

Karma Lif Takviyeli KYB Karışımlarının İşlenebilirlik ve Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması

Kazım TÜRK^{1*}, Metin KATLAV¹, Paki TURĞUT¹

¹İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

(ORCID: [0000-0002-6314-9465](https://orcid.org/0000-0002-6314-9465)) (ORCID: [0000-0001-9093-7195](https://orcid.org/0000-0001-9093-7195)) (ORCID: [0000-0002-3711-4605](https://orcid.org/0000-0002-3711-4605))



Anahtar Kelimeler:

Karma lif, Kendiliğinden yerleşen beton, İşlenebilirlik, Mühendislik özellikleri.

Öz

Bu çalışmada, benzer işlenebilirliğe sahip farklı boyut (makro ve mikro) ve narinlikteki çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımların mühendislik ve işlenebilirlik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, lifsiz, sadece makro lif ve karma lif içeren KYB olmak üzere toplamda üç adet karışım tasarlanmıştır. Lifli KYB karışımları, EFNARC (2002) komitesi tarafından önerilen kriterlere göre mümkün olan benzer işlenebilirlik esas alınarak elde edilmiştir. Bu sebeple, çökme-yayılma, t_{500} ve J-halkası işlenebilirlik testleri yapılmıştır. Elde edilen lifli KYB karışımlarından 3, 28 ve 90 günlük basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarının belirlenmesi için numuneler hazırlanmış ve standartlara uygun şekilde test edilmiştir. Sonuç olarak, karışıma hem tekli hem de karma lif ilave edilmesi, karışımların işlenebilirlik özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Bunun yanında, KYB karışımlarına narinliği 87 olan düz mikro çelik liflerin ilave edilmesinin basınç ve yarmada çekme dayanımlarında, narinliği 65 olan kancalı uçlu makro çelik liflerin ilave edilmesinin ise eğilmede çekme dayanımı değerlerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Investigation of Workability and Engineering Properties of Hybrid Fiber Reinforced SCC Mixtures

Keywords:

Hybrid fiber, Self-compacting Concrete, Workability, Engineering properties.

Abstract

In this study, the engineering and workability properties of different size (macro and micro) and aspect/ratio steel fiber reinforced self-compacting concrete (SCC) mixtures with similar workability was investigated. For this purpose, a total of three SCC mixtures were designed: control with no fiber, only macro and hybrid fiber reinforced SCC. Based on possible similar workability, fiber reinforced SCC mixtures were obtained according to criteria recommended by the EFNARC (2002) committee. Therefore, slump-flow, t_{500} and J-ring workability tests were performed. Specimens obtained from SCC mixtures with fiber were prepared for 3, 28 and 90-day and compressive, splitting tensile and flexural tensile strengths tests were carried out. In conclusion, the inclusion of both single and hybrid fiber to SCC mixtures negatively affected the workability properties of the mixtures. Besides, it was found that the addition of straight micro steel fibers with an aspect ratio of 87 to mixtures had a positive effect on the compressive and splitting tensile strengths while the addition of hook-end macro steel fibers with an aspect ratio of 65 had a positive effect on the flexural tensile strength values.

*Sorumlu yazar: kazim.turk@inonu.edu.tr

Geliş Tarihi: 18.08.2021, Kabul Tarihi: 06.04.2022

1. Giriş

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), dünyada ilk defa 20. yüzyılın sonlarına doğru Japon bilim insanı Okamura [1] tarafından Japonya’da özellikle deprem bölgelerindeki yapı elemanlarında çok sık aralıklarla atılan donatılardan dolayı betonun kalıplara yerleştirilmesi esnasında ortaya çıkabilecek sorunları çözmek amacıyla geliştirilmiştir. Buna ilaveten KYB, kesitlere yerleşmesi sırasında her hangi bir dahili ve harici sıkıştırma işlemine gerek kalmadan kendi ağırlığı altında akabilen ve yerleşebilen inovatif bir betondur [2]. Bir beton karışımının KYB olması için EFNARC 2002 [3] komitesinin önerdiği işlenebilirlik deneylerine (Çökme-yayılma, t_{500} , J-halkası, L-kutusu, U kutusu gibi) ait sınır koşullarına sağlaması gerekmektedir. Bunun yanında, birçok üstün özelliklere sahip olan KYB’nin gevrek özelliğinden dolayı çekme dayanımı ve eğilme performansı düşüktür. Bu gibi dezavantajlarını ortadan kaldırılması amacıyla tekli ve karma lif takviyeli KYB ile ilgili birçok çalışmada yürütülmektedir [11-13,14,38,39]. Lif takviyeli beton ile ilgili ilk çalışmalar 20. yüzyılın ortalarında çelik lif takviye edilen betonun mekanik davranışını incelemek amacıyla yapılmıştır [4]. Bilindiği üzere, betonun çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça düşüktür. Bu da özellikle yalın betonda ilk çatlak oluşuktan sonra betonun ani olarak kırılmasına ve oluşan çatlaklardan dolayı çevresel etkilere maruz kalmasına sebebiyet verir. Buna karşın, betonun çekme dayanımını artırmak için ilave edilen lifler matriste oluşturduğu bağ kuvvetleri sayesinde, betonda oluşan çatlakların başlamasını, yayılmasını ve ilerlemesini kontrol ederek betonun çekme dayanımı ve sünekliğini arttırmaktadır. Buna ilaveten, birden çok süreksiz lif tipinin betona ilave edilmesiyle elde edilen karma lif takviyeli betonların [5,6] daha ilgi çekici mühendislik özellikler sunacağı açıktır. Çünkü beton karışımına tek tip lif takviye edilmesi durumunda, betonun mekanik ve geçirimsizlik özelliklerini iyileştirmede sınırlı seviyede performans beklenebilir. Karma lif takviyeli kompozitte ise, farklı boy ve özelliklerdeki liflerin karma bir şekilde matrise ilave edilmesiyle, mikro lifler, mikro boyuttaki çatlakların başlamasını ve yayılmasını kontrol ederek betonda yüksek çekme dayanımına sebep olurlar. Daha sonra, mikro lifler, çatlağın ilerlemesini sağlayan gerilme enerjisini karşılamada yetersiz kaldığında mikro çatlaklar birleşerek makro çatlakları oluştururlar. Bu esnada devreye giren büyük makro lifler makro çatlakları kontrol ederek yapı elemanlarının, hem eğilme performansını hem de çatlak genişliklerinin sınırlandırılmasıyla çevresel

etkilere karşı dayanıklılığını geliştirirler [7]. Böyle bir karma lif takviyeli kompozitin istenen performansa ulaşmada daha etkin olacağı açıktır [8,9]. Türk ve Kına (2017) [10] tarafından çimento esaslı kompozit karışımlarda karma lif kullanımı ile ilgili kapsamlı bir literatür araştırması yapılmış ve farklı boyut, narinlik ve işlevselliğe sahip liflerin betona dahil edilmesinin betonun özelliklerinden daha etkili yararlanabilme ve betonarme elemanların mekanik performansını artırma imkanı sunduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanında, bu konuda yapılan bazı çalışmalarda [11-13], makro ve mikro çelik liflerin karma olarak uygun oranlarda geleneksel ve kendiliğinden yerleşen betona takviye edilmesi durumunda, eğilmeye maruz elemanların çoklu çatlak oluşumuna sebep olan sehim-sertleşmesi davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, makro ve mikro çelik lif ile birlikte sentetik liflerin betonda karma olarak kullanılmasının özellikle kendiliğinden yerleşen betonda meydana getirdiği işlenebilirlik sorunları dikkate alınarak, çimento yerine farklı tip mineral katkıların ikili, üçlü ve dörtlü kullanımlarının etkileri araştırılmış. Sonuçta, karma lif takviyeli betonlar için işlenebilirlik açısından en iyi harmanlamanın çimentoyla yer değiştirilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kireç taşı tozundan oluştuğu bulunmuştur [14]. Bu çalışmada farklı boy ve narinlikteki çelik lif içeren KYB’nin işlenebilirlik ve mühendislik özellikleri araştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzemeler

Bu çalışmadaki tüm karışımlarda bağlayıcı malzeme olarak, ÇİMKO Çimento ve Beton Sanayi A.Ş. firması ürünü CEM I 42.5 R tipli Portland Çimento (PÇ) ile Sugözü Termik Santralinin baca atığı olan F sınıfı uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Bağlayıcılara ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Buna ilaveten 0-4 ve 4-16 mm elek aralığına sahip iki farklı tipte agrega kullanılırken, 0-4 ve 4-16 mm agregalarına ait su emme değerleri sırasıyla, %0,7 ve %0,5 ve doymun yüzey kuru özgül ağırlık değerleri ise sırasıyla, 2,43 ve 2,62 olarak bulunmuştur. Agregaların elek analizleri Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca, tüm karışımlar için yaklaşık benzer işlenebilirlik sağlamak amacıyla Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.’den temin edilen özgül ağırlığı 1,06 olan ViscoCrete Hi-Tech 51 hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Tüm lifli karışımlarda makro çelik lif olarak Kemerli Metal San. ve Tic. A.Ş. firmasına ait KMX 65/60 BG ve mikro çelik lif olarak da Bekaert A.Ş. firması

tarafından üretilen Dramix OL 13/16 tercih edilmiştir. Bu liflere ait özellikler Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çimento ve uçuş küle ait kimyasal ve fiziksel bileşenler

Kimyasal Kompozisyon	PÇ (%)	UK(%)
CaO	64,3	1,07
SiO ₂	19,40	63,09
Fe ₂ O ₃	3,79	6,77
Al ₂ O ₃	5,36	21,63
MgO	2,25	-
SO ₃	2,47	0,10
Na ₂ O	0,09	2,79
K ₂ O	0,90	-
Kızdırma kaybı	1,44	2,68
Fiziksel Özellikler		
Özgül Yüzey (Blaine)	3480 cm ² /g	2900 cm ² /g
Özgül Ağırlık	3,15	2,30

Tablo 2. Çalışmada kullanılacak agregalara ait elek analiz sonuçları

Agrega	Elek boyutu (mm) - % Geçen							
	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125
Kırma Kum	100	100	96,55	62,9	39,4	15,8	14,2	7,35
Kırma Taş	100	19,71	1,48	0,62	0,18	0	0	0

Tablo 3. Liflere ait mekanik ve fiziksel özellikler

Lif Tipi	Boy (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
KMX 65/60	60	65	1300	200	7,80
OL 13/16	13	87	3000	200	7,20

2.2. Karışım Oranları

Yapılacak deneysel çalışma için, işlenebilirlik testleri açısından EFNARC'm (2002) KYB'ler için belirlenen şartları göz önüne alınarak karışımlara ait reçete hazırlanmıştır. Bunun yanında, liflerin işlenebilirlik üzerindeki olumsuz etkisini ortadan kaldırmak ve liflerin matris tarafından sürüklenmesini mümkün kılacak viskoziteyi elde etmek için toplam bağlayıcı miktarı 900 kg/m³ ve su/bağlayıcı (S/B) oranı 0.25 olarak sabit

tutulmuştur. Agregalar olarak %70 ve %30 oranlarında sırasıyla, 0-4 mm kırma kum ve 4-16 mm kırma taş kullanılmıştır. Lifli karışımlarda makro lif hacimce %1 ve %0,8 oranlarında ve mikro lif ise hacimce % 0,2 oranında kullanılmıştır. Bir adet kontrol karışımı, bir adet; sadece makro lif takviyeli tek lifli ve bir adet de karma lif takviyeli karışım olmak üzere toplam 3 adet KYB karışımı tasarlanmıştır. Tablo 4'de agregaların doymun yüzey kuru (DYK) olarak alındığı beton karışım oranları verilmiştir.

Tablo 4. Karışım oranları (kg/m³)

KARIŞIM ADI	PÇ	UK	SU	S/B*	HA**	AGREGA		ÇELİK LİF	
						(0-4) mm	(4-16) mm	KMX 65/60	DRMX OL 13/16
KONTROL	550	350	223	0,25	4,50	768,2	328,5	-	-
%1MAK	550	350	223	0,25	5,00	750,3	320,9	78,5	-
%0.8MAK_ %0.2MİK	550	350	223	0,25	5,25	749,9	320,7	62,8	14,5

S/B*: Su/Bağlayıcı oranı

HA**: Hiperakışkanlaştırıcı

Bu karışımlara ait isimlendirmede kullanılan ifadelerin ne anlama geldiği şu şekildedir;

KONTROL: Kendiliğinden yerleşen lifsiz beton

MAK: Makro çelik lif (65/60)

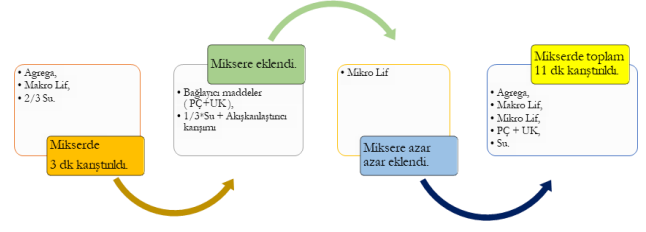
MİK: 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lif (OL 13/16)

MAK ve MİK'in sol tarafına yazılan rakamlar karışıma takviye edilen liflerin hacimce miktarlarını ifade etmektedir. Örneğin; %0.8MAK_%0.2MİK şeklinde isimlendirilen karışım, %0.80 oranında makro çelik lif, %0.20 oranında mikro çelik lifi içermektedir.

2.3. Yöntem

Bu çalışmada tüm karışımların benzer işlenebilirliğe sahip olması hedeflenerek, çökme yayılma değerleri EFNARC (2005) [15] komitesinin önerdiği SF2 (660mm-750mm) sınıfı esas alınarak belirlenmiştir. Bu amaçla, karışımlardan elde edilecek numunelerin mühendislik özelliklerinin lif tipi ve kombinasyonun etkisini araştırmak için tüm karışımlarda sadece akışkanlaştırıcı miktarı değişken olarak alınmıştır. Hazırlanan karışımlara uygulanacak testler sırasıyla, işlenebilirlik (çökme-yayılma çapı, t_{500} süresi ve J-halkası yükseklik farkı (ΔH)) ve sertleşmiş beton testleri olarak iki bölümde gerçekleştirilmiştir. KYB karışımlarının 3, 28 ve 90 günlük basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla her karışım için 3 adet olmak üzere sırasıyla, 100mm × 100mm × 100mm küp, $\phi 100 \times 200$ mm silindir ve 100mm × 75mm × 400mm prizmatik numuneler üretilmiş ve test edilmiştir. KYB karışımları hazırlanırken, 35 dm³ hazneye sahip düşey eksenli mikser kullanılmıştır ve karışımların hazırlanmasında sırasıyla şu işlemler uygulanmıştır:

- İlk olarak iri ve ince agregalar ile varsa makro lifler ve karışım suyunun 2/3'ü düşey eksenli mikser eklenerek 3 dakika boyunca karıştırma işlemi yapılmıştır.
- Daha sonra bağlayıcı malzemeler ile karışım suyunun geriye kalan kısmı ve akışkanlaştırıcı mikser eklenerek 8 dakika daha karıştırma işlemi devam edilmiştir. Mikro lifler de, bu esnada miksera topaklanmayı engellemek amacıyla azar azar eklenmiştir. Böylece tüm karışımlar için toplamda 11 dakika karıştırma süresi uygulanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Karışımların hazırlanmasında takip edilen adımları

2.3.1. İşlenebilirlik Testleri

İşlenebilirlik testleri EFNARC (2002) Komitesi'nin belirlediği öneriler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla KYB karışımlarının her biri için çökme-yayılma, t_{500} ve J-halkası deneyleri yapılmıştır.

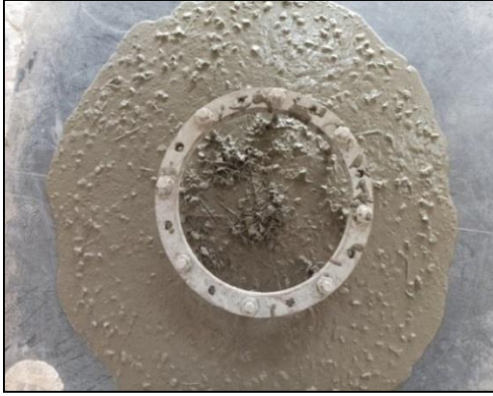
2.3.1.1. Çökme-yayılma, t_{500} ve J-halkası deneyi

KYB'nin doldurma kabiliyeti ve stabilitesinin ölçüldüğü çökme-yayılma testinde, deney aparatları deney öncesinde hafif ıslak bir bezle temizlendikten sonra, yeterli miktarda ve homojen olacak şekilde taze beton karışımı kesik koni şeklindeki Abrams hunisine doldurulmuştur. Abrams hunisi doldurulduktan sonra, 30 saniye zarfında koni yukarı doğru dikey olarak kaldırılmış ve Şekil 2'de de görülebileceği gibi KYB karışımının tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. Abrams hunisinin kaldırıldığı an ile betonun tabla üzerindeki 500 mm yayılma çapına ulaştığı an arasında geçen süre t_{500} olarak kaydedilmiştir. Karışımın yayılması bittikten sonra birbirine dik doğrultudaki çaplar ölçülüp aritmetik ortalaması alınarak karışımın çökme-yayılma değeri belirlenmiştir.

Lifli KYB'nin dar kesitler ve engeller arasındaki geçiş kabiliyetini tayin etmek için yapılan J-halkası deneyinde, halkanın merkezi ile hemen dışındaki 4 nokta arasındaki yükseklik farklarının ortalaması alınarak J-halkası yükseklik farkı (ΔH) belirlenmiştir. Aynı zamanda, betonun tabla üzerindeki 500 mm yayılma çapına ulaştığı t_{500j} süresi ve birbirine dik olacak çapların aritmetik ortalaması alınarak J-halkası yayılma çapı belirlenmiştir (Şekil 3).



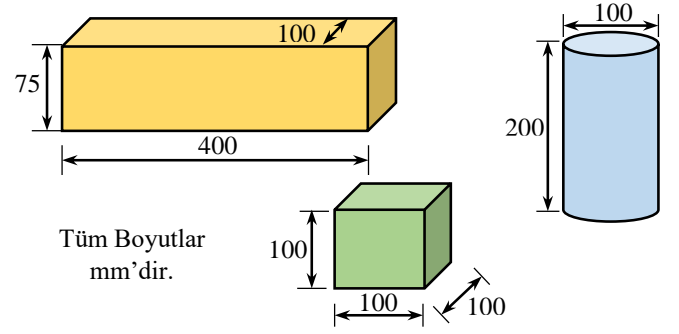
Şekil 2. Çökme-yayımla deneyi



Şekil 3. J-halkası deneyi

2.3.2. Mühendislik Özellikleri

Karışımların 3, 28 ve 90 günlük mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Basınç dayanımının belirlenmesi için her bir seride 3 adet 100mm × 100mm × 100mm küp numune hazırlanmış, ASTM C39 (2018) [16] standardına uygun olarak test edilmiştir. Yarmada çekme dayanımı testi, ASTM C496 (2017) [17] standardına uygun olarak üretilmiş 3 adet ϕ 100 × 200 mm silindirik numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dört noktalı eğilme dayanımı için ise, her bir seride 2 adet 100mm × 75mm × 400mm prizmatik numune hazırlanarak ASTM C1609 (2019) [18] standardına uygun bir şekilde dört noktalı eğilme testi yapılmıştır. Ayrıca lifli karışımlardan elde edilecek yük-sehim eğrileri yardımıyla karışımlara ait eğilme toklukları, JSCE-SF4 (1984) [19] standartına göre belirlenmiştir. Şekil 4'te üretilmiş numunelere ait geometrik özellikler görülmektedir.



Şekil 4. Numune şekilleri ve boyutları

3. Bulgular ve Tartışma

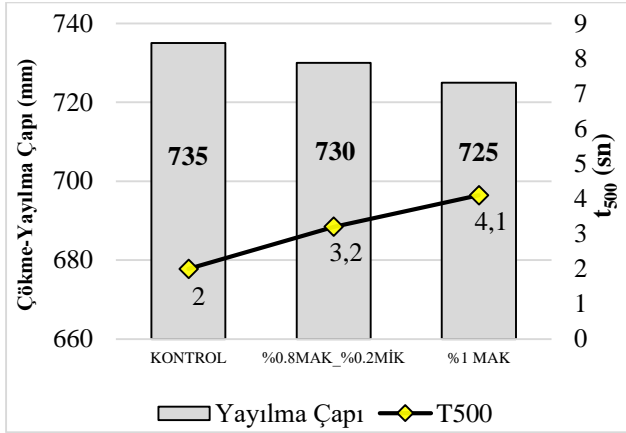
3.1. Karışımların İşlenebilirlik Özellikleri

Lifsiz, tek ve karma lifli KYB karışımlarına ait çökme-yayımla, t_{500} , J-halkası, J-halkası çökme-yayımla ve J-halkası 500 mm'ye ulaşma süresi (t_{500j}) işlenebilirlik test sonuçları Şekil 5 ve 6'da verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi tüm karışımlara ait işlenebilirlik değerleri EFNARC (2002) komitesinin önerdiği sınır değerleri arasında kalmaktadır. Ayrıca-şekillerden görüldüğü gibi, tüm karışımlara ait işlenebilirlik değerleri yaklaşık benzer olup, çökme-yayımla değerleri 730 ± 5 mm, t_{500} değerleri 3 ± 1.1 sn, J-halkası çökme-yayımla değerleri 707.5 ± 2.5 mm ve t_{500j} değerleri ise 5 ± 1 sn aralığında değişkenlik göstermişlerdir.

3.1.1. Çökme-yayımla ve J-halkası deneyi

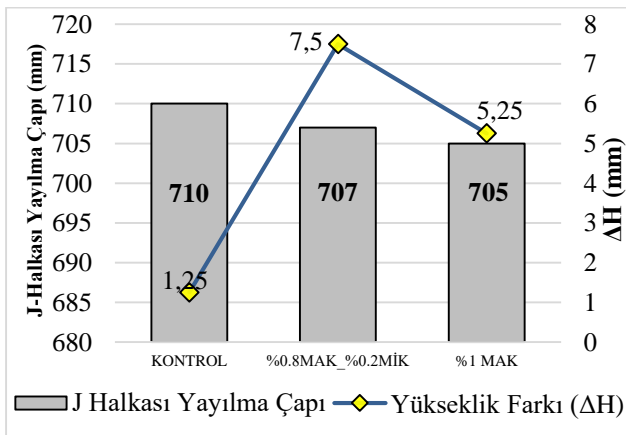
Şekil 5'te görüldüğü gibi, KYB karışımlarına lif ilave edilmesiyle birlikte akışkanlaştırıcı miktarı artmasına rağmen lifsiz karışıma kıyasla lifli karışımların çökme-yayımla değerlerinin azaldığı ve t_{500} sürelerinin de arttığı tespit edilmiştir. Bunun yanında, mikro lif içeren karma lifli KYB karışımı sadece makro lif içeren tek lifli karışıma göre daha fazla akışkanlaştırıcı içermesine rağmen, her iki karışımında yaklaşık benzer çökme-yayımla ve t_{500} sürelerine sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar karışıma dahil edilen liflerin agregaya kıyasla özgül ağırlıklarının büyük olmasına ve liflerin narinliklerine dayandırılabilir. Çünkü mikro liflerin narinliklerinin makro life göre daha düşük ve özgül yüzeylerinin daha fazla olması karışımların işlenebilirliklerini olumsuz etkilemektedir. Oliveira vd. (2013) [20] tarafından yapılan deneysel çalışmada da, çelik liflerin beton karışımı içerisindeki oranı arttıkça yayılma çapının azaldığı tespit edilmiştir. Literatürde yer alan bazı

araştırmalarda [13,21,22] da benzer sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 5. Karışımlara çökme-yayıllma ve t₅₀₀ değerleri

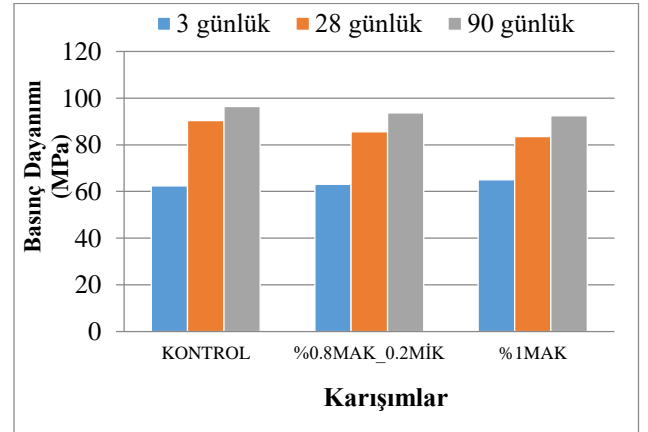
J-halkası yükseklik farkı ve çökme-yayıllma değerleri incelendiğinde, hem tek hem de karma lifli KYB karışımların lifsiz karışımlara kıyasla ΔH değerlerinde artış ve çökme yayılma değerlerinde ise azalma görülmüştür (Şekil 6). Çünkü lif geometrisi esas alındığında, özellikle mikro liflerin topaklanmaya olan eğiliminin fazla olması karışımların geçiş kabiliyeti ve aynı zamanda akıcılığını azaltabilir [23,24]. Ayrıca, Şekil 5'te görüldüğü gibi, KYB karışımlara ilave edilen makro lif miktarı arttıkça karışımların engeller arasında geçiş kabiliyetinin azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, KYB karışımlarında makro çelik lif yerine mikro çelik lif kullanılması taze betonun J-halkası içindeki ve dışındaki yükseklik farkı (ΔH) değerlerinde artışa sebep olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Karışımlara ait J-halkası yükseklik farkı ve Çökme-yayıllma değerleri

3.2. Karışımların Mühendislik Özellikleri

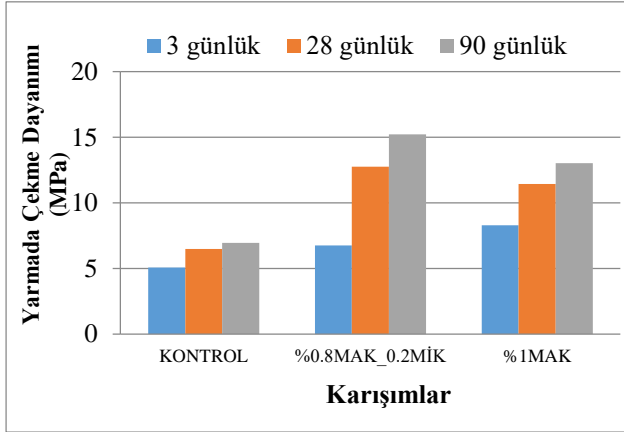
Lif takviyeli KYB karışımlarının basınç dayanımları Şekil 7'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, lif takviyeli karışımlara ait basınç dayanımlarının genelde kontrol karışımına kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak makro veya mikro liflerin KYB karışımlarının işlenebilirlik özelliklerini azalttığı ve buna bağlı olarak karışımların doluluk oranının düşmesi olarak gösterilebilir. Literatürde de betona çelik lif takviyesinin betonun basınç dayanımını lifsiz betona kıyasla ± 25 oranında değiştirebileceği belirtilmiştir [25, 26]. Kür süresinin artmasıyla, basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Tüm karışımlar dikkate alındığında, 90 günlük basınç dayanımı değerleri, uçucu külün puzolanik etkisiyle 28 günlük basınç dayanımına kıyasla %6-11 arasında artmıştır. Ayrıca, sadece lif takviyeli KYB'ler dikkate alındığında, karma lif takviyeli karışımın sadece 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin tek tip makro lif takviyeli karışıma kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çünkü mikro liflerin daha etkili çatlak köprüleme ve dolayısıyla çatlak oluşum ve yayılımını engelleyip geciktirmesi matrisin yaşına bağlıdır. Literatürde de yapılan bazı çalışmalarda, karma lif takviyeli betonda mikro liflerin çatlak köprülemede etkili olmasının, matrisin nihai dayanım ile ilişkili olduğu ortaya koyulmaktadır [13,27,28].



Şekil 7. Karışımlara ait basınç dayanımı değerleri

Çalışma kapsamında üretilen lifsiz, tek ve karma lif takviyeli KYB numuneleri üzerinde 3, 28 ve 90 gün sonunda yapılan yarmada çekme deneylerine ait sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, lif takviyesi tüm kür yaşları için lifsiz kontrol numunelerine kıyasla yarmada çekme dayanımını artırırken, karma lif takviyeli KYB numunelerinin yarmada çekme dayanımı

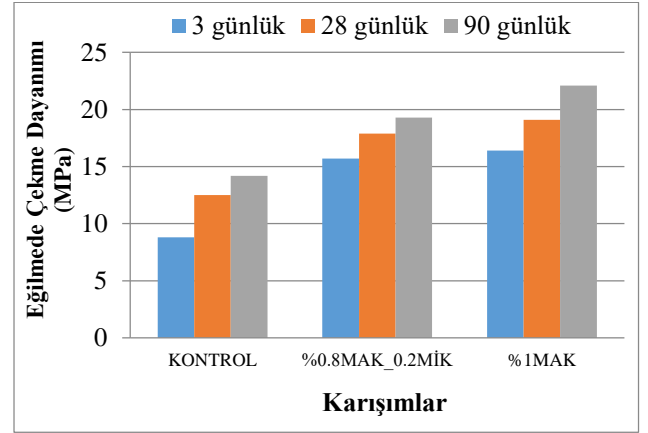
değerlerinin genelde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Literatürde bazı araştırmacılar [28-32] tarafından da bulunduğu gibi, betona tek tip lif yerine karma lif takviyesinin betonun yarmada çekme dayanımını daha çok iyileştirdiği belirtilmektedir. Ayrıca, Şekil 8’de görüldüğü gibi, tüm KYB karışımları değerlendirildiğinde, 28 günlük numunelere kıyasla, 90 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımlarında, uçucu külün puzolanik etkisi sebebiyle %7-20 arasında bir artış olmuştur.



Şekil 8. Karışımlara ait yarmada çekme dayanımları

Tüm KYB karışımlarının, 3, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla hazırlanan prizmatik numuneler test gününde dört noktali eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 9’da verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, lif içeren tüm KYB karışımlarının eğilmede çekme dayanımı değerleri, lifsiz KYB karışımına kıyasla daha yüksektir. Bunun nedeni, liflerin, etkili çatlak köprülemesinin yanı sıra çatlak başlamasını, büyümesini ve geciktirmesini kontrol ederek enerji yutma kapasitesi daha yüksek bir mekanizma oluşturmasıdır [30]. Bu durum, aynı zamanda, kür yaşının ilerlemesiyle birlikte lif-matris arayüz özelliklerinin iyileşmesi karışımların eğilmede çekme dayanımlarında artış meydana gelmesine ve matris dayanımının artmasıyla özellikle mikro liflerin eğilmede çekme dayanımı üzerindeki etkilerinin daha belirgin olmasına dayandırılabilir. Ayrıca, karışıma mikro çelik lif ilave edilmesinin tek lifli karışıma kıyasla, eğilmede çekme dayanımını azalttığı tespit edilmiştir. Literatürde mevcut olan bazı çalışmalarda [27,33,34] da bu durumu destekleyici sonuçlar bulunmuştur. Bunlara ilaveten, puzolanik bir malzeme olan uçucu kül daha uzun kür şartlarında hidrasyon reaksiyonları sergilediğinden, numunelerin 90 günlük eğilmede çekme dayanımı değerlerinin, 28

günlük tüm KYB numunelerine kıyasla %7,4-15,3 arasında arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 9. Karışımlara ait eğilmede çekme dayanımları

Ayrıca, dört noktali eğilme deneyine tabi tutulan lif takviyeli numunelere ait tokluk değerleri, yük-sehim eğrilerindeki L/150 (2 mm) sehim değerine kadar olan eğrinin altındaki alandan ($A_{(L/150)}$) faydalanılarak bulunmuştur. Daha sonra elde edilen tokluk değeri JSCE-SF4 standardının önerdiği Denklem 3.1’de yerine yazılarak eğilme tokluğu faktörü (FT) hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular Tablo 5’de verilmiştir

$$FT = \frac{A_{(L/150)} \times L}{(L/150) \times b \times h^2} \quad (3.1)$$

Burada;

FT: Eğilme Tokluğu Faktörü (N/mm²)

$A_{(L/150)}$: Yük-sehim eğrisinin altında kalan alan (N.mm)

L : Alt mesnetler arası mesafe (mm)

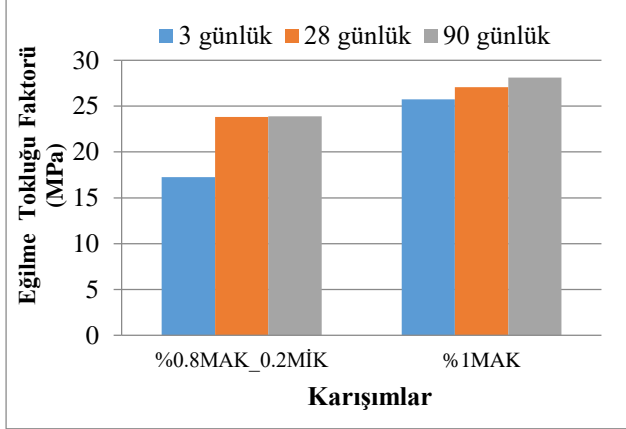
b, h : Numune boyutları (mm)

Tablo 5. Karışımlara ait tokluk ve eğilme tokluğu faktörü değerleri

Karışımlar	Tokluk (N.m)			Eğilme Tokluğu Faktörü (MPa)		
	3 gün	28 gün	90 gün	3 gün	28 gün	90 gün
%0.8MAK_0.2MİK	64,48	89,33	89,58	17,27	23,82	23,89
%1MAK	96,49	101,46	105,48	25,73	27,05	28,10

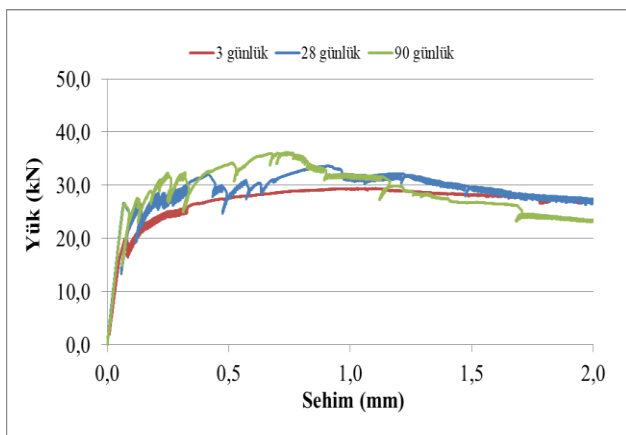
Tüm lif takviyeli karışımlara ait 3, 28 ve 90 günlük JSCE-SF4 standardına göre hesaplanan eğilme faktörü değerleri Şekil 10’da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde karışıma mikro çelik lif ilave edilmesiyle eğilme tokluğunun azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca numunelerin eğilme tokluğu değerleri üzerinde liflerin etkili çatlak köprülemesinin daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Ancak, nihai kür yaşında, liflerin çatlak köprülemesi

esnasından kopması sebebiyle, 28 günlük numunelerin eğilme tokluğu değerlerine kıyasla eğilme tokluğu değerleri artışında azalma görülmüştür. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda [35-40] da bulguları destekleyen sonuçlar bulunmuştur.

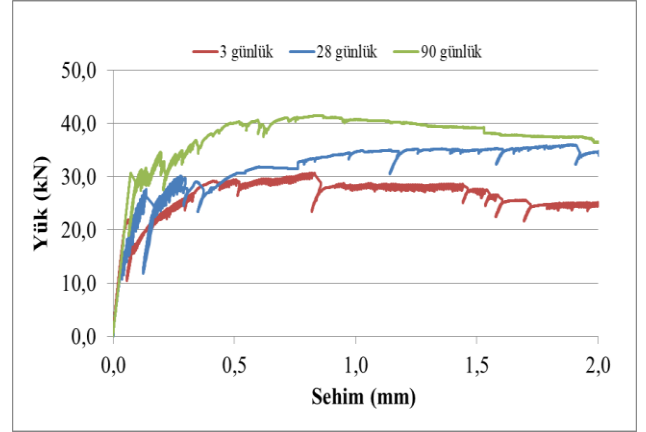


Şekil 10. Karışımlara ait eğilme tokluğu faktörü değerleri

Lifli KYB numunelerine ait eğilme deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrileri Şekil 11'de gösterilmiştir. Lif takviyeli tüm numunelerin, tüm kür yaşları için sehim sertleşmesi davranışı sergilediği görülmüştür. Ayrıca, numunelerin eğilme davranışı incelendiğinde, makro çelik lif takviyesinin, yük taşıma kapasitesi üzerinde daha olumlu bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mikro çelik lifler sadece mikro çatlakları köprülemede etkin olmasına ve tepe noktası sonrasındaki davranış üzerinde çok ciddi bir etkiye sahip olamamasına dayandırılabilir. Literatürde yer alan birçok çalışmada [13,27,36,38,41,42,43] karma lif takviyeli KYB karışımlarında mikro çelik lif oranı arttıkça, taşıma kapasitesi değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir.



a) %0.8MAK_0.2MİK



b) %1MAK

Şekil 11. Karışımlara ait 3, 28 ve 90 günlük yük-sehim eğrileri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, lifsiz, tek ve karma lif takviyeli olarak üretilen KYB karışımları üzerinde işlenebilirlik (Çökme-yayıma, t_{500} ve J-halkası) ve mekanik (basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımı) özelliklere ait deneyler yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

- Lifsiz kontrol karışımına göre, karışıma hem tekli hem de karma lif takviye edilmesi, karışımların çökme-yayıma çapı değerlerinde azalmaya, J-halkası yükseklik farkı (ΔH) ve yayılma sürelerinde (t_{500}) ise artışa neden olmuştur.
- Karışıma makro ve mikro çelik liflerin ilave edilmesi basınç dayanımında azalmaya neden olurken, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarında ise artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Lifli karışımlar içerisinde yarmada çekme dayanımlarında en fazla artış, karma lifli KYB numunelerinde görülürken, eğilmede çekme dayanımında ise en fazla artışın sadece makro lif içeren karışımda olduğu tespit edilmiştir.
- Tek ve karma lif takviyeli karışımların 3, 28 ve 90 günlük kür yaşlarından elde edilen yük-sehim eğrilerinin tümünde sehim sertleşmesi davranışı gözlemlenmiştir.
- Çelik lif takviyeli KYB karışımlarına ait eğilme tokluğu değerlerinde en iyi performansı, tüm kür yaşları için tek tip makro çelik lif takviyeli karışımdan elde edilmiştir. Ayrıca, numunelerin kür yaşının artmasına bağlı olarak matris kırılabilirliğinin artması ve liflerin matristen sıyrılarak çıkma davranışlarının azalmasından

dolayı eğilme tokluğu değerlerindeki artışta azalma gözlemlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1002 Hızlı destek Programı (MAG-121M024) ve İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi (Proje numarası: FYL-2020-2298) tarafından desteklenmiştir. Verdikleri finansal destekten ötürü teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] H. Okamura, "Self-compacting high-performance concrete," *Concrete international*, vol. 19 no. 7, pp. 50-54, 1997.
- [2] M. Nehdi, M. Pardhan, and S. Koshowski, "Durability of selfconsolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 2103-2112, 2004.
- [3] EFNARC, "Specification and guidelines for self-compacting concrete," *European project group, UK, 2002*.
- [4] D. J. Hannant, *Fiber cements and fiber concrete*, Chichester, UK: Wiley, 1978.
- [5] Y. N. Ding, Z. You, S. Jalali, "Hybrid fiber influence on strength and toughness of RC beams," *Composite Structures*, vol. 92, pp. 2083-2089, 2010.
- [6] P. Sukontasukkul, P. Jamsawang, "Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column," *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 201-205, 2012.
- [7] S. Mindess, *Thirty years of fibre reinforced concrete research at the UWM British, Colombia, 2007*.
- [8] P. Rossi, P. Acker, Y. Malier, "Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure," *Materials and Structures*, vol. 20, no. 1, pp. 436-439, 1987.
- [9] B. Mobasher, Y. L. Cheng, "Mechanical properties of hybrid cement based composites," *American Concrete Institute Materials Journal*, vol. 93, no. 3, pp. 284-292, 1996.
- [10] K. Türk and C. Kına, "Çimento Esaslı Kompozitlerde Karma Lif Kullanımı," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 23 no. 6, pp. 671-678, 2017.
- [11] K. Türk and E. Atalay, "The Properties of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete with Different Type Micro Fiber," *4th International Energy Engineering Congress, Gaziantep, Türkiye, pp.1040-1051,2019*.
- [12] K. Türk ve M. Başsürücü, "Effect of Curing Conditions on the Mechanical Properties of Conventional Concrete with Hybrid Fiber," in *4th International Energy Engineering Congress, Gaziantep, Türkiye, 2019, pp. 244-257*.
- [13] K. Turk, E. Oztekin, and C. Kına, "Self-compacting concrete with blended short and long fibres: experimental investigation on the role of fibre blend proportion," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 26. no. 3, pp. 905-918, 2022.
- [14] K. Türk ve İ. Dönmez, "Some Properties Of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete Containing Binary And Ternary Mineral Admixture," *4th International Energy Engineering Congress, Gaziantep, Türkiye, 2019, pp.1052-1065*.
- [15] EFNARC, "European Guidelines for Self-Compacting Concrete," *Specification and Production and Use Association, 2005*.
- [16] ASTM C39, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018*.
- [17] ASTM C496 / C496M-17, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression," *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017*.

Yazarların katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

Çıkar çatışması beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve yayın etiği beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

- [18] ASTM C1609 / C1609M-19. 2019. "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete," *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019*.
- [19] JSCE, "Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fibre Reinforced Concrete," *JSCE Standard SF-4, 1984*.
- [20] L. A. Pereira de Oliveira, J. P. Castro Gomes, M. M. M. Bernardo and L. F. A Ramos, "Evaluation of dry mortar ratio as mix design parameter for steel fibre reinforced self compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 642-649, 2013.
- [21] X. Liu, T. Wu, X. Yang and H. Wei, "Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 226, pp. 388-398, 2019.
- [22] H. Ghanem and Y. Obeid, "The Effect of Steel Fibers on the Rhyological and Mechanical Properties of Self Compacting Concrete," *European Scientific Journal*, vol. 11. no. 21, pp. 1857-1881, 2015.
- [23] B. Akcay ve M.A. Tasdemir, "Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 28 pp. 287-293, 2012.
- [24] R. Yu, P. Spiesz and H.J.H. Brouwers, "Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)," *Cement Concrete Research*, vol. 56 pp. 29-39, 2014.
- [25] U. Nyström and K Gylltoft, "Comparative numerical studies of projectile impacts on plain and steel-fibre reinforced concrete," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38 pp. 95-105, 2011.
- [26] M. Sarı, "Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013.
- [27] N. Haddadou, R. Chaid, Y. Ghernouti, and N. Adjou, "The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete," *J. Build. Mater. Struct*, vol. 1, no. 2, pp. 65-76, 2014.
- [28] M. Sahmaran, A. Yurtseven, and I. Ozgur Yaman, "Workability of hybrid fiber reinforced self compacting concrete," *Building and Environment*, vol. 40, no. 12, pp. 1672-1677, 2005.
- [29] M. Hsieh, C. Tu and P.S. Song, "Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete," *Materials Science and Engineering A*, vol. 494, pp. 153-157, 2008.
- [30] R. Yu, P. Spiesz and H.J.H. Brouwers, "Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres," *Construction and Building Materials*, vol. 79, pp. 273-282, 2015.
- [31] J. Blunt and C. P. Ostertag, "Performance-Based Approach for the Design of a Deflection Hardened Hybrid Fiber-Reinforced Concrete," *Journal Of Engineering Mechanics*, vol. 135, pp. 978-986, 2009.
- [32] A. Bentur and S. Mindess, *Fiber Reinforced Cementitious Composites*, CRC press, 2006.
- [33] F. Aslani, F. Hamidi, A. Valizadeh, and A. T. N. Dang, "High-performance fibre-reinforced heavyweight self-compacting concrete: Analysis of fresh and mechanical properties," *Construction and Building Materials*, vol. 232, pp. 117230, 2020.
- [34] H. Mazaheripour, S. Ghanbarpour, S. H. Mirmoradi and I. Hosseinpour, "The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no.1, pp. 351-358, 2011.
- [35] J. J. Li, C. J. Wan, J. G. Niu, L. F. Wu, and Y. C. Wu, "Investigation on flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 449-458, 2017.
- [36] P. Rashiddadash, A. A. Ramezaniapour, and M. Mahdikhani, "Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice," *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 313-320, 2014.
- [37] H.R. Pakravan, M. Latifi and M. Jamshidi "Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review," *Construction and Building Materials* vol. 142, pp. 280-294, 2017.
- [38] K. Turk, C. Kina and E. Oztekin, "Effect of macro and micro fiber volume on the flexural performance of hybrid fiber reinforced SCC," *Advances in Concrete Construction*, vol. 10, no. 3, pp. 257-269, 2020.

- [39] K. Turk, M. Bassurucu and RE. Bitkin, “Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber,” *Construction and Building Materials*, vol. 266, pp. 120944, 2021.
- [40] J.J. Li, C.J. Wan, J.G. Niu, L.F. Wu, and Y.C. Wu, “Investigation on flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 449-458, 2017.
- [41] M. Pajak and T. Ponikiewski “Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers,” *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 397-408, 2013.
- [42] Z. Wu, C. Shi and W. He, “ Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 103, pp. 8-14, 2016.
- [43] R.E. Bitkin, “Basınç Donatısız KYB’den Üretilmiş Kirişlerin Eğilme Performansına Karma Lif Takviyesinin Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2020.