

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

**YÜKSEK PERFORMANSLI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN KARMA LİFLİ BETON
GELİŞTİRİLMESİ**

Ceren KINA

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2019

Tezin Başlığı: Yüksek Performanslı Kendiliğinden Yerleşen Karma Lifli Beton Geliştirilmesi

Tezi Hazırlayan: Ceren KINA

Sınav Tarihi: 21.06.2019

Yukarıda Adı Geçen Tez Jürimizce Değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora Tezi Olarak Kabul Edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Paki TURĞUT

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Ragıp İNCE

Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

İnönü Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

Batman Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü



Canım Kızım Azra'ya
ve
Canım Oğlum Arda Taha'ya

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yüksek Performanslı Kendiliğinden Yerleşen Karma Lifli Beton Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ceren KINA

ÖZET

Doktora Tezi

YÜKSEK PERFORMANSLI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN KARMA LİFLİ BETON GELİŞTİRİLMESİ

Ceren KINA

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

185+xv sayfa

2019

Danışman: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Bu tez çalışmasında, eğilme altında sehim sertleşmesi davranışı gösteren, yüksek dayanıma sahip, tekli, ikili, üçlü ve dördü lif hibridizasyonu içeren 24 adet kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımı tasarlanmıştır. Üretilen KYB’de liflerin etkilerinin incelenmesi amacıyla farklı tip (çelik ve sentetik), narinlik ve boyutlarda (makro veya mikro) dört adet lif kullanılmıştır. Kaba agregası içeriğinin, tasarlanan karışımlara olan etkisini incelemek amacıyla da maksimum tane çapı aynı olmak üzere üç farklı Kaba Agregası/Toplam Agregası (KA/TA) oranı parametre olarak seçilmiştir. Elde edilen bu karışımların işlenebilirlik özelliklerinin (taze birim hacim ağırlığı, hava içeriği, çökme-yayılma değerleri, J-halkası çökme-yayılma değerleri, V-hunisi) yanı sıra, karışımlara ait numunelerin mekanik (basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı) ve dayanıklılık (kılcal su emme, kısıtlanmış rötre, donma-çözülme, basınçlı su geçirimsizlik) özellikleri de belirlenmiştir. Bununla birlikte, lif takviyeli KYB’nin donatının aderans dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, büyük ölçekli bindirmeli ekli-donatılı kırış deneyleri yapılmıştır.

Sonuçta, tüm KA/TA oranlarında, OL 6/16 mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonun olduğu karışımların işlenebilirlik özellikleri en iyi çıkarken, özellikle OL 13/16 mikro çelik lif ile PVA lifi içeren üçlü ve dördü lif hibridizasyonun olduğu karışımların işlenebilirliğinin daha düşük olduğu bulunmuştur. Nihai dayanımlar incelendiğinde, OL 6/16 mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonun olduğu karışımlar basınç dayanımında, makro çelik ve PVA lifinin ikili lif hibridizasyonun olduğu karışımlar yarmada çekme dayanımında, OL 13/16 mikro çelik lif ile PVA lifi içeren üçlü lif hibridizasyonun olduğu karışımlar

ise eğilme dayanımında ön plana çıkmıştır. Kılcal su emme ve basınçlı su geçirimsizliğe karşı, çelik lifin tekli ve ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait numunelerin, donma-çözülme döngüsüne ve kısıtlanmış rötreye karşı ise, lif içeriğinden bağımsız olarak KA/TA oranı 0.35 olan karışımlara ait numunelerin daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, özellikle OL 13/16 mikro çelik lif ile PVA lifi içeren üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışıma ait kırış numunelerde aderans dayanımının en fazla olduğu bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Yüksek dayanım, sehim sertleşmesi, karma lif takviyesi, iri agrega miktarı, kendiliğinden yerleşen beton



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DEVELOPMENT OF HIGH PERFORMANCE SELF-COMPACTING HYBRID FIBER REINFORCED CONCRETE

Ceren KINA

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

185+xv sayfa

2019

Supervisor: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

In this thesis study, 24 SCC mixtures with high strength that exhibits deflection hardening under bending were designed and these mixtures were reinforced with single fiber and also binary, ternary and quaternary fiber hybridization. 4 different types (steel and synthetic), aspect ratio and size (macro and micro) of fibers were used to investigate the effect of fibers in designed self-compacting concrete (SCC). With the aim of researching the influence of coarse aggregate content on design mixtures, 3 different Coarse Aggregate/Total Aggregate (CA/TA) ratio having the same maximum aggregate size were determined as parameter. Besides the fresh properties (unit weight, air content, slump-flow, J-ring slump flow, V funnel) of these designed SCC mixtures, the mechanical (compressive strength, elasticity modulus, splitting and flexural tensile strength) and durability (capillary water absorption, restrained shrinkage, freeze-thaw, water permeability) properties of the samples of mixtures were examined. Besides, in order to investigate the effect of fiber reinforced SCC on the bond of reinforcing bars, large-scale beams having lap-spliced reinforcing bars were tested.

As a result, for all CA/TA ratio, the fresh properties of the SCC mixtures having binary fiber hybridization with OL 6/.16 micro steel fiber were determined to be the best while those of the mixtures having ternary and quaternary fiber hybridization with OL 13/.16 micro steel and PVA fiber were determined to be the worst. In the

aspect of ultimate strength, in compressive strength, SCC mixtures having binary fiber hybridization with OL 6/.16 micro steel fiber, in splitting tensile strength, the mixtures having binary fiber hybridization with PVA fiber and in flexural strength, the mixtures having ternary fiber hybridization with OL 13/.16 micro steel and PVA fiber were the most prominent mixtures. It was found that against capillary water absorption and water permeability, the SCC mixtures having only macro steel fiber and binary fiber hybridization with micro steel fiber, against freeze-thaw cycles and restrained shrinkage, all mixtures with CA/TA in the ratio of 0.35 were the most durable mixtures. Besides, especially the bond strength of the beam specimens of the mixtures having ternary fiber hybridization with OL 13/.16 micro steel and PVA fiber were found to be the highest one.

KEYWORDS: High strength, deflection hardening, hybrid fiber reinforced, coarse aggregate content, self-compacting concrete

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam boyunca bilgilerini cömertçe paylaşan ve tez çalışmamın her aşamasında öneri, yardım ve tecrübeleri ile bana her zaman destek olarak beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kâzım TÜRK'e teşekkür ederim.

Doktora tez jürime katılan ve çalışmalarım ile ilgili yorumlar yaparak destek veren Sayın Prof. Dr. Paki TURĞUT'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca maddi, manevi her anlamda yanımda olan ve özellikle deneysel çalışmalarımda bütün imkanlarını benim için seferber eden sevgili eşim Tolga KINA'ya, laboratuarda beton dökümlerim esnasında beni yalnız bırakmayan ve var gücüyle bana yardım eden canım babam Vahdettin DEMİRCİ'ye ve her başım sıkıştığında yanıma koşup gelen ve varlığıyla benim motivasyonumu arttıran canım annem Sevgi Canan DEMİRCİ'ye çok teşekkür ederim. Bunun yanında, her zaman arkamda durarak bana güç veren canım ikinci babam Turgut KINA'ya ve beş yıl boyunca çalışmalarına vakit ayırmam için bana imkan sağlayan, en zor zamanlarımda yanımda olan ve desteğiyle doktora bitirmemde en çok katkısı bulunan canım ikinci annem Nihal KINA'ya da ayrıca minnetle sonsuz teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımın her safhasında bana yardım eden, destek veren değerli arkadaşım Esmâ ATALAY'a ve giriş deneylerimde bana yardımcı olan Mahmut BAŞSÜRÜCÜ'ye teşekkür ederim.

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP FDK-2017-865 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim. Ayrıca, tez çalışması kapsamında gerekli olan süper akışkanlaştırıcının temininde vermiş olduğu destekten dolayı SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş 'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Amacı, Kapsamı ve Özgünlüğü.....	4
1.3. Tezin Ana Hatları.....	6
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	8
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB).....	8
2.1.1. Karışım özellikleri.....	8
2.1.2. KYB reolojisi.....	10
2.1.2.1. Çökme-yayılma testi, J-halkalı çökme-yayılma testi ve t_{500} akma süresi.....	12
2.1.2.2. V-hunisi testi.....	14
2.1.2.3. L-kutusu testi.....	15
2.1.2.4. Elek ayrışma testi.....	15
2.2. Çimento Esaslı Kompozitlere Lif Takviyesi.....	17
2.2.1. Lif takviyesinin kompozitin davranışına etkisi.....	17
2.2.2. Lif tipleri.....	18
2.2.3. Liflerin kullanım şekilleri.....	19
2.2.3.1. Tek tip lif takviyesi.....	19
2.2.3.2. Karma lif takviyesi.....	20
2.2.3.3. Mikro ve makro liflerin davranışa etkisi.....	21
2.2.3.4. Mikro ve makro liflerin taze beton özelliklerine etkisi.....	22
2.2.3.5. Farklı türlerdeki liflerin kombinasyonunun incelenmesi.....	23
2.3. Büyük ölçekli bindirmeli ekli kirişlerin aderans dayanımı.....	24
2.3.1. Beton ve donatı arasındaki aderans ve etkileyen faktörler.....	24
2.3.2. Basit eğilmeye maruz bindirmeli ekli kirişlerin aderans dayanımının hesabı.....	27

2.3.3	Elastik hesap yöntemi.....	27
2.3.4	Eğilme yüklemesine maruz çift donatılı betonarme elemanların çözümü.....	28
3.	MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMA.....	31
3.1.	Malzemeler.....	31
3.1.1.	Çimento, uçucu kül ve silis dumanı.....	31
3.1.2.	Agrega.....	32
3.1.3.	Kimyasal katkı.....	33
3.1.4.	Lifler.....	34
3.2.	Deneysel Çalışma.....	35
3.2.1.	Karışımların hazırlanması.....	35
3.3.	Deneysel Yöntem ve Uygulanan Deneyler.....	39
3.3.1.	Taze beton deneyleri.....	40
3.3.1.1.	TBHA ve hava içeriği belirlenmesi.....	41
3.3.1.2.	Çökme-yayılma deneyi.....	42
3.3.1.3.	J halkalı çökme-yayılma deneyi.....	43
3.3.1.4.	V hunisi deneyi.....	44
3.3.2.	Sertleşmiş beton deneyleri.....	44
3.3.2.1.	Basınç dayanımı.....	45
3.3.2.2.	Elastisite modülü.....	46
3.3.2.3.	Yarmada çekme dayanımı.....	48
3.3.2.4.	Eğilme dayanımı.....	48
3.3.2.5.	Kılcal su emme.....	49
3.3.2.6.	Basınçlı su geçirimsizlik.....	50
3.3.2.7.	Kısıtlanmış rötre.....	52
3.3.2.8.	Donma çözülme.....	53
3.3.3	Bindirmeli Ekli-donatılı Kiriş.....	54
3.3.3.1	Numunelerin hazırlanması.....	54
3.3.3.2	Deney Düzeneği.....	58
4.	DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	60
4.1	Taze Beton Özellikleri.....	60
4.1.1	Taze beton birim hacim ağırlığı ve hava içeriği.....	60
4.1.2	Çökme-yayılma deneyi yayılma çapı (D_c) ve yayılma süresi(t_{50}).....	67

4.1.3	J halkalı çökme-yayılma deneyi yayılma çapı (D_J), yayılma süresi (t_{50J}) ve yükseklik farkı (ΔH).....	77
4.1.4	V-hunisi deneyi akış süresi (V_s).....	84
4.2	Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	87
4.2.1	Mekanik özellikler.....	87
4.2.1.1.	Basınç dayanımı.....	87
4.2.1.2.	Elastisite modülü.....	98
4.2.1.3.	Yarmada çekme dayanımı.....	101
4.2.1.4.	Eğilme performansı.....	109
4.2.1.4.1	Eğilme dayanımı.....	109
4.2.1.4.2	Yük-orta açıklık sehım eğrileri.....	120
4.2.2	Dayanıklılık özellikleri.....	130
4.2.2.1	Kılcal su emme deneyi.....	130
4.2.2.2	Basınçlı su geçirimsizlik deneyi.....	132
4.2.2.3	Kısıtlanmış rötre deneyi.....	137
4.2.2.4	Donma çözülme deneyi.....	141
4.3.	Büyük Ölçekli Bindirmeli Ekli-donatılı Kirişin Aderansı.....	147
4.3.1.	Kiriş numunelerin aderans dayanımlarının değerlendirilmesi...	147
4.3.2.	Yük-orta açıklık sehım eğrisi.....	150
4.3.3.	Aderans göçmesi modu ve çatlak modelleri.....	152
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİ.....	157
6.	KAYNAKLAR.....	163
7.	EKLER.....	175
	ÖZGEÇMİŞ.....	185

SİMGELER VE KISALTMALAR

13MİK	OL 13/.16 Mikro Çelik Lif
6 MİK	OL 6/.16 Mikro Çelik Lif
KA/TA	Kaba Agregat/Toplam Agregat
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
MAK	5D 65/60 Makro Çelik Lif
PÇ	Portland Çimentosu
PVA	Polivinil-alkol
SD	Silis Dumanı
UK	Uçucu Kül
VSI	Visual Stability Index
ΔH	J-halkası çökme-yayılma deneyi yükseklik farkı (mm)
a	Eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu derinliği (mm)
A	Su ile temas eden yüzey alanı (mm ²)
A _s	Çekme donatısı alanı (mm ²)
A _s '	Basınç donatısı alanı (mm ²)
b	Kiriş genişliği (mm)
c	Tarafsız eksen derinliği (mm)
D	Maksimum agregat tane çapı (mm)
d'	Paspayı mesafesi (mm)
d _b	Çekme donatısının çapı (mm)
D _ç	Yayılma çapı (mm)
d _i	Elek analizinde kullanılan elek ebatları
D _j	J-halkası çökme-yayılma çapı (mm)
E	Elastisite modülü (MPa)
f _s	Çekme donatısındaki gerilme (MPa)
f _c	Beton basınç dayanımı (MPa)
f _s '	Basınç donatısındaki gerilme (MPa)
h	Kiriş yüksekliği (mm)
k	Su emme katsayısı
K	Su geçirimsizlik katsayısı
L	Numunenin uzunluğu (mm)

l_s	Bindirme uzunluğu (mm)
μ	Suyun vizkozitesi
M_r	Kesitin taşıyabileceği moment (Nmm)
P_i	Elekten geçen yığışımlı yüzde (%)
P_{max}	Göçme yükü (kN)
Q	Debi
t	Zaman (sn)
t_{50}	Çökme-Yayılma Deneyi Yayılma Süresi (sn)
t_{50j}	J-Halkası Çökme-Yayılma Deneyi Yayılma Süresi (sn)
u	Aderans dayanımı (MPa)
V_s	V hunisi akış süresi (sn)
δ	Kiriş orta açıklık sehim (mm)
ϕ	Donatı çapı (mm)
σ_a	Akma dayanımı (MPa)
σ_{ϕ}	Çekme dayanımı (MPa)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Tez çalışmasının akış diyagramı.....	7
Şekil 2.1	Geleneksel beton ve KYB'nin karışım oranları (Holschemacher, 2004).....	9
Şekil 2.2	(a) Çökme-yayılma testi, (b) J-halkalı çökme-yayılma testi (Groth,2000-a).....	13
Şekil 2.3	VSI değerlerinin tanımlanması.....	13
Şekil 2.4	V-hunisi deney düzeneği (EFNARC(2002)).....	14
Şekil 2.5	L-kutusu deney düzeneği (EFNARC (2002)).....	15
Şekil 2.6	Elek ayrışma deney düzeneği (EFNARC (2002)).....	16
Şekil 2.7	Çift donatılı dikdörtgen kesitin şekil değiştirmesi ve oluşan gerilmeler.....	29
Şekil 3.1	Karışımlarda kullanılan agrega yığınının gradasyon eğrisi ve Fuller eğrisiyle karşılaştırılması.....	33
Şekil 3.2	Tez çalışması kapsamında kullanılan liflerin görselleri.....	35
Şekil 3.3	Numune hazırlanmasında kullanılan düşey eksenli mikser.....	40
Şekil 3.4	TBHA ve hava içeriği belirlenmesi.....	42
Şekil 3.5	Çökme-yayılma deneyinin yapılması.....	43
Şekil 3.6	J-halkalı çökme-yayılma deney düzeneği.....	43
Şekil 3.7	V hunisi deney düzeneği.....	44
Şekil 3.8	Basınç dayanım testi.....	45
Şekil 3.9	Elastisite modülü testinin uygulanması.....	47
Şekil 3.10	Yarmada çekme dayanım testi.....	48
Şekil 3.11	Eğilme dayanım testi ve test düzeneği.....	49
Şekil 3.12	Kılcal su emme deney düzeneği.....	50
Şekil 3.13	Su geçirimsizlik deney düzeneği.....	51
Şekil 3.14	Kısıtlanmış rötre deney aşamaları.....	53
Şekil 3.15	Donma çözülme deney düzeneği.....	54
Şekil 3.16	Kiriş donatısının teşkili.....	55
Şekil 3.17	Bindirmeli ekli-donatılı kiriş numunelerinin geometrik özellikleri.....	55
Şekil 3.18	Büyük ölçekli kiriş karışımlarının hazırlandığı 350 litre kapasiteli mikser.....	56
Şekil 3.19	Bindirmeli ekli-donatılı kiriş deneyi için hazırlanan kiriş numuneleri.....	57
Şekil 3.20	Büyük ölçekli kirişlerin dört noktalı eğilme testi ve deney düzeneği.....	58
Şekil 3.21	Eğilme yüklemesine maruz büyük ölçekli kiriş numunelerin çatlak çizimi.....	59
Şekil 4.1	Karışımların TBHA ve hava içeriği değerleri.....	62
Şekil 4.2	Karışımların lifsiz KYB'ye göre normalize TBHA ve hava içeriği değerleri.....	63
Şekil 4.3	KA/TA oranına bağlı olarak sadece makro çelik lif içeren karışımlarının lif dağılımı.....	64

Şekil 4.4	Makro çelik ve 6/16 OL mikro çelik lifin ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait numunelerin lif dağılımları.....	66
Şekil 4.5	Karışımların çökme-yayılma deneyi yayılma çapı ve yayılma süresi değerleri.....	68
Şekil 4.6	Yayılan SCC_0.35 karışımının visual stability index bakımından değerlendirilmesi.....	69
Şekil 4.7	Karışıma lif eklenmesinin lifsiz karışımlara kıyasla çökme-yayılma testi değerlerine etkisi.....	70
Şekil 4.8	Sadece makro çelik lif içeren karışımların çökme-yayılma deneyi görselleri.....	71
Şekil 4.9	Tek lifli ve iki lifli KYB karışımlarının yayılma çapının karşılaştırılması.....	73
Şekil 4.10	İkili lif hibridizasyonuna sahip karışımlarda PVA, 13/16 OL ve 6/16 OL mikro liflerin çökme-yayılmaya etkisinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 4.11	Tek, üç ve dört lifli KYB karışımların yayılma çapının karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.12	Üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarda çökme-yayılma deneyinin karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.13	Dörtlü lif hibridizasyonu olan karışımların kaba agrega içeriğine göre çökme yayılma deneyinde karşılaştırılması.....	77
Şekil 4.14	Karışımların J halkalı çökme-yayılma deneyi yayılma çapı ve yayılma süresi değerleri.....	78
Şekil 4.15	D_c ve D_j değerlerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 4.16	J halkalı çökme yayılma deneyi D_j ve ΔH sonuçları.....	80
Şekil 4.17	Sadece makro çelik lif içeren karışımların J halkalı çökme yayılma deneyinin karşılaştırılması.....	81
Şekil 4.18	Üçlü lif hibridizasyonunda KA/TA oranı 0.30 olan karışımların J halkalı çökme yayılma deneyi karşılaştırılması	82
Şekil 4.19	KA/TA oranı 0.35 olan karışımlarda D_j 'nin D_c 'yere göre değişimi (%) ve ΔH bağıntısı.....	83
Şekil 4.20	Yayılma çapında artış meydana gelen KA/TA oranı 0.35 olan karışımların karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.21	Karışımların V-hunisi deneyinden elde edilen akış süreleri ve çökme-yayılma deneyinde ölçülen t_{50} değerleri.....	85
Şekil 4.22	V-hunisi deneyinde bloklanma olan MAK1_035 karışımı.....	86
Şekil 4.23	3 günlük basınç dayanımı test sonuçları.....	87
Şekil 4.24	28 günlük basınç dayanımı test sonuçları.....	89
Şekil 4.25	90 günlük basınç dayanımı test sonuçları.....	89
Şekil 4.26	Lifsiz KYB karışımların basınç dayanımı-hava içeriği ilişkisi	90
Şekil 4.27	Tek ve iki lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize basınç dayanımı değerleri.....	92
Şekil 4.28	KA/TA oranı 0.25 olan MAK1 karışımına ait lif etrafında oluşan boşluklarla ilgili SEM görüntüsü.....	93
Şekil 4.29	Tek, üç ve dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize basınç dayanımı değerleri.....	95
Şekil 4.30	PVA lifinin karma lif takviyeli karışımlara etkisi.....	96
Şekil 4.31	Karışımların PVA lifi dağılım görselleri.....	97

Şekil 4.32	Dörtlü lif hibridizasyonun olduğu karışımların lifsiz karışımlara göre normalize basınç dayanımı değerleri.....	98
Şekil 4.33	28 günlük elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri.....	99
Şekil 4.34	3 günlük yarmada çekme dayanımı test sonuçları.....	101
Şekil 4.35	28 günlük yarmada çekme dayanımı test sonuçları.....	102
Şekil 4.36	90 günlük yarmada çekme dayanımı test sonuçları.....	102
Şekil 4.37	Lifsiz KYB karışımların yarmada çekme dayanımı-hava içeriği ilişkisi.....	103
Şekil 4.38	Tek ve iki lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize yarmada çekme dayanımı değerleri.....	104
Şekil 4.39	Tek, üç ve dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize yarmada çekme dayanımı değerleri.....	106
Şekil 4.40	Dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize yarmada çekme dayanım değerleri.....	107
Şekil 4.41	Farklı lif yönlenmesi ve liflerin homojen olmayan dağılımı ile ilgili SEM görüntüleri.....	109
Şekil 4.42	3 günlük eğilme dayanımı test sonuçları.....	110
Şekil 4.43	28 günlük eğilme dayanımı test sonuçları.....	110
Şekil 4.44	90 günlük eğilme dayanımı test sonuçları.....	111
Şekil 4.45	Lifsiz KYB karışımların eğilme dayanımı.....	112
Şekil 4.46	Tek ve iki lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize eğilme dayanımı değerleri.....	113
Şekil 4.47	Tek, üç lifli ve dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize eğilme dayanımı değerleri.....	115
Şekil 4.48	Numunelerin lif-hamur arayüzey SEM görüntüleri.....	117
Şekil 4.49	PVA lifinin karma lif takviyeli karışımların eğilme dayanımına etkisi.....	119
Şekil 4.50	Dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize eğilme dayanım değerleri.....	120
Şekil 4.51	3 günlük numunelerin yük – sehim eğrileri.....	122
Şekil 4.52	28 günlük numunelerin yük – sehim eğrileri.....	123
Şekil 4.53	90 günlük numunelerin yük – sehim eğrileri.....	124
Şekil 4.54	Lif takviyeli KYB karışımların tokluk değerleri	126
Şekil 4.55	Eğilme yüklemesine maruz kalmış tokluk değeri en yüksek olan numunelerin çoklu çatlak davranışı görselleri.....	129
Şekil 4.56	90 günlük numunelerin kılcal su emme katsayıları.....	130
Şekil 4.57	90 günlük numunelerin su geçirimsizlik katsayıları.....	133
Şekil 4.58	Makro çelik lifin çekip çıktığı yerin yüzeyinin SEM görüntüsü.....	135
Şekil 4.59	Liflerin etrafında oluşan boşluklara ait SEM görüntüleri.....	136
Şekil 4.60	Lifsiz KYB karışımlara ait numunelerin kısıtlanmış rötire çatlakları.....	139
Şekil 4.61	Lifli KYB karışımların kısıtlanmış rötire deneyi sonucunda elde edilen toplam rötire şekil değiştirme değerleri.....	140
Şekil 4.62	Karışımların D/Ç deneyi sonucunda elde edilen ağırlık değişimleri.....	143
Şekil 4.63	300 D/Ç döngüsü sonrasında en çok hasara uğrayan lifsiz KYB karışımlara ait numunelerin görünüşleri.....	145
Şekil 4.64	Numunelerin 300 D/Ç döngüsünden önceki ve sonraki	146

	yarmada çekme dayanım sonuçları.....	
Şekil 4.65	Lif takviyeli KYB karışımına ait kiriş numunelerin lifsiz KYB numunelerine göre aderans dayanımı gelişimleri (%)....	149
Şekil 4.66	Büyük ölçekli kirişlerin yük-sehim eğrileri.....	151
Şekil 4.67	KYB karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri.	153
Şekil 4.68	MAK1 karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri.....	153
Şekil 4.69	MAK1_P karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri.....	154
Şekil 4.70	MAK0.8_13MİK0.2 karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri.....	155
Şekil 4.71	MAK0.8_13MİK0.2_P karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri.....	155
Şekil 4.72	MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri.....	156
Şekil Ekler1	Tüm numunelerin lif dağılım görselleri.....	183
Şekil Ekler2	300 D/Ç döngüsü sonrasında numune görselleri.....	184

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Taze KYB özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test metodları EFNARC(2002)	11
Çizelge 2.2	KYB yayılımına göre VSI tanımlaması (Daczko ve Kurtz, 2001)	14
Çizelge 2.3	KYB sınıfları (EFNARC(2002))	16
Çizelge 2.4	Lif tiplerinin fiziksel özellikleri (Kurt, 2006).....	18
Çizelge 3.1	Çimento, uçucu kül ve silis dumanı kimyasal kompozisyonları.....	31
Çizelge 3.2	Puzolanik reaktivite deneyi karışımları ve dayanım aktivite indeksi hesaplaması.....	32
Çizelge 3.3	Liflerin bazı özellikleri.....	34
Çizelge 3.4	Karışım oranları (kg/m^3)	38
Çizelge 3.5	Karma lif takviyeli karışımlara uygulanan deneyler....	40
Çizelge 3.6	Taze beton deneyleri ile elde edilen özellikler.....	41
Çizelge 3.7	Numunelere uygulanacak deneyler ve detayları.....	45
Çizelge 3.8	Donatı çubuklarının mekanik özellikleri.....	56
Çizelge 4.1	Taze beton deney sonuçları.....	61
Çizelge 4.2	Sertleşmiş beton mekanik özellikleri tayini için yapılmış deney sonuçları (MPa)	88
Çizelge 4.3	Kısıtlanmış rötre deney sonuçları.....	137
Çizelge 4.4	Büyük ölçekli bindirmeli ekli-donatılı kiriş deney sonuçları.....	148
Çizelge EK-1	Karışımlara ait tüm numunelerin detaylı basınç dayanım değerleri (MPa).....	176
Çizelge EK-2	Karışımlara ait tüm numunelerin detaylı elastisite modülü değerleri (MPa).....	177
Çizelge EK-3	Karışımlara ait tüm numunelerin detaylı yarmada çekme dayanım değerleri (MPa).....	178
Çizelge EK-4	Karışımlara ait tüm numunelerin detaylı eğilme dayanım değerleri (MPa).....	179

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Depreme maruz kalmış yapılar üzerinde yapılan araştırmalar, depreme dayanıklı yapı tasarımlarının yetersiz olduğunu göstermiştir. Deprem bölgelerindeki betonarme yapılarda orta ve ağır derecede hasar görmüş ve uçlarında plastik mafsallar oluşmuş kolonlar, tasarımın yetersiz olduğunu kanıtlamıştır. Bu durum, lıfsız salt betonun enerji yutma kapasitesinin düşük, çekme dayanımının yetersiz ve gevrek olmasından kaynaklanmaktadır (Gu vd. 2012; Barrera vd. 2011). Geleneksel yapı tasarımlarında, plastik mafsalların oluşması muhtemel kolon ve kirişin birleşim bölgelerinde enine donatılar sıklaştırılmaktadır (Paulay ve Priestley, 1992; ACI 318-05, 2005). Böylece, sıklaştırılan enine donatıyla, çatlakların oluşumu veya oluşan çatlakların yayılması engellenerek, betonda oluşabilecek dayanım kaybı azaltmakta ve kolonların sismik performansı iyileştirilmektedir. Ancak, kullanılan etriye sayısının çok fazla olması nedeniyle hem işçilik artmakta hem de kusurlar daha fazla olmaktadır. Diğer olumsuzluklar ise, maliyet ve kalite kontrolünün artmasıdır. Böylece, maliyetin artmasıyla birlikte, kalite kontrolünün de daha hassas bir şekilde yapılması gerekir (Huang vd. 2015). Bahsedilen bu olumsuzlukları iyileştirmek için betonarme yapıda lif takviyesi kullanılması önerilmektedir.

Yapılan araştırmalarda, betona lif takviyesinin betonun mekanik performansını önemli derecede iyileştirdiği bulunmuştur (Banthia ve Gupta, 2004; Banthia ve Sappakittipakorn, 2007; Pons vd. 2007; Markovic vd. 2003). Betona ilave edilen lifler, betonun çekme dayanımının yanında sünekliliğinin de arttırmaktadır. Ayrıca lifler, betonun bazı dayanıklılık özelliklerinin iyileşmesini sağlayarak, hizmet süresini arttırmaktadır. Ancak betonun göçmesinin çok ölçekli ve aşamalı bir süreç olması ve lif tipinin her birinin betonun sadece belirli bir bölgesinde etkili olabilmesi nedenlerinden dolayı, tek lif takviyeli betonun en iyi performansa ulaşamayacağı gözönünde bulundurulmalıdır. Bu sebeple, betonarme elemanlarının mekanik performansını iyileştirmek ve beton malzeme özelliklerini daha iyi şekilde kullanmak amacıyla, çimento esaslı kompozitlerde farklı boyutları, işlevleri ve yapısal tepkileri olan lif kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu şekilde geleneksel beton matrisi ve birden çok süreksiz lif tipinin karışımının meydana getirdiği lif takviyeli betona karma lif takviyeli beton denir (Ding vd. 2010; Issa vd. 2011; Ganesan vd. 2014;

Caggiano vd. 2012, Dazio vd. 2008; Sukontasukkul ve Jamsawang, 2012). Farklı narinliklerde, tiplerde ve elastik modüllerde lifler içerebilen bu karma lif takviyeli beton kompozitlerde, bazı lif kombinasyonlarının sinerjik etki oluşturduğu bazı araştırmacılar (Banthia ve Gupta, 2004; Banthia ve Soleimani, 2005, Banthia ve Nandakumar, 2003) tarafından vurgulanmıştır. İyi tasarlanmış lif kombinasyonlarında liflerin birbiriyle pozitif etkileşiminin bir sonucu olarak, karma lif performansının toplamı tek lifin göstereceği performansı geçmektedir. Bu olgu ise sinerji olarak tanımlanabilir.

Lifli betonlar, etkili sıkıştırma, yerleştirmeyi kolaylaştıracak ve vibrasyon ihtiyacını azaltacak şekilde yeterince akıcı olarak fakat aynı zamanda homojen lif dağılımı sağlanarak ve hapsolmuş hava boşlukları riski azaltılarak tasarlanmalıdır (Khayat ve Roussel, 2000). Lif miktarının artırılması ve yüksek performanslı bir matris içerisinde kullanımı lifli betonun performansını artırır ancak, geleneksel beton tasarımıdaki oranlarla yüksek miktarda lifin kullanımı zordur (Balaguru ve Najm, 2004). Yüksek oranda lif kullanımının gerektiği beton tasarımlarında kendiliğinden yerleşen beton tasarım felsefesinin kullanılması, daha yüksek işlenebilirlikte lifli beton kompozitlerin oluşturulması açısından yararlı olabilir. Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) az veya hiçbir titreşim etkisi olmadan kendi ağırlığı altında yerleşebilmesi ve sıkışabilmesi için akmaya karşı direnci düşük, ayrışma veya terleme olmadan yeterli viskoziteye sahip beton olarak kabul edilebilir. Ancak lif ilavesinin lifsiz KYB karışımlara kıyasla işlenebilirliği düşürmesi, tasarımı bazı önlemlerin alınması gerektiğini göstermektedir. Yapılan araştırmalarda lif takviyeli KYB karışımlarının hamur hacminin artırılmasıyla birlikte liflerin daha iyi yayıldığı ve işlenebilirlikte kayıp olmadan karışıma eklenebilecek lif miktarının artırılabilceği bulunmuştur. Ayrıca, lif takviyeli KYB karışımlarında maksimum agrega tane boyutu ve kaba agrega içeriği de betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilediğinden, kaba agrega oranının daha düşük olduğu KYB karışımlarda işlenebilirlikte kayıp olmadan daha fazla lif dozajına sahip karışımlar elde edilebileceği vurgulanmıştır (Khayat, 1999; Grünewald ve Walraven, 2001).

Son birkaç on yılda, çimento esaslı malzemelerin gelişiminde 150 ile 450 MPa arasında değişen basınç dayanımına sahip yüksek performanslı reaktif pudra beton üretilmesi gibi önemli ilerlemeler gerçekleştirilmiştir. Yüksek performanslı beton,

dayanıklılığı büyük ölçüde artırılmış yüksek dayanımlı betonun tanımıdır. Bununla birlikte, yüksek dayanımın betonun gevrekliğinin artmasına sebep olduğu da bilinmektedir. Bu nedenle, betona lifin katılması, yüksek mukavemetli betonun tokluğunu artırmaktadır (Bonneau vd. 1997). Mikrolif mikro çatlak oluşumunu engellemede köprü olarak görev yapar. Böylece betonun çekme dayanımı artmaktadır. Mikrolifler boyut olarak kısa olduğundan, makro çatlaklar oluşuktan sonra matris ile etkileşimleri çekip-çıkarma (pull-out) şeklinde olabilir. Büyük liflerin mikro çatlakları önlemede önemli etkisi yoktur; buna rağmen, mikro çatlaklar makro çatlaklar arasına yayıldığında, büyük lifler makro çatlakların yayılmasını durdurabilir. Uzun liflerin katılımıyla tokluk artar, fakat en üst gerilme hemen hemen sabit kalır (Betterman vd. 1995). Farklı tip, şekil ve dayanımdaki liflerin kullanımıyla kendiliğinden yerleşen beton daha çok uygulamalar için uygun hale getirilebilir. Bu noktada, lifin KYB'nin işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkilerine karar verilmesi büyük önem arz etmektedir. KYB'nin doldurma kabiliyeti ve şekil değiştirebilirliği gibi karakteristik özellikleri bazı metotlarla ölçülebilir (RILEM TC 145-WSM, 2002). Ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton sisteminde, beton matrisi ve lifler arasındaki arayüz geçiş bölgesini geliştiren ve betonun birçok özelliğini arttıran aktif puzolanik malzemelerden faydalanılır. Dolayısıyla, ultra yüksek performanslı lif takviyeli betonda taban atık külü uygulamak ve daha yeşil ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton üretmek iyi bir tercih olabilir (Pan vd. 2008; Nazari ve Riahi, 2011; Li vd. 2004).

Bu tez çalışmasında, yüksek dayanımlı ve eğilme altında sehim sertleşmesiyle çoklu çatlak davranışı gösteren yüksek performanslı lif takviyeli KYB karışımlar tasarlanmıştır. Tek lifli ve ikili, üçlü ve dördü lif hibridizasyonuna sahip ve kaba agrega/toplam agrega oranları değişkenlik gösteren karma lif takviyeli karışımların işlenebilirlik, mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiş olup, liflerin ve kaba agrega içeriğinin bu özelliklere etkileri tartışılmıştır. Bununla birlikte, yapılan testler sonucunda, genelde mekanik özelliklerinin daha öne çıktığı KA/TA oranı 0.35 olan ve tek lifli ve ikili, üçlü ve dördü lif hibridizasyonuna sahip KYB karışımlarının donatı aderansının incelenmesi amacıyla bindirmeli-ekli donatılı büyük ölçekli kiriş deneyleri yapılmıştır.

1.2 Tezin Amacı, Kapsamı ve Özgünlüğü

Tez çalışmasının amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek basınç dayanımı ve yüksek çekme sünekliliğinin özel kombinasyonuna dayanan yüksek performanslı karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üretmek,
- Hem yüksek dayanım ve hem de yüksek sünekliliğe sahip karma lif takviyeli bu kompozitin üretiminde iri agrega kullanmak,
- Bu kompoziti, eğilme altında sehim sertleşmesiyle çoklu çatlak davranışı gösterecek şekilde tasarlamak,
- Farklı tip (çelik ve sentetik), narinlik ve boyutlarda (makro veya mikro) liflerin tekli, ikili, üçlü ve dörtlü kullanımının, tasarlanan KYB karışımların işlenebilirlik, mekanik ve durabilite özelliklerine etkisini incelemek.

Bu amaçlar doğrultusunda proje hedefleri şu şekilde sıralanabilir;

- Fazla miktarda iri agrega ve yüksek narinlikteki liflerin birlikte kullanımının betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilediği ve homojenliğini azaltarak, liflerin topaklaşmasına ve kümeleşmesine neden olduğu bilinmektedir. Ayrıca, betonda mikrOLF kullanımı da zorlaşmaktadır, çünkü iri agreganın varlığı kırılma sürecinde bu liflerin rolünü güçlü bir şekilde etkiler ve onların etkili olmalarını sınırlandırır. Bu çalışma ile lif hibridizasyonu ile üretilen Yüksek-Dayanımlı Yüksek-Süneklilikli KYB'nin istenen mekanik performansları sürdürürken işlenebilirlik ile alakalı problemleri azaltması için aynı maksimum tane boyutuna sahip fakat deneme dökümleri neticesinde önceden karar verilmiş 3 farklı “Kaba Agrega/Toplam Agrega (KA/TA) Oranı”nın etkisini incelemek,
- Eğilme altında çoklu çatlak davranışıyla sehim sertleşmesi gösteren yüksek dayanımlı ve yüksek sünekliliğe sahip KYB karışımlarında lif etkisini incelemek amacıyla tek lifli ve ikili, üçlü ve özellikle dörtlü lif hibridizasyonuna sahip KYB'yi ilk defa çalışmak,
- Yüksek dayanımlı ve yüksek sünekliliğe sahip yüksek performanslı karma lif takviyeli KYB olan kompozitin eğilme altında sehim sertleşmesi göstermesinde büyük önem arzeden “karışım parametreleri” ile ilgili literatürdeki boşluğu doldurmak.

- Farklı lif hibridizasyonlarının (tekli, ikili, üçlü, dördlü) beton-donatı aderansı üzerindeki etkisini incelemek.

Tez çalışmasının özgün değerleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Eğilme altında çoklu çatlak davranışı gösteren tek ve karma lif takviyeli yüksek dayanımlı ve yüksek sünekliliğe sahip kompozitler, inşaat mühendisliği alanında oldukça yeni bir konu olup, bu çalışmayla birlikte bu alandaki literatür yakından takip edilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen bulgu ve sonuçlar yeni olan bu alandaki literatüre katkı sağlamıştır.
- Yüksek dayanım ve yüksek sünekliliğe sahip bu yeni kompozitin üretiminde “iri agrega” kullanılmıştır.
- Literatürdeki mevcut kompozitlerden farklı olarak, bu yeni kompozitte mümkün olabilecek en yüksek oranda iri agrega kullanılarak hem “boyutsal stabilite” hem de ekonomiklik sağlanmıştır.
- Yine literatürdeki mevcut kompozitlerden farklı olarak, sentetik lif ile birlikte makro lif olarak maliyeti daha düşük olan “yeni nesil yüksek performanslı çelik lif” kullanılmıştır. Mikro lif olarak ise hem sentetik hem de çelik lif kullanılmıştır.
- Yüksek dayanımlı bu yeni kompozitin, çoklu çatlak davranışı göstermesinde büyük öneme sahip olan liflerin etkisini incelemek amacıyla, tek lifli, ikili, üçlü ve dördlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlar üretilmiş ve böylece literatürde ilk defa dördlü lif hibridizasyonunun etkisi araştırılmıştır.
- Bu çalışmada, yüksek mukavemetli betonda mikro çelik lif dışında sentetik lifler de kullanılarak bu iki farklı mikro lifin karışıma etkisi araştırılmıştır.
- Liflerin tekli, ikili, üçlü ve dördlü kullanımının donatı aderansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında, farklı KA/TA oranlarının ve farklı tip, narinlik ve boyutlardaki liflerin tekli, ikili, üçlü ve dördlü olarak kullanılmasının KYB karışımların işlenebilirlik, mekanik, durabilite özellikleri ile büyük ölçekli bindirmeli-ekli donatılı kiriş numuneler kullanılarak liflerin donatı aderansı üzerindeki etkileri incelenmektedir. KYB karışımlarının tasarımında su/bağlayıcı oranı (su, çimento, uçucu kül ve silis dumanı miktarları aynı) ve toplam çelik lif oranı sabit tutulmuştur. Değişken parametre olan KA/TA oranı ise deneme dökümleri neticesinde, hem maksimum oranda kaba agrega içerecek (maksimum tane boyutu 16 mm), hem de KYB işlenebilirlik kriterlerini sağlayabilecek şekilde seçilmiştir.

Yüksek dayanım ile birlikte eğilme altında sehim sertleşmesiyle çoklu çatlak davranışı göstermesi amacıyla tasarlanan karışımlarda, kullanılan liflerin oranlarına yine deneme dökümleriyle karar verilmiştir. Ancak bu esnada, liflerin işlenebilirliği olumsuz yönde etkilediği de göz önünde bulundurulmuş ve lif oranları, taze KYB özelliklerini de olabildiğince olumsuz etkilemeyecek şekilde seçilmiştir.

1.3 Tezin Ana Hatları

Yapılan tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır ve tez çalışmasının akış diyagramı Çizelge 1.1’de sunulmuştur.

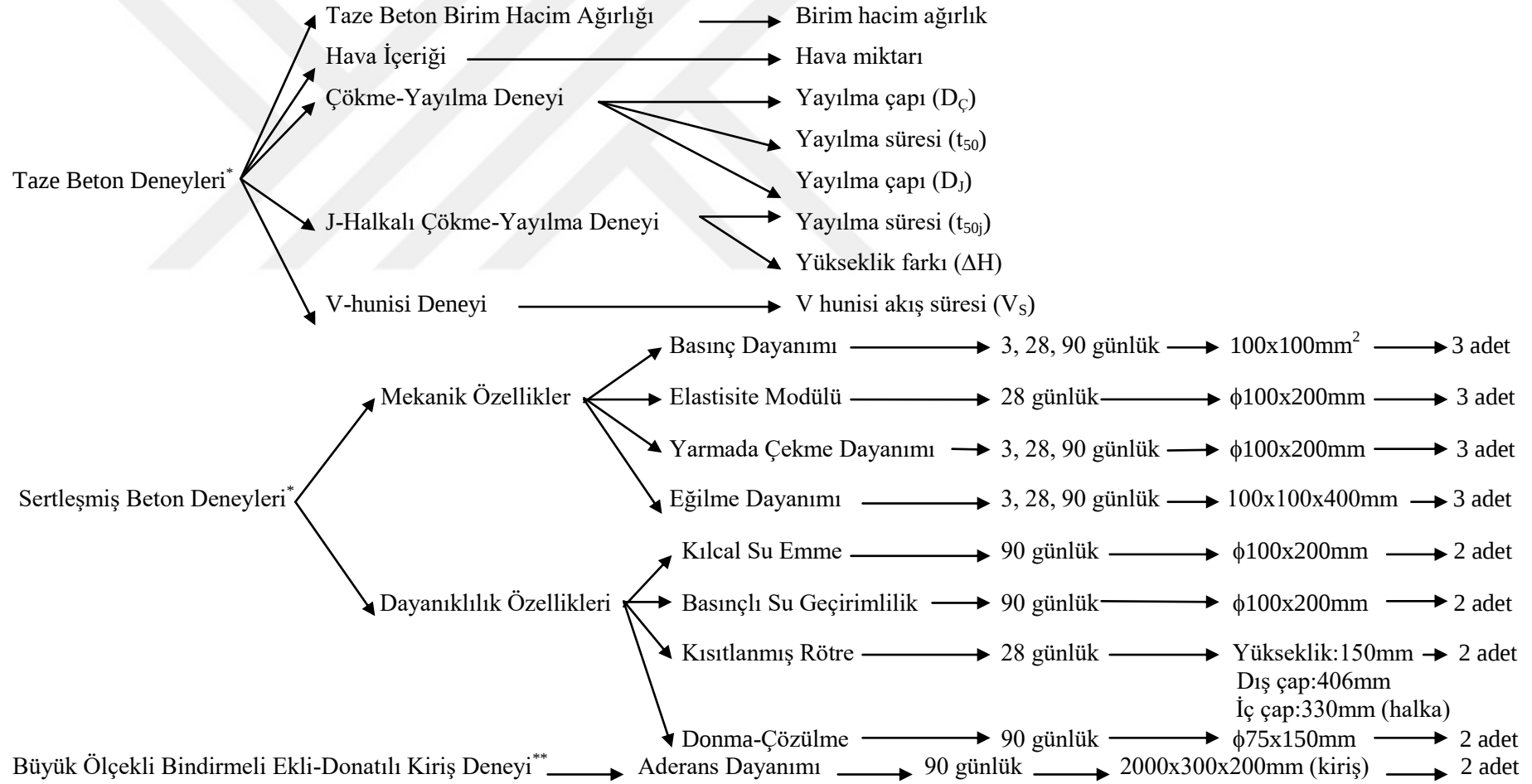
İkinci bölümde KYB’nin tanımı ve EFNARC (2002)’de belirtilen işlenebilirlik deneyleri tanıtılmıştır. Ayrıca lif tipleri ve özellikleri ile ilgili genel bilgiler verilerek, lif takviyeli çimentolu kompozitler tanıtılmıştır. Bununla birlikte, liflerin çimento esaslı kompozitlerin işlenebilirlik ve mekanik özelliklere etkileri ve büyük ölçekli bindirmeli ekli kirişlerin aderans dayanımı literatürdeki çalışmalarla desteklenerek sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, tez kapsamında tasarlanan bütün karışımlarda kullanılan malzemelerin karakterizasyonu yapılmış ve elde edilen karışım oranları detaylı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca, karışımların taze beton özelliklerini elde etmek amacıyla uygulanan işlenebilirlik deneyleri anlatılmıştır. Bununla birlikte sertleşmiş beton özelliklerinin tespiti için yapılacak testlerin prosedürleri ve bindirmeli ekli-donatılı kiriş deneyi detaylı olarak verilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez çalışması boyunca yapılmış olan deneylerin sonuçları verilmiş ve elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan mevcut çalışmalar ile desteklenerek tartışılmış ve değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde, tez kapsamında yapılan bütün deneylerin sonuçları ve bulguları özet olarak sunulmuştur.

Tez çalışmasının Ekler bölümünde karışımlara ait tüm numunelerin mekanik özellikleri, numunelerin lif dağılımları ve donma-çözülme deneyinde 300 donma/çözülme döngüsü sonunda numunelerin görselleri sunulmuştur.



*24 karışım için uygulanmıştır.

** 6 karışım için uygulanmıştır

Şekil 1.1 Tez çalışmasının akış diyagramı

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)

Kendiliğinden yerleşen beton, herhangi bir sıkıştırma uygulanmadan, yüksek akıcılığa ve kararlılığa sahip olmasının bir sonucu olarak, kendi ağırlığıyla kolayca yayılabilen, donatılar arasından geçme kabiliyetine sahip olan, terlemeye veya ayrışmaya uğramadan kalıbı dolduran beton olarak tanımlanmaktadır (Okamura, 1997). KYB’de sıkıştırma uygulanmadığından hem işçilikten tasarruf edilir hem de donatının çok yoğun olduğu yapı elemanlarında ve dar kesitlerde betonun daha etkili yayılması sağlanır. Bununla birlikte, geçirimsizliği geleneksel betona göre daha az, yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasının sonucu olarak betonun taze ve sertleşmiş halinde daha yüksek performans gösterdiği bilinmektedir (Okamura ve Ouchi, 2003).

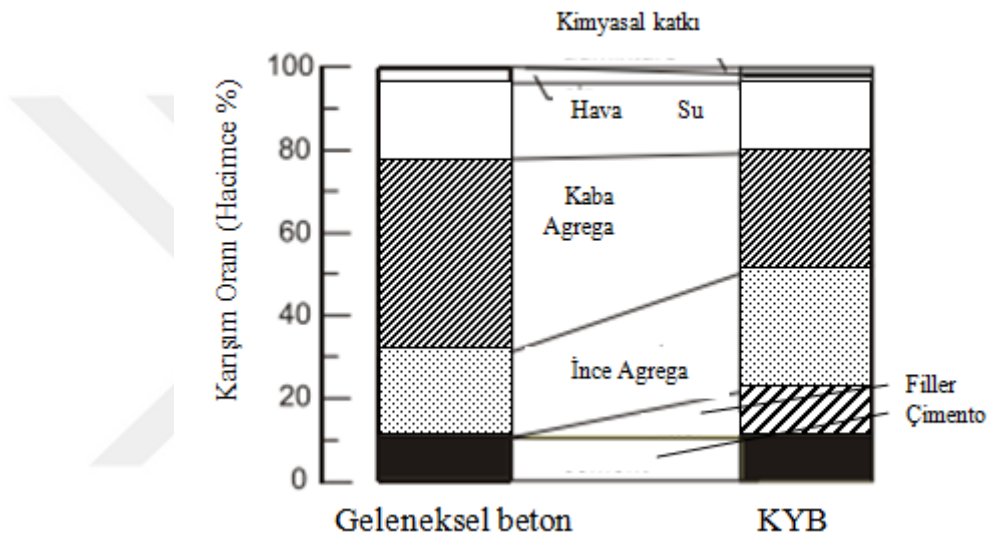
2.1.1 Karışım özellikleri

Kendiliğinden yerleşen beton tasarımının üç adet özelliği vardır. Bunlar, yüksek akma kabiliyeti ve yüksek stabilite özelliği ile birlikte bloklanma riskinin az, yani engeller arasından geçiş kabiliyetinin fazla olmasıdır. Bu amaç doğrultusunda KYB karışımlarda düşük akma gerilmesine sahip ve vizkozitesi yüksek malzemeye ihtiyaç vardır. Karışım su ilavesi akma gerilmesini düşürmekle birlikte vizkoziteyi de düşürmektedir. Ancak süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı hem akma gerilmesini düşürmekte hem de karışımın vizkozitesini az miktarda etkilemektedir. Ancak, burada unutulmaması gereken nokta, geleneksel betonun sadece süperakışkanlaştırıcı katkı kullanarak KYB’ye dönüştürülemeyeceğidir. KYB karışım tasarımında geleneksel betondan farklı olarak, düşük maksimum agrega tane boyutu, düşük kaba agrega oranı, yüksek hamur hacmi, mineral katkı veya viskozite artırıcı malzeme kullanılmaktadır.

KYB’de kullanılan ince malzeme miktarı, geleneksel betondakinden daha fazladır. İnce malzeme ihtiyacının fazla olması genelde $450-500\text{kg/m}^3$ arasında yüksek oranda çimento dozajı kullanımına neden olmaktadır. Ancak KYB’de toz malzeme olarak çimento ile birlikte silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkılar da kullanılmaktadır. EFNARC (2005)’e göre KYB karışımında toz malzeme miktarı ($125\mu\text{m}$ ’den küçük) $380-600\text{ kg/m}^3$ arasında değişkenlik gösterirken, su/toz malzeme oranı hacimsel olarak 0.85-1.10 arasındadır.

KYB karışımlarının kaba agregası içeriği ve maksimum agregası tane boyutu geleneksel betondakine göre daha azdır. EFNARC (2005)'e göre toplam agregası ağırlığının %48- %55'i kadar ince agregası kullanımı ve maksimum agregası tane boyunun ise 10-20 mm arasında olması önerilmektedir.

KYB ve geleneksel betonun içerdiği malzemeler aynı olmakla beraber tasarımında birtakım değişiklikler vardır. KYB'de kaba agregası/toplam agregası oranı ve su/bağlayıcı oranı daha düşüktür. Şekil 2.1'de KYB ve geleneksel betonun tipik karışım oranları verilmiştir.



Şekil 2.1 Geleneksel beton ve KYB'nin karışım oranları (Holschemacher, 2004)

Şekil 2.1'den de görüldüğü üzere geleneksel beton ile KYB arasındaki en büyük fark, KYB'de kaba agregası içeriğinin azaltılması, ince agregası içeriğinin artırılması ve betonun akıcılığının sağlanması için toplam agregası hacminin azaltılmasıdır. KYB karışımında kaba agregası/toplam agregası oranı da karışımın reolojik özelliklerini etkilemektedir. KYB karışımlarında kaba agregasının az olup ince agregası içeriğinin artırılmasıyla hem betonun akıcılığında hem de engeller arasından geçiş kabiliyetinde iyileşme meydana gelmektedir (Gomes, 2002). Bununla birlikte, KYB karışımındaki ince malzeme miktarını artırmak amacıyla filler malzeme olarak bilinen puzolanik veya inert toz malzemeler kullanılmaktadır. Böylece, KYB karışımında hamur hacmi, ilave edilen toz malzemelerin de etkisiyle artmakta ve KYB karışımının akıcılığı sağlanmaktadır (Toyoharu vd. 1998). Filler olarak kullanılan malzeme, maliyeti de düşük olduğundan kireçtaşı tozudur. Bu malzeme, çimento

içeriğinin fazla olduğu karışımlarda hidratasyon ısını düzenlediği gibi, yüksek işlenebilirliğin olduğu karışımların kararlılığın sağlanmasına yardımcı olmaktadır (Newman ve Choo, 2003).

KYB karışım tasarımında çimento ve mineral katkıların oranlarının ve su/toz malzeme oranının iyi ayarlanması gerekmektedir. Çünkü sertleşmeye başlayana kadar KYB karışımının terleme ve ayrışmaya karşı dirençli olması gerekmektedir. Su/toz malzeme oranı fazla olan karışımlarda yüksek şekil değiştirme sağlansa bile, karışımın kohezyonu azalarak, agrega ayrışmaları oluşup betonun akışı tıkanabilir. Kaba agrega, ince agrega ve ince malzeme taneciklerinin birbiri arasındaki iç sürtünmeleri KYB karışımının akmasına karşı iç direnci artırmaktadır. Bu durum taze haldeki KYB karışımının hem akma hızını hem de şekil değiştirme kabiliyetini düşürür. Meydana gelen bu iç sürtünmeler, özellikle dar alanlarda katı tanecikler arasında daha fazla olduğundan betonun akması ciddi oranda etkilenmektedir. Dolayısıyla viskozitesi düşük karışımlarda agrega yoğunluğunun fazla olması kümeleşmeye neden olmakta ve taze betonun dar alanlardaki hareketini kısıtlayabilmektedir (Newman ve Choo, 2003).

KYB’de hem yüksek işlenebilirlik hem de ayrışmaya karşı direnç sağlamak amacıyla, betonun su miktarını artırmadan kimyasal katkı maddeleri kullanılmaktadır (Hollingsworth, 2002). Yeni nesil süperakışkanlaştırıcı olarak bilinen pOLkarboksilik asit bazlı katkılar, çimento tanelerinin elektriksel itki ile betonun içerisinde dağılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, çimento tanelerinin çevresinde, uzun yan dallara sahip pOLmer zincirlerinin birbirini iten fiziksel itki meydana getirmesi ile de çimento taneciklerinin beton içerisinde dağılımı gerçekleşmektedir (Sağlam, 2000). Yapılan bir çalışmada da (Gürol, 1999), pOLkarboksilik asit bazlı katkının topaklaşmayı önlediği, daha fazla miktarda çimento tanesini hidratasyona katılmasının sağlandığı ve topaklar arasında hapsolan su moleküllerinin serbest kalmasıyla karışımın işlenebilirliğinin iyileştiği belirtilmiştir.

2.1.2 KYB reolojisi

Taze KYB karışımının reolojisi, optimum vizkozite ve düşük eşik kayma değeri olarak tanımlanmaktadır. Taze betonun hareket etmesi için gereken kuvvete eşik kayma değeri denebilir. Taze KYB karışımlarında eşik kayma değerinin olabildiğince sıfıra yakın olması gerekmektedir ve bu değer, çökme deneyine benzer bir deneyle de

göreceli olarak değerlendirilebilir. Taze KYB karışımının akmaya karşı gösterdiği dirence de vizkozite denir. Optimum vizkozite değeri ise karışım oranları ve malzeme parametreleri ile ilgilidir. Optimum vizkozitenin altında, taze beton ayrışmaya başlayarak stabilite bozulmakta, yani homojenliğini kaybetmektedir. Optimum vizkozitenin üstünde ise, beton kıvamının aşırı artmasından dolayı taze betonun yerleştirilmesinde sorunlar olmaktadır. Her iki durumda da istenmeyen sonuçlar olduğundan, çözüm olarak, karışım suyunun miktarını çok fazla arttırmadan, eşik kayma gerilmesi akışkanlaştırıcı kullanarak azaltılmalıdır. Ayrıca, optimum vizkoziteye ulaşmak için vizkozite artırıcı katkı maddeleri kullanılmalıdır. Bununla birlikte, KYB'nin reolojisi, malzemelerin karışıma eklenme sırası, karıştırma süresi, sıcaklık ve karıştırıcı tipinden de etkilenmektedir .

Taze KYB'nin akıcılık, engeller arasından geçiş kabiliyeti ve vizkozite gibi özelliklerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Ancak tek bir deney ile bu özelliklerin hepsinin tespiti mümkün değildir. Buna karşın, Çizelge 2.1'de sunulan bazı deney yöntemleriyle taze KYB karışımların bu özellikleri ile ilgili göreceli olarak değerlendirme yapılabilir. KYB reolojisinin tam olarak belirlenmesi için Çizelge 2.1'de belirtildiği gibi akıcılık, engeller arasından geçiş kabiliyeti, vizkozite ve ayrışma ile alakalı deneylerin yapılması gerekmektedir.

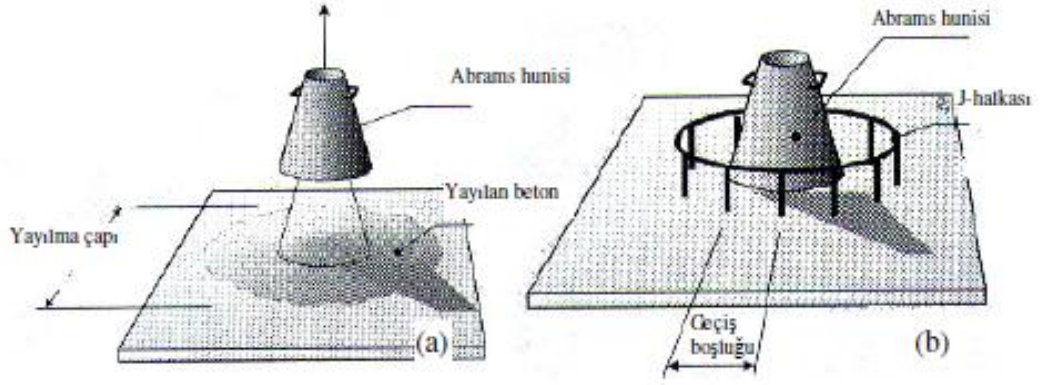
Çizelge 2.1 Taze KYB özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test metodları EFNARC(2002)

Özellik	Test Metodu	Ölçülen değer
Akıcılık/doldurma yeteneği	Çökme-yayılma Kajima kutusu	Toplam yayılma Görsel doldurma
Viskozite/akıcılık	t ₅₀₀ V-hunisi O-hunisi Orimet	Akma süresi Akma süresi Akma süresi Akma süresi
Engeller Arasından Geçiş Yeteneği	L-kutusu U-kutusu J-halkası Kajima kutusu	Geçme oranı Yükseklik farkı Yükseklik, toplam akma Görsel geçme yeteneği
Ayrışma direnci	Penetrasyon Elek ayrışma Oturak kolon	Derinlik Yüzde ayrışma Ayrışma oranı

2.1.2.1 Çökme-yayılma testi, J-halkalı çökme yayılma testi ve t_{50} akma süresi

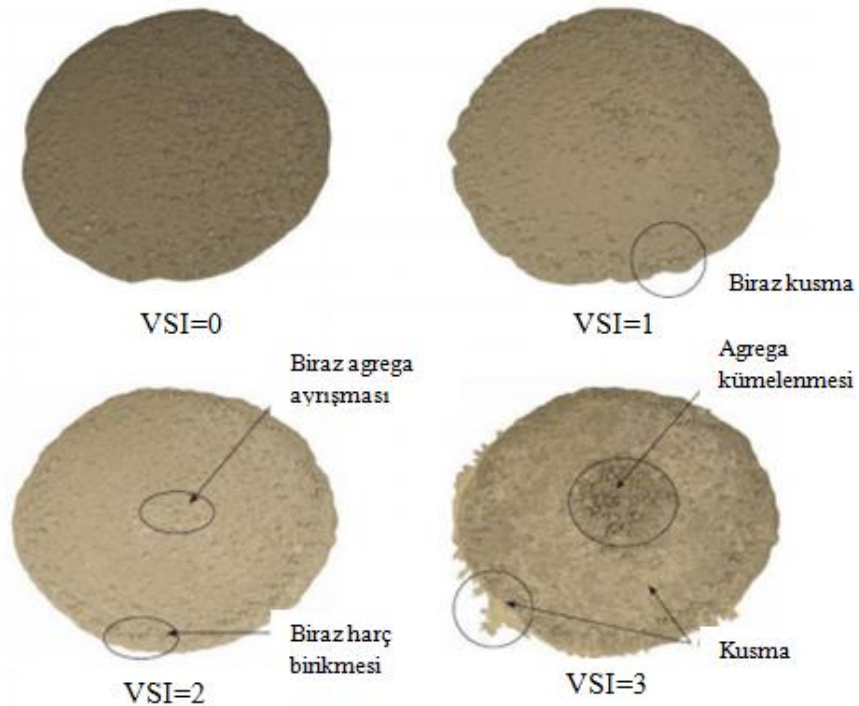
Çökme-yayılma deneyi, taze KYB karışımların akıcılığının tayininde kullanılan bir deney yöntemidir. Abrams hunisi kullanılarak uygulanan bu deneyde, tabla üzerinde taze betonun yayılma çapı ölçülerek taze betonun akıcılığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, yayılan taze betonun 50 cm çapa ulaşana kadar geçen zamanın tespit edilmesiyle bulunan t_{50} akma süresi de betonun vizkozitesi hakkında bilgi vermektedir. Deneyin uygulanmasında, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi, 900x900 mm boyutlarındaki tablanın tam ortasına yerleştirilen Abrams hunisi tamamen taze KYB karışımı ile doldurulmaktadır. Ardından, herhangi bir sıkıştırma uygulanmadan ve vakit kaybetmeden Abrams hunisi dik olacak şekilde yavaşça yukarı doğru kaldırılarak taze KYB karışımının tabla üzerinde yayılması sağlanır. Taze beton akmaya başladıktan itibaren, tabla üzerinde önceden belirlenmiş ve çizilmiş 50 cm çapa sahip daireye ulaşana kadar geçen süre kronometreyle ölçülerek t_{50} akma süresi bulunur. Yayılma tamamlandıktan sonra ise, tabla üzerinde yayılan betonun dik olacak şekilde iki doğrultudan çapları ölçülür ve ortalaması alınarak yayılma çapı olarak kaydedilir. Son olarak, yayılan betonda oluşan su kuma, agregaların segregasyonu, ayrışma gibi durumlar not alınır.

J-halkalı çökme yayılma deneyinde ise çökme-yayılma deneyine göre tek fark, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, tabla üzerine yerleştirilen, donatı engellerinin olduğu çelik çemberdir. J-halkalı çökme-yayılma deneyinde hem taze betonun akıcılığı hem de halka şeklinde parmaklık engellerden geçme kabiliyeti değerlendirilmektedir. Abrams hunisinin dik bir şekilde kaldırılmasıyla akan taze beton bu engellerden geçip yayılmasını tamamladıktan sonra, J-halkasının hemen iç kısmındaki ve dış kısmındaki yükseklikler ölçülüp bu değerlerinin farkının alınmasıyla taze betonun geçiş kabiliyeti ve tıkanma riski değerlendirilmektedir.



Şekil 2.2 (a) Çökme-yayılma testi, (b) J-halkalı çökme-yayılma testi (Groth, 2000-a)

Çökme yayılma testi uygulanmasıyla birlikte taze KYB karışımının yayılması sağlandıktan sonra, yayılan betonun kararlılığıyla alakalı olarak ASTM C1611 (2018) tarafından bazı indeksler tanımlanmıştır. Visual Stability Index (VSI) olarak tanımlanan bu metotta, yayılan betonun segregasyona karşı kararlılığıyla ilgili görsel olarak karar verilmekte ve segregasyon potansiyeline göre 0'dan 3'e kadar VSI değerleri ile karışımlar tanımlanmaktadır. Buna göre, taze KYB karışımlar Şekil 2.3'de olduğu gibi sınıflandırılmaktadır. Çizelge 2.2'de belirtilen kriterler ise bu VSI değerleri sembolize etmektedir.



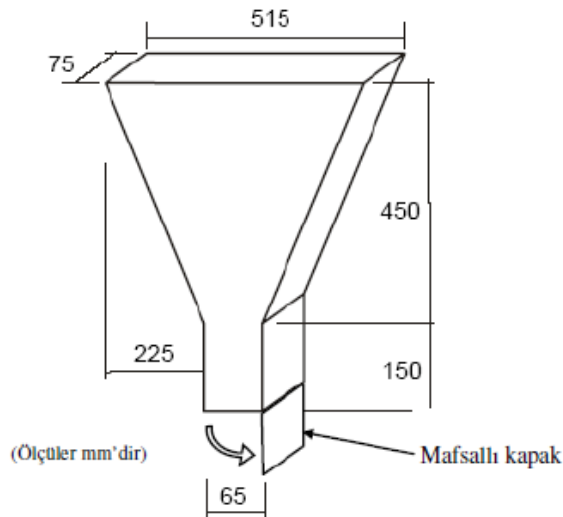
Şekil 2.3 VSI değerlerinin tanımlanması

Çizelge 2.2 KYB yayılımına göre VSI tanımlaması (Daczko ve Kurtz, 2001)

VSI	Kriterler
0 = Çok kararlı	Herhangi bir kuma ve segregasyon yok
1 = Kararlı	Segregasyon yok, biraz kuma var
2 = Kararlı değil	10 mm'den az harç birikmesi var ve/veya betonun ortasında biraz agrega ayrışması var
3 = Hiç kararlı değil	10mm'den fazla ve belirgin şekilde harç toplanması var ve betonun ortasında geniş agrega kümelenmesi mevcut

2.1.2.2 V-hunisi testi

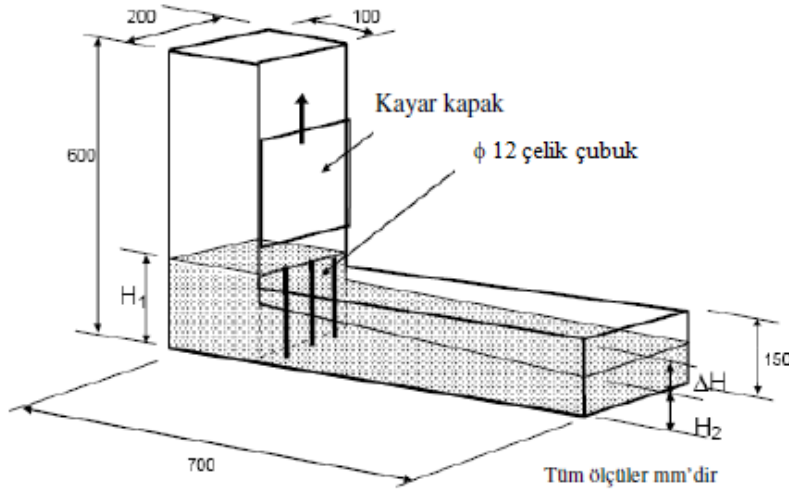
V-hunisi deneyiyle taze KYB karışımların hem akıcılığı hem de vizkozitesi değerlendirilmektedir. Deney, Şekil 2.4'de gösterilen deney aparatına 12 litre taze KYB karışımının hiç sıkıştırma işlemi uygulanmadan tamamen doldurulmasıyla gerçekleştirilir. 10 saniye süre geçtikten sonra, deney düzeneğinin alt bölümünde yer alan mafsallı kapak açılarak taze betonun akması sağlanır. Kronometre kullanılarak, taze betonun akmaya başladığı zaman ile V-hunisi haznesinin üzerinden ilk ışığın görüldüğü ana kadar geçen süre ölçülür ve V-hunisi akma süresi olarak kaydedilir. Bu sürenin düşük olması, akıcılığın fazla vizkozitenin düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.4 V-hunisi deney düzeneği (EFNARC(2002))

2.1.2.3 L-kutusu testi

L-kutusu deneyiyle, taze KYB karışımların engeller arasından geçiş yeteneği ve bu engellere takılarak bloklanma riski değerlendirilmektedir. Şekil 2.5’de de görüldüğü gibi, deney düzeneğinde gerçek durumu da simgeleyen demir donatı engeller bulunmaktadır. Ancak demir donatılar arasındaki mesafeler, KYB karışımındaki agrega maksimum tane boyutuna göre değişkenlik gösterebilir. L-kutusu haznesinin kayar kapağı kapatılarak 14 litre taze KYB karışımı haznenin içerisine doldurulur ve herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan 1 dakika beklenir. Ardından, kayar kapağın açılmasıyla taze betonun deney düzeneğinin yatay bölümüne yayılması sağlanır. Betonun akmaya başladığı zaman ile kayar kapak önünden 200 mm ve 400 mm’ye ulaşana kadar geçen zaman T_{20} ve T_{40} akış süreleri olarak not edilir. Taze betonun yayılması durduktan sonra kayar kapağın arkasındaki (H_1) ile L-kutusunun uç kısmı arasındaki taze beton yüksekliği (H_2) bloklanma oranı (H_2/H_1) olarak kaydedilir. Bu oran 1’e yaklaştıkça taze betonun akıcılığının arttığı söylenebilir.



Şekil 2.5 L-kutusu deney düzeneği (EFNARC (2002))

2.1.2.4 Elek ayrışma testi

Elek ayrışma testiyle, KYB karışımların ayrışmaya karşı gösterdiği direnç değerlendirilmektedir. Bu deneyde, 10 litrelik taze KYB karışımı bir kap içerisinde üstü kapatılarak 15 dakika sarsmadan bekletilir. Bu esnada, ilk olarak 300 mm çaplı boş kap tek başına (W_p) sonra da üzerine elek yerleştirilerek tartılır. Taze betonun

bekleme süresi dolduktan sonra ise, taze betonun üzerinden yaklaşık 5 kg.lık bir miktar alınarak tartılan ve üzerinde elek olan boş kabın içerisine yaklaşık 500 mm yükseklikten hızlı bir şekilde dökülür ve tartılır (W_c). İki dakika sonunda elek üzerinden geçen taze beton tartılır (W_{ps}) (bakınız Şekil 2.6). Taze KYB'nin ayrışan kısmı, $(W_{ps} - W_p) / W_c \times 100$ denklemiyle hesaplanır.



Şekil 2.6 Elek ayrışma deney düzeneği (EFNARC (2002))

Taze KYB karışımına uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlara göre KYB Çizelge 2.3'de belirtildiği gibi farklı sınıflara ayrılmaktadır.

Çizelge 2.3 KYB sınıfları (EFNARC(2002))

Sınıf	Yayılma çapı (mm)	t_{500} (sn)	V-hunisi akış süresi(sn)	Geçme yeteneği	Ayrışma direnci (%)
Çökme-yayılma sınıfı					
SF1	550 ~ 650				
SF2	660 ~ 750				
SF3	760 ~ 850				
Viskozite sınıfı					
VS1/ VF1		≤ 2	≤ 8		
VS2/ VF2		> 2	9 ~ 25		
Engeller arasından geçme sınıfı					
PA1				$\geq 0,80$ 2 çubuklu	
PA2				$\geq 0,80$ 3 çubuklu	
Ayrışma direnci sınıfı					
SR1					≤ 20
SR2					≤ 15

2.2 Çimento Esaslı Kompozitlere Lif Takviyesi

2.2.1. Lif takviyesinin kompozitin davranışına etkisi

Betona uygulanan lif takviyesi ilk olarak 1950 ve 1960'lı yıllarda betona çelik lif takviyesinin betonun mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesiyle başlamıştır (Hannant, 1987). Lif takviyeli beton, betonun gelişigüzel yönlenmiş lifler içermesi demektir (Bentur, 1989). Günümüzde lif takviyeli beton, yol kaplamaları, su yapıları, altyapı elemanları, köprüler, tüneller, uçak pistleri, patlamaya dayanıklı askeri yapılar ve beton borular gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Geleneksel beton, göçmeye başladığında yük taşıma kapasitesinin tamamını kaybederek yarı gevrek bir davranış sergiler. Ancak, betona uygulanan lif takviyesi, yükleme sonucunda betonda oluşan çatlakların büyümesini ve gevrekliğini ortadan kaldırabilir (Bentur ve Mindess, 2007). Matriste bulunan rastgele dağılan lifler, çekme gerilmesi taşıyarak çatlakları köprüleyebilen ve betonun enerji yutma kapasitesini geliştiren üç boyutta birleştirici ağ oluşmasını sağlamaktadır. Böylece, çimento esaslı kompozitlerin hem eğilme dayanımı hem de tokluk kapasitesi gelişmektedir. Üniform olarak dağılmış sürekli liflerin ilave edilmesiyle betonun mekanik özellikleri geliştirilebilir. Böylece, rastgele dağılmış lifler çatlakların başlamasını, yayılmasını ve birleşmesini kontrol ederek ve engelleyerek açılmış olan çatlak boyunca yükün taşınmasını sağlarlar (Hannant, 1987; Bentur, 1989; Balaguru ve Shah, 1992). Çatlaklar, süreksiz, ince ve yayılı mikro çatlakların birleşerek makro çatlak denilen daha geniş çatlakların oluşmasıyla meydana gelmektedir. Lifler, mikro çatlakların başlamasını ve mikro çatlakların birbiriyle birleşerek makro çatlak oluşumunu erteleyerek, kırılmanın gelişimini büyük ölçüde etkilerler. Ayrıca bu lifler, mikro ve makro çatlakları durdurmada da rol oynarlar. Mikro düzeyde lifler, çatlakların başlayıp büyümesini önlerler ve mikro ve makro çatlakları birleştiğinde etkili köprüleme ile süneklik, tokluk ve dayanımı geliştirirler (Balaguru ve Shah, 1992; Bentur ve Mindess, 1990). Betona lif takviyesi, hem çatlamaya karşı üstün direnç hem de çekme dayanımı ve enerji yutma kapasitesinde artış sağlarlar. Çekme kuvvetinin sonucunda lif takviyeli çimento esaslı kompozitte çatlak oluşması durumunda, lifler çatlak köprülemesi için mevcutsa, çatlağın yayılmasının önlenmesi için lif-matris aderansını kırması amacıyla ilave enerji gereklidir. Bunun sonucunda, lif çekip-çıkmaya (pull-out), akmaya ve kopmaya uğrayacaktır (Balaguru ve Shah, 1992; Bentur ve Mindess, 1990; Johnston, 2001)

Plastik şekil değiştirme esnasında çimento esaslı kompozitler, lokal tek bir çatlağın genişliğinin artması yerine çok sayıda küçük çatlak oluşumuna olanak sağlamaktadır. Yani, oluşan ilk çatlak sonrasında, şekil değiştirme devam ederken, kompozitin yük taşıma kapasitesi artarak devam etmektedir (Ersoy, 2001). Kırılma ise, birçok paralel çatlağın oluşması sonucunda meydana gelmektedir. Betonun içerisindeki hem hidrasyon gelişirken oluşan çatlaklar hem de içsel gerilmeler kaynaklı meydana gelen çatlaklar, kompozit yük taşımaya başladığı anda büyümeye başlamaktadır. Çatlağın ilerlemesine neden olan gerilme enerjisi ilk olarak lifler vasıtasıyla karşılanmaya başlanmaktadır. Ardından, yükü taşıyan lif, bu gerilme enerjisini taşımakta yetersiz kalınca, lif ya betondan sıyrılmakta ya da kopmaktadır. Lifin kopması veya sıyrılması durumunda, gerilme enerjisi tekrar betona aktarılmakta ve çatlak başka bir lif ile karşılaşana kadar büyümeye devam etmektedir. Bu durumun sürekli tekrarıyla paralel çatlaklar oluşmaktadır. Tamamen göçme olana kadar elemanda oluşan paralel çatlakların miktarı, elemanın enerji yutma kapasitesinin ne oranda olduğu ile alakalıdır. Buna rağmen, lif takviyesi olmayan betonda ilk çatlak ile birlikte kırılma gerçekleşmektedir. Lif takviyeli ve lif takviyesiz betonların yük-sehim eğrilerinde, lifsiz betonların ilk çatlaktan sonra ani bir şekilde kırıldığı, ancak lif takviyeli betonun artan sehim ile birlikte yük taşıma kapasitesinin devam ettiği ve hatta, eğilme dayanımının iyileştiği anlaşılmaktadır (Arısoy, 2005).

2.2.2. Lif tipleri

Farklı özellik ve kullanım alanları gözönüne alındığında, çok sayıda lif tipi vardır. Değişik türdeki liflerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.4'de sunulmaktadır (Kurt, 2006).

Çizelge 2.4 Lif tiplerinin fiziksel özellikleri (Kurt, 2006)

Lif cinsi	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Maksimum uzama (%)	Yoğunluk
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0.6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-3.5	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
POLetilen(PE)	690	0.14-0.4	10	0.95
YP-PE	2700	120	5	0.97
POLpropilen	552-759	3.5	25	0.90
Pamuk-Yün	414-621	6.9	10-25	1.5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0.6	2.7

Karbon lif, cam lifi ve elik lifi gibi elastisite modülü yüksek olan lifler, polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil-alkol (PVA) gibi elastisite modülü düşük olan liflere göre daha gevrek davranış sergilediklerinden kompozitin dayanım ve tokluğunu daha çok geliştirmektedirler. Bununla birlikte, elastisite modülü düşük lifler, kompozitte çatlamaya karşı direnci artırarak sünekliği sağlamaktadırlar (Kawamata vd. 2003; Lawler vd. 2005).

En çok kullanılan lif tipi çeliktir. Bu durum, çeliğin beton ile iyi uyum göstermesi, popülerliği, kullanım kolaylığı ve tokluğunun yüksek olması ile ilgilidir (Holschemacher vd. 2010). elik lif takviyesi ile ilgili yapılan çalışmalarda, tünel segmentlerinde geleneksel elik donatı talebini azalttığı, sünekliği ve çekme dayanımını iyileştirdiği, inşaat süresini kısalttığı görülmüştür. Bununla birlikte, geleneksel betonarme tünelle kıyaslandığında, elik liflerin çatlak yayılımını kontrol ettiği ve sürekli yüksek sıcaklığa maruz kalma durumlarında betonun performansını geliştirdiği bulunmuştur (Yan vd. 2013). Buna ilaveten, uzun ve kancalı uçlu elik liflerin, KYB'nin yarmada çekme dayanımı ile birlikte işlenebilirliğini de olumlu yönde etkilediği bulunmuştur (şahmaran ve Yaman, 2007).

PVA lifleri diğer sentetik liflere göre daha yüksek elastisite modülüne ve dayanıklılığa sahiptir ve çatlak ilerlemesine karşı çok etkilidirler. Hatta, PVA lifinin üretim safhasında yüzeylerine uygulanan deformasyonlarla lif-matris aderansı daha çok geliştirilebilmektedir (Horikoshi vd. 2005). PVA lifi kullanılarak yapılan çalışmalarda, PVA lifinin lifsiz betona göre eğilme dayanımını ve enerji yutma kapasitesini oldukça arttırdığı bulunmuştur (Uğur, 2007).

2.2.3. Liflerin kullanım şekilleri

2.2.3.1. Tek tip lif takviyesi

Genellikle, betonlara uygulanan lif takviyesinde tek tip lif bulunmaktadır. Lif içeren betonun karakteristiği, kullanılan lifin özelliklerine ve hacimsel oranına bağlıdır. Liflerin beton içerisindeki en önemli rolü, çatlakların arasını köprüleyerek çatlak genişlemesini ertelemek ve böylece süneklik sağlamaktır. Bununla beraber, betonda oluşan göçme çok ölçekli ve aşamalı bir süreçtir. Yüke maruz betonda önceden oluşan mikro çatlaklar büyümekte ve birleşerek makro çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Makro çatlaklar ise yayılmakta ve ani göçme olmaktadır. Beton göçmesinin çok ölçekli ve aşamalı doğası, bir lifin şekil değiştirmenin meydana geldiği sınırlı bölge içinde ve sadece bir seviyede etkili

olabilmesini gerektirmektedir (Banthia ve Soleimani, 2005). Tek tip lif ilave edilen karışımlarda ise betonun sadece tek ölçekte çatlak bölgeleri korunmaktadır.

2.2.3.2. Karma lif takviyesi

Tek tip lif takviyesi olan betonda, betondaki göçmenin çok ölçekli ve aşamalı olmasından dolayı, kullanılan tek lif tipi sadece sınırlı bir alanda etkisini göstermekte ve dolayısıyla uygun performansa ulaşamamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, betonun malzeme özelliklerini en etkili şekilde kullanmak ve elemanların mekanik performansını iyileştirmek için değişik boyutları, işlevleri ve yapısal tepkileri olan lif kombinasyonları kullanılmaktadır. Bunu başarmak için geleneksel beton matrisi ile birden fazla süreksiz lif tipinin birleşiminden oluşan lif takviyesi olan betona karma lif takviyeli beton denilmektedir (Ganesan vd. 2014; Issa vd. 2011). İlk olarak Rossi vd. (1987) tarafından betona farklı tip çelik lif takviyesi uygulanmıştır ve bu malzeme çok-ölçekli lif-takviyeli beton olarak tanımlanmıştır. Buna göre, mikro düzeydeki çelik lifler mikro çatlakların büyümesini kontrol edip, çatlak köprülemesi ile yüksek çekme dayanımı sağlarken, büyük makro düzeydeki çelik lifler elemanların yük taşıma kapasitesi ve sünekliğini iyileştirerek makro çatlakları kontrol etmektedir. Başka bir deyişle, yumuşak ve küçük lifler mikro çatlakların başlaması ve yayılmasını, güçlü ve büyük lifler ise makro düzeydeki çatlakları kontrol etmektedir. Bu şekilde karma lif takviyesi içeren kompozitte bir lif tipinin varlığı, diğer liflerin özelliklerini faydalı hale getirdiği için, elemanların daha gelişmiş mühendislik özellikleri ortaya çıkmaktadır (Mobasher ve Li, 1996; Akcay, 2012). Bentur ve Mindess (1990) tarafından karma lif kullanımının sağladığı avantajlar şöyle sıralanmaktadır;

- Daha rijit olan birinci tip lif nihai mukavemeti ve ilk çatlak gerilmesini iyileştirirken, daha esnek olan ikinci tip lif çatlak oluşumu sonrasında şekil değiştirme kapasitesi ve tokluğu geliştirmektedir.
- Daha kısa olan lif tipi mikro çatlakların büyümesini kontrol ederek kompozitin çekme dayanımını arttırırken, uzun olan diğer lif tipi makro çatlak yayılımını engelleyerek kompozitin tokluğunu geliştirmektedir.
- Liflerden dayanıklılığı az olan, elemanların taşınmasında kısa süreli performansı iyileştirirken, daha dayanıklı olan lif ileri yaşlardaki tokluğu ve dayanımı artırır.

Karma lif takviyeli kompozitler, farklı elastisite modülü, narinlik ve boya sahip lifler içerebilirler. Böyle farklı özellikteki liflerin karma olarak kullanılmasıyla

kompozitin eğilme performansının ne şekilde etkilendiği araştırılmıştır. Neticede, bazı lif kombinasyonlarının kullanılmasıyla sinerji olduğu bulunmuştur (Banthia ve Soleimani, 2005; Banthia ve Nandakumar, 2003). Değişik geometriye sahip ve/veya farklı orijinden liflerin ikili veya daha fazla miktarda karma olarak kullanımı, eğilme performansını yüksek oranda iyileştirmektedir. Amaç, liflerin karma olarak kullanılmasıyla, toplam performansın lif tiplerinin her birinin tek olarak sağlayacağı performansı geçmesini başarmaktır. Yani, karma sistemde bir sinerji oluşturmaktır (Mindess, 2007). Aşağıda belirtildiği gibi, birçok lif kombinasyonu kullanımıyla sinerji sağlanabilir (Xu vd. 1998);

- (a) Tepkisel esaslı karma lif kullanımı: Daha esnek özellikteki lif tipi, çatlak oluşuktan sonra bu bölgedeki şekil değiştirme kapasitesini ve tokluğu arttırırken, rijit özellikteki lif tipi, nihai dayanım ve ilk çatlak dayanımı geliştirmektedir.
- (b) Boyutsal esaslı karma lif kullanımı: Kısa olan lif tipi, mikro çatlakların başlamasını, büyümesini kontrol ederek çatlakların birleşmesini engellemekte ve dolayısıyla kompozitin çekme dayanımını arttırmaktadır. Ayrıca, bu lifler harç fazındaki ve çimento hamurundaki çatlakların da köprüleme ile birleşmesini geciktirerek bu fazdaki çekme dayanımı artışında da etkili rol oynamaktadır. Büyük olan lif tipi ise makro çatlak yayılımını önleyerek kompozitin kırılma tokluğunu iyileştirmektedir.
- (c) İşlevsel esaslı karma lif kullanımı: Kompozitin mekanik özelliklerinin iyileşmesini sağlayan lif tipi ile üretim kolaylığı olan ve taze ve erken yaş özelliklerinin gelişmesini sağlayan lif tipinin birlikte kullanılmasıdır.

2.2.3.3. Mikro ve makro liflerin davranışa etkisi

Son yıllarda, liflerin kompozitlerin davranışı üzerindeki etkilerini geliştirmek için farklı boy ve tiplerdeki liflerin karma olarak kullanılması popülerite kazanmıştır. Bu amaç doğrultusunda daha kısa ve narinliği düşük olan mikro lifler ile birlikte daha uzun ve narinliği yüksek lifler kullanılmaktadır (Rambo vd. 2014, Yap vd. 2014). Mikro ve makro liflerin bir arada kullanımında ilk olarak numunedeki çok sayıda ve rastgele oluşan mikro çatlaklar mikro lifler tarafından kuşatılmaktadır. Sonrasında, bu bölgede oluşan köprüleme sayesinde artan gerilme uzun liflere aktarılmaktadır. Bu şekilde, çatlakların birleşmesi gecikmektedir ve dolayısıyla malzemenin sünekliği artmaktadır (Blunt ve Ostertag, 2009).

Makro lif içeren harçlardaki çatlaklar, lif içermeyen harçlardakine göre benzer şekilde oluşmaktadır. Ancak, mikro lif takviyeli harçlarda maksimum yük öncesinde birleşen çatlakların genişliği daha az olmakta ve çoklu-çatlak davranışı meydana gelmektedir (Lawler vd. 2003).

Karma lif takviyeli beton ve geleneksel donatı içeren betonarme kolonlar kıyaslandığında, karma lif takviyesinin enerji yutma kapasitesi ve süneklik üzerinde önemli bir sinerjik etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Huang vd. 2015). Yüksek ve düşük elastisite modülüne sahip liflerin bir arada kullanıldığı karma lif takviyeli kompozitte, şekil değiştirme kapasitesi ve çekme dayanımında aynı anda iyileşme olması beklenmektedir. Böylece, darbeye karşı dayanıklılık sağlanabilir (Zhang vd. 2007).

2.2.3.4. Mikro ve makro liflerin taze beton özelliklerine etkisi

Hangi boyut, şekil ve malzeme özelliklerine sahip liflerin matris içerisinde daha etkili olduğunun anlaşılması için lif-beton matrisi arasındaki mekanizmayı anlamak gerekmektedir (Li ve Maalej, 1996).

Rastgele dağılmış mikro lif takviyeli hamur veya beton karışımları, agrega, su, çimento, lifler ve katkı maddeleriyle üretilmektedir. Ancak bunun iki farklı üretim şekli mevcuttur. Bunlardan birincisi, mikro lifler, agrega gibi çimento hamuru içerisine rastgele atıp karıştırılmakta ve elemanlar geleneksel donatı ile de takviye edilmektedir. İkincisinde ise, rastgele karışım içerisine dahil edilen mikro lifler direkt donatı olarak kullanılmakta, ilave olarak elemanlara başka bir donatı takviyesi yapılmamaktadır (Arısoy, 2005).

Mikro liflerin etkili oranlamasıyla tek lif olarak kullanıldığı durumlarda, alkali-silika reaksiyonu (Yi ve Ostertag, 2005), korozyon (Grubb vd. 2007) ve plastik rötre çatlağı (Naaman vd. 2005) gibi dayanıklılık özellikleri iyileştirilebileceği bulunmuştur. Ayrıca, mikro liflerin makro liflere göre işlenebilirliği daha olumlu etkilediği ve daha az hava hapsedtikleri tespit edilmiştir (Chung, 2005).

Beton içerisinde mikro lif kullanımı zordur. Çünkü, karışım içerisindeki kaba agrega, kırılma sürecinde mikro liflerin etkili olmalarını sınırlandırmaktadır. Maksimum tane boyutu daha fazla olan kaba agrega kullanımı ise sürekli arayüz bölgesini arttırmaktadır. Bu durum, arayüz bölgesi zayıf olduğundan ve çatlak oluşumu bu bölgelerde oluşup yayıldığından lif takviyesiz betonu olumsuz etkilemektedir. Sonuçta, agreganın betona ilave edilmesiyle hamur hacmi azalmakta

ve bu durumdan mikro lifler iki şekilde etkilenmektedir. Birincisi, lifler hamur fazında dağıldığından, liflerin dağılacağı alan azalmaktadır. İkincisi ise, agrega ile birlikte liflerin varlığı işlenebilirlikte azalmaya neden olmaktadır (Lawler, 2001). Standardlar tarafından beton için önerilen akıcılık, terleme ve segregasyona direnç sağlanmadan önce, yüksek yüzey alanına sahip mikro liflerin tamamen kaplanabilmesi için geniş hacimde hamura ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir.

2.2.3.5. Farklı türlerdeki liflerin kombinasyonunun incelenmesi

Karma lif kullanımının etkisinin incelenmesi amacıyla farklı türdeki liflerin kombinasyonlarının olduğu çalışmalar, çelik-PP (Qian ve Stroeven, 2000), çelik-PVA (Lawler vd. 2005), çelik-PE (Ahmed ve Maalej, 2009), PVA-PE (Yun ve Rokugo, 2012), PVA-karbon (Metaxa vd. 2011) olarak listelenebilir. Metaxa vd. (2011) tarafından yürütülen çalışmada, PVA ve karbon lifinin birlikte kullanılmasıyla çimento esaslı kompozitin tokluğunun, eğilme dayanımının ve elastisite modülünün arttığı bulunmuştur. Ahmed ve Maalej (2009) ise, çelik-PE hibridizasyonunun, çelik-PVA hibridizasyonuna göre daha yüksek sehim kapasitesiyle birlikte daha düşük eğilme dayanımına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Diğer bir sonuç olarak ise, çelik-PE liflerinin bir arada kullanımıyla maksimum yük sonrası dayanım kaybının, çelik-PVA liflerinin birlikte kullanılmasına göre daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Çelik-PP lif hibridizasyonunun olduğu karışımda, daha rijit ve güçlü olan çelik lif nihai dayanımı arttırırken, daha sünek olan PP lifi çatlak sonrasında şekil değiştirme kapasitesini ve tokluğu geliştirmiştir (Qian ve Stroeven, 2000). PVA mikro lifi ve çelik makro lifin karma kullanımıyla, çekme altında çoklu-çatlak davranışı meydana gelmiştir (Lawler vd. 2005).

Çelik ve PP lifinin karma olarak kullanıldığı betonda üstün yangın performansı oluşmaktadır (Bangı ve Horiguchi, 2011). PP lifleri yaklaşık 160-170 °C'de eridiğinden, her ne kadar kalıcı dayanımda bazı düşüşler olsa da, yangına maruz betonda PP lifinin erimesiyle beton parçalanmaya karşı direnç kazanmaktadır. Çünkü, eriyen lifler beton içerisinde yeni genleşme kanalları meydana getirmekte ve iç kanalları birleştirerek biriken su buharının bu kanallara gitmesini sağlamak ve böylece gözenek basıncı azalmaktadır (Zeiml vd. 2006; Pliya vd. 2011). Böylece, çelik lifler çatlak yayılımını azaltarak süneklik sağlarken, PP lifler betondaki parçalanmayı azaltabilirler (Rodrigues vd. 2010).

2.3.Büyük ölçekli bindirmeli ekli kirişlerin aderans dayanımı

2.3.1. Beton ve donatı arasındaki aderans ve etkileyen faktörler

Betonarmenin varlığının borçlu olduğu beton ve donatı arasındaki aderansın bu anlamda da önemi büyüktür. Bu sebeple, beton ve donatı arasındaki bu mekanizmayı etkileyen bütün faktörlerin araştırılması bilimsel anlamda gereklidir. Ayrıca, çubuk donatı ve beton arasındaki ilişki özellikle betonarme elemanlarının göçmesini tahmin etmede esastır. Özellikle bu durum çubuk donatının çevresindeki beton ile aderans ve ankraj davranışını anlamada önemlidir. Donatı ve beton arasındaki aderans dayanımının araştırıldığı bir çalışmada (Turk ve Yildirim, 2003), yaklaşık olarak $f_c' = 30$ MPa dayanıma sahip betondan üretilen dokuz büyük ölçekli kiriş test edilmiştir. Kirişlerin hepsinin çekme bölgesine iki adet donatı yerleştirilmiş olup açıklık ortasında bu çelikler bindirilmiş olarak tasarlanmıştır. Bütün deneylerde, donatı çubuk çapı değişkendir. Yapılan deneyler sonucunda, çubuk çapı arttıkça aderans dayanımı ve sünekliliğin azaldığı fakat, bununla birlikte, kirişlerin rijitliğinin (sehime karşı koyabilmesi) arttığı bulunmuştur. İki ucu birbirine birleştirilmiş durumdaki çekme donatısı ve azaltılmış su içeriğine sahip beton arasındaki aderans dayanımının çalışmasının rapor edildiği başka bir çalışmada ise (Turk vd. 2005), çekme bölgesinde aynı boya sahip iki donatı çubuğu olacak şekilde kirişler tasarlanmış ve test etmek için sabit moment bölgesinde üç farklı çapta (12, 16 ve 22 mm) çekme çeliği iki ucu birleştirilmek üzere seçilmiştir. Bütün çaplardaki donatılar için eksenel kuvveti olmayan (pozitif eğilme) üç kiriş ve eksenel kuvveti olan (birleşik eğilme) altı kiriş olmak üzere toplamda dokuz kiriş (1900x270x180 mm) test edilmiştir. Bütün donatı boyutları için, birleşik eğilmede test edilen kirişlerde sadece pozitif eğilmede test edilen kirişlerden daha yüksek aderans dayanım rijitliği elde edildiği bulunmuştur. Farklı tipteki ve dozajdaki mineral katkının, kiriş numunelerinin moment kapasitesi ve rijitliği ve kendiliğinden yerleşen beton ve normal beton içine gömülü olan çekme bindirme yapışmalı çubuğun aderans dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek için yürütülen deneysel programda (Turk, vd. 2010), farklı oranlarda uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton kirişlerin aderans dayanımı aynı boyut, çelik düzenlemesi ve yaklaşık olarak aynı su-çimento oranına sahip normal beton kirişlerle kıyaslanmıştır. Sonuçta, %5 silis dumanı ve %30 uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen betondan üretilen kiriş numuneleri 1.07 ile en yüksek normalleştirilmiş aderans dayanımına sahipken

kendiliğinden yerleşen betonda eşit ağırlıkta uçucu kül ve silis dumanının portland çimentosuyla yer değiştirmesinin donatı çubuklarının mineral katkı dozajına bakmaksızın normal betona sahip numunelerle kıyaslandığı zaman aderans dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, silis dumanı içeren kendiliğinden yerleşen betondan üretilen kiriş numunelerin diğer bütün kirişlere kıyasla daha yüksek rijitliğe sahip olduğu bulunmuştur. Karataş vd. (2010) tarafından yürütülen diğer çalışma ise farklı oranlarda silis dumanının çimento ile yer değiştirmesiyle hazırlanan dört farklı kendiliğinden yerleşen beton ve normal beton, silis dumanı içeriğinin normal beton ve kendiliğinden yerleşen beton içerisine gömülmüş çekme bindirme yapışması olan donatıların aderans dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton kirişlerde gömülü donatının aderans dayanımının normal beton kirişlerinkinden daha yüksek olurken silis dumanının %5'den %10'a çimentoyla yer değiştirme oranının artmasıyla aderans dayanımının arttığı bulunmuştur. Betonarme elemanların çekme bindirme yapıştırmasının aderans dayanımını etkileyen parametrelerden biri de bindirme boyu boyunca kullanılan enine donatıdır. Bu konu ile alakalı yürütülen deneysel programda (Mabrouk ve Mounir, 2017), donatılı betonarme kiriş test edilmiş ve parametreler enine donatının çapı ile birlikte onun şekli ve üç farklı tip beton kullanırkenki dağılımı olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, plastiklik modeli ile hasara uğratılmış beton seçilmiştir, çünkü bu model, hasar karakteristiği ile birlikte hem çekme hem de basınçta betonun bütün elastik olmayan davranışını gösterebilen niteliktedir. Analitik ve deneysel sonuçlar araştırılıp karşılaştırılmıştır.

Geleneksel betonarmede aderans ve ankraj çalışmalarıyla ilgili birçok çalışma yürütülmektedir fakat bu yönetmeliklerin pratikte uygulanması yüksek dayanımlı beton için uygun değildir. Yüksek dayanımlı betonun ankraj boyunun tasarımı için uygulanan güncel yönetmelikler sınırlıdır ve normal dayanımlı betonun deney sonuçlarından tahmin edilerek yürütülmüştür. Dolayısıyla normal dayanımlı beton ile kıyaslandığında yüksek dayanımlı betonda donatının aderans ve ankrajı nispeten daha az tutarlıdır. Bu sorun, yapı endüstrisinde yüksek dayanımlı betonun yaygın olarak kullanılması için engel oluşturmaktadır. Bu açıdan, normal ve yüksek dayanımlı betonarmenin aderans ve ankraj davranışı, onların mekanizmaları ve betonarme yapıların aderans ve ankraj davranışının gelişimini kolaylaştırmada yanıl basıncın uygulanabilirliği ile ilgili birtakım çalışmalar (Sulaiman vd. 2017)

yürütülmüştür. Bulgular, donatı çubuğu ve beton arasındaki aderans ve ankrajı başarmada sargılamanın etkili olduğunu göstermiştir fakat yanal veya çaprazlama sargıya sahip betonarmenin uzun vadeli servis ömrü ile ilgili uygun yönergeler geliştirmek için daha çok araştırmaya ihtiyaç vardır. Diab vd. (2014) tarafından normal ve yüksek dayanımlı betonun en iyi aderans gerilmesini belirlemek amacıyla yapılan çalışmada, numunelerin beton kısımlarına çekme gerilmesi uygulanarak çift çekme-çıkarma testi uygulanmıştır. En iyi tasarım aderans gerilmesini hesaplamak için denklem ve gerekli geliştirme boyu tavsiye edilmiştir. Ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton kullanmak da çekme özelliklerinin üstünlüğünden dolayı aderans dayanımındaki gelişmeyi sağlamaktadır. Çatlaklardaki liflerin köprüleme etkisi normal betona kıyasla önemli derecede aderans yarmada dayanımı geliştirmektedir. Ultra yüksek performanslı lif takviyeli betonda lif içeriğinin donatı çubuklarının çekme bindirme yapışmasının dayanımı üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada (Lagier vd. 2015), kısa bindirme boyu için, bindirme boyu boyunca bütün nervürlerin taşıyıcı hareketinin uygulanan kuvvete direnmede eşit olarak katkı sağladığını ortaya çıkarmaktadır. Ultra yüksek performanslı lif takviyeli betonun aderans performansı açıkça çatlak öncesi ve sonrası çekme kapasitesiyle alakalıdır. Lagier vd. (2016) tarafından yapılan diğer çalışmada ise, Ultra-Yüksek performanslı lif takviyeli betondaki liflerin aderans dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak için doğrudan çekme altında binmeli numunelerin testi yapılmıştır. Geniş donatı çapı (db) ve çoklu bindirme boyu ile üç lif içeriği (V_f) incelenmiştir. Hacımda $V_f = 4\%$ içeren Ultra-Yüksek performanslı lif takviyeli beton karışımı için 12 db bindirme boyunun 400 MPa akma dayanımını başarmak için yeterli olduğu bulunmuştur. Karma lif, pOLetilen ve çelik lif ve donatının, şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimento esaslı kompozitin çekme bölgesinde gömülü olan binmeli yerleştirilen güçlendirme donatısının aderans ve çatlak karakteristiği üzerindeki etkisini araştırmak için yürütülen başka bir araştırmada ise (Choi vd. 2017), monotonik ve periyodik çekme yüklemesi uygulanmıştır. Sonuçlar, bu karışımların donatının gelişim uzunluğunu (şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimento esaslı kompozit karışımların çoklu çatlak davranışı tarafından kontrol edilen yarmada göçme ile alakalı ACI 318 denklemlerinde istenildiği gibi) bindirme boyunun %60'ına kadar azaltmada etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

2.3.2 Basit eğilmeye maruz bindirmeli ekli kirişlerin aderans dayanımının hesabı

Aderans ile alakalı çok sayıda deney türü olmasına rağmen, donatı aderans dayanımının tespiti için, büyük ölçekli ve sabit moment bölgesinde çekme donatısının bindirmeli-ekli yerleştirildiği kiriş deneyinin en gerçekçi sonucu verdiği yapılan çalışmalarda anlaşılmıştır. Deneyde kullanılan kiriş numunelerin çekme donatısı genelde nervürlü demir olurken, kirişler etriyeli veya etriyesiz olarak tasarlanabilmektedir.

Çekme donatısı bindirmeli-ekli olarak yerleştirilen basit mesnetli kiriş numuneleri, orta açıklıkta sabit momentin olduğu bölgede dört noktalı pozitif eğilme ile yüklenmektedir. Sabit momentin olduğu bölgede bindirmeli olarak yerleştirilen donatıların bindirme uzunluğu, donatı akmaya başlamadan önce, aderans kırılması olacak şekilde seçilmektedir. Bu şekilde göçen kirişte bindirmeli ekli donatı maksimum kapasiteye ulaşmaktadır. Çünkü, donatı nervürleri yükleme esnasında betonu zorlamakta ve donatının etrafını saran betonda donatının eksenine dik radyal gerilmeler oluşmaktadır. Oluşan bu gerilmelerin neticesinde çok sayıda yarıma çatlağı meydana gelmekte ve böylece, donatı akmadan numune göçmektedir. Bu nedenle, aderans dayanımı, donatıda oluşan gerilme ile doğrudan alakalıdır. Donatı çubuğunda oluşan gerilme (f_s), elastik hesap yöntemi ile tamamen çatlamış kesit analizi kullanılarak bulunabilir. Bu hesapta, her numunede elde edilen maksimum yük esas alınır. Ortalama aderans gerilmesi ise, donatının toplam kuvvetinin ($A_s f_s$), bindirme uzunluğu boyunca olan donatının yüzey alanına ($\pi d_b l_s$) bölünmesiyle bulunmaktadır;

$$u = \frac{(A_s f_s)}{\pi d_b l_s} = \frac{f_s d_b}{4 l_s} \quad (2.1)$$

Ortalama aderans dayanımı, deneylerden bulunan dataların Denklem (2.1)'de yerine konmasıyla bulunmaktadır.

2.3.3 Elastik hesap yöntemi

Betonarme hesaplarında, betonun çekme gerilmesi taşımadığı kabul edilmektedir. Bu sebeple, boyutlandırma yapılırken yüklemeye maruz malzemelerin belirlenen

emniyet gerilmelerini aşmaması gerekmektedir. Kesitlerin boyutlandırılmasında, 2000 yılında yayınlanan TS 500 yönetmeliğinde Elastik Hesap Yöntemi, bir seçenek olarak kullanılabilir.

Elastik hesap yönteminde bazı temel varsayımlar yapılmaktadır. Bu varsayımlar uygunluk ve denge denklemlerinin çözümlenebilmesi ve yazılabilmesi için zorunludur. Kabul edilen varsayımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

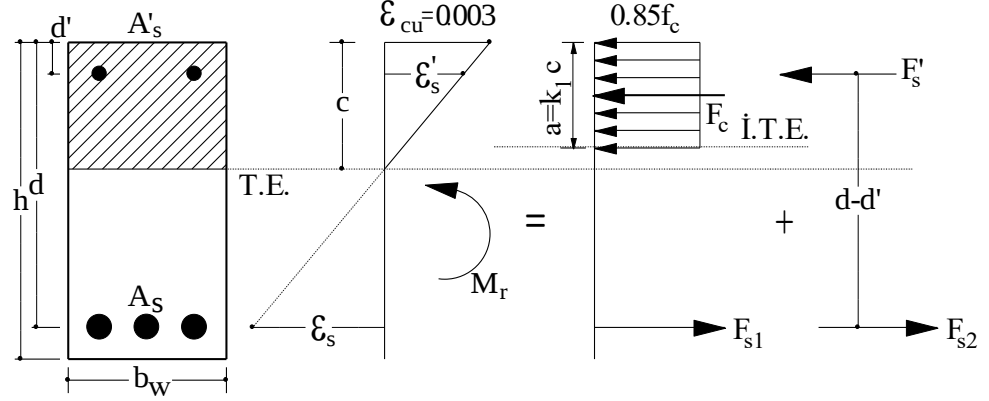
1. Bernouilli-Navier varsayımı, yani, tarafsız eksen den uzaklıklarıyla şekil değıştirmelerin, doğru orantılı olarak değıştiğı kabul edilir.
2. Çekme bölgesinde betonun tamamen çatlamış olduğı kabul edilerek, betonun çekme dayanımına etkisi ihmal edilir.
3. Donatı ve beton arasında oluşan yapışma ve aderans tamdır.
4. Çelik ve beton gerilmelerinin yayılımının doğrusal, yani, gerilme-şekil değıştirme davranışının lineer olduğı kabul edilir.
5. Beton gerilmelerinin esas alınmasıyla gerilme diyagramı çizilir. Donatının ve betonun yan yana olduğı bölgede şekil değıştirmelerin eşit olması sebebiyle, donatı gerilmeleri, beton gerilmelerinin $n = E_s / E_c$ katıdır.
6. Kesitte donatıların birkaç sıra olması durumunda, hesaplarda, bu donatıların şekil merkezinde oluşan gerilme değeri esas alınır.

2.3.4 Eğilme yüklemesine maruz çift donatılı betonarme elemanların çözümü

Kiriş kesitlerde basınç bölgesinde bulunan montaj donatısının, momentin taşınmasının üzerindeki etkisinin anlaşılması amacıyla çift donatılı kesit kullanılabilir (Şekil 2.7). Çift donatılı kesitin daha kolay boyutlandırılabilmesi için, öncelikle aynı kesitin tek donatı ile ne kadar fazla eğilme momenti taşıyabileceğini bulmak gerekir. $\rho = 0.85\rho_b$ durumuna denk gelen şekil değıştirme durumu esas alınıp çift donatılı kesitin taşıyabileceğı eğilme momenti ve buna karşılık gelen çekme donatısı hesaplanır. Geriye kalan taşınması gereken momentin karşılanması için ise basınç ve çekme bölgelerine eklenmesi gereken donatı bulunur.

Çift donatılı betonarme kesitin şekil değıştirme ve kuvvet diagramları Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Tek donatılı kesitlerin taşıma gücü hesabı ile çift donatılı kesitlerinki aynı şekilde yapılabilir. Gerilme bloğunun dikdörtgen olarak kabul edilmesiyle taşıma gücü hesaplanabilir. Kesitte oluşan basınç kuvveti, hem beton

hem de basınç donatısında oluşan kuvvetlerin toplamına eşittir. Kesitte tarafsız eksenin yeri, basınç donatısının akma gerilmesine ulaşp ulaşamayacağı belirlir. Şekil 2.7'ye göre aşağıdaki denklemler yazılabilir;



Şekil 2.7 Çift donatılı dikdörtgen kesitin şekil değiştirmesi ve oluşan gerilmeler

$$F_c = 0.85 f_c a b_w$$

$$F'_s = A'_s f'_s$$

$$F_s = A_s f_s$$

$$\sum M = 0 \quad M_r = F'_s (d - d') + F_c \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (2.2)$$

$$M_r = A'_s f'_s (d - d') + 0.85 f_c a b_w \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (2.3)$$

$$M_r = 0.85 f_c a b_w \left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s f'_s (d - d') \quad (2.4)$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{cu} \frac{c - d'}{c} \quad (2.5)$$

$$f'_s = E_s \varepsilon'_s = E_s \varepsilon_{cu} \frac{c - d'}{c} \quad (2.6)$$

(2.6) nolu denklem (2.4) nolu denklemde yerine yazılarak,

$$M_r = 0.85 f_c b_w a \left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s E_s \varepsilon_{cu} \frac{c - d'}{c} (d - d')$$

$$(0.425f_c b_w)a^3 - (0.85 f_c b_w d)a^2 + (M_r - A'_s E_s \varepsilon_{cu} (d - d'))a + (k_1 A'_s E_s \varepsilon_{cu} d' (d - d')) = 0 \quad (2.7)$$

(2.7) bağıntısı bulunur. Bu denklemde k_1 değeri aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır:

$$k_1 = 0.85 - (f_c - 25)0.006 \geq 0.7 \quad (2.8)$$

Üçüncü dereceden bir bilinmeyenli (2.7) bağıntısından bulunan a değeri ile c mesafesi

aşağıdaki gibi bulunur;

$$c = \frac{a}{k_1} \quad (2.9)$$

Elde edilen c değeriyle f'_s gerilmesi elde edilir.

$$F_s = 0.85 f_c b_w a + f'_s A'_s \quad (2.10)$$

(2.10) bağıntısından asal donatının karşıladığı kuvvet hesaplanır ve

$$F_s = f_s A_s \quad (2.11)$$

(2.11) bağıntısında yerine yazılırsa asal donatıdaki çekme gerilmesi f_s bulunabilir.

3. MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Malzemeler

3.1.1. Çimento, uçucu kül ve silis dumanı

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların hepsinde, Elazığ SEZA çimento tarafından üretilen CEM I 42.5R tipi normal Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül (UK) İsen Sugözü Termik Santralinin külüdür ve yapılan analiz sonucu F sınıfı olduğu görülmüştür (ASTM C618, 2019). Yüksek dayanım elde etmek amacıyla mineral katkı olarak uçucu kül ile birlikte silis dumanı (SD) da karışıma dahil edilmiştir. Çimento, uçucu kül ve silis dumanının özgül ağırlıkları sırasıyla 3.15, 2.45 ve 2.2 g/cm³'tür ve kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 Çimento, uçucu kül ve silis dumanı kimyasal kompozisyonları

(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	SrO	Kızdırma Kaybı
PÇ	19.41	5.58	3.67	58.85	2.12	3.16	0.69	0.61	-	-	-	-	6.07
UK	63.09	3.74	6.11	6.75	10.53	0.63	5.63	-	-	1.43	1.62	0.2	2.6
SD	94.17	-	1.01	-	1.8	0.19	1.67	-	0.11	-	-	-	1.81

Uçucu kül ve silis dumanının dayanım aktivite indeksini bulmak amacıyla pozolanik reaktivite deneyi yapılmıştır. Çizelge 3.2'de de görülebileceği gibi aynı işlenebilirliğe sahip olarak tasarlanmış uçucu kül ve silis dumanı içermeyen kontrol karışımı, sadece uçucu kül ve sadece silis dumanı içeren üç farklı karışım elde edilmiş olup, karışımların 3 ve 28 günlük dayanımları elde edilmiştir.

ASTM C618 (2019)'e göre F sınıfı uçucu kül dayanım aktivite indeksinin en az %75 olması gerekmektedir ki, proje kapsamında hazırlanacak karışımlarda mineral katkı olarak kullanılacak uçucu külde bu değer %75'den fazladır. Kullanılan uçucu külün, yapılan çalışma doğrultusunda uygun olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 3.2 Pozolanik reaktivite deneyi karışımları ve dayanım aktivite indeksi hesaplaması

Bileşen	Kontrol	UK Karışım	SD Karışım
Çimento	1	0.6	0.94
Uçucu Kül	-	0.4	-
Silis Dumanı	-	-	0.06
Su	0.30	0.30	0.30
İnce Agrega	2.5	2.47	2.54
Akışkanlaştırıcı	0.01	0.01	0.01
İşlenebilirlik Sonuçları			
Çökme-Yayılma (mm)	820	830	820
t ₅₀₀ (sn)	6	6	6
Pozolanik Reaktivite Değerleri			
Basınç Dayanımı (7gün) (MPa)	85.3	59.7	91.6
Basınç Dayanımı (28gün) (MPa)	98.9	71.6	100.9
Dayanım Aktivite İndeksi (%) (7gün)	-	75.6	107
Dayanım Aktivite İndeksi (%) (28gün)	-	76	110

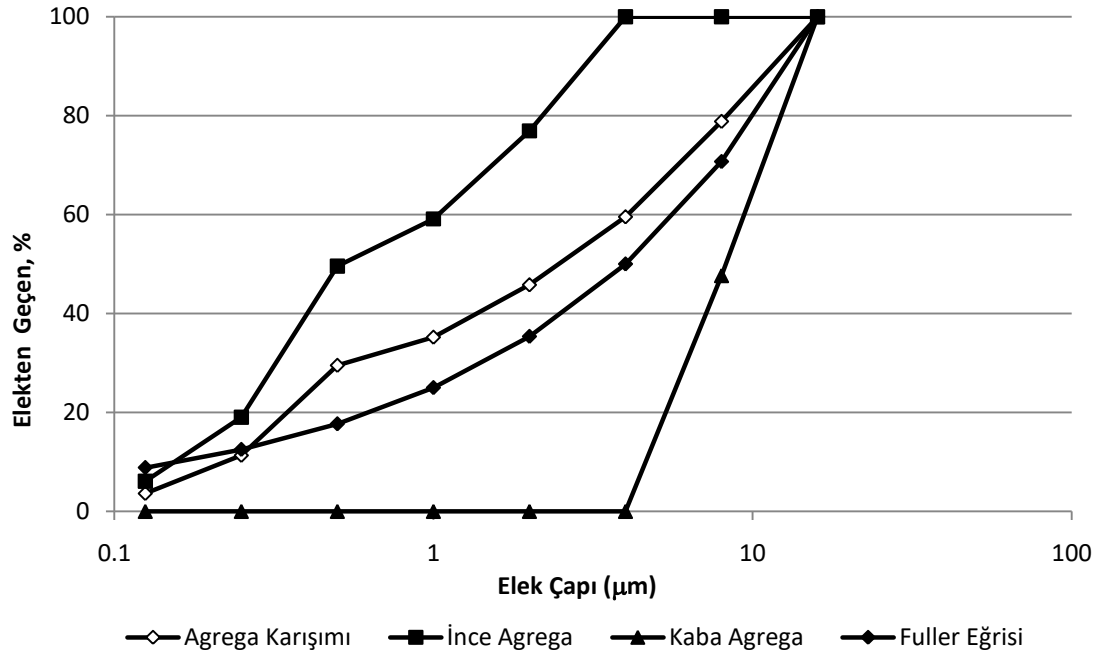
3.1.2. Agrega

Tez kapsamında bağlayıcı malzemelere (PC, UK, SD) ek olarak KYB üretiminde ince agrega ve maksimum agrega tane boyutu 16 mm olan kaba agrega olmak üzere toplam iki farklı tip agrega kullanılmıştır. İnce agreganın kuru özgül ağırlığı 2.41 g/cm³, ağırlıkça su emme kapasitesi %2.2 ve incelik modülü 2.95'dir. 0.125 mm'lik elekten geçen malzeme miktarı %6.1 olarak tespit edilmiştir. Maksimum agrega tane boyutu 16 mm olan kaba agrega yığının ise kuru özgül ağırlığı 2.67 g/cm³ ve su emme kapasitesi %1 olarak hesaplanmıştır. Deney kapsamında kullanılacak olan agrega yığınlarının tane dağılımını elde etmek amacıyla elek analizi yapılmıştır. Kullanılan elek çapları TS 706 EN 12620 (2003)'ye uygun olarak seçilmiştir.

Şekil 3.1'den de görüldüğü gibi, agrega oranını maksimize etmek, tanelerin ayrışmasını minimuma indirmek, taneler arasındaki kohezifliği artırmak, rötrenin etkisini azaltmak ve özellikle işlenebilirlik gibi taze beton açısından en önemli olan bu özelliği korumak için en uygun granülometri eğrisi seçilmiş olup, agrega yığını bu hedef doğrultusunda kombine edilmiştir. Bu tez çalışmasında sürekli granülometriye sahip agrega birleşimi elde etmek için ilgili formülü aşağıdaki Denklem (3.1)'de verilen 0.45. dereceden Fuller parabolü grafiği kullanılmıştır (Demirhan, 2017).

$$P_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^{0.45} \quad (3.1)$$

Burada P_i elekten geçen yığılımlı yüzdeyi, d_i elek analizinde kullanılan elek ebatlarını ve D ise maksimum agrega tane çapını göstermektedir. Liflerin matris içinde homojen olarak dağılılabilmesi, iri agrega etrafında topaklaşmaların minimize edilmesi ve karışımların kendiliğinden yerleşebilirliğinin arttırılması için 0-2 mm boyutunda dere kumu, Fuller parabolü gözönünde bulundurularak toplam ince agrega yığınının %64'ü oranında mevcut ince agrega yığına dahil edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Karışımlarda kullanılan agrega yığınının gradasyon eğrisi ve Fuller eğrisiyle karşılaştırılması

3.1.3. Kimyasal katkı

Liflerin işlenebilirlik üzerindeki negatif etkisini minimize etmek, su/bağlayıcı oranını düşürmek ve KYB işlenebilirlik kriterlerine uygun beton üretmek amacıyla SİKA Yapı Kimyasalları tarafından üretilen ve özgül ağırlığı 1.08 olan modifiye edilmiş pOLkarboksilik pOLmer esaslı süper akışkanlaştırıcı (SP) karışımlarda kullanılmıştır.

Tez çalışması boyunca içme suyu olarak da kullanılan Malatya şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Lifler

Tez kapsamında bir tip makro çelik lif ve üç adet farklı tip ve narinliklerde mikro lif olmak üzere toplamda dört adet lif kullanılmıştır. Mikro lif olarak farklı narinliklerde iki tip çelik lif ve sentetik liflerden Polivinil-alkol (PVA) lifi karışımlara farklı oranlarda eklenmiştir. Makro ve mikro çelik lifler Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş., PVA lifi ise Arkem Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş. işletmesinden temin edilmiştir.

Makro çelik lifin iki ucu çift kancalı olup firma tarafından 5D 65/60BG olarak adlandırılmıştır. Mikro lif olarak kullanılan çelik lifler şekil olarak düzdür, narinlikleri birbirinden farklıdır ve OL6/.16 ve OL13/.16 olarak isimlendirilmiştir. Çelik liflerin ve PVA lifin bazı özellikleri Çizelge 3.3'de ve görselleri Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Liflerin bazı özellikleri

Lif Adı	Lif Tipi	Boy (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
5D 65/60	Makro Çelik Lif	60	65	2300	210	7.8
OL 13/.16	Mikro Çelik Lif	13	87	3000	200	7.2
OL 6/.16	Mikro Çelik Lif	6	40	3000	200	7.2
PVA	Mikro Sentetik Lif	18	90	1000	27	1.3



(a) Makro çelik lif (5D 65/60)



(b) Mikro çelik lif (OL 13/16)



(c) Mikro çelik lif (OL 6/16)



(d) Mikro sentetik lif (PVA)

Şekil 3.2 Tez çalışması kapsamında kullanılan liflerin görselleri

3.2. DeneySEL Çalışma

3.2.1. Karışımların hazırlanması

Öncelikle, bu tez çalışmasında esas alınacak kaba agrega oranları için lifsiz ön araştırma karışımları denenmiştir. Bu deneme karışımlarında %50, %45, %40 ve %35 kaba agrega oranları kullanılmış olup, deneme karışımları esnasında yapılan gözlemler ve işlenebilirlik testleri sonucunda %35 üzerinde olan kaba agrega oranlarının kullanımının karma lifli KYB karışımı elde etmek için mümkün olamayacağına karar verilmiştir. Çünkü mikro (sentetik ve çelik) ve makro (çelik) lifin bir arada kullanılması, KYB karışımlarının işlenebilirlik kriterlerini zorlaştıran bir durumdur. Tez kapsamında kullanılacak olan dört farklı lif tipinin de

eklenmesiyle, lifsiz ön-deneme olarak tasarlanmış olan %35 kaba agrega oranına sahip karışım oranlarıyla da KYB için EFNARC (2002)'ın belirlediği işlenebilirlik kriterlerini sağlamada sınır bir değer olacağı öngörülmüştür. Buna ilaveten, lif hibridizasyonunun KYB'nin işlenebilirlik kriterlerini olumsuz etkileyeceği gözönünde bulundurulduğunda, karışımda daha fazla ince malzemeye ihtiyaç duyulacağı görülmüştür. Bu bağlamda, bağlayıcı miktarlarının arttırılmasına ve agrega tane dağılımının daha fazla oranda ince malzeme içerecek şekilde değiştirilmesine karar verilmiştir. Daha sonra mümkün olan en fazla kaba agrega (%35) içeren karışım karma lifli olarak dökülmüş ve yeni karışım oranları tespit edilmiştir. EFNARC (2002)'ın kendiliğinden yerleşebilirlik şartlarını sağlamak hedefiyle bağlayıcı miktarları ve ince agrega yığını içeriği arttırılmıştır. Bu amaçla, lifsiz deneme karışımlarında Portland çimentosu dozajı, uçucu kül ve silis dumanı miktarları sırasıyla 320, 220 ve 30 kg/m³ iken, sırasıyla 550, 250 ve 50 kg/m³ olarak değiştirilmiştir. Agrega tane dağılımındaki ince malzeme miktarını arttırmak amacıyla da 0-2 mm boyutunda dere kumu, toplam ince agrega yığınının %64'ü oranında mevcut ince agrega yığına dahil edilmiştir. Bağlayıcı miktarı ve agrega içeriğindeki böyle bir değişimle birlikte elde edilecek yeni karışımların hem kendiliğinden yerleşebilirliği arttırmak hem de liflerin ve özellikle sentetik lifin topaklaşmadan harç içerisinde üniform bir şekilde dağılmasını sağlamak amaçlanmıştır.

Çizelge 3.4'te de görülebildiği gibi, ön araştırma karışımlarından sonra, su/bağlayıcı oranı 0.25 olan 24 adet karma lif takviyeli yüksek dayanımlı KYB karışımları geliştirilmiştir. Karışımların hepsinin toplam bağlayıcı miktarı 850 kg/m³'tür. Kaba agrega/Toplam agrega oranı ise 0.25, 0.3, ve 0.35 olarak belirlenmiştir. Karışımlara hacimce ilave edilen toplam çelik lif oranı %1 ve sentetik lif (PVA) oranı %0.5 olarak sabit tutulmuştur. Lif kombinasyonları olarak tek ve karma (ikili, üçlü ve dörtlü) lif kullanılmıştır. Makro lif olarak tek tip çelik lif, mikro lif olarak ise farklı narinliklere sahip çelik lifler ile PVA lifi kullanılmıştır. Bütün karışımlar kendiliğinden yerleşen beton özelliğine sahip olup, bu karışımların tanımlanmasında kullanılan karışım kodlarındaki harflerin ne anlama geldiği şu şekildedir;

- KYB: kendiliğinden yerleşen beton (lifsiz)
- MAK: 5D 65/60 makro çelik lif
- 13MİK: OL 13/16 mikro çelik lif

- 6 MİK: OL 6/.16 mikro çelik lif
- P: PVA lifini sembolize etmektedir.

MAK, 13MİK ve 6MİK'dan sonra yazan rakamlar ise liflerin hacimce yüzde ne kadar oranda karışıma dahil edildiğini göstermektedir. Kodlamada PVA lifinin hangi oranda karışıma dahil edilmesinin yazılmama nedeni, PVA lifi içeren karışımların hepsinin, %0.5 oranında PVA lifi içermesidir. Tanımlamaların en sonunda yazan 0.25, 0.3 ve 0.35 ise karışımların kaba agregâ/toplam agregâ oranlarını belirtmektedir. Örneğin; MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.30 kodlu karışım, %0.8 oranında makro çelik lif, %0.1 oranında 13/.16 OL mikro çelik lif, %0.1 oranında OL 6/.16 mikro çelik lif ve %0.5 oranında PVA lif içermektedir. Ayrıca karışımın kaba agregâ/toplam agregâ oranı 0.30'tür.



Çizelge 3.4. Karışım oranları (kg/m³)

Karışım No	Karışım Kodu	Bağlayıcılar			Agrega (DYK*)		SP	Su	Lif			
		Çimento	Uçucu Kül	Silis Dumanı	(0-4)mm	(4-16)mm			Makro Lif	OL13/.16	OL6/.16	PVA
1	KYB_0.25	550	250	50	804	240	25	210	-	-	-	-
2	MAK1_0.25	550	250	50	785	234	25	211	80	-	-	-
3	MAK1_P_0.25	550	250	50	765	228	27	212	80	-	-	6.5
4	MAK0.8_13MİK0.2_0.25	550	250	50	786	234	24	211	64	16	-	-
5	MAK0.8_6MİK0.2_0.25	550	250	50	777	232	26	212	64	-	16	-
6	MAK0.8_13MİK0.2_P_0.25	550	250	50	771	230	27	212	64	16	-	6.5
7	MAK0.8_6MİK0.2_P_0.25	550	250	50	771	230	27	212	64	-	16	6.5
8	MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.25	550	250	50	770	229	28	212	64	8	8	6.5
9	KYB_0.30	550	250	50	772	283	24	213	-	-	-	-
10	MAK1_0.30	550	250	50	754	276	22	214	80	-	-	-
11	MAK1_P_0.30	550	250	50	740	271	25	214	80	-	-	6.5
12	MAK0.8_13MİK0.2_0.30	550	250	50	749	274	24	214	64	16	-	-
13	MAK0.8_6MİK0.2_0.30	550	250	50	757	277	25	214	64	-	16	-
14	MAK0.8_13MİK0.2_P_0.30	550	250	50	732	278	26	215	64	16	-	6.5
15	MAK0.8_6MİK0.2_P_0.30	550	250	50	737	279	23	215	64	-	16	6.5
16	MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.30	550	250	50	728	276	28	216	64	8	8	6.5
17	KYB_0.35	550	250	50	719	347	24	216	-	-	-	-
18	MAK1_0.35	550	250	50	699	338	22	217	80	-	-	-
19	MAK1_P_0.35	550	250	50	689	333	22	217	80	-	-	6.5
20	MAK0.8_13MİK0.2_0.35	550	250	50	697	337	23	217	64	16	-	-
21	MAK0.8_6MİK0.2_0.35	550	250	50	702	339	21	217	64	-	16	-
22	MAK0.8_13MİK0.2_P_0.35	550	250	50	681	329	26	218	64	16	-	6.5
23	MAK0.8_6MİK0.2_P_0.35	550	250	50	691	333	22	217	64	-	16	6.5
24	MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.35	550	250	50	686	331	25	218	64	8	8	6.5

*DYK : Doygun Yüzey Kuru

3.3. Deneysel Yöntem ve Uygulanan Deneyler

KYB karışımlarında küçük ölçekli numune hazırlanmasında 30 litre kapasiteli düşey eksenli laboratuvar mikseri (Şekil 3.3) kullanılmıştır. Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi, kullanılan makro ve mikro liflerin matris içerisinde topaklaşmaya yol açmayacak şekilde homojen olarak yayılması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, ilk olarak, karışım oranlarına uygun olarak tartılmış ince ve kaba agrega ile birlikte makro çelik lif mikser içerisine karışım suyunun üçte ikisi eklenerek karıştırılmıştır. İlave edilmesi gereken OL 13/16 ve/veya OL 6/16 mikro çelik lif var ise, mikser döndüğü esnada olması gereken miktarda mikro çelik lifler azar azar karışıma dahil edilmiştir. 3 dakika tamamlandıktan sonra bağlayıcılar (PC, UK ve SD) ile farklı bir kaptaki önceden karıştırılmış akışkanlaştırıcı ve karışım suyunun geriye kalan üçte birlik kısmı mikser içerisindeki malzemelere katılmış ve 7 dakika boyunca karıştırılmıştır. PVA lifi hem işlenebilirliği düşürmesi hem de topaklaşma riskinin en fazla olduğu lif olması nedeniyle karışıma en son katılan malzeme olmuştur. PVA lif içeren karışımlarda PVA lifi, mikser içerisinde hazırlanan KYB karışım akıcı kıvama geldikten sonra, liflerin birbirleriyle topaklaşmasını önlemek için mikser döndüğü esnada karışıma eklenmiştir. Yapılan ön-deneme karışımları neticesinde hacimce %0.5’den fazla PVA lifinin kullanılmasının topaklaşmaya neden olduğu ve ön karışım olmadan karma lif takviyeli KYB’de kullanılamayacağı anlaşılmıştır. Bu durumun, aynı zamanda uygulamada zorluklara sebep olacağı ve inşaat maliyetini arttıracığı düşünüldüğünde, PVA lif oranı %0.5 olarak seçilmiş ve herhangi bir ön karışım işlemine gerek duyulmadan tüm bileşenler aynı mikser içinde bir defada karıştırılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Numune hazırlanmasında kullanılan düşey eksenli mikser

Hazırlanan karışımlara Çizelge 3.5’ de belirtilen taze ve sertleşmiş beton deneyleri uygulanmıştır.

Çizelge 3.5. Karma lif takviyeli karışımlara uygulanan deneyler

Taze Beton Deneyleri	Sertleşmiş Beton Deneyleri
• Taze birim hacim ağırlığı (TBHA) • Hava içeriği • Çökme-Yayılma deneyi • J-halkalı çökme yayılma deneyi • V-hunisi deneyi	• Basınç dayanımı deneyi • Elastisite modülü • Yarmada çekme deneyi • Eğilme dayanımı deneyi • Kılcal su emme deneyi • Basınçlı su geçirimsizlik deneyi • Donma-çözülme deneyi • Kısıtlanmış rötre deneyi

3.3.1. Taze beton deneyleri

Taze beton özelliklerini tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen özellikler Çizelge 3.6’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 Taze beton deneyleri ile elde edilen özellikler

Taze beton deneyleri	Elde edilen özellikler
TBHA ve hava içeriği	
Çökme-yayılma deneyi	Yayılma çapı (D_C)
	Yayılma süresi (t_{50})
J halkalı çökme-yayılma deneyi	Yayılma çapı (D_J)
	Yayılma süresi (t_{50j})
	Yükseklik farkı (ΔH)
V hunisi deneyi	V hunisi akış süresi (V_S)

3.3.1.1. TBHA ve hava içeriği belirlenmesi

Taze betonun TBHA ve hava içeriği değerleri aynı kap içerisinde önce TBHA, ardından hava içeriği belirlenmesi şeklinde, ASTM C138 (2017) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kap 7 dm³ hacime sahiptir. Hazırlanan KYB karışımlar mikser içerisinde homojen bir şekilde alınmış olup, karışımlara kap içerisinde herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan deney gerçekleştirilmiştir. TBHA değerleri elde edilirken hassas laboratuvar tartısı kullanılmıştır. Hava içeriğini belirlemek için ise aynı kaba hava ölçer takılarak ölçüm yapılmıştır. Taze haldeki karışımların TBHA ve hava içeriği değerlerinin ölçülmesi Şekil 3.4’ de gösterilmiştir.



(a) TBHA belirlenmesi



(b) Hava içeriği ölçümü

Şekil 3.4 TBHA ve hava içeriği belirlenmesi

3.3.1.2. Çökme-yayılma deneyi

Çökme-yayılma deneyinde yayılma tablası ve Abrams hunisi kullanılmaktadır. EFNARC(2002)'ye göre yapılan deneyde, tablanın üzerine merkezden 200 mm çaplı çizilmiş daireye Abrams hunisi yerleştirilmiştir. Taze beton, mikserden homojen bir şekilde alındıktan sonra Abrams hunisine herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan ve vakit kaybetmeden doldurulur ve huni yukarı doğru kaldırılarak Şekil 3.5'den de görülebileceği gibi KYB karışımın tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. Abrams hunisi kaldırıldıktan sonra karışımın 500 mm yayılma çapına ulaşmasına kadar geçen süre kronometre yardımıyla ölçülmüştür (t_{50}). Tamamen yayılma sağlandıktan sonra karışımın iki birbirine göre dik bölgesinden çap ölçülmüştür ve ortalaması alınarak her karışımın yayılma çapı (D_c) bulunmuştur.



a) Abram's hunisi ile betonun yayılması



(b) Yayılma çapının ölülmesi

Şekil 3.5. Çökme-yayılma deneyinin yapılması

3.3.1.3. J halkalı çökme-yayılma deneyi

Şekil 3.6'dan da görülebileceği gibi çökme-yayılma ve J-halkalı çökme-yayılma deneylerinde EFNARC(2002)'de belirtildiği gibi aynı aparatlar kullanılmış olup, J halkalı çökme yayılma deney düzeneğinde ilave olarak tablanın merkezinden 300 mm çapında çizilmiş olan daireye J halkası yerleştirilmiştir. J halkasının yere basan metal ayakları arasındaki mesafe, tez kapsamında kullanılan en uzun lif yani makro elik lifin geçebilmesine olanak verecek şekilde ayarlanmış olup, bu deney düzeneği bu tez çalışmasının özgünlüğü olarak gösterilebilir.



Şekil 3.6. J-halkalı çökme-yayılma deney düzeneği

Çökme-yayılma deneyinde olduğu gibi Abram's hunisinin kaldırılıp KYB karışımının 50 cm çapa kadar yayılmasına kadar geçen süre (t_{50J}) ve yayılma apı (D_J)

ölçülmüştür. Bununla birlikte, yayılan KYB karışımların halkanın iç (H_1) ve dış (H_2) kısmındaki beton yüksekliği 3'er farklı noktadan ölçülerek ortalamaları alınmış ve iç-dış yükseklikler arasındaki fark ise yükseklik farkı (ΔH) olarak not edilmiştir.

3.3.1.4. V hunisi deneyi

EFNARC (2002)'ye göre gerçekleştirilen V hunisi deneyinin düzeneği Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Mikserden homojen olarak alınmış taze KYB karışımları V hunisi aparatına sıkıştırılmadan tamamen doldurulmuştur. 10 saniye bekledikten sonra huninin altındaki kapak açılmış ve üstten bakılarak ışığın geldiği ana kadar geçen beton akış süresi (V_s) kronometre yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir.



Şekil 3.7 V hunisi deney düzeneği

3.3.2. Sertleşmiş beton deneyleri

Üretilen karma lif takviyeli KYB karışımların mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi için Çizelge 3.7'de belirtilen testler gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla yapılan testler, numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan yaklaşık 2-3 saat sonra yani doymuş yüzey kuru haldeyken yapılmıştır.

Çizelge 3.7 Numunelere uygulanacak deneyler ve detayları

Deney Yöntemi	Numune Boyutları (mm)	Test Yaşı (gün)	Numune Adedi (Her yaş için)
Basınç Dayanımı	100x100x100 (küp)	3,28,90	3
Yarmada Çekme Dayanımı	100x200 (silindir)	3,28,90	3
Elastisite Modülü	100x200 (silindir)	28	3
Eğilme Dayanımı	100x100x400 (prizma)	3,28,90	3
Kılcal Su Emme	100x200 (silindir)	90	2
Su Geçirimsizlik	100x200 (silindir)	90	2
Donma-Çözülme	75x150 (silindir)	14	2
Kısıtlanmış Rötire	Yükseklik:150 Dış çap:406 İç çap:330 (halka)	28	2
Bindirmeli-ekli donatılı büyük ölçekli kiriş deneyi	2000x300x200 (kiriş)	90	2

3.3.2.1. Basınç dayanımı

Tez kapsamında karışımların 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını elde etmek amaçlı 100x100x100 mm ölçülerindeki küp kalıplara her yaş için 3 adet olacak şekilde toplam 216 adet numune üretilmiştir. Şekil 3.8’de de görülebileceği gibi 3, 28 ve 90 günlük numunelerin yükleme hızı 6kN/sn olarak ayarlanmış pres cihazı ile ASTM C39 (2018) standardına uygun olarak basınç testi uygulanmıştır. Her yaş için elde edilen üç farklı sonucun ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.8 Basınç dayanım testi

3.3.2.2. Elastisite modülü

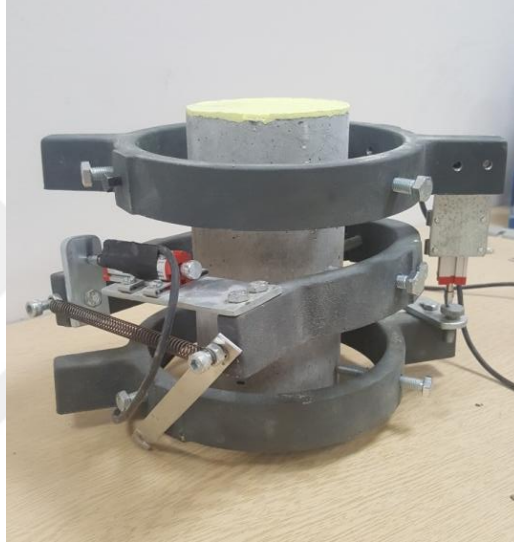
Elastisite modülü, uygulanan kuvvet altında oluşan gerilmenin, elastik sınır içerisinde meydana getirdiği şekil değiştirmeye oranıdır. Bu gerilme değerinin, geri dönüşü olmayan şekil değiştirmeye maruz kalmadan önceki elde edilen maksimum gerilme olmasından dolayıyla tasarımlarda elastik limitin çok önemli bir rolü vardır.

Karma lif takviyeli KYB karışımların elastisite modülü tespiti için 28 günlük numunelere her karışım için 3 adet olacak şekilde 100x200 mm ölçülerinde silindir numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin elastisite modülünün belirlenmesinde basınç ve yarmada çekme dayanım testlerinin gerçekleştirildiği pres cihazı kullanılmıştır ve numune yükleme hızı 1.8 kN/sn olarak ayarlanmıştır. Testler ASTM C469 / C469M-14 (2014) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, Şekil 3.9(a)'da görüldüğü gibi numuneye uygulanacak yükün, numune boyunca homojen olarak yayılması için kükürt başlık yapılmıştır. Ardından, uygulanan yükün numunede meydana getireceği deplasmanları ölçmek amacıyla numuneye yatay ve düşey deplasman ölçerler takılmıştır (Şekil 3.9(b)) ve silindir numuneler cihazın numune haznesine yarmada çekme dayanım testinde olduğu gibi yatay değil, dik olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.9(c)). Silindir numunede oluşan yatay ve düşey deplasmanlar deplasman ölçer vasıtasıyla bilgisayara aktarılarak excel programı ile yük-deplasman grafikleri elde edilmiş ve sonrasında gerilme-birim deformasyon grafikleri çizilmiştir. Maksimum gerilmenin %5 - %35 arasında kalan kısmın eğrisi kullanılarak karışımların elastisite modülü (E) değerleri belirlenmiştir.



(a) Numunelere kükürt başlık yapılması



(b) Numunelere yatay ve düşey deplasman ölçer yerleştirilmesi



(c) Numunelerin test edilmesi

Şekil 3.9 Elastisite modülü deneyi

3.3.2.3. Yarmada çekme dayanımı

Karma lif takviyeli KYB karışımların 3, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımlarının elde edilmesi için her karışımdan 3 adet 100x200 mm ölçülerinde silindirik numuneler kullanılmıştır (Şekil 3.10). Karışımların yarmada çekme dayanımları, ASTM C496 / C496M-17 (2017) standardına uygun olacak şekilde, basınç dayanımının belirlendiği pres cihazı kullanılarak tespit edilmiştir ve numune yükleme hızı 1.7 kN/sn olacak şekilde ayarlanmıştır. Numunelerin eksenli boyunca çizgisel yükü sağlamak amacıyla numunelerin alt ve üst bölümlerine aparat yerleştirilmiştir. Aynı karışımın her yaşı için elde edilen sonuçların ortalaması hesaplanmıştır.

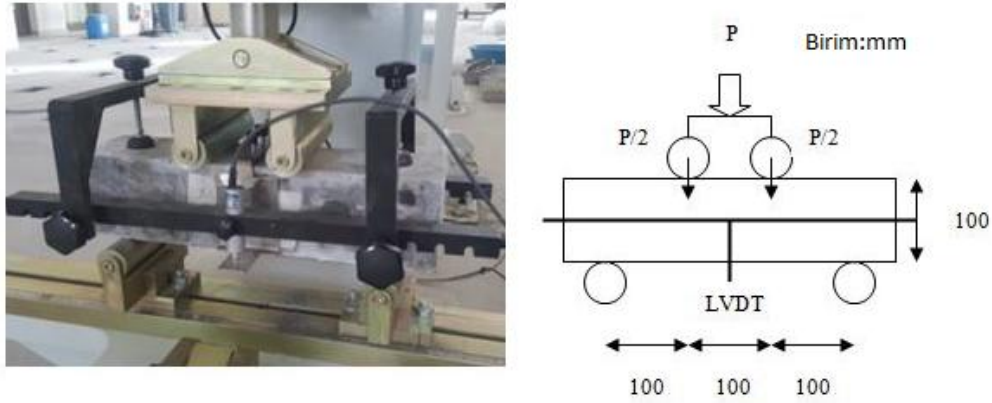


Şekil 3.10 Yarmada çekme dayanım testi

3.3.2.4. Eğilme dayanımı

Tüm karışımların 3, 28 ve 90 günlük dört noktalı eğilme parametrelerinin (eğilme dayanımı, yük-deplasman grafiği, maksimum yük, kiriş ortasındaki sehim) elde edilmesi amacıyla her karışım için 3 adet 100x100x400 mm ölçülerinde prizma numuneler üretilmiştir. Dört noktalı eğilme deneyi, Utest marka eğilme deney presi kullanılarak 0.003 mm/sn yükleme hızıyla yapılmıştır. Numunenin cihazda testi ASTM C78-02 (2002)'ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11'de de görüldüğü gibi iki mesnet arası açıklık L diye düşünülürse, numunenin üzerine

uygulanan yükler ($P/2$) arası mesafe $L/3$ olacak şekilde numunenin mesnet yerlerine karar verilmiştir. Dolayısıyla mesnetler arasındaki mesafe 300 mm olarak ayarlanmıştır. Prizmanın orta noktasındaki sehim ölçmek amacıyla deplasman ölçer (LVDT) yerleştirilmiş ve numunenin orta noktasındaki sehim 3 mm olana kadar numuneye yük verme işlemi devam ettirilmiştir. Deney esnasında sehim ve buna denk gelen yük, cihazın bağlı olduğu bilgisayar vasıtasıyla kaydedilmektedir. Elde edilen sonuçlar excel programı yardımıyla sonradan tekrar grafik haline çevrilmiştir.



Şekil 3.11 Eğilme dayanım testi ve test düzeneği

3.3.2.5. Kılcal su emme

Beton içerisinde çapı çok küçük boşluklar tarafından emilen su, kılcallık etkisiyle iç kısımlara kadar emilir ve bu durum betonda istenmeyen bir durumdur. Karışımların 90 günlük kılcal su emme değerlerinin belirlenmesi amacıyla 100x200 mm ölçülerinde her karışımdan ikişer adet silindir numuneler hazırlanmıştır ve ilk olarak, numuneleri tamamen kuru duruma getirmek için numuneler 72 saat boyunca 105°C sıcaklıktaki etüvde bekletilmiştir. Bu sıcaklığın sentetik lif yani PVA lifinin erime sıcaklığından düşük olduğu kontrol edilmiş ve bu sıcaklığın karışımların içeriği için bir sakıncası olmadığı anlaşılmıştır. Çıkarılan numuneler soğuduktan sonra numunenin alt ve üst yüzeyi açıkta kalacak şekilde yan yüzeyleri, emilen suyun dışarı çıkıp buharlaşmasını engellemek amacıyla numuneler su geçirmez bant ile tamamen kaplanmış ve tartılarak kuru numune ağırlığı olarak not edilmiştir.



Şekil 3.12 Kılcal su emme deney düzeneği

ASTM C1585 (2004) standardına uygun olarak hazırlanan deney düzeneğine göre numuneler üçgen profiller üzerine oturtulmuş ve Şekil 3.12’de görülebileceği gibi alttan 3 cm batacak şekilde kap su ile doldurulmuştur. Böylece silindir numunelerin sadece alt yüzeyi su ile temas etmektedir. Numuneleri suya bıraktıktan her 5., 10., 20., 30., 60., 240. ve 1440. dakikalarda numuneler sudan çıkartılıp nemli bir bezle alt yüzeyleri kurulanıp tartılmıştır. Böylece belirtilen dakikalara kadar numunelerin kaç gr su emdiği ve dolayısıyla Denklem 3.2’de belirtildiği gibi su emme katsayıları hesaplanmıştır.

$$k = \frac{Q}{A \cdot \sqrt{t}} \quad (3.2)$$

Burada k kılcal su emme katsayısını, Q absorbe edilen su miktarını, A su ile temas eden yüzey alanını t ise zamanı sembolize etmektedir.

3.2.2.2.6. Basınçlı su geçirimlilik

Betonda basınçlı su geçirimliliği deneyi, beton içerisinde birbiriyle bağlantılı boşluklar arasından su geçişine neden olmaktadır. Tüm karışımların 90 günlük su geçirimlilik değerlerinin tespiti için her karışımdan 2 adet olacak şekilde 100x200 mm ölçülerinde silindir numuneler hazırlanmış ve test edilmek üzere öncelikle 72 saat boyunca 105°C sıcaklıktaki etüvde bekletilerek tamamen kuru duruma gelmesi sağlanmıştır. TS EN 12390-8 (2002) standardına uygun olarak gerçekleştirilen su geçirimlilik testi için hazırlanan numuneler, soğuduktan sonra kalıbın alt tarafına

denk gelen düz yüzey tel fırça kullanılarak herhangi bir yabancı madde, toz tabakası vs. kalmayacak şekilde temizlenmiştir. Tamamen kuru numuneler tartılmış ve ardından Şekil 3.12’de gösterilen Utest beton geçirimsizlik cihazına yerleştirilmiştir. Bu esnada, numunenin düz, fırçayla temizlenmiş yüzeyinin alta gelecek şekilde koyulmasına dikkat edilmiştir. Böylece 72 saat boyunca, cihazdan gelen basınçlı suyun (500±50 kPa), herhangi bir şekilde sızma olmadan numuneye nüfuz etmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.13 Su geçirimlilik deney düzeneği

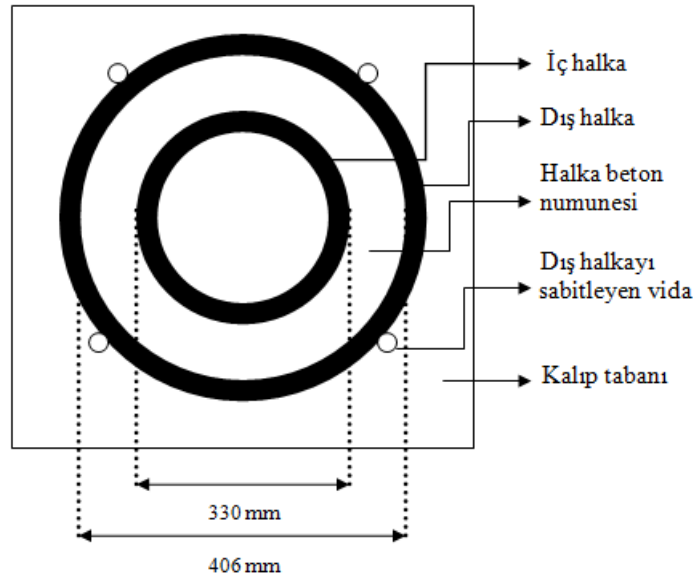
Test bitiminde numunenin basınçlı suya maruz kalan yüzeyi nemli bezle silinmiş ve tekrar tartılmıştır. Numunelerin su geçirimlilik katsayıları, Denklem (3.1)’de belirtilen Darcy kuralına göre hesaplanmıştır.

$$K = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{A \cdot P} \quad (3.1)$$

Denkleme göre; K; su geçirimlilik katsayısı, Q; debi, μ ; suyun vizkozitesi, L; numunenin uzunluğu, A; basınçlı suyun etki ettiği alan, P; basınç olarak sembolize edilmiştir.

3.3.2.7. Kısıtlanmış rötre

Karışımlara göre hazırlanmış sertleşmiş betonlarda oluşan kısıtlanmış rötre çatlakların tespiti için ASTM C1581 / C1581M-18a (2018) standardına uygun kısıtlanmış rötre deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14'den görülebileceği gibi deneyde halka şeklinde bir kalıp kullanılmıştır. İç ve dış çelik halka arasında 76 mm kalınlığında, 150 mm yüksekliğinde yüzük şeklinde beton numuneler elde edilmiştir. Karışım oranlarına göre hazırlanmış taze beton, iki halka arasına dökülüp prizini aldıktan sonra dış halka, vidaların sökülmesiyle birlikte kalıptan çıkartılmıştır. Ardından, betonun üst yüzeyinden oluşabilecek su kaybını engellemek amacıyla üst yüzey silikon ile tamamen hava almayacak şekilde kapatılmış ve numune 28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. İç halka, sertleşmiş betonda oluşabilecek rötreyi kısıtlayıcı niteliktedir. Böylece, betonda bir takım çekme gerilmeleri meydana gelmekte ve kısıtlanmış rötre çatlakları oluşmaktadır. 28 gün boyunca oluşan çatlaklar gözlemlenmiş ve mikroskop ölçüm aletiyle her gün ölçümleri yapılmıştır. Oluşan çatlakların ilk gözlemlendiği gün, çatlak genişlikleri ve çatlak sayıları kaydedilmiştir. Her çatlağın 3 farklı noktadan genişlikleri ölçülmüş ve ortalaması alınarak çatlak genişliği olarak not edilmiştir.



(a) Deney düzeneği üst görünümü



(b) Deney kalıbı



(c) Dış halkası çıkmış ve kısıtlanmış rötreye maruz bırakılan numuneler

Şekil 3.14. Kısıtlanmış rötreye deney aşamaları

3.3.2.8 Donma çözülme

Hava sıcaklığındaki değişimler beton içerisinde donma çözülme olayına neden olabilir ve bu durum betonda birtakım hasarlara yol açar. Bu hasar, beton içindeki suyun donarak genleşmesi ve betonun bu genleşmeye karşı direnç gösteremeyip çatlaması şeklinde olur. Donma çözülme döngüsünün sürekli devam etmesi ise bu tahribatı giderek artırmakta ve beton ciddi şekilde hasar görebilmektedir.

Donma çözülme deneyi için her karışımdan 2 adet olacak şekilde 75x150 mm boyutlarında silindirik numuneler hazırlanmıştır. ASTM C666 / C666M-15 (2015) standardına uygun olarak yürütülen deney için kullanılan numunelerin 14 gün kür süresi sonunda doygun yüzey kuru haldeyken ilk ağırlıkları ölçülmüştür. Numuneler Şekil 3.15’de gösterildiği gibi cihaza yerleştirilmiş ve 6 saatte +4 °C’den -18 °C’ye inen ve ardından -18 °C’den +4 °C’ye çıkan döngüye maruz bırakılmıştır. Her 30

döngü sonrasında numuneler cihazdan çıkartılıp üzerindeki beton parçaları temizlendikten sonra numunelerin doygun yüzey kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Ardından numuneler tekrar cihaza yerleştirilip test toplamda 300 döngü olana kadar devam ettirilmiştir.



(a) Numunelerin donması



(b) Numunelerin çözülmesi

Şekil 3.15 Donma çözülme deney düzeneği

3.3.3 Bindirmeli Ekli-donatılı Kiriş

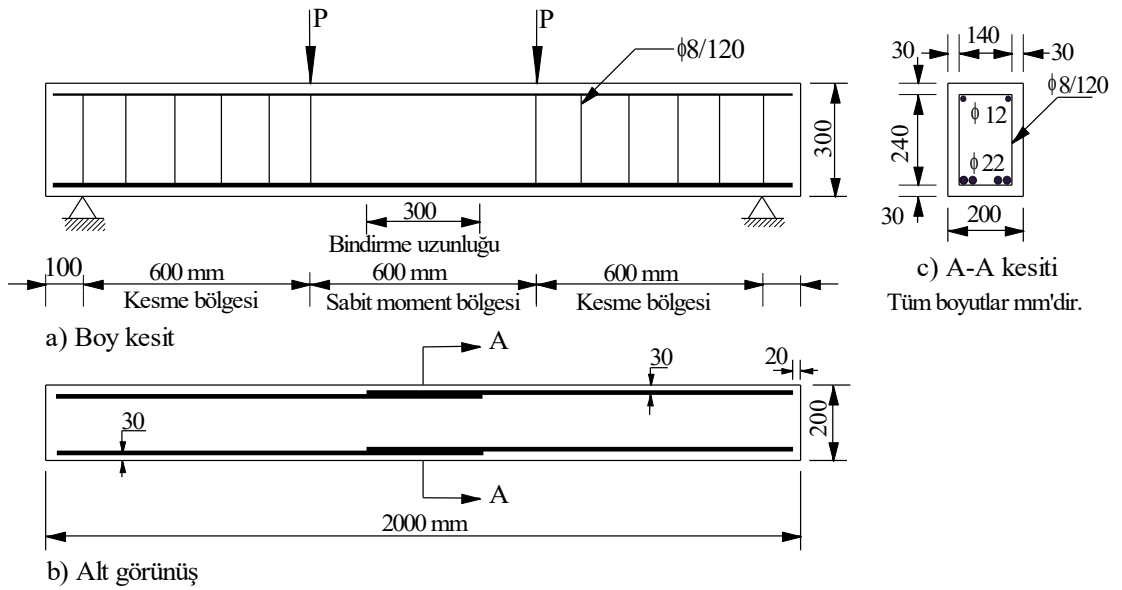
3.3.3.1 Numunelerin hazırlanması

Tez çalışması kapsamında tasarlanan karışımlar arasından KA/TA oranı 0.35 olan 6 adet karışıma ait, her karışımdan 2'şer tane olacak şekilde toplam 12 adet, tam ölçekli ve dikdörtgen kesitli bindirmeli ekli-donatılı kiriş numuneleri hazırlanmış ve

dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Şekil 3.16 ve 3.17’de görülebileceği gibi, kirişler, çekmeye maruz ve açıklık ortasında üst üste bindirilmiş iki adet $\phi 22$ nervürlü donatı çubuğu, iki adet $\phi 12$ montaj donatısı ve 12 adet $\phi 8$ kayma donatısının yerleştirilmesiyle tasarlanmıştır. Bindirme boyu, donatı akmaya ulaşmadan önce, bindirme bölgesindeki beton örtüyü yararak, aderans göçmesi olabilecek şekilde seçilmiştir. Çekme ve montaj donatısına, TS 708 (2010)’e göre çekme deneyleri yapılmış, elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.8’de gösterilmiştir. Donatı elastisite modülü değerleri ise 200000 MPa olarak alınmıştır.



Şekil 3.16. Kiriş donatısının teşkili



Şekil 3.17 Bindirmeli ekli-donatılı kiriş numunelerinin geometrik özellikleri

Çizelge 3.8 Donatı çubuklarının mekanik özellikleri

	Sınıf	ϕ (mm)	A_s (mm ²)	σ_a (MPa)	σ_c (MPa)
Montaj Donatısı	S420	12	113.1	477.4	631.6
Çekme Donatısı	S420	22	380.1	497.4	702.2

Şekil 3.16’da gösterildiği gibi bağlanan kiriş donatıları, kiriş ölçülerine göre önceden hazırlanan kalıpların içerisine yerleştirilmiştir. Karışımlar, İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında 350 litre kapasiteli betoniyer (Şekil 3.18) kullanılarak hazırlanmıştır. Taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin tayini için hazırlanan karışımlarda olduğu gibi, büyük ölçekli kiriş karışımlarında da öncelikle ince agrega, kaba agrega, makro çelik lif ve karışım suyunun üçte ikisi karıştırılmıştır. Ardından, karışım oranlarına göre ilave edilecek 13/.16 OL ve/veya 6/.16 OL mikro çelik lif var ise, mikser döndüğü esnada mikro çelikler karışıma ilave edilmiş ve toplamda 3 dakika boyunca karıştırma işlemi devam etmiştir. Sonra, bağlayıcılar (PC, UK ve SD) ile farklı bir kapta önceden karıştırılmış akışkanlaştırıcı ve karışım suyunun geriye kalan üçte birlik kısmı mikser içerisindeki malzemelere katılmış ve 7 dakika boyunca karıştırılmıştır. Eğer karışım PVA lifi içeriyorsa, KYB karışımı akıcı kıvama geldiğinde PVA lifi karışıma dahil edilmiştir.



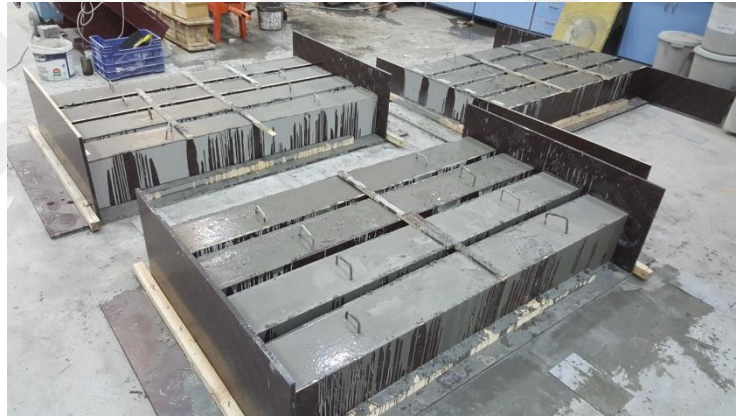
Şekil 3.18 Büyük ölçekli kiriş karışımlarının hazırlandığı 350 litre kapasiteli mikser

Hazırlanan karışımlar kendiliğinden yerleşebilirlik özelliğine sahip olduğundan herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan kirişlere dökülmüştür. Ayrıca, karışımlara ait numunelerin basınç dayanımlarının tespiti için her karışıma ait 3 adet 100x100 mm² ölçüsünde küp numuneler hazırlanmıştır. Hem kiriş hem de küp numuneler döküldükten

iki gün sonra kalıptan çıkartılıp, karışımın içerisinde puzolan olması nedeniyle 90 gün boyunca üstü çuval kumaşıyla sarılı bir şekilde naylon örtü altında kür edilmiştir. Donatısı yerleştirilmiş kiriş kalıpları, döküm sonrası görselleri ve numunelerin kür edilmesi Şekil 3.19’da verilmiştir.



(a) Donatısı yerleştirilmiş kiriş kalıpları



(b) Laboratuarda hazırlanıp dökümü tamamlanmış kirişler

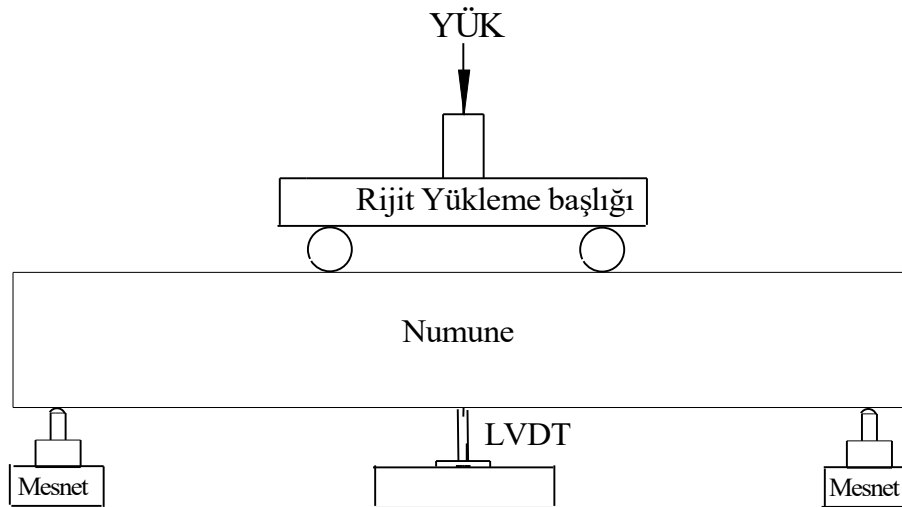
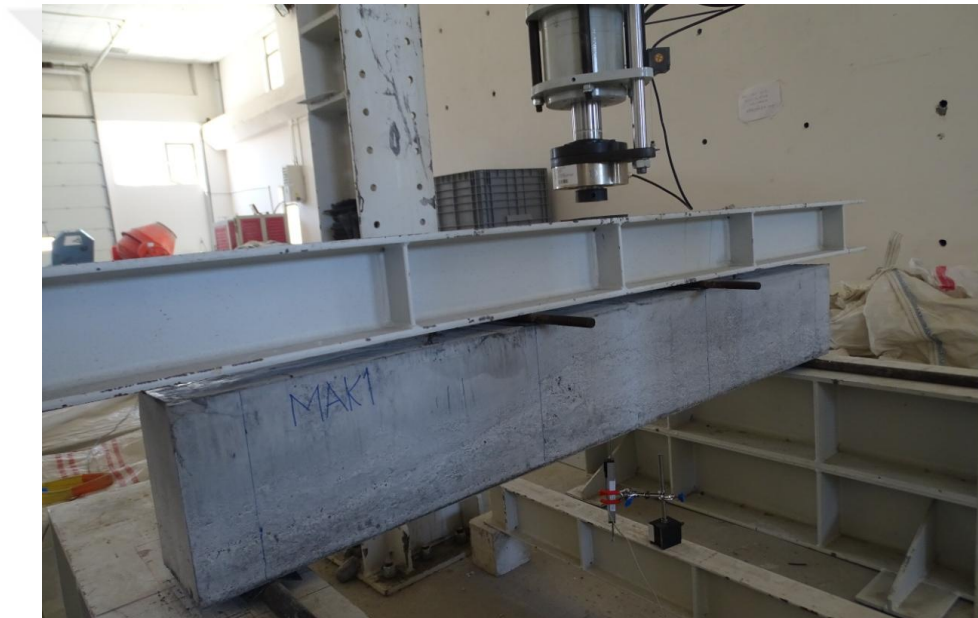


(c) Numunelerin kür edilmesi

Şekil 3.19 Bindirmeli ekli-donatılı kiriş deneyi için hazırlanan kiriş numuneleri

3.3.3.2. Deney Düzeneği

Büyük ölçekli kirişler, deney düzeneğine 1800 mm açıklığı olacak şekilde yerleştirilerek basit mesnetli kiriş olarak test edilmiştir. Numuneler, kiriş üzerine yerleştirilen rijit çelik profil vasıtasıyla eşit olarak yükün etki etmesi sağlanarak iki tekil yük ve iki mesnet olarak dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmıştır. Şehim değerleri ise, kirişin tam ortasına yerleştirilen deplasman ölçer (LVDT) kullanılarak ölçülmüş olup ihmal edilecek düzeyde oluşan mesnetteki oturmalar dikkate alınmamıştır. Yükleme hızı 1.2 mm/dak olarak ayarlanmış olan testte, lifsiz KYB karışımına ait numunelerin deney süresi 10-15 dakika sürerken, lifli KYB karışımlarına ait numunelerin deneyleri 15-20 dakika arasında tamamlanmıştır. Şekil 3.20’de dört noktalı eğilmeye maruz kirilerin deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 3.20 Büyük ölçekli kirişlerin dört noktalı eğilme testi ve deney düzeneği

Deneyler kiriş numuneleri 25 mm orta açıklık sehimine ulaşınca sona erdirilmiştir. Oluşan çatlaklar ise, daha belirgin olarak gözlemlenebildiğinden, kirişin maruz kaldığı yükleme kaldırılmadan çizilmiştir (Şekil 3.21). Böylece yükleme sonunda oluşan mikro düzeyde çatlaklar da daha belirgin bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.21 Eğilme yüklemesine maruz büyük ölçekli kiriş numunelerin çatlak çizimi

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Taze Beton Özellikleri

Tez kapsamında tasarlanan lifsiz, tek lifli ve ikili, üçlü ve dördü lif kombinasyonlarının içerdiği karışımların taze beton özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

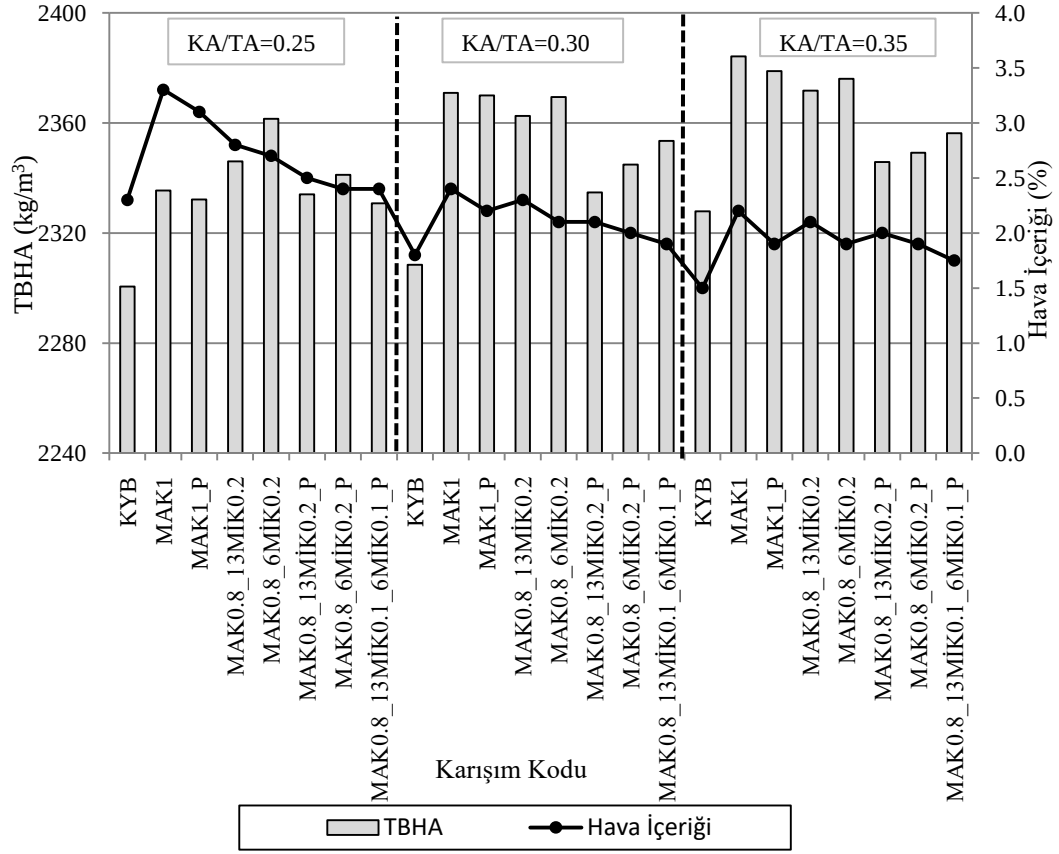
4.1.1 Taze beton birim hacim ağırlığı ve hava içeriği

Üretilen KYB karışımların taze birim hacim ağırlığı ve hava içeriği değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Lifsiz karışımlara bakıldığı zaman KA/TA oranının artmasıyla birlikte TBHA değerleri artmıştır. Buna neden olan iki durum olduğu düşünülmektedir. Bunlardan birincisi, kaba agreganın özgül ağırlığının (2.67 g/cm^3) ince agreganın özgül ağırlığından (2.41 g/cm^3) fazla olmasıdır. Diğer bir neden olarak ise, kaba agrega oranının artmasıyla birlikte karışımların hava içeriği miktarının azalması gösterilebilir. Bahsedilen bu durum, tekli, ikili, üçlü ve dördü lif hibridizasyonun olduğu karışımlar için de geçerlidir. Genel olarak bakıldığında aynı lif kombinasyonuna sahip ancak KA/TA oranı farklı karışımların hepsinde kaba agrega oranının artmasıyla birlikte TBHA değerleri yükselme ve hava içeriği değerleri ise düşme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 4.1’den de görülebileceği gibi ince agrega miktarı en fazla olan ($\text{KA/TA}=0.25$) karışımların hava içeriği oranları en fazla olmakla birlikte, TBHA değerleri de kaba agrega miktarının daha fazla olduğu ($\text{KA/TA}=0.30$ ve 0.35) diğer iki gruba göre daha düşüktür.

Karışımlar birlikte değerlendirildiği zaman, en yüksek TBHA değeri KA/TA oranı 0.35 olan ve sadece makro çelik lif içeren karışımda, en düşüğü ise KA/TA oranı 0.25 olan lifsiz KYB’de gözlemlenmiştir. KA/TA oranı 0.25 olan ve sadece makro çelik lifli karışımda en yüksek, KA/TA oranı 0.35 olan lifsiz KYB’de de en düşük hava içeriği miktarı ölçülmüştür.

Çizelge 4.1 Taze beton deney sonuçları

Karışım No	Karışım Kodu	TBHA (kg/m ³)	Hava İçeriği (%)	Çökme-Yayılma		J-Halkalı Çökme-Yayılma			V _f (sn)
				D _C (mm)	t ₅₀ (sn)	D _J (mm)	t _{50J} (sn)	ΔH (mm)	
1	KYB_0.25	2301	2.3	780	4	780	4	0.5	9
2	MAK1_0.25	2335	3.4	750	5	735	6	4	17
3	MAK1_P_0.25	2332	3.1	730	7	700	10	7.3	18.5
4	MAK0.8_13MİK0.2_0.25	2346	2.8	746	6	730	9	5	15
5	MAK0.8_6MİK0.2_0.25	2361	2.7	772	4	760	8	3.3	13.5
6	MAK0.8_13MİK0.2_P_0.25	2334	2.5	705	7	700	7	9	16.6
7	MAK0.8_6MİK0.2_P_0.25	2341	2.4	748	6	725	8	4.3	15
8	MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.25	2331	2.4	715	7	705	10	5.3	15
9	KYB_0.30	2308	1.8	768	5	755	5	1.9	11
10	MAK1_0.30	2371	2.4	740	6	723	7	4.6	20.5
11	MAK1_P_0.30	2370	2.2	710	8	700	10	8.6	20
12	MAK0.8_13MİK0.2_0.30	2363	2.3	733	7	715	6	7.3	17
13	MAK0.8_6MİK0.2_0.30	2369	2.1	750	6	735	7	5	14.7
14	MAK0.8_13MİK0.2_P_0.30	2335	2.1	690	9	695	10	11	19.5
15	MAK0.8_6MİK0.2_P_0.30	2345	2.0	728	7	700	8	6	16
16	MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.30	2353	1.9	700	8	690	11	7	16.8
17	KYB_0.35	2328	1.6	760	5	740	5	2	12.8
18	MAK1_0.35	2384	2.2	735	8	725	7	8	blok
19	MAK1_P_0.35	2379	1.9	690	8	685	13	9	blok
20	MAK0.8_13MİK0.2_0.35	2372	2.1	718	8	715	6	7	19.5
21	MAK0.8_6MİK0.2_0.35	2376	1.9	743	6	720	7	5	16
22	MAK0.8_13MİK0.2_P_0.35	2346	2.0	675	10	750	8	20	22
23	MAK0.8_6MİK0.2_P_0.35	2349	1.9	693	8	730	6	12	19.3
24	MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.35	2356	1.8	685	10	730	7	10	19

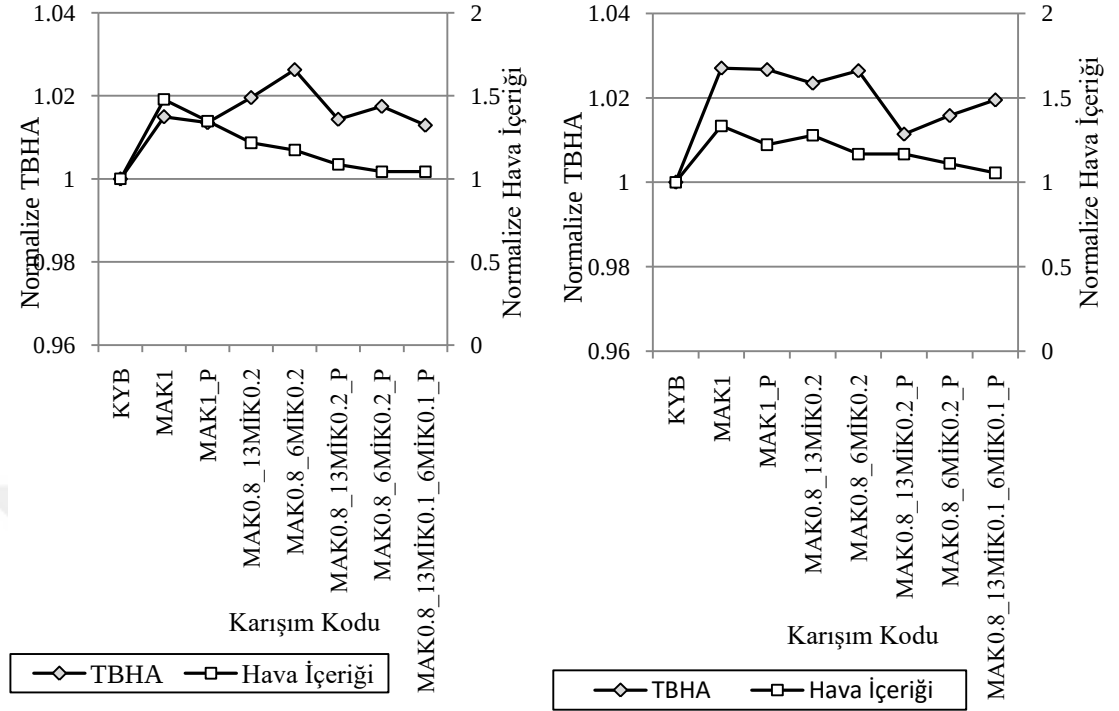


Şekil 4.1 Karışımların TBHA ve hava içeriği değerleri

Şekil 4.1'den görüldüğü gibi KA/TA oranının değişkenlik gösterdiği üç grup da kendi içinde değerlendirildiğinde, lifsiz karışımların TBHA değerlerinin diğer karışımlara göre en az olduğu görülmektedir. Bu durumun temel nedeni karışıma dahil edilen çelik liflerdir. Lifler, agregalar ile yer değiştirilerek kullanıldığından ve makro (7.8 g/cm^3) ve mikro çelik liflerin (7.2 g/cm^3) özgül ağırlığının ince ve kaba agregaların özgül ağırlığından (2.67 g/cm^3 ve 2.44 g/cm^3) daha fazla olması, lifli karışımların TBHA değerlerinin fazla çıkmasına neden olmuştur. PVA lifinin özgül ağırlığı (1.3 g/cm^3) her ne kadar agregalarınkinden düşük de olsa, PVA lifinin karışıma az oranda katılmış olması (6.5 kg/m^3) ve bu karışımlarda makro ve mikro çelik liflerin varlığı, aynı KA/TA oranına sahip lifsiz karışım ile kıyaslandığında TBHA değerinde düşüşe neden olmamıştır.

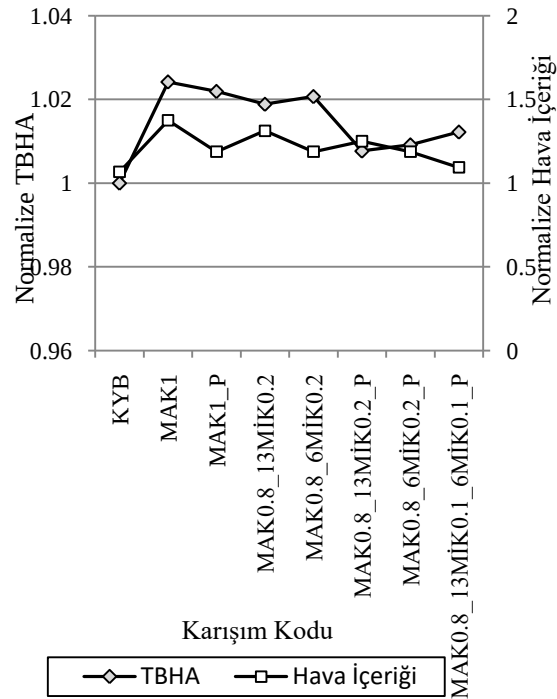
Şekil 4.2'de, KA/TA oranı sırasıyla 0.25, 0.30 ve 0.35 olan karışımların normalize TBHA ve normalize hava içeriği grafikleri gösterilmiştir. Normalize TBHA ve hava içeriği değerleri, lif içeren karışımlarda elde edilen TBHA ve hava içeriği değerlerinin, aynı granülometri grubuna ait lifsiz karışımın TBHA ve hava

içeriği değerlerine bölümü ile bulunmuştur. Dolayısıyla, lif eklenmesinin TBHA ve hava içeriğini hangi oranda etkilediği ortaya koyulmuştur.



(a) $KA/TA=0.25$

(b) $KA/TA=0.30$



(c) $KA/TA=0.35$

Şekil 4.2 Karışımların lifsiz KYB'ye göre normalize TBHA ve hava içeriği değerleri

KA/TA oranının 0.30 ve 0.35 olan karışımlarda, sadece makro çelik lif içeren karışımların normalize TBHA değeri diğer karışımlarinkine göre daha fazla iken en ince granülometriye sahip karışım grubunda bu durum farklılık göstermiştir. Aynı granülometriye sahip karışımlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde, en yüksek özgül ağırlığa sahip olması ve kullanım oranının (%1) en fazla olması nedeniyle MAK1 karışımların, TBHA değerlerinin en yüksek çıktığı düşünülmüştür. Bununla birlikte, MAK1 karışımlarında aynı granülometriye sahip lif içeren diğer karışımlara göre hava içeriğinin fazla oluşu da bu durumu tetikleyen başka bir unsur olarak görülmüştür. Makro çelik lifin uzun ve düzensiz şekli, agrega arayüzeyinde boşluklara neden olduğu ve dolayısıyla betonun hava içeriğinde artışa sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Makro çelik lifin %1 oranında kullanıldığı MAK1 karışımlarında normalize hava içeriğinin en fazla olma nedeni ise hem şeklinden dolayı boşluklara yol açması hem de Şekil 4.3'den görüleceği üzere, bu karışımlarda lif dağılımı homojen olmaması şeklinde açıklanabilir (Tüm numunelerin lif dağılım görselleri Ekler'de mevcuttur). Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, en ince granülometriye sahip karışımlara bakıldığında ise MAK1 karışımının maksimum normalize TBHA değerini vermemesi, hava içeriği oranının diğer karışımlarinkine göre çok daha fazla olmasına dayandırılabilir.



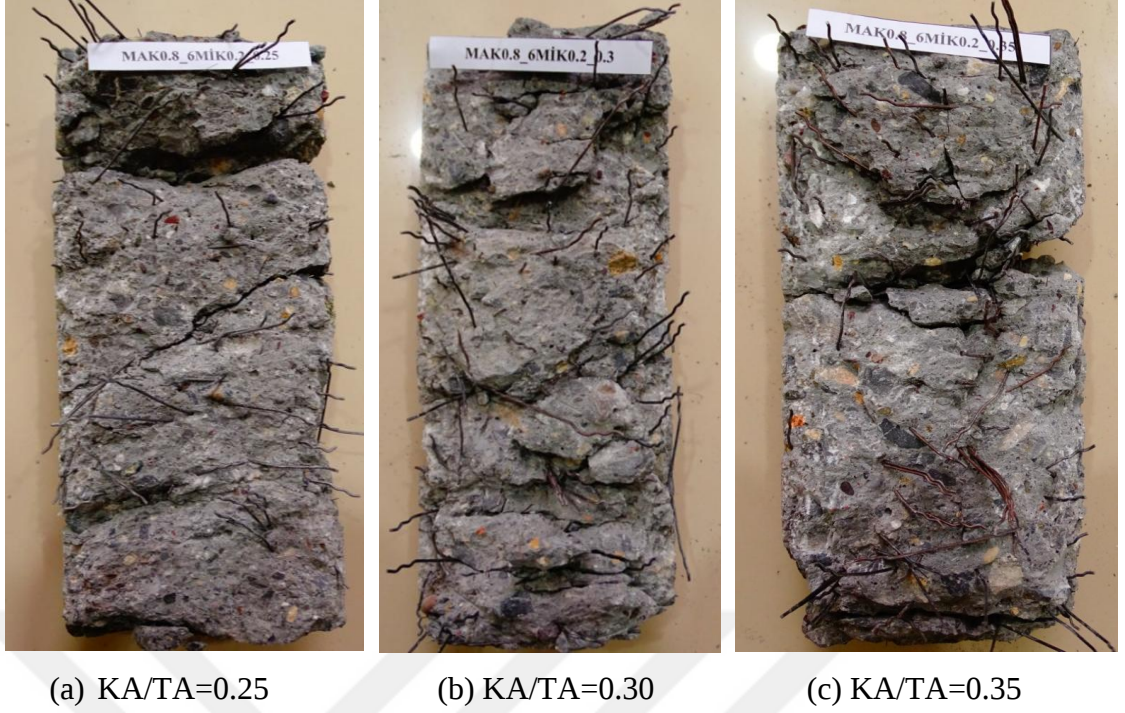
(a) MAK1_0.25



(b) MAK1_0.35

Şekil 4.3 KA/TA oranına bağlı olarak sadece makro çelik lif içeren karışımlarının lif dağılımı

Aynı granülometriye sahip karışımlarda ikili lif hibridizasyonunun etkisi karşılaştırıldığında, makro çelik lif ve PVA lifinin birlikte kullanıldığı KA/TA oranının 0.30 ve 0.35 olduğu karışımların, normalize TBHA değerlerinin makro çelik lifin etkisiyle en fazla çıktığı görülmüştür. Bunun nedeni, MAK1_P karışımında kullanılan makro çelik lif miktarının MAK0.8_13MİK0.2 ve MAK0.8_6MİK0.2 karışımlarında kullanılan makro çelik lif miktarından fazla olması şeklinde açıklanabilir. Mikro lif olarak sentetik lifin kullanıldığı MAK1_P karışımında her ne kadar PVA lifinin özgül ağırlığı düşük de olsa %1 oranında makro çelik lifin kullanılmasının, makro ve mikro çelik lifin kullanıldığı diğer karışımlara göre TBHA değerini artırmada rol oynadığı düşünülmüştür. Makro ve mikro çelik lifin birlikte kullanıldığı ikili lif hibridizasyonunda toplam lif miktarı %1 olsa da, mikro çelik lifin özgül ağırlığının makro çelik lifden az olması, normalize TBHA değerinin azalmasına neden olmuş olabilir. Buna rağmen, en ince agrega granülometrisine sahip grupta ise, MAK1_P karışımının diğer ikili lif hibridizasyonuna göre daha fazla TBHA değerine sahip olmaması, ince agrega oranı daha fazla olan bu karışımın hava içeriği miktarının kaba agrega içeriği fazla olan diğer karışımlara kıyasla çok daha fazla olması şeklinde açıklanabilir. Tüm KA/TA oranları için farklı narinliklere sahip mikro çelik lif içeren MAK0.8_13MİK0.2 ve MAK0.8_6MİK0.2 karışımları dikkate alındığında, narinliği daha az olan mikro çelik lif içeren MAK0.8_6MİK0.2 karışımların normalize TBHA değerlerinin daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu durum, MAK0.8_6MİK0.2 karışımı oluşturan liflerden makro çelik lifin azalması ve narinliği daha yüksek olan OL 13/.16 çelik life kıyasla homojen dağılıma daha fazla katkısı olan OL 6/.16 mikro çelik lifin eklenmesine ve dolayısıyla normalize hava içeriğinin daha az olmasına dayandırılabilir (Bakınız Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Makro çelik ve 6/.16 OL mikro çelik lifin ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait numunelerin lif dağılımları

Sadece makro çelik lif içeren MAK1 ile makro çelik ile birlikte mikro sentetik lif içeren MAK1_P karışımları karşılaştırıldığında, Şekil 4.2’den görülebileceği gibi, normalize TBHA değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ancak MAK1_P karışımlarının normalize hava içeriği oranının daha düşük olduğu bulunmuştur. Ayrıca, MAK1 karışımı ile diğer ikili lif hibridizasyonunun olduğu MAK0.8_13MİK0.2 ve MA0.8_6MİK0.2 karışımları kıyaslandığında ise KA/TA oranı 0.30 ve 0.35 olan karışımlarda normalize TBHA ve hava içeriği değerlerinin mikro çelik lif kullanımıyla düştüğü görülmüştür. Bu durumun, kaba agrega miktarı daha fazla olan bu karışımlarda, mikro çelik liflerin makro çelik liflere kıyasla granülometriye olumlu etkisinin sonucu olarak karışımdaki doluluk oranını artırması ile alakalı olabileceği düşünülmektedir. En ince granülometriye sahip grupta ise MAK1 karışımındaki yüksek hava içeriği nedeniyle tam tersi bir durum söz konusu olmuştur.

KA/TA oranı 0.25, 0.30 ve 0.35 olan tüm karışımlar için üçlü lif hibridizasyonu içeren karışımlarda MAK0.8_6MİK0.2_P karışımının normalize TBHA değerleri MAK0.8_13MİK0.2_P karışımından daha fazla çıkmıştır. Bu durum, narinliği daha düşük olan OL 6/.16 çelik life kıyasla homojen dağılıma olumsuz etkisi olan

OL 13/16 mikro çelik lifin eklenmesiyle hazırlanan taze beton karışım içerisinde topaklaşma eğiliminin yüksek ve dolayısıyla hava içeriğinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır (Bakınız Şekil 4.4).

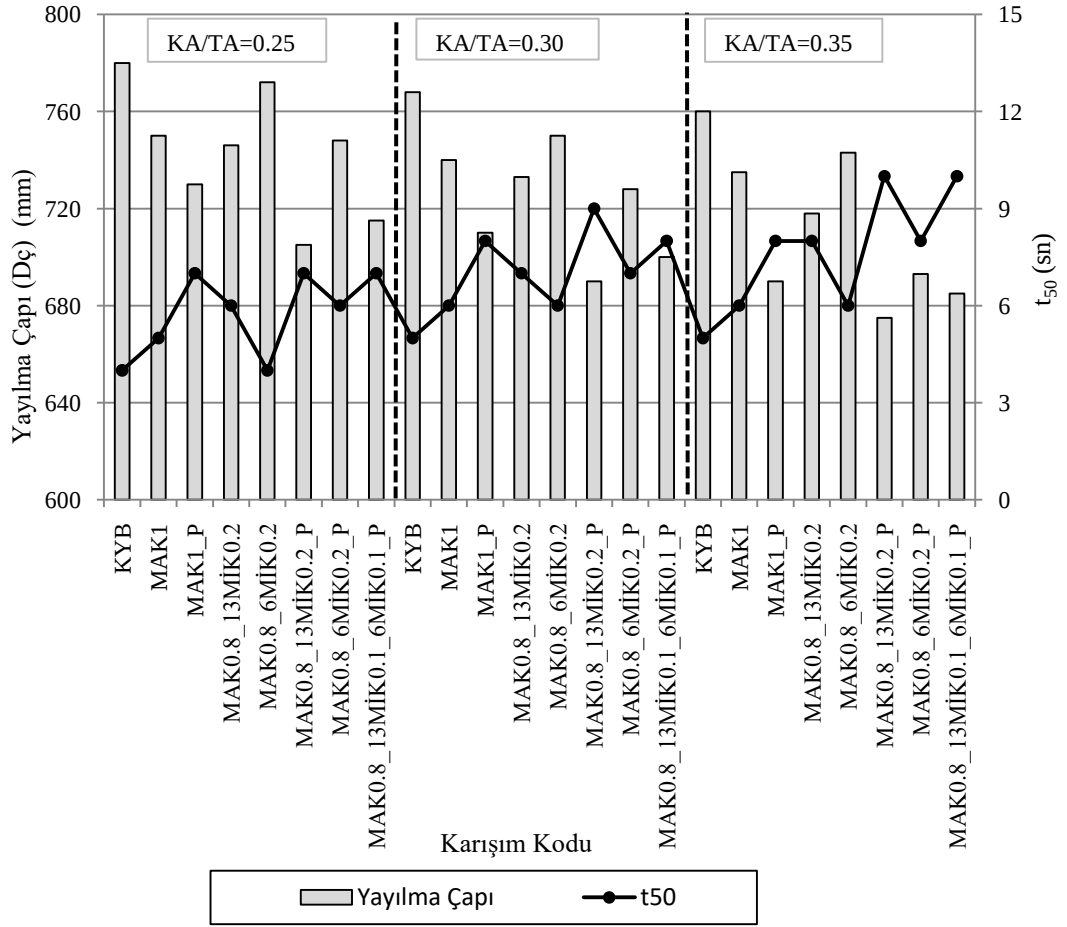
Karışımlarda mikro lif olarak sentetik lif olan PVA lifin etkisini incelemek amacıyla MAK1 & MAK1_P, MAK0.8_13MİK0.2 & MAK0.8_13MİK0.2_P ve MAK0.8_6MİK0.2 & MAK0.8_6MİK0.2_P karışımlarına bakıldığında, PVA lifin eklenmesiyle karışımlarda normalize TBHA ve normalize hava içeriği değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. TBHA değerlerinin düşmesi, PVA lifinin özgül ağırlığının düşük olmasına, hava içeriğini düşmesi ise PVA lifinin sentetik olması ve dolayısıyla, agrega arayüzeyinde kıvrılarak boşlukları doldurmada daha çok etkili olabileceğine dayandırılabilir.

Dörtlü lif hibridizasyonun kullanılması durumunda, tüm KA/TA oranları için genel olarak normalize hava içeriği oranının, OL 6/16 lifin ve PVA liflerinin yukarıda bahsedilen olumlu etkilerinden dolayı, diğer karışımlara kıyasla en düşük olduğu görülmüştür. Dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımların TBHA değerlerine gelince, KA/TA oranı 0.3 ve 0.35 olan karışım gruplarında, üçlü lif hibridizasyonuna sahip MAK0.8_13MİK0.2_P ve MAK0.8_6MİK0.2_P karışımlarından daha fazla çıkmıştır. Fakat normalize hava içeriği oranının daha fazla olması nedeniyle KA/TA oranı 0.25 olan karışım grubunda, dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımının normalize TBHA değeri daha düşük elde edilmiştir.

4.1.2 Çökme-yayılma deneyi yayılma çapı (D_c) ve yayılma süresi (t_{50})

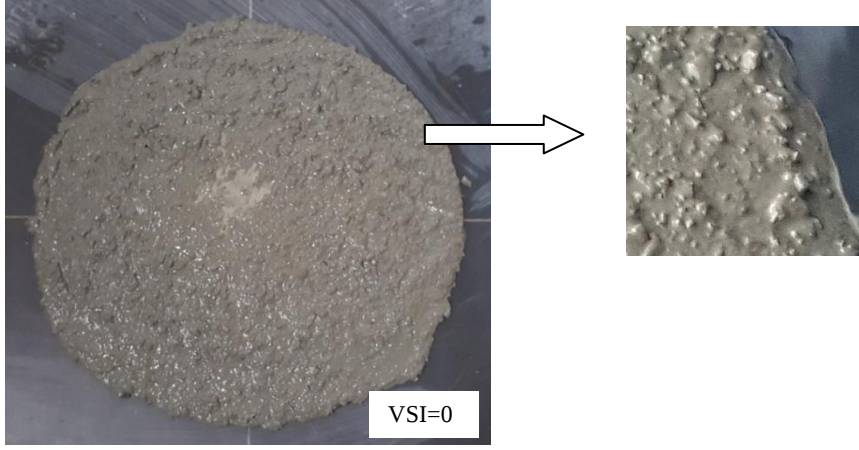
Çökme-yayılma deneyinin yapılış amacı, daha önceki bölümlerde de detaylı olarak verildiği gibi betonun akıcılığı ve vizkozitesi hakkında bilgi sahibi olmaktır. Üretilen KYB karışımların çökme-yayılma deneyinden elde edilen yayılma çapı (D_c) ve yayılma süresi (t_{50}) değerleri Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Lif içerdiği halde, tasarlanan karışımların hepsinin yayılma çapı değerlerinin 650-800 mm arasında olması, EFNARC(2002)’de belirtilen çökme-yayılma deneyi yayılma çapı kriterlerine uygun olduğunu göstermektedir. Ancak yayılma süresi (t_{50}) değerleri, lifsiz karışımlar dışında EFNARC(2002)’de önerilen aralıkta (2-5 sn) ölçülmemiş, lifin etkisiyle KYB karışımların yayılma süresi artmıştır. Ancak EFNARC (2002) işlenebilirlik kriterlerinin lifsiz KYB karışımlar için olduğunu da göz önünde

bulundurmak gerekmektedir. Yayılma süresinin (t_{50}) artması, betonun akmaya karşı gösterdiği direnç ile orantılıdır.



Şekil 4.5 Karışımların çökme-yayılma deneyi yayılma çapı ve yayılma süresi değerleri

Lifsiz karışımlar karşılaştırıldığında, agreg granülometrisindeki kaba agreg miktarı arttıkça yayılma çapının düştüğü ve buna bağlı olarak da 50 cm çapa ulaşana kadar geçen yayılma süresinin (t_{50}) arttığı ancak segregasyonun olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.6'dan da görüldüğü üzere KA/TA oranının 0.35 olduğu lifsiz karışımda bile kaba agreglar yayılan taze betonun uç kısımlarına ulaşmış ve dolayısıyla segregasyonun olmadığı görülmüştür. ASTM C1611 (2018)'e göre değerlendirildiğinde Visual Stability Index (VSI) değerinin 0 olduğu görülmüştür.



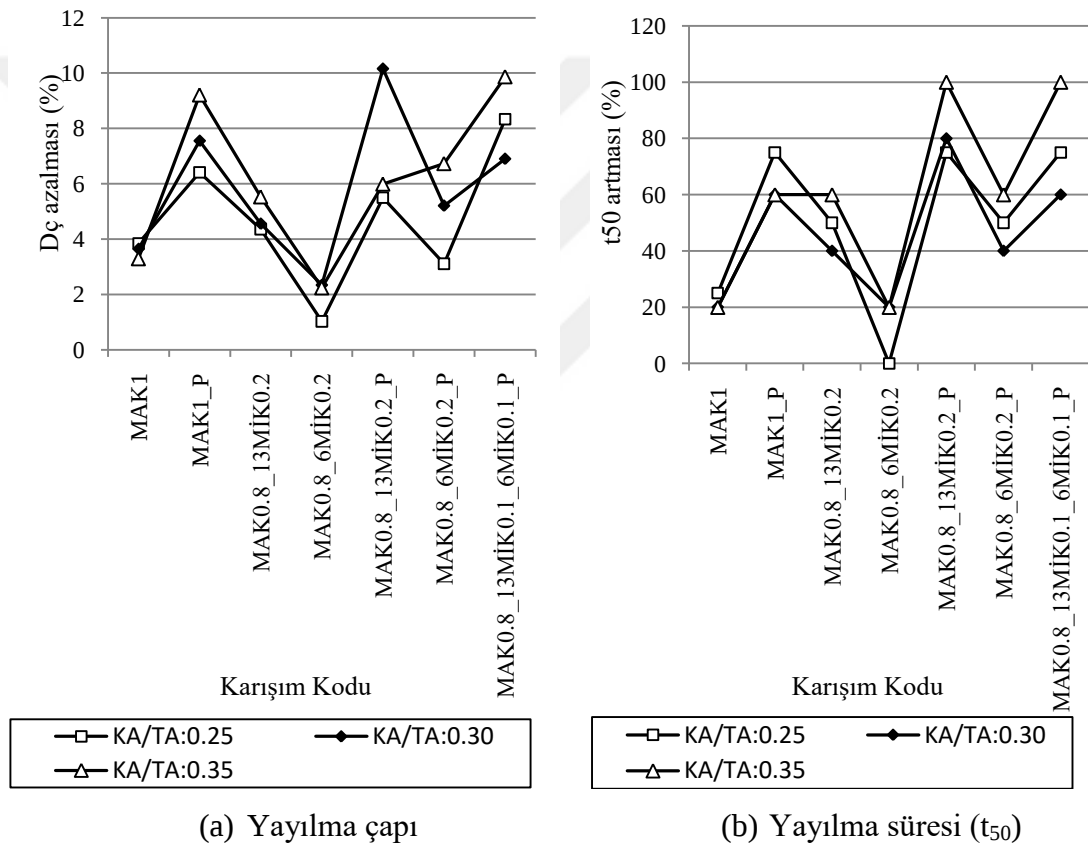
Şekil 4.6 Yayılan KYB_0.35 karışımının visual stability index bakımından değerlendirilmesi

Çizelge 3.4’de verilen karışım oranlarına bakıldığında, hem lifli hem lifsiz karışımların kaba agrega miktarının artmasıyla ince malzeme miktarı düştüğünden akışkanlaştırıcıya duyulan ihtiyaç azalmış ve dolayısıyla daha az miktarda akışkanlaştırıcıyla KYB işlenebilirlik kriterleri sağlanabilmiştir. Ancak, lif içeren karışımlarda genel olarak kaba agrega içeriğinin artmasıyla birlikte hem segregasyon eğilimi gözlemlenmiş, hem de t_{50} yayılma süresi uzamıştır. Bu durum kaba agreganın artmasıyla birlikte beton matrisinde kaba agregaları saran hamur hacminin düştüğü ve böylece betonun kendi ağırlığıyla hareket edebilme yeteneğinin azaldığı şeklinde açıklanabilir. Karışımlara lif eklenmesi de yayılma çapında azalmaya ve buna bağlı olarak da t_{50} ’de artmaya yol açmıştır. Bu ise, lif ilavesinin karışımın birim ağırlığını arttırmasına, dolayısıyla karışımındaki mevcut hamur miktarının katı bileşenleri sürüklemeye zorlanmasına dayandırılabilir. Ayrıca, Yu vd. (2014) de yaptıkları çalışmada karışıma lif eklenmesinin özgül yüzey alanını arttırması sonucu, taneler arasında oluşan sürtünme kuvvetinin betonun akıcılığını düşürdüğünü ifade etmişlerdir.

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi lif içeren karışımlarda da, lifsiz karışımlardaki gibi, kaba agrega granülometrisinin artmasıyla birlikte taze betonun yayılma çapında azalma ve t_{50} yayılma sürelerinde artma olduğu görülmüştür. Bu durum, kaba agrega miktarının artmasıyla, taze beton içerisindeki hamur hacminin azaldığı, dolayısıyla liflerin beton içerisinde hareket edecek yer bulamayıp betonun akma kabiliyetinde azalmaya sebebiyet verip yayılma süresinde de uzamaya yol açtığı şeklinde düşünülebilir. Çünkü kaba agrega içeriğinin artmasıyla birlikte, taze betonun sadece

hamur fazında yer alabilecek olan mikro liflerin dağılım alanları kısıtlanmakta, dolayısıyla hareket edecek yer bulamayan liflerde topaklanmalar meydana gelmektedir (Lawler vd. 2005).

Lif hibridizasyonlarının çökme-yayılma deneyine etkisini incelemek için, aynı granülometriye sahip karışım grupları içerisinde lifsiz karışımlara göre lifli karışımlarda meydana gelen yayılma çapı ve buna bağlı olarak t_{50} yayılma sürelerindeki değişim Şekil 4.7’de verilmiştir. Aynı granülometriye sahip karışımlar kendi içinde değerlendirildiğinde, yayılma çapı azalma yüzdelerinin t_{50} yayılma süresi artma yüzdeleriyle benzer eğilim gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.7 Karışıma lif eklenmesinin lifsiz karışımlara kıyasla çökme-yayılma testi değerlerine etkisi

Çökme-yayılma deneyinde en fazla yayılma çapı en ince granülometriye sahip lifsiz karışımda ölçülmüştür. Lifsiz karışımların hepsinin t_{50} yayılma süresi değerleri ise EFNARC(2002) tarafından önerilen süre aralığına (2-5 sn) uygundur. Tek lif olarak makro çelik lif içeren karışımların yayılma çapına bakıldığında, kaba agrega miktarı değişse bile yayılma çaplarında ve t_{50} yayılma sürelerinin genelde benzer olduğu anlaşılmıştır. Ancak, Şekil 4.8’den de görülebileceği gibi, kaba agrega

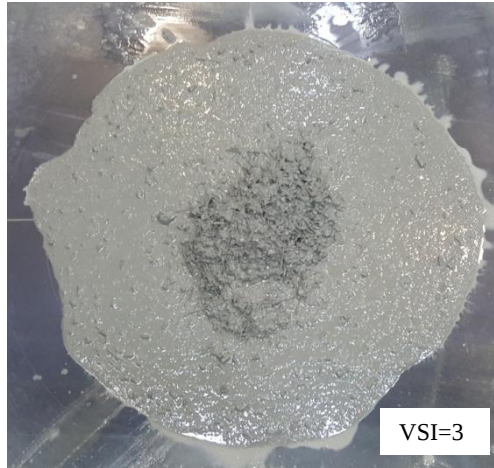
miktarının artması ile birlikte, KA/TA oranı 0.30 olan karışımda yayılan betonun orta bölgesinde segregasyon olup VSI değerlerinin 2 ancak KA/TA oranının 0.35 olduğu karışımda ise orta bölgedeki öbikleşmenin daha yoğun olması sebebiyle VSI değerinin 3 olduğu gözlemlenmiştir. KA/TA oranı 0.25 olan karışımda ise, makro çelik lifin %1 oranında kullanılmasına rağmen, lifler matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmış ve hem yayılma çapı hem de t_{50} yayılma süresi bakımından EFNARC(2002) işlenebilirlik kriterlerine uygunluk göstermiş ve VSI değerinin 0 olduğu görülmüştür.



(a) MAK1_0.25



(b) MAK1_0.30

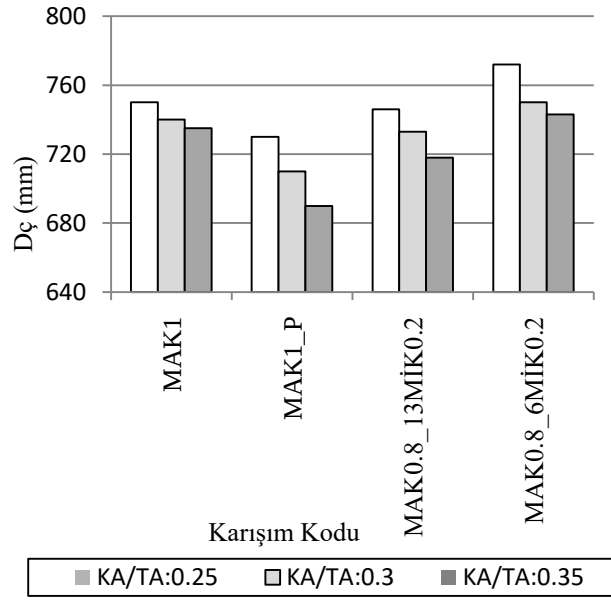


(c) MAK1_0.35

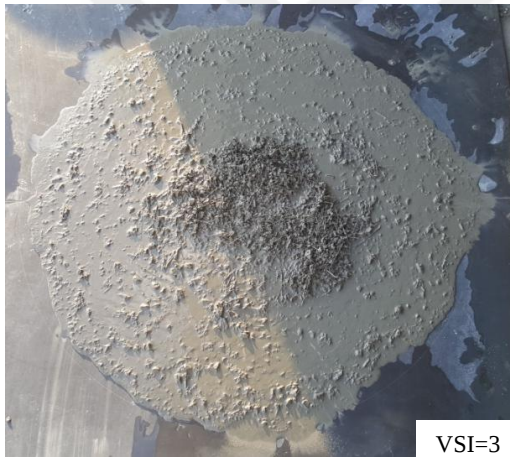
Şekil 4.8 Sadece makro çelik lif içeren karışımların çökme-yayılma deneyi görselleri

İkili lif hibridizasyonun olduğu karışımlarda mikro lif olarak kullanılan PVA, OL 13/16 ve OL 6/16 lifler arasında PVA lifinin, lifsiz karışımlara göre yayılma çapını en çok azaltan ve süresini en çok arttıran lif olduğu görülmüştür (Bakınız Şekil 4.9). Mikro sentetik lif olan PVA lifinin narinliğinin mikro çelik liflerin narinliğinden

daha fazla olması ve topaklaşma eğilimi göstermesinin yanında hidrofilik yapısının bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. Aynı agrega granülometrisine sahip gruplar kendi içinde değerlendirildiğinde, lifsiz karışıma kıyasla yayılma çapındaki en az azalma % 6.41 ile MAK1_P_0.25 karışımında görülürken, MAK1_P_0.30 ve MAK1_P_0.35 karışımlarında yayılma çapındaki azalma ise lifsiz karışıma göre sırasıyla %7.55 ve %9.21 olarak ölçülmüştür. Mikro lif olarak sentetik lif yerine çelik lifin kullanılması ise taze KYB karışımların işlenebilirliğini arttırmıştır. Bu durum, çelik lifin hidrofobik yapısına dayandırılabilir (Aydin, 2007). İkili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarda 6/16 OL mikro çelik lif içeren karışımlar, agrega granülometrisinden bağımsız olarak, en iyi akıcılığa sahip karışımlar olmuştur. Öyle ki, KA/TA oranı 0.25 olan en ince agrega granülometrisine sahip MAK0.8_6MİK0.2 karışımında yayılma süresi, lifsiz karışımın yayılma süresiyle aynı ölçülmüştür. Bu durum, 6/16 OL çelik lifinin narinliğinin diğer liflerin narinliklerinden daha az olmasına, dolayısıyla agregaların hareketlerini kısıtlamada diğer liflere oranla daha az risk oluşturmaya dayandırılabilir (Sahmaran vd. 2005). Mikro lif olarak 13/16 OL lifin olduğu MAK0.8_13MİK0.2 karışımlarında, bu lifin narinliğinin 6/16 OL çelik lifine oranla yüksek olması ve dolayısıyla kümeleşme riskinin daha fazla olması sebebiyle lifsiz karışımlara göre yayılma çapında daha çok oranda azalmaya neden olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.10(b) ve (c)'den de görülebileceği gibi, en kaba agrega granülometrisine sahip karışımda bile 6/16 OL mikro çelik lifi, taze beton içerisinde daha homojen ve segregasyona neden olmayacak şekilde dağılırken, 13/16 OL mikro çelik lifin olduğu karışıma ait çökme-yayılma testinde orta bölgede kümeleşme gözlemlenmiştir. ASTM C1611 tarafından kabul edilen VSI açısından değerlendirildiğinde, MAK0.8_6MİK0.2_0.35 karışımının VSI değeri 1 iken, MAK0.8_13MİK0.2_0.35 karışımına ait VSI değeri işlenebilirlik açısından daha olumsuz bir durumu ifade eden 2'ye karşılık gelmektedir. Bunlara ilaveten, PVA lifi içeren ve KA/TA oranı 0.35 olan karışıma ait çökme-yayılma testinde orta bölgede kümeleşmenin çok daha belirgin olması sebebiyle VSI değeri 3 olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.9 Tek lifli ve iki lifli KYB karışımlarının yayılma çapının karşılaştırılması



(a) MAK1_P_0.35



(b) MAK0.8_13MİK_0.35

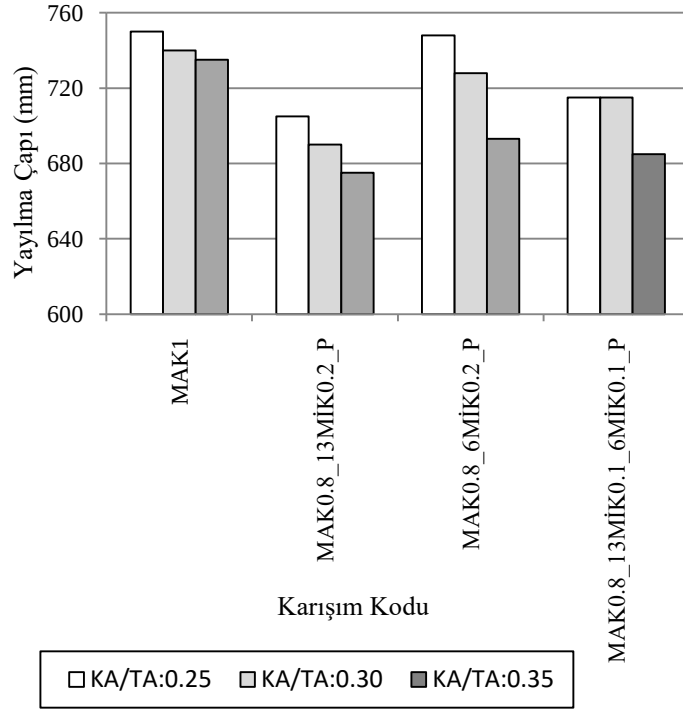


(c) MAK0.8_6MİK_0.35

Şekil 4.10 İkili lif hibridizasyonuna sahip karışımlarda PVA, 13/.16 OL ve 6/.16 OL mikro liflerin çökme-yayılmaya etkisinin karşılaştırılması

Sadece makro çelik lif içeren ve ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar karşılaştırıldığında, narinliğinin yüksek ve topaklaşma riskinin fazla olması dolayısıyla PVA lif içeren karışımın hem akıcılığı azalmış hem de t_{50} yayılma süresi artmıştır. Mikro çelik lifin olduğu karışımlara bakıldığında, her ne kadar toplam çelik lif oranı %1 olarak sabit tutulmuş da olsa, MAK0.8_13MİK0.2 karışımlarının yayılma çapında düşüş meydana gelmiştir. Çünkü, karışımda özgül ağırlığı daha yüksek olan makro çelik lif, narinliği ve özgül yüzeyi daha fazla ve özgül ağırlığı daha düşük olan mikro çelik lif ile ağırlıkça yer değiştirmiştir. Bu bulgu, karışıma daha fazla hacimde lif katılmasına ve lif yüzey alanının artmasına dayandırılabilir (Oztekin vd. 2018). MAK0.8_6MİK0.2 karışımların yayılma çapında ise sadece makro çelik lif içeren karışıma göre 6/16 OL mikro çelik lifinin narinliğinin düşük olması ve taze beton içerisinde homojen dağılması nedenlerinden dolayı sadece makro çelik lif içeren karışıma kıyasla artış meydana geldiği görülmüştür.

Üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar aynı agrega gradasyonuna sahip lifsiz karışımlarla kıyaslandığında, hem PVA hem de 13/16 OL mikro çelik lifin varlığından dolayı, yayılma çapındaki düşüş %11.18 ile en fazla MAK0.8_13MİK_P_0.35 karışımlarında meydana gelmiştir (bakınız Şekil 4.11). 13/16 OL mikro çelik lif ve PVA lifi içeren bu karışım, 675 mm yayılma çapı ile bütün karışımlar arasında hem en düşük yayılma çapına ulaşmış hem de bu karışımda 10 saniye ile lifsiz karışımın iki katı kadar t_{50} değeri ölçülmüştür. Agreg granülometrisinden bağımsız olarak yayılma çapındaki azalma ise MAK0.8_6MİK_P karışımlarında 6/16 OL mikro çelik lifin etkisiyle daha az olmuştur. Şekil 4.12’de görülebileceği gibi, KA/TA oranı 0.25 olan agrega granülometrisinde PVA lifinin varlığına rağmen MAK0.8_6MİK_P karışımının homojen yayıldığı ve buna bağlı olarak da VSI değerinin 0 olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, kaba agrega içeriğinin artmasıyla birlikte, az miktarda terleme olması nedeniyle MAK0.8_6MİK_P_0.35 karışımının VSI değeri 1 olarak değerlendirilebilir. MAK0.8_13MİK_P_0.25 karışımı ise yayılan taze betonda hemen hemen homojen bir yayılma gösterdiği için VSI değerinin 0 olduğu söylenebilir. İşlenebilirlik açısından en problemlili olan ve yayılma çapının en düşük ölçüldüğü MAK0.8_13MİK_P_0.35 karışımı ise orta bölümde kümelenme meydana geldiği için VSI değeri 3 olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.11 Tek, üç ve dört lifli KYB karışımların yayılma çapının karşılaştırılması



(a) MAK0.8_6MİK_P_0.25



(b) MAK0.8_13MİK_P_0.25



(c) MAK0.8_6MİK_P_0.35



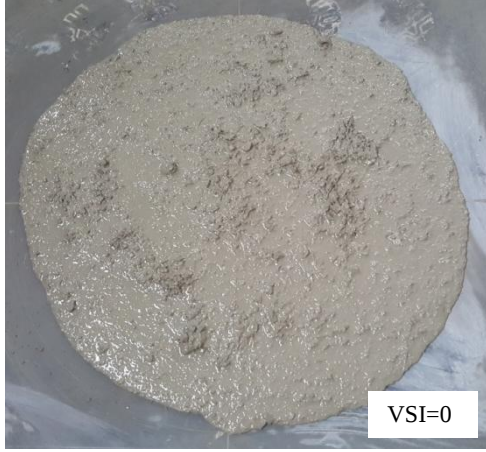
(d) MAK0.8_13MİK_P_0.35

Şekil 4.12 Üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarda çökme-yayılma deneyinin karşılaştırılması

Sadece makro çelik lif içeren karışımlar ile üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar karşılaştırıldığında, agrega içeriğinden bağımsız olarak, MAK1 karışımların yayılma çapının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. MAK0.8_6MİK0.2 karışımlarının yayılma çapı MAK1'inkinden fazla olmasına rağmen, PVA lifinin eklenmesiyle birlikte MAK0.8_6MİK0.2_P karışımlarının yayılma çapı düşmüş, t_{50} artmıştır.

Mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarla üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara bakıldığında, PVA lifinin etkisiyle yayılma çaplarında düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum PVA lifinin hidrofilik yapıda olması sebebiyle taze KYB karışımlarının su ihtiyacını arttırmasına dayandırılabilir. Karışımların hepsinin su/bağlayıcı oranı aynı olduğundan, hidrofilik yapıya sahip PVA lifinin karışımlara eklenmesiyle üçlü lif hibridizasyonuna sahip tüm karışımların çökme-yayılma çaplarında düşüş meydana geldiği düşünülmektedir. PVA lifi içermeyen ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlara kıyasla, KA/TA oranı 0.25 olan MAK0.8_13MİK0.2_P ve MAK0.8_6MİK0.2_P karışımlarının çökme-yayılma çaplarındaki düşüş sırasıyla %5.5 ve %3.11, KA/TA oranı 0.35 olan karışımların ise sırasıyla %5.99 ve %6.73 olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.11'den görüleceği gibi, dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar, aynı KA/TA oranına sahip lifsiz karışımlarla karşılaştırıldığında, yayılma çapındaki azalmanın birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, kaba agrega içeriğinin artmasıyla çökme-yayılma çapı değerlerindeki farkın arttığı görülmüştür. KA/TA oranı 0.25, 0.30 ve 0.35 olan dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlarda yayılma çapındaki azalma lifsiz karışımlara göre sırasıyla %8.33, %8.85 ve %9.87 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.13(c)'den de görülebileceği gibi, KA/TA oranının 0.35 olduğu en kaba agrega granülometrisine sahip dörtlü lif içeren karışımda az kümelenme meydana gelmiş olup VSI değeri 2 olarak belirlenmiştir. KA/TA oranı 0.25 ve 0.30 olan dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar daha homojen yayıldığından VSI değerleri 0 olarak değerlendirilebilir (Bakınız Şekil 4.13(a),(b)).



(a) MA0.8_13MI0.1_6MI0.1_PVA_0.25



(b) MA0.8_13MI0.1_6MI0.1_PVA_0.3

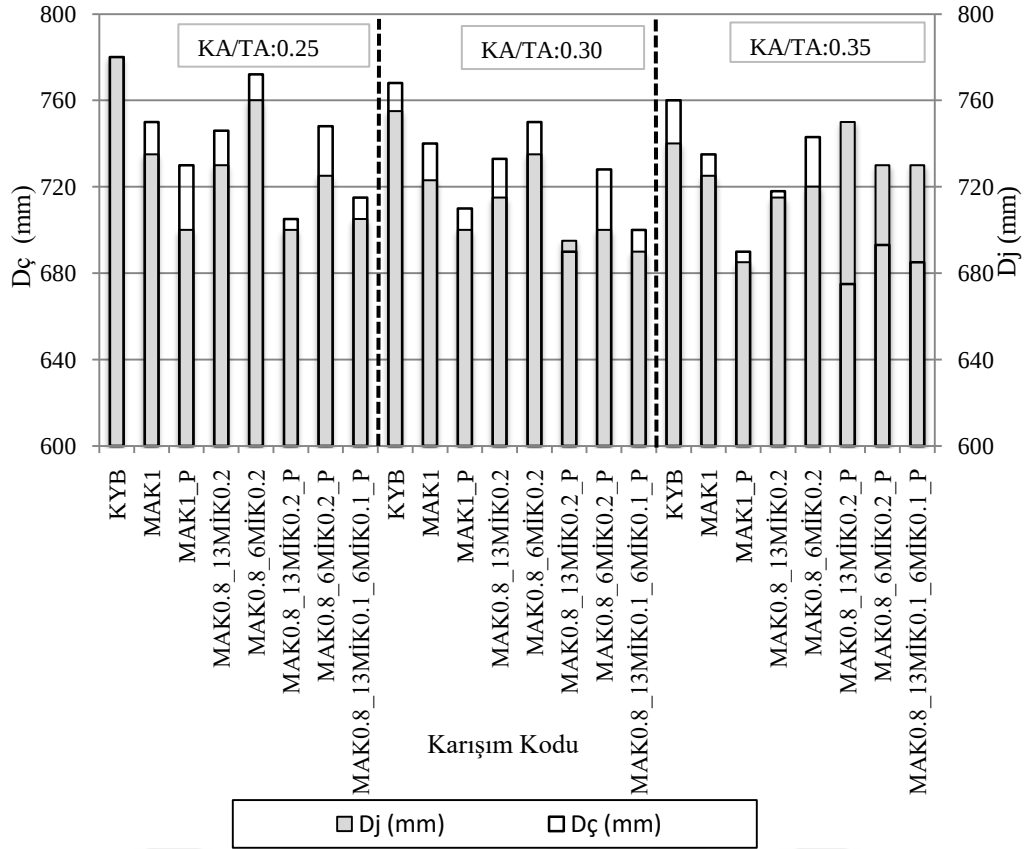


(d) MA0.8_13MI0.1_6MI0.1_PVA_0.35

Şekil 4.13 Dörtlü lif hibridizasyonu olan karışımların kaba agregaya içeriğine göre çökme yayılma deneyinde karşılaştırılması

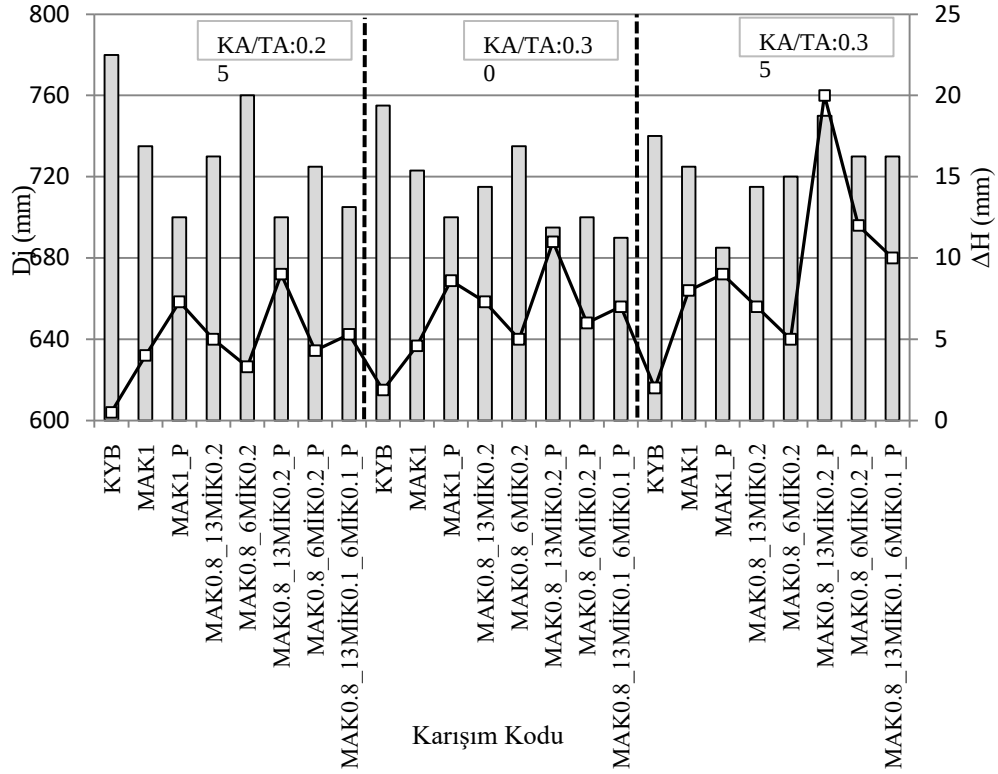
4.1.3 J Halkalı Çökme-Yayılma Deneyi Yayılma Çapı (D_J), Yayılma Süresi (t_{50J}) ve Yükseklik Farkı (ΔH)

J halkalı çökme-yayılma deneyinde taze betonun akıcılığı ile birlikte, betonun engeller arasındaki geçiş yeteneği de test edilmektedir. Burada önemli olan nokta, J halkasının 30 cm çapında yer almasıdır. Taze betonun 50 cm çapa ulaşana kadarki geçen süre ölçüldüğü için bu durumda, karşılaşılan engelin taze betonun yayılma süresine etkisinin daha iyi irdelenebileceği planlanmıştır. Buna ilaveten, EFNARC(2002) standardı lifsiz betonları için işlenebilirlik testlerini içerdiğinden bu çalışmada, J halkasındaki parmaklık aralıkları iki katına çıkartılmıştır. Deneyde elde edilen yayılma çapı ve yayılma süresi değerleri Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15 D_ç ve D_j değerlerinin karşılaştırılması

Ayrıca, lif tipi ve narinliklerinin J halkalı çökme yayılma ve t_{50j} deney sonuçları üzerindeki etkisinin, standard çökme-yayılma ve t_{50} deneylerinin sonuçları üzerindeki etkileri ile benzer olduğu tespit edilmiştir (Bakınız Şekil 4.15). Ancak J-halkalı çökme yayılma deneyinde, konulan çelik halka parmaklıkları nedeniyle KA/TA oranı 0.35 olan MAK0.8_13MİK0.2_P, MAK0.8_6MİK0.2_P ve MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P karışımları ile KA/TA oranı 0.30 olan MAK0.8_13MİK_P karışımı dışında yayılma çapında azalmalar meydana gelmiştir. Yayılma çapı değerlerindeki bu azalmaların nedeni ise, taze karışımların katı bileşenlerinin halkanın iç bölümünde çelik halka engelini aşamaması olarak düşünülebilir. Bu noktada, çelik halkanın iç ve dış bölümünde kalan taze betonun yükseklik farkının (ΔH) önemi ortaya çıkmıştır. Her ne kadar yayılma çaplarında düşüş de meydana gelse, yayılma çapları EFNARC(2002)'de belirtilen kriterlere uygun olarak ölçülmüştür. Karışımların J halkalı çökme-yayılma deneyi sonucunda elde edilen yayılma çapı ve yükseklik farkı sonuçları Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 J halkalı çökme yayılma deneyi D_j ve ΔH sonuçları

Lifsiz karışımlara ait D_ç ve D_j değerleri incelendiğinde, KA/TA oranı 0.25 olan en ince agrega granülometriye sahip karışımda ΔH değerinin 0.5 mm olmasının bir sonucu olarak, J halkalı çökme yayılma deneyinde elde edilen yayılma çapı, standard çökme-yayılma deneyindeki aynı ölçülmüştür. Kaba agrega içeriğinin artması ise yayılma çapında düşüş meydana getirmiştir. Karışımlara lif eklenmesiyle birlikte taze betonun geçme kabiliyeti düşmüş ve ΔH değerlerinde göze çarpan bir artış görülmüştür.

KA/TA oranının 0.25 ve 0.30 olduğu taze beton karışımların J halkalı çökme-yayılma deneyindeki davranışı ile KA/TA oranı 0.35 olan en kaba agrega granülometriye sahip karışımların davranışı Şekil 4.11'den de görülebileceği gibi birbirinden farklı olmuştur. Şöyle ki, KA/TA oranının 0.25 ve 0.30 olduğu karışımlara kıyasla, KA/TA oranının 0.35 olduğu karışımların genelinde, taze betonun kaba iskeleti daha çok halkanın iç kısmında kalmış olup, parmaklıklardan dışarı çıkan taze betonun daha çok ince malzemeden oluştuğu bir davranış gözlemlenmiştir.

KA/TA oranının 0.25 ve 0.30 olduğu taze KYB karışımları incelendiğinde, standard çökme-yayılma deneyinde olduğu gibi liflerin narinliklerinin sonuçları etkilediği görülmüştür. Bu bağlamda, özellikle kullanılan lifler arasında narinliği en yüksek olan PVA mikro sentetik lifinin taze betonun engeller arasında geçiş yeteneğini ciddi oranda olumsuz etkilediği görülmüştür. PVA içeren bu karışımlarda D_j değerlerindeki düşüşlerle birlikte ΔH değeri de artmıştır. OL 13/16 mikro çelik lifi de narinliği yüksek olan bir diğer liftir. Özellikle, bu çalışmada kullanılan liflerden narinlikleri yüksek olan bu iki lifin birlikte kullanıldığı karışımlarda, J-halkasının iç bölümünde karışımın kaba iskeletini oluşturan katı malzemenin daha fazla birikmesi sebebiyle ΔH değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan mikro çelik lifler arasında en düşük narinliğe sahip olan OL 6/16 lifinin beton içerisinde topaklanmadan daha homojen bir şekilde yayılabilmesi, hem D_j ile $D_{\bar{c}}$ arasında daha az fark oluşmasında hem de taze betonun geçiş kabiliyeti kaybının daha az olmasında önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 4.17’den görüldüğü gibi, KA/TA oranı 0.25 ve 0.30 olan MAK1 karışımlarında, makro çelik lifin diğer liflere kıyasla çok uzun olmasına (mikro liflerden en uzun olan OL 13/16 lifinin 5 katı uzunluğunda) ve %1 oranda sadece makro çelik lif kullanılmasına rağmen, taze beton geçiş yeteneğinde çok fazla kayba yol açmamıştır.



(a) MAK1_0.25



(b) MAK1_0.30

Şekil 4.17 Sadece makro çelik lif içeren karışımların J halkalı çökme yayılma deneyinin karşılaştırılması

KA/TA oranı aynı olan karışımlar kendi içinde değerlendirildiğinde, J halkalı çökme yayılma deneyi sonuçlarına göre en iyi işlenebilirlik özellikleri, lifsiz KYB’den sonra, MAK0.8_6MİK0.2 karışımında ortaya çıkmıştır. Bu durum, daha kısa ve düşük narinlikte olan OL 6/16 mikro çelik lifin makro çelik lif yerine

kullanılmasına dayandırılabilir. OL 6/.16 mikro çelik lifin OL 13/.16 mikro çelik life göre işlenebilirlik açısından daha avantajlı olduğu gibi, üçlü lif hibridizasyonunda da benzer bir sonuç elde edilmiştir. Çünkü, Şekil 4.10'daki J halkalı çökme-yayılma değerleri dikkate alındığında, yayılma çapı değerlerindeki azalma, lifsiz karışımdan elde edilen yayılma çapı değerlerine kıyasla, OL 13/.16 mikro çelik lif içeren MAK0.8_13MİK0.2_P_0.25 karışımı için J halkalı çökme-yayılma değerindeki azalma %10.3 iken, OL 6/.16 mikro çelik lif içeren MAK0.8_6MİK0.2_P_0.25 ve MAK0.8_6MİK0.2_P_0.30 karışımları için ise sırasıyla %1.36 ve %3.84 olarak bulunmuştur. Ancak MAK0.8_13MİK0.2_P_0.30 karışımında ise narinliği daha yüksek olan OL 13/.16 mikro çelik lif ve PVA lifinin etkisiyle Şekil 4.10'dan da görülebileceği üzere yayılma çapında %0.72 oranında artma meydana gelmiştir. Bu durumun Şekil 4.11'de de gösterildiği gibi ΔH değerinin diğer karışımlara oranla daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Yani, başka bir deyişle, taze beton halkanın iç kısmında toplanmış ve dışarı sızan beton daha ince malzeme olduğu için yayılmada kayıp meydana gelmemiştir (bakınız Şekil 4.18).



(a) MA0.8_6MI0.2_PVA_0.30

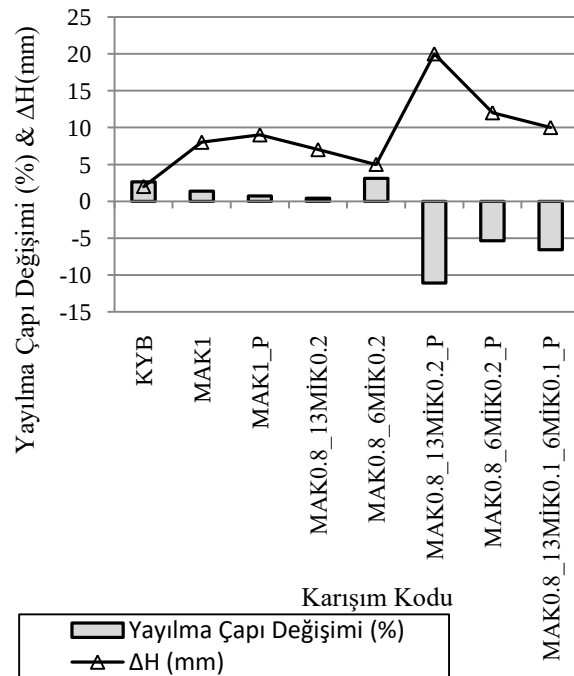


(b) MA0.8_13MI0.2_PVA_0.30

Şekil 4.18 Üçlü lif hibridizasyonunda KA/TA oranı 0.30 olan karışımların J halkalı çökme yayılma deneyi karşılaştırılması

Şekil 4.15'den görüldüğü üzere, KA/TA oranı 0.35 olan en kaba agrega granülometrisine sahip karışımlarda, kaba agrega içeriğinin artması ve mikro çelik liflerin PVA lifi ile birlikte kullanılması sebeplerinden dolayı, beklenilenin aksine, söz konusu karışımlara ait J halkalı çökme yayılma çapı değerleri J halkasız standard çökme-yayılma deneyinden elde edilen yayılma çaplarına göre daha fazla olmuştur. Şöyle ki, MAK0.8_13MİK0.2_P, MAK0.8_6MİK0.2_P ve MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P karışımlarının J halkasız standard çökme-yayılma

çapı değerlerinde, J halkalı çökme-yayılma çap değerlerine kıyasla, sırasıyla, %11.1, %5.34 ve %6.57 oranında azalma olmuştur. Bu durum Şekil 4.19’da da görüldüğü gibi bu karışımların ΔH değerlerinin çok fazla olmasına dayandırılabilir. Ayrıca, deneyler esnasında yapılan gözlemlerden, taze betonu oluşturan iri malzemeler ile narinliği yüksek olan PVA ve OL 13/16 mikro çelik lifin, halkanın iç kısmında betonun kümelenmesine yol açarak halkanın engelleri arasını tıkadığı ve dolayısıyla taze betonun geçiş kabiliyetini düşürdüğü görülmüştür. J halkalı çökme-yayılma çap değerlerinin standard çökme-yayılma çapı değerlerinden fazla çıkmasının diğer bir nedeni de, J halkasının engellerinden geçen ince malzeme oranı yüksek taze betonun, tabla üzerinde daha çok yayılma potansiyeline sahip olmasına, yani başka bir deyişle, taze betonda enerji kaybına neden olan malzemelerin halkanın içinde kümelenmesine dayandırılabilir (Şekil 4.20). J halkalı t_{50j} yayılma sürelerinin J halkasız standard çökme-yayılma deneyinde ölçülen t_{50} değerlerinden daha az çıkma nedeni ise, 30 cm çapa yerleştirilen J halkasından dışarı çıkan malzemenin daha çok ince malzemelerden oluştuğundan akıcılığının daha fazla olması, yani 50 cm çapa ulaşmada gecikmeye sebebiyet verecek iri malzemelerin halkanın iç bölümünde kalmış olmasına dayandırılabilir.



Şekil 4.19 KA/TA oranı 0.35 olan karışımlarda D_j 'nin $D_ç$ 'yere göre değişimi (%) ve ΔH bağıntısı



(a) MAK0.8_13MİK0.2_P_0.35



(b) MAK0.8_6MİK0.2_P_0.35



(d) MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_PVA_0.35

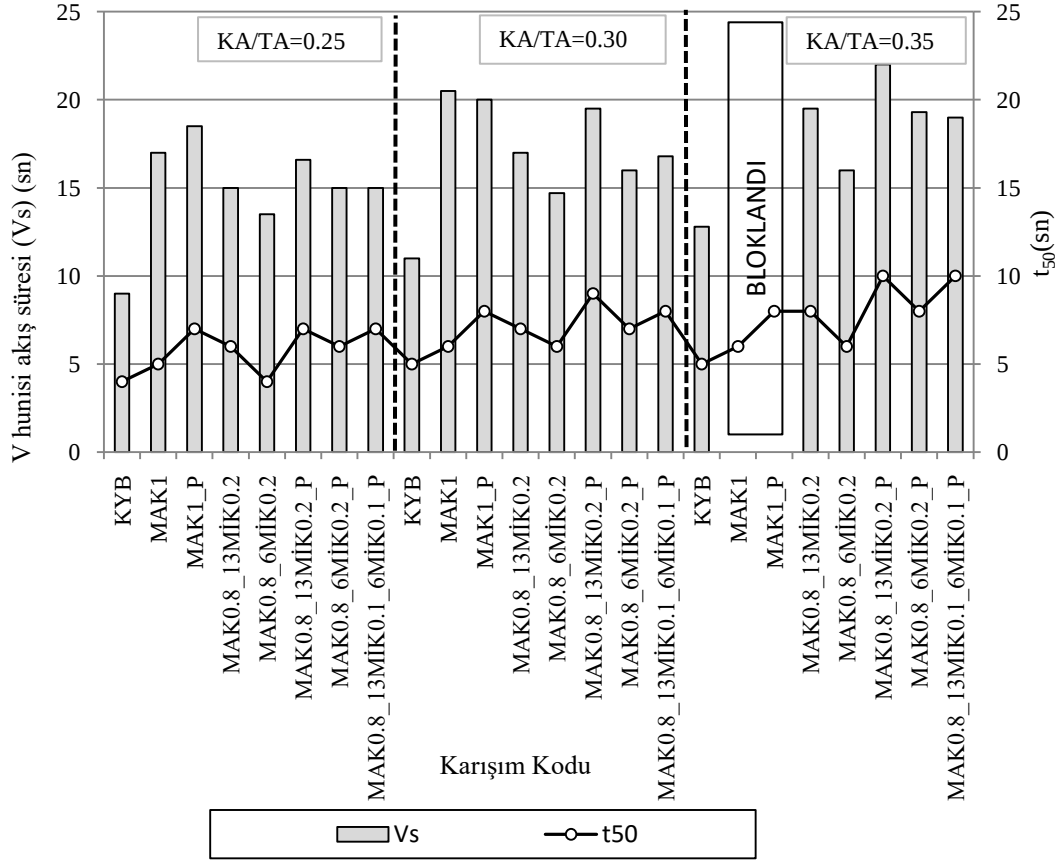
Şekil 4.20. Yayılma çapında artış meydana gelen KA/TA oranı 0.35 olan karışımların karşılaştırılması

4.1.4 V-hunisi deneyi akış süresi (V_s)

Tez kapsamında hazırlanan taze KYB karışımların akma yeteneği ile ilgili bilgi sahibi olmak amacıyla yapılmış olan V-hunisi deneyinde V-hunisi akış süresi (V_s) tayini yapılmıştır. Elde edilen bu parametre, çökme-yayılma deneyinde ölçülen t_{50} yayılma süresi ile birlikte Şekil 4.21’de sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği gibi V_f değerleri t_{50} değerleriyle yaklaşık olarak aynı eğilimi göstermiştir.

Lifsiz KYB karışımların V-hunisi akış sürelerine bakıldığında genel olarak EFNARC(2002) kriterlerine uygun olduğu görülmüştür. Bunun yanında, lifli karışımların hiçbirisi EFNARC(2002) kriterlerini karşılamamıştır. Karışımların hepsinde kaba agreganın miktarının artmasıyla birlikte, V_s değerlerindeki artış göze çarpmaktadır. Bu durum, kaba agreganın miktarının artmasının, taze beton içerisindeki hamur hacmini azaltmasına, dolayısıyla liflerin beton içerisinde hareket edecek yer bulamayıp betonun akma kabiliyetinde azalmaya sebebiyet vermesine

dayandırılabilir. V hunisi çıkış ağzında taze betonda bulunan katı parçacıklar birbirleriyle temas ederek birikme eğiliminde olduklarından, beton içerisindeki kaba agreganın fazla olması da bu teması artırarak akış süresini uzattığı düşünülmektedir.



Şekil 4.21 Karışımların V-hunisi deneyinden elde edilen akış süreleri ve çökme-yayılma deneyinde ölçülen t_{50} değerleri

Tek lif olarak makro çelik lif eklenen karışımların V_s değerleri, diğer karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu duruma, makro çelik lif boyunun V-hunisinin ağız kısmının boyutlarına (65 mm x 65 mm) yakın olması sebebiyle, karışımın akışını zorlaştırması ve bununla birlikte makro çelik lifin %1 oranında kullanılmasının neden olduğu düşünülmektedir. Hatta, KA/TA oranı 0.35 olan MAK1 ve MAK1_P karışımlarında, taze beton akamamış, Şekil 4.22’de görüldüğü gibi V-hunisi ağız kısmında tıkanma olmuştur. Bu bağlamda, V hunisi deneyiyle taze betonun viskozitesinin yanında, taze betonun belirli bir alandan geçiş kabiliyetiyle ilgili de fikir sahibi olunmuştur.

Tüm KA/TA oranları için ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarda %1 oranında makro çelik lifin de etkisiyle MAK1_P karışımının V_s değerinin

MAK0.8_13MİK0.2 ve MAK0.8_6MİK0.2 karışımlarından daha fazla çıktığı görülmüştür. Çünkü, kancalı ve daha uzun olan ve dolayısıyla taze betonun akarken bloklanmasına veya akışının yavaşlamasına yol açan makro çelik lifin, %0.2 oranında mikro çelik liflerle yer değiştirmesi neticesinde, akma sürelerinde düşüş meydana gelmiştir. Dolayısıyla, düz ve daha kısa olan mikro çelik liflerin makro çelik lif ile birlikte kullanıldığı ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarda taze betonun doldurma kabiliyeti iyileşmiş ve V_s değeri daha düşük çıkmıştır. MAK0.8_6MİK0.2 karışımının daha akıcı olması da, OL 6/16 mikro çelik lifinin boyunun ve buna bağlı olarak da narinliğinin daha az olmasına dayandırılabilir.



Şekil 4.22 V-hunisi deneyinde bloklanma olan MAK1_035 karışımı

Üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımların V hunisi akma süreleri, PVA lifinin etkisiyle ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara göre artmıştır. KA/TA oranı 0.35 olan karışımlardan, bloklanmanın olduğu MAK1 ve MAK1_P karışımları hariç, MAK0.8_13MİK0.2_P karışımında V_s değeri 22 sn olarak en fazla ölçülmüştür. Bu durumun, kullanılan mikro liflerin narinliklerinin fazla olmasından ve dolayısıyla kümelenme eğilimi göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüm KA/TA oranları için dörtlü lif hibridizasyonuna sahip MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P karışımların V hunisi akış süreleri, üçlü lif hibridizasyonuna sahip olan MAK0.8_13MİK0.2_P karışımlarından daha az iken, MAK0.8_6MİK0.2_P karışımlarının V hunisi akış süreleri değerlerine yakın elde edilmiştir.

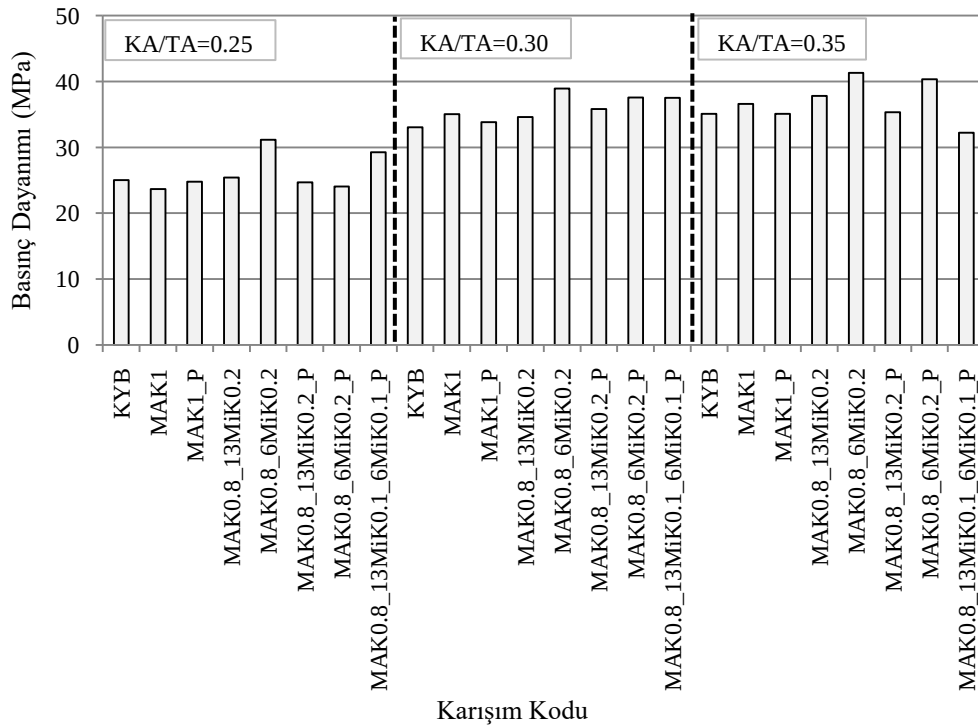
4.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Tez çalışması kapsamında tasarlanan karışımların hem mekanik hem de durabilite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla testler yapılmış olup, elde edilen sonuçların detaylı gösterimi Çizelge EK-1, EK2, EK-3 ve EK-4’de sunulmuştur.

4.2.1 Mekanik özellikler

4.2.1.1. Basınç dayanımı

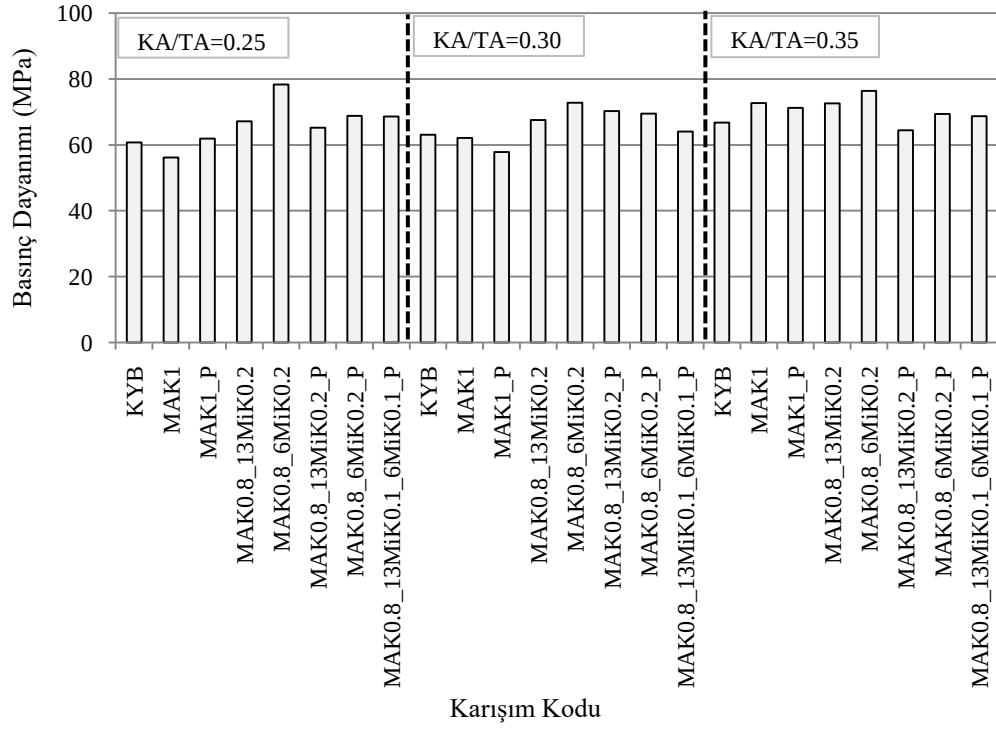
Deneyisel çalışmada tasarlanan 24 karışımın basınç dayanımı tespiti için 3 günlük erken dayanımları, 28 günlük standard dayanımları ve içerisinde puzolan bulundurması nedeniyle 90 günlük nihai dayanımları bulunmuştur ve elde edilen basınç dayanımlarının toplu sonuçları Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Her yaş deneyi için 3’er adet küp numune test edilmiş ve bu testlerin ortalaması alınarak basınç dayanımları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların detaylı gösterimi Çizelge EK-1’de mevcuttur. Sonuçların grafiksel gösterimi ise Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25’da yer almaktadır.



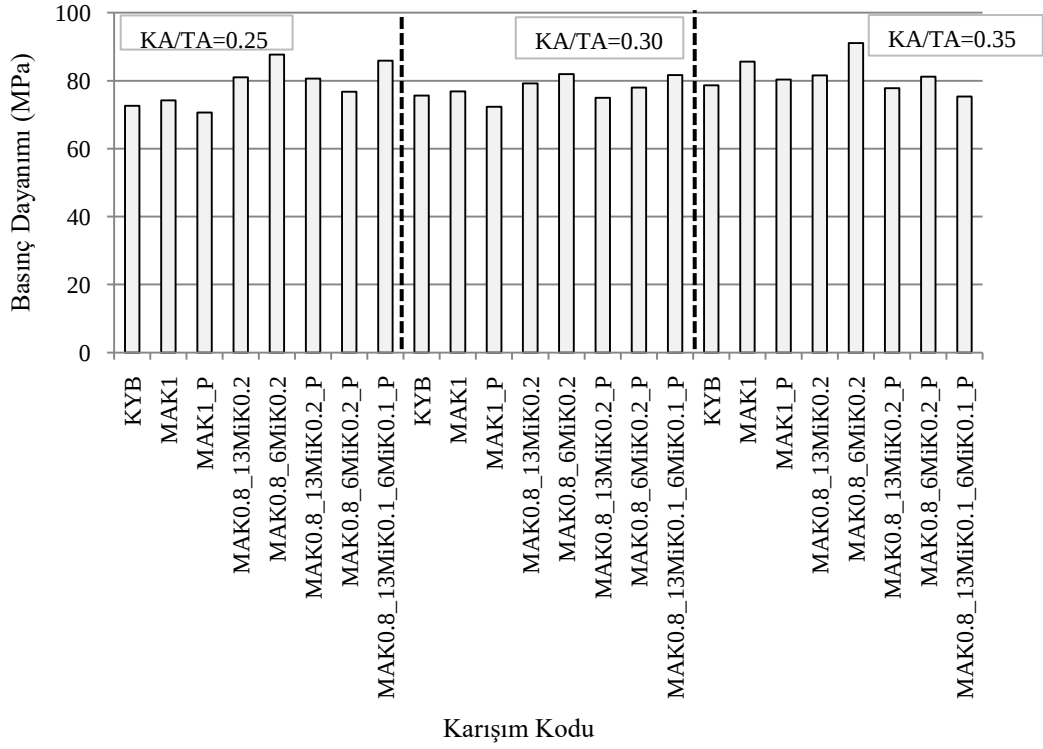
Şekil 4.23 3 günlük basınç dayanımı test sonuçları

Çizelge 4.2 Sertleşmiş beton mekanik özellikleri tayini için yapılmış deney sonuçları (MPa)

Karışım No	Karışım Kodu	Basınç Dayanımı			Elastisite Modülü	Yarmada Çekme Dayanımı			Eğilme Dayanımı		
		3 gün	28 gün	90 gün		3 gün	28 gün	90 gün	3 gün	28 gün	90 gün
1	KYB_0.25	25.03	60.75	72.65	39.96	3.35	5.65	6.35	4.25	6.11	7.71
2	MAK1_0.25	23.65	56.18	74.25	40.20	5.15	8.85	9.20	8.57	8.71	10.23
3	MAK1_P_0.25	24.80	61.95	70.60	40.50	5.35	9.10	9.30	9.15	9.94	10.51
4	MAK0.8_13MİK0.2_0.25	25.40	67.15	81.00	41.34	4.35	9.30	9.50	5.79	7.50	10.28
5	MAK0.8_6MİK0.2_0.25	31.15	78.30	87.70	42.23	3.65	8.45	8.50	5.36	7.17	10.17
6	MAK0.8_13MİK0.2_P_0.25	24.70	65.20	80.60	39.93	4.55	9.60	9.65	7.06	9.04	12.09
7	MAK0.8_6MİK0.2_P_0.25	24.05	68.80	76.75	40.70	4.35	9.20	9.40	5.94	8.33	10.42
8	MA8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.25	29.25	68.60	85.90	39.10	4.50	9.70	10.55	6.56	8.42	11.78
9	KYB_0.30	33.03	63.10	75.60	40.91	3.85	6.05	6.55	4.71	6.78	7.94
10	MAK1_0.30	35.05	62.10	76.85	39.30	5.40	9.50	10.65	7.99	7.85	10.56
11	MAK1_P_0.30	33.85	57.85	72.35	39.90	5.55	10.2	10.75	8.61	9.86	11.37
12	MAK0.8_13MİK0.2_0.30	34.60	67.60	79.25	39.26	5.00	9.40	9.95	5.41	7.84	9.92
13	MAK0.8_6MİK0.2_0.30	38.95	72.80	81.9	40.64	5.10	8.25	8.75	5.38	7.75	8.57
14	MAK0.8_13MİK0.2_P_0.30	35.80	70.25	75.00	38.66	6.15	9.65	10.75	6.97	9.56	12.13
15	MAK0.8_6MİK0.2_P_0.30	37.55	69.50	77.95	39.75	5.50	8.30	8.75	6.09	7.82	10.97
16	MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.30	37.50	64.10	81.65	39.05	5.95	9.85	10.10	6.96	9.03	11.24
17	KYB_0.35	35.10	66.78	78.65	41.50	4.05	6.40	6.80	5.37	7.82	8.55
18	MAK1_0.35	36.60	72.70	85.60	39.90	4.35	9.10	10.40	7.23	9.18	9.32
19	MAK1_P_0.35	35.10	71.25	80.30	39.40	4.95	10.35	10.90	7.67	10.02	10.80
20	MAK0.8_13MİK0.2_0.35	37.80	72.60	81.55	39.03	5.15	8.75	8.95	6.56	10.12	10.24
21	MAK0.8_6MİK0.2_0.35	41.30	76.40	91.03	40.66	4.80	7.55	8.65	5.86	8.76	9.48
22	MAK0.8_13MİK0.2_P_0.35	35.35	64.45	77.75	39.27	5.35	8.85	9.75	7.02	11.95	12.24
23	MAK0.8_6MİK0.2_P_0.35	40.35	69.45	81.15	40.23	4.95	8.65	9.35	6.19	10.34	10.70
24	MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.35	32.20	68.75	75.35	39.98	4.65	10.20	10.35	6.39	10.27	11.13

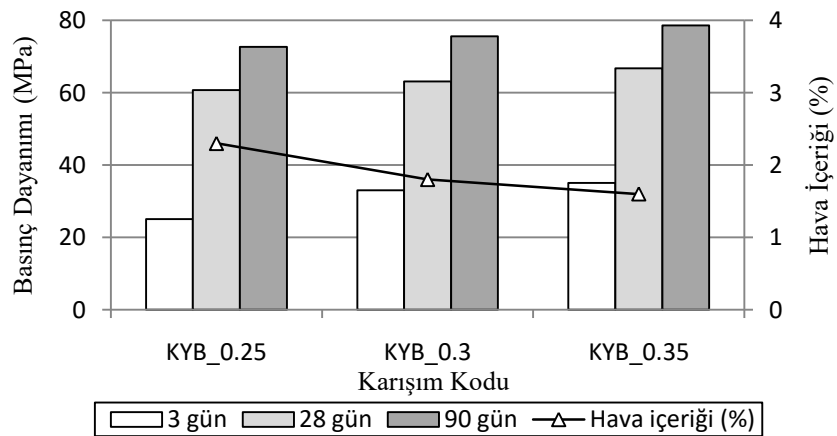


Şekil 4.24 28 günlük basınç dayanımı test sonuçları



Şekil 4.25 90 günlük basınç dayanımı test sonuçları

Lifsiz karışımlarda kaba agreganın içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. KA/TA oranı 0.25 olan en ince agreganın granülometrisine sahip lifsiz KYB karışımında 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 25.03 MPa, 60.75 MPa ve 72.65 MPa bulunmuştur. KA/TA oranının 0.30 olduğu karışımların basınç dayanımında, bu değerlere göre sırasıyla %31.9, %4.2 ve %4.1 oranlarında artış meydana gelmiştir. KA/TA oranı 0.35 olan en kaba agreganın granülometrisine sahip lifsiz KYB karışımlarının basınç dayanımında ise KA/TA oranı 0.25 olan lifsiz KYB karışımına göre sırasıyla %40.2, %10.2 ve %8.3 oranlarında artış hesaplanmıştır. Karışımlarda ince agreganın içeriğinin artmasıyla birlikte, çimento hamurunun sarması gereken agreganın miktarı artmakta ve dolayısıyla, betonda çatlak oluşumunda en kritik ve zayıf bölge olan agreganın – çimento hamuru arayüzey bölgesi artmaktadır. Sertleşmiş betonda yüklemeyle birlikte, çatlaklar bu zayıf geçiş bölgesi boyunca ilerleyeceğinden, agreganın-çimento hamuru arayüzeyi, basınç dayanımını etkileme açısından önemli bir faktördür (Francois ve Albert, 1997). Beton içeriği aynı tutulup, ince agreganın içeriği artırılması da mikro çatlak içeren agreganın-çimento hamuru arayüzeyi hacminin artmasına yol açmaktadır. Buna ilave olarak, ince agreganın miktarının artmasıyla basınç dayanımının düşmesi, ince malzeme miktarının artışı ile birlikte karışımın hava içeriğinin artmasına da dayandırılabilir (Şekil 4.26). Farklı agreganın içeriğinin değişken olarak alındığı tek lif takviyeli KYB ile ilgili bir doktora tez çalışmasında da benzer sonuç bulunmuştur (Yardımcı, 2007).



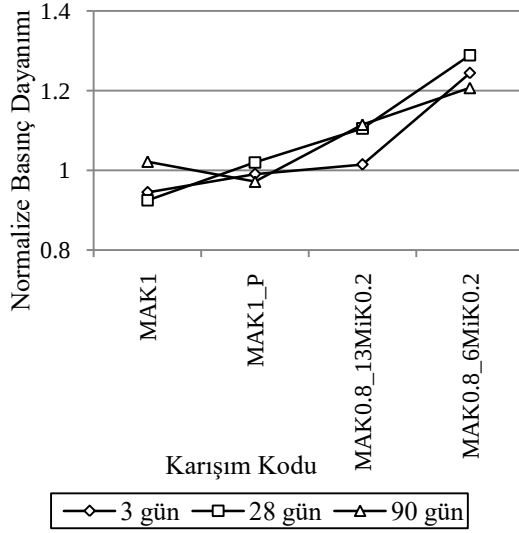
Şekil 4.26. Lifsiz KYB karışımlarının basınç dayanımı-hava içeriği ilişkisi

Şekillerden görülebileceği gibi, lifli karışımların basınç dayanımı testi, lifsiz karışımlarda olduğu gibi, kaba agreganın içeriğinin artmasıyla birlikte basınç

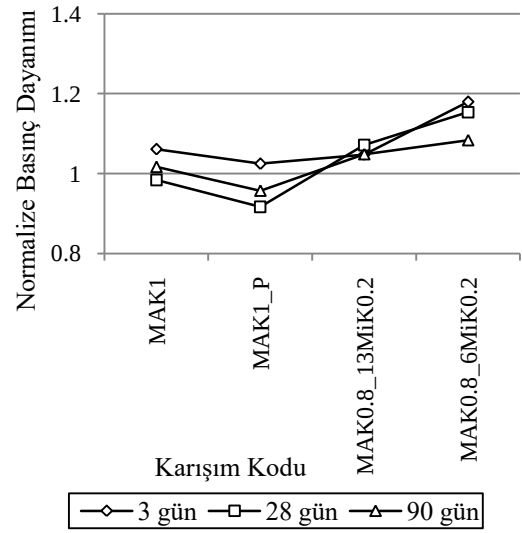
dayanımının arttığını göstermiştir. KA/TA oranından bağımsız olarak karışımların 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerine bakıldığında, liflerin tip ve narinliklerinin basınç dayanımı üzerinde genel olarak etkisi göze çarparken, bazı istisnai durumlar da söz konusu olmuştur. Bunun nedeni olarak, liflerin agrega-hamur arayüzeyinde farklı yönelmesi, homojen olarak yayılmayıp matris içerisinde zayıf bölgeler oluşturmuş olması veya betonun içerisindeki hava boşluğunu artırması şeklinde düşünülebilir (Ahmad ve Umar, 2018). Betonun içerisindeki boşluklar, mikro çatlakların başladığı kusurlu bölgelerdir. Dolayısıyla lifin basınç dayanımı üzerindeki etkisi, lif ilavesinden kaynaklı oluşan boşluklar ile mikro çatlak köprüleme arasındaki denge olarak görülebilir (Hossain vd. 2013).

Bu çalışmada ise, aynı granülometriye sahip karışımlar kendi içinde değerlendirildiğinde, lifsiz karışımlara göre lifli karışımlarda en fazla azalma %8.32 ile 28 günlük MAK1_P_0.30 karışımında, artış ise %28.9 ile 28 günlük MAK0.8_6MİK0.2_0.25 karışımında ölçülmüştür. Literatürde, betona lif takviyesinin betonun basınç dayanımını yaklaşık olarak $\pm$ %25 oranında değiştirdiği ile ilgili çalışma mevcuttur (Pierre, 2000).

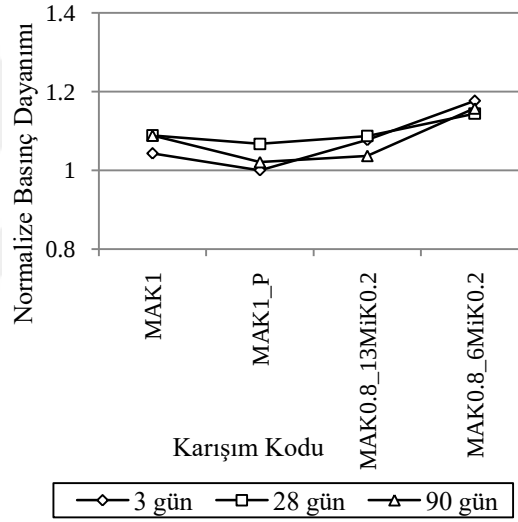
Şekil 4.27’de tek ve iki lifli karışımların basınç dayanımlarının aynı KA/TA oranına sahip lifsiz karışımların basınç dayanımlarına göre normalize edilmiş değerleri gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, hava içeriğinin çok daha fazla olduğu (bakınız Şekil 4.28) KA/TA oranı 0.25 olan en ince agrega granülometrisine sahip karışımlar hariç, tek lif olarak makro çelik lif içeren MAK1 karışımların basınç dayanımı, lifsizinkine göre tüm kür yaşları için genelde artış göstermiştir. Sadece makro çelik lif içeren KYB karışımlarından en yüksek basınç dayanımı, 85.6 MPa ile KA/TA oranı 0.35 olan 90 günlük karışımdan elde edilmiştir.



(a) KA/TA=0.25

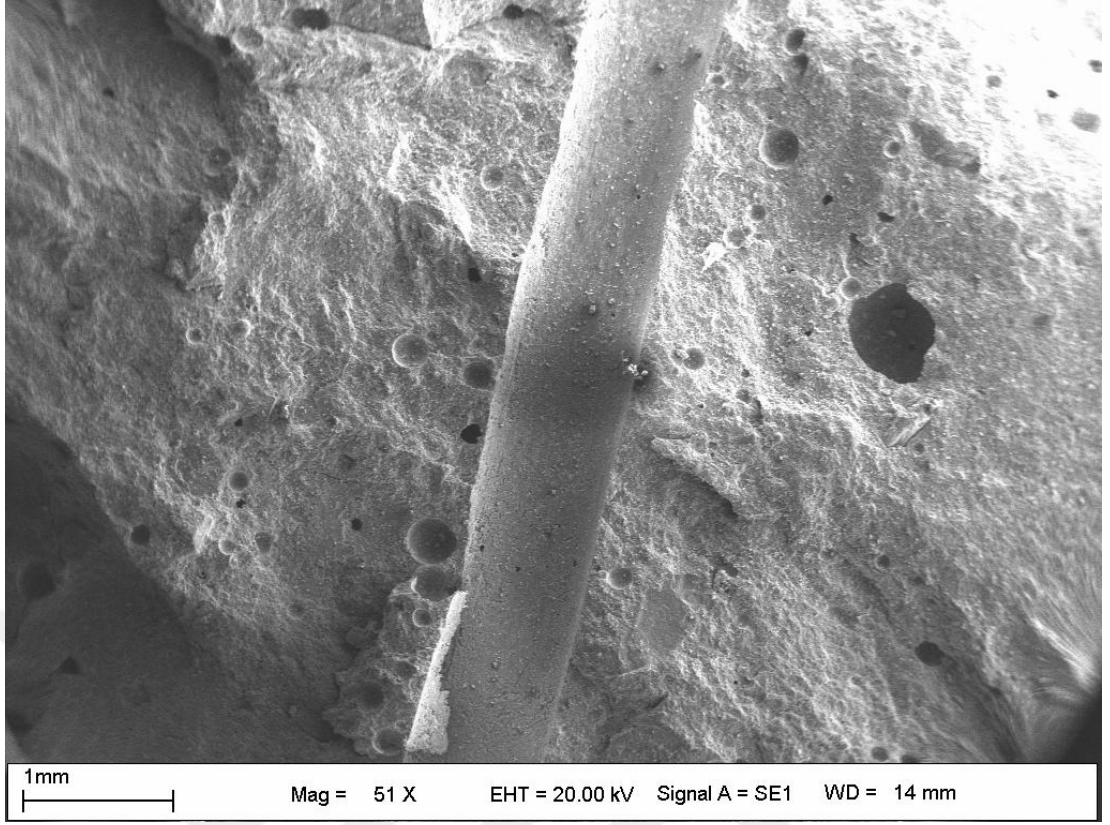


(b) KA/TA=0.30



(c) KA/TA=0.35

Şekil 4.27. Tek ve iki lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize basınç dayanımı değerleri

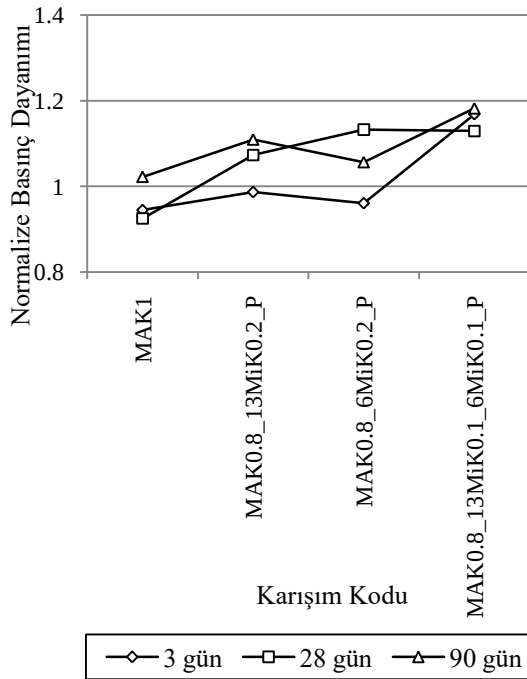


Şekil 4.28 KA/TA oranı 0.25 olan MAK1 karışımına ait lif etrafında oluşan boşluklarla ilgili SEM görüntüsü

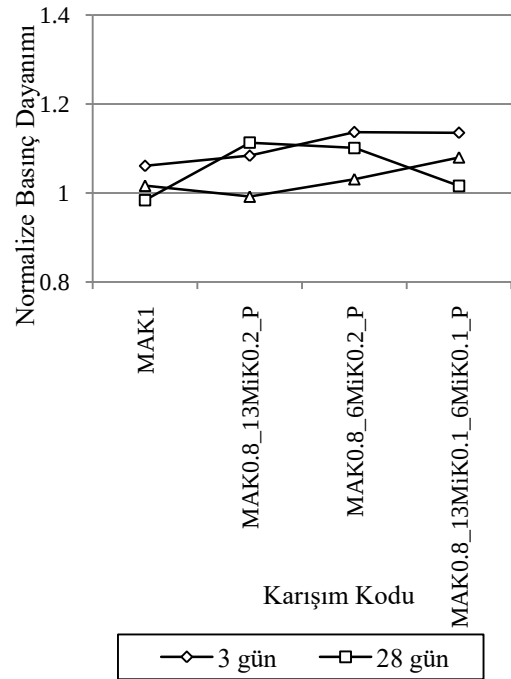
Şekil 4.27’deki ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımların normalize edilmiş basınç dayanım değerlerine bakıldığında, makro çelik lif ile birlikte mikro sentetik lif olan PVA lifi içeren karışımların KA/TA oranları 0.25 ve 0.30 olan ince agrega granülometrisine sahip karışımlar için basınç dayanımında düşüş gözlemlenirken, KA/TA oranının 0.35 olduğu en kaba agrega granülometrisinde basınç dayanımlarının, 28 ve 90 günlük kür yaşları için sırasıyla, %6.7 ve %2.1 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bunun yanında, mikro çelik liflerin karışıma dahil edilmesinin ise genel olarak basınç dayanımı üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Normalize basınç dayanım grafiklerine de bakıldığında, hatta özellikle makro çelik lifin OL 6/.16 mikro çelik lif ile yer değiştirmesinin basınç dayanımı gelişimi açısından çok daha etkili olduğu anlaşılmıştır. Bu durum OL 6/.16 çelik lifin boyunun (6mm), PVA (18mm) ve OL 13/.16 (13mm) liflerinden kısa olmasına ve dolayısıyla mikro çatlakları köprülemede daha etkili bir role sahip olmasına dayandırılabilir. Ayrıca, işlenebilirlik açısından bakıldığında, bu lifin taze beton içerisinde kümeleşme riskinin daha az olmasından ve beton matrisinde çok daha

homojen bir şekilde yayılmış olabileceğinden dolayı, basınç dayanımını iyileştirmede daha etkili olduğu düşünülmektedir. Karma lif takviyeli kompozit ile ilgili yapılan benzer çalışmalarda (Sahmaran vd. 2005; Ahmad ve Umar, 2018; Thwe ve Liao, 2002) da yüke maruz bırakılan betonda mikro olan kısa liflerin mikro çatlakların oluşumunu ve yayılmasını önlemede daha etkili olduğu ve hatta düz mikro çelik lifler arasından daha kısa olanın betonun basınç dayanımını daha çok iyileştirdiği (Bozkurt ve Yazicioglu, 2017) bulunmuştur.

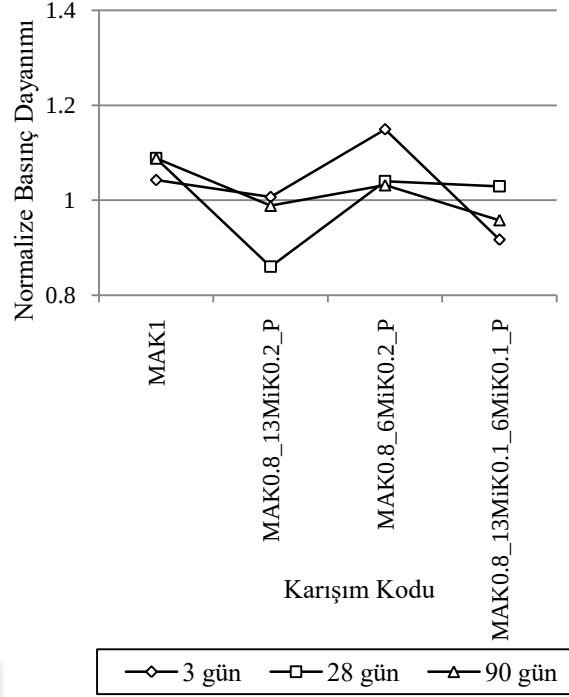
Üçlü ve dördü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar ile sadece makro çelik lif içeren karışımlar kıyaslandığında, KA/TA oranı 0.25 ve 0.30 olarak kullanıldığı üçlü ve dördü lif hibridizasyonunun olduğu karışımların 3, 28 ve 90 günlük normalize basınç dayanımlarının genel olarak MAK1 karışımına kıyasla arttığı, ancak, KA/TA oranı 0.35 olan karışımlarda ise 3 farklı yaş için de genel olarak basınç dayanımı değerlerinin azaldığı görülmüştür (bakınız Şekil 4.29). KA/TA oranı 0.35 olan üçlü ve dördü lif içeren karışımlardaki basınç dayanımlarının MAK1'e göre düşüş göstermesi, karışımdaki liflerin matris içerisinde daha homojen yayılmasını sağlayan hamur hacminin azalmasına dayandırılabilir.



(a) KA/TA=0.25



(b) KA/TA=0.30

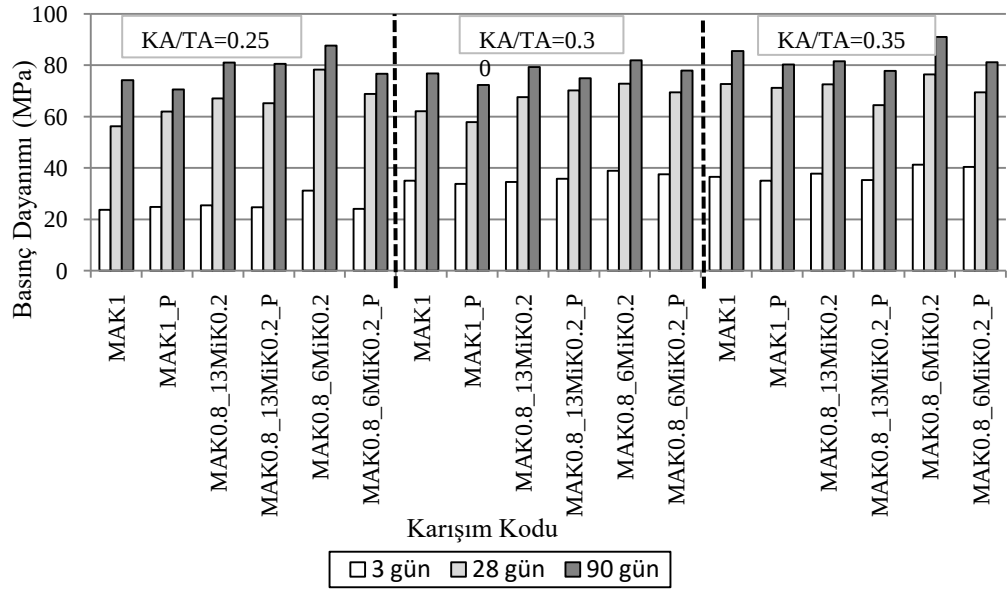


(c) KA/TA=0.35

Şekil 4.29. Tek, üç ve dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize basınç dayanımı değerleri

Karma lif takviyesi üzerinde PVA lifinin etkisini incelemek amacıyla hem sadece makro çelik lif içeren karışımlar ile makro çelik ve PVA lifinin ikili hibridizasyonunun olduğu karışımlar, hem de farklı mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar ile PVA lifinin eklendiği üçlü lif hibridizasyonu olan karışımlar karşılaştırılmıştır (bakınız Şekil 4.30). KA/TA oranından bağımsız olarak, MAK1_P, MAK0.8_13MİK0.2_P ve MAK0.8_6MİK0.2_P karışımlarında, aynı karışım oranlarına sahip PVA lifi içermeyen karışımlara göre basınç dayanımlarında genelde azalma meydana gelmiştir. Örneğin, KA/TA oranının 0.35 olduğu üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlarda PVA lifi, mikro çelik liflerin basınç dayanımı üzerindeki olumlu etkisini azaltmış, üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımların basınç dayanımı, MAK1_0.35 karışımın basınç dayanımından da düşük çıkmıştır. Bunun sebebi PVA lifinin basınç dayanımını genel olarak düşürdüğüne dayandırılabilir. Çünkü, çelik lif, çatlak genişlemesini önleyip, beton matrisiyle daha fazla yüzey alanı teması sağlayarak basınç dayanımını artırmaktadır (Yan vd. 1999). Ancak Şekil 4.16(a) 'dan da görüldüğü gibi, PVA lifi betondaki poroziteyi ve hapsolmuş hava miktarını artırarak basınç dayanımını düşürmektedir. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında hazırlanan karışımların su/bağlayıcı oranının

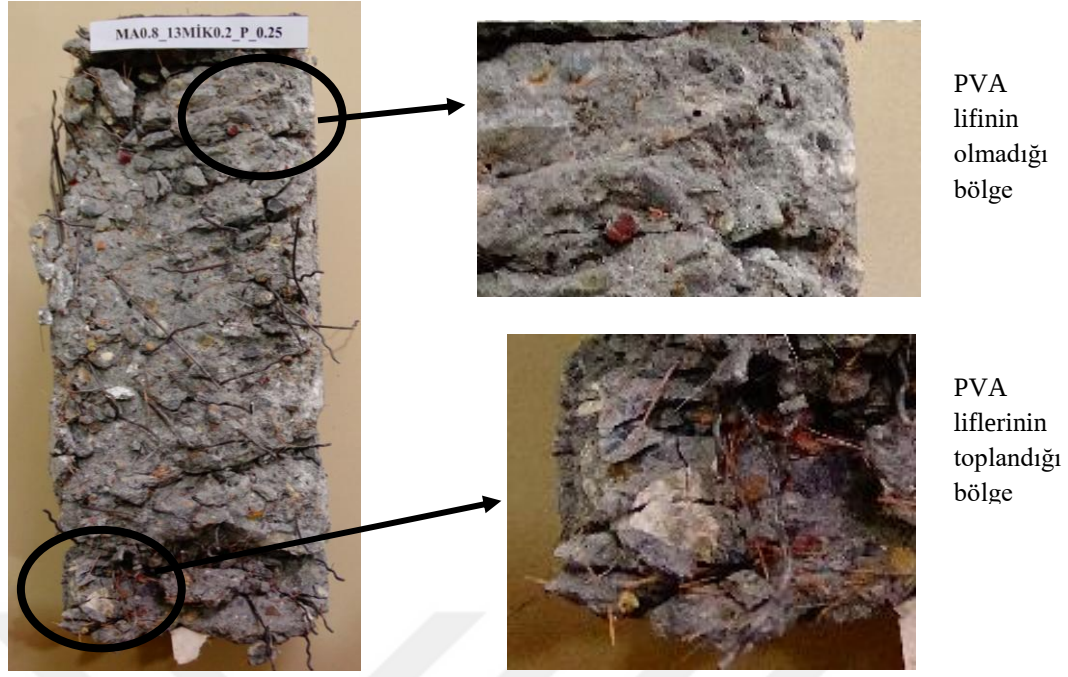
0.25 gibi düşük bir değerde olmasına bağlı olarak karışımın yüksek vizkozite özelliği ve karışımların hazırlanmasında kullanılan mikserin kesme etkisinin yetersiz olması sebebiyle, PVA liflerinin matris içerisinde homojen yayılmamasına ve dolayısıyla karışımların basınç dayanımının düşmesine dayandırılabilir (bakınız Şekil 4.31). Su/çimento oranının 0.25 olduğu PVA lifi içeren karışımların kullanıldığı başka bir çalışmada (Atahan vd. 2013) da benzer sonuç bulunmuş olup, basınç dayanımının olumsuz etkilendiği ve bunun da yüksek vizkozite özelliğine sahip karışımda PVA lifinin matris içerisindeki dağılımının iyi olmamasına bağlanabileceği söylenmiştir.



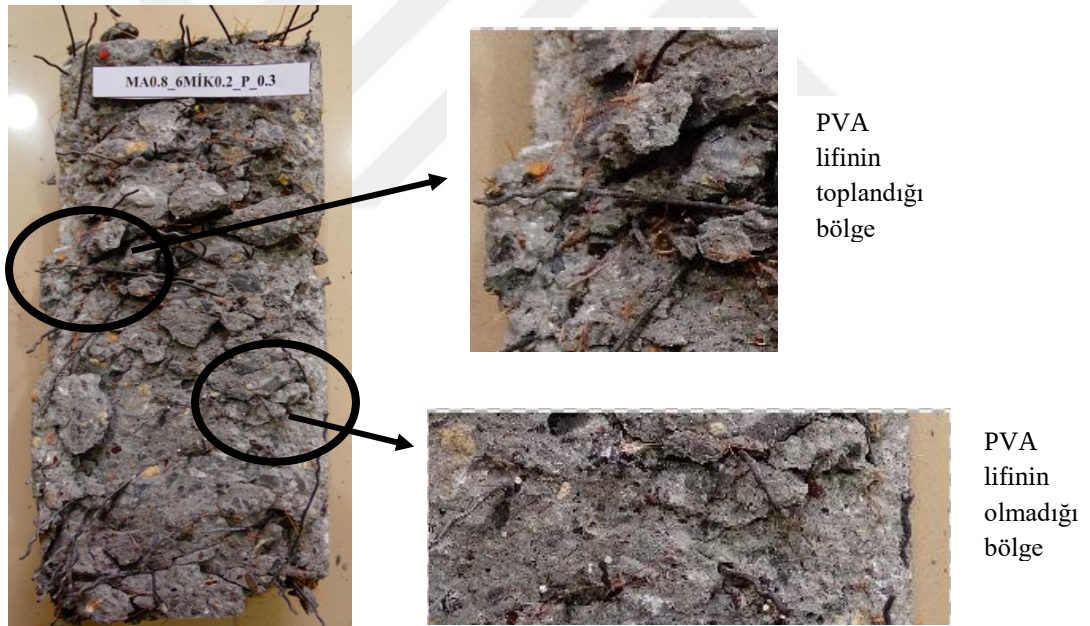
Şekil 4.30. PVA lifinin karma lif takviyeli karışımlara etkisi



(a) MAK1_P



(b) MAK0.8_13MİK0.2_P

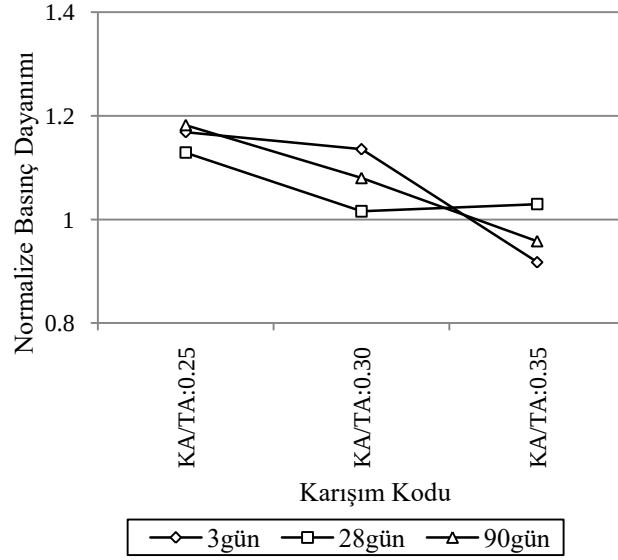


(c) MAK0.8_6MİK0.2_P

Şekil 4.31 Karışımların PVA lifi dağılım görselleri

Şekil 4.32’de dörtlü lif hibridizasyona sahip karışımlara ait numunelerin basınç dayanımları, tüm KA/TA oranları ve kür yaşları için lifsiz karışımlara göre normalize değerleri esas alınarak karşılaştırılmıştır. Şekilden de görülebileceği gibi, KA/TA oranı 0.25 ve 0.30 olan dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımların lifsiz karışımlara göre normalize basınç dayanımında artış meydana gelirken, KA/TA oranı

0.35 olan karışımların sadece 28 günlük basınç dayanım değerlerinde artış olduğu bulunmuştur. Dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımların basınç dayanımına genel olarak bakıldığında, KA/TA oranı 0.25 olan karışımda, lifsiz karışımın 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına kıyasla, sırasıyla, %16.9, %12.9 ve %18.2 oranlarında artış sağlanmış olup, KA/TA oranı 0.30 ve 0.35 olan karışımlarinkine kıyasla daha olumlu bir iyileşme sağlanmıştır.



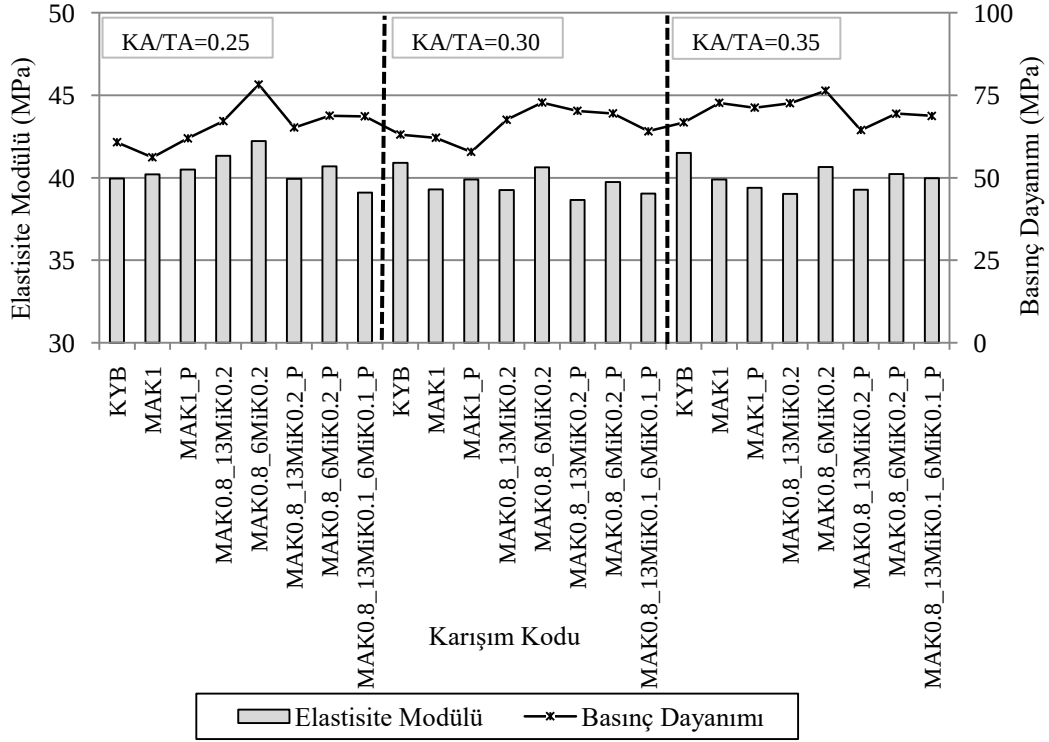
Şekil 4.32 Dörtlü lif hibridizasyonun olduğu karışımların lifsiz karışımlara göre normalize basınç dayanımı değerleri

4.2.1.2. Elastisite modülü

Elastisite modülü, malzemelerin rijitliği ile alakalı bir parametredir ve betonun elastik şekil değiştirme kabiliyetini gösterir. Yüksek dayanımlı betonarme yapıların potansiyel basınç dayanımlarının hepsini kullanabilmesi ve böylece rijitliğini koruyabilmesi için, yüksek elastisite modülüne sahip olması gerekir. Bu sebeple, yüke maruz kalan yüksek dayanıma sahip betonun aşırı deformasyonunu önlemek amacıyla elastisite modülünün bilinmesi çok önemlidir (Gul vd. 2014).

Tez çalışması kapsamında hazırlanan karışımlara ait silindir numunelere basınç dayanım testi uygulanmış ve numunelerin boyunda meydana gelen birim şekil değiştirme değerleri bilgisayar programı vasıtasıyla tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiş, numunelere ait detaylı ölçümler de Çizelge EK-2’de sunulmuştur. Karışımlara ait sadece 28 günlük numunelerin elastisite modülü değerlerinin bulunmasının nedeni, 28 günden sonra elastisite modülünde çok da

farklı sonuçlar elde edilmemesi ve 28 günlük numunelerin elastisite modüllerinin bazı formüller kullanılarak da bulunabiliyor olmasıdır (Zhou vd. 1995). Karışımların 28 günlük basınç dayanımları ve elastisite modülü değerleri Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



Şekil 4.33. 28 günlük elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri

Lifsiz KYB karışımların kaba agrega içeriğinin artmasıyla birlikte, basınç dayanım sonuçlarında olduğu gibi elastisite modülü değerlerinde de artış meydana gelmiştir. Kaba agrega betonun iskeletini oluşturur ve dolayısıyla elastisite modülündeki bu artışın nedeni olarak kaba agrega miktarının artmasının karışımı daha rijitleştirmesi gösterilebilir (Nikbin vd. 2014).

Karışımların 28 günlük basınç dayanımları ve elastisite modülü değerlerine bakıldığında, KA/TA oranı 0.25 olan en ince agrega granülometrisine sahip karışımlarda basınç dayanımları ve elastisite modülü değerlerinde benzer eğilimler gözlemlense de kaba agrega içeriğinin fazla olduğu karışımlarda bu durum gözlemlenmemiştir (Şekil 4.33). Ayrıca, Şekil 4.33’den de görüleceği üzere, genelde lif hibridizasyonunun basınç dayanımı değerleri üzerindeki etkisinin aksine, elastisite modülü değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, yapılan bazı çalışmalarda (Mazaheripour vd. 2011; Altun ve Aktas 2013)

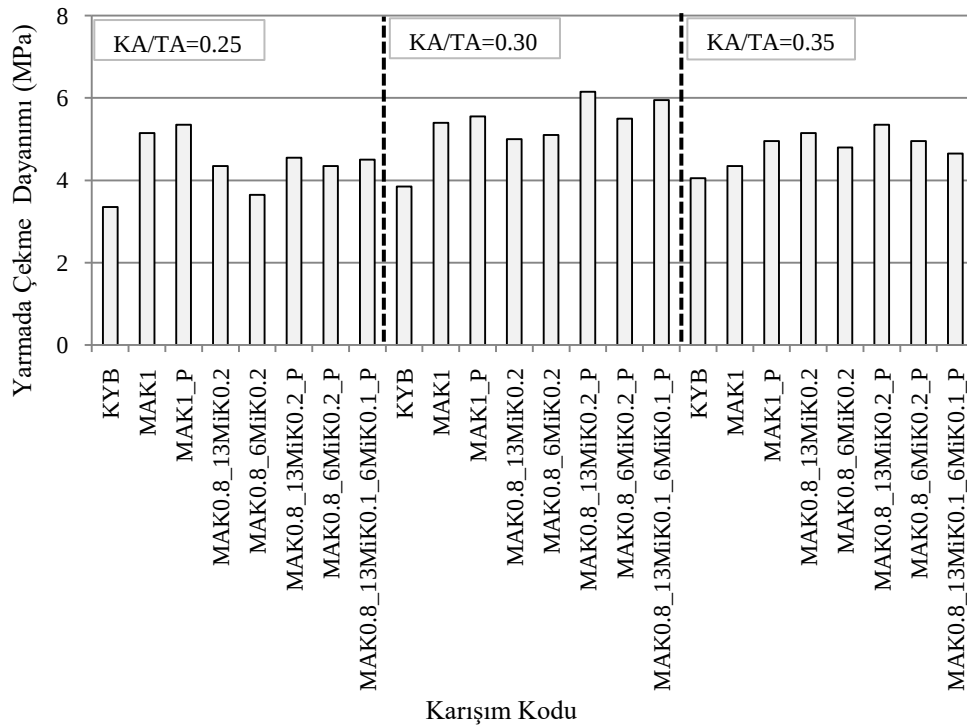
da bulunduğu gibi, karışımlara takviye edilen liflerin betonun basınç dayanımı üzerinde daha çok etkisi olduğu ancak elastisite modülünde önemli bir etki oluşturmadiğı söylenebilir. Bunun yanında, lifler deney esnasında eksenel basınca maruz numunede meydana gelen çatlakları köprüleyerek numunenin bütünlüğünün devamını sağlayarak daha çok şekil değiştirmeye uğramasına sebep olmaktadır. Çünkü betona lif eklenmesinin sonucu olarak, maksimum gerilmeye denk gelen birim şekil değiştirme artmaktadır (Yoo vd. 2015).

Lifsiz karışımlar ile sadece makro çelik lif içeren MAK1 karışımları karşılaştırıldığında, KA/TA oranı 0.25 olan en ince agrega granülometrisine sahip karışımda makro çelik lif eklenmesinin elastisite modülünü arttırdığı, ancak, KA/TA oranı 0.30 ve 0.35 olan karışımlarda makro çelik lif eklenmesinin elastisite modülünü düşürdüğü görülmüştür. Bu durum, Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, KA/TA oranının 0.25 olduğu karışımdaki hamur hacminin artmasıyla birlikte, makro çelik lifin daha iyi sarılmasının sonucu olarak liflerin matris içerisinde daha homojen dağılımına ve aynı zamanda agrega ile yer değiştiren çelik lifin elastisite modülünün agregaya kıyasla çok daha yüksek olmasına dayandırılabilir. Ancak KA/TA oranı 0.35 olan karışımlardaki makro çelik lif, hamur hacminin azalması ve böylece, Şekil 4.3'den da görüldüğü gibi, matris içerisindeki homojen dağılımını kaybetmesi sebebiyle, rijitliği agregaya göre çok daha fazla olan çelik lifin elastisite modülü üzerindeki olumlu etkisinin yeterince açığa çıkmadığı düşünülmektedir.

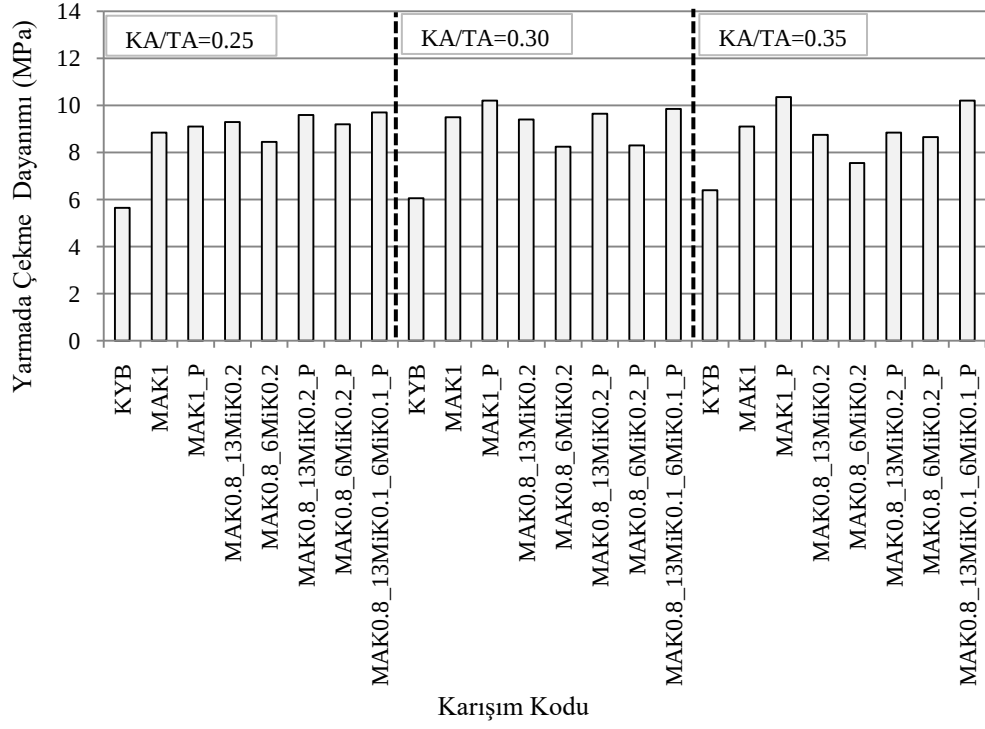
Çizelge 4.2 ve Şekil 4.33'den görülebileceği gibi, karışımlara ilave edilen PVA lifinin betonun elastisite modülüne önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bunun nedeninin PVA lifinin düşük elastisite modülüne sahip olması olarak düşünülmektedir. Buna karşılık, hem çelik liflerin daha yüksek elastisite modülüne sahip olmaları (23), hem de özellikle en ince agrega granülometrisinin sonucu olarak matris içerisindeki daha fazla hamur hacmi sebebiyle çelik liflerin daha etkili sarılmaları, elastisite modülünde artışa neden olmuştur. Özellikle, KA/TA oranından bağımsız olarak, OL 6/.16 mikro çelik lifi içeren ve ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımların elastisite modülü değerleri, tüm lifli karışımlar içerisinde en yüksek çıkmıştır. Bu, PVA lifi ve agregaya kıyasla yüksek elastisite modülüne sahip olan OL 6/.16 mikro çelik lifinin narinliğinin düşük olmasına ve dolayısıyla karışımda homojen yayılmasına dayandırılabilir.

4.2.1.3. Yarmada çekme dayanımı

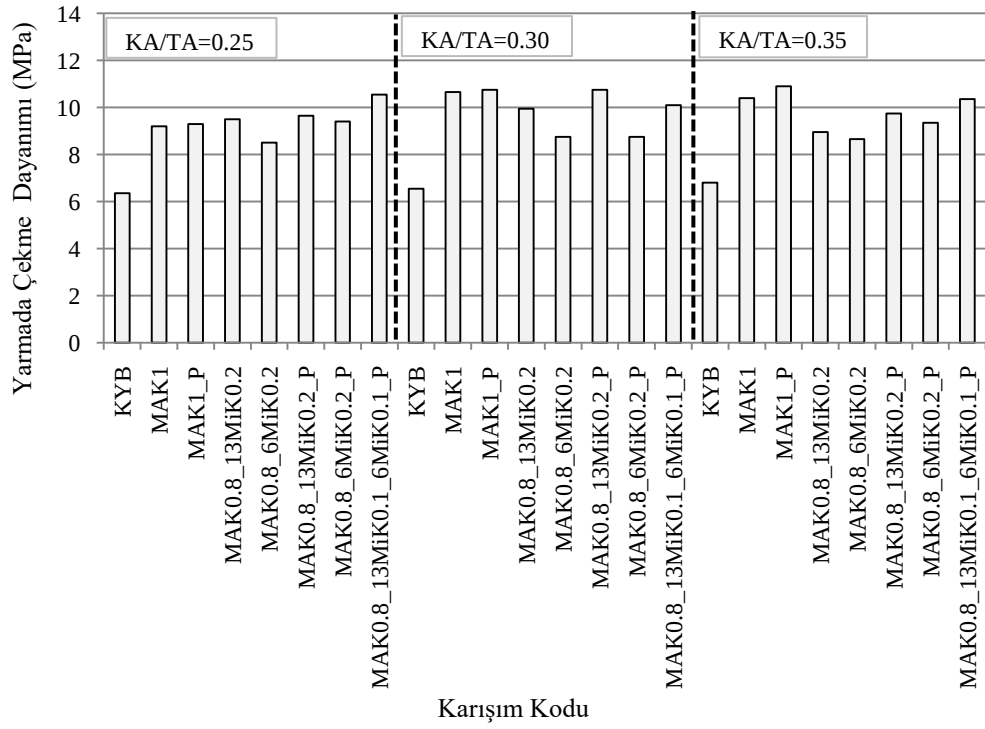
Tez kapsamında hazırlanan 24 karışımın yarmada çekme dayanımı tespiti için 3 günlük erken dayanımları, 28 günlük standard dayanımları ve içerisinde puzolan bulundurması nedeniyle 90 günlük nihai dayanımları bulunmuştur ve elde edilen yarmada çekme dayanımlarının toplu sonuçları Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Her yaş deneyi için 3’er adet silindir numune test edilmiş ve bu testlerin ortalaması alınarak tüm karışımlara ait yarmada çekme dayanımları bulunmuştur. Elde edilen sonuçların detaylı gösterimi Çizelge EK-3’de mevcuttur. Sonuçların grafiksel gösterimi ise Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36’da yer almaktadır.



Şekil 4.34 3 günlük yarmada çekme dayanımı test sonuçları

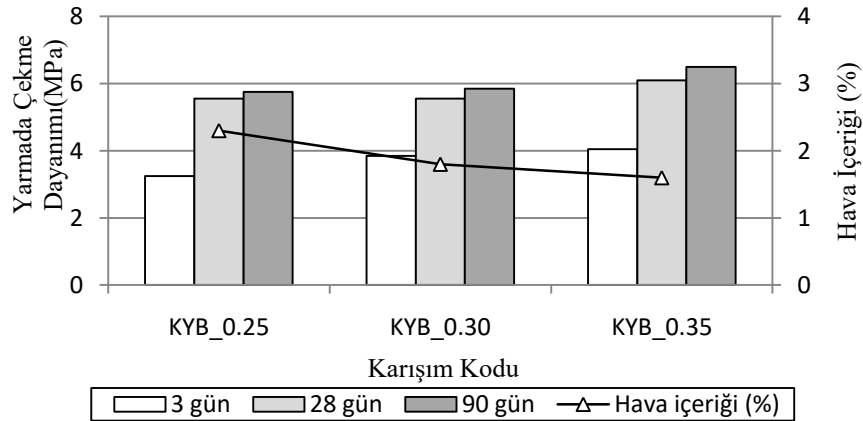


Şekil 4.35 28 günlük yarmada çekme dayanımı test sonuçları



Şekil 4.36 90 günlük yarmada çekme dayanımı test sonuçları

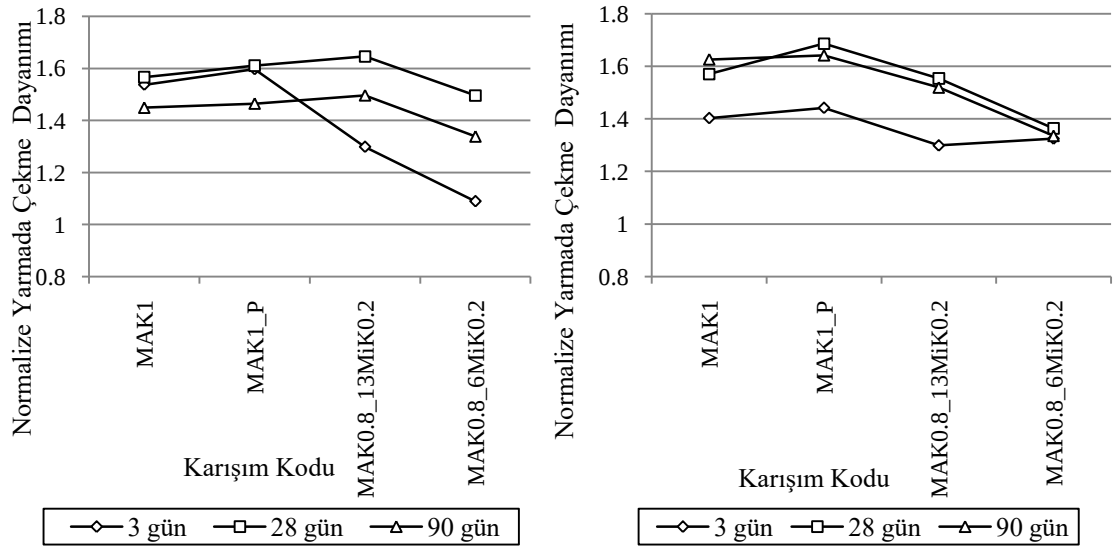
Lifsiz karışımlarda basınç dayanımı değerlerinde olduğu gibi, kaba agreganın içeriğinin artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanımında artış meydana gelmiştir. Tüm karışımlar için kür yaşı arttıkça yarmada çekme dayanımları artmıştır. KA/TA oranı 0.25 olan en ince agreganın granülometrisine sahip lifsiz KYB karışımlarının 3, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları, sırasıyla, 3.35 MPa, 5.65 MPa ve 6.35 MPa bulunmuştur. KA/TA oranının 0.30 olduğu lifsiz karışımların yarmada çekme dayanımı değerleri, KA/TA oranı 0.25 olan lifsiz karışımlarınkine kıyasla, sırasıyla, %14.9, %7.1 ve %3.2 oranlarında artış gösterirken, KA/TA oranı 0.35 olan en kaba agreganın granülometrisine sahip lifsiz KYB karışımlarının yarmada çekme dayanımı değerleri ise, sırasıyla, %20.9, %13.3 ve %7.1 oranlarında artmıştır. Şekil 4.37’de görüldüğü üzere, lifsiz karışımlarda, ince agreganın miktarının artmasıyla birlikte basınç dayanımında olduğu gibi yarmada çekme dayanımında da düşme meydana gelmiştir. Yapılan benzer bir çalışmada (Yardimci, 2007) da bulunduğu gibi, bu durum, ince malzeme miktarının artışı ile birlikte karışımın hava içeriğinin artmasına dayandırılabilir.



Şekil 4.37. Lifsiz KYB karışımların yarmada çekme dayanımı-hava içeriği ilişkisi

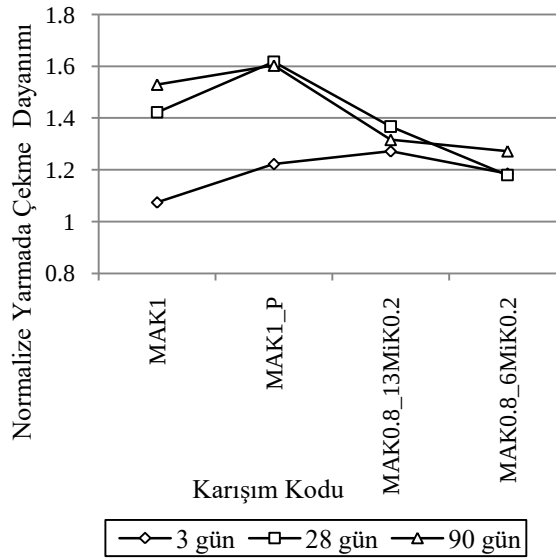
Yapılan çalışmalar sonucu, betona lif takviyesinin betonun yarmada çekme dayanımını arttırdığı bulunmuştur (Mazaheripour vd. 2011; Farhad ve Nejadi, 2013; Prasad vd. 2009). Yarmada çekme dayanımında lif performansı malzemenin dayanımına, lif yüzeyinin pürüzsüzlüğüne, mikroyapı aderansına bağlıdır. Bu faktörlerin optimizasyonu beton-lif etkileşimini iyileştirir ve çatlaklara karşı etkili bir mekanizma gelişmesine yardımcı olur (Nanni, 1988). Tüm lifli ve lifsiz karışımlar dikkate alındığında, en yüksek yarmada çekme dayanımı değerleri 90 günlük KA/TA oranı 0.35 ve 0.30 olan MAK1_P karışımlarına ait numunelerden elde edilmiş olup,

bu değerler sırasıyla, 10.90 MPa ve 10.75 MPa olarak ölçülmüştür. Bu, bazı araştırmacılar (Sahmaran vd. 2005; Yun vd. 2007) tarafından da bulunduğu gibi, tek tip lif yerine karma lif takviyesinin yarmada çekme dayanımını daha çok iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, 90 gün kür yaşı için en düşük yarmada çekme dayanımı değeri 8.50 MPa ile KA/TA oranı 0.25 olan karışımına ait MAK0.8_6MİK0.2 numunesinde elde edilmiş olmasına rağmen, aynı agrega granülometrisi için bu numuneye ait yarmada çekme dayanımı değerinde lifsiz karışıma ait numuneninkinden %33.8 oranında iyileşme meydana gelmiştir.



(a) KA/TA=0.25

(b) KA/TA=0.30

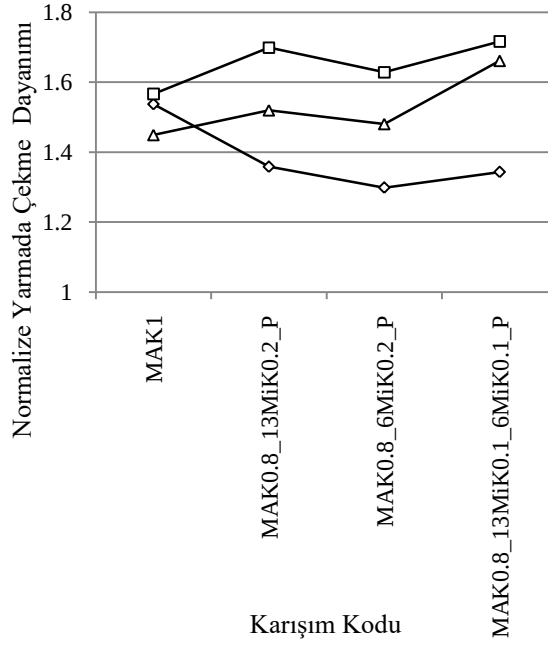


(c) KA/TA=0.35

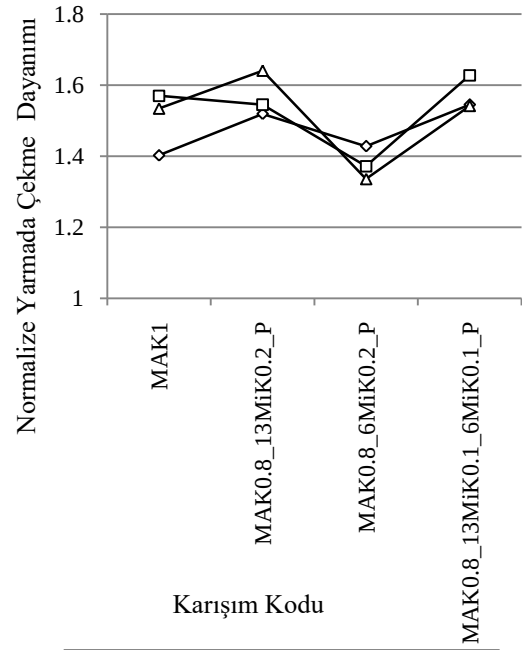
Şekil 4.38. Tek ve iki lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize yarmada çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.38’de tek ve iki lifli karışımların yarmada çekme dayanımlarının aynı agrega granülometrisine sahip lifsiz karışımların yarmada çekme dayanımlarına göre normalize edilmiş değerlerinin grafiği gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi sadece makro çelik lif kullanılan 3 günlük karışımların lifsize göre yarmada çekme dayanım değerlerinde en yüksek artış %53.7 oranıyla KA/TA oranı 0.25 olan karışıma ait numunelerde sağlanmışken, 28 ve 90 günlük kür yaşları için bu değer KA/TA oranı 0.30 olan karışımlara ait numunelerde sırasıyla, %57.02 ve %62.59 olarak hesaplanmıştır.

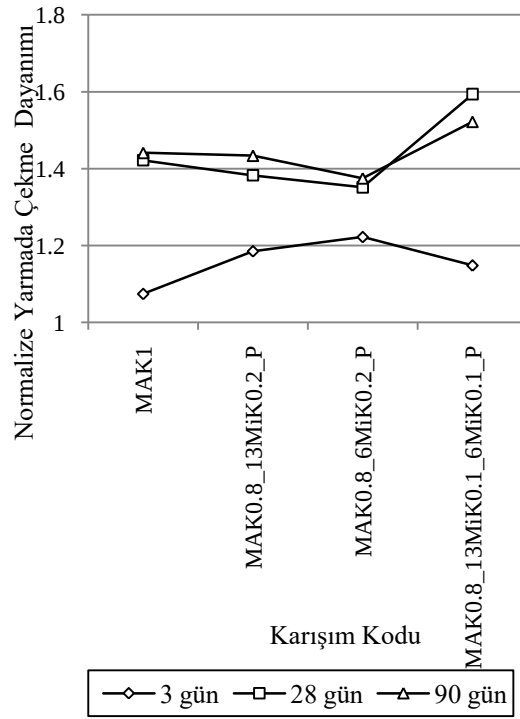
Tüm KA/TA oranları ve kür yaşları için tek lif ve ikili lif hibridizasyonuna sahip olan karışımlar dikkate alındığında, ikili lif hibridizasyonuna sahip MAK1_P karışımının yarmada çekme dayanım değerlerinin genel olarak en yüksek iken, MAK0.8_6MİK0.2 karışımına ait yarmada çekme dayanımının en düşük olduğu tespit edilmiştir. Buna ilaveten, MAK1_P karışımlarına ait yarmada çekme dayanımı değerlerinin diğer ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlara kıyasla daha yüksek çıkması, bu lif hibridizasyonunda hem makro çelik lif oranının fazla olmasına hem de PVA lifinin eklenmesinin etkisine dayandırılabilir. Ayrıca, Şekil 4.38’de görüldüğü gibi, tüm KA/TA oranları ve kür yaşları için tek lif olarak makro çelik lifin kullanıldığı karışımlara ait numunelerin yarmada çekme dayanım değerleri, makro çelik lifin mikro çelik lif ile yer değiştirilmesiyle elde edilen ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlarına ait numunelerinkinden genel olarak daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, makro çelik lifin daha uzun ve elastisite modülünün daha yüksek olmasına (Tabatabaeian vd. 2017), ve özellikle kancalı uçlu uzun çelik liflerin betonun içindeki çatlak genişliğinin iki ucunu köprülemede daha etkili olmasına (Şahmaran ve Yaman, 2007; Haddadou vd. 2014) dayandırılabilir. Ayrıca, deneysel program kapsamında yapılan testlere ait sonuçlardan, agrega içeriğine ve kür yaşına bakılmaksızın, karışımlara kısa ve düz çelik lif dahil edilmesinin basınç dayanımı değerleri üzerinde, uzun ve kancalı uçlu çelik liflerin ilave edilmesinin ise yarmada çekme dayanımı değerleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Mevcut literatürde, makro ve mikro çelik lif içeren karma lif üzerine yapılan çalışmalarda (Ahmad ve Umar, 2018; Sahmaran vd. 2005; Şahmaran ve Yaman, 2007) da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



(a) KA/TA=0.25



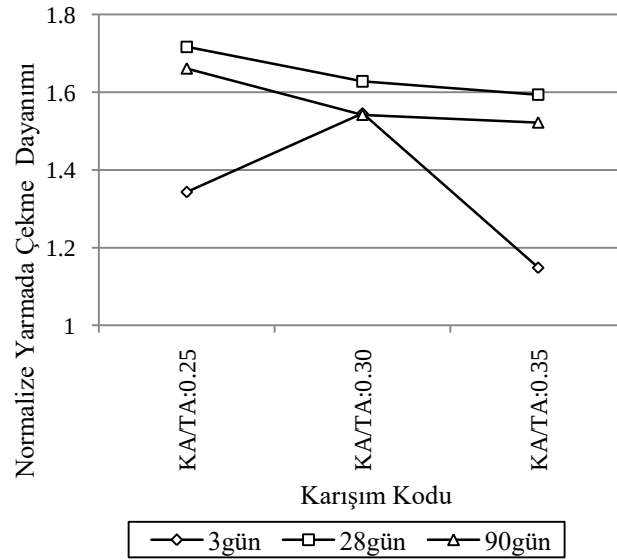
(b) KA/TA=0.30



(c) KA/TA=0.35

Şekil 4.39. Tek, üç ve dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize yarmada çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.39’da gösterildiği üzere, tek lif olarak makro çelik lif içeren karışım ile üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar kıyaslandığında, özellikle PVA lifinin eklenmesinin MAK0.8_13MİK0.2_P karışımının yarmada çekme dayanımına genel olarak pozitif etkisi olduğu ve MAK1 karışımından daha yüksek yarmada çekme dayanımı elde edilmiştir. Sonuçta, üçlü lif içeren karışımlarda hem narinliği hem de boyu daha fazla olan 13/.16 OL mikro çelik lifinin yarmada çekme dayanımına daha çok katkısı olduğu görülmüştür. Özellikle, KA/TA oranının 0.30 olduğu karışımlarda 13/.16 OL mikro çelik lifinin 6/.16 OL mikro çelik life göre çok daha belirgin bir artışa neden olduğu bulunmuştur. Örneğin, OL 13/.16 içeren üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışımların 3, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımları, lifsiz karışımlara ait numunelerin dayanımlarına kıyasla, sırasıyla, %52, %54.5 ve %64.1 oranında artış meydana gelirken OL 6/.16 mikro çelik lif içeren karışımlarda bu oranlar sırasıyla %42.8, %37.2 ve %33.6 olarak hesaplanmıştır. Benzer konuda yapılan bir çalışmada (Tabatabaeian vd. 2017) da, karışıma daha uzun ve düz çelik lif dahil edilmesinin, betondaki iç mikro çatlakları yeterli köprüleyebilmesi sebebiyle yarmada çekme dayanımını olumlu etkilediği ifade edilmiştir.

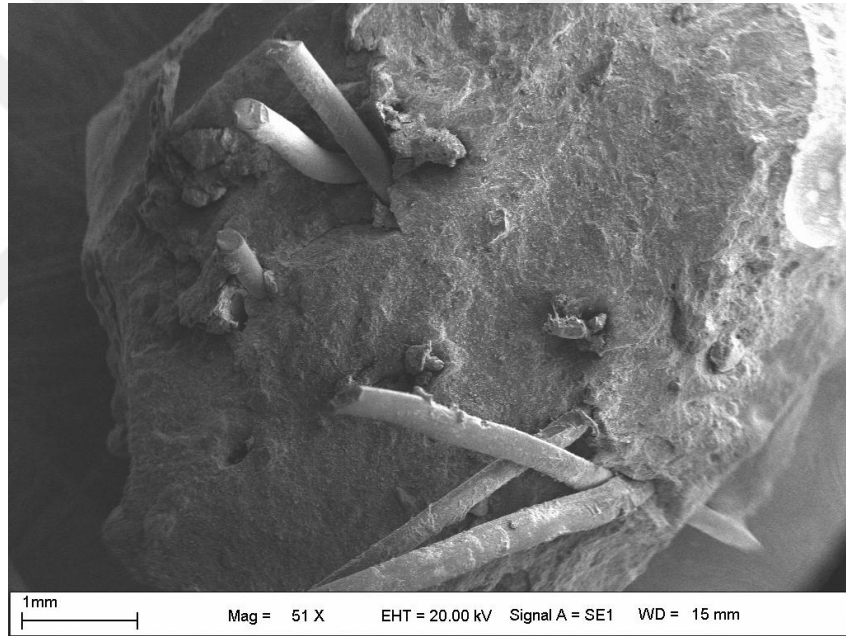


Şekil 4.40. Dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize yarmada çekme dayanım değerleri

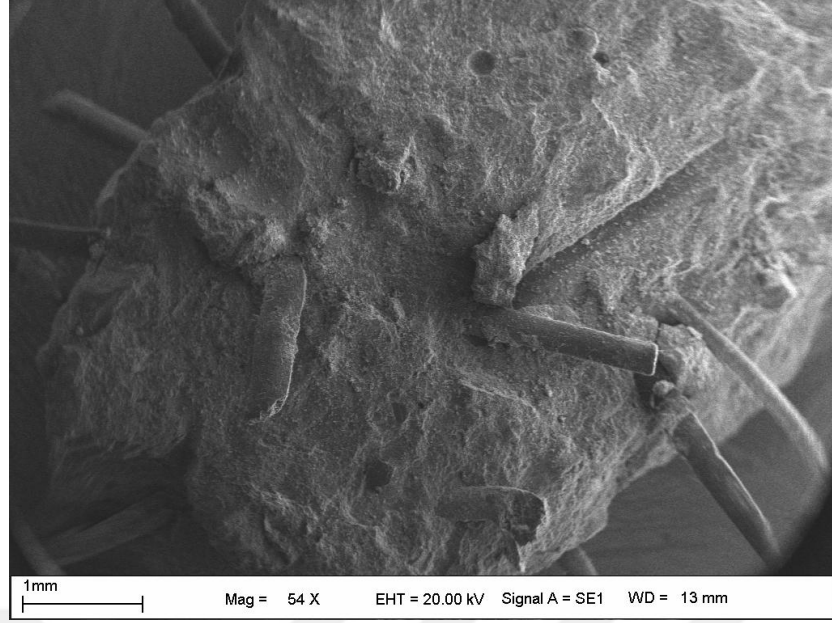
Şekil 4.40’da dörtlü lif hibridizasyona sahip karışımlara ait numunelerin yarmada çekme dayanımları, tüm KA/TA oranları ve kür yaşları için lifsiz karışımlara göre normalize değerleri esas alınarak karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere,

KA/TA oranlarından bağımsız olarak, dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerde lifsiz karışımlara göre normalize yarmada çekme dayanımında artış meydana gelmiştir. Ayrıca, KA/TA oranı 0.25 olan dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin yarmada çekme dayanımlarının, KA/TA oranı 0.30 ve 0.35 olan karışıma kıyasla, genel olarak daha olumlu bir iyileşme meydana gelmiştir.

Tek lif ve karma lif hibridizasyonuna sahip tüm karışımların KA/TA oranlarına bağlı olarak 3, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanım değerlerinin değişiminde, genelde liflerin tip ve narinliklerinin etkisi göze çarparken, liflerin farklı yönelmesi, homojen olmayan dağılımı ve liflerin oluşturduğu hava boşlukları (Ahmad ve Umar, 2018) nedeniyle basınç dayanım değerlerinde de olduğu gibi bazı istisnai durumlar da gözlemlenmiştir (bakınız Şekil 4.31, Şekil 4.41).



(a) MAK0.8_6MİK0.2_P



(b) MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P

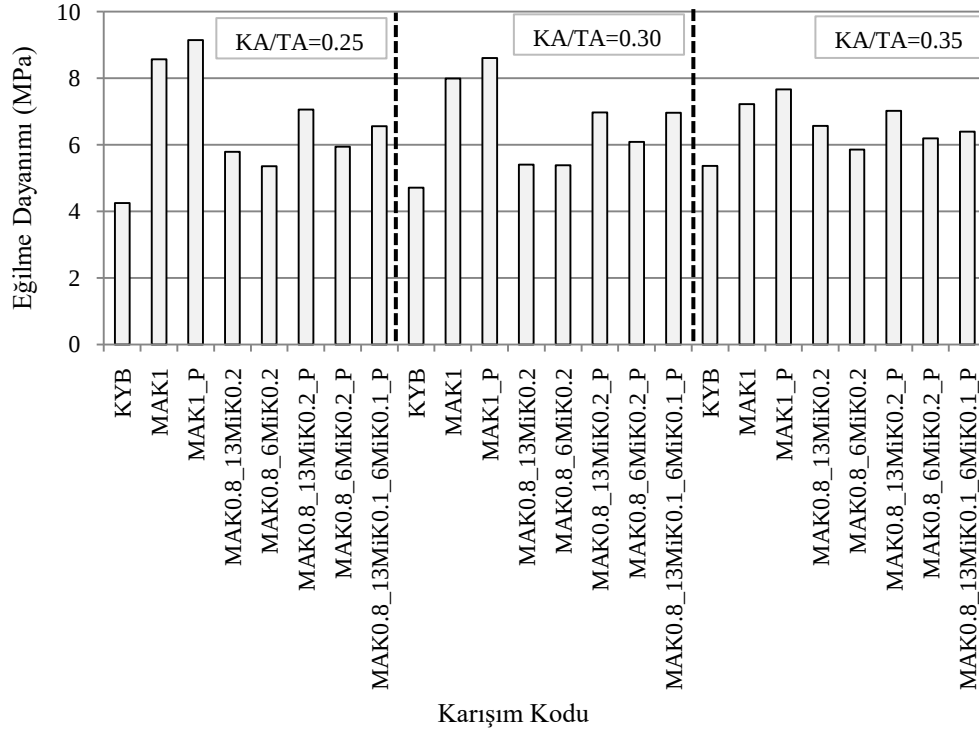
Şekil 4.41 Farklı lif yönlenmesi ve liflerin homojen olmayan dağılımı ile ilgili SEM görüntüleri

4.2.1.4. Eğilme performansı

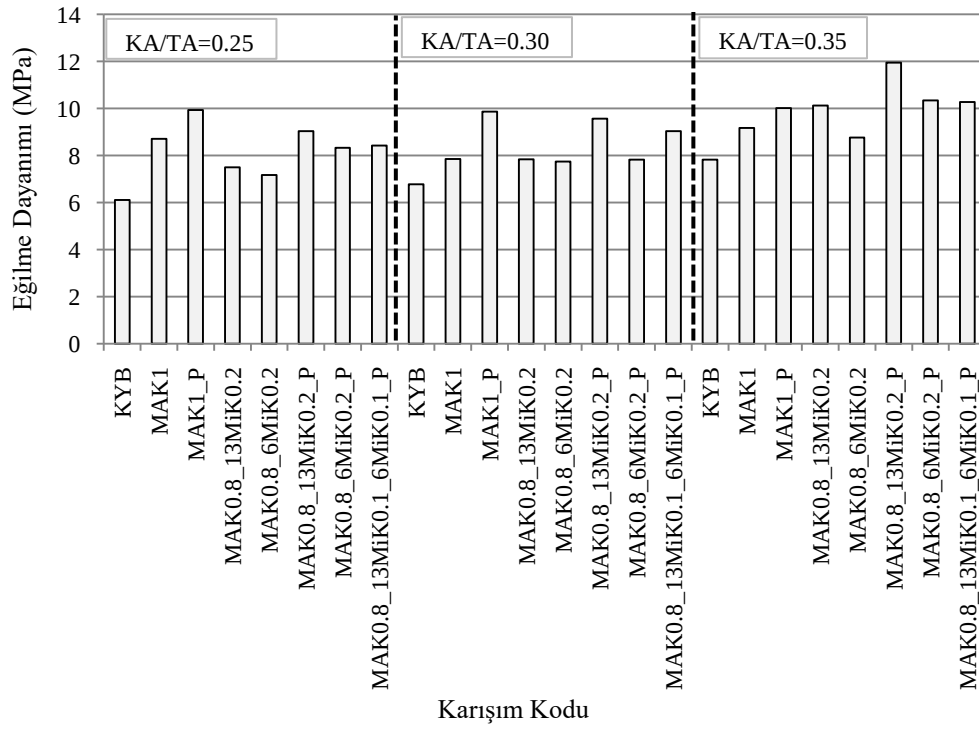
Tez kapsamında hazırlanan 24 karışımın eğilme dayanımı ve yük-orta açıklık sehim eğrileri tespiti için 3 günlük erken dayanımları, 28 günlük standard dayanımları ve içerisinde puzolan bulundurması nedeniyle 90 günlük nihai dayanımlarını bulmak amacıyla deplasman kontrollü dört noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır.

4.2.1.4.1 Eğilme dayanımı

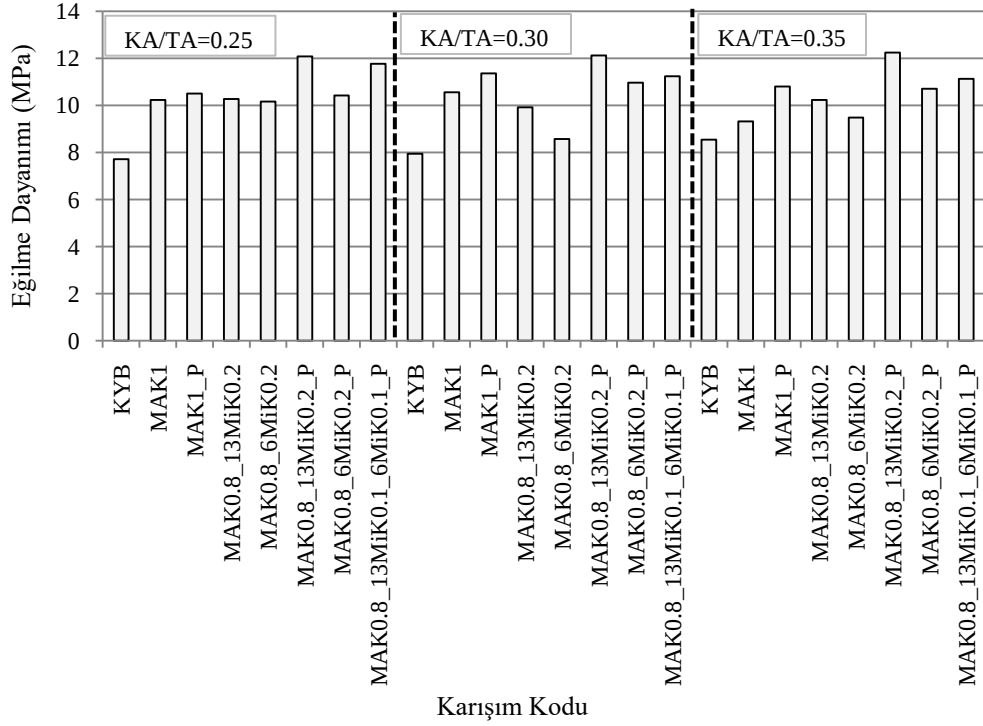
Bu çalışmada hazırlanan karışımlara ait numunelerin eğilme dayanım değerleri, 3 mm'lik orta açıklık deplasmanına kadar çizilen yük – sehim eğrisinde elde edilen maksimum yük değeri kullanılarak belirlenmiştir. Her yaş için 3'er adet 100x100x400 mm³ prizma test edilmiş ve testlerin ortalaması alınarak eğilme dayanımları bulunmuştur. Farklı lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin eğilme dayanımlarının toplu sonuçları, Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçların detaylı gösterimi ise Çizelge EK-4'de mevcuttur. Sonuçların grafiksel gösterimi Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44'de yer almaktadır.



Şekil 4.42 3 günlük eğilme dayanımı test sonuçları

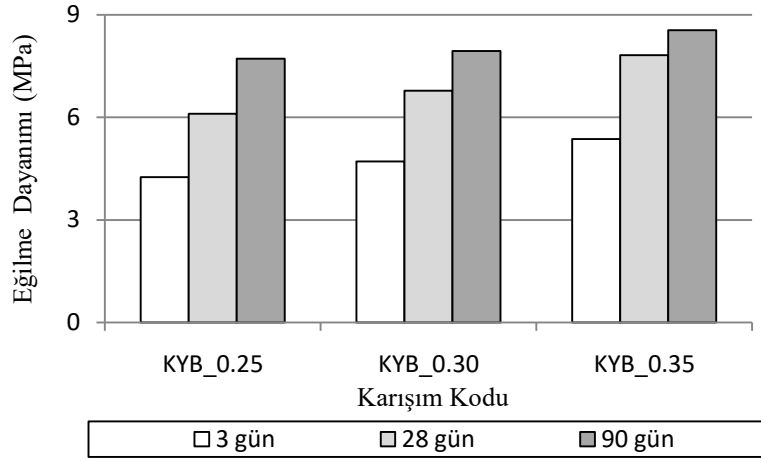


Şekil 4.43 28 günlük eğilme dayanımı test sonuçları



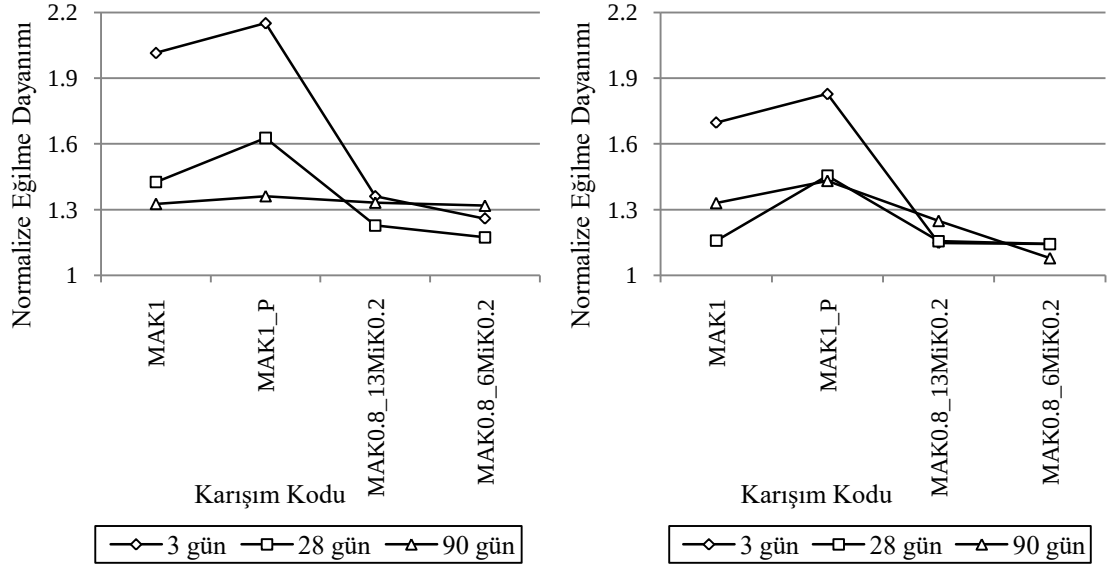
Şekil 4.44 90 günlük eğilme dayanımı test sonuçları

Lifsiz karışımlarda, KA/TA oranı arttıkça, yani kaba agrega miktarı arttıkça, karışımların basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı değerlerinde olduğu gibi eğilme dayanımında da artma meydana gelmiştir (bakınız Şekil 4.45). Tüm karışımların kür yaşı arttıkça lif-matris arayüz özellikleri iyileştiğinden dolayı eğilme dayanımları artmıştır. KA/TA oranı 0.25 olan en ince agrega granülometrisine sahip lifsiz KYB karışımlarının 3, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları, sırasıyla, 4.25 MPa, 6.71 MPa ve 7.71 MPa bulunmuştur. KA/TA oranı 0.25 olan lifsiz karışımlarinkine kıyasla, KA/TA oranının 0.30 olduğu lifsiz karışımların eğilme dayanımı değerleri, sırasıyla, %10.7, %11 ve %2.9 oranlarında artış gösterirken, KA/TA oranı 0.35 olan lifsiz KYB karışımlarının eğilme dayanımı değerleri ise, sırasıyla, %26.2, %28 ve %10.8 oranlarında artmıştır.



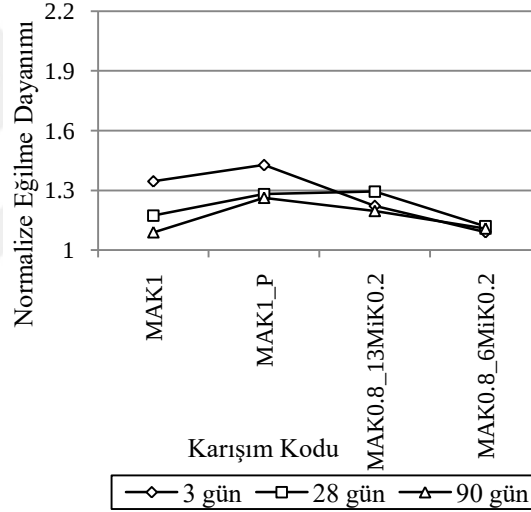
Şekil 4.45. Lifsiz KYB karışımların eğilme dayanımı

Çizelge 4.2’de de görülebileceği gibi KA/TA oranından ve kür yaşından bağımsız olarak, lif içeren karışımların hepsinin eğilme dayanım değerleri lifsizinkilere kıyasla daha fazladır. Bunun nedeni, liflerin, etkili köprüleme ile birlikte çatlak başlamasını ve büyümesini engelleyerek enerji yutma kapasitesi daha yüksek bir mekanizma oluşturmalarıdır (Bentur ve Mindess, 1990). Ayrıca, hidrate olmuş çimento taneleri ile liflerin arasındaki arayüz bölgesi de eğilme performansını etkilemektedir (Bentur, 2000). Bunun bir sonucu olarak, kür yaşının ilerlemesiyle birlikte karışımların eğilme dayanımlarında artış meydana gelmiş ve lif tipi ve narinliklerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri daha belirgin olarak gözlemlenmiştir. Şöyle ki, 3 gün kür yaşına sahip lifli ve lifsiz tüm karışımlar arasından tüm KA/TA oranlarında en yüksek eğilme dayanımı %1 makro çelik lif ile birlikte PVA lifi içeren MAK1_P karışımında elde edilirken, 90 günlük numunelerde tüm KA/TA oranları için 13/.16 OL mikro çelik lif ile birlikte PVA lifi içeren MAK0.8_13MİK0.2_P karışımı, diğer lif hibridizasyonuna sahip karışımlara kıyasla, en iyi eğilme performansı göstermiştir.



(a) KA/TA=0.25

(b) KA/TA=0.30



(c) KA/TA=0.35

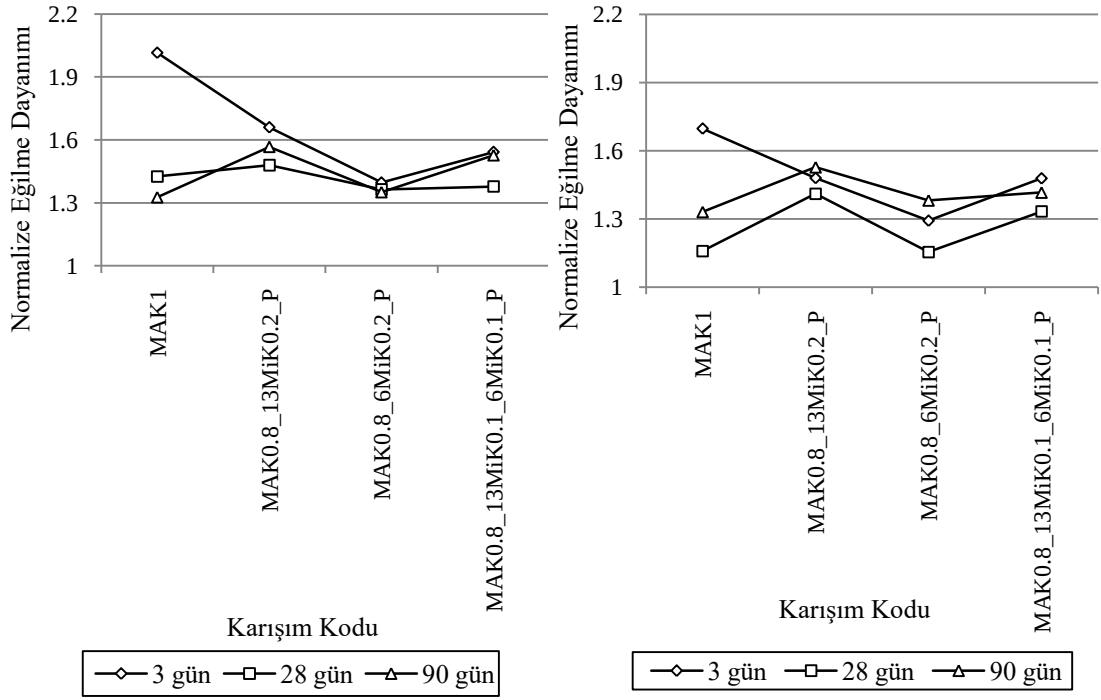
Şekil 4.46. Tek ve iki lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.46’da tek ve iki lifli karışımların eğilme dayanımlarının aynı KA/TA oranına sahip lifsiz karışımların eğilme dayanımlarına göre normalize edilmiş değerlerinin grafiği gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, KA/TA oranları dikkate alındığında, tüm kür yaşları için, lif içermeyen karışımların eğilme dayanım değerlerine kıyasla, en yüksek eğilme dayanım değerleri KA/TA oranı 0.25 olan ve sadece makro çelik lif içeren MAK1 karışımında elde edilmiştir. Özellikle KA/TA oranı 0.25 olan 3 günlük MAK1 karışımının eğilme dayanımı lifsizinkine göre %101.5 artış ile en çok iyileşmenin olduğu numune olmuştur.

Tüm KA/TA oranları ve kür yaşları için tek lif ve ikili lif hibridizasyonuna sahip olan karışımlar kıyaslandığında, ikili lif hibridizasyonuna sahip MAK1_P karışımının eğilme dayanım değerlerinin en yüksek, MAK0.8_6MİK0.2 karışımına ait eğilme dayanımının ise en düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu, ikili lif hibridizasyonunun olduğu diğer karışımlara nazaran MAK1_P karışımının daha yüksek oranda makro çelik lif içermesi ve PVA lifinin özgül ağırlığının mikro çelik liflere kıyasla daha düşük olması nedeniyle karışıma daha fazla oranda dahil edilmesine dayandırılabilir. Mikro çelik liflerin özgül ağırlığının eğilme dayanımı üzerine etkisi ile ilgili benzer sonuç, yapılan bir tez çalışmasında (Demirhan, 2017) da bulunmuştur. Ayrıca, KA/TA oranları 0.25 ve 0.30 için, 3 ve 28 günlük tek lif olarak makro çelik lif içeren MAK1 karışımına ait numunelerin normalize eğilme dayanım değerleri, makro çelik lif ve mikro çelik lifin birlikte kullanıldığı ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin eğilme dayanım değerlerine göre genel olarak daha yüksek çıkarken, KA/TA oranı 0.35 için sadece makro çelik lif içeren MAK1 ve mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonuna sahip numunelerin normalize eğilme dayanım değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Buna ilaveten, tüm KA/TA oranları için, 90 günlük numunelerin eğilme dayanım değerleri arasındaki fark azalmıştır. Bu durum, erken eğilme dayanımlarında kancalı uçlu ve daha uzun olan makro liflerin lif-matris arayüzeyindeki aderansın ve dolayısıyla, çatlakları köprülemedeki etkinliğinin daha iyi olmasına dayandırılabilir. Nihai eğilme dayanım değerlerindeki farkın azalmasının nedeni ise, matris dayanımının artmasıyla birlikte lif-matris arayüzeyinin iyileşmesine bağlı olarak mikro çelik liflerin çatlak köprülemedeki etkinliğinin artması olarak düşünülebilir. Farklı tip ve narinliğe sahip lifler kullanılarak yapılan birçok deneysel çalışmada (Rashiddadash vd. 2014; Beglarigale ve Yazıcı, 2015; Wu vd. 2016; Abu-Lebdeh vd. 2011) da düz liflere kıyasla daha etkili kenetlenme sağlayan kancalı ucun, etkili aderansı dolayısıyla ilk çatlak sonrası daha iyi performans gösterdiğine dair benzer sonuçlar bulunmuştur.

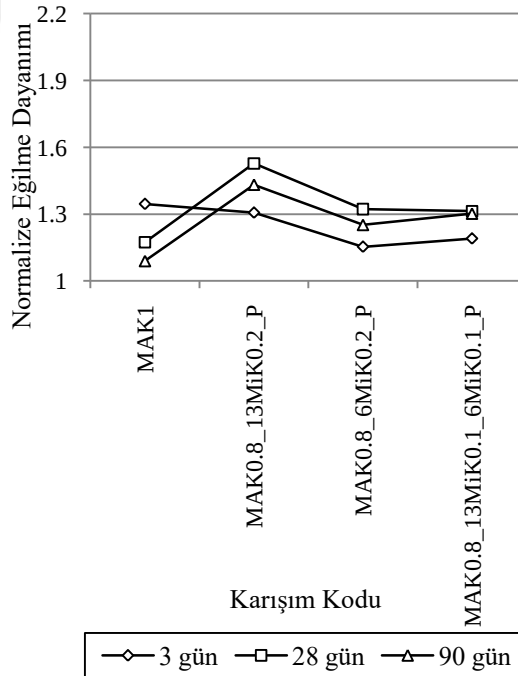
Yine Şekil 4.46'dan görülebileceği üzere, mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar birbirleriyle kıyaslandığında, OL 13/16 mikro çelik lifin OL 6/16 mikro çelik life nazaran, karışımların eğilme dayanım değerlerini daha çok geliştirdiği bulunmuştur. Bu durum, daha uzun olan düz çelik liflerin, iç çatlaklar arasını köprülemede daha etkili rol oynamasına ve böylece çatlak gelişimini engellemesine dayandırılabilir. Literatürdeki kısa ve uzun çelik lif

kullanılarak yapılan bazı çalışmalarda (Yu vd. 2014; Rambo vd. 2014; Pajak ve Ponikiewski, 2017) da aynı sonuç bulunmuştur.



(a) KA/TA=0.25

(b) KA/TA=0.30



(c) KA/TA=0.35

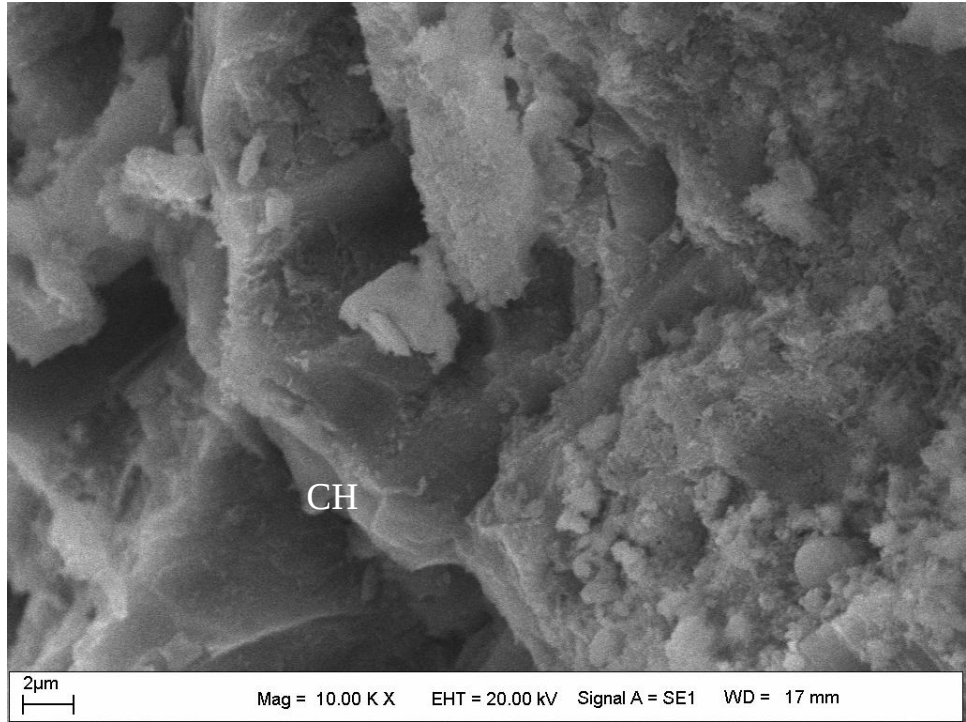
Şekil 4.47. Tek, üç lifli ve dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.47’de gösterildiği üzere, tek lif olarak makro çelik lif içeren karışım ile üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar kıyaslandığında, tüm KA/TA oranları için, 3 gün kür yaşına sahip karışımlar arasından en yüksek eğilme dayanımı, sadece makro çelik lif içeren MAK1 karışımına ait numunelerde elde edilmiştir. 28 günlük numunelerde ise, KA/TA oranı 0.25 ve 0.30 olan ve OL 6/.16 mikro çelik lif içeren MAK0.8_6MİK0.2_P karışımları ve KA/TA oranı 0.25 olan dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımları hariç, üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait numunelerin eğilme dayanım değerlerinin MAK1 karışımından fazla olduğu bulunmuştur. Bunun yanında, 90 günlük numunelerin eğilme dayanım değerleri dikkate alındığında, tüm KA/TA oranları için, üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip tüm karışımların eğilme dayanımlarının sadece makro çelik lif içeren karışımlarinkine göre daha fazla çıktığı bulunmuştur. Hatta, tüm KA/TA oranları için, OL 13/.16 mikro çelik lif içeren 90 günlük üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin eğilme dayanım değerleri en yüksek çıkmıştır. Bu bulguların, 90 gün kür yaşına sahip üçlü lif hibridizasyonu içeren karışımlara ait numunelerin eğilme dayanımının tek lif olarak makro çelik lif içeren karışımlara ait numunelerinkinden daha iyi olması, hidrasyon ürünlerinden C-S-H’nin puzolanik reaktivite sonucu yeterli düzeyde gelişmesiyle matrisin güçlenerek tüm liflere daha etkili bir çatlak köprüleme imkanı vermesinden kaynaklandığı söylenebilir (bakınız Şekil 4.48(a)). Başka bir deyişle, Şekil 4.48(b)’da da görüldüğü üzere, erken yaşlarda hidrasyon reaksiyonlarının tam manasıyla gelişmemesine bağlı olarak matrisin yeterli dayanıma sahip olmaması ve dolayısıyla lif-matris arayüzeyinin zayıflığı sebepleriyle, kısa ve düz mikro çelik liflerin çatlakları köprülemede yetersiz kalmasına dayandırılabilir. Aksi takdirde, erken yaşlarda, çatlak köprülemede sadece daha uzun ve kancalı uçlu makro çelik lifler etkili olabilecektir. Üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarda, matrisin güçlenmesiyle birlikte mikro liflerin de çatlak köprülemede etkili olmasına bağlı olarak lifler arasında sinerji oluştuğu ve böylece bu karışımlarda, üç lifin toplam performansının sadece makro çelik lifin göstereceği performansı aştığı düşünülmektedir. Ayrıca, nihai dayanıma ulaşmış matrisler için sadece makro çelik lif içeren karışıma kıyasla karma lifli karışımlarda, mikro liflerin karışıma dahil edilmesinin sonucu olarak, matristeki artan lif yoğunluğu sebebiyle özellikle mikro çatlakların birleşip yayılmasının engellendiği ve dolayısıyla numunelerin yük taşıma kapasitesinin arttığı söylenebilir. Banthia ve Gupta (2004) tarafından yapılan çalışmada da karma lifli karışımlardaki

lif yoğunluğu sebebiyle, liflerin arasındaki mesafenin azalmasına ve böylece mikro çatlakların birleşmesinin engellenmesine bağlı olarak karışımlara ait numunelerin eğilme dayanımlarını arttığı bulunmuştur.



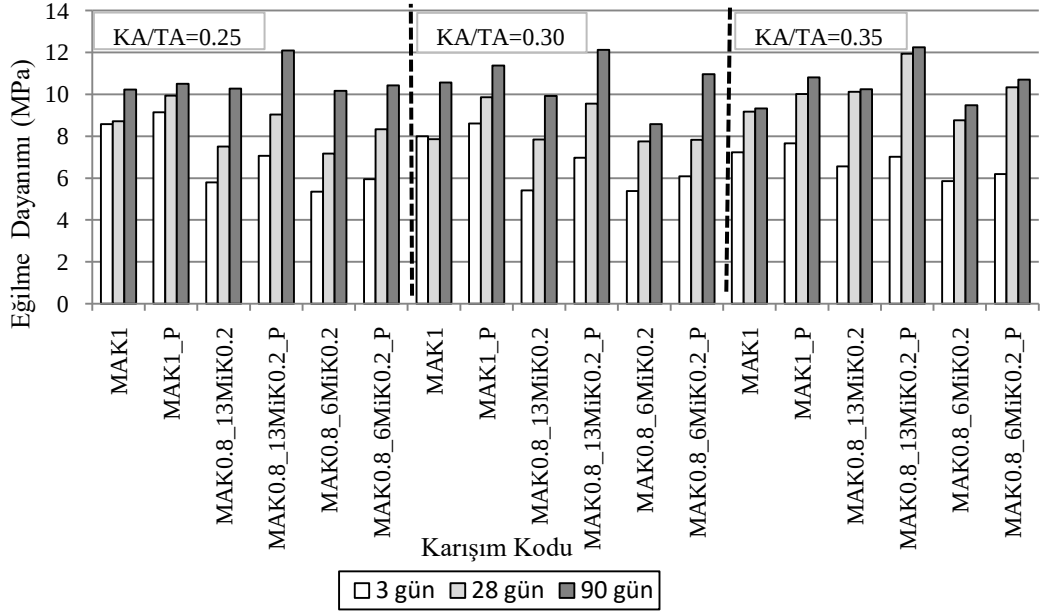
(a) 90 günlük



(b) 3 günlük

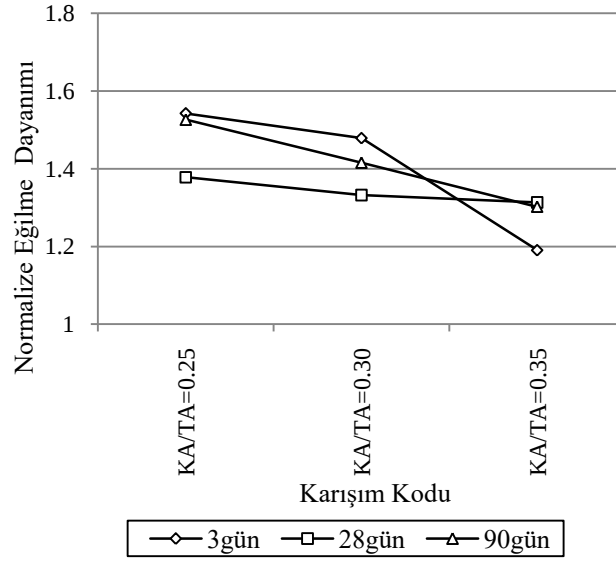
Şekil 4.48 Numunelerin lif-hamur arayüzey SEM görüntüleri

Şekil 4.49'dan görülebileceği üzere, PVA lifinin, karma lif takviyeli karışımların eğilme dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, hem sadece makro çelik lif içeren karışımlar ile makro çelik ve PVA lifinin ikili hibridizasyonunun olduğu karışımlar, hem de farklı mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlar ile PVA lifinin eklendiği üçlü lif hibridizasyonu olan karışımlar karşılaştırılmıştır. KA/TA oranından ve kür yaşından bağımsız olarak, PVA lifi içeren karışımlara ait numunelerin eğilme dayanımlarında, aynı çelik lif (sadece makro veya makro ile birlikte mikro çelik lif) içeriğine sahip PVA lifi içermeyen karışımlarınkine göre artma meydana gelmiştir. Bu duruma neden olarak, diğer karışımlara kıyasla, bu karışımların PVA lifi de içermesinin yanında, önceki çalışmalarda (Xu vd. 2010; Bentur ve Mindess, 1990) da bulunduğu gibi, PVA lifinin hidrofilik yapısı gösterilebilir. PVA lifinin doğasından kaynaklanan bu hidrofilik yapısı, PVA lifinin, kendi etrafını saran çimento esaslı matris ile güçlü bağ oluşturarak çatlak oluşumu ve gelişimini engellemede etkili olmasına neden olmaktadır (bakınız Şekil 4.13(b)). Ayrıca, PVA lifinin yapısındaki hidroksil grubu moleküller arası hidrojen bağı oluşması için olanak sağlar. Bu da, PVA ve matris arasındaki yüzey aderans dayanımının güçlenmesine neden olmaktadır. PVA lifinin eğilme dayanımı üzerindeki olumlu etkisi, Toutanji vd. (2010) tarafından da tespit edildiği gibi, PVA lifinin uzaması ve böylece matris içerisindeki farklı bölgelere yük transfer edebilmesi nedeniyle yüke maruz kalan yüzeyler arasında uygulanan kuvvetin daha düzenli bir şekilde yayılabilmesine dayandırılabilir. Sonuç olarak, çimento ile kimyasal uyumluluğu, su ile olan yakınlığı, yüksek maksimum çekme dayanımına sahip olması ve uzama özelliği nedenlerinden dolayı PVA lifi eğilme dayanımını geliştirmede önemli rol oynayan bir lif tipidir.



Şekil 4.49. PVA lifinin karma lif takviyeli karışımların eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.50’de dörtlü lif hibridizasyona sahip karışımlara ait numunelerin eğilme dayanımları, tüm KA/TA oranları ve kür yaşları için lifsiz karışımlara göre normalize değerleri esas alınarak karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere, tüm kür yaşları için, dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin lifsiz karışımlara göre en yüksek normalize eğilme dayanım değerleri, KA/TA oranı 0.25 olan karışımlara ait numunelerde elde edilirken, diğer KA/TA oranlarında normalize eğilme dayanım değerlerinde daha az oranda iyileşme meydana gelmiştir. Örneğin, KA/TA oranı 0.25 olan en ince agrega granülometrisine sahip karışımda, lifsiz karışımın 3, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarına göre, sırasıyla, %54.2, %37.8 ve %52.7 oranlarında artış sağlanmıştır. Bunun yanında, KA/TA oranı 0.35 olan dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin eğilme dayanımlarında ise, lifsizinkine göre, sırasıyla, %19.1, %31.3 ve %30.2 oranlarında iyileşme bulunmuştur.



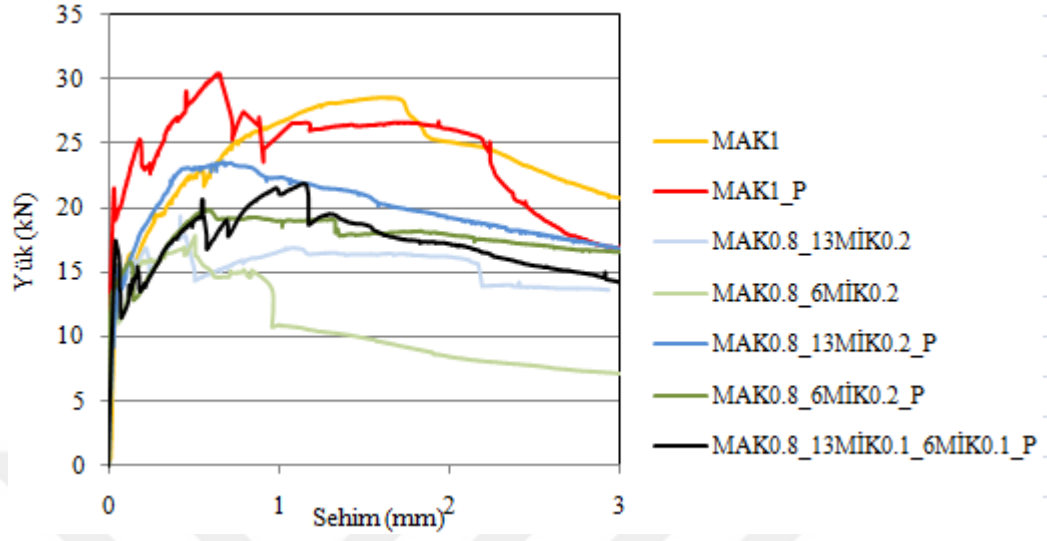
Şekil 4.42. Dört lifli karışımların lifsiz karışımlara göre normalize eğilme dayanım değerleri

4.2.1.4.2 Yük-orta açıklık sehim eğrileri

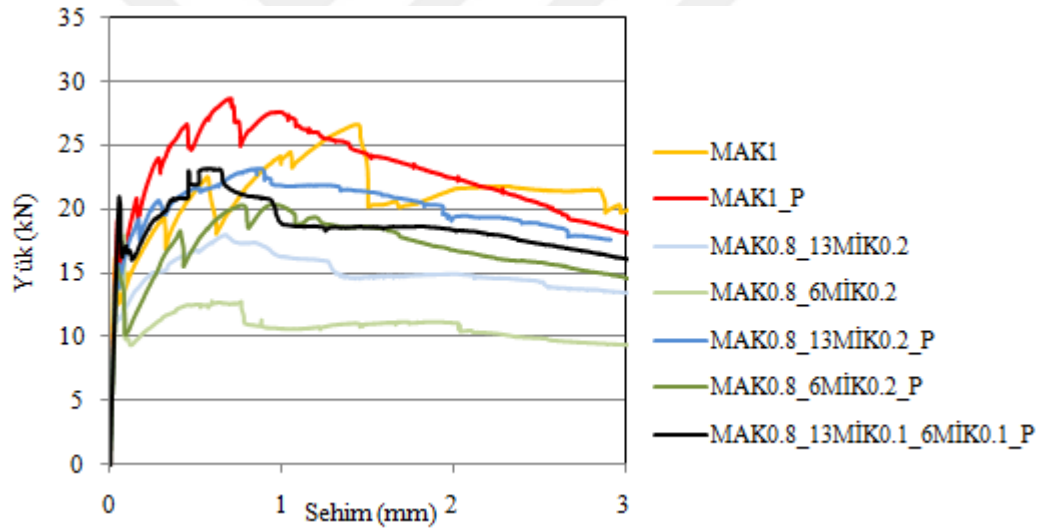
Numunenin dört noktalı eğilme deneyinde test edilmesi neticesinde, çekme bölgesinde ilk çatlak oluşumuyla birlikte ilk gerilme düşüşünün gözlemlendiği dayanıma ilk çatlak dayanımı denir. Numunenin sergileyebileceği en büyük yük ve bu yüke karşılık gelen sehime de orta açıklık sehimi veya orta açıklık sehim kapasitesi denir. Şekil 4.51, 4.52 ve 4.53’de lif takviyeli KYB karışımlara ait numunelerin yük – orta açıklık sehim eğrileri gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, KA/TA oranı ve kür yaşından bağımsız olarak, bütün numunelerde ilk çatlak oluşumundan sonra artan sehim ile birlikte numunelerin yük taşıma kapasiteleri de artarak devam etmiştir.

Tüm KA/TA oranları için, 3 günlük sadece kancalı uçlu uzun olan makro çelik liflerin kullanıldığı MAK1 karışımlara ait prizmatik kiriş numunelerin açıklık ortası sehimleri en yüksek çıkarken, 90 günlük numunelerde MAK1 karışımlara ait numunelerin açıklık ortası sehim değerlerinde düşüş olmuştur. Tüm KA/TA oranları için, mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait prizmatik kiriş numunelerin açıklık ortası sehimleri ise, kür yaşı arttıkça genelde azalma göstermiştir. Ayrıca, KA/TA oranına bakılmaksızın, 3 günlük üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait numunelerin açıklık ortası sehimi, PVA lifi içermeyen ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerinkinden daha

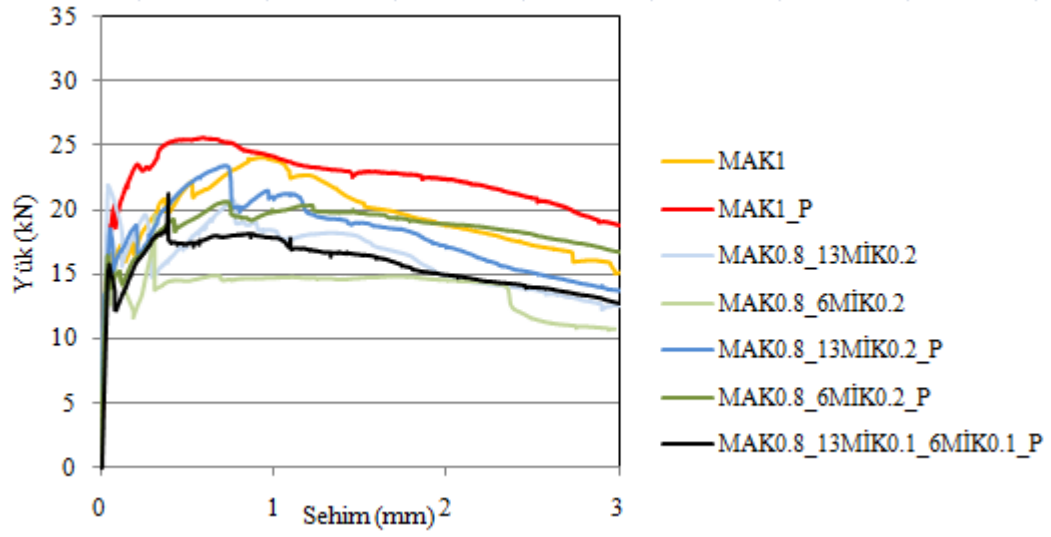
yüksek çıkarken, KA/TA oranı 0.25 olan numuneler hariç, 90 günlük numuneler için söz konusu durumun tersi bir durum oluşmuştur.



(a) KA/TA = 0.25

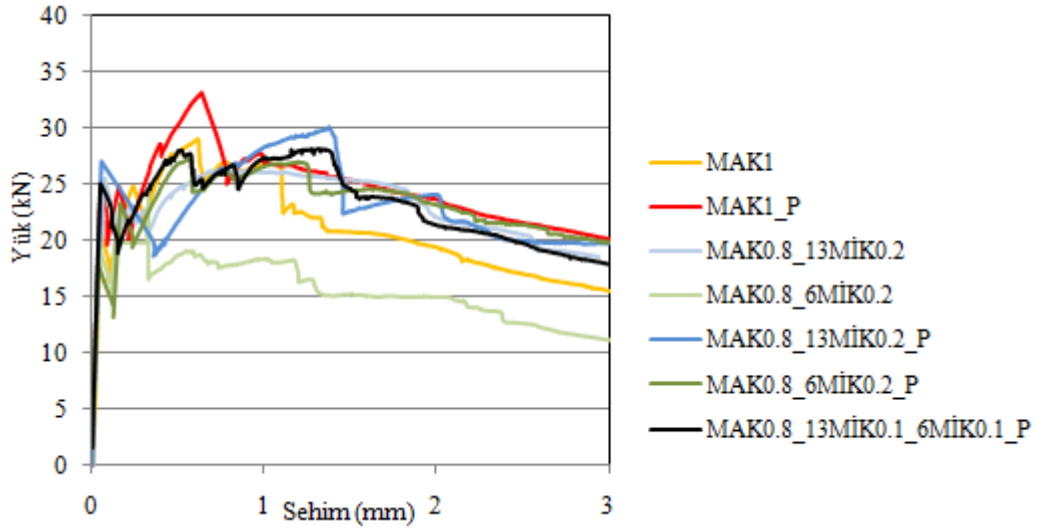


(b) KA/TA = 0.30

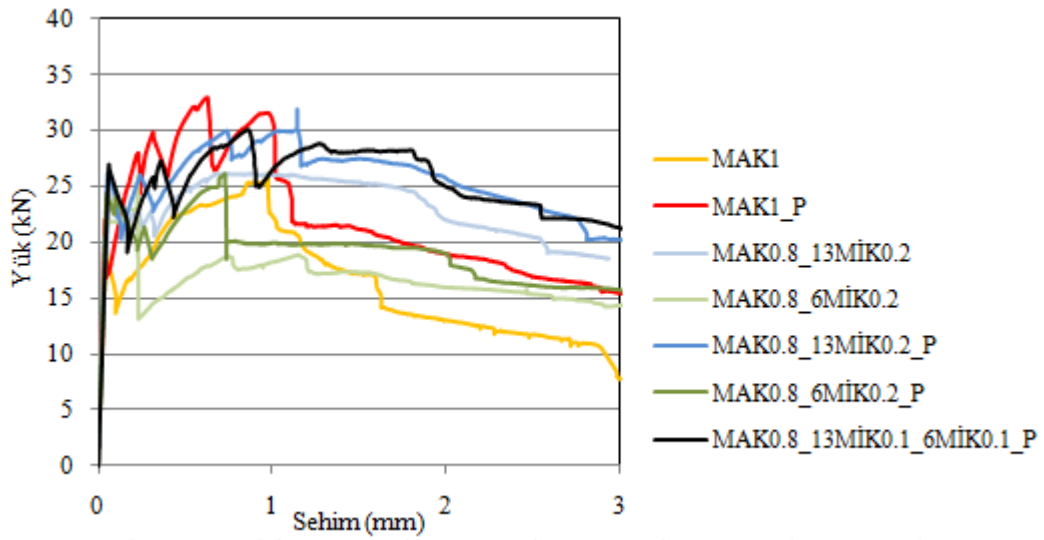


(c) $KA/TA = 0.35$

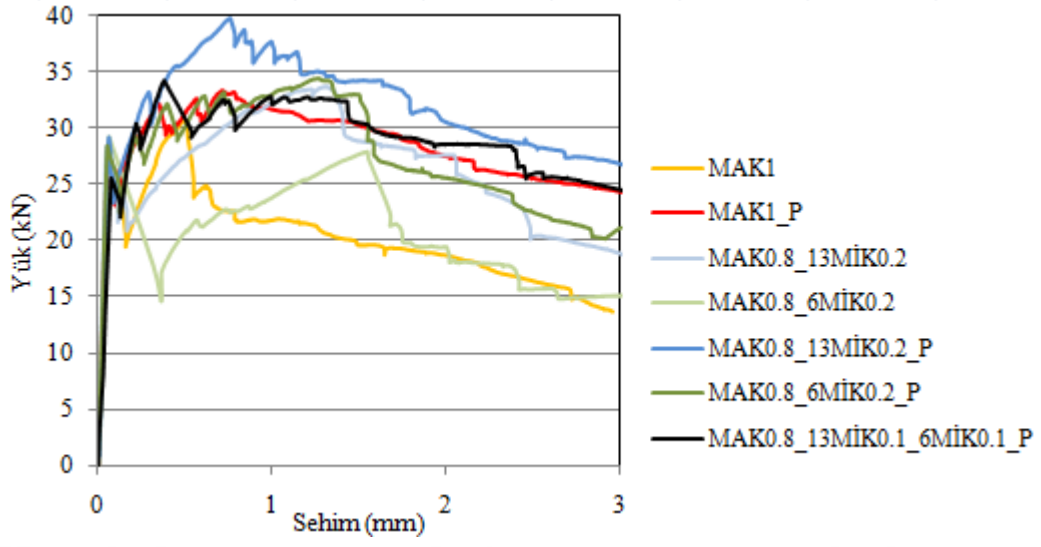
Şekil 4.51 3 günlük numunelerin yük – sehim eğrileri



(a) $KA/TA = 0.25$

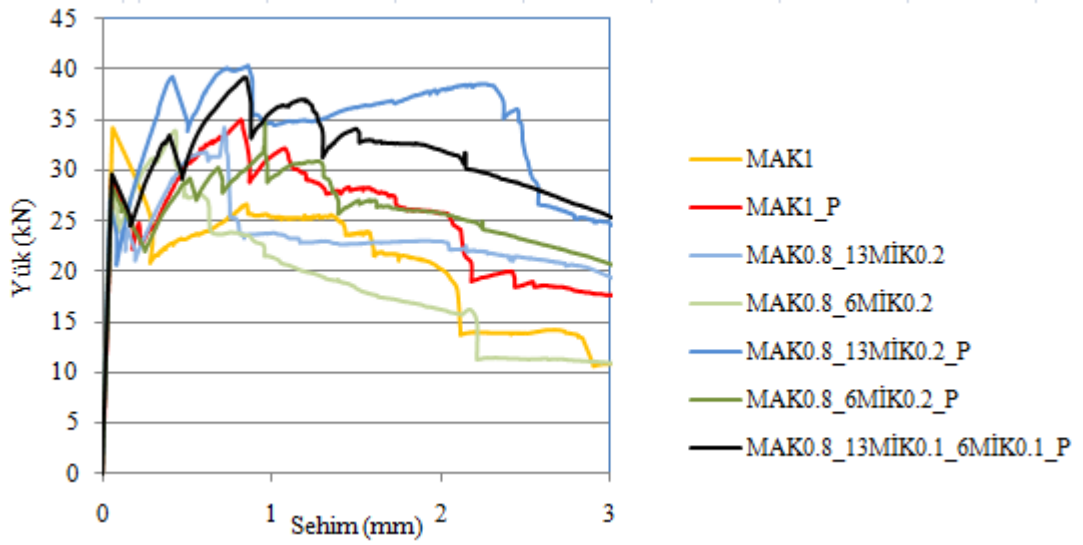


(b) $KA/TA = 0.30$

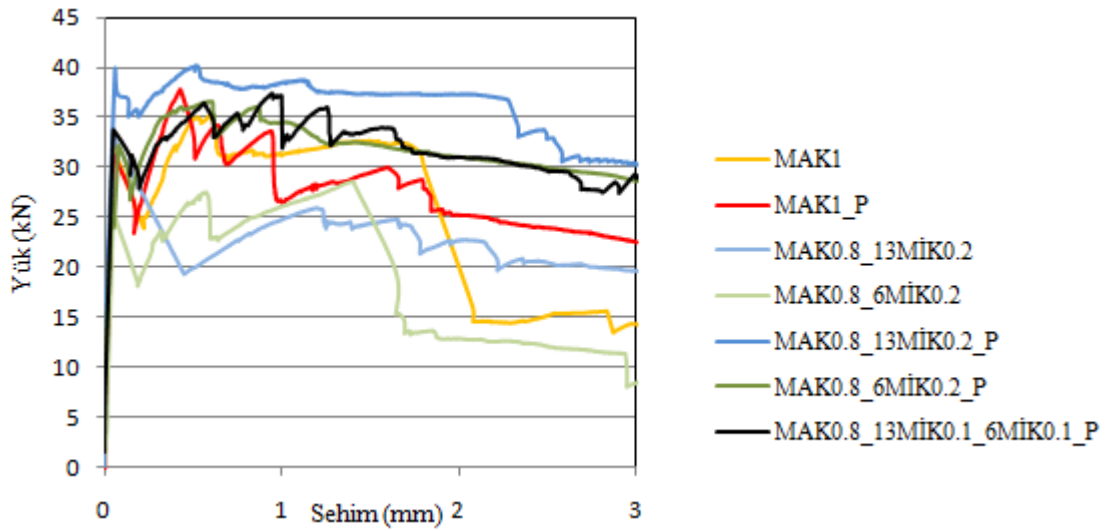


(c) $KA/TA = 0.35$

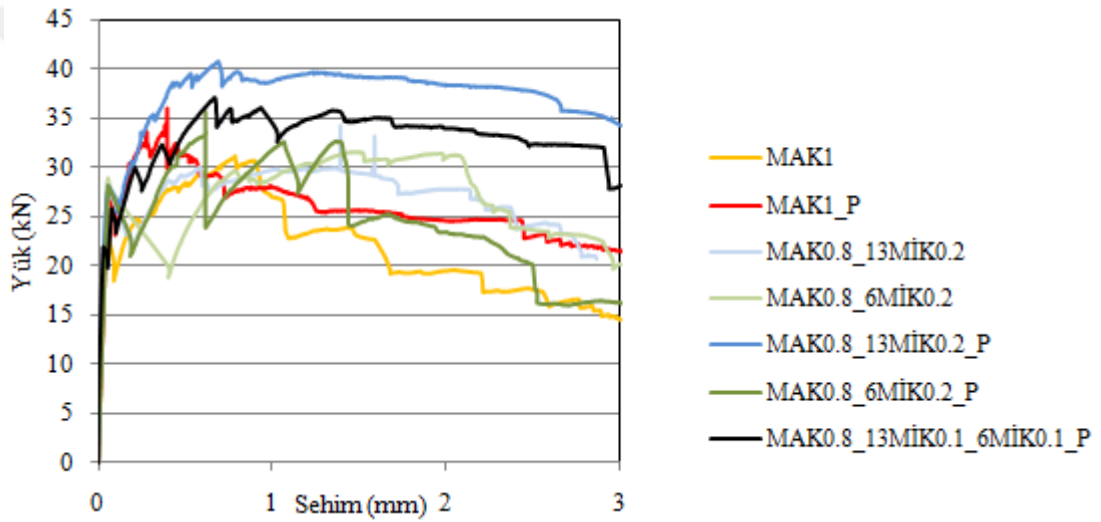
Şekil 4.52 28 günlük numunelerin yük – sehim eğrileri



(a) $KA/TA = 0.25$



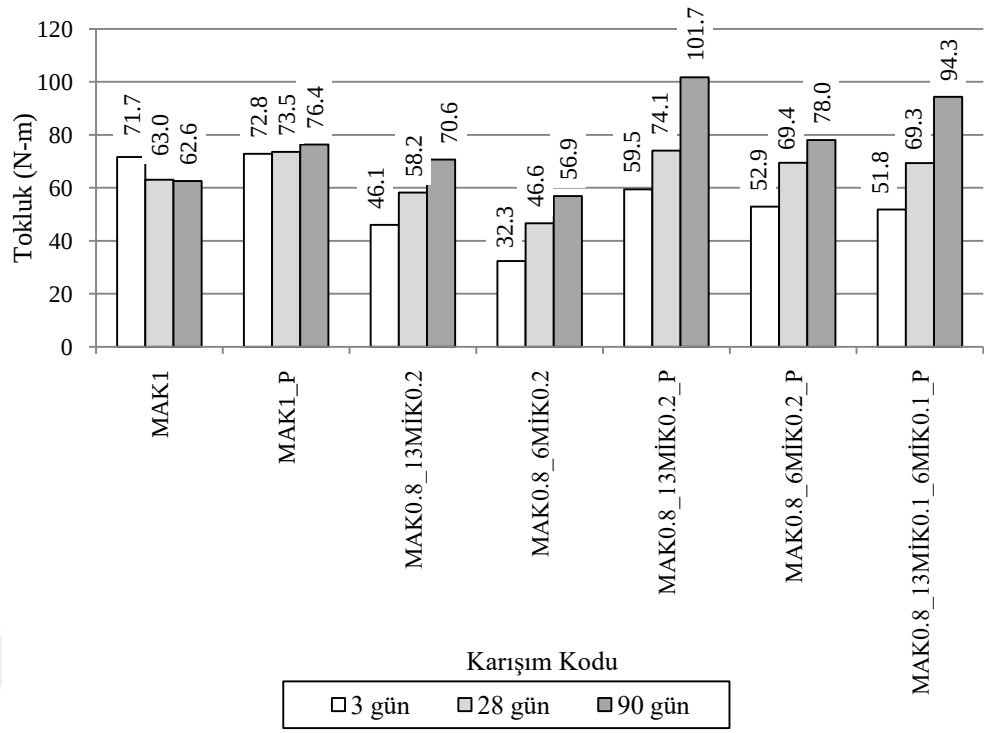
(b) $KA/TA = 0.30$



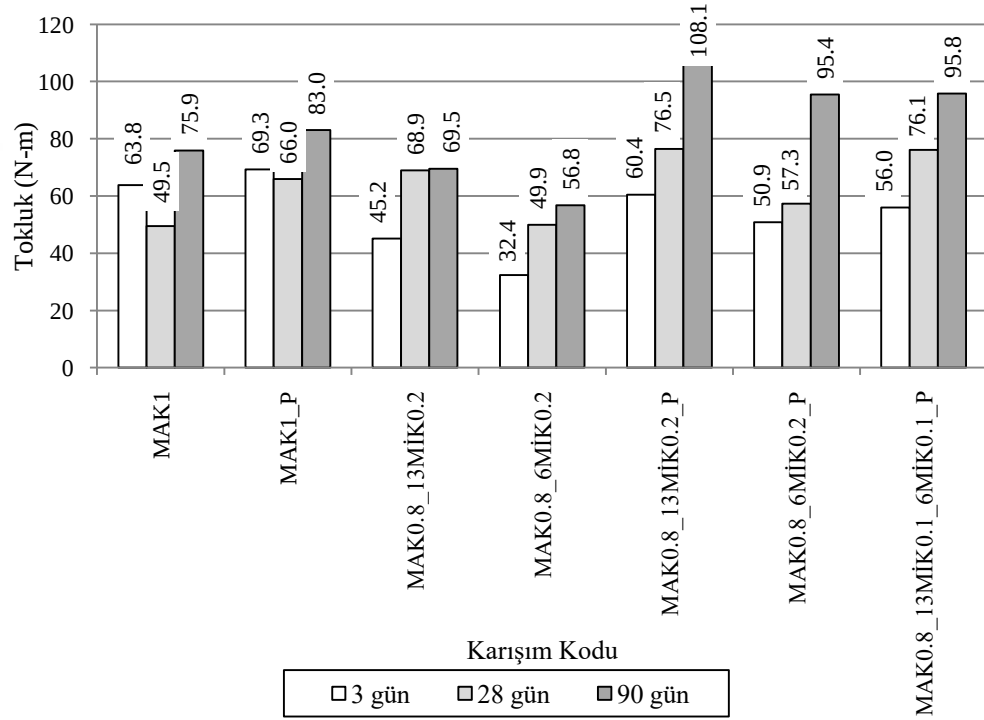
(c) $KA/TA = 0.35$

Şekil 4.53 90 günlük numunelerin yük – sehim eğrileri

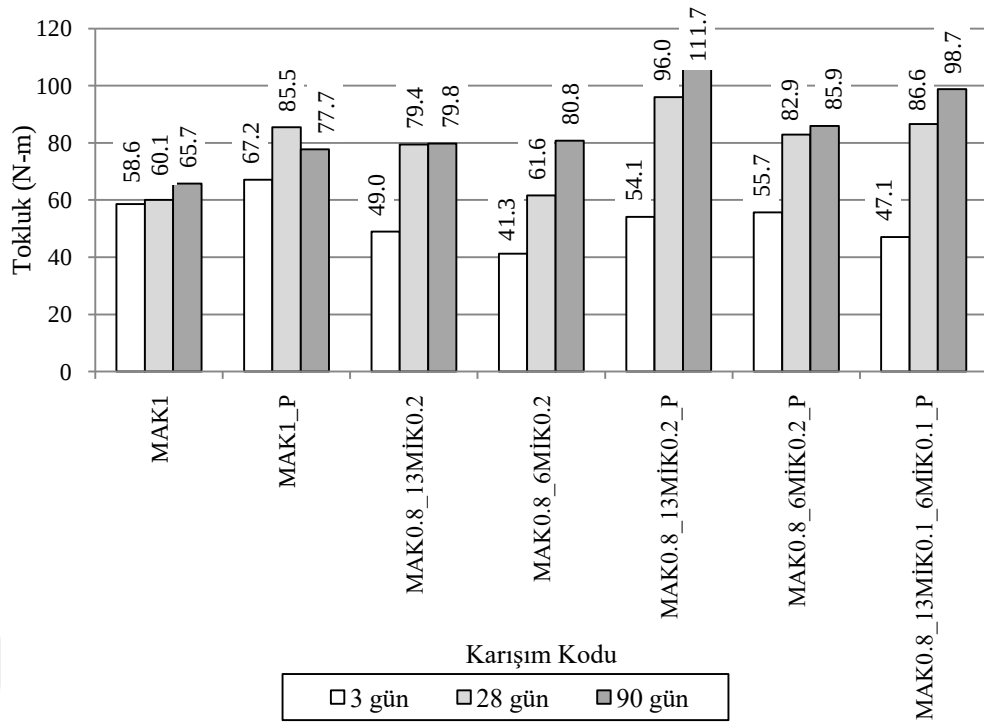
Belirli bir sehime kadar çizilmiş yük-sehim eğrisi altında kalan alan, numunenin enerji yutma kapasitesi (tokluk) olarak tanımlanmaktadır. Lif tipi, narinliği ve kombinasyonları ile KA/TA oranının karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton numunelerin enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, deplasman kontrollü dört noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.51, 4.52 ve 4.53’de gösterildiği gibi yük-sehim grafikleri çizilmiştir. Karışımlara ait numunelerin tokluk değerleri ise Şekil 4.54’de sunulmuştur.



(a) KA/TA = 0.25



(b) KA/TA = 0.30



(c) KA/TA = 0.35

Şekil 4.54 Lif takviyeli KYB karışımların tokluk değerleri

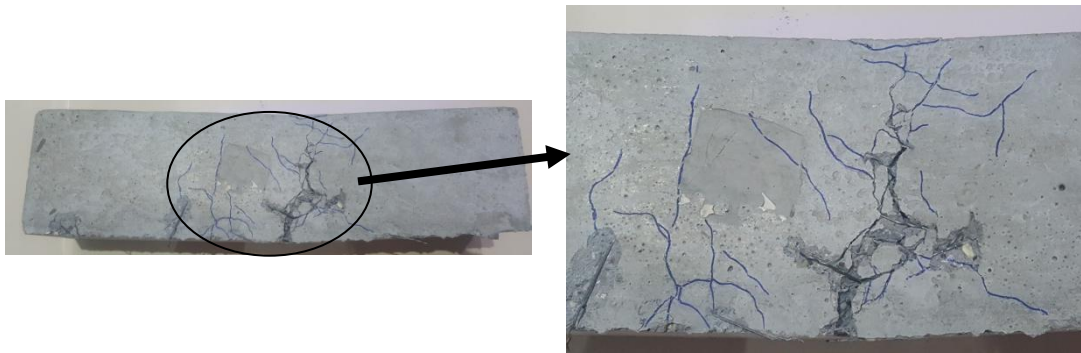
Tüm KA/TA oranları için, 3 günlük %1 makro çelik lif ile birlikte PVA lifi içeren ikili lif hibridizasyonuna sahip MAK1_P karışımı ve sadece makro çelik lif içeren MAK1 karışımına ait numuneler, diğer lif kombinasyonlarına ait karışımlarinkinden daha fazla yük taşıma kapasitesine ulaşmış ve maksimum yüke ulaştıktan sonra artan sehim ile birlikte ani düşüş yerine düşme sonrası sehim-sertleşmesi göstererek artan eğilme performansı davranışı sergilemişlerdir. Hatta, tüm KA/TA oranları için, MAK1_P karışımlarının 3 günlük tokluk değerlerinin, KA/TA oranı 0.25, 0.30 ve 0.35 için, sırasıyla, 72.8 N-m, 69.3 N-m ve 67.2 N-m ile en yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonun olduğu karışımlara ait numunelerde ise, ulaşılan maksimum yük diğer karışımlarinkine nazaran daha az olmuş ve maksimum yük daha az sehimde meydana gelmiştir. Aynı zamanda, mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonun olduğu karışımlardan 13/16 OL mikro çelik lifin olduğu numunelerin yük-sehim eğrilerinde artan sehim ile birlikte eğilme performansında ani düşüş olmasa bile yük-sehim grafiği yatay devam eden bir davranış sergilerken, 6/16 OL mikro çelik lifin olduğu numunelerin yük-sehim eğrilerinde artan sehim ile birlikte eğilme performansında belli bir sehimden sonra düşme eğilimi görülmüştür. Dolayısıyla, 3 günlük lif takviyeli karışımlara ait numuneler arasından en düşük

tokluk değerleri mikro elik lif içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışım-lara ait numunelerde elde edilmiş, tüm KA/TA oranları için, OL 6/.16 mikro elik lif içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışım-larının 3 günlük tokluk değerlerinin, KA/TA oranı 0.25, 0.30 ve 0.35 için, sırasıyla, 32.3 N-m, 32.4 N-m ve 41.3 N-m ile en düşük enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür (bakınız şekil 4.46). Ayrıca, 3 günlük tüm KA/TA oranları için, l ve dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışım-lar kendi içinde değerlendirildiğinde ise, dörtlü lif hibridizasyonuna kıyasla daha fazla oranda 13/.16 OL mikro elik lif içeren (%0.2) MAK0.8_13MİK0.2_P karışımına ait numunelerin tokluk değerleri daha fazla çıkmıştır. 3 günlük karışım-lara ait numunelerin eğilme performanslarına ait bu sonuçlar, lif tipine, boyuna ve henüz gelişmemiş lif-matris arayüzeyine dayandırılabilir. Çünkü, uzun ve kancalı uçlu liflerin henüz zayıf olan matriste daha etkili olacağı ve kısa mikro elik liflerin ise lif-matris arayüzeyinin henüz gelişmemiş olması nedeniyle çatlak köprülemede etkin rol oynayamayacağı açıktır.

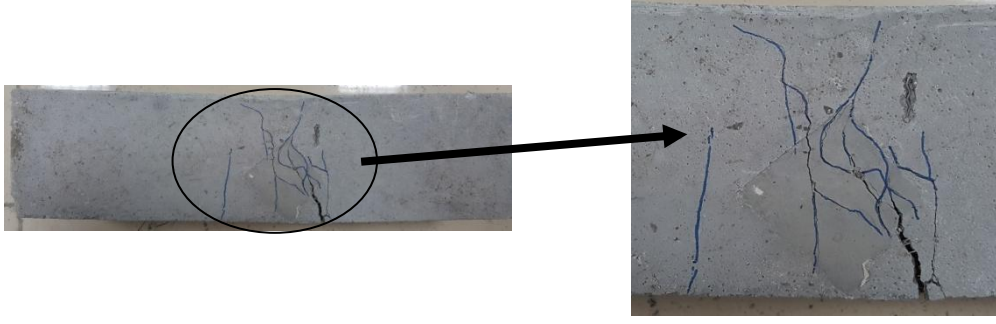
28 günlük lif takviyeli numuneler incelendiğinde, her ne kadar nihai dayanıma ulaşılmamış da olsa, erken dayanıma göre nispeten daha iyi gelişmiş lif-matris arayüzeyinin bir sonucu olarak, mikro elik liflerin eğilme performansı üzerinde etkisini göstermeye başladığı görülmüştür. Çünkü, 3 günlük tokluk değerlerinin aksine, tüm KA/TA oranlarında, MAK0.8_13MİK0.2_P l lif hibridizasyonu içeren karışımın 28 günlük tokluk değerleri ile makro elik lif ve PVA lifi içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu MAK1_P karışım-larının tokluk değerleri arasındaki farkın azaldığı ve MAK0.8_13MİK0.2_P karışımına ait numunelerin tokluk değerlerinin az da olsa daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Puzolanik reaktivite sonucu hidrasyon ürünlerinin gelişimini tamamlamış olmasının sonucu olarak gelişen matris tokluğu ve arayüz bağ özellikleri dolayısıyla, 90 günlük numunelerde, çatlak köprülemede makro ve mikro liflerin tümünün etkili olduğu görülmüştür. şekil 4.46'dan da görüleceği üzere, makro ve mikro liflerin oluşturdukları sinerjinin sonucu olarak l ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışım-lara ait numunelerin tokluk değerlerinin diğer karışım-larınkine göre daha fazla olduğu bulunmuştur. Öyle ki, tüm KA/TA oranları için, makro elik, OL 13/.16 mikro elik ve PVA liflerinin l olarak kullanıldığı MAK0.8_13MİK0.2_P karışım-larının yük taşıma kapasitesi en fazla olup, artan sehim ile birlikte, yük-sehim eğrileri genelde yatayda maksimum yüke yakın değerlerde devam etmiştir.

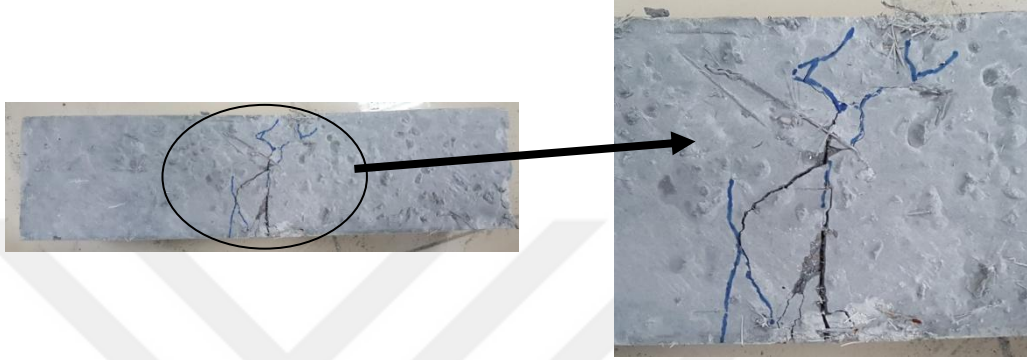
Tez çalışması kapsamında, tasarlanan karışımlara ait numunelere uygulanan dört-noktalı eğilme yüklemesi neticesinde, lifsiz KYB karışımlarına ait numuneler gevrek kırılırken, lif takviyeli diğer bütün karışımlara ait numuneler ise, Şekil 4.51, 4.52 ve 4.53’de sunulan yük-sehim eğrilerinden de görüleceği üzere, özellikle 90 günlük numunelerde daha belirgin olmakla beraber, genelde sehim-sertleşmesi davranışı sergilemiştir. Sehim-sertleşmesi davranışı, eğilmeye maruz bir numunede, ilk çatlak sonrası çoklu-çatlak oluşması ile beraber lif takviyeli çimento esaslı kompozitin performansının geliştirilmesi şeklinde açıklanabilir. Çoklu-çatlak davranışında da belirleyici olan yük-sehim eğrisinin maksimum noktasından sonraki davranışı ise, karışımın içeriğindeki çelik lifin tipinden etkilenmektedir. Literatürde de bazı çalışmalarda (Rashiddadash vd. 2014; Pajak ve Ponikiewski, 2013; Lawler vd. 2005) bahsedildiği gibi, kancalı uçlu çelik lif ve PVA lifi sehim-sertleşmesi, düz çelik lifler ise sehim-yumuşaması davranışına neden olmaktadır. Bu çalışmada da tüm lif takviyeli KYB karışımlarında kancalı uçlu makro çelik lif en az %0.8 oranında ve mikro çelik lif de en çok %0.2 oranında kullanılarak sehim-sertleşmesi ve çoklu-çatlak davranışı hedeflenmiştir. Numunenin gösterdiği sehim sertleşmesi davranışı, yukarıda da bahsedildiği gibi, yükleme neticesinde oluşan çatlak karakterizasyonu ile kanıtlanmaktadır. Örneğin, 3, 28 ve 90 günlük numuneler arasından tokluk değerleri en yüksek olan karışımlara ait numunelerde eğilme yüklemesi altında meydana gelen çoklu çatlak davranışı Şekil 4.55’de verilmiştir. Şekillerden de anlaşılabileceği üzere, numunelere yapılan lif takviyesi, yüklemeye maruz kalmış numunede çatlaklar arası köprüleme yapmış ve lokal bir çatlak yerine, birbirini izleyen çoklu mikro çatlaklar meydana gelmiştir. Böylece lif takviyeli numunelerde gevrek kırılma yerine sehim-sertleşmesi davranışı oluşmuş ve dolayısıyla numunelerin hem sünekliği hem de yük taşıma kapasitesi gelişmiştir.



(a) 3 günlük MAK1_P_0.25



(b) 28 günlük MAK0.8_13MİK0.2_P_0.35



(c) 90 günlük MAK0.8_13MİK0.2_P_0.35

Şekil 4.55 Eğilme yüklemesine maruz kalmış tokluk değeri en yüksek olan numunelerin çoklu çatlak davranışı görselleri

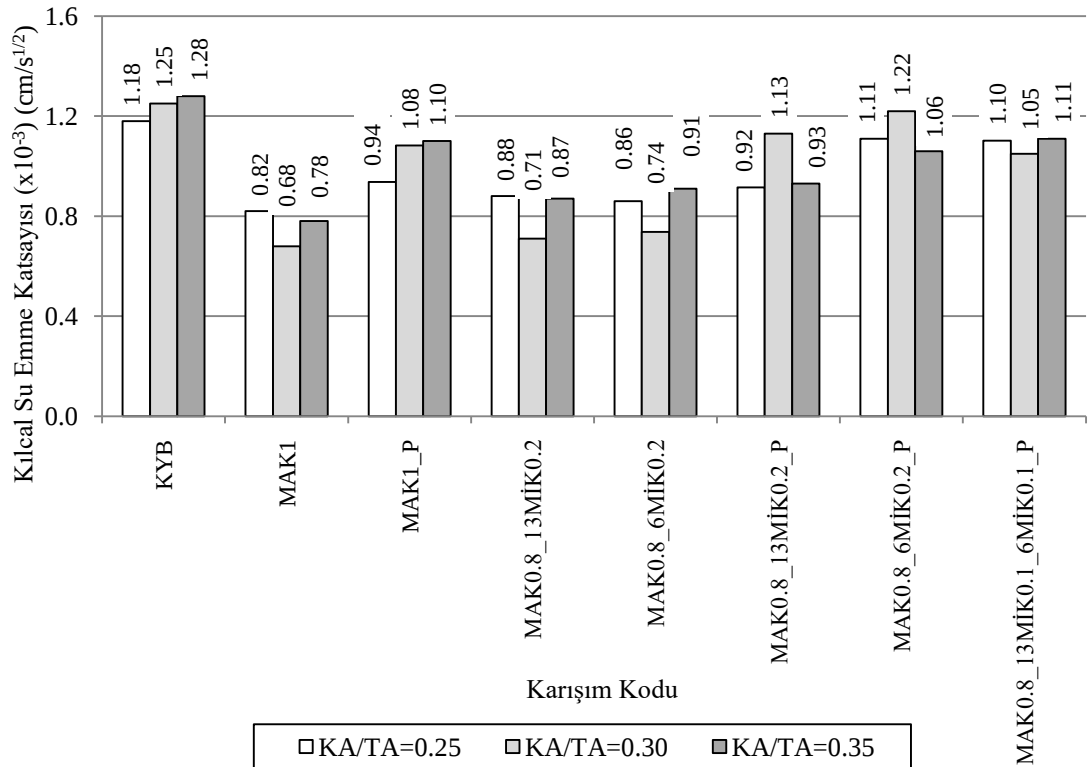
Şekil 4.55’de görülebileceği üzere, kür yaşı arttıkça eğilme yüklemesi sonucu oluşan çatlakların sayısı azalmıştır. Örneğin, 3 günlük numuneler arasından en yüksek tokluk değerine sahip KA/TA oranı 0.25 olan MAK1_P karışımına ait numunede yaklaşık 22 adet çatlak oluşmuş ve bu çatlakların genişliği $5\mu\text{m}$ ile $80\mu\text{m}$ arasında değişkenlik göstermiştir. Ayrıca, 28 günlük numuneler arasından en yüksek enerji yutma kapasitesine sahip, KA/TA oranı 0.35 olan MAK0.8_13MİK0.2_P karışımına ait numunede ise genişlikleri $5\mu\text{m}$ ile $1000\mu\text{m}$ arasında değişen yaklaşık 10 çatlak oluşurken, 90 günlük KA/TA oranı 0.35 olan MAK0.8_13MİK0.2_P karışımına ait numunede ise $5\mu\text{m}$ ile $2000\mu\text{m}$ arasında çatlak genişliğe sahip yaklaşık 7 adet çatlak ölçülmüştür. Bu sonuç, bazı literatürde (Balaguru ve Shah, 1992; Bentur ve Mindess, 1990) de vurgulandığı üzere, 3 günlük matrisin henüz yetersiz dayanıma sahip olması sebebiyle, eğilme yüklemesi sonucu oluşan çatlakları köprüleyen liflerin, kopmaya veya akmaya uğramadan matris içinden çekip-çıkma (pull-out) şeklinde davranmasına, ileriki kür yaşlarında ise tam aksine çatlakları köprüleyen liflerin genelde kopmasına veya akmasına dayandırılabilir.

4.2.2 Dayanıklılık özellikleri

4.2.2.1 Kılcal su emme deneyi

Betondaki kılcal boşlukların, zararlı bileşiklerin beton içerisine taşınmasında önemli rol oynaması nedeniyle kılcal su emme katsayısı, betonun dayanıklılık özellikleri bakımından önemli bir parametredir. Kılcal su emme tayini için kullanılan deney metodu da suyun betona nüfuz etmesi şeklinde gerçekleşir.

Deneyisel çalışmada test edilen karışımların pozolan içermesi nedeniyle, kılcal su emme deneyi sadece 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olup, tüm karışımlara ait kılcal su emme katsayıları Şekil 4.56’da yer almaktadır. Her karışım için 2’şer adet 100mm x 200mm ölçülerinde silindir numuneler test edilmiş ve sonuçların ortalamaları alınarak her karışıma ait numunenin kılcal su emme katsayıları bulunmuştur.



Şekil 4.56 90 günlük numunelerin kılcal su emme katsayıları

Şekil 4.56’den görülebileceği gibi, lif içermeyen KYB karışımlarına ait numunelerin kılcal su emme katsayıları arasında çok belirgin bir fark olmamakla birlikte, KA/TA oranının artmasıyla numunelerin su emmesinde artma olmuştur.

Suyun taşınması ile alakalı olan beton matris yapısının esas özelliği, çimento hamurunun gözenekli yapısı ve özellikle de agrega-hamur arayüzeyinin çevresindeki çimento hamurunun gözenekli yapısı ile alakalıdır. Her ne kadar agrega, suyun beton matrisi içerisinde taşınmasını etkilese de, içinde barındırdığı boşlukların süresiz olması ve dolayısıyla kapilarite yoluyla suyun hareketine izin vermemesi nedeniyle betonun kılcal su emmesine olumlu katkı sağlayacağı düşünülebilir. Ancak, arayüzey bölgesindeki daha fazla olan gözenekliliğe rağmen, beton içerisindeki suyun hareketi çoğunlukla betonda tek sürekli bölge olan sertleşmiş çimento hamur hacmi tarafından kontrol edilmektedir (Larby, 1993). Bu tez çalışmasında olduğu gibi, bağlayıcı malzeme miktarı sabit olan lifsiz KYB karışımlarında ise, agrega granülometrisine bağlı olarak kılcal su emme değeri de değişiklik göstermiştir. Yani, agrega içeriğindeki ince malzeme miktarı arttıkça kılcal su emme katsayısı azalmıştır. Çünkü, karışım içerisindeki ince taneli mineral katkılar (silis dumanı ve uçucu kül), ileriki yaşlardaki pozolanik reaksiyonları sonucu açığa çıkan hidrasyon ürünü olan C-S-H jellerinin arayüzeyi iyileştirmesine bağlı olarak mikroyapıdaki gözenekliliği azaltmaktadır. Şekil 4.48'den de görülebileceği gibi, nihai dayanıma sahip numunelerde arayüzey iyi gelişmiş olduğundan, beton içerisindeki sürekliliği olan kılcallık, sadece sertleşmiş çimento hamuru içerisinde gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, bağlayıcı miktarı sabit olan bir karışımında, ince malzeme miktarı arttıkça daha fazla miktardaki agrega tanelerinin, çimento hamuru içerisindeki boşlukları blokladığı ve dolayısıyla matrisin kılcallığını azalttığı düşünülmektedir. Benzer sonuca Larby (1993) tarafından yapılmış olan bir çalışmada da ulaşılmış olup, sertleşmiş çimento hamur hacminin, beton içerisinde sürekliliği olan tek bölge olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak, Şekil 4.56'dan da görülebileceği gibi, değişkenlik gösteren KA/TA oranlarının lif takviyeli KYB karışımların kılcal su emme katsayıları üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır.

Lifsiz ve lif içeren karışımlar karşılaştırıldığında, lifsiz KYB karışımlara ait numunelerin kılcal su emme katsayılarının lif takviyeli karışımlarınkine göre daha yüksek çıktığı bulunmuştur. Bu sonuç, lif ilavesinin rötreden dolayı oluşan çatlak genişliği ve sayısını azaltmasına ve buna bağlı olarak da betonun geçirimsizliğini düşürmesine dayandırılabilir. Literatürde, lif takviyeli karışımlara ait numunelerin kılcal su emme deneylerinin yapıldığı bazı çalışmalarda da (Nili ve Afroughsabet, 2012; Afroughsabet vd. 2019), benzer sonuçlar bulunmuştur.

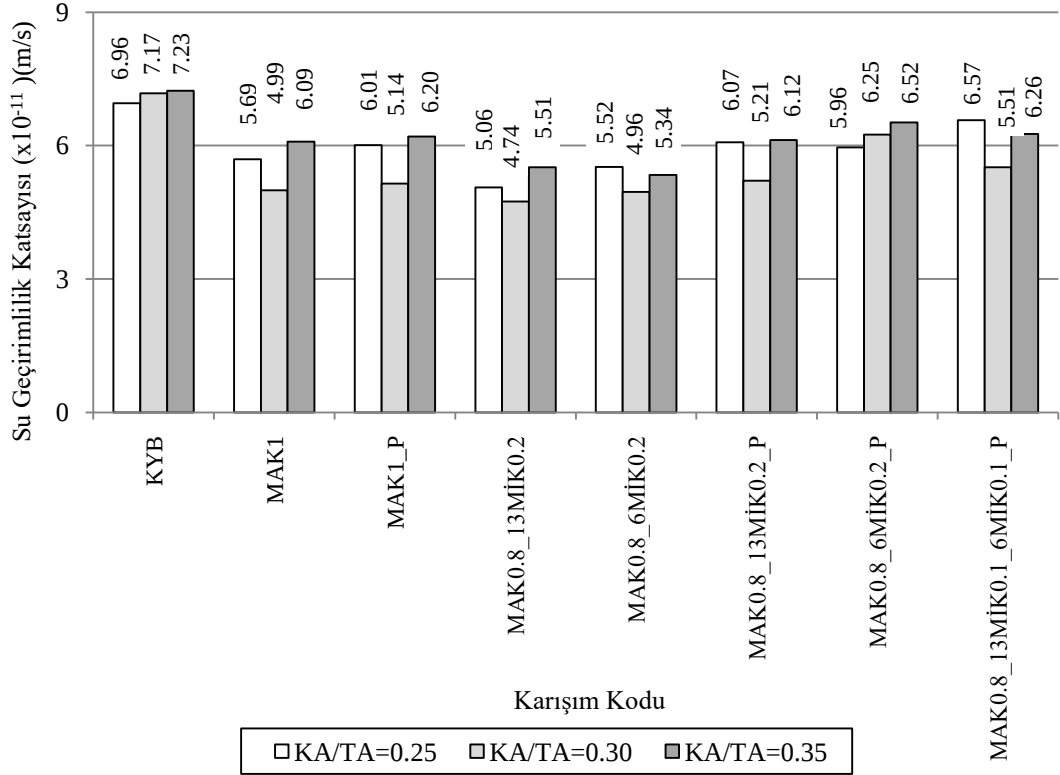
Şekil 4.56’da gösterildiği üzere, tüm KA/TA oranları için, sadece kancalı uçlu çelik lif içeren MAK1 karışımlarının kılcal su emme katsayıları en düşük çıkmış olup, makro çelik ve mikro çelik lifin ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımların da su emme miktarları PVA içeren ikili, üçlü ve dördü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerinkine göre düşük bulunmuştur. Sadece kancalı uçlu makro çelik lif içeren karışımlara ait numunelerin kılcal su emme katsayı değerleri, lifsizlere kıyasla, KA/TA oranı 0.25, 0.30 ve 0.35 için, sırasıyla, %30.5, %45.6 ve %39.1 oranlarında daha düşük çıkmıştır. Bu duruma neden olarak, çelik lifin su emmemesi ile birlikte, çelik liflerin kapiler yolla su taşınımına karşı koyan manyetik ve elektrostatik kuvvetlere sahip olması gösterilebilir (Yehia vd. 2016).

Tüm KA/TA oranları için, aynı lif hibridizasyonuna sahip PVA lifi içeren ve içermeyen karışımlar kendi içinde değerlendirildiğinde, PVA lifinin karışımların kılcal su emme katsayılarını arttırdığı bulunmuştur. Buna neden olarak, PVA lifi eklenmesinin karışımların içerisinde daha fazla boşluğa yol açması şeklinde düşünülmektedir. Karma lif takviyeli betonların durabilitesi ile ilgili yapılan bir çalışmada da PVA lifinin matristeki boşluk miktarını arttırdığı bulunmuştur (Afroughsabet vd. 2019).

4.2.2.2 Basınçlı Su Geçirimsizlik Deneyi

Beton için en tehlikeli olan elementler, betona nüfuz eden su ile birlikte betonun iç kısımlarına taşınmaktadır. Ayrıca, beton içerisine sızan suyun beraberinde getirdiği, sülfat, klor ve asit gibi maddeler betonda farklı reaksiyonlar oluşmasına neden olur ve böylece betonun dayanıklılığı olumsuz yönde etkilenir. Bu nedenlerden dolayı betonun su geçirimsizlik katsayısı betonun durabilite özellikleri için önemli bir parametredir. Yapılan basınçlı su geçirimsizlik deneyi de betondaki birbirleriyle bağlantılı boşluklar hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır.

Deneyisel çalışma kapsamında test edilecek karışımların puzolan içermesi nedeniyle, basınçlı su geçirimsizlik deneyi sadece 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olup, tüm karışımlara ait su geçirimsizlik katsayıları Şekil 4.57’de yer almaktadır. Her karışım için 2’şer adet 100mm x 200mm ölçülerinde silindir numuneler test edilmiş ve sonuçların ortalamaları alınarak her karışıma ait numunenin su geçirimsizlik katsayıları bulunmuştur.



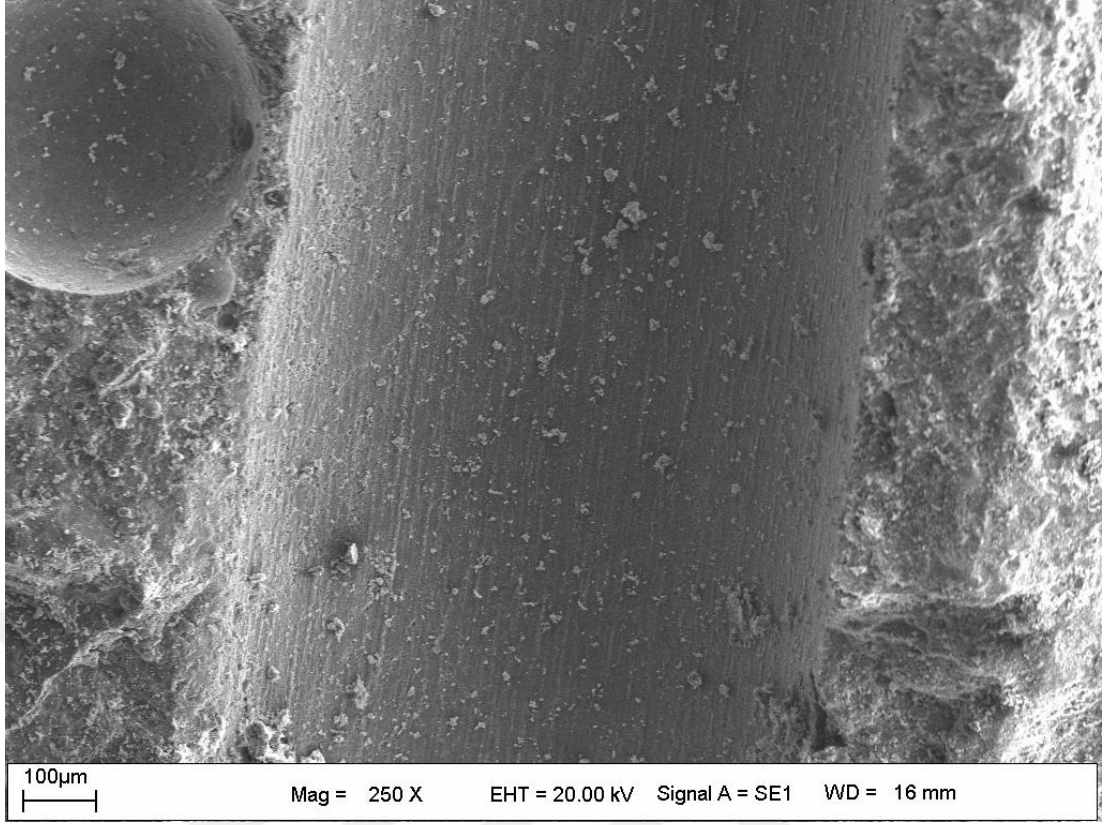
Şekil 4.57 90 günlük numunelerin su geçirimsizlik katsayıları

Su geçirimsizlik katsayısı, suyun basınç etkisiyle betonun boşluklarına sızması ve dolayısıyla betonun mikroyapısında bulunan boşlukların boyutları ve birbiriyle bağlantısı ile alakalı bir parametredir. Şekil 4.57’den görülebileceği üzere, lif içermeyen KYB karışımlarında KA/TA oranının artmasının, su geçirimsizlik katsayısını çok belirgin olmamakla birlikte arttırdığı bulunmuştur. Bu durumda, ince agrega miktarının artmasıyla karışımdaki mevcut ince malzeme miktarının arttığı, başka bir deyişle, sertleşmiş betonda mikrofiller malzemenin artmasının sonucu olarak betonun geçirimsizliğinin azaldığı söylenebilir. Yani, bu durum, tüm karışımlara ait su/bağlayıcı oranının sabit olduğu dikkate alındığında, KA/TA oranının azalmasıyla birlikte karışımdaki agrega tanelerinin fazla olmasının neticesi olarak, çimento hamurunda basınçlı suyun geçtiği mikro kanalların daha etkili bir şekilde birbiriyle bağlantılarının kesilmesine ve geçirimsizlik katsayısının düşmesine dayandırılabilir. Ayrıca, çimento hamur matrisinde oluşan kanalların, agrega taneleri tarafından tıkandığı ve betonun su geçirimsizliğe karşı dayanıklılığının iyileştiği literatürde de mevcuttur (Mehta ve Monteiro, 2006).

Lifsiz ve lif içeren karışımlar karşılaştırıldığında, tüm KA/TA oranları için, lifsiz KYB karışımlara ait numunelerin su geçirimsizlik katsayılarının lif takviyeli

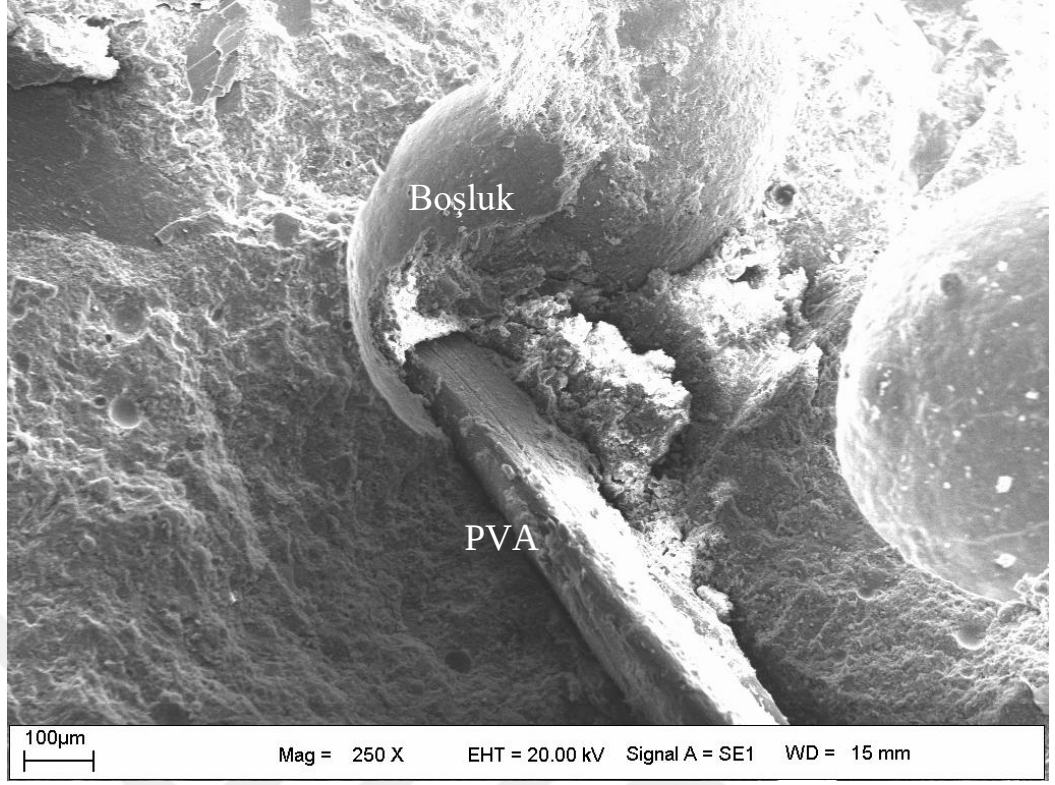
karışımlarınkine göre daha yüksek çıktığı bulunmuştur. Bu durum, beton matrisindeki boşlukların eklenen lif ile birlikte birbiriyle olan bağlantılarının engellenmesine dayandırılabilir. Ayrıca, geçirimliliğin artmasına neden olan betondaki rötre çatlaklarının, lif eklenmesiyle birlikte genişliklerinin ve sayılarının azalması da, lif takviyeli karışımların su geçirimlilik katsayılarının düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Lif takviyeli karışımların su geçirimliliği ile alakalı yapılan bazı çalışmalarda da (Cholker ve Tantray, 2019; Afroughsabet vd. 2019) benzer sonuçlar bulunmuştur.

Şekil 4.57'den görüldüğü üzere, tüm KA/TA oranları için, makro çelik lif ile mikro çelik lifin ikili hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait numunelerde su geçirimlilik katsayılarının en düşük olduğu bulunmuştur. Ayrıca, sadece makro çelik lif içeren MAK1 karışımların da bu değerlere yakın su geçirimlilik katsayılarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni olarak, beton matrisindeki birbiriyle bağlantılı boşluklardan geçen basınçlı suyun, çelik lifler tarafından duvar etkisiyle (wall effect) engellenmesi gösterilebilir. Yehia ve ark (2016) tarafından yapılan bir çalışmada da üretim sürecinin bir sonucu olarak yüzeyi pürüzlü olan çelik lifin, PVA lifine göre çevresini saran çimento hamuruyla duvar etkisi oluşturduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, çimento esaslı kompozitlerde arayüzey her ne kadar bir dezavantaj olarak görülse de, çelik liflerin pürüzlü yüzeyi gereği hamurla olan aderansı daha iyi olacaktır. Şekil 4.58'den de görüldüğü üzere, makro çelik lif ve hamur arasındaki yüksek aderansa sebep, hamurdan sıyrılıp çıkmış olan makro çelik lifin, hamur yüzeyinde life paralel olarak uzunlamasına oluşturduğu lifin yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanmış olan çok incecik çizgiler gösterilebilir.

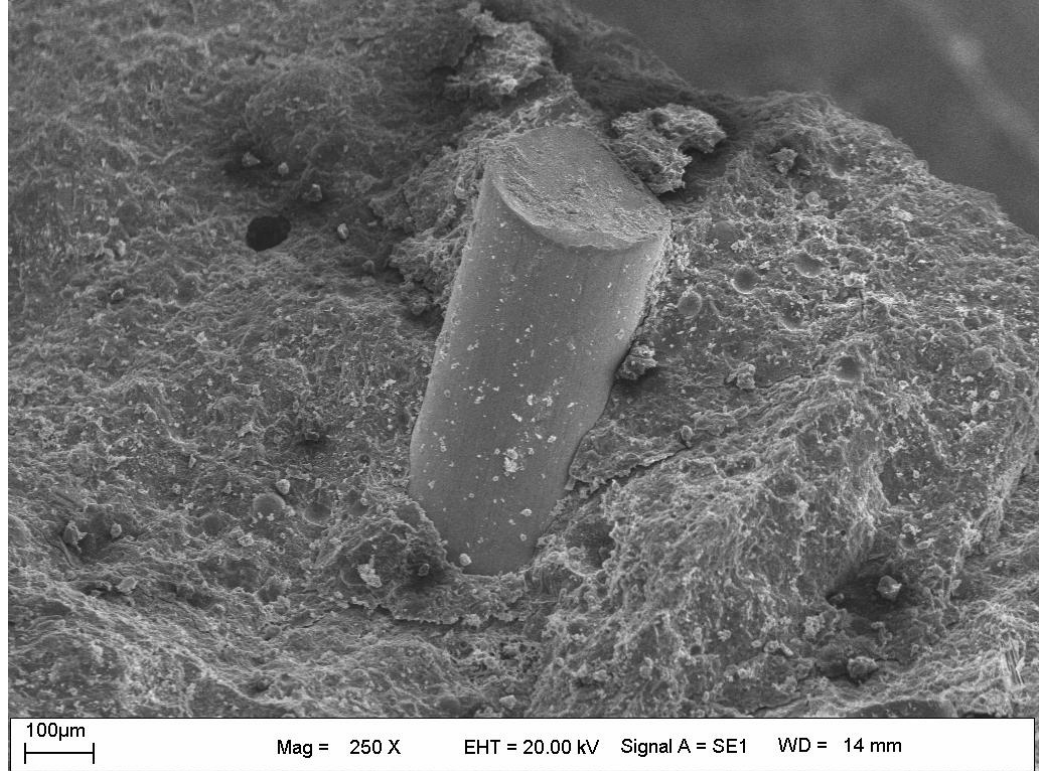


Şekil 4.58 Makro çelik lifin çekip çıktığı yerin yüzeyinin SEM görüntüsü

Tüm KA/TA oranları için, PVA lifi içeren ve içermeyen farklı lif hibridizasyonuna sahip karışımlar karşılaştırıldığında, PVA lifi içeren ikili, üçlü ve dördümlü lif hibridizasyonuna sahip karışımların su geçirimsizlik katsayılarının daha yüksek olduğu bulunmuştur. Buna neden olarak, Şekil 4.59'dan da görüldüğü üzere, karışıma PVA lifi eklenmesinin mikro çelik lif içeren karışımlara kıyasla, daha geniş ve fazla miktarda boşluğa yol açması gösterilebilir. Lif takviyeli betonların durabilitesi ile ilgili yapılan bir çalışmada da PVA lifinin matristeki boşluk genişliklerini arttırdığı bulunmuştur (Karahan ve Atis, 2011).



(a) PVA lifi



(b) Mikro çelik lif

Şekil 4.59 Liflerin etrafında oluşan boşluklara ait SEM görüntüleri

Şekil 4.57’den görüldüğü gibi, ikili lif hibridizasyonuna sahip MAK1_P karışımı ile üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin su geçirimsizlik katsayıları, tekli ve ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlarınkinden daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımların içerdiği liflerin farklı yönlenmesine (bakınız Şekil 4.41) ve liflerin işlenebilirliğe bağlı olarak uniform bir dağılım göstermemesine dayandırılabilir (bakınız Şekil 4.4).

4.2.2.3 Kısıtlanmış Rötire Deneyi

Sertleşmiş betonda, oluşan su kaybından dolayı büzülme meydana gelmektedir. Ancak betonun serbestçe büzülme göstermesini engelleyen kısıtlamalar neticesinde, betonda kısıtlanmış rötire çatlakları oluşmaktadır. Bu çalışmada, karma lif içeren KYB karışımlarından üretilen sertleşmiş numunelerin büzülmesini kısıtlayan eleman, deney düzeneğinde kullanılan iç bölümdeki halka şeklindeki çelik kalıptır. Halka şeklindeki betonun iç kısmındaki bu sınırlayıcı kalıp, sertleşmiş betonda çekme gerilmelerinin oluşmasına yol açmakta ve çatlaklar oluşmaktadır.

Çalışma kapsamında tasarlanan karışımlara ait numunelerin kısıtlanmış rötire deneyinden elde edilen çatlaklar ile alakalı sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir. Kısıtlanmış rötire çatlak genişlikleri, her çatlağın üç noktasından okunan çatlak genişlik değerlerinin ortalaması alınarak bulunmuştur. Kısıtlanmış numunelerin toplam rötire şekil değiştirme değerleri ise, numunede oluşan çatlakların genişliklerinin toplamının beton numune çevresine (1275 mm) bölünmesiyle elde edilmiştir.

Çizelge 4.3’den de görülebileceği gibi, lif içermeyen KA/TA oranı 0.25 olan KYB karışımına ait numunede bir tane lokal kısıtlanmış rötire çatlağı meydana gelmiş, KA/TA oranı 0.30 ve 0.35 olan lifsiz karışımlara ait numunelerde ise lokal çatlak ile birlikte mikro düzeyde, sırasıyla, 50 µm ve 77 µm genişliklerinde birer tane daha çatlak oluşmuştur. Lifsiz KYB karışımlarına ait numunelerin toplam kısıtlanmış rötire çatlak genişliği dikkate alındığında ise, kaba agrega oranının artmasıyla, Şekil 4.60’dan da anlaşılabileceği üzere, çatlak genişliğinde azalma tespit edilmiştir. Bu duruma neden olarak, bu çalışmada su/bağlayıcı oranı tüm karışımlar için sabit olduğu dikkate alındığında, kaba agreganın çimento matrisindeki büzülmeyi engellemede etkili olması ve betonda iskelet görevi gören kaba agrega içeriğinin

artmasıyla betonun hacim değişikliğinin daha başarılı bir şekilde sınırlandırıldığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. Kısıtlanmış rötre deney sonuçları

Karışım Kodu	Çatlak Sayısı	Çatlama Zamanı (gün)	Toplam Çatlak Genişliği (μm)	Maksimum Çatlak Genişliği (μm)	Toplam Rötre Şekil Değiştirmesi (μ şekil değiştirme)
KYB_0.25	1	10	1500	1500	1176
MAK1_0.25	3	16	163	112	128
MAK1_P_0.25	4	17	150	103	118
MAK0.8_13MİK0.2_0.25	5	8	198	135	155
MAK0.8_6MİK0.2_0.25	3	5	222	150	174
MAK0.8_13MİK0.2_P_0.25	5	10	157	102	123
MAK0.8_6MİK0.2_P_0.25	3	12	155	123	122
MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.25	3	10	149	113	117
KYB_0.30	2	4	860	810	675
MAK1_0.30	5	5	188	140	147
MAK1_P_0.30	3	9	152	117	119
MAK0.8_13MİK0.2_0.30	5	10	158	140	124
MAK0.8_6MİK0.2_0.30	3	13	180	130	141
MAK0.8_13MİK0.2_P_0.30	5	3	137	101	107
MAK0.8_6MİK0.2_P_0.30	3	9	161	117	126
MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.30	5	9	152	117	119
KYB_0.35	2	7	730	653	573
MAK1_0.35	6	3	192	160	151
MAK1_P_0.35	3	3	161	147	126
MAK0.8_13MİK0.2_0.35	7	5	153	140	120
MAK0.8_6MİK0.2_0.35	9	2	157	123	123
MAK0.8_13MİK0.2_P_0.35	8	6	134	107	105
MAK0.8_6MİK0.2_P_0.35	8	5	151	116	118
MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.35	9	5	153	111	120



(a) $KA/TA = 0.25$



(b) $KA/TA = 0.30$

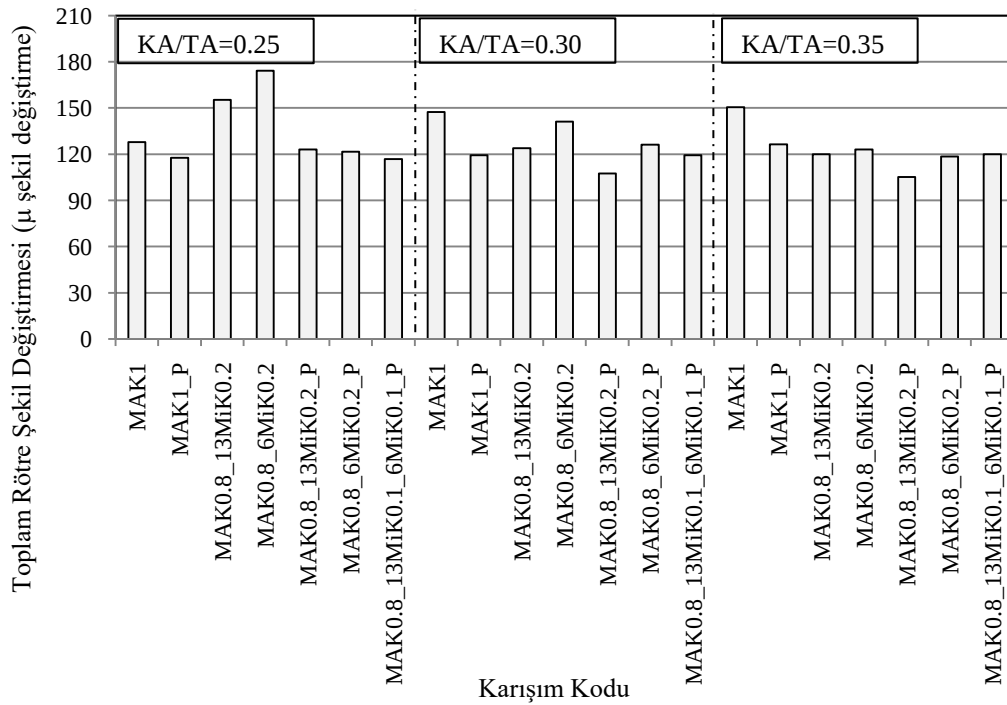


(c) $KA/TA = 0.35$

Şekil 4.60 Lifsiz KYB karışımlara ait numunelerin kısıtlanmış rötre çatlakları

Lifsiz ve tek lifli ile ikili, üçlü ve dördü lif hibridizasyonuna sahip KYB karışımlar birbiriyle kıyaslandığında, lif ilavesi ile birlikte, numunelerde lokal bir çatlak yerine, toplam çatlak genişliği lifsizinkine göre çok daha az olan birkaç sayıda çatlak oluşmuştur. Bu duruma neden olarak, lif takviyesinin, betonda çoklu çatlak davranışı gösterilebilir. Ayrıca, betonun büzülmesinin içindeki çelik halka tarafından sınırlandırıldığı ve böylece oluşan büzülme sonucu betonun bu halkaya sıkıştırma etkisi uyguladığı kısıtlanmış rötre deneyinde, tüm KA/TA oranına sahip lifsiz KYB'lerde oluşan lokal çatlak ile birlikte çelik halka üzerinde oluşan sıkıştırma etkisinin ortadan kalktığı düşünülmektedir. Tüm lifli KYB'lerde ise, ilk çatlak sonrası içindeki çelik halkada meydana gelen sıkışma etkisinin devam ettiği ve dolayısıyla, tüm KA/TA oranlarına sahip lif takviyeli karışımlara ait halka numunelerde birden fazla rötre çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, benzer bir çalışmada (Kwon vd. 2007) da bulunduğu gibi, lif takviyeli betonlarda, liflerin çekip-çıkma (pull-out) özelliğine dayandırılabilir. KA/TA oranı 0.35 olan en kaba agrega granülometrisine sahip karışımlara ait numunelerde ise, diğer numunelere göre daha fazla sayıda çatlak meydana gelmiştir. Bu, kaba agrega içeriğinin artmasıyla agrega-hamur arayüzeyinde rötreden kaynaklı gerilmelerin artmasına ve dolayısıyla, arayüzeydeki çatlak sayısının çoğalmasına dayandırılabilir (Ulukaya, 2008). KA/TA oranının 0.35 olduğu karışımlara ait numunelerin ilk çatlaklarının, lif hibridizasyonuna bağlı olarak, 2., 3., 5. ve 6. günlerde oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, KA/TA oranı 0.35 olan tekli ve ikili lif hibridizasyonunun

olduğu karışımlara ait numunelerde ilk çatlaklar genelde 2. ve 3. günlerde oluşmaya başlarken, üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait numunelerinde ise 5. ve 6. günlerde oluştuğu gözlemlenmiştir. Ancak, KA/TA oranının 0.25 ve 0.30 olduğu karışımlara ait lifli numunelerde ise KA/TA oranı 0.35 olan karışımlara ait lifli numunelere kıyasla çok daha ileri günlerde ilk çatlak oluşumu meydana gelmiştir. Bu çalışmada, tüm karışımlar için su/bağlayıcı oranının 0.25 ile sabit olduğu dikkate alındığında, kaba agreganın miktarının fazla olduğu karışımlarda agrega-hamur arayüzeyinde rötreden kaynaklı gerilmelerin artmasına bağlı olarak çatlakların daha erken günlerde başladığı sonucuna varılabilir. Ayrıca, bu bulgu, literatürde kaba agreganın kuruma rötresi üzerine etkisi ile ilgili olan bir çalışmada (Zhu vd. 2016) da, kaba agreganın rötreye üzerindeki etkisinin ilk 7 gün ihmal edilebileceği ancak ilerleyen günlerde kaba agreganın miktarının artmasının rötrenin azalmasına neden olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.61 Lifli KYB karışımların kısıtlanmış rötreye deneyi sonucunda elde edilen toplam rötreye şekil değiştirme değerleri

Şekil 4.61’den görüldüğü üzere, kancalı uçlu makro çelik lifin, KA/TA oranının 0.25 olduğu ince malzeme miktarı daha fazla olan karışımlarda rötreye çatlağına karşı daha etkili olduğu, ancak karışımlarda kaba agreganın içeriğinin artmasıyla birlikte

rötreden dolayı oluşan çatlakları kısıtlamada etkisini gösteremediği anlaşılmıştır. Bu durum, uzun olan makro çelik lifin halka şeklinde olan beton numunede, kaba agrega içeriğinin de artmasına bağlı olarak karışımdaki harç miktarının azalması sonucu etkili yayılamamasına dayandırılabilir. Makro çelik lifin mikro çelik lif ile yer değiştirilerek kullanıldığı ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarda ise, karışımların KA/TA oranının artmasıyla, mikro çelik liflerin betonun büzülmesiyle meydana gelen çekme gerilmelerini karşılamada daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, Şekil 4.61'den de anlaşıldığı üzere, mikro çelik lifler arasından daha uzun olan OL 13/16 mikro çelik lif içeren karışımlara ait numunelerde, OL 6/16 mikro çelik lif içeren karışımlarınkine göre rötre çatlak genişliğinde daha çok azalma olmuştur. Aynı geometrik şekile sahip fakat farklı uzunluklarda çelik lif içeren karışımlara ait numunelerin kısıtlanmış rötre deneyinin yapıldığı bir çalışmada da benzer sonuç elde edilmiştir (Banthia vd. 1993).

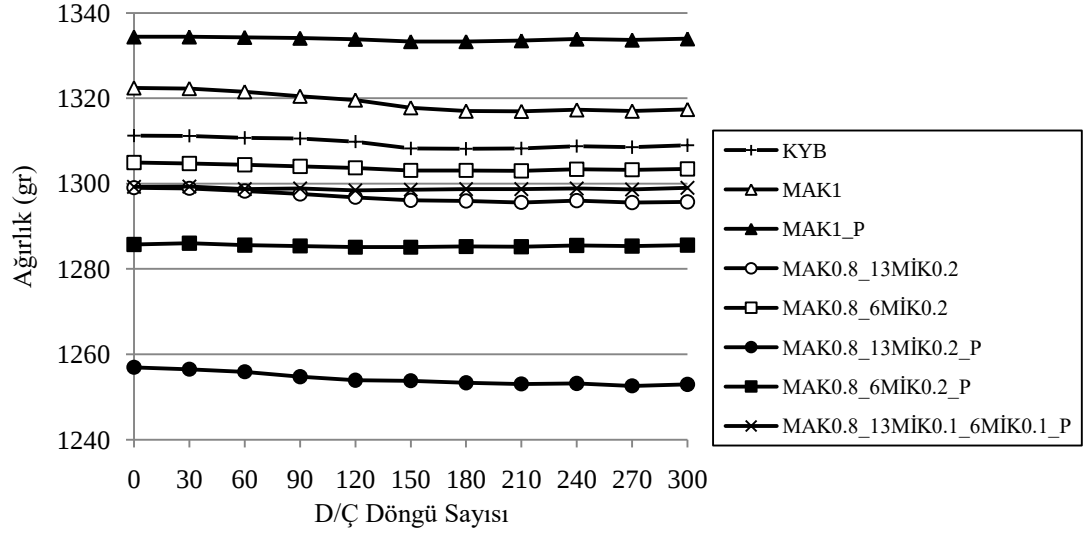
Tüm KA/TA oranları için, aynı lif hibridizasyonuna sahip PVA lifi içeren ve içermeyen karışımlar kendi içinde değerlendirildiğinde, PVA lifinin rötre çatlağı genişliği sınırlandırmada etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, PVA lifinin elastisite modülünün düşük olmasına ve agregaların etrafını sararak çatlakları daha iyi köprülemesine dayandırılabilir.

Üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait numuneler incelendiğinde, karışımların tek veya ikili lif içermesinin yerine, üçlü veya dörtlü lif hibridizasyonunun, numunelerde kısıtlanmış rötre çatlak oluşumuna karşı daha çok dayanıklılık sağladığı ve daha çok sayıda fakat genişliği daha az olan çatlak oluşumunu tetiklediği anlaşılmıştır. Afroughsabet ve ark (2019) tarafından yapılan bir çalışmada da çift kancalı uçlu, tek kancalı uçlu ve PVA lifi içeren üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışıma ait numunede, liflerin tekli ve ikili kullanıldığı karışımlara göre daha az sayıda rötre çatlağı oluşmuştur.

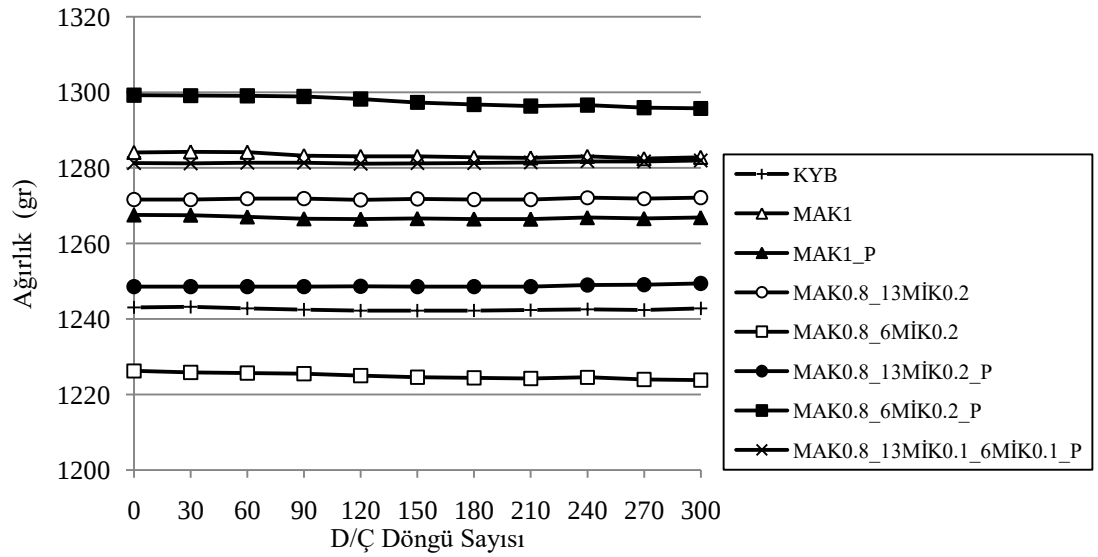
4.2.2.4 Donma çözülme deneyi

Dış koşullara maruz beton elemanlarda, hava sıcaklığındaki değişimler neticesinde donma-çözülme olayı meydana gelmekte ve bunun bir sonucu olarak da hasar oluşmaktadır. Donma-çözülme döngüsüne maruz bu elemanlarda hasarın oluşma nedeni, betonun içerisindeki suyun donmasıyla birlikte hacimce %9 oranında genleşmesi ve tekrar çözülmesi sonucunda oluşan döngünün meydana getirdiği

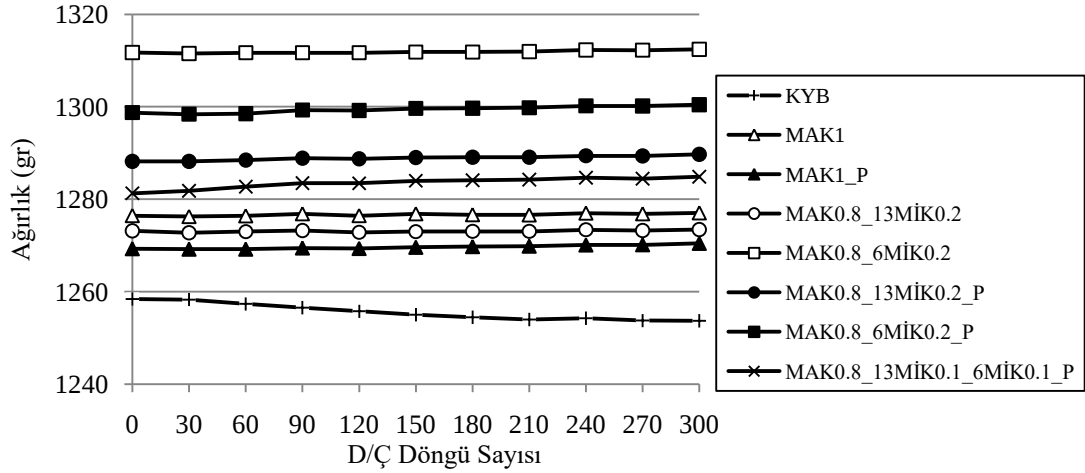
hacim değişikliklerinin, betonun içerisinde çekme gerilmeleri oluşturmasıdır. Tez alışması kapsamında yapılan donma-özölme deneyinde ise, 300 defa donma-özölme dsüne maruz bırakılan numunelerin dayanıklılığı test edilmiştir.



(a) KA/TA = 0.25



(b) KA/TA = 0.30



(c) KA/TA = 0.35

Şekil 4.62 Karışımların D/Ç deneyi sonucunda elde edilen ağırlık değişimleri

Karışımlara ait numunelerin 300 donma-çözülme (D/Ç) döngüsü boyunca her 30 döngüde bir ölçülen ağırlık değişimleri Şekil 4.62’de verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği üzere, tüm karışımlarda 60 D/Ç döngüsüne kadar ağırlıklarda artış olmuş, ilerleyen D/Ç döngülerinde ise KA/TA oranı 0.25 ve 0.30 olan karışımlara ait numunelerin hepsinde çok az da olsa (stabile yakın) bir ağırlık kaybı olurken, KA/TA oranı 0.35 olan karışımlara ait numuneler arasında lifsiz KYB haricindeki bütün numunelerde ağırlık değerlerinde artış olmuştur. KA/TA oranı 0.25 olan karışımlara ait numunelerdeki ağırlık kayıpları %0.25 ile %0.012 arasında değişkenlik gösterirken, KA/TA oranı 0.30 olan karışımlara ait numunelerdeki ağırlık kayıpları %0.19 ile %0.012 arasında değişmektedir. Bu durumda, lif içeriğinden bağımsız olarak KA/TA oranı 0.25 ve 0.30 olan tüm karışımlarda don hasarı nedeniyle ağırlık kayıplarının meydana geldiği ancak KA/TA oranı 0.35 olan karışımlara ait numunelerin ise don hasarına karşı daha dirençli olduğu söylenebilir. Bu duruma neden, kaba agrega miktarı fazla olan karışımlardaki boşluk miktarının az olmasına bağlı olarak numunelere ait D/Ç dayanıklılığının daha yüksek olduğu gösterilebilir. Bunun yanında, yüksek oranda ince malzeme içeren bu karışımların hidrasyon reaksiyonlarının devam etmesi durumuna bağlı olarak, numunelerin iç yapısındaki boşlukların dolmasının neticesinde ağırlık değerlerinin arttığı düşünülmektedir. İnce malzeme miktarı fazla olan lifli karışımlarla ilgili yapılan bazı çalışmalarda (Jacobsen ve Sellevold, 1996) da benzer sonuçlar bulunmuş olup D/Ç döngüleri sonucu numunedeki boşlukların ilerleyen yaşlarda don etkisi sonrasındaki çözülme safhasında tam olarak suya doygun hale gelmesi sonucunda, numunelerde

beklenenin aksine, ağırlık artışlarının meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Yine, başka birkaç çalışmada (Attiogbe, 1996; Attiogbe, 1997; Girska ve Skripkiūnas, 2017) da, D/Ç döngüsüne maruz bırakılmış lif takviyeli yüksek performanslı numunelerin donma-çözölmeye karşı yüksek dayanıklılık göstermesi, karışımların içerisindeki boşlukların çok küçük ve aralarındaki mesafelerin de az olması ihtimali şeklinde açıklanmıştır.

KA/TA oranları aynı olan karışımlar kendi içinde değerlendirildiğinde, tüm KA/TA oranlarında en fazla ağırlık kaybının lifsiz KYB karışımlarında olduğu ve KA/TA oranının azalmasıyla birlikte ağırlık kayıplarında artış olduğu anlaşılmıştır (bakınız Şekil 4.62). Yani, tüm numuneler arasından en fazla ağırlık kaybı, %0.25 ile KA/TA oranının 0.25 olduğu lifsiz KYB karışımında olurken, bunu KA/TA oranı 0.30 ve 0.35 olan lifsiz KYB karışımları, sırasıyla %0.19 ve %0.12 oranlarında ağırlık kaybıyla izlemiştir. Tez kapsamında tasarlanan yüksek performanslı lif takviyeli karışımların D/Ç döngü etkisine karşı gösterdiği dayanıklılık, her ne kadar bazı numunelerin yüzeylerinde hafif dökölmeler gözlemlense de genel olarak numunelerin yüzeylerinin hasarsız olmasıyla da kanıtlanmaktadır (bakınız Şekil Ekler-2). Ancak, KA/TA oranından bağımsız olarak, lifsiz KYB karışımlarında 300 D/Ç döngüsü sonrasında Şekil 4.63'den de göröldüğü gibi numunelerin yüzeyinde lifli KYB'lere kıyasla dökölmeler gözlemlenmiştir. Bu da, lif takviyesinin, karışımlarda D/Ç döngüsü neticesinde meydana gelmesi olası olan genişlemeyi engellemede etkili olmasına dayandırılabilir.



(a) KYB_0.25



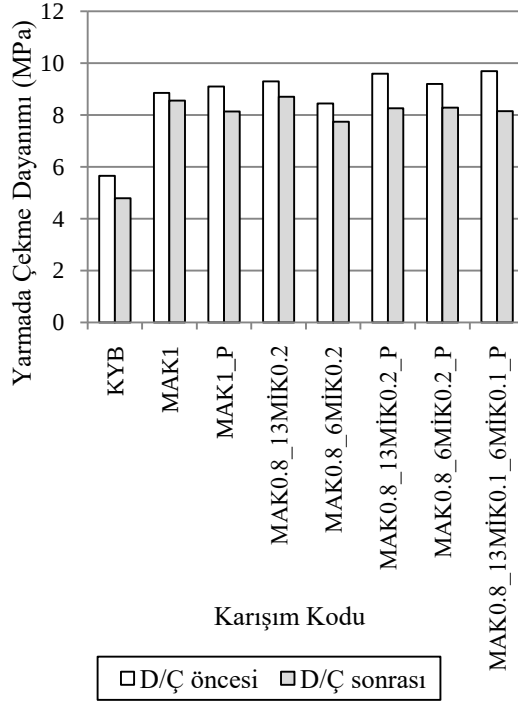
(b) KYB_0.30



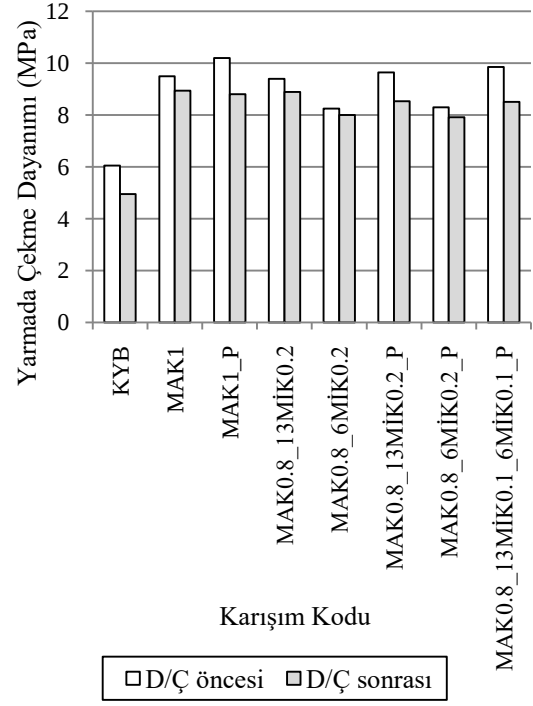
(c)KYB_0.35

Şekil 4.63 300 D/Ç döngüsü sonrasında en çok hasara uğrayan lifsiz KYB karışımlara ait numunelerin görünüşleri

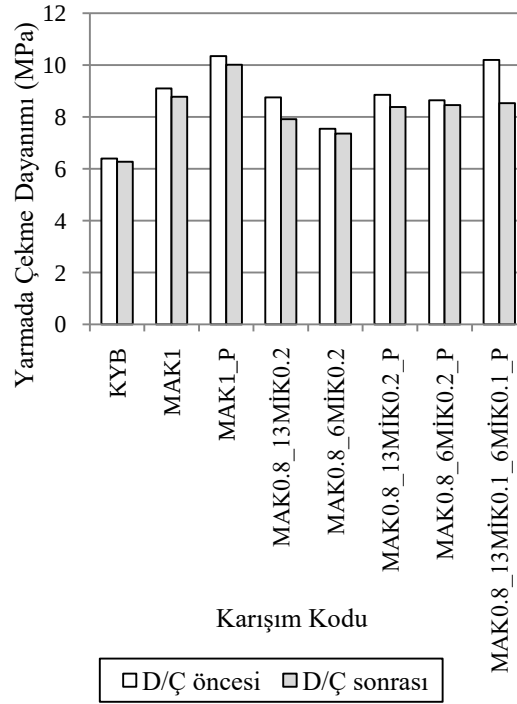
Şekil 4.64’de 300 D/Ç döngüsü öncesinde ve sonrasında numunelerin yarmada çekme dayanım sonuçları gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi, D/Ç döngüsüne maruz bütün karışımların yarmada çekme dayanımları, D/Ç deneyinden öncesine kıyasla azalmıştır. Ancak, bazı numunelerin 300 D/Ç döngüsü öncesi ve sonrası yarmada çekme dayanım değerleri arasında çok az fark olduğu bulunmuştur. Özellikle, tüm KA/TA oranları için, OL 6/16 mikro çelik lif içeren ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin D/Ç deneyi sonrasındaki artık yarmada çekme dayanımlarının genelde daha yüksek olduğu bulunmuştur. Numunelerin D/Ç döngüsüne karşı gösterdiği dayanıklılık, lif takviyesinin yanında, içerdiği mineral katkıları sayesinde de olduğu düşünülmektedir. Silis dumanı ve uçucu kül, agrega-çimento hamuru arasındaki arayüzeyi iyileştirmekte ve betonun mikroyapısında geçirgenliği daha az olan bir gözenek oluşturmaktadır (Behfarnia ve Salemi, 2013). Böylece, yüksek bağlayıcı oranına sahip bu karışımlarda donma çözülme etkisinin az olduğu, yani, bu tez çalışmasında hazırlanan karma lif takviyeli çimento esaslı kompozit karışımlara ait numunelerin donma çözölmeye karşı dayanıklı olduğu sonucuna varılabilir.



(a) KA/TA = 0.25



(b) KA/TA = 0.30



(c) KA/TA = 0.35

Şekil 4.64 Numunelerin 300 D/Ç döngüsünden önceki ve sonraki yarmada çekme dayanım sonuçları

4.3. Büyük Ölçekli Bindirmeli Ekli-donatılı Kirişin Aderansı

Bu tez çalışması kapsamında, üç farklı KA/TA oranına sahip lif takviyeli KYB karışımların taze beton özellikleri incelenmiş ve daha sonra tekli, ikili, üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip KYB karışımlarından numuneler üretilmiştir. Üretilen bu numuneler üzerinde 3, 28 ve 90 günlük sertleşmiş beton özelliklerine ait testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, genelde KA/TA oranı 0.35 olan karışımlara ait numunelerin mekanik özelliklerinin daha öne çıktığı görülmüştür. Lif hibridizasyonu bakımından ise, özellikle eğilme dayanımına katkısı 6/16 OL mikro çelik life kıyasla daha fazla olan 13/16 OL mikro çelik lifin kullanıldığı karışımların daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, KA/TA oranı 0.35 olan ve makro çelik lif, 13/16 OL mikro çelik lif ve PVA lifi içeren 5 adet lif takviyeli karışım ile karşılaştırma amacıyla lifsiz KYB karışımından 2'şer adet olmak üzere toplamda 12 adet 200x300x2000 mm³ boyutlarında büyük ölçekli kirişler, lif takviyesinin beton ve donatı arasındaki aderans üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla dökülmüştür. Daha sonra, basit mesnetli ve çekme donatısı bindirmeli ekli yerleştirilmiş bu büyük ölçekli kiriş numuneleri, açıklık ortasında sabit moment bölgesinden dört noktalı pozitif eğilme ile yüklenerek test edilmiştir.

4.3.1 Kiriş numunelerin aderans dayanımlarının değerlendirilmesi

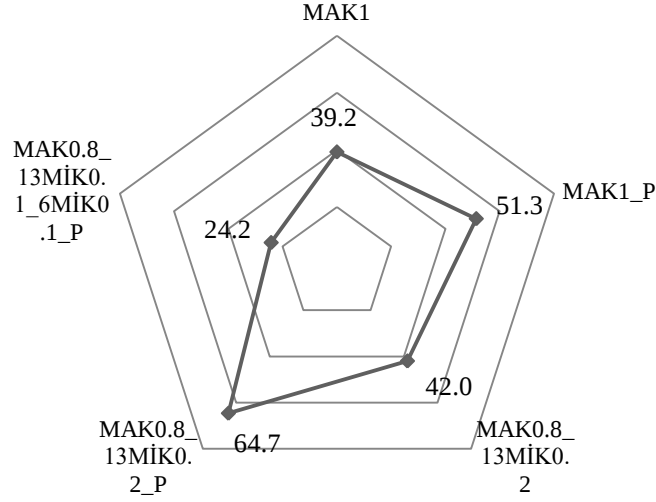
Büyük ölçekli bindirmeli ekli-donatılı kirişlerin aderansının tespiti amacıyla yapılan testler sonunda elde edilen bulgular Çizelge 4.4'de sunulmuştur. Burada, f_c basınç dayanımını, P_{max} göçme yükünü, δ orta açıklık sehimini, c tarafsız eksen derinliğini, f_s donatıda oluşan gerilmeyi ve u aderans dayanımını sembolize etmektedir.

Çizelge 4.4'den görülebileceği gibi, lifsiz KYB karışım ile liflerin tekli, ikili, üçlü ve dörtlü kullanıldığı farklı lif hibridizasyonuna sahip karışımlar karşılaştırıldığında, tüm lif takviyeli karışımlara ait kiriş numunelerin aderans dayanımını lifsizinkilerden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu duruma neden olarak, liflerin, etkili köprüleme ile birlikte çatlak başlamasını ve büyümesini engelleyerek enerji yutma kapasitesinin daha yüksek olduğu ve donatı ile beton arasındaki etkili aderansın devamını sağlayan bir mekanizma oluşturması gösterilebilir. Şekil 4.65'den görüldüğü gibi, lifsiz KYB karışımına ait kiriş numunesine göre aderans dayanımındaki en düşük artış %24.2 ile dörtlü lif

hibridizasyonunun olduğu karışıma ait kiriş numunelerde gözlemlenirken, en fazla artış %64.7 ile makro çelik lif, OL 13/16 mikro çelik lif ve PVA lifi içeren üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışıma ait kiriş numunelerde elde edilmiştir.

Çizelge 4.4 Büyük ölçekli bindirmeli ekli-donatılı kiriş deney sonuçları

Karışım Kodu	İstatistik Değerler	f_c (MPa)	P_{max} (kN)	δ (mm)	c (mm)	f_s (MPa)	u (MPa)
KYB	1. Numune	69.60	146.90	4.72	26.36	219.18	4.02
	2. Numune	66.90	152.90	4.84	27.45	229.27	4.20
	Ortalama	68.25	149.90	4.78	26.91	224.23	4.11
	Std.sapma	1.91	4.24	0.08	0.77	7.13	0.13
MAK1	1. Numune	78.40	203.20	4.98	31.95	307.61	5.64
	2. Numune	75.60	209.10	5.38	32.74	317.47	5.82
	Ortalama	77.00	206.15	5.18	32.35	312.54	5.73
	Std.sapma	1.98	4.17	0.28	0.56	6.97	0.13
MAK1_P	1. Numune	69.70	220.20	7.03	34.50	336.16	6.16
	2. Numune	69.10	224.10	6.91	35.02	342.43	6.28
	Ortalama	69.40	222.15	6.97	34.76	339.30	6.22
	Std.sapma	0.42	2.76	0.08	0.37	4.43	0.08
MAK0.8_13MiK0.2	1. Numune	76.90	204.60	5.92	32.16	309.90	5.68
	2. Numune	72.20	214.80	6.18	33.63	327.07	6.00
	Ortalama	74.55	209.70	6.05	32.90	318.49	5.84
	Std. sapma	3.32	7.21	0.18	1.04	12.14	0.23
MAK0.8_13MiK0.2_P	1. Numune	72.90	238.60	7.44	36.37	364.87	6.69
	2. Numune	68.70	243.70	7.64	37.48	374.14	6.86
	Ortalama	70.80	241.15	7.54	36.93	369.51	6.78
	Std.sapma	2.97	3.61	0.14	0.78	6.55	0.12
MAK0.8_13MiK0.1_6MiK0.1_P	1. Numune	70.50	188.90	5.55	30.88	286.12	5.24
	2. Numune	68.00	175.50	5.28	30.08	271.40	4.98
	Ortalama	69.25	182.20	5.42	30.48	278.76	5.11
	Std.sapma	1.77	9.48	0.19	0.57	10.41	0.18



Şekil 4.65 Lif takviyeli KYB karışımına ait kiriş numunelerin lifsiz KYB numunelerine göre aderans dayanımı gelişimleri (%)

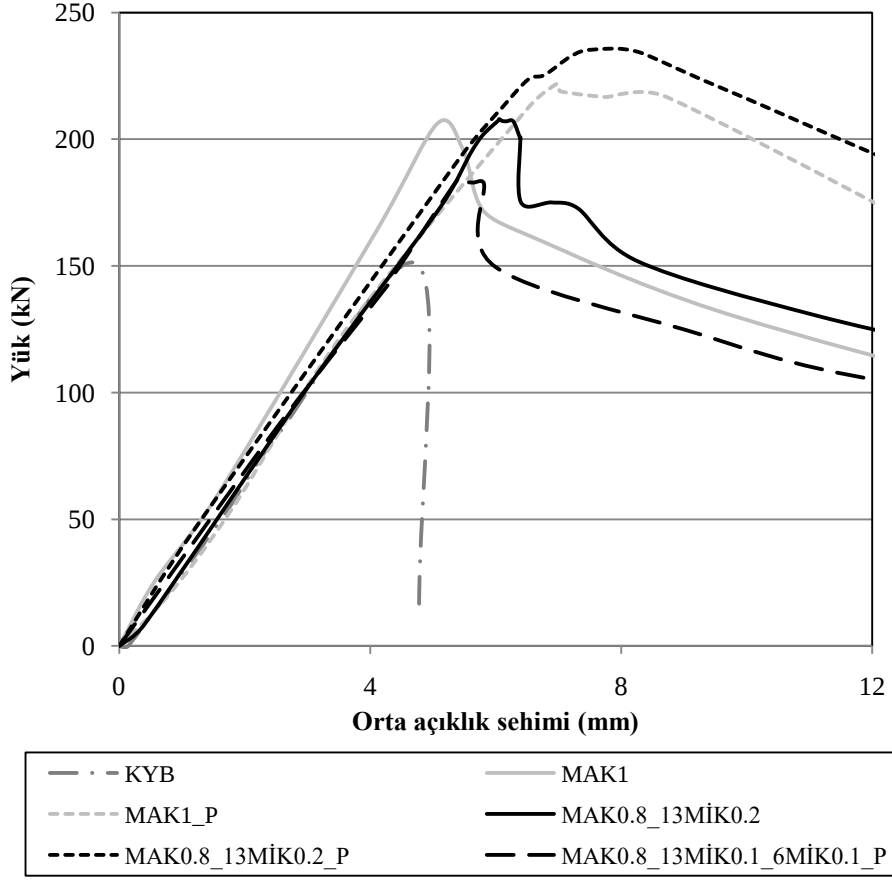
İkili lif hibridizasyonuna sahip karışımlara dahil edilen mikro liflerden OL 13/16 çelik lif ile PVA lifi karşılaştırıldığında, PVA mikro lifinin aderans dayanımının gelişiminde daha etkili olduğu anlaşılmıştır. Bu duruma neden olarak, MAK1_P karışımının MAK0.8_13MİK0.2 karışımına göre daha fazla oranda hem elastisite modülü yüksek, hem de uzun ve kancalı uçlu olan makro çelik lif içermesi gösterilebilir. Ayrıca, bu, PVA lifinin özgül ağırlığının OL 13/16 mikro çelik lifinkinden düşük olması, dolayısıyla PVA lifinin karışıma daha fazla oranda dahil edilmesi neticesinde, eğilme yüklemesi altında kirişlerde meydana gelebilecek mikro çatlakların daha etkili köprülenmesine dayandırılabilir. Harajli ve Salloukh (1997) tarafından yapılan bir çalışmada da, daha fazla oranda kancalı uçlu makro çelik lif kullanımının, lifsiz betona göre aderans dayanımını %55 oranında arttırdığı bulunmuştur.

Üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışıma ait kiriş numunelerde, hem OL 13/16 mikro çelik lif hem de PVA mikro sentetik lifinin makro çelik lif ile birlikte kullanılmasıyla, liflerin daha etkili bir şekilde çatlakları köprülediği ve böylece bu karışımlara ait kiriş numunelerinin aderans dayanımının gelişiminin diğer lif takviyeli karışımlara kıyasla daha fazla olduğu bulunmuştur. Bunun sebebi, üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlarda, tekli ve ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlara göre, mikro çelik lif ile PVA lifinden dolayı matristeki artan lif yoğunluğu ve lifler arası oluşan sinerji sebebiyle, özellikle mikro çatlakların birleşip yayılmasının engellenmesine ve dolayısıyla numunelerin göçme yükünün (P_{max})

artmasına dayandırılabilir. Başka bir deyişle, liflerin karma olarak kullanıldığı karışımlarda, mevcut olan liflerin toplam performansının tek lif olarak makro çelik lifin performansından fazla olması (sinerji) nedeniyle, karma lif takviyesinin kirişin göçme yükü ile birlikte aderans dayanımını daha çok arttırdığı düşünülmektedir. Ancak, dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışıma ait kiriş numunesinin lifsizinkine göre aderans dayanımı gelişiminin en düşük olduğu görülmüştür. Bu duruma neden olarak, OL 13/16 mikro çelik lif yerine karışıma dahil edilen OL 6/16 mikro çelik lif gösterilebilir. Çünkü, bu lifin boyunun kısa olması ve dolayısıyla eğilme altında oluşan çatlakları köprülemede çok fazla etki gösteremediği düşünülmektedir.

4.3.2 Yük-orta açıklık sehim eğrisi

Lif takviyeli KYB'nin donatının aderans dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yapılan dört-noktalı eğilme testinden elde edilen yük-orta açıklık sehim eğrileri Şekil 4.66'da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, lifsiz KYB karışımına ait kirişin hem göçme yükü en düşük çıkmış hem de göçme yüküne daha az orta açıklık sehiminde ulaşılmıştır. Ayrıca, maksimum yük sonrasında yük taşıma kapasitesini tamamen kaybetmiştir. Buna rağmen, lif takviyeli karışımların hepsinde, hem göçme yükünün daha fazla olduğu, hem de maksimum yük sonrasında, yük taşıma kapasitesinde ani düşüş olmayıp, yük taşıma kapasitesinin azalarak devam ettiği görülmüştür. Bu duruma neden olarak, eğilme yüklemesinden dolayı oluşan çatlakların lifler tarafından köprülenmesi gösterilebilir. Çünkü lifler, çatlak genişliğini azaltarak betonun çekme karakteristiğini arttırmaktadır. Ayrıca, bu durum, lif takviyesinin, bindirme donatısı ve etrafındaki betonun arasındaki adezyonu arttırmasına dayandırılabilir (Bilal vd. 2001). Literatürdeki bazı çalışmalarda (Yerex vd. 1985; Rodriguez vd. 1992) da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bilal (2001) tarafından yapılan başka bir çalışmada da, çatlak öncesinde, lif takviyesinin beton matrisinin çekme dayanımına katkısı olmadığı ancak çatlak sonrasında çatlayan yüzeyin köprülenmesiyle liflerin çekme dayanımına katkı sağladığı bulunmuştur.



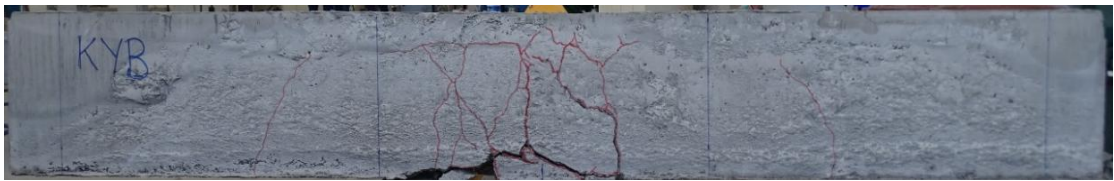
Şekil 4.66 Büyük ölçekli kirişlerin yük-sehim eğrileri

Şekil 4.66'den görüldüğü gibi, MAK1, MAK0.8_13MİK0.2 ve dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait kiriş numunelerinde maksimum yük sonrası yük kapasitesinde keskin bir düşüş olurken, PVA lifi içeren ikili ve üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait kiriş numunelerinde maksimum yük sonrasında artan sehim ile birlikte daha kademeli bir düşüş meydana gelmiştir. Enerji yutma kapasitesinin daha fazla olduğu PVA lifi içeren ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait kiriş numunelerinde, eğilme yüklemesi altında daha fazla miktarda oluşan mikro çatlaklar da bu karışımlara ait kiriş numunelerinin daha sünek bir davranış sergilediğinin kanıtı olarak gösterilebilir (bakınız Şekil 4.67-72). Yük-sehim eğrilerinde maksimum yük sonrasındaki yük kapasitesinde kademeli olarak meydana gelen bu düşüşün karışımların içeriğindeki kancalı uçlu makro çelik lif ve PVA lifinden kaynaklandığı düşünülmektedir. PVA lifinin çimento ile kimyasal uyumluluğu, hidrofilik yapısı, yüksek maksimum çekme dayanımına sahip olması ve makro çelik lifin yüksek elastisite modülü ve uzun ve kancalı uçlu olması nedenlerinden dolayı kirişler çoklu-çatlak davranışıyla daha yüksek göçme yüküne

ulaştığından, kirişlerdeki donatının betondan çekip çıktığı düşünülmektedir. Harajli ve Salloukh (1997) tarafından yapılan bir çalışmada da kancalı uçlu çelik lif içeren karışımlara ait numunelerde yük-sehim eğrilerinde maksimum yük sonrasında, lifsiz numunelerinkinin aksine, kademeli düşüş olduğu bulunmuştur. Ayrıca, aynı çalışmada, hacimce %0.6 oranında kullanılan sentetik lifin de aderans göçmesinin sünekliliğini geliştirdiği ancak kancalı uçlu çelik lif kadar etkili olmadığı tespit edilmiştir.

4.3.3 Aderans göçmesi modu ve çatlak modelleri

Liflerin donatı aderansı üzerindeki etkilerini incelenmek amacıyla hazırlanan büyük ölçekli bindirmeli-ekli donatılı kiriş numunelerde dört noktalı eğilme testi sonucunda oluşan çatlaklar Şekil 4.67-72’de gösterilmiştir. Test edilen kiriş numunelerin hepsinde ilk eğilme çatlakları, kirişte yükleme sonucunda maksimum momentin olduğu sabit moment bölgesinin çekme kısmında oluşmuştur. Yüklemenin artmasıyla birlikte sabit moment bölgesi boyunca, donatıların bindirme bölgesini de kapsayacak şekilde çatlaklar meydana gelmiştir. Lifsiz KYB karışımında, göçme sonrasında, donatıların bindirme bölgesinde çatlak genişliklerinin çok fazla arttığı, hatta Şekil 4.67’den görüldüğü gibi, kirişin alt yüzeyinde donatı bindirme bölgesinin olduğu kısımda yüzey betonunun tamamen kırıldığı görülmüştür. Ayrıca lifsiz KYB karışımına ait kiriş numunelerde ani, gevrek, sesli ve yarıma şeklinde göçmenin olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, lifsiz kiriş numunelerde gevrek davranışın bir sonucu olarak genişliği daha fazla ve diğer karışımlara nazaran daha az sayıda çatlak oluşmuştur.



(a) Yan görünüş (1.Numune)



(b) Alt görünüş (1.Numune)



(c) Yan görünüş (2.Numune)



(d) Alt görünüş (2.Numune)

Şekil 4.67 KYB karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri



(a) Yan görünüş (1.Numune)



(b) Alt görünüş (1.Numune)



(c) Yan görünüş (2.Numune)



(d) Alt görünüş (2.Numune)

Şekil 4.68 MAK1 karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri



(a) Yan görünüş (1.Numune)



(b) Alt görünüş (1.Numune)



(c) Yan görünüş (2.Numune)



(d) Alt görünüş (2.Numune)

Şekil 4.69 MAK1_P karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri



(a) Yan görünüş (1.Numune)



(b) Alt görünüş (1.Numune)



(c) Yan görünüş (2.Numune)



(d) Alt görünüş (2.Numune)

Şekil 4.70 MAK0.8_13MİK0.2 karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri



(a) Yan görünüş (1.Numune)



(b) Alt görünüş (1.Numune)



(c) Yan görünüş (2.Numune)



(d) Alt görünüş (2.Numune)

Şekil 4.71 MAK0.8_13MİK0.2_P karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri



(a) Yan görünüş (1.Numune)



(b) Alt görünüş (1.Numune)



(c) Yan görünüş (2.Numune)



(d) Alt görünüş (2.Numune)

Şekil 4.72 MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P karışımına ait büyük ölçekli kirişlerin çatlak modelleri

Kiriş numunelerin test edilmesi esnasında, göçme öncesinde, lif takviyeli kiriş numunelerinin hepsinde, donatı bindirme bölgesi dışındaki eğilme çatlak genişliklerinin ve çatlakların yayılımının, donatı bindirme bölgesine göre daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü, göçme öncesinde bindirme bölgesinde oluşan gerilmenin, bu bölgedeki donatıların kapasitesinden daha az olduğu düşünülmektedir. Bu durumun nedeni olarak, bindirme bölgesinde, bindirme bölgesi dışına göre iki kat daha fazla donatının olmasının neticesi olarak, bu bölgedeki yük kapasitesinin arttığı ve aynı zamanda lif takviyesinin, bindirme donatısı ve etrafındaki betonun arasındaki adezyonu artırarak çatlak oluşumunu geciktirdiği söylenebilir. Benzer sonuca lif takviyesinin aderans dayanımı üzerine etkisi ile ilgili yapılan başka bir çalışmada (Hamad vd. 2001) da ulaşılmıştır. Lifli karışımlara ait kiriş numunelerin hepsinde göçme ise kademeli olarak ve lifsizinkine göre daha sünek bir şekilde gerçekleşmiştir. Özellikle PVA lifi içeren ikili ve üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarda, çoklu çatlak davranışın bir sonucu olarak, genişliği daha az ancak daha fazla sayıda çatlak meydana geldiği görülmüştür (bakınız Şekil 4.67-4.72). Liflerin, göçme esnasında geniş açıklıklı çatlak oluşumunu engellediği ve böylece kiriş numunelerinin göçme sonrasında bile, lifsiz karışıma ait kiriş numunesinin aksine, bütünlüğünün bozulmadığı gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİ

- Lifsiz karışımlarda kaba agreganın artmasıyla birlikte taze beton birim hacim ağırlığı değerleri artarken, hava içeriğinde azalma meydana gelmiştir.
- Tüm lifli karışımların taze beton birim hacim ağırlığı değerleri lifsizlerinkinden daha yüksek bulunmuştur. Sadece makro çelik lif içeren karışımların hava içeriği değerleri, tüm kaba agrega/toplam agreganın için en yüksek çıkmıştır.
- Lifsiz karışımlar karşılaştırıldığında, kaba agreganın arttıkça standard çökme-yayılma ve J-halkalı çökme-yayılma çapının düştüğü ve buna bağlı olarak da t_{50} , t_{50j} ve V hunisi süresinin arttığı ancak segregasyonun olmadığı gözlemlenmiştir.
- Tüm kaba agrega/toplam agreganın için, ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlardan daha düşük narinlikteki mikro çelik lifin olduğu karışımların çökme-yayılma değerleri en yüksek ve t_{50} değerleri en düşük çıkarken, üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlardan narinliği fazla olan mikro lif ile birlikte PVA lifi içeren karışımların çökme-yayılma değerleri en düşük ve t_{50} değerleri en yüksek çıkmıştır.
- Dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlarda, kaba agreganın toplam agreganın oranı 0.25 ve 0.30 olması durumlarında çökme-yayılma deneyinde karışım daha homojen yayılmış, hatta VSI değerleri 0 olarak değerlendirilmiştir. Kaba agreganın toplam agreganın oranının 0.35 olduğu karışımlarda ise az kümelenme meydana gelmiş olup VSI değeri 2 olarak belirlenmiştir.
- Tüm kaba agreganın toplam agreganın oranları için, J halkalı çökme yayılma deneyinden elde edilmiş olan yayılma çapı, t_{50j} akma süresi ve ΔH değerleri gözönüne alındığında, daha düşük narinlikteki mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımların işlenebilirlik özellikleri tüm lifli karışımlar içerisinde en iyi çıkmıştır.
- Tüm kaba agreganın toplam agreganın oranları için, PVA ve yüksek narinlikteki mikro çelik lifin bir arada kullanıldığı üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımların J-halkalı çökme yayılma çapı, t_{50j} akma süresi ve ΔH değerlerinin, olumsuz etkilendiği bulunmuştur.
- Kaba agreganın toplam agreganın oranı 0.35 olan üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımların J-halkası çökme-yayılma çapları

beklenilenin aksine ince malzeme miktarı fazla olan kaba agrega/toplam agrega oranlarına sahip tüm karışımlarınkinden fazla olmuştur.

- Tüm kaba agrega/toplam agrega oranları için, narınlığı düşük mikro çelik lifi içeren ikili lif hibridizasyonun olduğu karışımların V hunisi akış süreleri en düşük çıkarken tek lif olarak makro çelik lif içeren karışımlarının V hunisi akış süreleri en yüksek olarak bulunmuş ve kaba agrega/toplam agrega oranı 0.35 olan tek lifli karışımlarda bloklanma gözlemlenmiştir.
- Kaba agrega/toplam agrega oranı 0.35 olan karışımlardan, PVA ve yüksek narınlığa sahip mikro çelik lif içeren üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımda 22 sn ile en yüksek V_s değeri elde edilirken, en düşük narınlığa sahip mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonu içeren karışımda ise 13.5 sn ile en düşük V_s değeri bulunmuştur.
- Lifsiz ve lif takviyeli karışımlarda kaba agrega oranı artmasıyla birlikte basınç dayanımında artış meydana gelmiştir.
- Lif takviyeli KYB karışımlara ait numunelerde en düşük erken ve standard basınç dayanım değerleri, kaba agrega/toplam agrega oranı 0.25 olan sadece makro çelik lif içeren karışıma ait numunelerden elde edilirken, en düşük nihai basınç dayanımı değeri ise yine kaba agrega/toplam agrega oranı 0.25 olan makro çelik lif ile PVA lifinin ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışıma ait numunelerde bulunmuştur. Ayrıca, en yüksek erken, standard ve nihai basınç dayanım değerleri ise kaba agrega/toplam agrega oranı 0.35 olan boyu kısa mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışıma ait numunelerde elde edilmiştir.
- Tüm kaba agrega/toplam agrega oranları için, PVA lifinin ilave edildiği ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlarında, aynı lif içeriğine sahip ancak PVA lifi içermeyen karışımlara göre basınç dayanımlarında genelde azalma olmuştur.
- Dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerde, kaba agrega/toplam agrega oranı 0.30 ve 0.35 olan karışımlarınkine kıyasla, kaba agrega/toplam agrega oranı 0.25 olan karışımlarda, lifsiz karışımın erken, standard ve nihai basınç dayanım değerlerine göre daha çok artış oluşmuştur.
- Lifsiz karışımlarda kaba agrega oranının artmasının elastisite modülü değerlerinde artışa neden olduğu ancak lif takviyeli karışımlarda hem kaba

agrega içeriğinin hem de lif hibridizasyonunun elastisite modülü değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.

- Lif takviyeli KYB karışımlara ait numunelerde en yüksek elastisite modülü değeri 42.23 MPa ile kaba agrega/toplam agrega oranı 0.25 olan ve düşük narinliğe sahip mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışıma ait numunede, en düşük elastisite modülü değeri ise 38.66 MPa ile kaba agrega/toplam agrega oranı 0.30 olan ve PVA lifi içeren üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışıma ait numunede bulunmuştur.
- Lifsiz karışımlara kıyasla, genelde kaba agrega/toplam agrega oranı 0.25 olan karışımlara ait numunelerin elastisite modülü değerlerinde artış gözlenirken, özellikle kaba agrega/toplam agrega oranı 0.35 için, lifli karışımların elastisite modülü değerlerinde düşüş olmuştur.
- Lifsiz karışımlarda kaba agrega/toplam agrega oranının artmasıyla birlikte hem yarmada çekme dayanımında hem de eğilme dayanımında artış olmuştur.
- Lif takviyeli KYB karışımlara ait numunelerde en düşük 90 günlük yarmada çekme dayanım değerleri, kaba agrega/toplam agrega oranı 0.25 olan boyu kısa mikro çelik lif içeren ikili lif hibridizasyonuna sahip karışıma ait numunelerden elde edilmiştir. En yüksek 90 günlük yarmada çekme dayanım değerleri ise kaba agrega/toplam agrega oranı 0.35 olan ve makro çelik lif ile birlikte PVA mikro lifi içeren ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışıma ait numunede bulunmuştur.
- Dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımların yarmada çekme ve eğilme dayanımı, kaba agrega/toplam agrega oranı 0.25 olan karışımda, lifsiz karışımın 3, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımlarına göre artış sağlarken, kaba agrega/toplam agrega oranı 0.30 ve 0.35 olan dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında daha düşük oranlarda iyileşme meydana gelmiştir.
- Tüm kaba agrega/toplam agrega oranları ve kür yaşları için, PVA lifi içeren karışımlara ait ikili, üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip numunelerin yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında, aynı çelik lif içeriğine sahip tekli ve ikili lif hibridizasyonunun olduğu PVA lifi içermeyen karışımlarinkine göre artma meydana gelmiştir.

- Kaba agrega/toplam agrega oranına ve kür yaşına bakılmaksızın, karışımlara kısa ve düz çelik lif dahil edilmesinin basınç dayanımı değerlerinde, uzun ve kancalı uçlu çelik liflerin eklenmesi ise yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinde artışa neden olduğu bulunmuştur.
- Lif takviyeli KYB karışımlara ait numunelerde en yüksek erken eğilme dayanım ve tokluk değerleri, tüm kaba agrega/toplam agrega oranları için, makro çelik lif ile PVA lifinin ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait numunelerde bulunmuş olup, en yüksek nihai eğilme dayanım ve tokluk değerleri ise, makro çelik lif, yüksek narinlikteki mikro çelik lif ve PVA lifinin bir arada kullanıldığı üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışıma ait numunelerde elde edilmiştir.
- Tüm kaba agrega/toplam agrega oranları için, kür yaşının artmasıyla birlikte eğilme yüklemesi sonucu oluşan çatlakların sayısı azalmıştır.
- Lifsiz KYB karışımlarında, kaba agrega/toplam agrega oranının azalmasıyla, kılcal su emme katsayısı düşmüştür.
- Tüm kaba agrega/toplam agrega oranları için, lif takviyeli karışımlara ait numuneler arasından en düşük kılcal su emme katsayıları, sadece makro çelik lif ve makro ve mikro çelik lifin birlikte kullanıldığı ikili lif hibridizasyonuna sahip karışımlarda elde edilmiştir. Buna karşın, PVA lifinin olduğu ikili, üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerde su emme katsayılarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Lifsiz KYB karışımlarında, kaba agrega içeriğinin azalmasıyla su geçirimsizlik katsayısı azalmıştır.
- Tüm kaba agrega/toplam agrega oranları için, çelik liflerin tekli ve ikili olarak kullanıldığı karışımlara ait numunelerin su geçirimsizlik katsayılarının düşük olduğu, PVA lifinin dahil edildiği ikili, üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerin su geçirimsizlik katsayılarının ise daha yüksek olduğu bulunmuştur.
- Lifsiz KYB karışımına ait numunelerde kaba agrega/toplam agrega oranının artmasıyla, genişliği azalan bir tane lokal kısıtlanmış rötire çatlak oluşmuştur. Bunun yanında, tüm lif takviyeli karışımlara ait numunelerde çoklu-çatlak davranışı gözlemlenmiş olup, özellikle kaba agrega/toplam agrega oranı 0.35

olan lifli karışımlara ait numunelerde daha fazla sayıda rötre çatlağı oluşmuştur.

- Donma-    lme döngüsüne maruz lifsiz KYB karışımlarına ait numunelerde kaba agrega/toplam agrega oranlarının azalmasıyla numunelerin ağırlık kayıplarının arttığı ve lifli karışımlara kıyasla yüzeylerinde d k lmeler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, lif içeriğinden bağımsız olarak, kaba agrega/toplam agrega oranı 0.25 ve 0.30 olan lif takviyeli karışımlara ait numunelerin hepsinde az da olsa ağırlık kaybı olurken, kaba agrega/toplam agrega oranı 0.35 olan numunelerde ağırlık kaybı olmadığı ve D/  dayanıklılığının daha yüksek olduğu bulunmuştur.
- Tüm kaba agrega/toplam agrega oranları için, D/  öncesi ve sonrasındaki yarmada çekme dayanımları arasındaki fark en az düşük narinlikteki mikro  elik lif içeren ikili ve üçlü lif hibridizasyonuna sahip karışımlara ait numunelerde görülürken, numunelerin genelinde D/  öncesi ve sonrasındaki yarmada çekme dayanım farkı az olmuştur.
- Lif takviyesinin aderansı arttırdığı bulunmuştur. Lifsiz KYB karışımına göre aderans dayanımındaki en fazla artışı narinliği yüksek mikro  elik lif ve PVA lifi içeren   l  lif hibridizasyonuna sahip karışımına ait kiriş numunelerde olurken, en düşük aderans dayanım artışının ise, narinliği düşük mikro  elik lif içeren dörtlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımına ait kiriş numunelerde olduğu bulunmuştur. Ayrıca, lifsiz KYB karışımına ait kiriş numuneleri maksimum yük sonrasında yük taşıma kapasitesini tamamen kaybetmiş, PVA lifi içeren ikili ve üçlü lif hibridizasyonunun olduğu karışımlara ait kiriş numunelerinde maksimum yük sonrasında artan sehim ile birlikte daha kademeli bir düşüş gözlemlenmiştir. Ancak, sadece makro  elik lif ile makro ve mikro  elik lifin birlikte kullanıldığı ikili lif hibridizasyonunun olduğu karışımına ait kiriş numunesindeyse maksimum yük sonrası y k kapasitesinde artan sehim ile birlikte keskin bir düşüş g r lm ştir.
- Lif takviyeli KYB karışımlara ait büyük ölçekli kiriş numunelerinde göçme ani ve gevrek olurken, lif takviyeli karışımlara ait numunelerin hepsinde göçme, çoklu-çatlak davranışıyla daha sünek ve numunenin b t nl ğu bozulmadan meydana gelmiştir.

Karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton, özellikle deprem esnasında kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşan büyük momentlerin absorbe edilmesi ve bu bölgelerdeki donatı sıklığı sebebiyle beton yerleşmesiyle ilgili oluşacak problemlerin aşılması açısından büyük bir öneme sahiptir. Karma lifli çimento esaslı kompozitler yüksek enerji yutma (tokluk) kapasitesine sahip olduklarından, bu kompozitlerin deprem gibi dinamik yüke maruz yapıların inşasında kullanılmasının büyük avantaj sağlayacağı açıktır.



6. KAYNAKLAR

- Abu-Lebdeh, T., Hamoush, S., Heard, W. (2011). Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites. *Constr. Build. Mater.* 25(1), 39–46.
- ACI 318-05 (2005). *Building code requirements for reinforced concrete and commentary*. America: American Concrete Institute.
- Afroughsabet, V., Geng, G., Lin, A., Biolzi, L., Ostertag, C. P., Monteiro, P. J.M. (2019) . The influence of expansive cement on the mechanical, physical, and microstructural properties of hybrid-fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, **96**, 21–32
- Ahmad, S., Umar A. (2018). Fibre-reinforced Self-Compacting Concrete: A Review. *Mater. Sci. Eng.* **377**, 012117
- Ahmad, S., Umar, A. (2018). Rheological and mechanical properties of self-compacting concrete with glass and polyvinyl alcohol fibres. *Journal of Building Engineering*. **17**, 65–74
- Ahmed, S.F.U., Maalej, M. (2009). Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 23(1), 96-106.
- Akcay, B. (2012). Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete. *Composites: Part B*, **43**, 766-78.
- Altun, F., Aktas, B. (2013). Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.* **38**, 575–581.
- Arısoy, B. (2005). Lifli hafif betonların optimum karışım tasarımı. *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart
- ASTM C138 (2017). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1581 / C1581M-18a (2018). *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1585-04 (2004). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. 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 / C469M-14 (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C496 / C496M-17 (2017). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618 (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C666 / C666M-15 (2015). *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C78-02 (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Atahan, H. N., Pekmezci, B. Y., Tuncel, E. Y. (2013). Behavior of PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composites under Static and Impact Flexural Effects. *J. Mater. Civ. Eng.*, **25**, 1438-1445.
- Attigbe, E. K. (1996). Predicting freeze-thaw durability of concrete-A new approach. *Materials Journal*, 93(5), 457-464.
- Attigbe, E. K. (1997). Volume fraction of protected paste and mean spacing of air voids. *ACI Materials Journal*, 94(6), 588-591.
- Aydin, A. C. (2007). Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, **21**, 1149–1154
- Balaguru, P. N., Shah, S. P. (1992). *Fiber Reinforced Cement Composites*. 1st ed. New York, USA, McGraw-Hill Inc.
- Balaguru, P., Najm, H. (2004). High performance fiber reinforced concrete mixture proportions with high fiber volume fractions. *ACI Materials Journal*, **101**, 281–286.
- Bangi, M.R., Horiguchi, T. (2011). Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41(11), 1150-1156.
- Banthia, N., Azzabi, M., Pigeon, M. (1993). Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, **26**, 405-413
- Banthia, N., Gupta, R. (2004). Hybrid fibre reinforced concrete (HyFRC): fibre synergy in high strength matrices. *Mater Struct*, 37(10), 707–16.

- Banthia, N., Nandakumar, N. (2003). Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 3-9.
- Banthia, N., Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37, 1366–72.
- Banthia, N., Soleimani, S. M. (2005). Flexural response of hybrid fiber-reinforced cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 102(6), 382-389.
- Barrera, A., Bonet, J., Romero, M., Miguel, P. (2011). Experimental tests of slender reinforced concrete columns under combined axial load and lateral force. *Eng Struct.* 33, 3676–89.
- Beglarigale, A., Yazıcı, H. (2015). Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar, *Constr. Build. Mater.* 75, 255–265.
- Behfarnia, K., Salemi, N. (2013). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 4(8), 580-584.
- Bentur A., Mindess, S. (1990). *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. 1st ed. London and New York, Elsevier Applied Science.
- Bentur A., Mindess, S. (2007). *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. 2nd ed. New York, USA, Taylor and Francis.
- Bentur, A. (1989). *Fiber-reinforced cementitious materials*. Editors: Skalny JP. Material Science of Concrete, 223-285, Westerville, Ohio, The American Ceramic Society.
- Bentur, A. (2000). Role of interfaces in controlling durability of fiber-reinforced cements. *Journal of Materials In Civil Engineering*, 12(1), 2-7.
- Betterman, L.R., Ouyang, C., Shah, S.P. (1995). Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. *Advanced Cement Based Materials*. 2, 53-61.
- Bilal, S. H., Harajili, M.H., Jumaa, G. (2001). Effect of fiber reinforcement on bond strength of tension lap splices in high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, 638-647.
- Blunt, J., Ostertag, C.P. (2009). Performance based approach for the design of a deflection hardened hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 135(9), 978-986.
- Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aitcin, P-C. (1997). Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. *ACI Materials Journal*, 94(4), 286–90.

- Bozkurt, N., Yazicioglu, S. (2017). The Strength Properties of Fibre Reinforced Self Compacting Concrete (pp:775-778). 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, ICCESN
- Caggiano, A., Cremona, M., Faella, C., Lima, C., Martinelli, E. (2012). Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers. *Constr Build Mater*, **37**, 832–40.
- Choi, W.-C., Jang, S.-J., Yun, H.-D. (2017). Bond and cracking behavior of lap-spliced reinforcing bars embedded in hybrid fiber reinforced strain-hardening cementitious composite (SHCC). *Composites Part B*, **108**, 35-44.
- Cholker, A. K., Tantray, M. A. (2019). Mechanical and Durability Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced With Carbon Fibers, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 7(6).
- Chung, D.D.L (2005). Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7), 511-526.
- 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.
- Dazio, A., Buzzini, D., Trüb, M. (2008). Nonlinear cyclic behavior of hybrid fiber concrete structural walls. *Eng Struct*, **30**, 3141–50.
- Demirhan, S. (2017). Nano malzemeler ile modifiye edilmiş yüksek performanslı hibrid lif donatılı betonlar. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara
- Diab, A.M., Elyamany, H.E., Hussein, M.A., Ashy H.M.Al. (2014). Bond behavior and assessment of design ultimate bond stress of normal and high strength concrete. *Alexandria Engineering Journal*, **53**, 355–371.
- Ding, Y.N., You, Z., Jalali, S. (2010). Hybrid fiber influence on strength and toughness of RC beams. *Compos Struct*, **92**, 2083–9.
- EFNARC (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. European project group, UK.
- EFNARC (2005). *European Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Specification and Production and Use, Association House, UK,
- Ersoy, H.Y. (2001). *Kompozit Malzeme.*, Literatür Yayınları, İstanbul, Türkiye.
- Farhad, A., Nejadi, S. (2013). Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress–strain curve, and energy dissipated under compression. *Composites Part B: Engineering*, **53**, 121-133.

- Francois L., Albert B. (1997). The influence of aggregate on the compressive strength of normal and high-strength concrete. *ACI Mater J.* 94(5), 417–25.
- Ganesan, N., Indira, P.V., Sabeena, M.V. (2014). Behaviour of hybrid fibre reinforced concrete beam–column joints under reverse cyclic loads. *Mater Des*, 54, 686–93.
- Girskas, G., Skripkiūnas, G. (2017). The effect of synthetic zeOLte on hardened cement paste microstructure and freeze-thaw durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 14(2), 117-127.
- Gomes, P.C.C. (2002). *Optimization and characterization of high-strength selfcompacting Concrete*. PhD thesis, Universitat POLtecnica De Catalunya, Barcelona, Spain.
- Groth, P. (2000-a). *Fibre reinforced concrete – Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders*. PhD. Thesis, Lulea University of Technology.
- Grubb, J.A., Blunt, J., Ostertag, C.P., Divine, T.M. (2007). Effect of steel microfibers on corrosion of steel reinforcing bars. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1115-1126.
- 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 and Concrete Research*, 31, 1793 – 1798.
- Gu, D.S., Wu, Y.F., Wu, G., Wu, Z.S. (2012). Plastic hinge analysis of FRP confined circular concrete columns. *Constr Build Mater.* 27, 223–33.
- Gul, M., Bashir, A., Naqash, J. A. (2014). Study of Modulus of Elasticity of Steel Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 3(4), 304-309.
- Gürol, G. (1999). *Ekonomik beton için beton bileşenleri çimento/su/ince ve kaba agrega/kimyasal ve mineral katkıları*. Dizayn ve Konstrüksiyon Dergisi, 1999/164 Haziran, s. 66–74.
- Haddadou, N., Chaid, R., Ghernouti, Y., Adjou, N. (2014). The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete. *J. Build. Mater. Struct.* 1, 65-76
- Hannant, D.J. (1987). *Fiber Cements and Fiber Concrete*. Chichester, UK, Wiley.
- Harajili, M.H., Salloukh, K.A. (1997). Effect of fibers on development/splice strength of reinforcing bars in tension. *ACI Materials Journal*, 94(4), 317-324.
- Hollingsworth, D. (2002). Design and Use of Self-ConsOLDating Concrete, *First North American Conference on the Design and Use of Self-ConsOLDating Concrete*, p. 429–432.

- Holschemacher, K. (2004). Hardened properties of self-compacting concrete. *The 8th International Conference*, May 19-21.
- 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.
- Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T., Hoshiro, H. (2005). Properties of PolyvinylalcoholFiber as Reinforcing Materials for Cementitious Composites, *International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Compositesin Structural Applications*, Honolulu, HI, USA.
- Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Sammour, M., Sonebi, M. (2013). Strength and fracture energy characteristics of self-consOLdating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres. *Construction and Building Materials*. 45, 20–29
- Huang, L., Xu, L., Chi, Y., Xu, H. (2015). Experimental investigation on the seismic performance of steel polypropylene hybrid fiber reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*. 87, 16-27.
- Issa, M., Metwally, I., Elzeiny, S. M. (2011). Influence of fbers on fexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars. *Engineering Structures*, 33(5), 1754-1763.
- Jacobsen, S., Sellevold, E. J. (1996). Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw. *Cement and Concrete Research*, 26(1), 55-62.
- Johnston, C. D. (2001). *Fiber-Reinforced Cements and Composites*. 3rd ed. Amsterdam, Holland, Gordon and Breach Science Publishers.
- Karahan, O. Atis, C. D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete, *Materials and Design*, 32, 1044–1049
- Karatas, M., Turk, K., Ulucan, Z.C. (2010). Investigation of bond between lap-spliced steel bar and self-compacting concrete: The role of silica fume. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 420-428
- Kawamata, A., Mihashi, H., Fukuyama, H. (2003). Properties of hybrid fiber reinforced cement based composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 283-290.
- Khayat, K.H. (1999). Workability, testing and performance of self-consOLdating concrete, *ACI Materials Journal*, 96 (3), 346-353
- Khayat, K.H., Roussel, Y. (2000). Testing and Performance of Fiber-Reinforced, Self-ConsOLdating Concrete. *Materials and Structures*, 33(230), 391-397.

- Kurt, G. (2006). *Lif İçeriği ve Su-Çimento Oranının GRC'nin Mekanik Davranışına Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kwon, S.H., Ferron, R. P., Akkaya, Y., Shah, S. P. (2007). Cracking of Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete due to Restrained Shrinkage. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 1(1), 3-9.
- Lagier, F., Massicotte B., Charron, J.-P. (2015). Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC. *Construction and Building Materials*, 93, 84–94.
- Lagier, F., Massicotte, B., Charron, J.-P. (2016). Experimental investigation of bond stress distribution and bond strength in unconfined UHPFRC lap splices under direct tension. *Cement and Concrete Composites*, 74, 26-38.
- Larby, L. A. (1993). Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete. *Heron*, 38(1), 69-81.
- Lawler, J., Zampini, D., Shah, S. (2005). Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 595-604.
- Lawler, J.S. (2001). *Hybrid Fiber Reinforcement in Mortar and Concrete*. PhD Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA.
- Lawler, J.S., Wilhelm, T., Zampini, D., Shah, S.P. (2003). Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar. *Materials and Structures*, 36, 197-208.
- Li, H., Xiao, H., Yuan, J., Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Compos B Eng*, 35, 185–9.
- Li, V.C., Maalej, M. (1996). Toughening in cement based composites. Part I: Cement, mortar and concrete. *Cement and Concrete Composites*, 18(4), 223-237.
- Mabrouk, R.T.S., Mounir, A. (2017). Behavior of RC beams with tension lap splices confined with transverse reinforcement using different types of concrete under pure bending. *Alexandria Engineering Journal*, article in press.
- Markovic, I., Walraven, J.C., Van Mier, J.G.M. (2003). Development of high performance hybrid fiber (pp: 277). In: *4th International conference on high performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC 4)*, France: RILEM.
- Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S.H., Hosseinpour, I. (2011). The effect of polypropylene fibres on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(1), 351-358.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. New York, U.S.A, The McGraw - Hill Companies.

- Metaxa, Z.S., Konsta-Gdoutos, M.S., Shah, S.P. (2011). *Crack Free Concrete Made with Nanofiber Reinforcement*. Robert R. McCormick School of Engineering and Applied Science, Year 3 Final Report, 115-124.
- Mindess, S. (2007). Thirty years of fibre reinforced concrete research at the UWM British, Colombia. *The international conference sustainable construction materials and technologies*.
- Mobasher, B., Li C., Y. (1996). Mechanical properties of hybrid cement based composites. *American Concrete Institute Materials Journal*, 93(3), 284-92.
- Naaman, A.E., Wongtanakitcharoen, T., Hauser, G. (2005). Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete. *ACI Materials Journal*, 102(1), 49-58.
- Nanni, A. (1988). Splitting-tension test for fiber reinforced concrete. *ACI Mater J*. 85(4), 229–33.
- Nazari, A., Riahi, S. (2011). The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Compos B Eng*, 42, 570–8.
- Newman, J., Choo, B.S. (2003). *Advanced Concrete Technology / Processes*. Butterworth-Heinemann, Oxford
- Nikbin, I.M., Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Amiri, J. V., Rahmani, E., Rabbanifar, S, Eslami, M. (2014). A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete. *Materials and Design*, 59, 199–210
- Nili, M., Afroughsabet, V. (2012). Propety assessmet of steel-fibre reinforced concrete made with silica fume. *Constr. Build. Mater.* 28, 664-669.
- Okamura, H. (1997). Self compacting high performance concrete, *Concrete International*, 19(7), 50-54.
- Okamura, H., Ouchi M. (2003). Applications of Self-Compacting Concrete in Japan (pp:3-5). *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium*, 17-20 August, Reykjavik, Iceland.
- Oztekin, E., Kina, C., Turk, K. (2018). Effect of micro fiber content on workability of self-compacting concrete. *13th International Congress on Advances in Civil Engineering*, ACE, İzmir, Turkey, 12/14 September.
- Pajak, M., Ponikiewski, T. (2013). Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Construction and Building Materials*, 47, 397–408

- Pajak, M., Ponikiewski, T. (2017). Experimental investigation on hybrid steel fibers reinforced self-compacting concrete under flexure. *Procedia Engineering*, **193**, 218 – 225
- Pan, J.R., Huang, C., Kuo, J.J., Lin, S.H. (2008). Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cemen. *Waste Manage*, **28**, 1113–8.
- Paulay, T., Priestley, M. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. INC: John Wiley & Sons, USA, 764 p.
- Pierre R. (2000). Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC):An overview, *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes*, Lyon, France, September 13-15.
- Pliya, P., Beaucour, A.L., Noumowé, A. (2011). Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature. *Construction and Building Materials*, **25**(4), 1926-1934.
- Pons, G., Mouret, M., Alcantara, M., Granju, J.L. (2007). Mechanical behaviour of self-compacting concrete with hybrid fibre reinforcement. *Materials and Structures*, **40**, 201–10.
- Prasad, M. L. V., Kumar, P. R., Oshima, T. (2009). Development of analytical stress–strain model for glass fibre reinforced self-compacting concrete. *Int J Mech SOLds*, **4**(1), 25-37.
- Qian, C.X., Stroeven, P. (2000). Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, **30**(1), 63-69.
- Rambo, D. A. S., Silva, F. D. A., Filho, R. D. T. (2014). Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: materials and structural aspects. *Materials & Design*, **54**, 32-42.
- Rashiddadash, P. , Ramezaniapour, A.A., Mahdikhani, M. (2014). Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaOLn and pumice, *Constr. Build. Mater.* **51**, 313–320.
- RILEM TC 145-WSM (2002). Workability and rheology of fresh concrete: compendium of tests. In: Bartos, Donebi, and Tamimi, editors. *Report of RILEM technical committee TC 145-WSM workability of special concretes*. Cachan: RILEM Publications.
- Rodrigues, J.P.C., Laím, L., Correia, A.M. (2010). Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire. *Composite Structures*, **92**(5), 1263-1268.
- Rodriguez, J., Ortega, L.M., Fernandez, M. (1992). Bond between ribbed bars and steel fiber reinforced concrete. *Proceedings International Conference: Bond in Concrete from Research to Practice*, Riga, Latvia.

- Rossi, P., Acker, P., Malier, Y. (1987). Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure. *Materials and Structures*. 20(6), 436-439.
- Sağlam, A.R. (2000). *Süperakışkanlaştırıcı ve viskozite arttırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi*. Sika Teknik Bülten, 2000/4, s. 9-16.
- Sahmaran M, Yurtseven A, Yaman IO. (2005). Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. *Building and Environment*, **40**, 1672–1677.
- Sukontasukkul, P., Jamsawang, P. (2012). Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil–cement column. *Constr Build Mater*, **29**, 201–5.
- Sulaiman, M.F., Ma, C., Apandi, N.M., Chin, S., Awang, A. Z., Mansur S.A., Omar W. (2017). A Review on Bond and Anchorage of Confined High-strength Concrete. *Structures*, **11**, 97–109.
- Şahmaran, M., Yaman, İ.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.
- Tabatabaeian, M., Khaloo A., Joshaghani A., Hajibandeh, E. (2017). Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC. *Construction and Building Materials*, **147**, 497–509
- Thwe, M. M. and Liao, K. (2002). Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo–glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(1), 43-52.
- Toutanji, H., Xu, B., Gilbert, J., Lavin, T. (2010). Properties of poly (vinyl alcohol) fibre reinforced high-performance organic aggregate cementitious material: converting brittle to plastic. *Constr. Build. Mater*. 24(1), 1–10
- Toyoharu, N., Tatsuo, I., Yoshinobu, E. (1998). State of the art report on materials and design of self compacting concrete (pp:160 – 189), *International Workshop on Self Compacting Concrete*, Japan.
- TS 706 EN 12620 (2003). Beton Agregaları. TS Standardı, Ankara
- TS 708 (2010). *Çelik, Betonarme için Donatı Çeliği*. Türk Standardı, Ankara.
- TS EN 12390-8 (2002). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri -Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini*. Türk Standardı, Ankara
- Turk, K., Caliskan, S., Yildirim, M.S. (2005). Influence of loading condition and reinforcement size on the concrete/reinforcement bond strength. *Structural Engineering and Mechanics*, 19(3), 337-346.

- Turk, K., Karatas, M., Ulucan, Z.C. (2010). Effect of the use of different types and dosages of mineral additions on the bond strength of lap-spliced bars in self-compacting concrete. *Materials and Structures*, **43**, 557–570.
- Turk, K., Yildirim, M.S. (2003). Bond strength of reinforcement in splices in beams. *Structural Engineering and Mechanics*, **16**(4), 469–478.
- Uğur, A. (2007). *Lif Donatılarının Yüksek Dayanımlı Betonlarda Yarma Dayanımı BasınçDayanımı İlişkisine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ulukaya, S. (2008). Kendiliğinden yerleşen betonlarda rötre ve rötre çatlaklarının incelenmesi. *Yüksek lisans tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Wang, Z.F. (2008). A preliminary report on the great Wenchuan earthquake. *Earthquake Eng Eng Vibr.* **7**, 225–34.
- Wu, Z., Shi, C., He, W., Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, **103**, 8–14
- Xu, B., Toutanji, H.A., Gilbert, J. (2010). Impact resistance of poly(vinyl) alcohol fiber reinforced high performance organic aggregate cementitious material, *Cem. Concr. Res.* **40**(2), 347–351
- Xu, G., Magnani, S., Hannant, D. J. (1998). Durability of hybrid polypropylene-glass fiber cement corrugated sheets. *Cement and Concrete Composites*, **20**(1), 79–84.
- Yan, H., Sun, W., Chen, H. (1999). The effect of silica fume and steel fiber on the dynamic mechanical performance of high-strength concrete, *CemConcr Res.* **29** (3), 423–426.
- Yan, Z.G., Zhu, H.H., Ju, J. W. (2013). Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, **38**, 610–618.
- Yap, S.P., Bu, C.H., Alengaram, U.J., Mo, K.H., Jumaat, M.Z. (2014). Flexural toughness characteristics of steel-polypropylene hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete. *Materials & Design*, **57**, 652–659.
- Yardimci, M. Y. (2007). *Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Yehia, S., Douba, A., Abdullahi, O., Farrag, S. (2016). Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, **121**, 120–133

- Yerex, L., Wenzel, T.H., Davies, R. (1985). Bond strength of mild steel in polypropylene fiber reinforced concrete. *ACI Journal*, 82(1), 40-45.
- Yi, C.K., Ostertag, C.P. (2005). Mechanical approach in mitigating alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 35(1), 67-75.
- Yoo, D.,Y., Yoon, Y.S., Banthia, N. (2015). Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate. *Cement and Concrete Composites*, 64(6), 84-92.
- Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. (2014). Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Cem. Concr. Res.* **56**, 29–39.
- Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. (2014). Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPHFRC): Experiments and modeling. *Construction and Building Materials*. **68**, 158–171.
- Yun, H.D., Rokugo, K. (2012). Freeze-Thaw influence on the flexural properties of ductile fibre-reinforced cementitious composites (DFRCCs) for durable infrastructures. *Cold Regions Science and Technology*, **78**, 82-88.
- Yun, H.D., Yang, I.S., Kim, S.W., Jeon, E., Choi, C.S., Fukuyama, H. (2007). Mechanical properties of high-performance hybrid fibre reinforced cementitious composites (HPHFRCs). *Mag. Concrete Res.* **59**, 257-271
- Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R., Herbert, A.M. (2006). How do Polypropylene Fibers Improve the Spalling Behavior of in-situ Concrete?. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 929-942.
- Zhang, M.H., Sharif, M.S.H., Lu, G. (2007). Impact resistance of high-strength fiber reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 59(3), 199–210.
- Zhou, F. P., Lydon, F. D. and Barr, B. I. G. (1995). Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 177-186.
- Zhu, W., Wei, J., Li, F., Zhang, T., Chen, Y., Hu, J., Yu, Q. (2016) Understanding restraint effect of coarse aggregate on the drying shrinkage of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, **114**, 458–463



7.EKLER

Çizelge EK-1 Karışımlara ait tüm numunelerin detaylı basınç dayanım değerleri (MPa)

Karışım No	3 GÜN					28 GÜN					90 GÜN				
	1	2	3	Ort	Std. Sapma	1	2	3	Ort	Std. Sapma	1	2	3	Ort	Std. Sapma
1	24.20	23.50	27.39	25.03	2.1	62.10	63.80	56.35	60.75	3.9	62.10	63.80	92.05	72.65	16.8
2	23.00	25.40	22.55	23.65	1.5	57.80	58.90	51.84	56.18	3.8	72.10	75.00	75.65	74.25	1.9
3	24.20	25.80	24.40	24.80	0.9	60.30	62.60	62.95	61.95	1.4	70.00	72.10	69.70	70.60	1.3
4	25.80	28.30	22.10	25.40	3.1	66.90	67.80	66.75	67.15	0.6	80.40	82.10	80.50	81.00	1.0
5	30.10	35.10	28.25	31.15	3.5	75.90	78.90	80.10	78.30	2.2	86.40	85.90	90.80	87.70	2.7
6	23.90	25.20	25.00	24.70	0.7	66.40	65.20	64.00	65.20	1.2	79.80	80.40	81.60	80.60	0.9
7	24.90	26.80	20.45	24.05	3.3	65.90	69.80	70.70	68.80	2.6	75.00	78.90	76.35	76.75	2.0
8	28.70	25.90	33.15	29.25	3.7	67.90	68.00	69.90	68.60	1.1	88.90	86.00	82.80	85.90	3.1
9	32.10	33.70	33.28	33.03	0.8	62.90	65.00	61.40	63.10	1.8	74.90	75.00	76.90	75.60	1.1
10	34.10	36.90	34.15	35.05	1.6	61.90	64.00	60.40	62.10	1.8	75.20	77.00	78.35	76.85	1.6
11	33.20	35.70	32.65	33.85	1.6	59.80	58.00	55.75	57.85	2.0	69.90	74.00	73.15	72.35	2.2
12	33.90	36.80	33.10	34.60	1.9	67.00	68.90	66.90	67.60	1.1	78.50	79.00	80.25	79.25	0.9
13	37.80	39.80	39.25	38.95	1.0	72.00	73.90	72.50	72.80	1.0	80.10	83.00	82.60	81.90	1.6
14	34.90	32.70	39.80	35.80	3.6	70.60	72.90	67.25	70.25	2.8	77.20	74.00	73.80	75.00	1.9
15	36.90	38.60	37.15	37.55	0.9	68.90	70.90	68.70	69.50	1.2	77.00	79.70	77.15	77.95	1.5
16	36.50	37.00	39.00	37.50	1.3	63.70	65.40	63.20	64.10	1.2	80.10	85.00	79.85	81.65	2.9
17	34.50	35.10	35.70	35.10	0.6	65.20	67.40	67.73	66.78	1.4	78.10	80.90	76.95	78.65	2.0
18	35.80	37.30	36.70	36.60	0.8	71.60	73.90	72.60	72.70	1.2	81.90	88.30	86.60	85.60	3.3
19	33.90	36.70	34.70	35.10	1.4	70.60	73.40	69.75	71.25	1.9	78.50	81.80	80.60	80.30	1.7
20	36.70	36.10	40.60	37.80	2.4	71.60	73.70	72.50	72.60	1.1	80.10	83.00	81.55	81.55	1.4
21	40.10	42.30	41.50	41.30	1.1	75.60	76.80	76.80	76.40	0.7	88.90	92.00	92.19	91.03	1.8
22	34.20	35.40	36.45	35.35	1.1	63.60	65.00	64.75	64.45	0.7	75.70	77.00	80.55	77.75	2.5
23	38.60	39.80	42.65	40.35	2.1	68.90	70.90	68.55	69.45	1.3	79.90	83.00	80.55	81.15	1.6
24	30.10	32.00	34.50	32.20	2.2	69.90	67.00	69.35	68.75	1.5	75.00	77.00	74.05	75.35	1.5

Çizelge EK-2 Karışımlara ait tüm numunelerin detaylı elastisite modülü değerleri (MPa)

Karışım No	28 GÜN				
	1	2	3	Ort	Std. Sapma
1	40.10	38.00	41.78	39.96	1.9
2	42.00	38.90	39.70	40.20	1.6
3	42.90	38.90	39.70	40.50	2.1
4	39.90	43.00	41.12	41.34	1.6
5	45.00	40.50	41.19	42.23	2.4
6	43.30	38.50	37.99	39.93	2.9
7	40.30	41.00	40.80	40.70	0.4
8	42.00	38.50	36.80	39.10	2.7
9	41.70	39.90	41.13	40.91	0.9
10	37.90	40.90	39.10	39.30	1.5
11	37.80	42.10	39.80	39.90	2.2
12	39.50	38.40	39.88	39.26	0.8
13	43.20	39.80	38.92	40.64	2.3
14	39.80	37.00	39.18	38.66	1.5
15	38.80	41.00	39.45	39.75	1.1
16	37.90	40.10	39.15	39.05	1.1
17	40.90	38.90	44.70	41.50	2.9
18	38.50	40.00	41.20	39.90	1.4
19	37.50	42.00	38.70	39.40	2.3
20	37.90	42.00	37.19	39.03	2.6
21	40.00	38.50	43.48	40.66	2.6
22	38.50	41.60	37.71	39.27	2.1
23	43.10	39.80	37.79	40.23	2.7
24	38.30	40.00	41.64	39.98	1.7

Çizelge EK-3 Karışımlara ait tüm numunelerin detaylı yarmada çekme dayanım değerleri (MPa)

Karışım No	3 GÜN					28 GÜN					90 GÜN				
	1	2	3	Ort	Std. Sapma	1	2	3	Ort	Std. Sapma	1	2	3	Ort	Std. Sapma
1	3.00	3.80	3.25	3.35	0.41	5.45	5.65	5.85	5.65	0.20	6.20	6.40	6.45	6.35	0.13
2	5.00	5.05	5.40	5.15	0.22	8.80	8.90	8.85	8.85	0.05	9.00	9.20	9.40	9.20	0.20
3	5.30	5.45	5.30	5.35	0.09	8.95	9.25	9.10	9.10	0.15	9.25	9.45	9.20	9.30	0.13
4	4.50	4.10	4.45	4.35	0.22	9.20	9.35	9.35	9.30	0.09	9.40	9.65	9.45	9.50	0.13
5	3.50	3.70	3.75	3.65	0.13	8.25	8.50	8.60	8.45	0.18	8.30	8.50	8.70	8.50	0.20
6	4.20	4.60	4.85	4.55	0.33	9.40	9.55	9.85	9.60	0.23	9.75	9.55	9.65	9.65	0.10
7	4.00	4.60	4.45	4.35	0.31	9.10	9.35	9.15	9.20	0.13	9.30	9.70	9.20	9.40	0.26
8	4.30	4.60	4.60	4.50	0.17	9.65	9.90	9.55	9.70	0.18	10.35	10.50	10.80	10.55	0.23
9	3.60	3.90	4.05	3.85	0.23	6.10	6.20	5.85	6.05	0.18	6.30	6.55	6.80	6.55	0.25
10	5.30	5.50	5.40	5.40	0.10	9.35	9.45	9.70	9.50	0.18	10.40	10.60	10.95	10.65	0.28
11	5.40	5.60	5.65	5.55	0.13	10.00	11.50	9.10	10.20	1.21	10.70	10.65	10.90	10.75	0.13
12	4.90	5.20	4.90	5.00	0.17	9.10	9.50	9.60	9.40	0.26	9.95	9.80	10.10	9.95	0.15
13	4.80	5.10	5.40	5.10	0.30	8.50	8.50	7.75	8.25	0.43	8.40	8.80	9.05	8.75	0.33
14	6.00	6.30	6.15	6.15	0.15	9.45	9.70	9.80	9.65	0.18	10.90	10.70	10.65	10.75	0.13
15	5.30	5.20	6.00	5.50	0.44	8.40	8.45	8.05	8.30	0.22	8.60	8.55	9.10	8.75	0.30
16	5.80	6.00	6.05	5.95	0.13	9.80	9.95	9.80	9.85	0.09	10.00	9.90	10.40	10.10	0.26
17	3.80	4.20	4.15	4.05	0.22	6.30	6.55	6.35	6.40	0.13	6.55	6.90	6.95	6.80	0.22
18	4.00	4.50	4.55	4.35	0.30	9.00	8.85	9.45	9.10	0.31	10.40	10.70	10.10	10.40	0.30
19	4.80	4.90	5.15	4.95	0.18	10.10	10.25	10.70	10.35	0.31	10.60	11.00	11.10	10.90	0.26
20	5.00	5.10	5.35	5.15	0.18	8.60	8.70	8.95	8.75	0.18	8.85	9.00	9.00	8.95	0.09
21	4.60	4.75	5.05	4.80	0.23	7.65	7.40	7.60	7.55	0.13	8.45	9.00	8.50	8.65	0.30
22	5.15	5.30	5.60	5.35	0.23	8.80	8.60	9.15	8.85	0.28	10.00	9.50	9.75	9.75	0.25
23	4.85	4.95	5.05	4.95	0.10	8.45	8.75	8.75	8.65	0.17	9.10	9.55	9.40	9.35	0.23
24	4.55	4.80	4.60	4.65	0.13	10.00	10.20	10.40	10.20	0.20	10.00	10.40	10.65	10.35	0.33

Çizelge EK-4 Karışımlara ait tüm numunelerin detaylı eğilme dayanım değerleri (MPa)

Karışım No	3 GÜN					28 GÜN					90 GÜN				
	1	2	3	Ort	Std. Sapma	1	2	3	Ort	Std. Sapma	1	2	3	Ort	Std. Sapma
1	4.00	4.55	4.21	4.25	0.28	6.00	5.95	6.38	6.11	0.24	7.87	7.90	7.37	7.71	0.30
2	8.55	8.65	8.51	8.57	0.07	8.55	8.85	8.73	8.71	0.15	10.00	10.33	10.37	10.23	0.20
3	9.00	9.35	9.10	9.15	0.18	9.90	9.80	10.12	9.94	0.16	10.46	10.67	10.39	10.51	0.15
4	5.55	5.75	6.06	5.79	0.26	7.45	7.65	7.40	7.50	0.13	10.00	10.55	10.29	10.28	0.28
5	5.67	5.40	5.00	5.36	0.34	7.00	7.25	7.26	7.17	0.15	10.22	10.00	10.29	10.17	0.15
6	7.00	7.15	7.03	7.06	0.08	9.00	9.10	9.03	9.04	0.05	12.24	12.00	12.02	12.09	0.13
7	5.68	6.15	5.99	5.94	0.24	8.25	8.35	8.40	8.33	0.08	10.45	10.68	10.14	10.42	0.27
8	6.45	6.75	6.48	6.56	0.16	8.30	8.55	8.41	8.42	0.13	11.54	11.88	11.91	11.78	0.21
9	4.85	4.80	4.48	4.71	0.20	6.65	6.90	6.79	6.78	0.13	7.75	8.00	8.07	7.94	0.17
10	7.80	8.00	8.18	7.99	0.19	7.64	7.95	7.97	7.85	0.19	10.36	10.90	10.43	10.56	0.29
11	8.90	8.50	8.43	8.61	0.25	9.75	9.90	9.94	9.86	0.10	11.02	11.55	11.53	11.37	0.30
12	5.45	5.35	5.43	5.41	0.05	7.97	7.65	7.89	7.84	0.17	9.77	10.00	9.98	9.92	0.13
13	5.25	5.40	5.50	5.38	0.12	7.55	7.86	7.84	7.75	0.17	8.44	8.86	8.41	8.57	0.25
14	6.80	6.90	7.21	6.97	0.22	9.35	9.66	9.67	9.56	0.18	12.10	11.90	12.38	12.13	0.24
15	6.00	6.25	6.01	6.09	0.14	7.80	7.90	7.77	7.82	0.07	10.86	11.00	11.04	10.97	0.09
16	6.85	6.95	7.09	6.96	0.12	9.00	9.15	8.95	9.03	0.10	11.20	11.54	10.99	11.24	0.28
17	5.35	5.60	5.16	5.37	0.22	7.95	7.70	7.81	7.82	0.13	8.45	8.66	8.54	8.55	0.11
18	7.00	7.35	7.33	7.23	0.20	9.00	9.33	9.20	9.18	0.17	9.14	9.45	9.37	9.32	0.16
19	7.60	7.80	7.60	7.67	0.12	9.86	10.25	9.95	10.02	0.20	10.77	10.95	10.69	10.80	0.14
20	6.55	6.75	6.39	6.56	0.18	9.90	9.97	10.50	10.12	0.33	10.10	10.55	10.06	10.24	0.27
21	6.00	5.85	5.72	5.86	0.14	8.55	8.78	8.94	8.76	0.20	9.46	9.66	9.32	9.48	0.17
22	7.10	7.00	6.95	7.02	0.08	11.80	11.90	12.14	11.95	0.17	12.05	12.55	12.13	12.24	0.27
23	6.35	6.00	6.23	6.19	0.18	10.24	10.80	9.99	10.34	0.42	10.55	10.70	10.86	10.70	0.15
24	6.25	6.35	6.58	6.39	0.17	10.00	10.20	10.61	10.27	0.31	11.03	11.30	11.07	11.13	0.14









Şekil Ekler-1. Tüm numunelerin lif dağılım görselleri



(a) KYB_0.25



(b) MAK1_0.25



(c) MAK1_P_0.25



(d) MAK0.8_13MİK0.2_0.25



(e) MAK0.8_6MİK0.2_0.25



(f) MAK0.8_13MİK0.2_P_0.25



(g) MAK0.8_6MİK0.2_P_0.25



(h) MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.25



(i) KYB_0.30



(i) MAK1_0.30



(j) MAK1_P_0.30



(k) MAK0.8_13MİK0.2_0.30



(l) MAK0.8_6MİK0.2_0.30



(m) MAK0.8_13MİK0.2_P_0.30



(n) MAK0.8_6MİK0.2_P_0.30



(o) MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.30



(ö) KYB_0.35



(p) MAK1_0.35



(r) MAK1_P_0.35



(s) MAK0.8_13MİK0.2_0.35



(ş) MAK0.8_6MİK0.2_0.35



(t) MAK0.8_13MİK0.2_P_0.35



(u) MAK0.8_6MİK0.2_P_0.35



(ü) MAK0.8_13MİK0.1_6MİK0.1_P_0.35

Şekil Ekler-2. 300 D/Ç döngüsü sonrasında numune görselleri

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ceren KINA

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara – 07.06.1990

E-Posta: crnkna@gmail.com

Lisans: Atılım Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Çalışılan Süre	Şubat 2012- Şubat 2014, 2 yıl
Pozisyon	İnşaat Mühendisi
Yüklenilen Sorumlulular	Çelik yapıların projelendirilmesi, statik rapor hazırlanması
Firma	Bade Çelik Yapılar İnş. Mim. San. Ve Tic. A.Ş Çankaya/Ankara
Çalışılan Süre	Eylül 2018- Aralık 2018
Pozisyon	Sözleşmeli öğretim elemanı
Yüklenilen Sorumlulular	Mukavemet, Yapı Teknolojisi ve Mesleki Uygulamalar, Malzeme Bilimi ve Yapı Malzemesi derslerinin işlenmesi
Çalışma Yeri	OSB Meslek Yüksekokulu – Malatya

Yayın Listesi:

Türk, K. and Kina, C., “Freeze-thaw resistance and sorptivity of self-compacting mortar with ternary blends”, *Computers and Concrete*, 21(2), pp.149-156, 2018. doi: <https://doi.org/10.12989/cac.2018.21.2.149>.

Türk, K. ve Kina, C., "Çimento Esaslı Kompozitlerde Karma Lif Kullanımı", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), pp. 671-678, 2017. doi: [10.5505/pajes.2016.17047](https://doi.org/10.5505/pajes.2016.17047).