diğ., (1999) tarafından geliştirilmiş Denklem 3.6 kullanılarak bulunmuştur. Bu indeks, giriş elemanlarının nihai açıklık ortası sehiminin (δ_u), ilk akma sehimine (δ_y) oranlanması olarak tanımlanır (Şekil 3.21.b). Şekil.3.21.b'de görüldüğü gibi, ilk akma sehimi (δ_y), yük-sehim eğrisinin tepe noktası öncesi ve sonrasında çizilen teğetlerin çakışma noktasındaki sehim değeridir.

$$S_i = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3.6)$$

Bunlara ilaveten, tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklarda kesme açıklığı (a_k) 933 mm ve faydalı yükseklik (d) 200 mm olup a_k/d oranı 4.67'dir. Kesme açıklığı / faydalı yükseklik oranı $7 > a_k/d > 3$ olduğu durumda, kesme açıklığında kesme-eğilme çatlakları oluşmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2001). Bu sebeple, bu çalışmadaki tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklarda kesme açıklığında kesme-eğilme çatlakları beklenmektedir.

3.6 V-Şekilli Betonarme Katlanmış Plakların Moment Taşıma Kapasitesinin Hesabı

Bu çalışmada, lifsiz, tek ve karma çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların nominal moment taşıma kapasitesini tahmin etmek için ACI 544 (2009) şartnamesindeki analitik yaklaşım kullanılmıştır. Lifsiz ve lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak elemanların temsili gerilme ve şekil değiştirme diyagramları Şekil 3.22'de gösterilmektedir. Ayrıca, analitik çözümün test sonuçlarıyla uyumlu olması için mevcut modeller üzerinde yapılan bazı kabuller ve iyileştirmeler aşağıdaki gibidir:

- Betonun basınç bölgesinde meydana gelen birim şekil değiştirmesi (ϵ_{cu}), tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için 0.003 alınmıştır.
- Lifsiz KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların moment taşıma kapasitesi hesaplanırken, betonun çekme dayanımı ihmal edilmiştir.
- Geleneksel çelik lif takviyeli normal betonun nominal moment taşıma kapasitesi hesaplanırken çelik lif ile beton aderans gerilmesi ACI 544 (2009) göre $\tau_f = 2.30$ MPa olarak alınmıştır. Bu çalışmada, çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı KYB kullanıldığından dolayı beton ile çelik lif arasındaki aderans gerilmesinin $\tau_f = 4.15$ MPa olarak alınması gerektiği bu alanda yapılan birçok çalışmada (Dancygier ve Savir, 2006; Imam ve diğ., 1997; Al-Ta'an ve Al-Feel, 1990) önerilmektedir. Bu sebeple, lifli betonun çekme dayanımı (σ_t) hesabında ACI 544 (2009) tarafından önerilen Denklem

2.14'teki 0.00772 katsayısı modifiye edilerek, Denklem 3.7'deki gibi tekrar hesaplanmıştır.

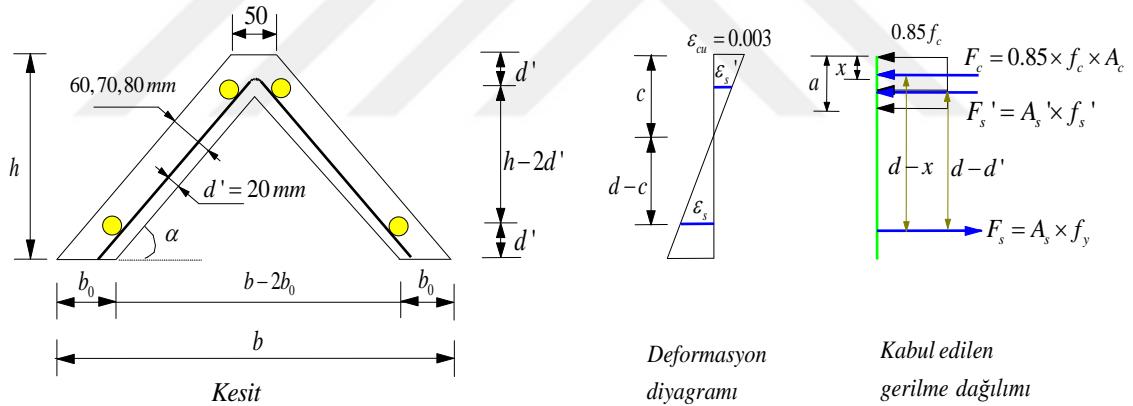
$$\sigma_t = \frac{4.15 \times 0.00772}{2.30} \times \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \times \rho_f \times F_{be} = 0.014 \times \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \times \rho_f \times F_{be} \quad (MPa) \quad (3.7)$$

- Tek tip çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için betonun çekme dayanımı Denklem 3.7 ile karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için ise Denklem 3.8 ile hesaplanmıştır.

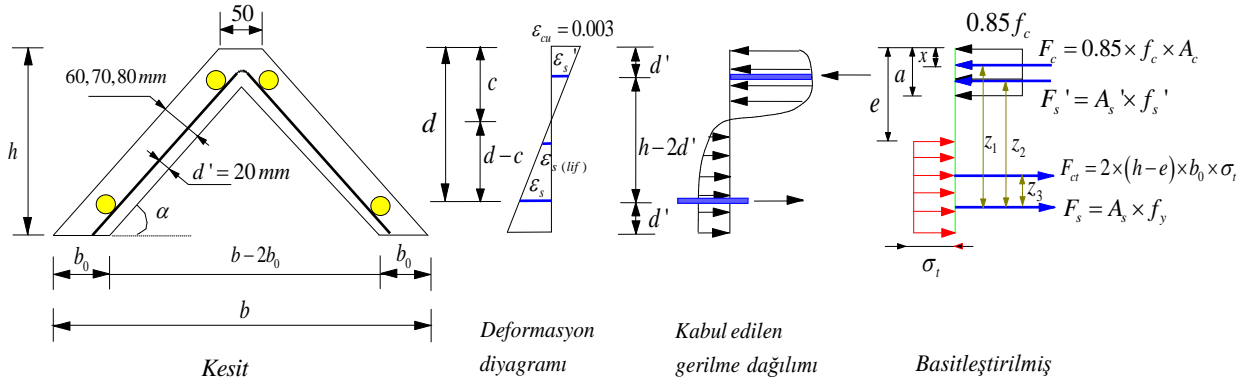
$$\sigma_t = 0.014 \times \left(\frac{\rho_{f(makro)}}{\rho_{f(makro+mikro)}} \times \frac{l_{f(makro)}}{d_{f(makro)}} \times F_{be(makro)} + \frac{\rho_{f(mikro)}}{\rho_{f(makro+mikro)}} \times \frac{l_{f(mikro)}}{d_{f(mikro)}} \times F_{be(mikro)} \right) \quad (3.8)$$

Aderans verimliliği faktörü F_{be} , her iki ucu kancalı ve uzun makro çelik lif için 1.2, düz ve kısa olan mikro çelik lifler için 1.0 alınmıştır (ACI 544, 2009; Shirai ve diğ; 2020).

- Betonun elastik çatlaksız bölgesinin yüksekliği tarafsız eksen derinliği c ile kıyaslandığında çok küçüktür. Bu nedenle, çelik liflerin betonun çekme dayanımına katkısı $(h-e)$ derinlikte dikdörtgen gerilme bloğu şeklinde varsayılmıştır (Bakınız Şekil 3.22.b)



a) Lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plak



b) Lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak

Şekil 3.22: V-şekilli betonarme katlanmış plakların tasarıma esas şekil değiştirme ve gerilme diyagramları

Lifsiz KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların nominal moment taşıma kapasitesi (M_n), Bölüm 2.4.1'de verilen geleneksel çift donatılı betonarme kirişler için uygulanan işlem adımları ile hesaplanmıştır (Bakınız Şekil 3.22.a).

Çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların nominal moment taşıma kapasitesi ise Şekil 3.22.b'ye göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$M_n = F_c \times z_1 + F_s' \times z_2 - F_{ct} \times z_3 \quad (3.9)$$

burada moment kolları olan z_1 , z_2 ve z_3 değerleri Denklem 3.10 yardımıyla hesaplanabilir.

$$z_1 = d - x, \quad z_2 = d - d' \quad \text{ve} \quad z_3 = \frac{h - e}{2} - d' \quad (3.10)$$

Denklem 3.10'da verilen z_1 , z_2 , z_3 değerleri ve Şekil 3.22.b'de tanımlanan F_c , F_s ve F_{ct} Denklem 3.9'da yerine konulursa M_n 'nin son hali Denklem 3.11'deki gibi yazılabilir.

$$M_n = 0.85 \times f_c \times A_c \times (d - x) + A_s' \times f_s' \times (d - d') - 2 \times \sigma_t \times (h - e) \times b_0 \times \left(\frac{h - e}{2} - d' \right) \quad (3.11)$$

burada A_c , b_0 ve x sırasıyla basınç bloğunun alanı, plak kalınlığının yataydaki izdüşümü ve basınç blok derinliğinin ağırlık merkezidir. Son olarak, V-şekilli betonarme katlanmış plakların tarafsız eksen derinliği (c), Denklem 3.11'deki M_n yerine deneysel elde edilen moment taşıma kapasitesi (M_d) yazılarak hesaplanabilir.

4. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Taze Beton Deneylerine Ait Bulgular

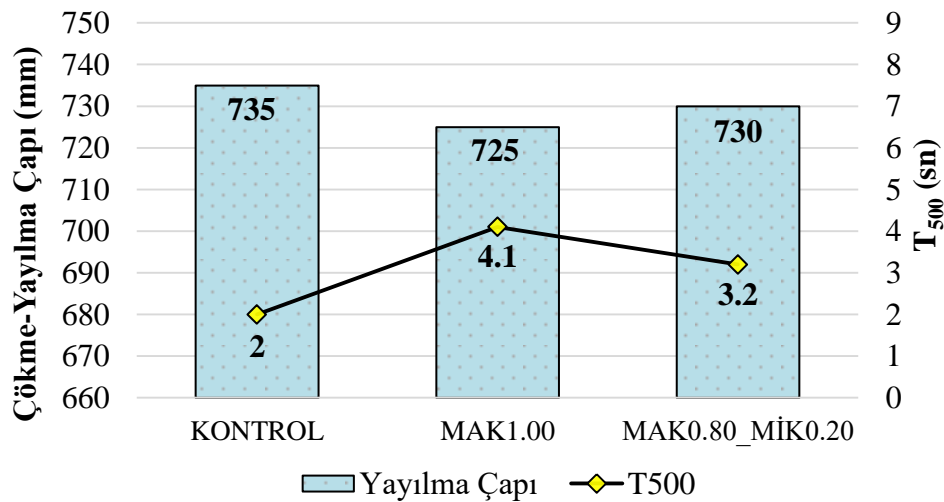
Bu tez çalışması kapsamında, tasarlanan tüm KYB karışımlarına ait işlenebilirlik testlerinden elde edilen bulgular Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Tüm karışımlara ait işlenebilirlik özellikleri hedeflendiği gibi yaklaşık benzer olup, çökme-yayılma değerleri 730 ± 5 mm, T_{500} değerleri 3 ± 1.1 sn, J-halkası yükseklik farkı değerleri 4.25 ± 3.25 mm ve VF değerleri ise 10.5 ± 3.6 sn aralığında değişkenlik göstermiştir.

Çizelge 4.1: Karışımlara ait işlenebilirlik test sonuçları

Karışım Adı	Çökme-Yayılma		J-Halkası		V-hunisi	
	D_c (mm)	T_{500} (sn)	D_j (mm)	T_{500j} (sn)	ΔH (mm)	VF (sn)
KONTROL	735	2	710	4	1.25	7.2
MAK1.00	725	4.1	705	5.9	5.25	14.1
MAK0.80_MİK0.20	730	3.2	707	5	7.50	12.3
EFNARC (2002) Sınır Değerleri	650-800	2-5	-	-	0-10	0-20

4.1.1 Çökme-yayılma ve T_{500} deneyi

KYB'nin doldurma yeteneği ve stabilitesini değerlendirmek amacıyla yapılan çökme-yayılma ve T_{500} testlerine ait bulgular Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de verilmiştir. Bulgular incelendiğinde, Şekil 4.1’de görüleceği gibi, EFNARC (2005) komitesi tarafından önerilen çökme-yayılma sınıfları referans alındığında karışımların hepsi SF2 (660-750 mm) sınıfına girmektedir.



Şekil 4.1: Karışımların çökme-yayılma ve T_{500} değerleri

KYB karışımına hem makro hem de mikro çelik lif takviye edilmesinin, lifsiz kontrol karışıma kıyasla karışımların çökme-yayıma değerlerinde çok az bir azalmaya, T₅₀₀ sürelerinde ise artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, lif uzunluğu ve/veya narinliği değiştiğinde, KYB'nin akıcılığı olumsuz etkilenmiştir. KYB karışımına lif eklenmesi, karışımın akıcılık özelliğinin azalmasının yanı sıra akış süresinin artmasına ve engeller arası geçişte bloklanma riskini ortaya çıkarabilir (Hasan-Nattaj ve Nematzadeh, 2017; Ghanem ve Obeid, 2015; As'ad ve diğ, 2011).

Bunun yanında, karma çelik lifli KYB karışımı daha fazla akışkanlaştırıcı içermesine rağmen tek tip makro çelik lif içeren karışımla yaklaşık benzer çökme-yayıma ve T₅₀₀ sürelerine sahiptir. Bu sonuçlar karışıma dâhil edilen liflerin narinliklerine dayandırılabilir (Türk ve diğ, 2021). Çünkü kısa ve düz mikro çelik liflerin narinliğinin uzun ve kancalı makro çelik liflere kıyasla daha yüksek ve özgül yüzeylerinin daha fazla olması karışımın işlenebilirliğini daha fazla olumsuz etkilemiştir. Literatürde yer alan bazı araştırmalarda (Türk ve diğ, 2021; Türk ve diğ, 2019; Silva ve diğ, 2017; Iqbal ve diğ, 2015; Khaloo ve diğ, 2014; Mohammadi ve diğ, 2008) da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

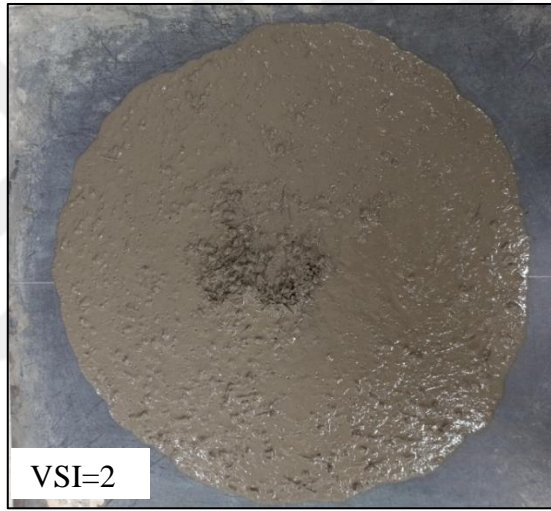
Çalışmada elde edilen KYB karışımlarının stabilitesinin değerlendirilmesinde, Şekil 4.2'deki gibi ASTM C1611 (2018)'de yer alan Visual Stability Index (VSI) değerleri kullanılmıştır. Şekiller incelendiğinden, lifsiz kontrol ve MAK1.00 karışımlarının VSI değerleri 0 iken, MAK0.80_MİK0.20 karışımının ise 2 olduğu tespit edilmiştir. Karma çelik lif takviyeli karışımın VSI değerlerinin 2 olması, narinliği yüksek olan mikro liflerin matriste kümelenmesine dayandırılabilir (Kına, 2019). Sonuç olarak, çalışmadaki tüm KYB karışımlarının kabul edilebilir bir kararlılıkta olduğu görülmüştür.



a) KONTROL



b) MAK1.00



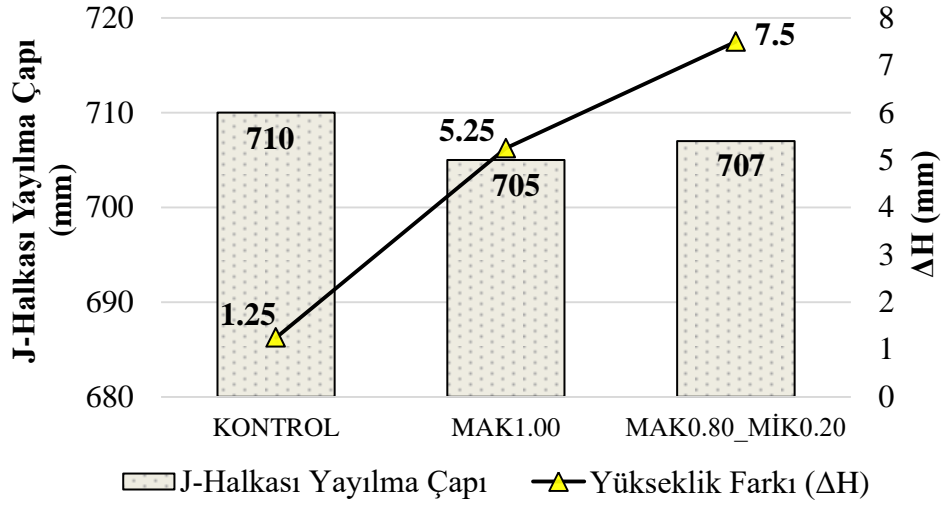
c) MAK0.80_MİK0.20

Şekil 4.2: KYB karışımlarına ait VSI değerlendirmesi

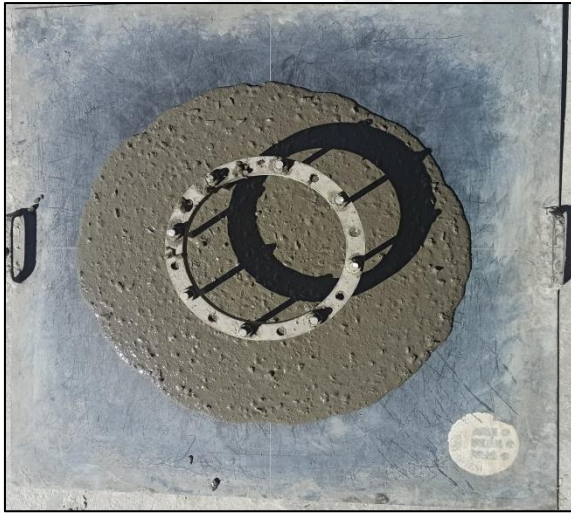
4.1.2 J-halkası deneyi

Taze KYB karışımlarının engeller arasından geçiş kabiliyetini tespit etmek amacıyla yapılan J-halkası testine ait bulgular Çizelge 4.1 ve Şekil 4.3'de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi, tüm karışımlara ait J-halkası yükseklik farkı değerleri 1.25-7.5 mm aralığında olup EFNARC (2002) komitesinin önerdiği sınır değerlerini sağlamıştır. Ayrıca, lif takviyeli KYB karışımlarının lifsiz karışıma kıyasla ΔH değerlerinde artış ve D_j değerlerinde ise çok az bir azalma görülmüştür (Şekil 4.3). Çünkü liflerin fiziksel özellikleri dikkate alındığında, özellikle 13 mm boyundaki mikro çelik liflerin topaklanmaya olan eğiliminin fazla olması karışımların geçiş kabiliyetini azaltmıştır (Akçay ve Tasdemir, 2012; Yu ve diğ., 2014). Literatürde yer alan bazı çalışmalarda (Türk

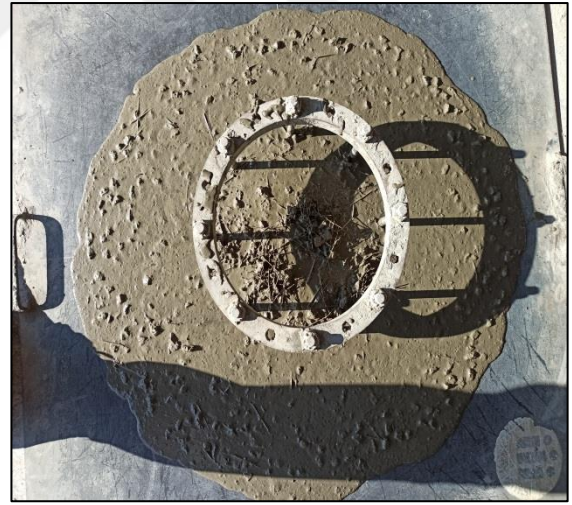
ve diğ, 2019; Türk ve diğ, 2021; Akçay, 2012; Mohammadi ve diğ, 2008) da tespit edildiği gibi, KYB karışımlarına narinliği daha düşük olan çelik liflerin eklenmesi ile işlenebilirlik özelliklerinde daha olumlu sonuçlar elde edilebileceği vurgulanmıştır.



Şekil 4.3: Karışımların J-halkası çökme-yayılma ve yükseklik farkı değerleri



a) KONTROL



b) MAK1.00

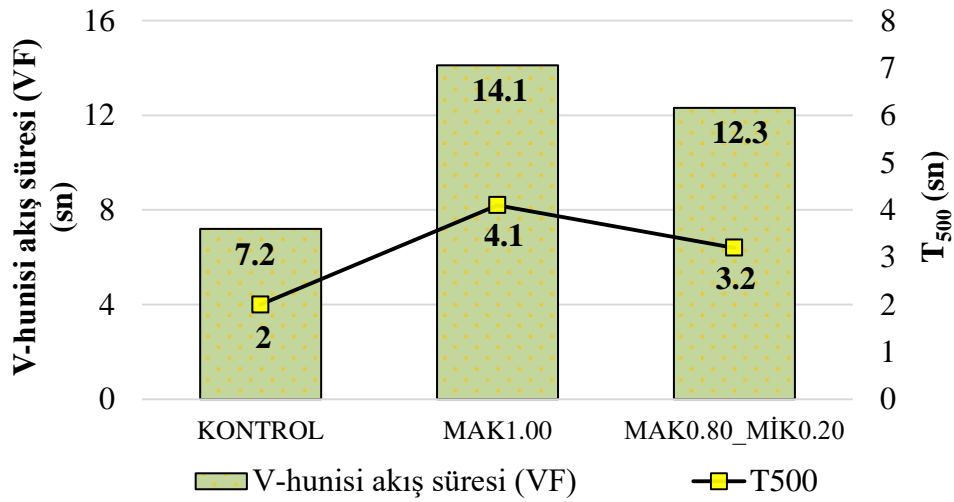


c) MAK0.80_MİK0.20

Şekil 4.4: Karışımların J-halkası testine ait görselleri

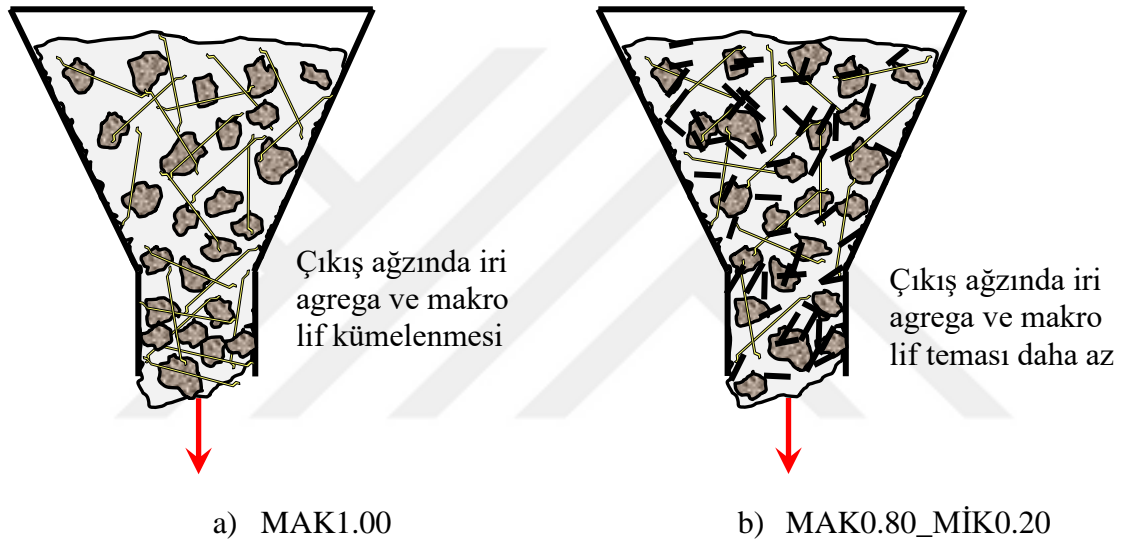
4.1.3 V-hunisi deneyi

Hazırlanan KYB karışımlarının viskozitesi hakkında fikir edinebilmek amacıyla yapılan V-hunisi testinden elde edilen V-hunisi akış süresi (VF) değerleri Çizelge 4.1’de ve T_{500} yayılma süresi ile birlikte karşılaştırma amaçlı Şekil 4.5’de verilmiştir. Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi, EFNARC (2005) komitesi tarafından önerilen V-hunisi akış süreleri baz alındığında, kontrol karışımı VF1 iken tüm çelik lifli KYB karışımları VF2 sınıfına dâhil olmaktadır. Ayrıca, V-hunisi akış süreleri değerleriyle T_{500} değerleri yaklaşık olarak aynı eğilimi göstermiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: Karışımların V-hunisi akış süreleri ve T_{500} değerleri

Tüm lif takviyeli karışımlar içerisinde tek tip makro çelik lifli KYB karışımının VF değeri, karma çelik lifli KYB karışımına kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bu duruma, makro çelik liflerin uzunluğunun (60 mm) V-hunisinin aparatının alt kapağıyla yakın boyutlara (65 mm x 65 mm) sahip olmasının yanında yerçekimi etkisi ile çıkış ağzından akışa geçen betonun, makro çelik liflerin ve iri agregalarla daha fazla temas edip betonun akış hızının düşürmesine neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, karma çelik lif takviyeli KYB karışımında, makro çelik lif miktarının azalmasıyla birlikte iri agregalarla olan temasın azalmasının sonucu olarak V-hunisi akış süresi azalmıştır (Şekil 4.6). Yapılan benzer birçok çalışmada (Dönmez, 2020; Kına, 2019; Yardımcı, 2007) da bu durumu destekleyici bulgular elde edilmiştir.



Şekil 4.6: Makro çelik liflerin KYB karışımlarının V- hunisi akış mekanizmasına etkisinin şematik gösterimi

4.2 Sertleşmiş Beton Deneylerine Ait Bulgular

Tüm KYB karışımlarına ait 3, 28 ve 90 günlük sertleşmiş beton deneylerine ait bulgular Çizelge 4.2’de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.7, 8 ve 9’da verilen hata çubuklarında da anlaşılacağı üzere, her bir karışım için numunelere ait basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımları arasında genelde çok düşük oranlarda sapmalar olduğu görülmektedir. Buda numunelerin özenle mümkün olan en yüksek homojenlikte üretildiğini göstermektedir.

Çizelge 4.2: KYB karışımlarına ait mekanik özellikler

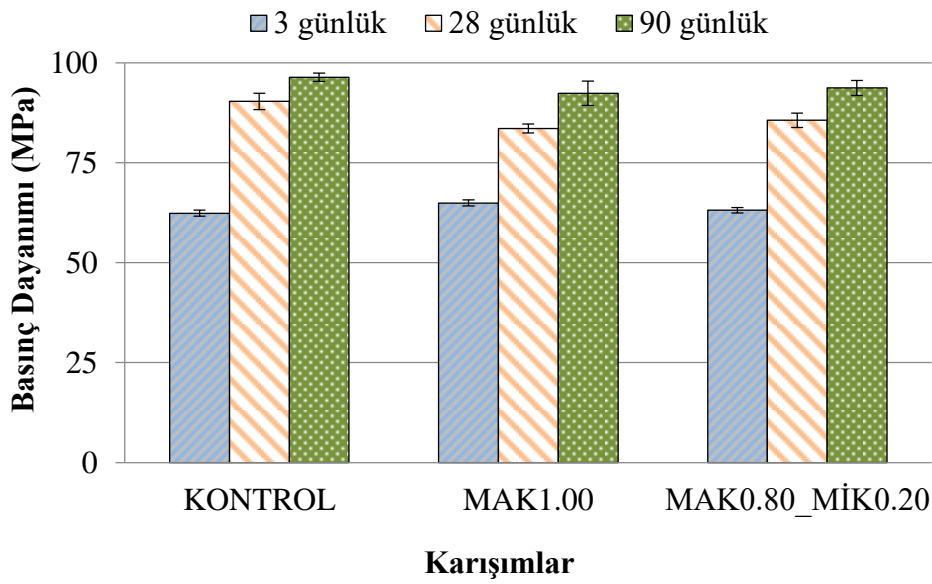
Karışım Adı	Basınç Dayanımları (MPa)			Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)			Eğilmede Çekme Dayanımları (MPa)		
	3 g	28 g	90 g	3 g	28 g	90 g	3 g	28 g	90 g
KONTROL	62.4	90.3	96.4	5.1	6.5	7.0	8.8	12.5	14.5
MAK1.00	64.9	83.5	92.4	8.3	11.4	13.0	16.4	19.2	22.1
MAK0.80_MİK0.20	63.1	85.6	93.7	6.8	12.8	15.2	15.9	17.9	19.3

4.2.1 Basınç dayanımı

Tüm KYB karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.7’de sunulmuştur. Lifsiz kontrol numunelerine ait 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri, sırasıyla 62.4, 90.3 ve 96.4 MPa olarak bulunmuştur. Lif takviyeli numunelerde ise en yüksek basınç dayanımı değerleri, 28 ve 90 günlük kür süreleri baz alındığında sırasıyla, 85.6 MPa ve 93.7 MPa değerleri ile karma çelik lif içeren MAK0.80_MİK0.20 karışımından elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.7’ye bakıldığında, çelik lif takviyeli karışımlara ait basınç dayanımlarının genelde lifsiz kontrol karışımına kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak çelik liflerin KYB karışımlarının işlenebilirlik özelliklerini az da olsa azaltması ve buna bağlı olarak karışımların doluluk oranının düşmesi olarak düşünülmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda (Nyström ve Gylltoft, 2011; Sarı, 2013, Bitkin, 2020), çimento esaslı kompozitlere lif takviyesinin betonun basınç dayanımını lifsiz numuneye kıyasla %±25 oranında değiştirebileceği belirtilmiştir.

Ayrıca, çelik lif içeren KYB’ler birbirleriyle kıyaslandığında, karma çelik lif takviyeli karışımın 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin tek tip makro çelik lif takviyeli karışımınkilere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Zira belli bir

dayanımına ulaşmış matriste, kısa olan mikro lifler daha etkili çatlak köprüleme ve dolayısıyla çatlak oluşum ve yayılımını engelleyip geciktirmektedir. Literatürde mevcut çalışmalarda (Türk, 2019, Haddadou ve diğ, 2014; Sahmaran ve diğ, 2005) da, karma lif takviyeli betonda mikro liflerin çatlak köprülemede etkili olmasının, matrisin nihai dayanım ile ilişkili olduğu ortaya koyulmaktadır. Bununla birlikte, numunelerin kür süresinin artmasıyla beraber basınç dayanımlarında da artışlar olmuştur. Lifsiz ve lifli tüm numuneler için, 90 günlük basınç dayanımı değerleri, uçucu külün yavaş gelişen hidrasyon reaksiyonlarından ötürü 28 günlük basınç dayanımlarına göre ortalama % 9 artmıştır.



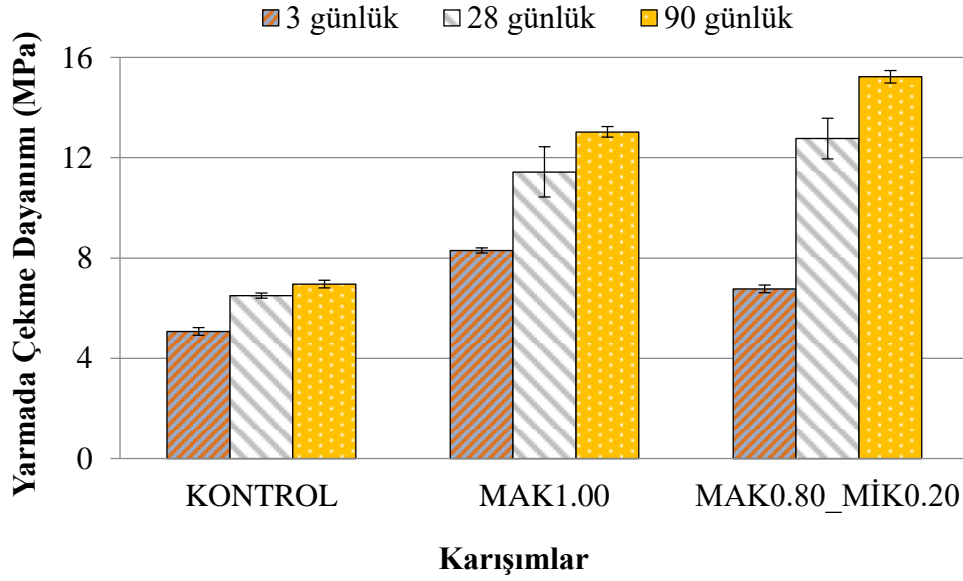
Şekil 4.7: Karışımlara ait basınç dayanımı değerleri

4.2.2 Yarmada çekme dayanımı

KYB karışımlarına ait 3, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.8’de sunulmuştur. Şekil 4.8’den görüldüğü gibi, karışıma çelik lif takviye edilmesi tüm kür yaşları için betonun yarmada çekme dayanımını artırırken, karma çelik lif takviyeli KYB numunelerine ait yarmada çekme dayanımını değerlerinin ise en yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Kontrol numunelerinin 3, 28 ve 90 günlük kür yaşları için yarmada çekme dayanımı değerleri sırasıyla, 5.1, 6.5 ve 7.0 MPa olarak belirlenmiştir. Lif takviyeli numunelerde ise en yüksek yarmada çekme dayanımı değerleri, 28 ve 90 günlük kür süreleri için sırasıyla, 12.8 MPa ve 15.2 MPa değerleri ile karma çelik lif içeren

MAK0.80_MİK0.20 karışımından elde edilmiştir. Literatürde yer alan bazı araştırmalardan (Hsiea ve diğ, 2017; Yu ve diğ, 2015; Blunt ve Ostertag, 2009; Sahmaran ve diğ, 2005; Bentur ve Mindess, 1990) da, betona tek tip lif yerine birden fazla lifin karma olarak eklenmesi, betonun yarmada çekme dayanımı değerlerinde daha çok artış sağladığı belirtilmektedir. Ayrıca, Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, tüm KYB karışımları göz önüne alındığında, uçucu külün pozolanik etkisi sebebiyle 90 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımlarında 28 günlük numunelere kıyasla ortalama %15 bir artış olmuştur.

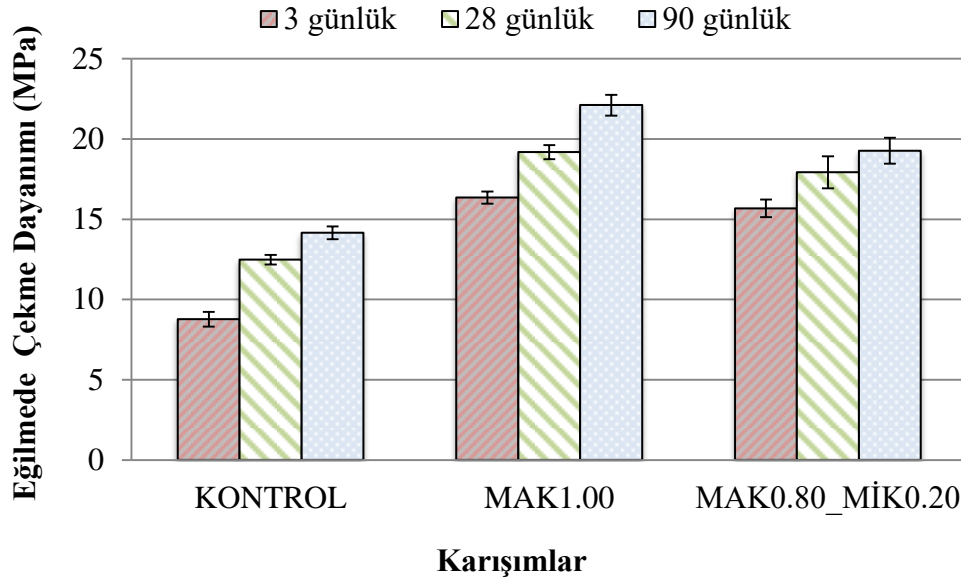


Şekil 4.8: Karışımlara ait yarmada çekme dayanım değerleri

4.2.3 Eğilmede çekme dayanımı

KYB karışımlarının, 3, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla hazırlanan prizmatik numuneler deney gününde dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Test sonucunda elde edilen bulgular Çizelge 4.2 ve Şekil 4.9’de sunulmuştur. Şekil 4.9 görülebileceği gibi, çelik lif takviyeli tüm KYB karışımlarının eğilmede çekme dayanımı değerleri, lifsiz KYB karışımına kıyasla daha yüksektir. Bunun nedeni, liflerin, etkili çatlak köprülemesinin yanı sıra çatlak başlamasını, büyümesini ve yayılmasını kontrol ederek daha yüksek bir yük taşıma kapasitesi mekanizması oluşturmasıdır (Bentur ve Mindess, 1990; Yu ve diğ, 2015; Turk ve diğ, 2021; Pakravan ve diğ, 2017; Tavakoli ve diğ, 2016; Sivakumar ve diğ, 2017). Bununla birlikte, hidrate olmuş çimento taneleri ile çelik lifler arasındaki arayüz bölgesi de numunenin eğilme performansını oldukça etkilemektedir (Bentur, 2000). Bunun bir sonucu olarak kür yaşının artmasıyla lif-matris

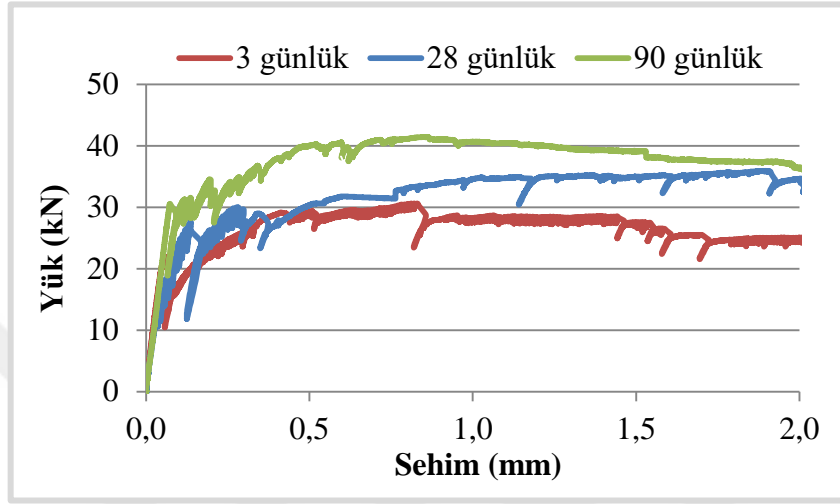
arayüz özelliklerinin iyileşmesine bağlı olarak karışımların eğilmede çekme dayanımlarında artış meydana gelmiştir. Kontrol numunelerinin 3, 28 ve 90 günlük kür yaşları için eğilmede çekme dayanımı değerleri sırasıyla, 8.8, 12.5 ve 14.5 MPa olarak belirlenmiştir. Lif takviyeli numunelerde ise en yüksek eğilmede çekme dayanımı, 3, 28 ve 90 günlük kür yaşları için sırasıyla 16.4, 19.2 ve 22.1 MPa ile tek tip makro lif içeren MAK1.00 karışımıyla üretilmiş numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca, karışıma mikro çelik lif ilave edilmesinin tek lifli karışıma kıyasla, eğilmede çekme dayanımını azalttığı tespit edilmiştir. Literatürde mevcut olan bazı çalışmalarda (Aslani ve diğ, 2020; Mazaheripour ve diğ, 2011; Haddadou ve diğ, 2020) da bu durumu destekleyici sonuçlar bulunmuştur. Bunlara ilaveten, puzolanik bir malzeme olan uçucu külün yavaş gelişen hidrasyon reaksiyonlarından ötürü, tüm KYB numuneleri için 90 günlük eğilmede çekme dayanımı değerlerinin, 28 günlük numunelere kıyasla ortalama %11 arttığı tespit edilmiştir.



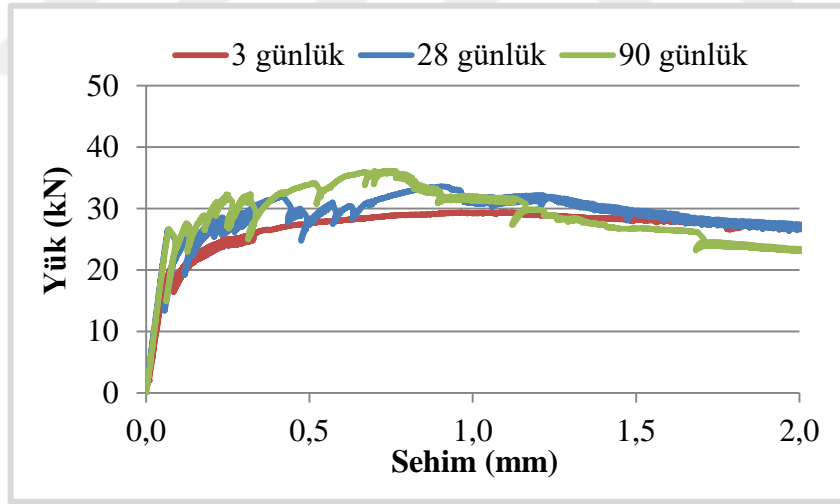
Şekil 4.9: Karışımlara ait eğilmede çekme dayanımı değerleri

Dört noktalı eğilme yüklemesine maruz bırakılan prizmatik çelik lif takviyeli KYB numunelerinden elde edilen yük-sehim eğrileri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Tüm çelik lifli KYB numuneleri her bir kür yaşı için birbirleriyle karşılaştırıldığında, yük-sehim eğrilerinde ilk tepe yük öncesi bölgelerin benzer olduğu görülmektedir. Bunun yanında, karışıma makro çelik lif takviyesinin, yük taşıma kapasitesi üzerinde daha olumlu bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, mikro çelik liflerin sadece mikro çatlakları köprülemede etkin olmasına ve tepe noktası sonrasındaki davranış üzerinde çok ciddi bir etkiye sahip olamamasına dayandırılabilir. Çünkü makro çelik lifler, eğilmeye maruz lifli KYB numunelerinin plastik bölgesinde daha etkin çalışarak süneklik ve yük taşıma

kapasitesini arttırırken, mikro çelik lifler ise mikro çatlakları sınırlama bakımından elastik bölgede daha etkili olarak çekme dayanımını arttırmaktadır (Yoo ve diğ, 2013; Marković, 2006). Literatürde yer alan birçok çalışmada (Türk ve diğ, 2021; Pajak ve Ponikiewski, 2013; Wu ve diğ, 2016; Haddadou ve diğ, 2014) karma çelik lif takviyeli KYB karışımlarında makro lif yerine mikro çelik lif ilave edildikçe, numunelerin süneklik ve taşıma kapasitesi değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir.



a) MAK1.00



b) MAK0.80_MİK0.20

Şekil 4.10: Karışımlara ait 3, 28 ve 90 günlük yük-sehim eğrileri

4.3 Büyük Ölçekli V-Şekilli Betonarme Katlanmış Plakların Eğilme Yükleme Altındaki Davranışı

4.3.1 V-Şekilli betonarme katlanmış plakların eğilme performansı

Lifsiz ve çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plaklar dört noktalı yüklemeye maruz bırakılarak eğilme performansları incelenmiştir. Ayrıca, tüm büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerinin eğilme testleri ile karışımlara ait basınç (f_c) ve eğilmede çekme dayanımı (f_e) testleri 90 günlük kür periyodu sonunda gerçekleştirilmiş olup tüm numuneler aynı şartlarda kür edilmiştir. Büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait maksimum yük taşıma kapasitesi (P_{max}), maksimum yüke karşılık gelen açıklık ortası sehimi (δ) ve Denklem 3.11 kullanılarak elde edilen tarafsız eksen derinliği (c) değerleri ile büyük ölçekli plakların üretiminde kullanılan karışımlara ait basınç ve eğilmede çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3: V-şekilli betonarme katlanmış plakların dört noktalı eğilme yüklenmesinden ve beton dayanım testlerinden elde edilen bulgular

Numune Adı	f_c (MPa)	f_e (MPa)	P_{max} (kN)	δ (mm)	c (mm)
KONTROL_60mm	95.6 (1.0)	14.4 (0.2)	19.2 (0.5)	29.6 (0.7)	16.7 (0.1)
MAK1.00_60mm	91.8 (1.4)	22.0 (1.2)	30.0 (1.4)	23.0 (0.1)	21.8 (0.1)
MAK0.80_MİK0.20_60mm	93.2 (0.9)	19.1 (0.8)	30.9 (1.0)	15.1 (1.1)	21.9 (0.2)
KONTROL_70mm	95.9 (1.2)	14.2 (0.3)	20.9 (0.7)	30.0 (0)	17.1 (0.2)
MAK1.00_70mm	91.5 (1.0)	21.8 (1.6)	33.4 (0.8)	27.1 (1.3)	23.0 (0.2)
MAK0.80_MİK0.20_70mm	92.9 (1.1)	19.0 (1.2)	39.0 (1.2)	19.3 (0.9)	24.5 (1.0)
KONTROL_80mm	96.2 (0.8)	14.3 (0.2)	24.8 (0.3)	30.0 (0)	18.4 (0.1)
MAK1.00_80mm	93.1 (1.1)	21.9 (0.8)	40.1 (1.4)	26.7 (1.2)	25.4 (0.3)
MAK0.80_MİK0.20_80mm	94.8 (1.6)	19.1 (1.5)	43.3 (0.8)	25.6 (0.2)	25.9 (0.2)

(Parantez () içindeki değerler standart sapmadır.)

Deneylemlerden elde edilen bulgulara bakıldığında, 80 mm kalınlığa (MAK0.80_MİK0.20_80mm) sahip karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerinin 43.3 kN ile en yüksek yük taşıma kapasitesine (P_{max}) sahip olduğu tespit edilmiştir. Her plak kalınlığı grubu kendi içerisinde kıyaslandığında, tek ve karma çelik lif takviye edilen 60, 70 ve 80 mm kalınlıklı V-şekilli betonarme katlanmış plakların yük taşıma kapasitesi, lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plaklara göre sırasıyla ortalama %59, % 74 ve % 69 oranlarında artmıştır. Ayrıca, her bir plak kalınlık grubu için, V-şekilli betonarme katlanmış plaklara hem tek hem de karma çelik lif ilave edilmesi, lifsiz V-şekilli

betonarme katlanmış plaklara kıyasla tarafsız eksen derinliğinde (c) artışa ve maksimum yüke karşılık gelen açıklık ortası sehiminde (δ) ise bir azalmaya neden olmuştur. Bunun nedeni, lifsiz katlanmış plak numunelere kıyasla, liflerin çekme bölgesindeki ilave donatı etkisi, sehim sertleşmesi davranışı ve çatlakları kontrol mekanizması etkilerinden dolayı çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlama sonrası eğilme rijitliğinin ve yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde artmasına dayandırılabilir (Khalil ve Tayfur, 2013; Fehling ve diğ, 2013; Dancygier, 2006; Wille ve Parra-Montesinos, 2012; Yoo ve diğ, 2015; Ashour ve Wafa, 1993; Yoo ve Yoon, 2015; Türker ve Torun; 2020; Türker ve diğ, 2019a). Ayrıca, lif takviyeli KYB'lerin yüksek elastisite modülü değerlerinden dolayı kirişlerin eğilme rijitliğini de arttırdığı bilinmektedir (Türker ve diğ, 2019b).

Çizelge 4.3'de görüldüğü gibi, tüm plak kalınlıkları için karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numuneleri en yüksek yük taşıma kapasitesine sahipken, bunu tek çelik lif takviyeli numuneler takip etmiştir. Ayrıca, 60 mm kalınlığında karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin yük taşıma kapasitesi, 80 mm kalınlığındaki lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plaklar numunelere kıyasla %25 daha yüksektir. Buradan, V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığının, KYB karışımlarına özellikle karma çelik lif takviye edilmesi durumunda daha etkin bir şekilde azaltılabileceği vurgulanabilir. Bunun bir sonucu olarak, büyük açıklıklı alanları kapatmak için çelik lif takviyeli KYB ile üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların kullanılması halinde aşağıdaki avantajlar sağlanabilir;

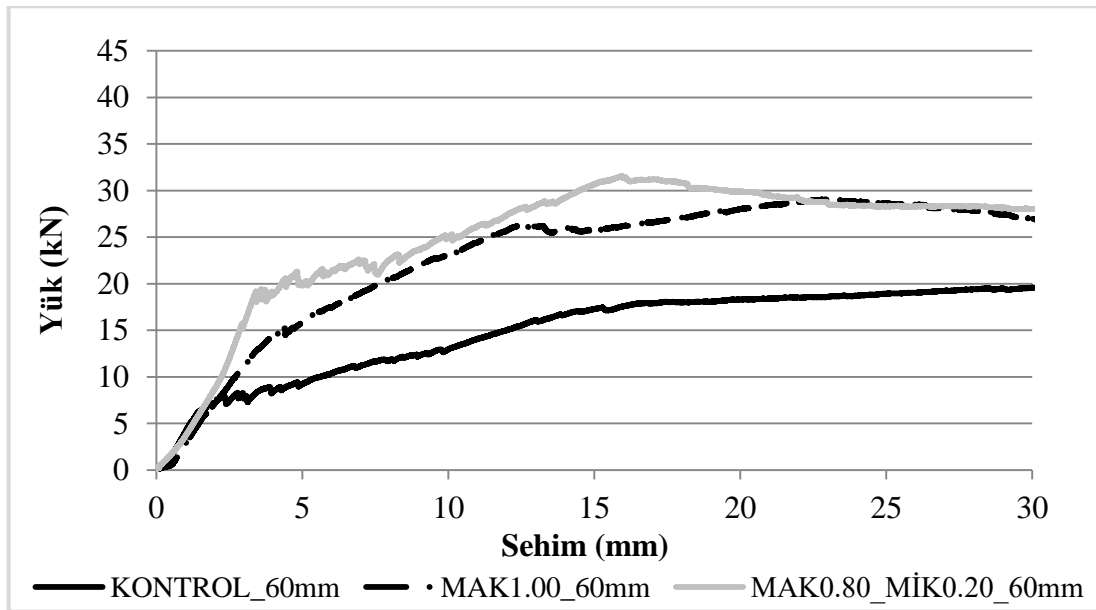
- i. Yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış,
- ii. Azaltılmış zati yük nedeniyle deprem davranışında iyileşme,
- iii. Mimari açıdan daha cazip bir yapı tasarımı.

4.3.2 V-şekilli betonarme katlanmış plakların yük-sehim eğrileri

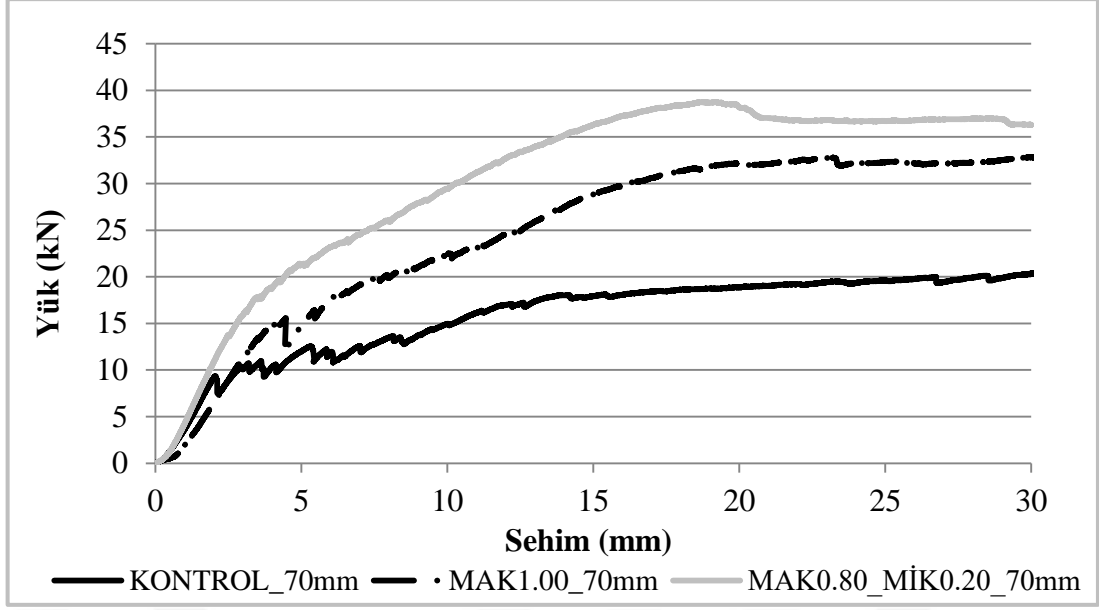
V-şekilli betonarme katlanmış plakların dört noktalı eğilme yüklemesi altında farklı noktalarda sehim ölçümleri alınmıştır. Fakat sadece açıklık ortası yük-sehim eğrileri dikkate alınarak yorum ve tartışmalar yapılmıştır. Zira mesnet bölgelerine yerleştirilen LVDT 1 ve 2 ile yanal açılmayı ölçmek için yerleştirilen LVDT 5 ve 6 vasıtasıyla ihmal edilebilecek sehim (1.2 ± 0.3 mm) değerleri ölçülmüştür. Açıklık ortası eğimli plaklardaki sehim ölçmek için yerleştirilen LVDT 3 ve 4'te ise açıklık ortasına yerleştirilen LVDT 7

ile aynı yük-sehim eğrilerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu da yanal mesnetler ile desteklenmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların yük altında herhangi bir yanal açılmaya maruz kalmadığının bir göstergesi olabilir.

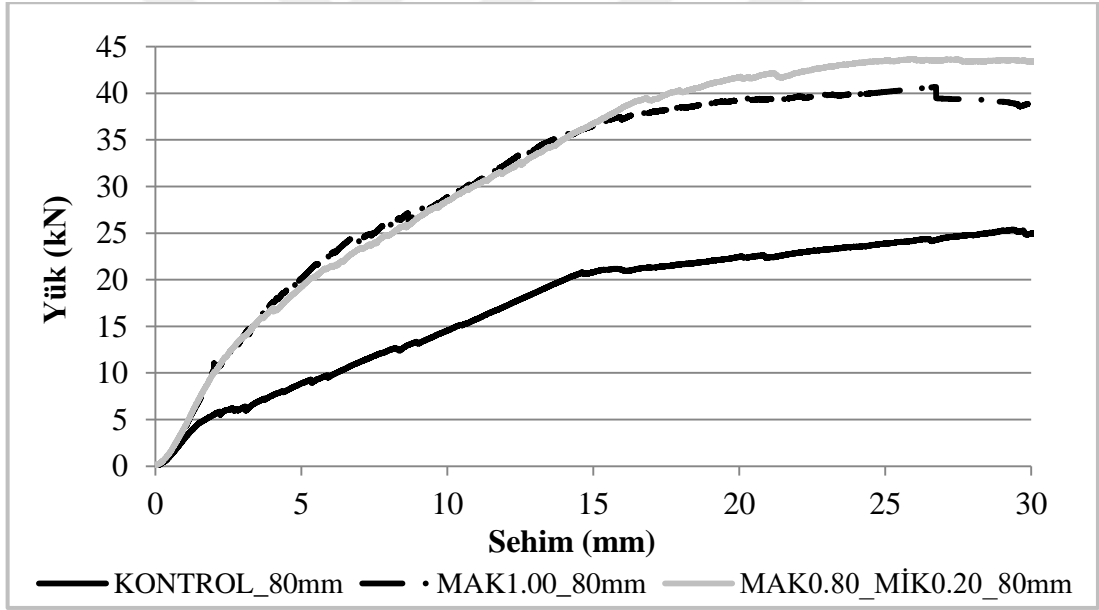
Farklı plak kalınlığı ve lif kombinasyonlarına sahip büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerinin dört noktalı eğilme yüklemesi altında açıklık ortasında oluşan yük-sehim eğrileri Şekil 4.11 a, b ve c'de verilmiştir. Her plak kalınlığı grubundaki tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklar, ilk çatlak noktasına kadar benzer lineer doğrusal bir davranış sergilemişlerdir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, tüm plak kalınlık grupları için, hem tek hem de karma çelik lif takviyesi, lifsiz numunelere kıyasla V-şekilli betonarme katlanmış plakların ilk çatlama yükünü, rijitliğini ve nihai yük taşıma kapasitesini artırmıştır. V-şekilli betonarme katlanmış plakların üretiminde, KYB'ye karma çelik lif takviyesinin tek tip çelik life kıyasla, ilk çatlama yükü, rijitliği ve nihai yük taşıma kapasitesi üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Bu durum, liflerin çatlak köprüleme mekanizmasına ve eğilme çatlaklarının açılmasını geciktirmesine bağlanabilir (Meda ve diğ, 2012). Yani, mikro çelik lifler, mikro çatlakların başlamasını ve yayılmasını kontrol ederek betonun çekme özelliklerini iyileştirirken (Yoo ve diğ, 2017; Caggiano ve diğ, 2012), makro çelik lifler ise makro çatlakları kontrol ederek elemanın hem yük taşıma kapasitesinde hem de tokluğunda artışa neden olmuştur (Mobasher, 1996; Akcay, 2012).



a) 60 mm plak kalınlığına sahip V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait yük-sehim eğrileri



b) 70 mm plak kalınlığına sahip V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait yük-sehim eğrileri



c) 80 mm plak kalınlığına sahip V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait yük-sehim eğrileri

Şekil 4.11: Tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait açıklık ortası yük-sehim eğrileri

V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için sunulan yük-sehim eğrilerinden görülebileceği gibi, tüm numuneler sehim-sertleşmesi davranışı sergilemiştir. Lif takviyesi ve plak kalınlığındaki artışla birlikte, sehim-sertleşmesi bölgesinin uzunluğunun da arttığı görülmüştür.

4.3.3 V-şekilli betonarme katlanmış plakların tokluk ve sünekliği

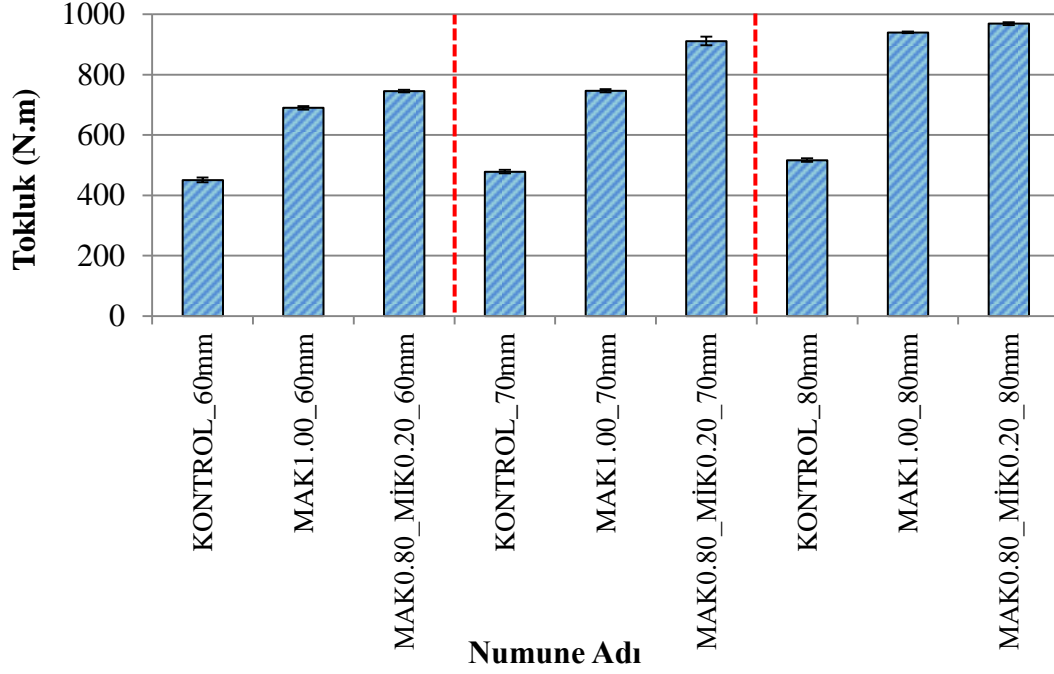
Farklı plak kalınlıklarına ve lif kombinasyonlarına sahip büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerinin açıklık ortasına ait yük-sehim eğrilerinden elde edilen tokluk ve Denklem 3.6 yardımıyla hesaplanan süneklik indeksi (S_i) değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4: Tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait tokluk ve süneklik indeksi değerleri

Numune Adı	Tokluk (N.m)	Süneklik (S_i)
KONTROL_60mm	451.08	3.33
MAK1.00_60mm	690.02	3.75
MAK0.80_MİK0.20_60mm	745.60	5.00
KONTROL_70mm	478.79	2.68
MAK1.00_70mm	746.62	3.66
MAK0.80_MİK0.20_70mm	911.54	4.62
KONTROL_80mm	516.76	1.76
MAK1.00_80mm	940.30	2.31
MAK0.80_MİK0.20_80mm	969.23	2.61

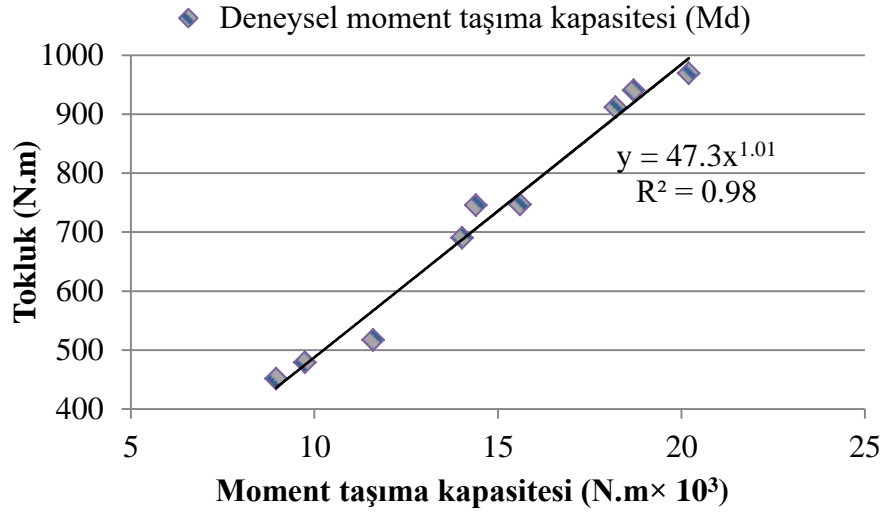
Malzemelerin enerji yutma kapasitesi olarak tanımlanan tokluk, yapıların sismik, darbe ve patlama yüklerine karşı direnç göstermesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada farklı plak kalınlığı ve lif kombinasyonuna sahip V-şekilli betonarme katlanmış plakların hesaplanan tokluk değerleri Şekil 4.12’de de verilmiştir. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi, tüm plak kalınlıkları için çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numuneler, lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelere kıyasla daha yüksek tokluk değerlerine sahiptir. KYB karışımına karma veya tek çelik lif takviyesinin lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plaklara kıyasla, tokluk değerlerini sırasıyla, ortalama % 91 ve % 67 arttırmıştır. Ayrıca, en yüksek tokluk kapasitesi 969.23 N.m değeri ile 80 mm kalınlığa sahip karma çelik lifli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerinden elde edilirken, her kalınlık grubu içerisinde de karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plaklar tokluk açısından en iyi performansı sergilemiştir. Sonuçta, karma çelik lif kullanımının tüm plak kalınlıkları için V-şekilli betonarme katlanmış plakların tokluk kapasitesi üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Literatürde yapılmış olan birçok çalışmada (Türker ve Torun; 2020; Türker ve diğ, 2019a; Kına ve Türk, 2021)

da büyük ölçekli kiriş elemanların üretiminde tek lif yerine karma lif kullanımının elemanların yük taşıma kapasitesi, tokluk ve sünekliliğini daha çok geliştireceği vurgulanmıştır.



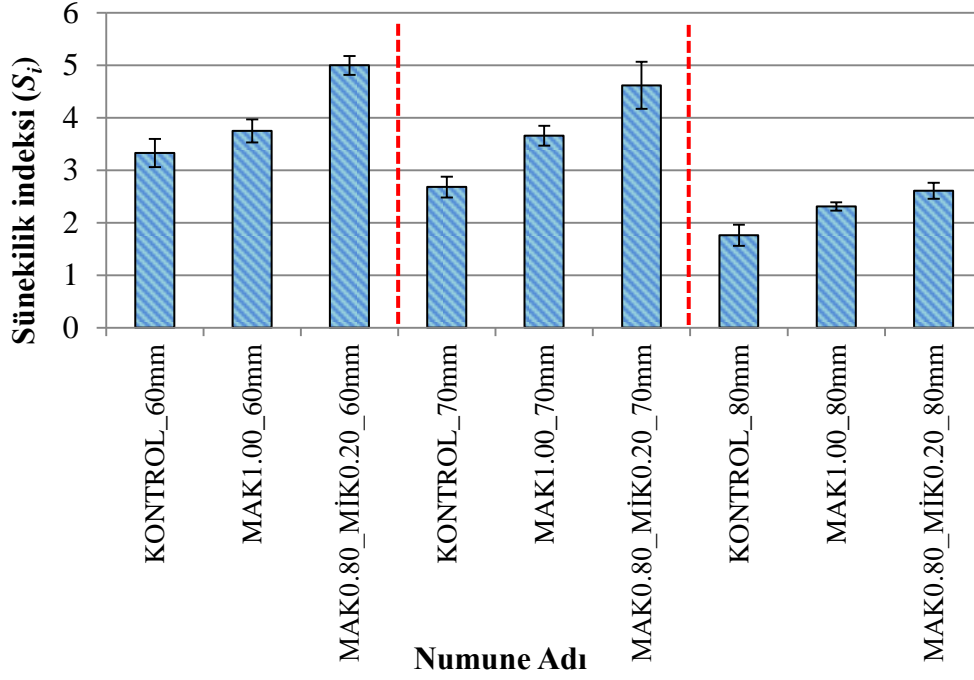
Şekil 4.12: V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait tokluk değerleri

Tüm bunlara ek olarak, Şekil 4.13'de gösterildiği gibi, tüm V-şekilli betonarme katlanmış plakların tokluk ve deneysel moment taşıma kapasitesi arasında bir regresyon analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda, deneysel moment taşıma kapasitesi kullanılarak V-şekilli betonarme katlanmış plakların tokluk değerinin $R^2 = 0.98$ ile yüksek bir doğrulukta tahmin edilebildiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.13: V-şekilli betonarme katlanmış plakların tokluğu ile deneysel moment taşıma kapasitesi arasındaki ilişki

Bir yapının tasarımında, sünekliğin dikkate alınması, şu nedenlerden dolayı hayati bir öneme sahiptir: (i) gevrek kırılmayı önlemek, (ii) deprem ve patlama gibi dinamik yüklere karşı yapının bütünlüğünü koruması (Park, 1991). Bu amaçla lif kombinasyonu ve plak kalınlığının V-şekilli betonarme katlanmış plakların sünekliği üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla hesaplanan süneklik indeksi değerleri Şekil 4.14’de de verilmiştir. Şekil 4.14’ de görüldüğü gibi en yüksek süneklik indeksi değeri 5.0 ile 60 mm kalınlığa sahip karma çelik lifli V-şekilli betonarme katlanmış plaklarda elde edilmiştir. Her kalınlık grubunda, karma çelik lifli V-şekilli betonarme plakların daha sünek bir davranış sergilediği görülmüştür. Ayrıca plak kalınlığının artmasına bağlı olarak eleman rijitliğinin de artması V-şekilli betonarme katlanmış plak elemanlarının sünekliğinde azalmaya neden olmuştur.



Şekil 4.14: V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait süneklik indeksi değerleri

4.3.4 V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlak modelleri

Farklı plak kalınlıklarına ve lif kombinasyonlarına sahip büyük ölçekli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerinin dört noktalı eğilme yüklemesi altında oluşan çatlak modellerine ait görseller Şekil 4.15-17 verilmiştir. Tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklarda oluşan ilk çatlaklar, numunelerin salt moment bölgesinde meydana geldiği deney sırasında gözlemlenirken bu bölgede tamamen eğilme çatlakları gelişmiştir. Sonuçta, tüm lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numuneler eğilme kırılması şeklinde göçerken, lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin kesme açıklığı bölgesinde çok az sayıda kesme çatlağı geliştiği görülmüştür (Şekil 4.15. a ve b, Şekil 4.16. a ve b, Şekil 4.17. a ve b).

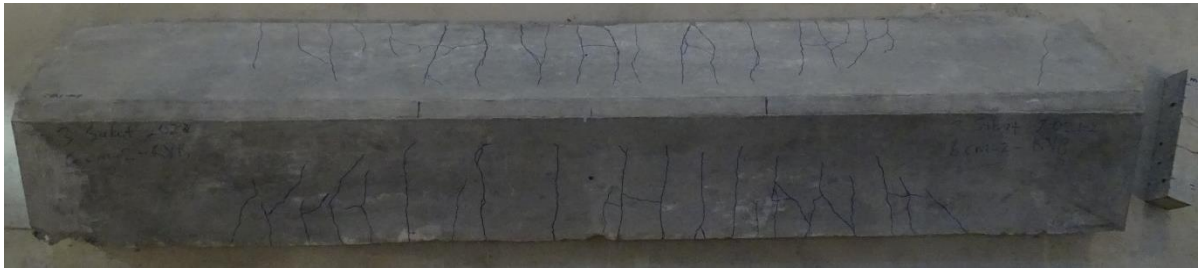
Tüm lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerde yaklaşık aynı genişlikte daha az sayıda ve daha geniş çatlaklar gözlemlenirken, tek ve karma çelik lifli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerde ise daha çok sayıda ve küçük genişlikli çatlak oluştuğu görülmüştür. Bunun yanında, çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin salt moment bölgesinde bir veya iki büyük genişlikli çatlak oluşumu da gözlemlenmiştir (Şekil 4.15-4.17).

Tüm çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlak modelleri, eğilme çatlakları şeklinde olup sünek bir davranış sergilemişlerdir (Şekil 4.15. c, d, e ve f, Şekil 4.16. c, d, e ve f, Şekil 4.17. c, d, e ve f). Bu durum, kayma gerilmelerinin yoğun olduğu kesme açıklığında çatlaklara dik veya eğimli olarak yönelen makro ve mikro çelik liflerin sırasıyla, makro ve mikro çatlaklar arasında köprülümeye yaparak kesme kırılmasını önlemesi ile açıklanabilir. Bu sonuç, yapılan bazı çalışmalarda (Sahoo ve diğ, 2015; Foster ve diğ, 2018) belirtilen, çelik liflerin betonarme kirişlerin kesme dayanımını artırdığı sonucu ile tutarlıdır.

Genelde, plak kalınlığından bağımsız olarak lifli V-şekilli betonarme katlanmış plaklarda, çok sayıda mikro çatlak oluşumunun sonucu olarak çoklu-çatlak davranışı gözlemlenmiştir (Şekil 4.15. c, d, e ve f, Şekil 4.16. c, d, e ve f, Şekil 4.17. c, d, e ve f). Bunun yanında, karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin, tek çelik lif takviyeli olanlara kıyasla, genelde daha iyi çoklu-çatlak davranışı sergilediği görülmüştür (Şekil 4.15. e ve f, Şekil 4.16. e ve f, Şekil 4.17. e ve f). Bunlara ek olarak, karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin, tek çelik lif takviyeli olanlara kıyasla kırılma sonrasındaki eleman bütünlüğünü daha iyi korudukları tespit edilmiştir (Şekil 4.15. c ve d, Şekil 4.16. c ve d, Şekil 4.17. c ve d). Dolayısıyla mikro çelik liflerin kullanımı V-şekilli betonarme katlanmış plakların kırılma sonrası bütünlüğünü koruma açısından hayati bir öneme sahip olduğu vurgulanabilir. Çünkü deprem esnasında betonarme elemanların bütünlüğünü koruması, yapının ani çökmesini engeller ve yaşam alanlarının oluşmasına olanak sağlar.



a) KONTROL_60mm_1



b) KONTROL_60mm_2



c) MAK1.00_60mm_1



d) MAK1.00_60mm_2



e) MAK0.80_MİK0.20_60mm_1



f) MAK0.80_MİK0.20_60mm_2

Şekil 4.15: 60 mm kalınlıklı V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlak modelleri



a) KONTROL_70mm_1



b) KONTROL_70mm_2



c) MAK1.00_70mm_1



d) MAK1.00_70mm_2



e) MAK1.00_MIK0.20_70mm_1



f) MAK1.00_MİK0.20_70mm_2

Şekil 4.16: 70 mm kalınlıklı V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlak modelleri



a) KONTROL_80mm_1



b) KONTROL_80mm_2



c) MAK1.00_80mm_1



d) MAK1.00_80mm_2



e) MAK0.80_MİK0.20_80mm_1



f) 0 MAK0.80_MİK0.20_80mm_2

Şekil 4.17: 80 mm kalınlıklı V-şekilli betonarme katlanmış plakların çatlak modelleri

4.3.5 V-şekilli betonarme katlanmış plakların moment taşıma kapasitesinin analitik hesabı

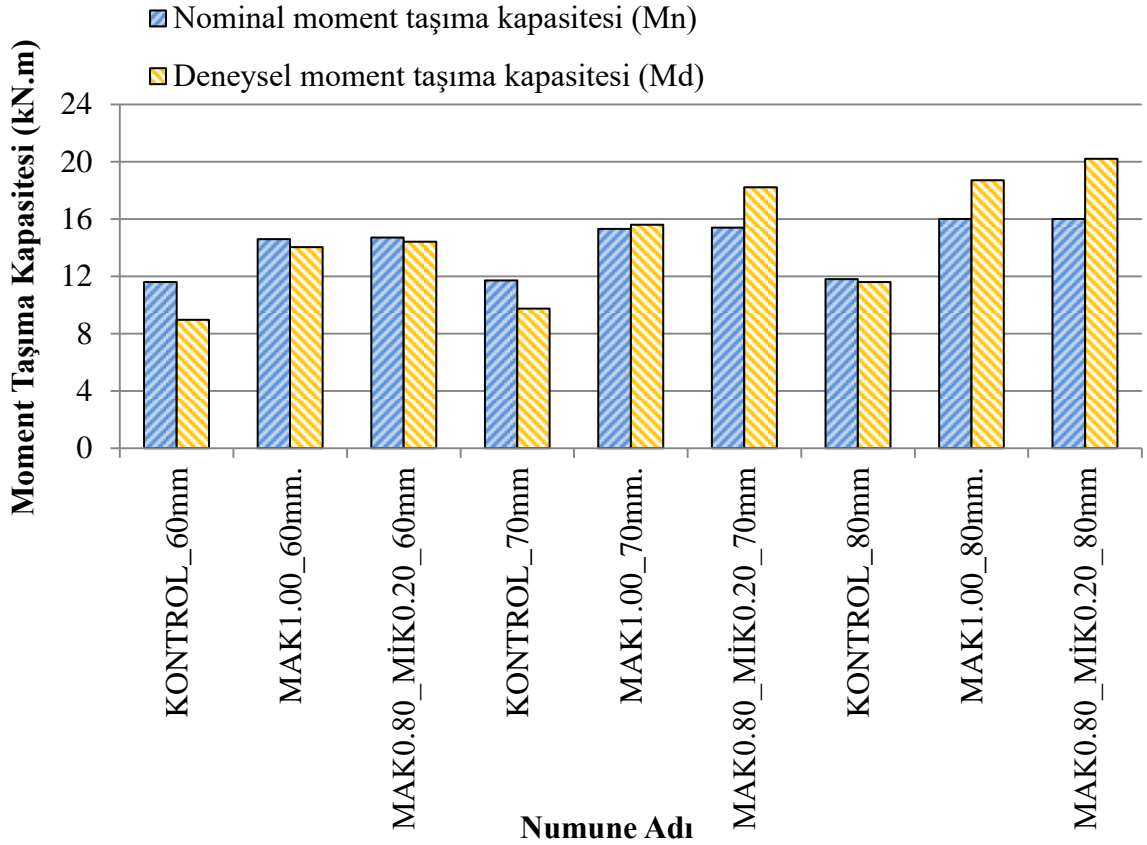
Bu çalışmada, tek ve karma çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların nominal moment kapasitesini tahmin etmek için ACI 544 (2009) şartnamesindeki analitik yaklaşım kullanılmıştır. Analitik hesap, normal dayanımlı çelik lif takviyeli betondan üretilmiş tek donatılı betonarme kirişler için önerilen modele dayanmaktadır. Hesaplamalarda, ACI 544 (2009) şartnamesinin önerdiği basınç ve çekme bölgeleri için eşdeğer gerilme bloğu kullanımı korunmuştur. Ancak, test sonuçlarıyla uyumlu olması için mevcut model üzerinde yapılan bazı iyileştirmeler ve kabuller Bölüm 3.6'da verilmiştir. Bu varsayımlar ile bu çalışmadaki tek ve karma çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların deneysel ve nominal moment taşıma kapasitesi değerleri ile birlikte göçme modları Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5: Deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması

Numune Adı	M_n (kN.m)	Deneysel Sonuçlar		Hesaplanan Nominal
		M_d (kN.m)	Göçme Modu	Momentin Deneysel Momentine Oranı
KONTROL_60mm	11.6	8.95	Kesme-Eğilme	1.30
MAK1.00_60mm.	14.6	14.02	Eğilme	1.04
MAK0.80_MİK0.20_60mm	14.7	14.40	Eğilme	1.02
KONTROL_70mm	11.7	9.73	Kesme-Eğilme	1.20
MAK1.00_70mm.	15.3	15.60	Eğilme	0.98
MAK0.80_MİK0.20_70mm	15.4	18.20	Eğilme	0.85
KONTROL_80mm	11.8	11.60	Kesme-Eğilme	1.12
MAK1.00_80mm.	16.0	18.70	Eğilme	0.85
MAK0.80_MİK0.20_80mm	16.0	20.20	Eğilme	0.79
			Ortalama	1.01
			Std	0.17
			CoV	0.16

Çalışma kapsamında, deneysel olarak elde edilen V-şekilli betonarme katlanmış plakların moment taşıma kapasitesi, ACI 544 (2009) şartnamesine göre analitik olarak hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan kabuller doğrultusunda hesaplanan V-şekilli betonarme katlanmış plaklara ait nominal moment taşıma kapasitesi (M_n) ve dört noktalı eğilme testlerinden elde edilen deneysel moment taşıma kapasitesi (M_d) değerleri Şekil 4.18'de de gösterilmiştir. Ayrıca, M_n/M_d oran değerleri için ortalama, standart sapma (Std) ve varyasyon katsayısı (CoV) gibi istatistiksel değerlendirme parametreleri Çizelge 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.18'de görüldüğü gibi, V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için hesaplanan nominal moment taşıma kapasite değerlerinin, deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. İstatistiksel değerlendirme parametrelerine bakıldığında, ortalama M_n/M_d , Std ve CoV değerleri sırasıyla 1.01, 0.17 ve 0.16 olup, analitik moment hesap yaklaşımının V-şekilli betonarme katlanmış plakların moment taşıma kapasitelerini %1 band aralığında belirleyebileceği görülmektedir. Ayrıca, bu istatistiksel değerlendirmede tek lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plakların hesaplanan nominal moment taşıma kapasitesi değerlerinin, karma lif takviyeli plak numunelerine kıyasla daha iyi tahmin edilebileceği görülmüştür. Yapılan bazı çalışmalarda (Xia ve diğ, 2018; Hasgül ve diğ, 2018; Türker ve diğ, 2019a) da ACI 544 (2009)

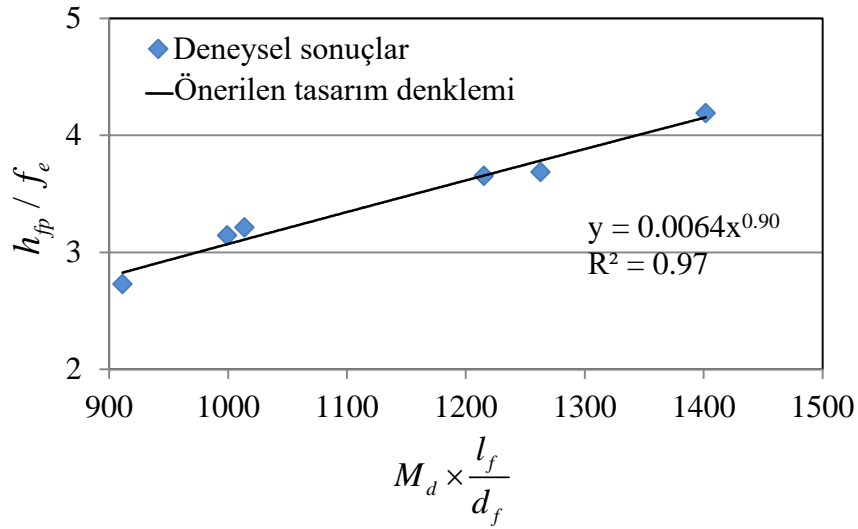
şartnamesinin temel esasları baz alınarak UHPFRC ile üretilmiş betonarme kirişlerin analitik olarak hesaplanan nominal moment taşıma kapasite değerleri de bu durumu desteklemektedir. Bunun yanında, lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin M_n/M_d oranı değerlerinin tüm kalınlık grupları için 1'den büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, çekme bölgesindeki betonun çekme dayanımının ihmal edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.18: Tüm V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için deneysel ve nominal moment taşıma kapasitesi değerleri

Bununla birlikte, çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların moment taşıma kapasitesinin hesaplanmasıyla ilgili literatürde herhangi bir deneysel veya teorik çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, çalışma kapsamında ele alınan çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plakların M_n/M_d oranı değerleri başka bir çalışmayla karşılaştırılamamıştır.

Farklı plak kalınlıklarına sahip tek ve karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plaklar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında plak kalınlığının tahmin edilmesi için regresyon analizi yapılmıştır. Şekil 4.19’da görüldüğü gibi, regresyon analizinde x eksenine deneysel moment taşıma kapasitesi (M_d) ve lif narinliğinin (l_f/d_f) çarpımı, y eksenine ise plak kalınlığının (h_{fp}) eğilmede çekme dayanımına (f_e) oranı yazılmıştır. Gerçekleştirilen regresyon analizinde, çelik lif takviyeli KYB’den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığını $R^2=0.97$ gibi yüksek bir değerle tahmin edebilen $y=ax^n$ formunda üssel bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Plak kalınlığının tahmininde kullanılacak ampirik formül Denklem 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.19: Çelik lif takviyeli KYB’den üretilen V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığının tahmini için önerilen denklem

$$h_{fp} = 0.0064 \times \left(M_d \times \frac{l_f}{d_f} \right)^{0.90} \times f_e \quad (4.1)$$

Bu çalışma kapsamında, çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığının tahmininde önerilen ampirik formül aşağıdaki koşul durumları için geçerlidir:

- Basınç dayanımı $f_c \geq 90$ MPa
- Eğilme çekme dayanımı $f_e \geq 15$ MPa
- Çelik liflerin ortalama narinlik (l_f/d_f) değerleri 60'a eşit veya daha büyük olmalıdır.

Literatürde, çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığını tahmin etmede herhangi bir deneysel çalışmaya dayalı olarak önerilmiş bir ampirik formül bulunamamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada önerilen denklem herhangi bir çalışmayla karşılaştırılamamıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plak elemanların zati ağırlığını azaltmak için farklı lif kombinasyonlarının V-şekilli betonarme katlanmış plak kalınlığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, büyük ölçekli olarak üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plak numuneleri dört noktalı eğilmeye maruz bırakılarak test edilmiştir. Ayrıca deneylerden elde edilen test sonuçları, ACI 544 (2009) şartnamesine göre analiz edilerek V-şekilli betonarme katlanmış plaktaki kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlardan ve analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- V-şekilli katlanmış plaklar gibi ince cidarlı betonarme elemanların üretiminde kendi ağırlığı altında dar kesitlerden akabilen ve kalıba yerleşmede herhangi bir ayrışmaya uğramayan çelik lif takviyeli KYB karışımlar elde edilmiştir. Tüm KYB karışımları benzer işlenebilirlik özelliklerine sahip olup, EFNARC (2002) komitesi tarafından belirlenen sınır değerler arasından kalmıştır.
- Lif içermeyen kontrol KYB karışımına kıyasla, karışıma tek veya karma çelik lif takviye edilmesi, karışımların çökme-yayıma çapında azalmaya, J-halkası yükseklik farkı (ΔH) değerleri, yayılma (T_{500}) ve V-hunisi geçiş (VF) sürelerinde ise artışa neden olmuştur.
- Lifsiz KYB karışımına tek veya karma çelik liflerin takviye edilmesi nihai basınç dayanımında azalmaya neden olurken, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarında ise artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Lifli karışımlar içerisinde yarmada çekme dayanımlarında en fazla artış, karma çelik lifli KYB numunelerden, eğilmede çekme dayanımında ise en fazla artışın sadece makro çelik lif içeren numunelerden elde edildiği görülmüştür.
- Deneysel çalışma kapsamında yapılan mekanik özelliklere ait test sonuçlarından, karışımlara düz ve kısa mikro çelik liflerin takviye edilmesinin basınç ve yarmada çekme dayanımlarında, uzun ve kancalı uçlu makro çelik liflerin takviye edilmesinin

ise eğilmede çekme dayanımı değerlerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

- KYB karışımına tek veya karma çelik lif takviye edilmesi farklı plak kalınlıklarına sahip V-şekilli betonarme katlanmış plakların yük taşıma kapasitesi, tokluk ve süneklik değerlerinde, lifsiz plaklara kıyasla sırasıyla, ortalama %67, %79 ve %42 oranlarında artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, karma çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plak elemanların, tüm plak kalınlıkları için en iyi eğilme performansına sahip olduğu görülmüştür.
- 60 mm kalınlığındaki karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin yük taşıma kapasitesi, tokluk ve süneklik değerlerinin, 80 mm kalınlığındaki lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelere kıyasla sırasıyla, %25, %44 ve %184 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Böylece, endüstriyel yapılar, hangar, depo, yüzme havuzları, spor salonları ve kütüphaneler gibi geniş açıklıklara sahip yapıların V-şekilli betonarme katlanmış plak ile kapatılması, ekonomik ve estetik bir yapı tasarımının yanı sıra plak kalınlığındaki azalma sayesinde deprem davranışı açısından da bir iyileşme sağlayacaktır.
- Tüm çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plaklarda, çok sayıda ve küçük genişlikte çatlaklar görülürken, lifsiz V-şekilli betonarme katlanmış plaklarda ise daha az ve daha geniş çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu durumda, daha çok çoklu-çatlak davranışı sergileyen karma çelik lifli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların uygulamada kullanılmasıyla birlikte, deprem gibi dinamik yükler altında bu elemanların bütünlüğünü koruyarak can kayıplarının önlenmesi açısından büyük avantaj sağlayacağı açıktır.
- Çalışma kapsamındaki tüm V-şekilli betonarme katlanmış plak numunelerin a_k/d oranı 4.67 olmasına rağmen, lifsiz kontrol numuneleri dışındaki tüm numunelerde çelik lif takviyesinin sonucu olarak kesme açıklığında (a_k) kesme çatlağı gözlemlenmemiştir.
- Tek ve karma çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plakların dört noktalı eğilme testlerinden elde edilen veriler kullanılarak plakların kalınlığının tahmini için bir ampirik formül elde edilmiştir. Elde edilen formül bazı koşul durumları çerçevesinde $R^2=0.97$ gibi çok yüksek bir doğrulukta çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plakların kalınlığını tahmin edebildiği belirlenmiştir. Sonuçta, önerilen ampirik formül, çelik lif takviyeli V-şekilli betonarme katlanmış plak yapı tasarlayan mühendisler için pratik bir yaklaşım sağlayacaktır.

- Yapılan bazı kabuller ve iyileştirmelerle, ACI 544'e göre hesaplanan V-şekilli betonarme katlanmış plakların nominal moment taşıma kapasitelerinin (M_n) deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla, V-şekilli betonarme katlanmış plakların moment taşıma kapasitelerinin, ACI 544 (2009) şartnamesine dayalı analitik yöntem kullanılarak %1 bandında hesaplanabileceği tespit edilmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlardan, çelik lif takviyeli KYB'den üretilmiş V-şekilli betonarme katlanmış plakların büyük açıklıklı yapıların örtülmesinde önemli bir alternatif olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, gelecekteki çalışmalarda V-şekilli betonarme katlanmış plaklar için teorik hesap yaklaşımları, farklı kesit boyutları, burkulma analizleri, lif içeriği (tipi ve miktarı) ve donatı oranlarının araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.



KAYNAKÇA

- Abbas, A.A. (2013).** The effect of steel fiber on some mechanical properties of self compacting concrete. *Am. J. Civ. Eng. 1 (3) (2013) 102–110.*
- Abdou, H.M., Naaman, A.E. & Wight, J.K. (1988).** Cyclic response of reinforced concrete connections using cast-in-place SIFCON matrix, *Department of Civil*
- ACI 318-19. (2019).** Building code requirements for structural concrete and commentary. *American Concrete Institute.*
- ACI Committee 544. (2009).** Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R-88). *American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.*
- Ahmad, S., & Umar A. (2018).** Rheological and mechanical properties of self-compacting concrete with glass and polyvinyl alcohol fibres. *J. Build. Eng., 17 (2018) 65– 74.*
- Aka, İ., Keskinel, F. & Arda, T. S. (1981).** Betonarme Katlanmış Plaklar. *Birsen Kitapevi, İstanbul.*
- Akca, B., & Tasdemir, MA. (2012).** Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials, 28:(287–293.*
- Akca, B. (2012).** Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete. *Composite Part B, 43, 766-78.*
- Al-Ta'an, SA., & Al-Feel, JR. (1990).** Evaluation of shear strength of fibre-reinforced concrete beams. *Cement Concrete Composite, 1990;12(2):87–94.*
- Altun, F., Haktanir, T., & Ari, K. (2007)** Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams. *Construction and Building Materials, 21:3, (2007) 654-661.*
- Amin A., Foster SJ., & Kaufmann W. (2017).** Instantaneous deflection calculation for steel fibre reinforced concrete one way members. *Engineering Structures, 2017;131.*
- Arısoy, B. (2005).** Lifli hafif betonların optimum karışım tasarımı. *Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart.*

- As'ad, S., Gunawan, P., & Syarif Alaydrus, M. (2011).** Fresh state behavior of self compacting concrete containing waste material fibres. *Procedia Eng.*, 14 (2011) 797-804.
- Ashour, SA., & Wafa, FF (1993).** Flexural behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams. *ACI Struct. J.*, 1993;90.
- 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, 117230.
- ASTM C1609 (2019).** Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM C1611 (2018).** Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. *ASTM International, West Conshohocken, PA*
- ASTM C39 (2018).** Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM C469 (2014).** Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- Avrupa Beton Platformu ASBL, Nisan 2007.**
- Azizinamini A., Pavel R., Hatfield, E., & Ghosh, SK. (1999).** Behavior of lap-spliced reinforcing bars embedded in high-strength concrete. *ACI Struct J* 1999;96.
- Banthia, N., & Nandakumar, N., (2003).** Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites. *Cement and Concrete Composites*, 25, 3-9.
- Banthia, N., & Gupta, R. (2004).** Hybrid fiber reinforced concrete (HYFRC): fiber synergy in high strength matrices. *Mater. Struct.* 37 (10) (2004) 707–716.
- Beigi, M.H., Berenjian, J., Lotfi Omran O., Sadeghi Nik, A., & Nikbin, I.M. (2013)** An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete. *Mater. Design*, 50(2013) 1019-1029.
- Bentur, A. (2000).** Role of interfaces in controlling durability of fiber-reinforced cements. *Journal of Materials In Civil Engineering*, 12(1), 2-7.

- Bentur, A., & Mindess, S., (1990).** Fibre Reinforced Cementitious Composites. *Elsevier Applied Science, London, UK.*
- Bertram, G., & Hegger, J. (2008).** Shear carrying capacity of ultra-high performance concrete beams, 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High- Performance Concrete. *Tokyo, Japan, 2008.*
- Bitkin, R.E. (2020).** *Basınç Donatısız KYB'den Üretilmiş Kirişlerin Eğilme Performansına Karma Lif Takviyesinin Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Blunt, J., & Ostertag, C. P. (2009).** Performance-Based Approach for the Design of a Deflection Hardened Hybrid 553 Fiber-Reinforced Concrete. *Journal Of Engineering Mechanics, 135:978-986.*
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2010).** Flowability of fibrereinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials, 24 (9) (2010) 1664–1671.*
- Caggiano, M., Cremona, C., Faella, C., Lima, & Martinelli, E. (2012).** Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers. *Construction and Building Materials, 37 832–840.*
- Cao, M.L., Li, L., & Xu, L. (2017).** Relations between rheological and mechanical properties of fiber reinforced mortar. *Comput. Concr., 20 (4) (2017) 449–459.*
- Centonze, G., Leone, M., Micelli, F., Colonna, D., & Aiello, M.A. (2016).** Concrete reinforced with recycled steel fibers from end of life tires: mix-design and application. *Key Eng. Mater., 711 (2016) 224–231.*
- Chi, Y., Xu L., & Zhang, Y. (2014).** Experimental study on hybrid fiber-reinforced concrete subjected to uniaxial compression. *J. Mater. Civ. Eng., 26 (2) (2014) 211–218.*
- Corvo, F., Torrens, A.D., Betancourt, N., P´erez, J., & Gonzalez, E. (2007).** Indoor atmospheric corrosion in Cuba. *A report about indoor localized corrosion, Corros. Sci. 49 (2) (2007) 418–435.*
- Daczko, J. A., & Kurtz, Mark A. (2001).** Development of High Volume Coarse Aggregate Self-Compacting Concrete (pp:403-412). *Proceedings of the Second*

International Symposium on Self-Compacting Concrete, 23-25 October, Tokyo, Japan.

- Dancygier, AN., & Savir, Z. (2006).** Flexural behavior of HSFRC with low reinforcement ratios. *Engineering Structures*, 2006;28.
- Danha LS. (2015).** Prediction of the Nominal Bending Moment Capacity for Plain and Singly Reinforced Rectangular RPC Beam Sections Prediction. *Eng &TechJournal*, Vol33,Part (A), No5.
- De Schutter, G., Bartos, P.J.M., & Domone, P. (2008).** Self-Compacting Concrete. *Whittles Publishing, Dunbeath, 2008.*
- DIN 1045-1 (2008).** Concrete, reinforced and prestressed concrete structures, Part 1: Design and construction. *Beuth Verlag, Berlin.*
- Ding, Y., Zhang, F., Torga,l F., & Zhang, Y. (2012).** Shear behaviour of steel fibre reinforced self-consolidating concrete beams based on the modified compression field theory. *Compos. Struct.*, 2012;94.
- Dönmez, İ. (2020).** Dörtlü Sistemlerde Mineral Katkı İkameli Karma Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun İşlenebilirlik ve Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.*
- Dybel, P., & Kucharska, M. (2020).** Effect of bottom-up placing on bond properties of high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 243 (2020) 118182.
- EFNARC (2002).** Guidelines for self-compacting concrete. *London, UK: Association House, 32, 34.*
- EFNARC (2005).** European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *Specification and Production and Use, Association House, UK.*
- El-Dieb, A.S., & Taha, M.M.R. (2012).** Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). *Construction and Building Materials*, 27 (1) (2012) 585–596.
- Ersoy, U., Özcebe, G. (2001).** Betonarme I. *Evrım Yayınları, Ankara, TÜRKİYE.*

- Fares, H., Noumowe , A., & Remond, S., (2009).** Self-Consolidating Concrete Subjected to High Temperature: Mechanical and Physicochemical Properties. *Cement and Concrete Research*, 39 (12): 1230-1238.
- Farzad, M., Shafieifar, M., & Azizinamini, A (2019).** Experimental and numerical study on an innovative sandwich system utilizing UPFRC in bridge applications. *Engineering Structures*, 2019;180.
- Fehling, E., Schmidt, M., & Sturwald, S. (2008).** Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. *vol. 53. 2008.*
- Felekoğlu, B. (2003).** Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Figueiredo, A.D.D., & Ceccato, M.R. (2015).** Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using slump and Ve-Be test. *Mater. Res.*, 18 (6) 1284–1290.
- Foster, S.J., Agarwal, A., & Amin, A (2018).** Design of steel fiber reinforced concrete beams for shear using inverse analysis for determination of residual tensile strength. *Structural Concrete.*, 2018;19.
- García Calvo, J.L., Alonso, M.C., Fernández Luco, L., & Robles Velasco, M. (2016).** Durability performance of sustainable self-compacting concretes in precast products due to heat curing. *Construction and Building Materials*, 111 (2016) 379–385.
- Gencil, O., Brostow, W., Datashvili T., & Thedford, M. (2011).** Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Compos. Interfac.*, 18 (2) 169–184.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., & Özbay, E. (2009).** Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 1847–1854.
- GG. Schierle (2006).** Architectural Structures.
- Ghanem, H., & Obeid, Y. (2015).** The effect of steel fibers on the rheological and mechanical properties of self compacting concrete. *Eur. Sci. J.*, 11 (21) (2015) 85–98.

- Grünewald, S., & Walraven, J.C. (2001).** Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete. *Cement Concrete Research*, 31 (12) (2001) 1793–1798.
- Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016).** Use of recycled plastics in concrete: a critical review. *Waste Manage.* 51 (2016) 19–42.
- Gueciouer, D., Youcef, G., & Tarek, N. (2019).** Rheological and mechanical optimization of a steel fiber reinforced self-compacting concrete using the design of experiments method. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, (2019) 1–21.
- Güneyisi, E., Atewi, Y.R., & Hasan, M.F. (2019).** Fresh and rheological properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with nanosilica and fly ash blended. *Construction and Building Materials*, 211 (2019) 349–362.
- Gürdal, H., & Yüceer, Z. (2004).** Türkiye ve Dünyada Kendiliginden Yerlesen Beton Uygulamaları,. *Beton 2004 Kongresi Bildirileri*, 244-254.
- Hackley, V. A., & Ferraris, C. F. (2001).** The use of nomenclature in dispersion science and technology. *NIST recommended practice guide, special publication, 960-3*, Washington: National Institute of Standards and Technology, 72.
- 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(June 2020), 65–76.
- Haldar, S., & Sheikh, AH (2011).** Bending analysis of composite folded plates by finite element method. *Finite Elem Anal Des* 2011;47.
- Hannant, D.J. (1978).** Fiber Cement and Fiber Concrete. *Wiley-Interscience publication*.
- Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan W., & Raghavan, B. (2016).** Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of ultrahigh performance fiber-reinforced concretes. *Compos. B.*, (2016) 214–220.
- Hasan-Nattaj, F., & Nematzadeh, M. (2017).** The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica. *Construction and Building Materials*, 137 (2017) 557–572.

- Hasgul, U., Turker, K., Birol, T., & Yavas, A (2018).** Flexural behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams with low and high reinforcement ratios. *Structural Concrete*, 2018;19.
- Hollingsworth, D. (2002).** Design and Use of Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, p. 429–432.
- Holschemacher, K., & Klug, Y. (2002).** A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC. *LACER report No. 7*, 123 – 134.
- Holschemacher, K., Mueller, T., & Ribakov, Y. (2010).** Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design*, 31(5), 2604-2615.
- Hsieh, M., Tu, C. & Song, P.S. (2008).** Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering A*, 494, 153–157, 2017. 552
- Imam, M., Vandewalle, L., & Mortelmans, F. (1995).** Shear-moment analysis of reinforced high strength concrete beams containing steel fibres. *Can. J. Civ. Eng.*, 1995;22.
- Imam, M., Vandewalle, L., Mortelmans, F. & Van Gemert, D. (1997).** Shear Domain of Fibre-Reinforced High-Strength Concrete Beams. *Engineering Structures*, 19 (9), 738- 747.
- Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., & Bier, T.A. (2015).** Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC). *Construction and Building Materials*, 98 (2015) 325–333.
- Iyer, P. (2014).** Performance of Basalt Fibre Mixed Concrete. *University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada, 2014.*
- Japan Society of Civil Engineers (1992).** Recommendations for Design and Construction of Antiwashout Underwater Concrete. *Concrete library of JSCE*, 19 (1992) 89.
- Jiang, S., Shan, B., Ouyang, J., Zhang, W., Yu, X., & Li, P. (2018).** Rheological properties of cementitious composites with nano/fiber fillers. *Construction and Building Materials*, 158 (2018) 786–800.

- Jiao, D.W., Shi, C.J., Qiang, Y., An, X.P., Liu, Y.I., & Li, H. (2017).** Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-a review. *Cem. Concr. Compos.*, 83 (2017) 146–159.
- Joshaghani, A., Balapour, M., & A.A. Ramezaniapour (2018).** Effect of controlled environmental conditions on mechanical, microstructural and durability properties of cement mortar. *Construction and Building Materials.*, 164 (2018) 134–149.
- Karaesmen, E. (2015).** Ardgermeli Beton ve Yeni Çözümler. *Lord Matbaacılık ve Kağıtçılık Alpaslan Aribuğa. İstanbul.*
- Kaufmann, J., Winnefeld, F., & Hesselbarth, D. (2004).** Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 26(5) (2004) 541-549.
- Kawamata, A., Mihashi, H., & Fukuyama, H. (2003).** Properties of hybrid fiber reinforced cement based composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 283-290.
- Kazemi, M.T., Golsorkhtabar, H., Beygi, M.H.A., & Gholamitabar, M. (2017).** Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods. *Construction and Building Materials*, 142 (2017) 482–489.
- Keyder, E. (2013).** Öngerilmeli Beton. *Seçkin Yayıncılık Genel Dağıtım, Ankara.*
- Khalil, W. I. & Tayfur, Y. R. (2013).** Flexural Strength of Fibrous Ultra High Performance Reinforced Concrete Beams. *ARPJ. Eng. Appl. Sci*, 8 (3), 200-214.
- Khaloo, A., Raisi, E.M., Hosseini, P., & Tahsiri, H. (2014).** Mechanical performance of self compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 51 (2014) 179–186.
- Khatip J.M. (2008).** Performance of Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 22: 1963-1971.
- Khayat, K.H., & Feys, D. (2010).** Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. *Springer, 2010.*

- Kim, D.J., Naaman, A.E., & El-Tawil, S. (2008).** Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 2008;30.
- 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*, 2011;25.
- Kına, C. (2019).** *Yüksek Performanslı Kendiliğinden Yerleşen Karma Lifli Beton Geliştirilmesi* (Doktora Tezi). İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Kına, 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. *Mater. Struct.*, 2021;54.
- Köksal, F., Eyyubov, C. & Özcan, D.M. (2002).** Çelik tel içeriğinin betonun mekanik özelliklerine etkisi. 5. *İnsaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, İstanbul, 25-27 Eylül*, s. 169-179.
- Kuder, K.G., Ozyurt, N., Mu, E.B., & Shah, S.P. (2007).** Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. *Cement Concrete Research*, 37 (2) (2007) 191–199.
- Kwon, S., Nishiwaki, T., Kikuta, T., & Mihashi, H. (2014).** Development of ultra-highperformance hybrid fiber-reinforced cement-based composites. *ACI Mater. J.*, 111 (3) (2014) 309–318.
- Lai, Y., Yu, W. (2002).** Analytical solution for forced vibration of a simply-supported V-shaped folded plate roof. *Thin-Walled Struct* 2002;40.
- Lawler, J., Zampini, D., & Shah, S. (2005).** Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 595-604.
- Le, H.T., Müller, M., Siewert, K., Ludwig, H.M. (2015).** The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures. *Mater. Des.*, 72 (2015) 51–62.
- Lee, J.H. (2017).** Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, 168 (2017) 216–225.

- Li, JJ., Wan, CJ., Niu, JG., Wu, LF., & Wu, YC. (2017).** Investigation on flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 2017;131.
- Lu, C., Hu, Y., & Mei, G. (2015).** Relationship between slump flow and rheological properties of self compacting concrete with silica fume and its permeability. *Construction and Building Materials*, 75 (2015) 157–162.
- Ma, K., Feng, J., Long, G., Xie, Y., & Chen X. (2017).** Improved mix design method of selcompacting concrete based on coarse aggregate average diameter and slump flow. *Construction and Building Materials*, 143 (2017) 566–573.
- Marković, I. (2006).** High-performance hybrid-fibre concrete-development and utilization. *Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology*, 2006.
- Markovic, I., Walraven, JC., & Van Mier, JGM. (2004).** Development and utilization of high performance Hybrid-Fibre Concrete. *5th Int. PhD Symp. Civ. Eng. - Proc. 5th Int. PhD Symp. Civ. Eng., vol. 2*, 2004.
- 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) (2011) 351–358.
- Meda, A., Minelli, F., & Plizzari, GA (2012).** Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete. *Composite Part B Eng.*, 2012;43.
- Meng, W.N., & Khayat K.H. (2017).** Improving flexural performance of ultra-high performance concrete by rheology control of suspending mortar. *Compos. Part B*, 117 (2017) 26–34.
- Mindess, S. (2007).** Thirty years of fibre reinforced concrete research at the UWM British, *Colombia*.
- Mobasher, B., & Li, CY. (1996).** Mechanical properties of hybrid cement-based composites. *ACI Mater. J*, 1996;93.
- Mohammadi, Y., Singh, S.P., & Kaushik, S.K. (2008).** Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*, 22 (5) (2008) 956–965.

- Morcillo, M., Chico, B., Díaz, I., Cano, & H., D.F (2013).** Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review. *Corros. Sci.* 77 (2013) 6–24.
- Naveen, K.S. (2014).** Analysis and Design of Structures. A presentation on Shells and Folded Plates.
- Nayak, AK., Shenoi, RA., & Blake, JIR. (2013).** A study of transient response of initially stressed composite sandwich folded plates. *Composite Part B Eng.*, 2013;44.
- Nehdi, M., Pardhan, M. & Koshowski, S. (2004).** Durability of selfconsolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. *Cement and Concrete Research*, 34, 2103– 2112.
- Nguyen, DL., Kim, DJ., Ryu, GS., & Koh KT. (2013)** Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete. *Composite Part B Eng.*, 2013;45.
- Ning, X., Ding, Y., Zhang, F., & Zhang, Y. (2015)** Experimental study and prediction model for flexural behavior of reinforced SCC beam containing steel fibers. *Construction and Building Materials*, 2015;93.
- Nyström, U., & Gylltoft, K. (2011).** Comparative numerical studies of projectile impacts on plain and steel-fibre reinforced concrete. *Int. J. Impact. Eng.*, 2011;38:95–105.
- Okamura, H., Maekawa, K., & Ozawa, K. (1995).** Development of Self- Compacting High Performance Concrete. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1995(522), 23-26.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003).** Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.1, 5-15, April.
- Okamura, H., & Ouchi, M., (1998).** Self-compacting high performance Concrete Progress in Structural Engineering and Materials, I (4), 378-383.
- Olivito, R.S., & Zuccarello, F.A. (2010)** An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Compos. Part B: Eng*, 41 (3) (2010) 246–255. M.N.
- Öztekin, E. (2019).** *Karma Çelik Lif İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kesme Davranışının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

- Ozyurt, N., Mason, T.O., & Shah, S.P.** (2007). Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs. *Cement Concrete Composite*, 29 (2) (2007) 70–79.
- P.C. Varghese** (2010). Design of Reinforced Concrete Shells and Folded Plates.
- Pajak, M., & Ponikiewski, T.** (2013) Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 397–408.
- Pakravan, H., Latifi, M., & Jamshidi, M.** (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 142 (2017) 280–294.
- Park, J.J., Yoo, D.Y., Park, G.J., & Kim, S.W.** (2017). Feasibility of reducing the fiber content in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under flexure. *Materials*, 2017;10.
- Park, R.** (1991). Ductility of structural concrete. *IABSE Reports 1991*;62.
- Park, R., & Paulay, T.** (1975). Reinforced concrete structures.
- Pyo, S., El-Tawil, S., & Naaman, A.E.** (2016). Direct tensile behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) at high strain rates. *Cement Concrete Research*, 88 (2016) 144–156.
- Qi, J., Wang, J., & Ma, Z.J.** (2018). Flexural response of high-strength steel-ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams based on a mesoscale constitutive model: Experiment and theory. *Structures Concrete*, 2018;19.
- Qin, Q., Zhang, W., Liu, S., Li, J., Zhang, J., & Poh, L.H.** (2018). On dynamic response of corrugated sandwich beams with metal foam-filled folded plate core subjected to low-velocity impact. *Compos. Part A Appl. Sc.*, 2018;114.
- Rajhans, P., Chand, G., Kisku, N., Panda, S.K., & Nayak, S.** (2019). Proposed mix design method for producing sustainable self-compacting heat cured recycled aggregate concrete and its microstructural investigation. *Construction and Building Materials*, 218 (2019) 568–581.
- Ramezaniapour, A.M., Esmaili, Kh., Ghahari, S.A., & Ramezaniapour, A.A.** (2014). Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on

- mechanical and durability properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 73 (2014) 187–194.
- Rossi, P. (2000).** Ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC): An Overview. *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France, 13-15 September. 87-100.
- Rossi, P., Acker, P., & Malier, Y. (1987).** Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure. *Materials and Structures*, 20, 436-439.
- Rossi, P., Arca, A., Parant, E., & Fakhri, P. (2005).** Bending and compressive behaviors of a new cement composite. *Cement and Concrete Research*, 35, 1, 27-33, 2005.
- Şahmaran, M., & Yaman, Ğ.Ö. (2007).** Hybrid fiber reinforced self compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Journal of Construction and Building Materials*. 27(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, DR., Maran, K., & Kumar, A. (2015).** Effect of steel and synthetic fibers on shear strength of RC beams without shear stirrups. *Construction and Building Materials*, 2015;83.
- Saidani, M., Olubanwo, A., Khorami, M.(2021).** Characteristics of a novel lightweight concrete. *Structural Concrete*.
- Salvadori, M. (1966).** Structure in Architecture. *Prentica Hall*.
- Samanta, A., & Mukhopadhyay, M. (1999).** Finite element static and dynamic analyses of folded plates. *Engineering Structures*, 1999;21.
- Samie, F., Tidblad, J., Kucera, V., & Leygraf, C. (2007).** Atmospheric corrosion effects of HNO₃—Comparison of laboratory-exposed copper, zinc and carbon steel. *Atmos. Environ.* 41 (23) (2007) 4888–4896.
- Sánchez, C., Antón, G.D., Vera, J.M., & Ortega, M.A. Climent (2013).** Moisture distribution in partially saturated concrete studied by impedance spectroscopy. *J. Nondestruct. Eval.* 32 (4) (2013) 362–371

- Sarı, M. (2013).** Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*
- Semioli, W.J. (2001).** Self-Placing Concrete. *Concrete International, Vol. 23, No.12, pp. 69-72, 2001. 15.*
- Shah, A.A., & Ribakov, Y. (2011).** Recent trends in steel fibered high-strength concrete. *Mater. Design 32 (8–9) 4122–4151.*
- Shah, S. P., & Rangan, B. V. (1971)** Fiber reinforced concrete properties. *In Journal Proceedings 68:2, (1971) 126-137.*
- Shams, A. (2015).** *A Novel Approach for the Production and Design of Load-carrying Sandwich Panels with Reinforced Concrete Facings* (Doctoral thesis). RWTH Aachen University.
- Sharei, E., Scholzen, A., Hegger, J., & Chudoba, R. (2017).** Structural behavior of a lightweight, textile-reinforced concrete barrel vault shell. *Composite Structures, 171:505-514.*
- Shi, Y., Matsui, I., & Feng, N., (2002).** Effect of compound mineral powders on workability and rheological property of HPC. *Cement and Concrete Research, 32, 71–78.*
- Shirai, K., Yin, H., & Teo, W. (2020).** Flexural capacity prediction of composite RC members strengthened with UHPC based on existing design models. *Structures 2020;23.*
- Siddique, R., & Kaur, G. (2016).** Strength and permeation properties of self-compacting concrete containing fly ash and hooked steel fibres. *Construction and Building Materials, 103 (2016) 15–22.*
- Silva, M.A., Pepe, M., Andrade, R.G.M., Pfeil, M.S., & Toledo Filho, R.D. (2017).** Rheological and mechanical behavior of high strength steel fiber-river gravel self compacting concrete. *Construction and Building Materials, 150(2017) 606-618.*
- Sirijaroonchai, K., El-Tawil, S., & Parra-Montesinos G. (2010)** Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading. *Cement Concrete Composite, 32 (1) (2010) 62–72.*

- Sivakumar, V.R., Kavitha, O.R., Arulraj, G.P., & Srisanthi V.G. (2017).** An experimental study on combined effects of glass fiber and Metakaolin on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete. *Appl. Clay Sci.*, 147 (2017) 123–127.
- Soutsos, M.N., Le, T.T., & Lampropoulos A.P. (2012).** Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, 36 (2012) 704–710.
- Stark, A. (2017).** *Analysis of Prestressed Sandwich Panels with Ultra-High Performance Concrete Facings* (Doctoral Thesis). Institute of Structural Concrete, RWTH Aachen University,
- Stark, A., Classen, M., Knorrek, C., Camps, B., & Hegger J. (2018).** Sandwich panels with folded plate and doubly curved UHPFRC facings. *Struct Concr* 2018;19.
- Stark, A., & Hegger, J. (2021).** A calculation approach for sandwich panels with facings made of UHPFRC and pre-tensioned CFRP reinforcement. *Engineering Structures* 243-11233.
- Sulthan, F., & Saloma. (2019).** Influence of hooked-end steel fibers on fresh and hardened properties of steel fiber reinforcement self-compacting concrete (SFRSCC). *J. Phys., Conf. Ser.* 1198(3) (2019) 032005.
- Swatilekha, G.B. (2013).** Modelling of Reinforced Concrete Folded Plate Structures for Seismic Evaluation. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, Vol. 3, Issue 2.
- Taşdemir M.A., Kocatürk, A.N., Haberveren, S. Ve Aslan, G., (2005).** Özel Prefabrike Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar, 16-18, 447- 457, İstanbul .
- Tavakoli, H., Fallahtabar, M., & Parvin, M. (2016).** Mechanical behavior of selfcompacting reinforced concrete including synthetics and steel fibers. *Civ. Eng. Infrast. J.*, 49 (2) (2016) 197–213.
- Teng, S., Afroughsabet, V., & Ostertag, C.P. (2018).** Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 182 (2018) 504–515.

- Thakur, BR., Verma, S., Singh, BN., & Maiti, DK. (2021).** Dynamic analysis of flat and folded laminated composite plates under hygrothermal environment using a nonpolynomial shear deformation theory. *Composite Structures*, 2021;274.
- Topçu, İ. B., Bilir, T., & Baylavlı, H. (2008).** Kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri. *Eskisehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XXI, S.1*, 2008
- TS 708 (2010).** Çelik, Betonarme için Donatı Çeliği. *Türk Standardı, Ankara*.
- Türk, K., & Kına, C. (2017).** Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımını. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 23 (6) , 671-678.
- 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., Kına, C., & Oztekin, E. (2020).** Effect of macro and micro fiber volume on the flexural performance of hybrid fiber reinforced SCC. *Advances in Concrete Construction*.
- Turk, K., & Nehdi, ML. (2021).** Flexural toughness of sustainable ECC with high-volume substitution of cement and silica sand. *Construction and Building Materials*, 2021;270.
- Turk, K., Oztekin, E., & Kına, 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*, 0(0), 1–14.
- Türkçü, H. Ç., 2003.** Çağdaş Taşıyıcı Sistemler. *Birsen Yayınevi, İstanbul*.
- Turker, K., Hasgul, U., Birol, T., Yavas, A., & Yazici, H. (2019).** Hybrid fiber use on flexural behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams. *Compos. Struct.* 2019a;229.
- Türker, K. , Birol, T. , Yavaş, A. , Hasgül, U. & Yazıcı, H. (2019b).** Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton İçeren Kirişlerin Eğilme Davranışı . *Teknik Dergi* , 30 (1) , 8777 8801.

- Turker, K., & Torun, IB. (2020).** Flexural performance of highly reinforced composite beams with ultra-high performance fiber reinforced concrete layer. *Engineering Structures*, 2020;219.
- Voo, Y. L., Poon, W. K., & Foster, S. J. (2010).** Shear strength of steel fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams without stirrups. *Journal of Structural Engineering*, 136, 11, 1393-1400, 2010.
- Walraven, J. (2003).** Structural aspects of self compacting concrete, 3rd Int. Symposium of SCC. Reykjavik, Edited by Wallevik and Nielsson, RILEM publications PRO 33, Bagnaux, pp. 15-22.
- Wang, W., Shen, A., Lyu, Z., He, Z., & Nguyen, KTQ. (2021).** Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete--A review. *Construction and Building Materials*, 2021;296.
- Wilby, C. (2008).** Concrete Folded Plate Roofs.
- Wille, K., & Parra-Montesinos, GJ. (2012).** Effect of beam size, casting method, and support conditions on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Mater. J* 2012;109.
- Williams, D. A., Saak, A. W., & Jennings, H. M. (1999).** The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. *Cement and Concrete Research*, 29:9, (1999) 1491-1496. 45.
- Winter ve Pei (1947).** Hipped Plate Construction. *ACI J Proc* 1947;43.
- Wu, Z., Shi, C., & He, W. (2016).** Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 103, 8-14.
- Wua, H., Leib, H., & Chen, Y. F. (2022).** Grey relational analysis of static tensile properties of structural steel subjected to urban industrial atmospheric corrosion and accelerated corrosion. *Construction and Building Materials*, Volume 315, 125706.
- Xia, J., Chan, T., Mackie, KR., Saleem, MA., & Mirmiran, A. (2018).** Sectional analysis for design of ultra-high performance fiber reinforced concrete beams with passive reinforcement. *Engineering Structures*, 2018;160.

- Yardımcı, M. Y. (2007).** *Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı* (Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yardımcı, M.Y., Baradan, B., & Tasdemir, M.A. (2014).** Effect of fine to coarse aggregate ratio on the rheology and fracture energy of steel fibre reinforced selfcompacting concretes. *Sadha* 39(6) (2014) 1447-1469.
- Yoo, D. Y., Lee, J. H., & Yoon, Y. S. (2013).** Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 106, 742-753.
- Yoo, DY., Banthia, N., & Yoon, YS. (2016).** Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiberreinforced concrete. *Cement Concrete Composite*, 2016;74.
- Yoo, DY., & Yoon, YS. (2015).** Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *Engineering Structures*, 2015;102.
- 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.
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, HJH. (2014).** Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Cement Concrete Research*, 56:29–39.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : **Metin KATLAV**

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İnönü Üniveristesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği (Fakülte ve Bölüm birinciliğiyle)
- **Yüksek Lisans:** 2022, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendsiliği Anabilim Dalı Programı

