

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRTLÜ SİSTEMLERDE MİNERAL KATKI İKAMELİ KARMA LİFLİ
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN İŞLENEBİLİRLİK VE MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İzzeddin DÖNMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OCAK 2020

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

**DÖRTLÜ SİSTEMLERDE MİNERAL KATKI İKAMELİ KARMA LİFLİ
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN İŞLENEBİLİRLİK VE MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İzzeddin DÖNMEZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

OCAK 2020

Tezin Başlığı: Dörtlü Sistemlerde Mineral Katkı İkameli Karma Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun İşlenebilirlik Ve Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi

Tezi Hazırlayan: İzzeddin DÖNMEZ

Sınav Tarihi: 07.01.2020

Yukarıda Adı Geçen Tez Jürimizce Değerlendirilerek İnaşat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi Olarak Kabul Edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Kâzım TÜRK**



İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Paki TURĐUT



İnönü Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ceren KINA



Malatya Turgut Özal Üniversitesi

Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Dörtlü Sistemlerde Mineral Katkı İkameli Karma Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun İşlenebilirlik Ve Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi” 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.

İzzeddin DÖNMEZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÖRTLÜ SİSTEMLERDE MİNERAL KATKI İKAMELİ KARMA LİFLİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN İŞLENEBİLİRLİK VE MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İzzeddin DÖNMEZ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

74+ xii sayfa

2020

Danışman: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonlar üstün mekanik özellikleri ve durabilitesiyle yüksek performanslı beton sınıfına girerler. Bununla birlikte KYB'nin kompleks taze hal özelliklerinden dolayı lif ilavesi işlenebilirlik özelliklerini etkilemektedir. Bu çalışmada, farklı tipteki mineral katkıların karma lif takviyeli ve lifsiz kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) işlenebilirlik ve mühendislik özelliklerine katkısı araştırılmıştır. Bu amaçla, mineral katkı olarak uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), kireçtaşı tozunun (KTT) kullanıldığı, ikili, üçlü ve dörtlü bağlayıcı harmanlamasına sahip karma lifli ve lifsiz toplam 9 adet KYB karışımları hazırlanmıştır. Mineral katkı etkisinin daha açık bir şekilde gözlemlenmesi için tüm karışımlarda toplam bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı, akışkanlaştırıcı katkı dozajı ve ince agrega/tüm agrega oranı sabit tutulmuştur. Tüm karışımlara ait işlenebilirlik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla çökme-yayılma deneyi, T₅₀₀, J-halkası deneyi ve V-hunisi deneyi gerçekleştirilirken, sertleşmiş beton özellikleri için ise basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve dört noktalı eğilme dayanımı testleri uygulanmıştır. Sonuçta, UK, YFC ve KTT içeren dörtlü bağlayıcı harmanlamasına sahip karma lifli karışımın yayılma çapı ve donatılar arasından geçiş kabiliyeti UK ve YFC içeren üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip karma lifli karışımına kıyasla daha iyi olduğu bulunmuştur. Diğer taraftan, kireçtaşı tozu ikamesinin, hem karma lifli hem lifsiz karışımların eğilme dayanımı ile karma lifli karışımların eğilme tokluğu üzerinde en olumsuz etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Karma lif, KYB, Mineral katkı, İşlenebilirlik, Mühendislik özellikler

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF WORKABILITY AND ENGINEERING PROPERTIES OF HYBRID FIBER REINFORCED SELF-COMPACTING CONCRETE PRODUCED USING BY QUATERNARY PORTLAND CEMENT BLENDS

İzzeddin DÖNMEZ

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

74+xii sayfa

2020

Supervisor: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete having superior mechanical properties and durability is included to high – performance concrete class. However, the fiber inclusion have affected the workability properties of self-compacting concrete (SCC) due to its complex fresh state properties. In this study, the effect of different type and combination of mineral admixtures on the properties of workability and engineering of SCC with hybrid fiber and no fiber were investigated. For this purpose, a total of nine SCC mixtures containing fly ash (FA), blast furnace slag (BFS) and limestone powder (LSP) as binary, ternary and quaternary blended system were prepared. A total of binder amount, water/cementitious materials ratio, the dosage of high-range water reducer admixture(HRWRA) and sand/total agregate ratio were constant in all mixtures to observe bluntly the effect of mineral admixture used different type and combination. For mechanical properties, the compressive, splitting tension and flexural strength tests were carried out all specimens while slump – flow, T₅₀₀, J-ring and V-funnel tests were performed to determine the workability properties.

Finally, it was found that the slump – flow and passing ability between bars of quaternary blended SCC with hybrid fiber was better than those of ternary blended SCC with hybrid fiber. On the other hand, the replacement of LSP by PC had worst effect on the flexural toughness of SCC specimens with/without hybrid fiber.

KEYWORDS: Hybrid fiber, Self-compacting concrete, mineral admixture, workability, engineering properties.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, bana değerli zamanını ayıran ve her konuda yardımcı olan danışman hocam Sn. Prof. Dr. Kâzım TÜRK'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarım için sağladığı teknik destekten dolayı, UTEST mühendislerinden Murat MERAL'e, teşekkür ederim.

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP FYL-2017-889 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim. Ayrıca, malzeme temininde sağlamış oldukları desteklerden dolayı SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye ve Karçimsa Çimento San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Benden, her konuda desteklerini esirgemeyen, başta annem ve babam olmak üzere tüm aile fertlerine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	ÖZET.....	i
	ABSTRACT.....	ii
	TEŞEKKÜR.....	iv
	İÇİNDEKİLER.....	v
	SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
	ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
	ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1.	GİRİŞ.....	1
1.1.	Giriş.....	1
2.	LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER.....	2
2.1.	Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB).....	2
2.1.1.	Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları.....	2
2.1.2.	Kendiliğinden yerleşen betonun dezavantajları.....	3
2.1.3.	Karışım tasarımı.....	4
2.1.3.1.	Kendiliğinden yerleşen betonu oluşturan malzemeler.....	5
2.1.3.1.1.	Çimento.....	6
2.1.3.1.2.	Puzolanlar.....	6
2.1.3.1.2.1.	Uçucu kül.....	7
2.1.3.1.2.2.	Yüksek fırın cürufu.....	8
2.1.3.1.2.3.	Silis dumanı.....	9
2.1.3.1.2.4.	Mikrofiller.....	10
2.1.3.1.3.	Su.....	10
2.1.3.1.4.	Akışkanlaştırıcı.....	11
2.2.	KYB reolojisi.....	12
2.3.	KYB stabilitesi.....	14
2.3.1.	Statik stabilite.....	14
2.3.2.	Dinamik stabilite.....	15
2.4.	İşlenebilirlik testleri.....	16
2.4.1.	Çökme-yayılma testi.....	17
2.4.2.	J-halkası testi.....	19
2.4.3.	V-hunisi deneyi.....	20

2.5.	Lif takviyeli betonlar.....	21
2.5.1.	Lif takviyeli beton türleri.....	21
2.5.1.1.	Tek lif lif takviyeli beton.....	21
2.5.1.2.	Karma lif takviyeli beton.....	22
3.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	23
3.1.	Malzemeler.....	23
3.1.1.	Bağlayıcılar.....	23
3.1.1.1.	Çimento.....	23
3.1.1.2.	Uçucu kül.....	24
3.1.1.3.	Yüksek fırın cürufu.....	24
3.1.1.4.	Kireçtaşı tozu.....	25
3.1.2.	Agrega.....	25
3.1.3.	Kimyasal katkı.....	25
3.1.4.	Karma suyu.....	26
3.1.5.	Lifler.....	26
3.2.	Karışım tasarımı.....	27
3.2.1.	Beton karışımları ve numune kodları.....	28
3.2.2.	Taze karışımların hazırlanması.....	30
3.2.3.	Numune boyutları ve şekilleri.....	32
3.3.	Numune kürü.....	32
3.4.	Taze beton deneyleri.....	33
3.4.1.	Çökme-yayılma ve T ₅₀₀ deneyi.....	33
3.4.2.	J-halkası deneyi.....	33
3.4.3.	V-hunisi deneyi.....	34
3.5.	Sertleşmiş beton deneyleri.....	35
3.5.1.	Basınç dayanımı deneyi.....	35
3.5.2.	Yarmada çekme deneyi.....	36
3.5.3.	Dört noktalı eğilme testi.....	37
3.3.3.1.	Numunelerin hazırlanması.....	54
3.3.3.2.	Deney Düzeneği.....	58
4.	DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
4.1.	Taze beton özellikleri.....	39
4.1.1.	Çökme-yayılma çapı (Df) ve 500 mm yayılma çapı süresi (T500).....	39

4.1.2.	J-halkası deneyi.....	45
4.1.3.	V-hunisi deneyi.....	49
4.2.	Sertleşmiş beton deney sonuçları.....	50
4.2.1.	Basınç dayanımı.....	51
4.2.2.	Yarmada çekme dayanımı.....	54
4.2.3.	Eğilme dayanımı (ASTM C1609).....	56
4.2.3.1.	Mineral katkı tipinin eğilme dayanımı üzerine etkisi.....	57
4.2.4.	Eğilme tokluğu.....	60
4.2.5.	Ultrases geçiş hızı.....	63
5.	SONUÇLAR.....	63
6.	ÖNERİ.....	66
7.	KAYNAKLAR.....	67
	ÖZGEÇMİŞ.....	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

VDK	Viskozite Düzenleyici Katkı
PÇ	Portland Çimentosu
UK	Uçucu Kül
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
KTT	Kireçtaşı Tozu
PP	Polipropilen
τ	Kayma Gerilmesi
γ	Deformasyon Hızı
VSI	Visual Stability Index
ΔH	J-halkası çökme-yayılma deneyi yükseklik farkı (mm)
μ	Viskozite
τ_0	Eşik Kayma Gerilmesi
SA	Süper Akışkanlaştırıcı
S/Ç	Su/Çimento
T_{500}	500 mm Yayılma Çapına Ulaşma Süresi
T_{500J}	J-Halkası 500 mm Yayılma Çapına Ulaşma Süresi
l	Silindirik Numunenin Yükleme Tablasına Temas Çizgisi Uzunluğu (mm)
d	Silindirik Numunenin Seçilen En Kesit Boyutu (mm)
f_{ct}	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
D_{ϕ}	Yayılma çapı (mm)
F	En Büyük Yük, Newton
D_j	J-halkası çökme-yayılma çapı (mm)
LVDT	Deplasman Ölçer
FT	Eğilme Tokluğu Faktörü
$A_{(L/150)}$	Yük – sehim grafiği altında kalan alan
L	Eğilme Testi Alt Mesnetler Arası Mesafe
h	Prizmatik Numune Yüksekliği (mm)

b	Prizmatik Numune Genişliği (mm)
UPV	Ultrases Dalga Hızı
V_f	V hunisi akış süresi (sn)
KL	Karma Lif
f_{c, 7 gün}	Betonun 7 Günlük Basınç Dayanımı
f_{c, 28 gün}	Betonun 28 Günlük Basınç Dayanımı
f_{c, 90 gün}	Betonun 90 Günlük Basınç Dayanımı
δ	Kiriş orta açıklık sehimi (mm)
φ	Transmisyon çapı (mm)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	İsviçrede bir köprüye ait kirişin, özel kalıp sistemiyle aşağıdan yukarıya doğru KYB pompalanarak tamir edilmesi.....	3
Şekil 2.2	KYB’de Tipik Olarak Hacimsel Karışım Oranları.....	6
Şekil 2.3	Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcıların çimento taneleri arasındaki flokülleşmeyi önleme mekanizması.....	12
Şekil 2.4	KYB karışımları için reolojik göstergeler.....	13
Şekil 2.5	Taze durumdaki beton süspansiyonunda asılı durumdaki agregaya etkiyen kuvvetler.....	15
Şekil 2.6	Yatay akış esnasında agregayı harekete geçiren kuvvetler.....	16
Şekil 2.7	Dikey akış esnasında agregaya etkiyen kuvvetler.....	16
Şekil 2.8	Çökme-yayılma deney aparatları.....	18
Şekil 2.9	J-halkası deney aparatları.....	19
Şekil 2.10	V-hunisi deney aparatı ölçüleri.....	20
Şekil 2.11	Tek tip lif takviyeli betonların tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	22
Şekil 3.1	Agrega karışımı granülometrisi ve TS 802 incelik ve kalınlık sınırları.....	25
Şekil 3.2	Çalışmada kullanılan lifler.....	27
Şekil 3.3	Karışımlarda kullanılan pan tipi mikser.....	30
Şekil 3.4	Beton karıştırma sürecinin şematik gösterimi.....	31
Şekil 3.5	Numune şekilleri ve boyutları.....	32
Şekil 3.6	J-halkası deney aparatı.....	34
Şekil 3.7	Deneylerde kullanılan V-hunisi deney aleti.....	34
Şekil 3.8	Basınç dayanımı deneyinde numunenin cihaza yerleştirilmesi.	35
Şekil 3.9	Karma lif içeren karışıma ait basınç dayanımı testi sonrası numuneler.....	35
Şekil 3.10	Yarmada çekme deneyi.....	36
Şekil 3.11	Dört noktalı eğilme testi düzeneği.....	37
Şekil 3.12	Dört noktalı eğilme testi uygulanan numunelerin boyutlarının ve mesnetler arası mesafelerin gösterimi	37
Şekil 3.13	JSCE- SF4 yöntemine göre eğilme tokluğu gösterimi.....	38
Şekil 4.1	Karışımlara ait çökme-yayılma ve T ₅₀₀ değerleri.....	40
Şekil 4.2	850 mm’den fazla yayılan karışımların VSI değerlendirmesi...	41
Şekil 4.3	Lifsiz karışımlara kıyasla mineral katkı türüne ve içeriğine göre lifli karışımların yayılma çapı kaybı oranları.....	42
Şekil 4.4	Kontrol ve ikili mineral katkı içeren lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait çökme-yayılma görselleri.....	43
Şekil 4.5	Üçlü ve dörtlü mineral katkı içeren lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait çökme-yayılma görselleri.....	44
Şekil 4.6	Lifsiz karışımların çökme-yayılma çapı ve T500 değeri arasındaki regresyon analizi.....	45
Şekil 4.7	J-halkası yayılma çapı ve geçiş yeterliliği (H2-H1) değerlerinin grafiksel gösterimi.....	46

Şekil 4.8	Karma lifli karışımlara ait J-halkası deneyi görselleri.....	48
Şekil 4.9	Karışımlara ait V-hunisi akış süresi değerleri.....	50
Şekil 4.10	Karışımların V-hunisi akış süresi ile T500 değerleri arasındaki ilişki.....	50
Şekil 4.11	Karışımlara ait 7,28 ve 90 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri.....	51
Şekil 4.12	Normalize edilmiş basın dayanımı değerleri.....	52
Şekil 4.13	28 günlük basınç dayanımlarının 7 günlük basınç dayanımlarına göre artış indeksi.....	53
Şekil 4.14	90 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımlarına göre artış indeksi.....	53
Şekil 4.15	Karma lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait 7 günlük çekme dayanımı.....	55
Şekil 4.16	Karma lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait 28 günlük çekme dayanımı.....	55
Şekil 4.17	Karma lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait 90 günlük yarmada çekme dayanımı.....	56
Şekil 4.18	Normalize edilmiş çekme dayanımı.....	56
Şekil 4.19	Lifli ve lifsiz KYB numunelerine ait 7 günlük eğilme dayanımı değerleri.....	58
Şekil 4.20	Lifli ve lifsiz KYB numunelerine ait 28 günlük eğilme dayanımı değerleri.....	59
Şekil 4.21	Lifli ve lifsiz KYB numunelerine ait 90 günlük eğilme dayanımı değerleri.....	60
Şekil 4.22	Karma lifli ve farklı mineral katkı içeriğine sahip KYB karışımlarının eğilme tokluğu faktörü değerleri.....	61
Şekil 4.23	Karma lifli karışımların 7 günlük yük-sehim grafikleri.....	62
Şekil 4.24	Karma lifli karışımların 28 günlük yük-sehim grafikleri.....	62
Şekil 4.25	Karma lifli karışımların 90 günlük yük-sehim grafikleri.....	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	EFNARC Komitesi tarafından tavsiye edilen karışım oranları (EFNARC, 2005).....	5
Çizelge 2.2	EFNARC (2005)'e göre mineral katkı malzemelerinin sınıflandırılması.....	7
Çizelge 2.3	ASTM'ye göre uçucu kül sınıflandırması.....	8
Çizelge 2.4	EFNARC (2002)'a göre bazı işlenebilirlik testleri ve belirlenen parametreler.....	17
Çizelge 2.5	EFNARC (2005)'a göre yayılma çapı sınırları.....	18
Çizelge 2.6	EFNARC (2005)'a göre V-hunisi akış süresi sınıflandırması.....	20
Çizelge 3.1	Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	23
Çizelge 3.2	Uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	24
Çizelge 3.3	Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler....	24
Çizelge 3.4	Çelik ve sentetik liflerin bazı özellikleri.....	26
Çizelge 3.5	Karışım oranları.....	29
Çizelge 4.1	Karışımlara ait işlenebilirlik testi bulguları.....	39
Çizelge 4.2	Beton numunelerine ait mekanik testlerin sonuçları.....	51
Çizelge 4.3	Tüm lifli ve lifsiz KYB numunelerine ait dört noktalı eğilme testi sonuçları.....	57

1. GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen beton, kendi ağırlığı altında akabilen ve yerleşebilen, donatılar arasında geçerek kalıpları tamamen doldurabilen, tüm bunları stabil durumu bozulmadan yapan bir beton türüdür [1]. Kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı beton ise yeterli derecede işlenebilirliğe, yüksek mukavemete ve iyi dayanıklılığa sahip beton olarak tanımlanmaktadır [2]. Bu gereklilikleri yerine getiren bir beton oluşturmak için, yüksek miktarda bağlayıcı dozajına, süper akışkanlaştırıcıya (SP), viskozite düzenleyici katkı (VDK) veya UK, YFC gibi amorf yapıya sahip mineral katkılara ihtiyaç vardır [3]. KYB'nin olumsuz özelliklerinde birisi yüksek hacimde portland çimentosuna (PC) ihtiyaç duymasıdır. Çimento sektörünün Dünya'da en yüksek üçüncü karbondioksit emisyonuna yol açan sektör olduğu düşünülürse, betona talebin her geçen gün artmasıyla bu olumsuzluk daha önemli bir hal alır [4]. KYB'de portland çimentosu kullanımını sınırlandırmanın bir yolu, uçucu kül, doğal puzolan, kireç taşı tozu gibi mineral katkıları(MK) çimentoyla yer değiştirerek ikame etmektir [5]. Bu gibi MK'ların kullanımı, betonun işlenebilirlik ve mekanik özelliklerini geliştirdiği gibi endüstriyel atık kategorisindeki UK, YFC, silis dumanı gibi malzemeler değerlendirilerek çevresel ayak izini azaltır.

UK betonun işlenebilirliğini ve uzun dönem basınç dayanımını arttırmaktadır. UK küresel taneli şekillere sahip olduğu için ve çimentoya kıyasla su ihtiyacının daha az olması sebebiyle, sadece çimento içeren bir karışımla aynı çökme-yayıma değerini elde etmek için daha az suya ve akışkanlaştırıcıya ihtiyaç duyar [6], [7]. YFC, çimentoya yakın bir kimyasal bileşime sahiptir. Dünyada yılda yaklaşık 250 milyon ton cüraf üretilir ve beton üretiminde 90 milyon tonu kullanılır. Ayrıca YFC; düşük hidratasyon ısı, yüksek sülfat ve asit direnci, daha iyi işlenebilirlik ve düşük geçirgenlik gibi avantajlara da sahiptir [8].

Günümüzde yapılan araştırmalar sonucunda, betona katılan liflerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımını arttırdığını ve sünekliği yüksek betonlar elde etmeyi mümkün kıldığı görülmüştür [9]. Lif takviyeli betonlarda, tek çeşit ve karma lif olmak üzere iki tip uygulama vardır. Tek tip lif kullanımı betonun özelliklerini sınırlı bir düzeye getirebilir. Bununla birlikte, betona iki veya daha fazla sayıda farklı lif tipinin eklenmesiyle daha gelişmiş mühendislik özellikleri sunulabilir; çünkü bir lifin varlığı diğer lifin sağlayacağı özelliklerin daha verimli kullanılmasını sağlar [10].

Bu çalışmada, mineral katkı türünün, ikili ve üçlü bağlayıcı sistemlerde lifli ve lifsiz karışımların işlenebilirlik ve mekanik özelliklerini nasıl etkilendiğinin araştırılması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER

2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), herhangi dahili veya harici vibrasyon gerektirmeden kendi ağırlığı altında akabilen, dar donatılar arasından geçerek derin kesitlere yerleşebilen ve bu özellikleri gerçekleştirirken stabilitesini kaybetmeyen, ayrışmaya karşı dirençli özel bir beton türü olarak tanımlanabilir. KYB ilk olarak 1980'lerin sonuna doğru Japon bilim insanı H. Okamura tarafından geliştirilmiştir [1]. Japonya'da 1970'li yıllarda, kalifiye eleman eksikliğinden dolayı yapısal betonlarda durabilite problemlerinin belirmeye başlaması, bu beton türünün ortaya çıkmasının temellerini oluşturur [11]. KYB'nin ilk uygulaması, İtalya'nın S.Marco Rıhtım inşaatında 40.000 m³ reoplastik beton kullanılarak yapılmıştır [12]. KYB'nin sağladığı üstün avantajlardan dolayı günümüzde kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır.

2.1.1 Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları

Taze haldeki betonun vibrasyon ihtiyacı ortadan kalkacağı için zaman, işçilik ve maliyetten tasarruf sağlanır. Maruz kalınan gürültü kirliliğinin ve titreşimin önüne geçilmiş olunur [13].

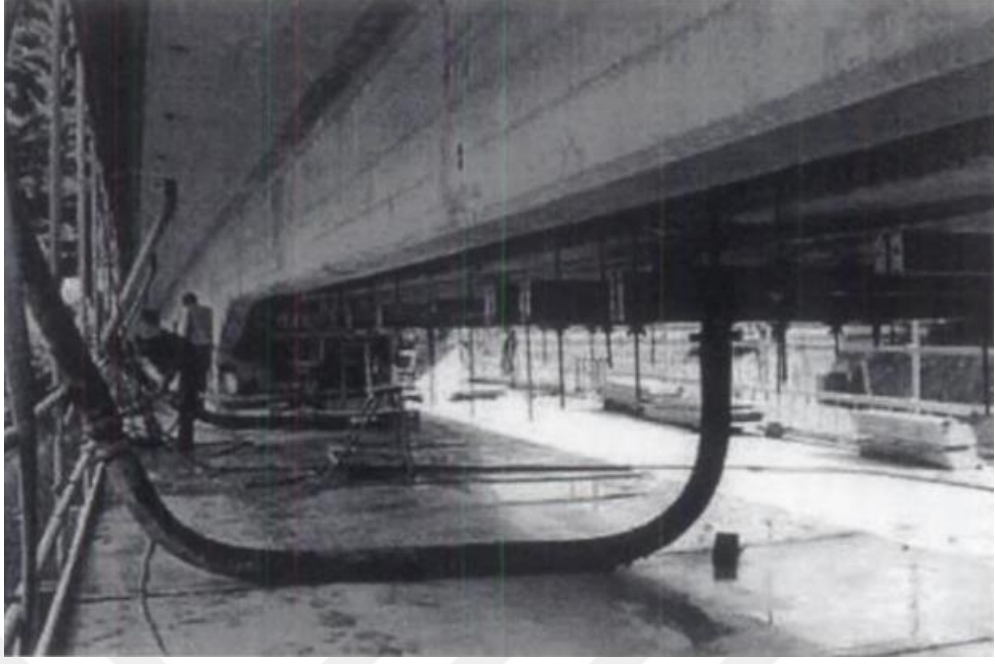
Güçlendirme projelerinde tek bir noktadan döküm yapılmasına olanak sağladığı için büyük kolaylık sağlar (Şekil 2.1).

Geleneksel betonlara kıyasla daha geçirimsiz olduğu için gelişmiş durabilite özellikleri sunar ve daha yüksek dayanım sağlar.

Sık donatılı perde tipi dar kesitli veya kiriş - kolon birleşim yerleri gibi sık donatılı bölgelerde boşluk bırakmadan akıcı bir şekilde yerleştiği için betonun mekanik performansını artırır [14].

Yerleştirme sırasında doğabilecek işçilik hatalarının önüne geçer.

Geleneksel betona kıyasla, döşeme ve düşey elemanların üretim süresini %20 oranında daha kısaltır [15].



Şekil 2.1 İsviçrede bir köprüye ait kirişin, özel kalıp sistemiyle aşağıdan yukarıya doğru KYB pompalanarak tamir edilmesi [16]

2.1.2 Kendiliğinden yerleşen betonun dezavantajları

Betonun stabilitesini sağlamak için viskozite düzenleyici katkı (VDK) ya da yüksek miktarda bağlayıcı malzemeye ihtiyaç duyulur. Bunun neticesinde çimento dozajının artırılmasıyla maliyet yükselir ve betonun hidrasyon ısısı yüksek olduğu için rötre çatlaklarını artırır.

KYB karışım tasarımına karşı oldukça hassastır. Bunun için üretiminde ve uygulanmasında yüksek özen gerektirir.

Kullanılan kalıp sistemlerinin bir çoğu, KYB kullanımı için elverişli değildir. Kalıp sistemlerinin %2'den daha yüksek eğime sahip oldukları durumlarda, KYB uygulanamaz [17].

Üretiminde çeşitli kimyasal katkıları kullanıldığı için maliyetleri normal betona göre daha yüksek olmaktadır ve kullanılan katkıların bazı olumsuz yan etkileri olabilmektedir.

2.1.3 Karışım tasarımı

KYB'nin karmaşık bir reolojik yapısı olmasından dolayı, karışım oranları, malzeme özellikleri, karıştırma yöntemi vb. gibi faktörlere karşı oldukça duyarlıdır. Bu beton türünün işlenebilirlik özelliklerinde meydana gelebilecek olumsuzluklar, mekanik ve durabilite açısından da sorun teşkil edebilmektedir [18]. Bunun için karışım dizayn edilirken, kullanılacak malzemeler ve oranları dikkatli seçilmelidir. KYB tasarımı yapılırken, betonun yüksek akıcılık, dinamik ve statik stabilite ve dar açıklıklar ve donatılar arasında başarılı geçiş özellikleri sergilemesi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu özellikleri sağlamak için, yeterli viskozite ve olabildiğince düşük akma gerilmesi gereklidir. Karışım tasarımı yapılırken şu noktalara dikkat edilmelidir: Segregasyon riskini azaltmak için ve karışımın yeterli akıcılığı sağlayabilmesi için iri agrega miktarı ve maksimum agrega tane çapı düşük tutulmalıdır. Yeterli viskozite ve akıcılık sağlamak için, puzolanik nitelikte veya inert mineral katkıları kullanılarak bağlayıcı miktarı yüksek tutulmalıdır. Betonun akma gerilmesini düşürmek için uygun özellikte ve dozajda akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılmalıdır.

KYB'de yeterli kohezyon ve segregasyon direnci oluşturmak için hamur hacmi geleneksel betondan yüksek olmaktadır. EFNARC (2005) kılavuzunda yer alan yönergelere göre tipik olarak hamur hacmi %30 – 38 aralığında değişmektedir. Su/Bağlayıcı oranı ise hacimsel olarak 0.85 – 1.10 değerleri arasında olmaktadır. Bağlayıcı malzemenin 0.125 mm'den küçük olması ve 0.063 mm elekten geçen miktarın >70% olması tavsiye edilmektedir. Bağlayıcı olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin, doğal puzolan gibi amorf yapıya sahip mineral katkıları kullanılabileceği gibi inert mikrofiller malzemeler de çimentoya ikame edilerek kullanılabilir. Yeterli viskozite sağlamak için Viskozite Düzenleyici Katkı (VDK)' lar kullanılabilir ancak bunlar maliyeti arttırmaktadır [19], [20]. EFNARC (2005) tarafından önerilen tipik karışım oranları aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 2.1).

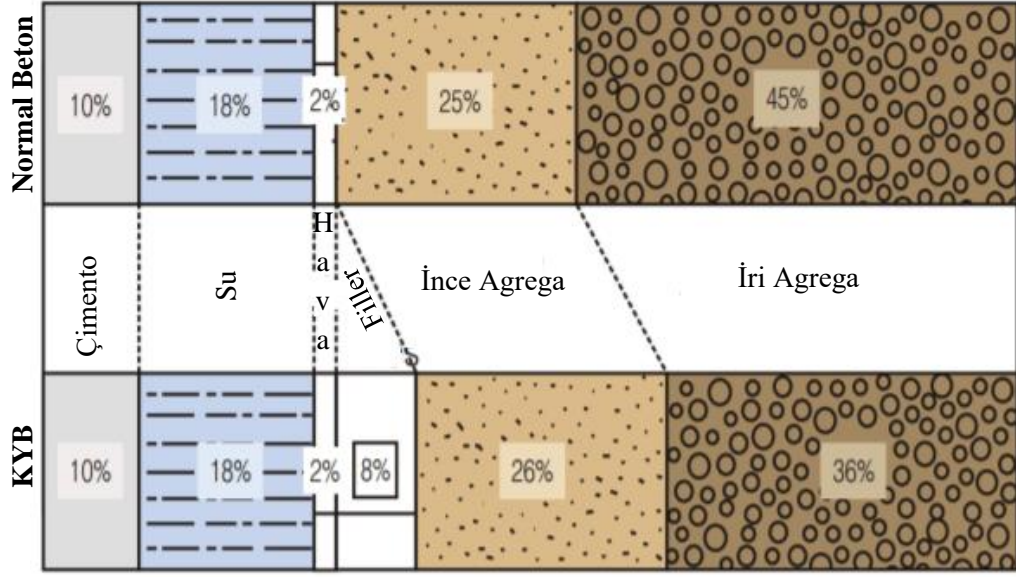
Çizelge 2.1 EFNARC Komitesi tarafından tavsiye edilen karışım oranları

Bileşenler	Tipik Ağırlık Oranları (kg/m ³)	Tipik Hacimsel Oranlar (litre/m ³)
Toz	380 – 600	-
Çimento hamuru	-	300 - 380
Su	150 - 210	150 - 210
Kaba agregası	750 - 1000	270 - 360
İnce agregası	Genel olarak toplam agregası ağırlığının %48 – 55'i	
Su/bağlayıcı (hacimce)		0.85 – 1.10

EFNARC (2005) kılavuzuna göre, maksimum agregası tane çapını azaltmanın ana nedeni dar kesitlerden betonun geçişini sağlayabilmektir. Bunun yanında azaltılmış iri agregası oranı, karışımın segregasyon riskini düşürür ve akıcılığını artırır. EFNARC'ın tavsiye ettiği iri agregası hacmi %27 – 36 arasında iken, maksimum tane boyutu 12 – 20 mm aralığındadır ancak daha büyük çaplı agregası kullanılabilir.

2.1.3.1 Kendiliğinden yerleşen betonu oluşturan malzemeler

KYB'yi oluşturan ana bileşenler, geleneksel betonla neredeyse aynıdır fakat KYB'yi geleneksel betondan ayıran bazı kilit tasarım prosedürleri vardır. Bunlar; klasik betona göre artırılmış ince agregası/iri agregası oranı, viskoziteyi arttırmak için mikrofiller malzeme ya da VDK kullanımı, düşük su/bağlayıcı oranı ve kayma gerilmesini düşürmek için süperakışkanlaştırıcı kullanımı olarak sıralanabilir. Şekil 2.2'de, geleneksel beton ile KYB'yi oluşturan malzemelerin hacimce yüzdeleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2 KYB’de tipik olarak hacimsel karışım oranları [21].

2.1.3.1.1 Çimento

Portland çimentosundan üretilen beton, inşaat mühendisliği projelerinde kullanılan en yaygın malzemelerden birisidir. Yaygın kullanımının başında gelen sebeplerden bazıları, çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin yerel olarak kolaylıkla bulunması, ticari olarak yaygın kullanımı, servis sırasında minimum bakım ihtiyaçları olarak sıralanabilir [22]. EFNARC (2005)’de belirtildiğine göre, EN 197-1 standartına uyan tüm çimentolar, KYB üretiminde kullanılabilir.

2.1.3.1.2 Puzolanlar

Kendi başlarına bağlayıcılığı olmayan veya çok az bağlayıcılığı olan, fakat ince olduklarında ve sulu ortamda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH) ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler ‘puzolan’ olarak tanımlanmaktadır [23], [24]. KYB’de puzolan kullanımının işlenebilirlik, durabilite ve mekanik özellikleri olumlu etkilediği bilinmektedir. 0.125 mm’den daha küçük tane çapındaki mineral katkıları, iri agregatlar arasındaki boşlukları doldurarak içsel sürtünmeleri azaltarak betonun reolojik özelliklerini iyileştirmektedir [25],[26]. Puzolanların dayanıma ve durabiliteye katkısı ise, karışıma ikame edildikleri orana ve mineralojik özelliklerinin etkilemiş olduğu puzolanik aktiviteleri ile ilgilidir. Örneğin çimentonun hidrasyon ürünleriyle silikalar reaksiyona girerek dayanımı ve durabiliteyi geliştiren çekirdeklenme bölgeleri oluşturabilirler [27].

KYB’de kullanılan ince malzeme miktarı, geleneksel betondakinden daha fazladır. İnce malzeme ihtiyacının fazla olması genelde 450-500kg/m³ arasında yüksek oranda çimento dozajı kullanımına neden olmaktadır. Fakat yüksek çimento kullanımı hem çevresel etki olarak zararlı olmaktadır hem maliyeti arttırmaktadır hem de yüksek hidrasyon ısı nedeniyle rötre çatlaklarına sebebiyet vermektedir. Bu olumsuzlukların önüne geçmek için KYB’de toz malzeme olarak çimento ile birlikte silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı tozu gibi mineral katkıları da kullanılmaktadır. EFNARC (2005)’e göre KYB karışımında toz malzeme miktarı (125µm’den küçük) 380-600 kg/m³ arasında değişkenlik gösterirken, su/toz malzeme oranı hacimsel olarak 0.85-1.10 arasındadır. KYB’de segregasyon direnci ve kohezyon sağlamak için kullanılan inert ya da puzolanik nitelikteki puzolanların EFNARC (2005)’e göre bağlayıcı özelliği olarak sınıflandırılması Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 EFNARC (2005)’e göre mineral katkı malzemelerinin sınıflandırılması

TİP 1	İnert ya da yarı inert	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mineral filler (CaCO₃, dolomit vb.) ➤ Pigmentler
TİP 2	Puzolanik	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Uçucukül ➤ Silis Dumanı
	Hidrolik	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Yüksek Fırın Cürufu

KYB üretiminde en çok kullanılan mineral katkıları ve bazı özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

2.1.3.1.2.1 Uçucu kül

Elektrik enerjisi üretimi için, termik santrallerin çoğunda yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Kömür, %80’inin 75µm elekten geçebilecek inceliğe sahip olacak tarzda öğütülmekte ve havayla birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir. Pulverize kömürün yanmasıyla büyük bir miktarı çok ince olan küller açığa çıkar. Açığa çıkan uçucu küllerin bir takım elektrostatik veya elektromanyetik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolarda toplanmaktadır [28], [29].

Çizelge 2.2’de gösterildiği gibi ASTM C 618’e göre uçucu küller F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Çizelge 2.3 ASTM’ye göre uçucu kül sınıflandırması [30]

Sınıf	Tanım
F	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 70$; antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilmekte; puzolanik özelliğe sahip
C	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 50$; linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilmekte; puzolanik özelliğinin yanısıra kendiliğinde de bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip.

KYB’de uçucu kül kullanımının bazı etkileri aşağıda özetlenmiştir:

- Betonun hidratasyon ısısını düşürmesine bağlı olarak, büzülme çatlaklarını ve su kaybını azaltır. Bunun yanında priz alma süresini bir miktar geciktirmesi, erken dayanımın daha düşük olmasına neden olur [1].
- Uçucu kül tanelerinin sahip olduğu küresel şekilli yapı, tanecikler arası sürtünmeyi azaltarak ve yuvarlanma etkisiyle, karışımların işlenebilirliğini artırır [31].
- Uçucu kül nispeten düşük özgül ağırlığı sayesinde, karışıma ikame edildiği zaman, çimento hamuru hacminin artmasını sağlayarak agregalar arasındaki sürtünme kuvvetini azaltır. Kohezifliği ve plastisiteyi artırarak işlenebilirliği iyileştirir [32].
- Puzolanik reaksiyonların devreye girmesiyle, uçucu kül nihai dayanımı artırır [33].

2.1.3.1.2.2 Yüksek fırın cürufu

Demir üretimi için, demir cevherlerinin, ‘‘yüksek fırın’’ olarak adlandırılan fırınlarda yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 1600 °C) ısıtılmaları sonucu ortaya çıkan yüksek fırın cürufu, endüstriyel atık kökenli bir malzemedir.

Hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4) gibi demir cevherlerinin fırınlarda ergitilmeleri sonucu oksijenden ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekir. Kok kömürü tarafından ısıtılan bu fırınlarda, arıtma işlemine yardımcı olabilmesi için kalkertaşı da

eklenmektedir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle kömürdeki karbon ile demir oksitteki oksijen reaksiyona girerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazları oluşturarak fırını terkeder. Fırında eriyik durumda demir ve CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi yabancı maddeler topluluğu kalmaktadır. Demir, diğer yabancı maddelerin yoğunluğundan daha fazla yoğunluğa sahip olduğu için, eriyik durumdaki demir, fırının en alt bölümünde, onun üstünde ise yüksek fırın cürufu yer almaktadır. Eriyik cüruf havada soğutulursa kristal yapıya sahip olurken, suda hızlı bir şekilde soğutulması sonucunda amorf yapıya sahip granüle yüksek fırın cürufu elde edilir. Granüle yüksek fırın cürufu öğütülerek çok ince taneli bir hale getirilirse, puzolanik özellik gösterir, ayrıca yüksek miktarda CaO içerdiği için kendinden de bir miktar bağlayıcı özelliği bulunmaktadır [30].

YFC kullanımının KYB özelliklerinin üzerine bazı etkileri aşağıda özetlenmiştir:

- Taze betonun işlenebilirlik özelliklerini iyileştirebilir.
- Hızlı puzolanik reaksiyona girerek, erken dayanımı artırıcı etkisinin olması [34].
- YFC'nin kendinden bir miktar bağlayıcı özelliği bulunmaktadır.
- Alkali-agrega reaksiyonuna ve korozyona karşı KYB'nin direncini arttırmaktadır.
- Çimentoyla ağırlıkça %60'a kadar değiştirilebilerek, KYB'de kullanımı mümkündür [35].

2.1.3.1.2.3 Silis dumanı

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarda yaklaşık 2000 °C sıcaklıktaki kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Üretim işleminde çok büyük miktarı SiO'dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO'nun, fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmesi ve çok çabuk yoğunlaştırılmasıyla, gazın içindeki SiO, amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşmektedir.

Silikon metalinin üretimi esnasında açığa çıkan gazın hızlı soğutulmasıyla yoğunlaştırılmasıyla elde edilen ve %85- 98 kadar SiO₂ içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye "yoğunlaştırılmış silis dumanı" veya kısaca "silis dumanı" adı verilmektedir [30].

Silis dumanın betonda kullanımını Kuzey Amerika ve İskandinav ülkelerinde oldukça yaygındır. Ülkemizde üretimi, Etibank Elektrometalurji Sanayi Tesistlerinde 5000 ton/yıl kapasiteli %75 ferrosilisyum üreten bir ark fırınında yapılmaktadır.

Silis dumanının KYB özellikleri üzerine etkilerinden bazıları şunlardır:

- Viskoziteyi ve kayma gerilmesini artırır. Sonuç olarak çökme-yayılma değerini ve segregasyon direncini düşürmektedir [36], [37].
- KYB’de %5’e kadar kullanımını, mekanik özellikleri ve durabiliteyi geliştirebilir [38].
- KYB’de düşük çimento dozajlarında (300-350 kg/m³) etkili bir viskozite arttırıcıdır [39].
- Puzolanik reaksiyon hızı diğer puzolanlara göre yüksektir [40].

2.1.3.1.2.4 Mikrofiller

Bu malzemeler, kimyasal etkidenden daha çok, küçük partikülleri sayesinde KYB matrisinin mikroyapısını geliştirmektedir. KYB’nin paket yoğunluğunda artış sağlayabilirler. Taze KYB’nin stabilitesini arttırmaları ve daha düşük su içeriğine sahip, serbest su miktarı azalmış karışımlar oluşturmaya olanak tanırırlar [41].

Bu malzemelerin tanecik şekilleri, boyutları ve yüzey karakteristikleri işlenebilirlik karakteristikleri üzerinde büyük önem taşımaktadır. Kireçtaşı tozu ve mermer tozu en yaygın kullanılan filler malzemelerdir.

1. Kireçtaşı tozu KYB’de yalnızca filler malzeme olarak kullanılmaktadır ve hidrasyon reaksiyonlarında rol almamaktadır [42]. Kireçtaşı tozu, amorf yapıda bir malzeme olmamasına karşın KYB dayanımına katkı sağlamaktadır. Bunun nedeni, ince kireçtaşı tozu tanecikleri çimento hidrasyonunun hızlanması için çekirdeklenme bölgeleri oluşturmaktadır. Bu da erken dayanıma katkı sağlamaktadır. Ayrıca belirtmelidir ki, kireçtaşı tozunun viskozite üzerinde etkisi az olsa da akma gerilmesini arttırmaktadır [43].

2.1.3.1.3 Su

KYB karışımlarının hidrasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesi, betonun taze hal özelliklerinin işlenebilir durumuna getirilebilmesi için su, temel bileşenlerden birisidir. KYB’nin akma gerilmesinin düşürülüp yeterli yayılmaya ulaşabilmesini

sağlamak için sadece su kullanıldığı düşünülürse, akma gerilmesiyle birlikte viskozite de önemli ölçüde azalacaktır. Dolayısıyla segregasyon direnci çok azalmış ve stabilitesi bozuk bir karışım elde edilir. Bu durumun önüne geçilmesi için, su ile birlikte süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılması, akma gerilmesini neredeyse sıfır'a indirirken viskozite yeterli seviyede tutulmuş olacaktır. KYB karışımlarında kullanılan suyun bir kısmı bağlayıcılar, agrega ve varsa lifler gibi komponentler tarafından absorbe edilir. Karışımda geriye kalan su miktarı serbest su olarak adlandırılır ve de karışımların kendiliğinden yerleşebilirliğini ve performansını etkileyen en önemli kriterlerden birisidir. Serbest su miktarını etkileyen en önemli faktörlerden birisi de, agregaların nemlilik durumlarıdır [44].

2.1.3.1.4 Akışkanlaştırıcı

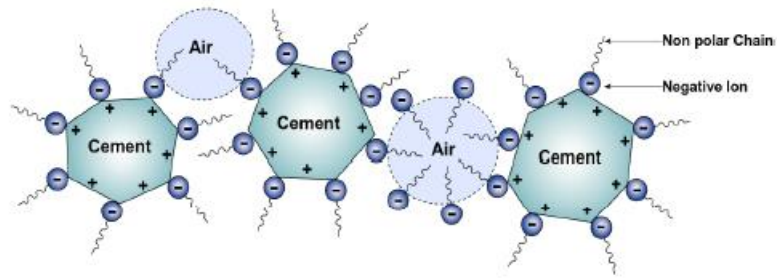
KYB'de süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmasında ki amaç, betonun yeterli çökme-yayıma çapına ulaşabilmesi için akma gerilmesini düşürülürken, segregasyon direnci ve stabilitesinin bozulmaması için, düşük su içeriği sayesinde viskozitesinin yeterli olmasını sağlamaktır.

Su azaltıcı kimyasal katkıların ilk ana hammaddesi lignosülfonat olmuştur. Lignosülfonatlar kağıt üretiminde kullanılan odunların yan ürünüdür. Lignosülfonatın katkı haline dönüşmesi için uzun bir süreçten geçer. Selüloz elde etmek için, odunun içerisinde bulunan linyin maddesi, sodyum bisülfid (Na_2SO_3) içinde eritilir. Kullanılan odun türüne ve kimyasal süreçlerin çeşidine göre farklı özellikteki lignosülfonatlar elde edilir.

İlk akışkanlaştırıcılardan olan lignosülfonat bazlı katkılar yüksek şeker içeriğine bağlı olarak priz süresini geciktirmekteydi. Ayrıca lignosülfonatlar tarafından betonun içerisine hava kabarcıkları sürüklenmekteydi ve bu hava kabarcıklarının çapı donma çözülme için etkili olan 0.25 mm çaptan çok daha büyük olduğu için betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkilemektedir [hulusi özkul].

İkinci nesil olarak adlandırılabilir akışkanlaştırıcı katkılar, melamin (SMF) ve naftalin (SNF) formaldehit sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcılardır. İlk olarak 60'lı yılların sonunda Japonya'da, 70'lerin başında Almanya'da ve 1974'te Kuzey Amerika'da kullanılmışlardır. Süper akışkanlaştırıcı sınıfına giren bu katkılar lignosülfonatlardan çok daha etkilidir. Fakat bu katkılarda karşılaşılan en sık sorun zamanla betonda meydana gelen işlenebilirlik kayıplarıdır. Bu sorunu çözmek için de

üçüncü nesil polikarboksilat kökenli katkılar geliştirilmiştir [90]. Bu katkılar, çok yüksek oranda su azaltma özelliğine sahiptirler. Polikarboksilat esaslı katkılarda elektrostatik itkiye ek olarak sterik itki mekanizmasına sahiptir. Akışkanlaştırıcı kimyasal, çimento tanelerinin yüzeyine absorbe olarak çimento taneciklerini negatif iyonla yükler ve bu sayede elektrostatik itki kuvveti oluşturur. Polikarboksilik asit esaslı katkılar da ek olarak uzun yan dallara sahip polimer zincirleri çimento tanesine bağlanarak tanecikler arasında sterik etkiyle bariyer oluşturur [63]. Şekil 2.3’de polikarboksilat eter bazlı süper akışkanlaştırıcıların etki mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcıların çimento taneleri arasındaki flokülleşmeyi önleme mekanizması

2.2 KYB Reolojisi

Reoloji, malzemelerin gerilme altındaki akış ve deformasyon davranışı inceleyen bilim dalıdır. Reolojik özelliklerine göre sıvılar newtonyen ve newtonyen olmayan incelenir. Sıvıya uygulanan kayma gerilmesi (τ) ile deformasyon hızı ($\dot{\gamma}$) arasında lineer bir ilişki varsa bu davranışa ‘‘Newtonyen Davranış’’, bu sıvılara da ‘‘Newtonyen Sıvısı’’ denilmektedir []. Newtonyen Davranışa ait Denklem 2.1’de gösterilmiştir.

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

Denklem 2.1’den de görüleceği üzere, kayma hızı ($\dot{\gamma}$) ile viskozitenin (μ) çarpımıyla kayma gerilmesi (τ) bulunur.

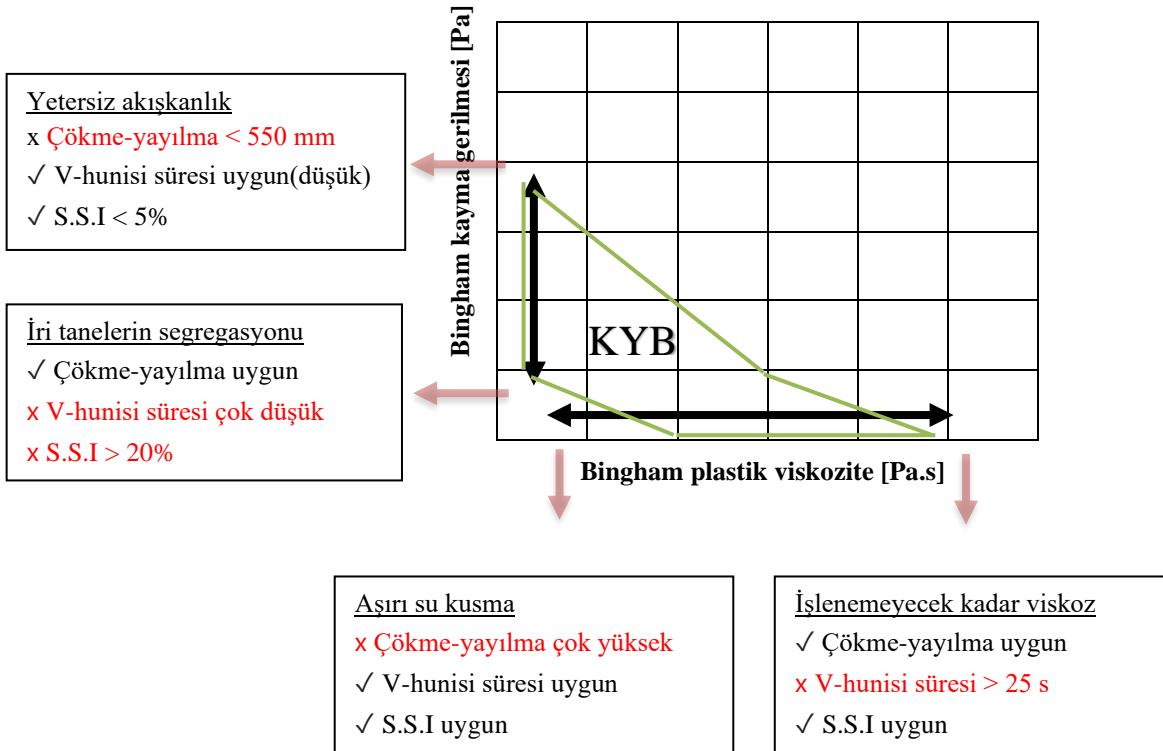
Newtonyen sıvılarda eşik kayma gerilmesi (τ_0), ‘‘sıfır’’ kabul edilmektedir. Oysa ki betonun jeolojisine böyle bir davranış uymamaktadır. Taze durumdaki betonun akışa

geçebilmesi için aşması gereken belli bir τ_0 değeri vardır. Bu davranışın uyumlu olduğu Bingham Modeli, Denklem 2.2’de verilmiştir.

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

Verilen Bingham denkleminde τ_0 , betonun akmaya başlaması için aşması gereken eşik kayma gerilmesi olarak tanımlanır. μ plastik viskozitedir ve betonun akmaya karşı gösterdiği dirençle ilişkilidir. Yüksek eşik kayma gerilmesi (τ_0) ve düşük plastik viskoziteye (μ) sahip olan karışımlar nispeten düşük yayılma çapına ve düşük V-hunisi akış süresine sahiptir. Düşük eşik kayma gerilmesi ve yüksek plastik viskoziteye sahip karışımlar ise daha büyük yayılma çapına ve yüksek V-hunisi akış süresine sahiptirler [64].

KYB karışımları tasarlanırken, uygulama türüne göre farklı reolojik parametreleri gerektirmekle beraber, genellikle sıfır veya sıfıra yakın eşik kayma gerilmesi ve segregasyon ve su kuma gibi stabilite problemlerinin önüne geçmek için yeterli plastik viskozite hedeflenir. Şekil 2.4’de belirtildiği gibi talepleri karşılayacak bir KYB karışımı tasarımında sağlanması gereken bazı reolojik parametreler vardır.



Şekil 2.4 KYB karışımları için reolojik göstergeler [91]

Eşik kayma gerilmesinin yüksek olması, segregasyona karşı direnci arttırmasına karşın, bazı durumlarda yetersiz akışkanlığa neden olarak, EFNARC (2005)'ın, KYB olabilme şartı olarak belirlediği 550 mm'lik minimum çökme-yayıma çapını sağlamayabilmektedir. Plastik viskozite, KYB karışımlarının stabilitesini sağlamaktadır. Fakat plastik viskozitenin çok yüksek olması, karışımı aşırı viskoz ve işlenemez hale getirebilir.

KYB karışımlarında eşik kayma gerilmesini etkileyen en önemli bileşen "su"dur. Akışkanlaştırıcı katkıları ise su içeriğini fazla arttırmadan eşik kayma gerilmesinin sıfır veya sıfıra yakın bir değer almasını sağlamaktadır. Karışımın viskozitesi ise mineral katkı malzemeleriyle ve/veya VDK'lar ile düzenlenmektedir.

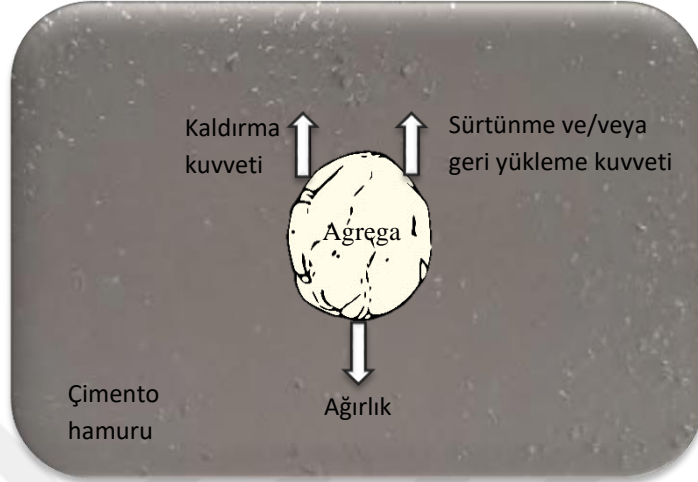
2.3 KYB stabilitesi

KYB stabilitesi, çimento hamuruyla agrega ve lif gibi parçacıkların yerleştirme esnasında ve sonrasında faz ayrışmasına uğramadan bütün olarak kalabilme kabiliyetini ifade eder. Taze haldeki KYB'nin stabilitesi genel olarak, dinamik ve statik stabilite olmak üzere iki formda incelenir. Betonda özellikle kaba agrega ve varsa lif gibi bileşenlerin homojen dağılımını sağlayabilmek için statik ve dinamik stabilite sağlanmalıdır [74].

2.3.1 Statik stabilite

Yerleştirildikten sonra, durağan haldeki betonun stabilitesi "Statik stabilite" olarak adlandırılır. Statik stabilitenin yetersiz olması durumunda, beton yüzeyinde kusurlar oluşur, arayüzey geçiş bölgesi etkilenir, betonun mekanik özellikleri olumsuz etkilenir ve donatıyla beton matrisi arasında aderansın azalmasına neden olur [75]. Statik stabilite, akma gerilmesi ve plastik viskozite tarafından kontrol edilir. Akma gerilmesi kaba agregaların çökmesine engel olur. Ancak KYB'lerde Eşik kayma gerilmesi sıfır veya sıfıra yakın bir değer de olduğu için agrega ve lif gibi kaba parçacıklar çökme eğilimindedir. Ayrıca betonun viskozitesi ve matris yoğunluğu kaba parçaların çökmesine karşı koymaktadır.

Taze durumdaki beton yerleştirildikten sonra agregaya etkiyen; kaldırma kuvveti, sürtünme kuvveti, geri yükleme kuvveti, ağırlık gibi etkiler Şekil 2.5’de şematik olarak gösterilmiştir.

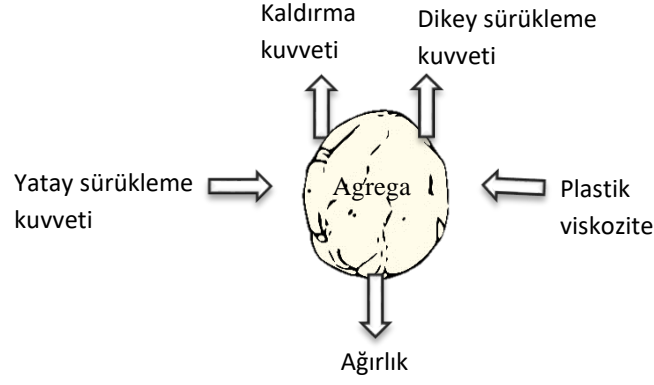


Şekil 2.5 Taze durumdaki beton süspansiyonunda asılı durumdaki agregaya etkiyen kuvvetler (Safiuddin (2008)’den uyarlanmıştır) [3].

2.3.2 Dinamik stabilite

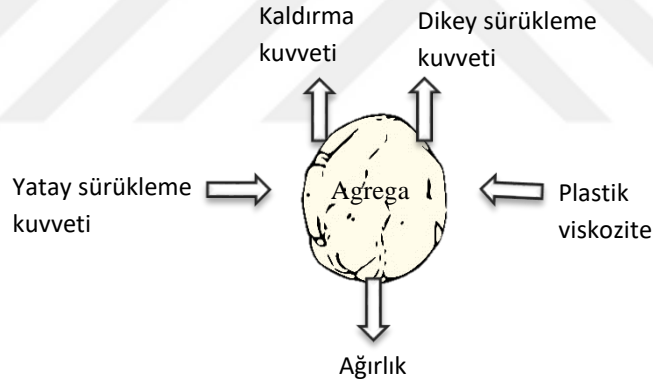
Taşıma ve yerleştirme işlemleri sırasında taze haldeki betonun stabilitesi ‘‘Dinamik stabilite’’ olarak ifade edilir. Dinamik stabilite yetersizliği, kaba agreganın kademeli olarak birikmesine ve beton matrisinin ayrışmasına sebep olur. Sonuç olarak beton heterojen bir yapıya sahip olur ve beton özellikleri olumsuz etkilenir [76]. KYB, taşıma ve yerleştirilme esnasında iri agregalarla birlikte kohezif bir şekilde hareket ederse, bu durum betonun iyi bir dinamik stabiliteye sahip olduğunun göstergesidir. Bu kriter, gelişmiş bir viskoziteyle elde edilebilir [77].

Dikey veya yatay yerleştirme esnasında KYB’de dinamik segregasyon meydana gelebilmektedir. Şekil 2.6’da gösterildiği gibi, yatay akış esnasında agregaya; yanıl karışım sürüklenme kuvveti, yer çekimi, kaldırma kuvveti, plastik viskozite, dikey sürüklenme kuvveti gibi bazı kuvvetler etki etmektedir.



Şekil 2.6 Yatay akış esnasında agregayı harekete geçiren kuvvetler (Safiuddin (2008)'den uyarlanmıştır) [3].

Dikey akış esnasında ise, kaldırma kuvveti, yer çekimi, dikey sürüklenme kuvveti etki etmektedir. Şekil 2.7'de, agregaya etki eden bu kuvvetler verilmiştir.



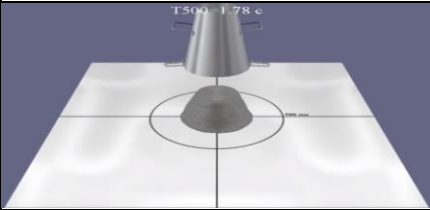
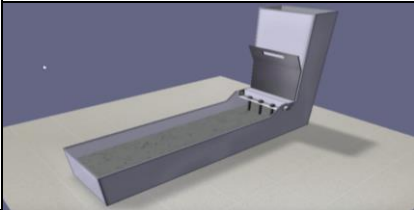
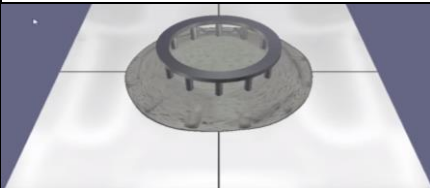

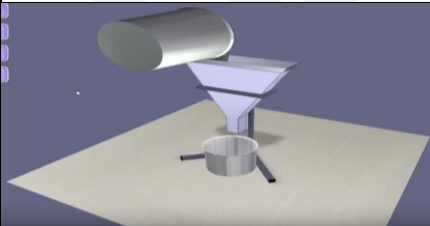

Şekil 2.7 Dikey akış esnasında agregaya etkiyen kuvvetler (Safiuddin (2008)'den uyarlanmıştır) [3].

2.4 İşlenebilirlik testleri

Geleneksel betona uygulanan Slump, VeBe, Walz gibi işlenebilirlik deneyleri, KYB için uygun olmamaktadır. KYB için uygulanan işlenebilirlik testleri üç ana kriteri belirlemektedir. Bunlar; doldurma kabiliyeti, engeller ile dar açıklıklardan geçiş

kabiliyeti ve segregasyona karşı dirençtir. Şekil 2.8’de EFNARC (2005)’e göre yapılan işlenebilirlik testleri ve ölçülen özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.4 EFNARC (2002)’a göre bazı işlenebilirlik testleri ve belirlenen parametreler

Deney yöntemi	Karakteristik	Deney yöntemi	Karakteristik
Çökme-yayılma deneyi	<ul style="list-style-type: none"> -Akışkanlık -Doldurma kabiliyeti 	L-kutusu deneyi	<ul style="list-style-type: none"> -Geçiş kabiliyeti
			
J-halkası deneyi	<ul style="list-style-type: none"> -Geçiş kabiliyeti -Doldurma kabiliyeti 	T ₅₀₀ deneyi	<ul style="list-style-type: none"> -Viskozite -Akışkanlık
			
V-hunisi deneyi	<ul style="list-style-type: none"> -Viskozite -Akışkanlık 	U-kutusu deneyi	<ul style="list-style-type: none"> -Geçiş kabiliyeti
			

2.4.1 Çökme-yayılma testi

Bu test yöntemi ilk olarak Japonya’da su altı beton uygulamalarında betonun akıcılık özelliğini değerlendirmek için kullanılmıştır [78]. Çökme-yayılma deneyinde, beton numunesinin kendi ağırlığı altında yayılması sağlanarak betonun doldurma kabiliyetinin belirlenmesi amaçlanır. Bu test, KYB karışımlarının görsel olarak segregasyon eğilimini kontrol etmek için yararlı olabilir. Betonun yayılma çapı, doldurma kabiliyetinin bir ölçütüdür. Numunenin yayılmaya başladığı an ile 500 mm’lik yayılma çapına ulaştığı an arasında geçen T₅₀₀ süresi ise karışımın viskozitesi hakkında fikir verebilir. Genel olarak, saha da ve laboratuvarında hızlı ve kolay gerçekleştirilebilir bir test metodudur. Fakat T₅₀₀ süresi belirlenirken iki kişiye ihtiyaç duyulabilir ve de düz zemin plakası üzerinde gerçekleştirilmesi gereken bir deneydir. Bu deney yöntemiyle, betonun engeller arasından veya dar açıklıklardan geçiş özelliklerini tespit etmek mümkün değildir. En yaygın kullanılan işlenebilirlik testidir ve betonun doldurma kabiliyetini belirlemek için iyi bir değerlendirme sunar. Betonun

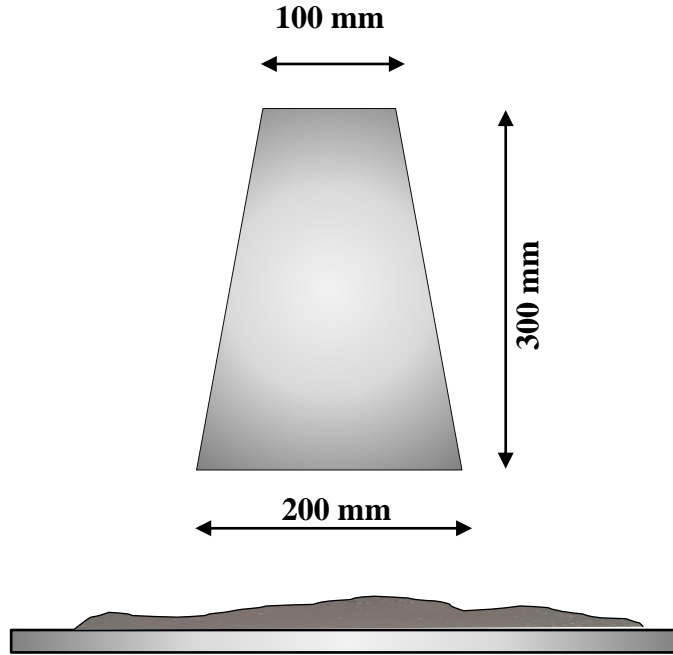
döküm ve yerleştirilme esnasında herhangi bir engel veya kısıtlamaya maruz kalmadan serbest bir şekilde akış göstermesi sahadaki uygulamaları temsil etmez bu yöntemle betonun doldurma kabiliyeti hakkında bir ön fikir edinileceği göz önünde bulundurulmalıdır. EFNARC (2005)'e göre KYB'ler çökme-yayıma çaplarına göre 3 kategoriye ayrılmıştır (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.5 EFNARC (2005)'e göre yayılma çapı sınırları

KYB sınıfı	Yayıma çapı (mm)
SF1	550 - 650
SF2	660 - 750
SF3	760 - 850

Deney aparatları

Bu deneyde kullanılan aparatlar EN 12350 – 2'ye uygun olmalıdır. Slump konisi, 200 mm alt çapa, 100 mm üst çapa ve 300 mm yüksekliğe sahip olmalıdır. Taban plakası en az 900 x 900 mm ölçülerinde, et kalınlığı en az 2 mm olacak şekilde sıvı emmeyen materyalden üretilmiş olmalıdır. Plaka üzerinde 200 mm ve 500 mm çapa denk gelen daireler çizilerek belli edilmelidir. Deney aparatları Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



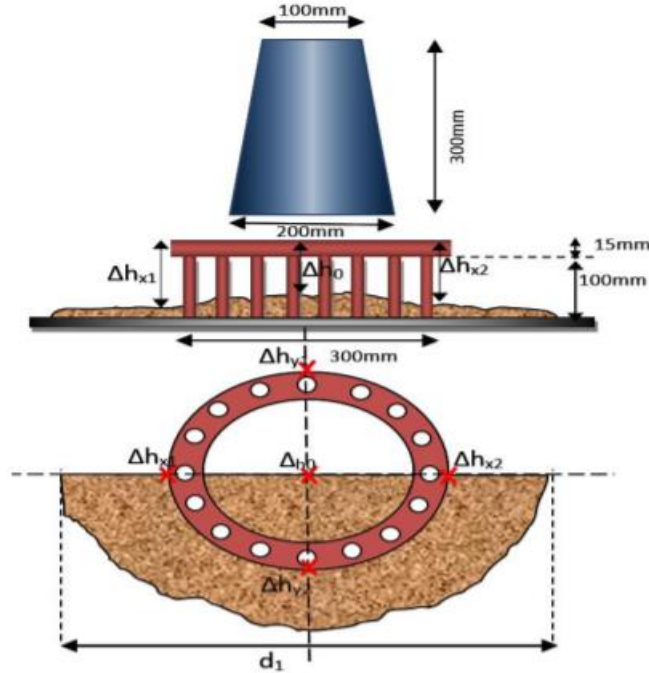
Şekil 2.8 Çökme-yayıma deney aparatları

2.4.2 J-halkası testi

J-halkası testi, betonun engeller arasından ve dar açıklıklardan geçiş yeteneğini belirlemek için uygulanır. Bu deney yöntemi genellikle J-halkası aparatının içine yerleştirilen slump konisi kullanılarak uygulanmaktadır. Bunun yanı sıra V-hunisi hatta Orimet deney aletleri kullanılarak da uygulanabilmektedir. Bu kombinasyonlarla, hem doldurma hem de geçiş özellikleri belirlenebilir. J-halkasında donatıları temsil eden çelik barların çapı veya aralarındaki mesafe uygulama tipine göre ayarlanabilir. Deney sırasında koninin kaldırıldığı an ile betonun 500 mm yayılma çapına ulaştığı an arasındaki geçen süre olan T_{500j} belirlenir. Beton yayılmasını tamamladıktan sonra J-halkasının ortasındaki yükseklik ile halkanın hemen dışındaki dört yüksekliğin arasındaki farkın aritmetik ortalaması alınarak J-halkası geçiş yeterliliği belirlenir.

Deney aparatları

Taban çapı 200 mm, üst çapı 100 mm yüksekliği 300 mm olan standart slump konisi kullanılır. J-halkası aparatının halka kısmı, 25 x 30 mm ölçüsünde dikdörtgen kesite sahiptir. Halkanın çapı 300 mm, yüksekliği 100 mm'dir. Çelik barların çapı ve aralarındaki boşluk, değişkenlik gösterebilmektedir. Deney aparatları Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



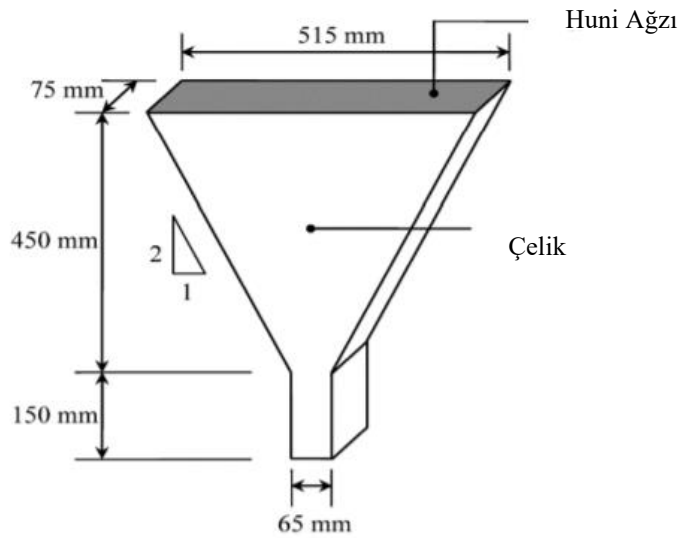
Şekil 2.9 J-halkası deney aparatları

2.4.3 V-hunisi deneyi

V-hunisi testi Japonya’da geliştirilmiştir [79]. Bu yöntemle betonun doldurma kabiliyeti belirlenir ve maksimum agrega tane çapı 20 mm olan betonlara uygulanabilir. Ayrıca bu deney, karışımın plastik viskozitesini göreceli olarak yansıtabilir. V-hunisi yaklaşık olarak 12 l hacminde betonla doldurularak, huninin altındaki kapağın açılmasıyla haznedeki betonun boşalması sağlanır. Kapağın açıldığı an ile, üstten bakılmak suretiyle huninin altında ışığın ilk görüldüğü an arasında geçen süre tutulur ve V-hunisi akış süresi belirlenir. Lif içeriğine sahip veya aşırı viskoz karışımlarda, huninin ağzının tıkanmasına bağlı olarak blokajlanma görülebilir. Segregasyon oluşan karışımlarda da V-hunisi akış süresi yüksek çıkabilmektedir. Düşük V-hunisi akış süresi, parçacıklar arası sürtünmenin az olması ve yüksek doldurma kabiliyetiyle ilişkilendirilebilir. EFNARC (2005) yönetmeliği, V-hunisi akış sürelerine göre karışımları 2 kategoriye ayırmaktadır (Çizelge 2.6). V-hunisi deney aparatları Şekil 2.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 EFNARC (2005)’e göre V-hunisi akış süresi sınıflandırması

KYB sınıfı	V-hunisi akış süresi (s)
VF1	≤ 8
VF2	9 – 25



Şekil 2.10 V-hunisi deney aparatı ölçüleri [63]

2.5 Lif takviyeli betonlar

Kırılgan yapıya sahip olan matrislerin, lif kullanılarak yapısal bütünlüğünün artırılması fikri tarih öncesi dönemlere kadar uzanmaktadır. 2500 sene öncesi Antik Mısır'da, kerpiç tuğlalara saman katılarak veya harç malzemelerine at kılı katılması yoluyla güçlendirme sağlanmıştır [80]. Betonda ise, 20. yy başlarında yaygın olarak asbest lifler kullanılırken, çelik liflerin kullanıldığı deneyler, 1910'lu yıllara dayanmaktadır [81]. Günümüzde inşaat endüstrisinin, alternatif inşa yöntemlerine yönelik artan talebi neticesinde çok çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalarda lif takviyeli çimento kompozitlerinin geliştirilmesine ve uygulanmasına yol açmıştır. Bu tür uygulamalar arasında, kazık destekli veya zemin destekli taban plakaları, kaldırımlar ve tünel kaplamalarının tasarımı ve yapımı yer alır. Bu durum, lif takviyeli çimento kompozitlerinin yapısal modellemelerinde son yıllarda önemli gelişmelere yol açmıştır [82].

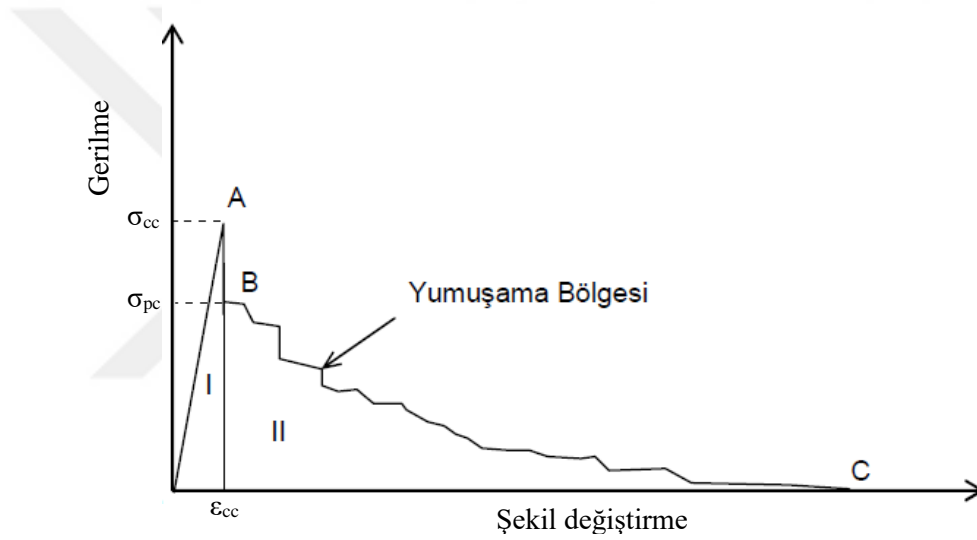
Yapısal olarak kullanılan beton, diğer malzemelerle kıyaslandığında en düşük maliyet/dayanım değerine sahip olduğu için en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Geleneksel beton, kırılmaya başladığında yük taşıma kapasitesinin tamamını kaybederek yarı gevrek bir davranış sergilemektedir. Betonun zayıf olan bazı yapısal özelliklerini iyileştirmek amacıyla, beton karışımlarına doğrudan olarak çelik ve karbon lifler eklenmektedir [84]. Beton içerisinde farklı yönelimlerde dağılım gösteren çelik lifler, betonun çatlak oluşumunu azaltması, şekil değiştirme kapasitesini ve tokluğunu arttırması, dinamik etkilere karşı dayanımını arttırması, büyük enerji yutma kapasitesi sunması gibi avantajlar sağlayarak yüksek dayanımlı betonlar elde etmede önemli bir role sahiptir [85].

2.5.1 Lif takviyeli beton türleri

2.5.1.1 Tek tip lif takviyeli beton

Geleneksel lif takviyeli betonlar, süreksiz çelik liflerin, gelişi güzel olarak betona eklenmesiyle oluşturulur. İşlenebilirlik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği için, liflerin boyutları, geometrileri, kullanılan hacim oranları sınırlandırılmaktadır. Betona katılan liflerin asıl görevi, matrisle oluşturduğu bağ kuvvetleri sayesinde, betonda oluşan çatlakları köprüleyerek çatlağın ilerlemesinin önüne geçerek betona süneklik kazandırmaktır. Bununla birlikte, betonda oluşan göçme olayı çok ölçekli ve birkaç

fazlı bir olaydır. Yüke maruz betonda önce mikro çatlaklar oluşmakta, mikro çatlakların gelişmesiyle mezo çatlaklar, mezo çatlakların ilerlemesiyle ise makro çatlaklar oluşmaktadır. Betonda göçme olayının birden fazla aşamada ve ölçekte meydana gelmesi, kullanılan lif tipinin, boyut ve geometrisine bağlı olarak etki alanının sınırlı bir seviyede kalmasına neden olur [86]. Geleneksel lif takviyeli betonların tipik gerilme – şekil değiştirme davranışları Şekil 2.11’de verilmiştir. Buna göre, gerilme – şekil değiştirme davranışı iki bölümden oluşur. Birinci bölge (A bölgesi), ilk çatlak gerilmesine kadar olan lineer elastik bölgedir. İkinci bölge (B bölgesi), maksimum gerilmeden sonra oluşan şekil değiştirme yumuşamasının görüldüğü alandır.



Şekil 2.11 Tek tip lif takviyeli betonların tipik gerilme – şekil değiştirme eğrisi [87].

2.5.1.2 Karma lif takviyeli beton

Geleneksel beton matrisi ile birden fazla süreksiz lif tipinin birleştiği çimento esaslı kompozit türüne karma lif takviyeli beton denilmektedir [88]. Sertleşmiş betonda çimento, agrega, boşluklar ve farklı boyutlardaki çatlaklar tek tip lif kullanımının iyileştirme etkisini sınırlandırmaktadır. Farklı boyut, geometri ve farklı tipteki lifler, mikro, mezo ve makro çatlaklara karşı direnç oluşturarak betonun mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde önemli etkiye sahip olmaktadır [89].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, karma lif takviyeli ve lifsiz karışımların işlenebilirlik ve mekanik özellikleri üzerinde, çimentoya ikame edilen farklı tip mineral katkıların tekli, ikili ve üçlü kombinasyonlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kireç taşı tozu gibi mineral katkıların kullanıldığı ve çimentoyla birlikte ikili, üçlü ve dörtlü bağlayıcı içeren karışımlar oluşturulmuştur. Mineral katkı kombinasyonunun etkilerini görebilmek için su/bağlayıcı oranı, toplam bağlayıcı miktarı, agrega karışım oranları, toplam lif içeriği ve kimyasal katkı miktarı sabit tutulmuştur. Bu amaçla, işlenebilirlik ve sertleşmiş beton testleri yapılmıştır. İşlenebilirlik testleri olarak; Çökme-yayılma, T₅₀₀, J-halkası, V-hunisi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi için ise basınç, yarmada çekme ve dört noktalı eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır.

3.1 Malzemeler

3.1.1. Bağlayıcılar

3.1.1.1 Çimento

Tüm karışımlarda, Elazığ SEZA Çimento firmasına ait, TS-EN 197-1:2012 standartına uygun CEM I 42.5 R tip çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel özellikler ve kimyasal bileşim Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Kimyasal Özellikler	
SiO ₂	% 19.41
Al ₂ O ₃	% 5.58
Fe ₂ O ₃	% 3.67
CaO	% 58.85
MgO	% 2.12
SO ₃	% 3.16
Na ₂ O	% 0.61
K ₂ O	% 0.69
Kızdırma kaybı	% 6.07
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	% 28.66
Fiziksel Özellikler	
Özgül Yüzey (Blaine)	4252 cm ² /g
Özgül Ağırlık	3.17 g/cm ³

3.1.1.2 Uçucu kül

İsken - Sugözü Termik Santrali'ne ait F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait özellikler Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 Uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Kimyasal Özellikler	
SiO ₂	% 63.09
Al ₂ O ₃	% 21.63
Fe ₂ O ₃	% 6.77
CaO	% 1.07
MgO	-
SO ₃	% 0.10
Na ₂ O	% 2.79
K ₂ O	-
Kızdırma kaybı	% 2.68
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	% 91.44
28 günlük puzolanik aktivite	% 81
Fiziksel Özellikler	
Özgül Yüzey (Blaine)	2900 cm ² /g
Özgül Ağırlık	2.35 g/cm ³
45 µm elek bakiyesi	% 19

3.1.1.3. Yüksek fırın cürufu

Karabük'te bulunan Karçimsa fabrikasına ait öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufuna ait özellikler Çizelge 3.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler

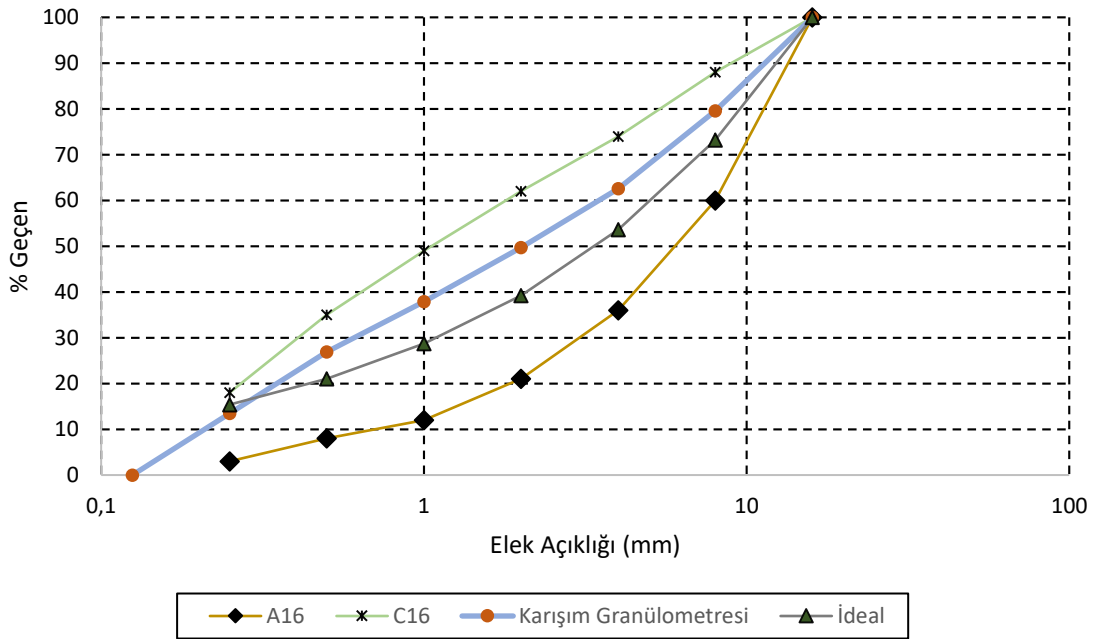
Kimyasal Özellikler	
SiO ₂	% 32.37
Al ₂ O ₃	% 10.00
Fe ₂ O ₃	% 1.33
CaO	% 32.94
MgO	% 9.77
SO ₃	% 0.7
Na ₂ O	% 0.42
K ₂ O	% 0.83
Kızdırma kaybı	% 0
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	% 43.7
28 günlük puzolanik aktivite	% 72.9
Fiziksel Özellikler	
Özgül Yüzey (Blaine)	4085 cm ² /g
Özgül Ağırlık	2.86 g/cm ³
45 µm elek bakiyesi	% 0.8
90 µm elek bakiyesi	% 72.9

3.1.1.4. Kireçtaşı tozu

Çimentoyla ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılan kireçtaşı tozu, Malatya'da faaliyet gösteren Çınarlar A.Ş.'den temin edilmiş olup, %98 saflıkta CaCO_3 'tür. Özgül ağırlığı 2.70 olan kireçtaşı tozu, laboratuvarında 125 μm elekten elendikten sonra kullanılmıştır.

3.1.2. Agregata

Çalışmada ince agregata olarak kalker esaslı kırma kum (0-5 mm) kullanılmıştır. Kırma kumun özgül ağırlığı 2.58 ve su emme kapasitesi % 2.26, incelik modülü 4.09'dur. 0.125 mm elekten geçen malzeme miktarı %10 olarak tespit edilmiştir. İri agregata olarak, özgül ağırlığı 2.63 ve ağırlıkça su emme kapasitesi % 0.3 olan kalker esaslı kırma taş kullanılmıştır. Karışım granülometrisi ve TS 802'de tanımlanan sınır değerleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Agregata karışımı granülometrisi ve TS 802 incelik ve kalınlık sınırları

3.1.3. Kimyasal katkı

Tüm karışımlarda TS EN 934-2 standardına uygun, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından temin edilen ViscoCrete Hi-Tech 51 modifiye polikarboksilat esaslı ve yoğunluğu 1.06 g/cm^3 olan hiper akışkanlaştırıcı tercih edilmiştir.

3.1.4. Karma suyu

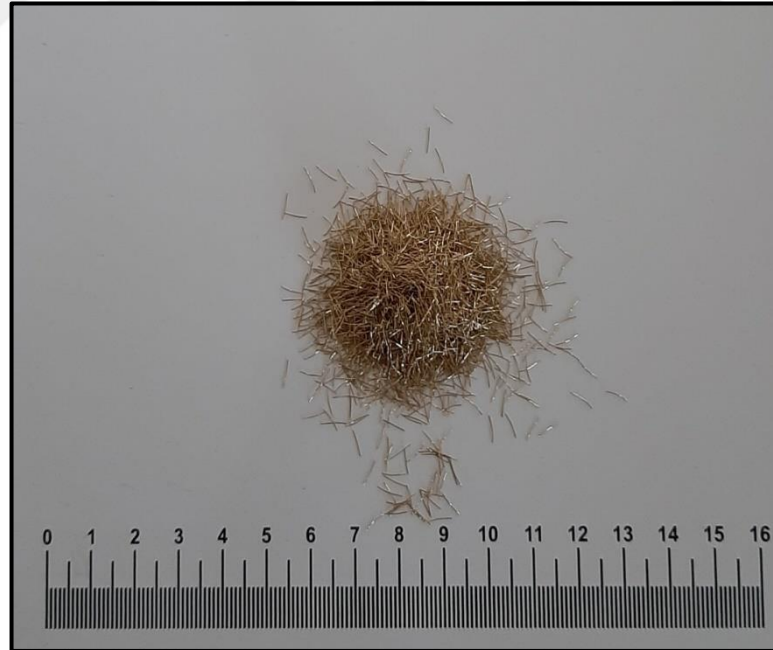
Karışımlarda Malatya şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.5. Lifler

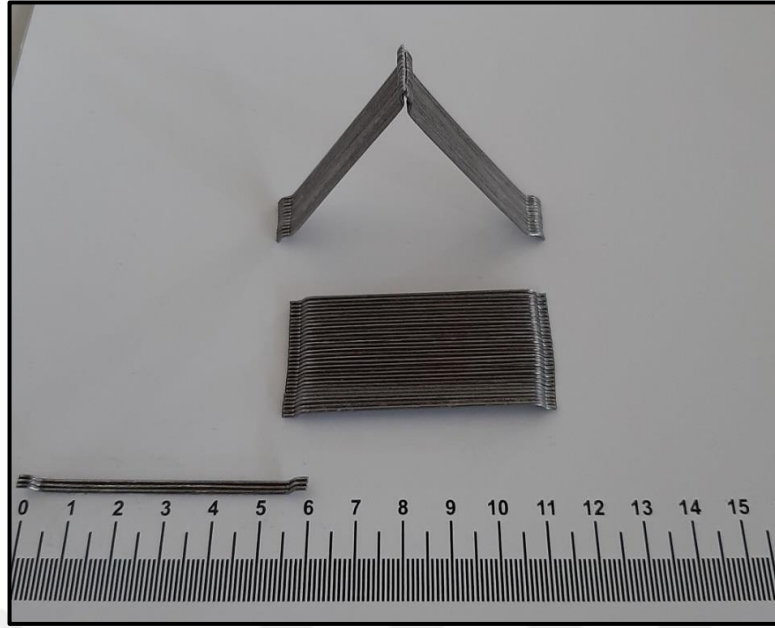
Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen, uçları kancalı, 60 mm uzunluğunda, narinliği 65 olan Dramix 3D 65/60 BG ile düz uçlu, 6 mm uzunluğunda, narinliği 40 olan OL 6/16 isimlendirmeli iki tip çelik lif kullanılmıştır. Sentetik lif olarak ise polipropilen lif kullanılmıştır. Liflere ait bazı özellikler Çizelge 3.4'de, görseller Şekil 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Çelik ve sentetik liflerin bazı özellikleri

Lif Adı	Lif türü	Uzunluk (mm)	Narinlik	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
3D 65/60BG	Çelik lif	60	65	1160	200	7.8
OL 6/16	Çelik lif	6	40	3000	200	7.2
PP	Sentetik lif	6	-	350	-	0.91



(a) OL 6/16 mikro çelik lif



(b) 3D 65/60 BG makro çelik lif



(c) Polipropilen lif

Şekil 3.2 Çalışmada kullanılan lifler

3.2. Karışım tasarımı

Literatürde mevcut olan önceki çalışmalardan faydalanılarak [91,92], karma lifli karışımlarda kullanılacak olan lif içeriği hacimce % 1 çelik lif ve % 0.25 sentetik lif olarak belirlenmiştir. Bu lif oranlarına sahip bir karışımının stabilitesini koruyarak,

yeterli işlenebilirlik, homojenlik ve mikro liflerin çatlakları daha etkili köprüleyebilmesi için gerekli olan dayanımı sağlaması göz önünde bulundurularak, yapılan deneme karışımları sonucunda, minimum çimento miktarı 550 kg/m^3 , mineral katkı miktarı 300 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Viskoziteyi artırmak ve yeterli filler malzeme sağlayabilmek için ağırlıkça ince agrega/tüm agrega oranı 0.30 olarak seçilmiştir. Tüm karışımlarda Su/Bağlayıcı oranı

3.2.1. Beton karışımları ve numune kodları

Hazırlanan tüm karışımların toplam bağlayıcı miktarı 850 kg/m^3 , su/çimento oranı 0.22, ince agrega/toplam agrega oranı 0.30 ve toplam lif içeriği % 1 çelik lif ile % 0.25 polipropilen lif olarak sabit tutulmuştur. Kontrol karışımı dışında akışkanlaştırıcı dozajı 6.5 kg/m^3 olarak tüm karışımlarda sabittir.

Agrega olarak 5-10 mm kırma taş ve 0-5 mm kırma kum sırasıyla %30 ve %70 oranlarında kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve kireçtaşı tozu mineral katkılarının kullanıldığı bu çalışmada, toplam mineral katkı miktarı sabit olup 300 kg/m^3 alınmış ve çimentoyla ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan toplam mineral katkı miktarı çimento ağırlığının %35'ine, mineral katkı içeren lif takviyeli karışımlarda akışkanlaştırıcı % 1.18 ve mineral katkı içermeyen kontrol karışımında ise akışkanlaştırıcı miktarı % 0.91 olarak kullanılmıştır. Beton karışımlara lif takviyesi olarak ise 6 mm boyunda, 3000 MPa çekme dayanımına sahip mikro lif, 60 mm uzunluğunda 1345 MPa çekme dayanımına sahip makro lif ve çekme dayanımı 350 MPa olan sentetik lif kullanılmıştır. Tüm lifli karışımlar, 60 kg/m^3 makro, 20 kg/m^3 mikro, 2.36 kg/m^3 polipropilen lif içermektedir. Lif içeriği ve oranları tüm lifli karışımlarda sabit tutulmuştur. Hacimsel olarak %1 çelik lifin % 0.77'si makro çelik ve % 0.23 mikro çelik liften oluşurken, sentetik lif olarak ise % 0.25 polipropilen lif kullanılmıştır. Tekli, ikili ve üçlü mineral katkı içeriğine sahip 4 adet lifsiz, 4 adet karma lifli ve bir adet de, bağlayıcı olarak sadece çimentodan oluşan kontrol karışımı olmak üzere toplam 9 karışım hazırlanmıştır. Karışım isimlendirmesinde U, Y, KT gibi kodlamalar sırasıyla; uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kireçtaşı tozunu, yanındaki değerler ise 1 m^3 'te kullanılan mineral katkı ağırlıklarını belirtmektedir. KL kodlaması ise karma lifi temsil etmektedir.

Çizelge 3.5. Karışım oranları

Karışım No	Karışım Kodu	Bağlayıcılar (kg/m ³)				Agrega (kg/m ³)		SA (kg/m ³)	S/B*	Su (kg/m ³)	Lif (kg/m ³)	
		Çiment o	Uçucu Kül	Yüksek Fırın Cürufu	Kireçtaşı Tozu	(0-5)mm	(5-10)mm				Makro Lif	OL6/.16
1	Kontrol	850	-	-	-	926	397	7.75	0.22	190	-	-
2	U300	550	300	-	-	876	375	6.5	0.22	190	-	-
3	Y300	550	-	300	-	910	390	6.5	0.22	190	-	-
4	U150Y150	550	150	150	-	893	382	6.5	0.22	190	-	-
5	U125Y125KT50	550	125	125	50	894	383	6.5	0.22	190	-	-
6	U300-KL	550	300	-	-	853	365	6.5	0.22	190	60	20
7	Y300-KL	550	-	300	-	886	380	6.5	0.22	190	60	20
8	U150Y150-KL	550	150	150	-	870	372	6.5	0.22	190	60	20
9	U125Y125KT50-KL	550	125	125	50	871	373	6.5	0.22	190	60	20

*Su/Bağlayıcı oranı

3.2.2. Taze karışımların hazırlanması

Karıştırma işinde, 100 lt hazneye sahip pan tipi mikser kullanılmıştır. Miksere ait görüntü Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Yapılan deneme karışımları esnasında farklı karıştırma metodları uygulanmıştır. Su emme oranı yüksek olan polipropilen lif ve fırın kuru su durumundaki agregalar karışıma başlangıçta eklendikten sonra karma suyunun 2/3'si ile karıştırılarak absorbe edilecek akışkanlaştırıcıyı elimine etmek hedeflenmiştir. Sırasıyla şu yol izlemiştir:

- İlk olarak agrega ile varsa lifler 15 sn kuru olarak karıştırıldı.
- Ardından karışım suyunun 2/3'si eklenerek karıştırmaya 3 dk boyunca devam edildi.
- Daha sonra çimento ve mineral katkıları eklenerek 2 dk daha karıştırma işlemi devam etti.
- Son olarak, geriye kalan karışım suyu ve akışkanlaştırıcı birlikte eklenerek 8.5 dk daha karıştırılarak karıştırma işlemi tamamlandı.

Özellikle S/Ç oranı düşük ve yüksek katkı dozajına sahip olan karışımlarda, akışkanlaştırıcı katkının tam verimle çalışabilmesi için karıştırma süresinin yeterli olması gereklidir [45].



Şekil 3.3. Karışımlarda kullanılan pan tipi mikser

Lifli karışımların homojen olarak karışması ve akışkanlaştırıcının etkisini daha iyi göstermesi için toplam karıştırma süresi yaklaşık 14 dakika olmuştur. Karıştırma metodu Şekil 3.4'te şematize edilmiştir.

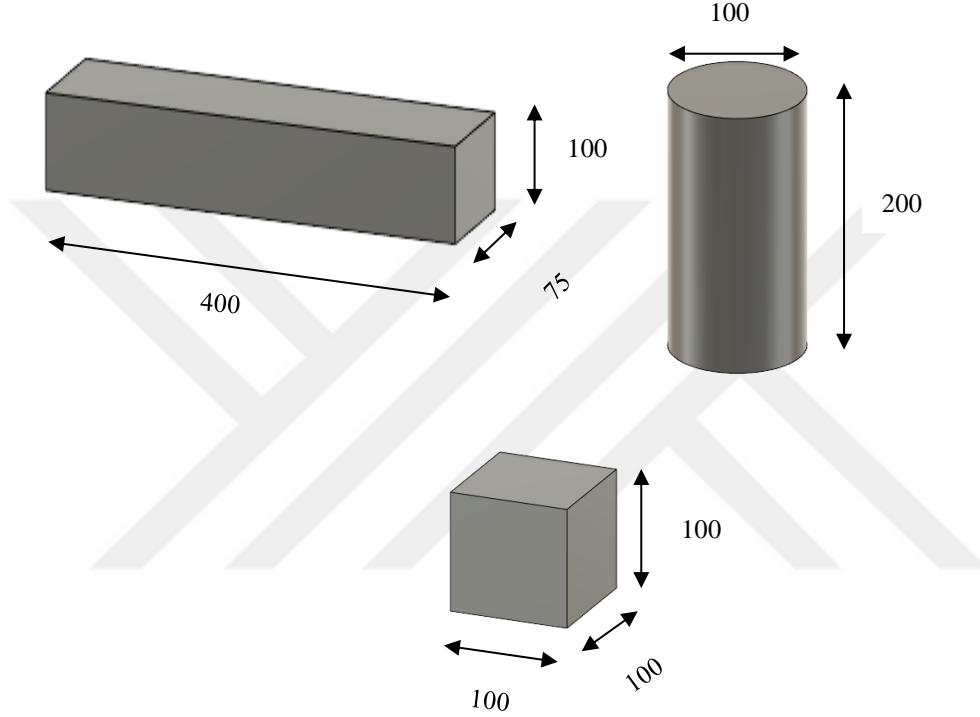


Şekil 3.4. Beton karıştırma sürecinin şematik gösterimi

3.2.3. Numune boyutları ve şekilleri

Basınç dayanımı için her bir seride 3 adet 100x100x100 mm küp numune TS EN 12390-1'e uygun olarak üretilmiştir. Yarmada çekme dayanımı için Ø100/200 mm silindir numuneler TS EN 12350-1'e uygun olarak üretilmiştir. Dört noktalı eğilme dayanımı için her bir seride 2 adet 100x75x400 prizmatik numune üretilmiştir.

Üretilen numunelere ait şekil ve boyutlar Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Numune şekilleri ve boyutları

3.3. Numune kürü

Karışımlara ait tüm numuneler TS EN 12390-2 standartına uygun olarak kür edilmiştir. Dökümden sonra kalıplara yerleştirilen numunelerin üzeri nem kaybını önlemek için streç film ile kapatılmıştır. Kalıplara yerleştirildikten 24 saat sonra numuneler kalıptan çıkarılmış ve $23 \pm ^\circ\text{C}$ sıcaklığında kür havuzuna koyularak test gününe kadar bekletilmişlerdir.

3.4. Taze beton deneyleri

3.4.1. Çökme-yayılma ve T_{500} deneyi

Taze betonun doldurma kabiliyeti, stabilitesinin belirlendiği çökme-yayılma ve plastik viskozitesini gösteren T_{500} testleri, EFNARC Komitesi'nin önerilerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde 1000 x 1000 mm boyutunda çelik malzemedan imal edilmiş taban plakası ve üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm, yüksekliği 300 mm olan kesik koni kullanılmıştır (Şekil 3.6). Lifli karışımlarda, karışımı temsil eden en uygun numune ile deneyi gerçekleştirebilmek için her bir karışımdan, deney için gerekli olan yaklaşık 6 dm³ beton alınmıştır. Çökme-yayılma testinde, deney aletleri hafif nemli bir bezle silindikten sonra, karışımı temsil edecek numune çökme konisine dolduruldu. Koni doldurulduktan sonra, 30 sn. içerisinde dikey olarak kaldırıldı ve en büyük yayılma çapı ve ona dik doğrultudaki çap ölçülüp aritmetik ortalaması alındı (D_c). Çökme konisinin kaldırıldığı an ile betonun 500 mm yayılma çapına ulaştığı an arasında geçen T_{500} süresi olarak kaydedildi.

3.4.2. J-halkası deneyi

Betonun donatılar arasından geçiş kabiliyetinin belirlenmesi amacıyla J-halkası deneyi EFNARC standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. J-halkası deneyini gerçekleştirmek için 1000x1000 mm boyutunda çelik malzemedan imal edilmiş taban plakası, üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm, yüksekliği 300 mm olan kesik koni ve üst çapı 300 mm olan ve düşeyde 105 mm aralıkla yerleştirilmiş toplam 8 adet $\phi 12$ çubuklardan oluşan j-halkası aparatı kullanılmıştır. Bu aparatın dikey barları arasındaki mesafe, EFNARC kılavuzunda belirtilen, 3x maksimum agrega tane boyutu ölçüsüne uygun olacak şekilde tavsiye edilmektedir. J-halkası yayılma çapını (D_j) belirlemek için en büyük yayılma çapı ve ona dik doğrultudaki çapın aritmetik ortalaması alınmıştır. Halkanın merkezindeki ile halkanın hemen dışındaki 4 nokta arasındaki yükseklik farklarının ortalaması alınarak J-halkası geçiş yeterliliği (ΔH) ölçülmüştür. Koninin kaldırıldığı an ile betonun 500 mm yayılma çapına ulaştığı an arasında geçen süre tutularak T_{500J} bulunmuştur. Deney aletleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 J-halkası deney aparatı

3.4.3. V-hunisi deneyi

Betonun dolum kabiliyetini ve viskozitesini ölçmek için V-hunisi deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde EFNARC(2005) kılavuzundaki yönergeler uygulanmıştır. V hunisine beton herhangi vibrasyon ve sıkıştırma işlemi uygulanmadan doldurulmuştur. Daha sonra 10 sn beklenildikten sonra huninin altındaki kapak hızlı bir şekilde açılmıştır. Kapağın açıldığı an ile, üstten bakılmak suretiyle alt kapaktan ışığın görüldüğü ilk an arasında geçen süre 0.1 sn hassasiyetle ölçülmüştür. Deney aparatları Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

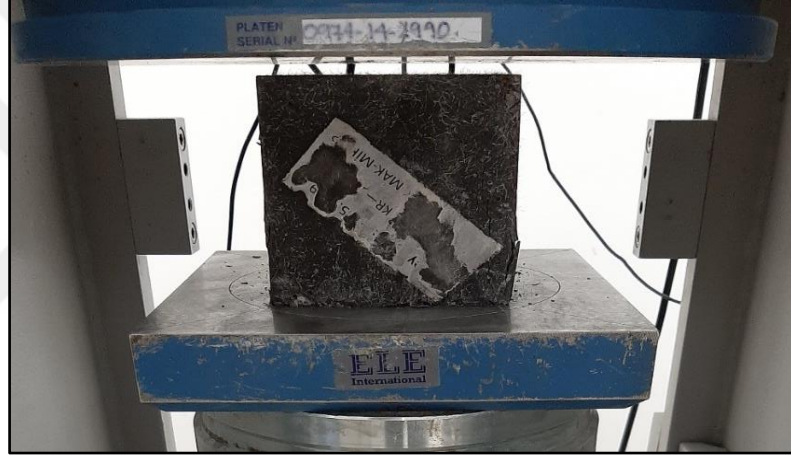


Şekil 3.7 Deneylerde kullanılan V-hunisi deney aleti

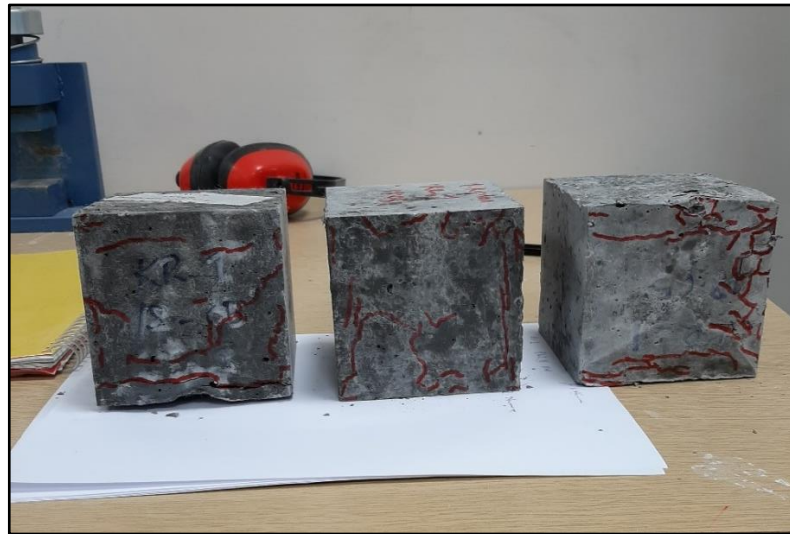
3.5. Sertleşmiş beton deneyleri

3.5.1. Basınç dayanımı

Her bir karışımın 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımını belirlemek amacıyla her seride 100x100x100 mm ölçülerinde 3 adet numune dökülmüştür. Deney, 3000 kN kapasiteli, yük kontrollü pres makinasında, TS EN 12390 – 3 standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyin yapıldığı cihaz Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Basınç testi, eksenel olarak uygulanan 0.6 MPa/s sabit yükleme hızında yapılmıştır. Numunenin maruz kaldığı maksimum yükün, numune kesit alanına bölünmesiyle basınç dayanımı değerleri hesaplanmıştır. U150Y150-KL karışımının 7 günlük basınç dayanımı testine ait, kırılmadan önce ve sonraki görseller Şekil 3.8-9’da verilmiştir.



Şekil 3.8 Basınç dayanımı deneyinde numunenin cihaza yerleştirilmesi



Şekil 3.9 Karma lif içeren karışıma ait basınç dayanımı testi sonrası numuneler

3.5.2. Yarmada çekme dayanımı

Üretilen karışımlara ait 7, 28 ve 90 günlük çekme dayanımını belirlemek için TS EN 12390 – 6 standartına uygun yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Her bir yaş grubu için 2 adet 100 x 200 mm silindirik numune dökülmüştür. Deney uygulanırken, Şekil 3.10’da görüldüğü gibi silindir numuneler merkezlenerek, yükün uygulanacağı alt ve üst yüzeyler işaretlenip, numune üzerinde yükün üniform dağılması için sert mukavva sıkıştırma şeritleri yerleştirilmiştir. Deney numunelerine pres makinasında 1.6 kN/s hızında yük uygulanmış ve elde edilen deney sonuçlarından Denklem 3.1 kullanılarak yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir.

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times d} \quad (3.1)$$

f_{ct} = Yarmada çekme dayanımı, MPa (N/mm²),

F = En büyük yük, N,

l = Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, mm,

d = Numunenin seçilen en kesit boyutu, mm



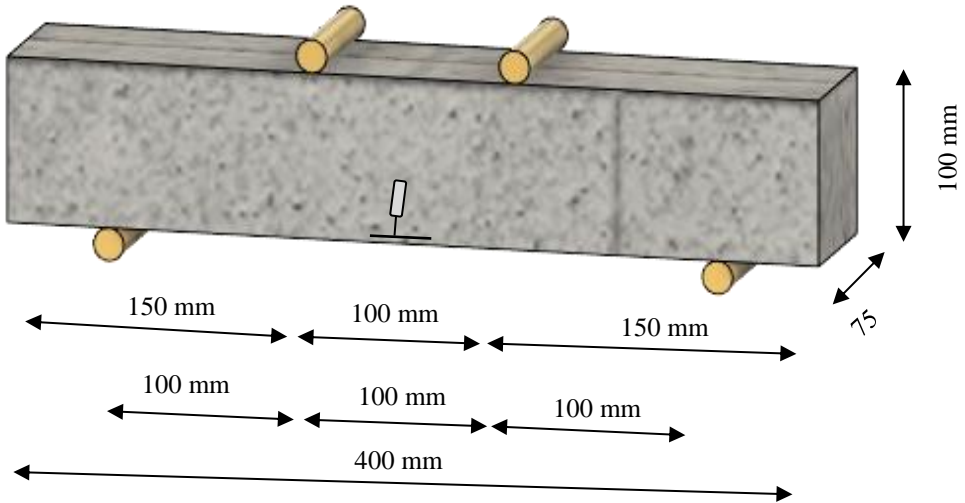
Şekil 3.10 Yarmada çekme deneyi

3.5.3. Dört noktalı eğilme testi

Tüm karışımlara ait 7, 28 ve 90 günlük her bir seri için 2 adet 100x75x400 prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere, sehim kontrollü, dört noktalı eğilme testi ASTM C1609'a göre Şekil 3.11'deki gibi uygulanmıştır. Numune açıklık ortasına dikey olarak yerleştirilen 2 adet karşılıklı deplasman ölçer (LVDT) ile deney boyunca ortalama sehim hesaplanmıştır. Açıklık uzunluğu 300 mm, mesnetler arası mesafe 100 mm olacak şekilde hazırlanan deney düzeneği Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Dört noktalı eğilme deneyinde, numunelere ait Yük – Sehim grafiği, açıklık ortası net deplasman, maksimum yük, maksimum eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.11 Dört noktalı eğilme testi düzeneği



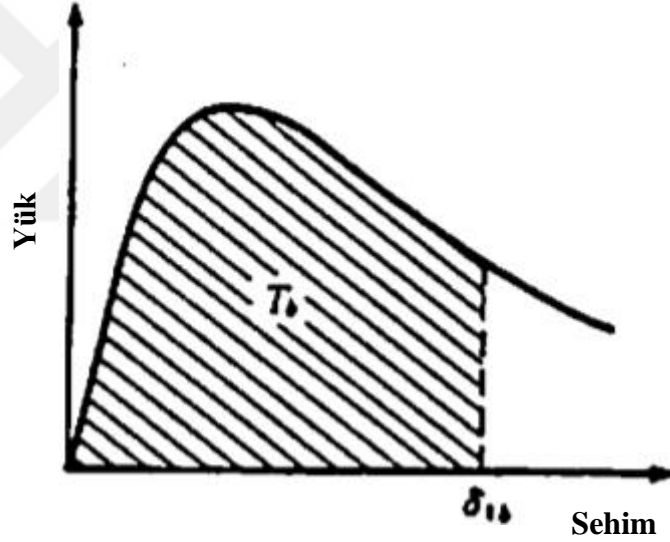
Şekil 3.12 Dört noktalı eğilme testi uygulanan numunelerin boyutları

Karma lif içeriğine sahip numunelerin eğilme toklukları, JSCE SF-4 standartına göre belirlenmiştir. Bu yöntemde yük-sehim eğrisi üzerinde L/150'lik sehime kadar olan eğri altındaki alan hesaplanarak eğilme tokluğu değerine ulaşılır. ASTM-C1018 metodundan farklı olarak, ilk çatlağın tespit edilmesi bu yöntemde önem taşımadığı için uygulanması daha pratiktir.

JSCE-SF4 yöntemine göre eğilme tokluğunun belirlenmesi, denklem 3.2'de verilmiştir.

$$FT = \frac{A_{(L/150)} \cdot L}{(L/150) \cdot bh^2} \quad (3.2)$$

Bu denklemde FT eğilme tokluğu faktörünü, $A_{(L/150)}$ yük – sehim eğrisi altında kalan alanı, L alt mesnetler arası mesafeyi (mm), b numune genişliğini (mm), h ise numune kalınlığını (mm) temsil etmektedir.



Şekil 3.13 JSCE- SF4 yöntemine göre eğilme tokluğu gösterimi

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde, lif takviyeli KYB işlenebilirliği ve reolojisini belirlemek amacıyla yapılan Çökme-yayılma, J-halkası, V-hunisi gibi taze beton özellikleri ve sertleşmiş beton özellikleri olarak ise basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, dört noktalı eğilme dayanımı, küp numunelerin 90 günlük UPV sonuçları verilmiştir.

4.1 Taze Beton Özellikleri

Hazırlanan tüm karışımlara ait Çökme-yayılma, J-halkası ve V-hunisi deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

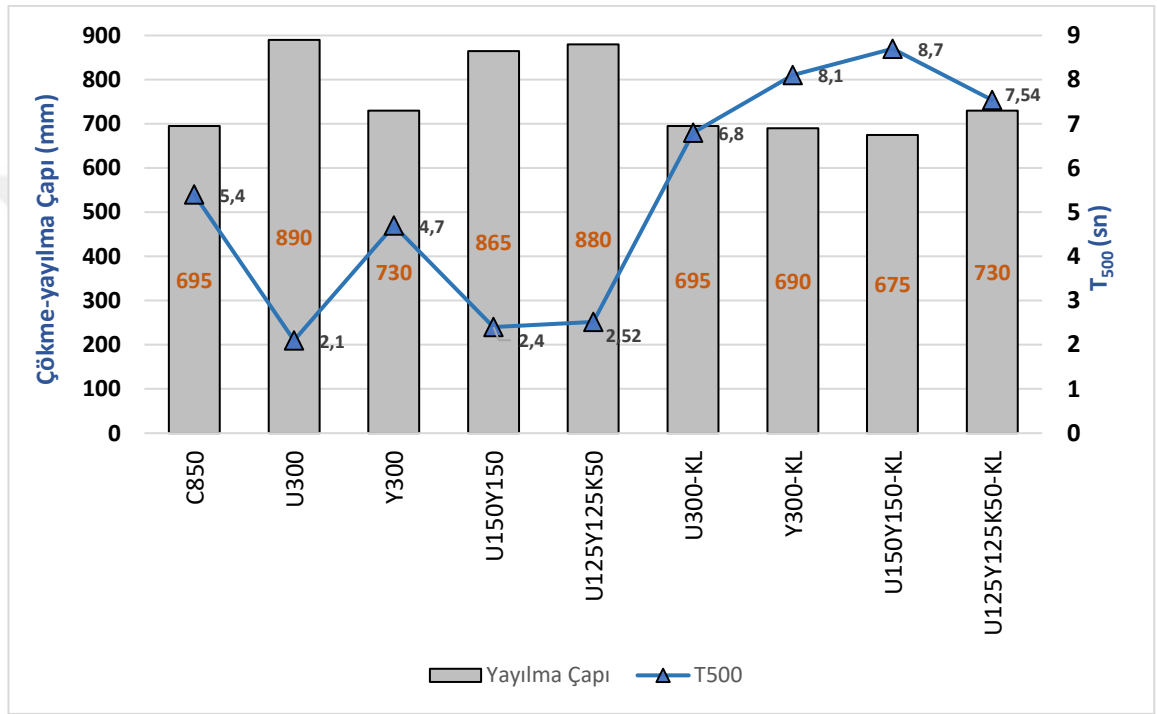
Çizelge 4.1. Karışımlara ait işlenebilirlik test bulguları

Karışım No	Karışım Kodu	Çökme-Yayılma		J-Halkalı Çökme-Yayılma			V _f (sn)
		D _ç (mm)	T ₅₀₀ (sn)	D _J (mm)	T _{500J} (sn)	ΔH (mm)	
1	C850	695	5.4	620	6.7	7	8.5
2	U300	890	2.1	880	2.5	3.25	3.8
3	Y300	730	4.7	710	10	9.7	6.6
4	U150Y150	865	2.4	860	2.5	8.25	5
5	U125Y125K50	880	2.5	740	5.4	4.25	7.2
6	U300-KL	695	6.8	655	8.5	22.75	10.5
7	Y300-KL	690	8.1	622	10.3	45.25	31.1
8	U150Y150-KL	675	8.7	640	12.2	20.75	31.3
9	U125Y125K50-KL	730	7.5	640	9.7	18.5	12.3

4.1.1 Çökme-yayılma çapı (D_f) ve 500 mm yayılma çapı süresi (T₅₀₀)

Betonun doldurma kabiliyeti, plastik viskozitesi ve stabilitesinin değerlendirildiği bu testte, karışımlara ait çökme-yayılma çapı (D_f) ve T₅₀₀ süresi değerleri Şekil 4.1’de sunulmuştur. Bu şekilden görüleceği üzere, en düşük yayılma çapına sahip lifli ve üçlü mineral katkı içeriğine sahip U150Y150-KL karışımı, EFNARC (2005) Komitesi’nin belirlediği 550 mm minimum yayılma çapından yaklaşık %23 daha fazla yayılmıştır. Bazı karışımlar (U300, U150Y150, U125Y125K50) 850 mm’den fazla yayılmasına karşın, Şekil 4.2’de görüldüğü gibi stabilite problemleriyle karşılaşmadığı ve aynı zamanda EFNARC (2005)’in bu durumlarda şart koştuğu maksimum agrega tane çapınının 12 mm’den küçük olması durumunu da sağladığı görülmektedir. Çünkü bu

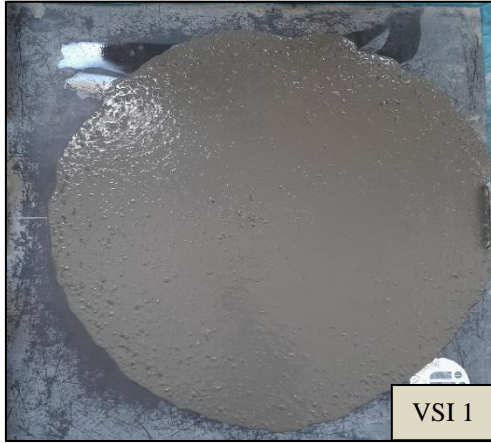
çalışmadaki tüm karışımlar için maksimum tane çapı 10 mm'dir. Buna göre, 850 mm'den fazla yayılan karışımlar uygulanabilir olarak değerlendirilebilir. Sonuçta, tüm karışımlarda bağlayıcı miktarı ve ince agrega oranı yüksek tutulduğu için T_{500} süreleri 2 saniyenin üzerinde çıkmıştır. EFNARC (2005)'in belirlediği kriterlere göre bu çalışmadaki tüm karışımlar, Bölüm 2'de tanımlandığı üzere VS2 sınıfına girmektedirler (Tablo 4.1).



Şekil 4.1 Karışımlara ait çökme-yayılma ve T_{500} değerleri

Ayrıca, Şekil 4.1'den, en yüksek yayılma çapı ve en düşük T_{500} süresi değerlerine sahip karışımın PÇ ve UK içeren U300 karışımı olduğu görülür. Bunun sebebi, uçucu külün Blaine özgül yüzey alanının PÇ ve YFC'den daha düşük olmasına ve UK partiküllerinin küresel şekillerinin sürtünmeyi azaltarak hareket kabiliyetini arttırmasına bağlanabilir [46]. YFC'nin en yüksek özgül yüzey alanına sahip malzeme olması ve tane boyutu dağılımının diğer bağlayıcılardan daha küçük olması su talebini arttırır, dolayısıyla karışımın serbest su miktarı azalacağı için viskozitesi daha yüksek bir karışım elde edilmiştir [47]. Bu sebeple, yine Şekil 4.1'den de görüleceği üzere, YFC ve PC'den oluşan Y300 karışımı, mineral katkı içeren diğer lifsiz karışımlara göre daha yüksek T_{500} süresine ve daha düşük yayılma çapına

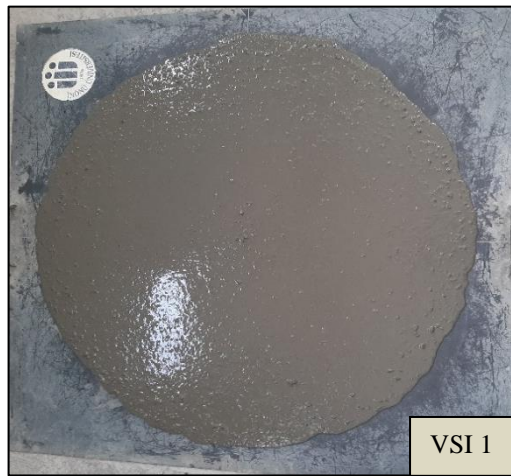
sahiptir. PÇ, UK ve YFC'den oluşan üçlü U150Y150 karışımı ise ikili U300 ve Y300 karışımlarının sahip olduğu çökme-yayılma, T_{500} değerlerinin arasında değerler almıştır. PÇ, UK, YFC ve KTT kullanılan dördü U125Y125K50 karışımının yayılma çapı, üçlü U150Y150 karışımına göre bir miktar artmıştır. T_{500} süresinde kayda değer değişiklik yoktur. Bu sonuca göre, UK ve YFC varlığında karışıma KTT eklenmesinin işlenebilirlik özelliklerini kısmen geliştirdiği söylenebilir. Sonuç olarak, lifsiz karışımlara ait çökme-yayılma değerlerine bakıldığında, mineral katkı ilaveli karışımlar, kontrol karışımına kıyasla daha yüksek yayılma çapı değerlerine sahip olmasına rağmen daha az akışkanlaştırıcıya ihtiyaç duymuştur. Yapılan bazı çalışmalarda[48], [49], [50] da UK, YFC, KTT kullanımı, bağlayıcı olarak yalnız çimento içeren karışıma göre aynı çökme-yayılma değerinde akışkanlaştırıcı ihtiyacını azaltmıştır.



(a) U125Y125K50

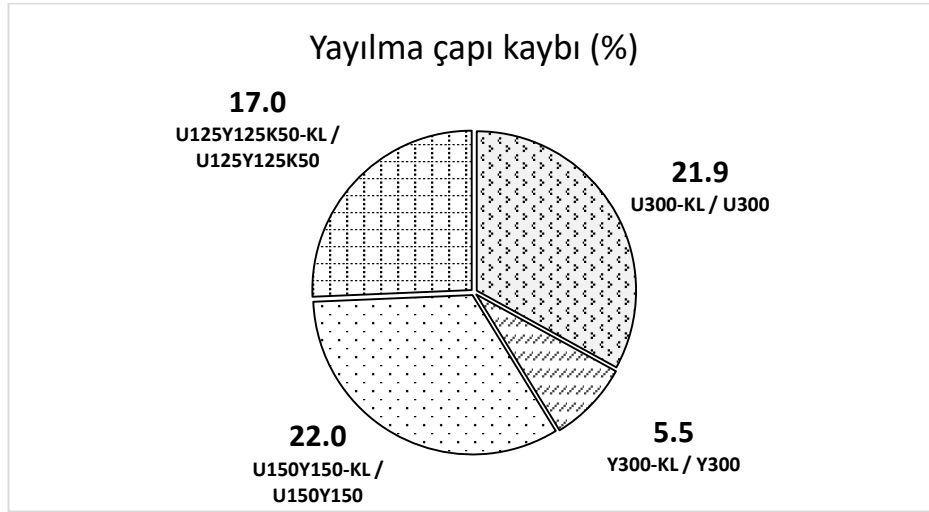


(b) U150Y150



(c) U300

Şekil 4.2 850 mm'den fazla yayılan karışımların VSI değerlendirilmesi



Şekil 4.3 Lifsiz karışımlara kıyasla mineral katkı türüne ve içeriğine göre lifli karışımların yayılma çapı kaybı oranları

Şekil 4.3’de ise, aynı mineral katkı türüne ve içeriğine sahip lifli karışımların, lifsiz karışımlara kıyasla çökme-yayılma çapı kaybı yüzde değerleri verilmiştir. Karma lifli karışımlar, lifsizlere oranla, mineral katkı türüne göre %5.5 ile %22 arasında yayılma çapı kaybına uğramışlardır. Yayılma çapı kayıplarıyla lifli karışımların homojenliği arasında bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Şöyle ki, Şekil 4.4’de görüldüğü gibi, en düşük yayılma çapı kaybına uğrayan Y300-KL karışımı ortada lifler ve kaba partiküllerin biriktiği en fazla ayrılmaya uğrayan karışımdır. Çünkü lifli karışımlarda beton ya da çimento hamuru fazında, etkili olan hidrodinamik, Van Der Waals, elektrostatik gibi moleküller arası çekim kuvvetleri, moleküllerin şekli, büyüklüğü, ve partikül tane dağılımı gibi fiziksel ve kimyasal etkileşimler vasıtasıyla hamur ile lif arasında koheziflik sağlanmaktadır. Fakat bu durumun aksi söz konusu olan karışımlar süspansiyon özelliğini kaybederek liflerin ayrışmasıyla birlikte, karışımın sadece hamur kısmı yayılmaktadır. Dolayısıyla hamur, lifler ile bir bütün halinde hareket edemeyerek, yanılıcı bir şekilde aynı mineral katkı içeriğine sahip lifsiz karışımıyla arasındaki yayılma kaybı daha düşük olmaktadır.



Lifsiz Kontrol C850 karışımı



Karma Lifli



U300 Karışımı

Lifsiz



Karma Lifli



Y300 Karışımı

Lifsiz

Şekil 4.4 Kontrol ve ikili mineral katkı içeren lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait çökme-yayıma görselleri



Karma Lifli



U150Y150 Karışımı

Lifsiz



Karma Lifli

U125Y125K50 Karışımı

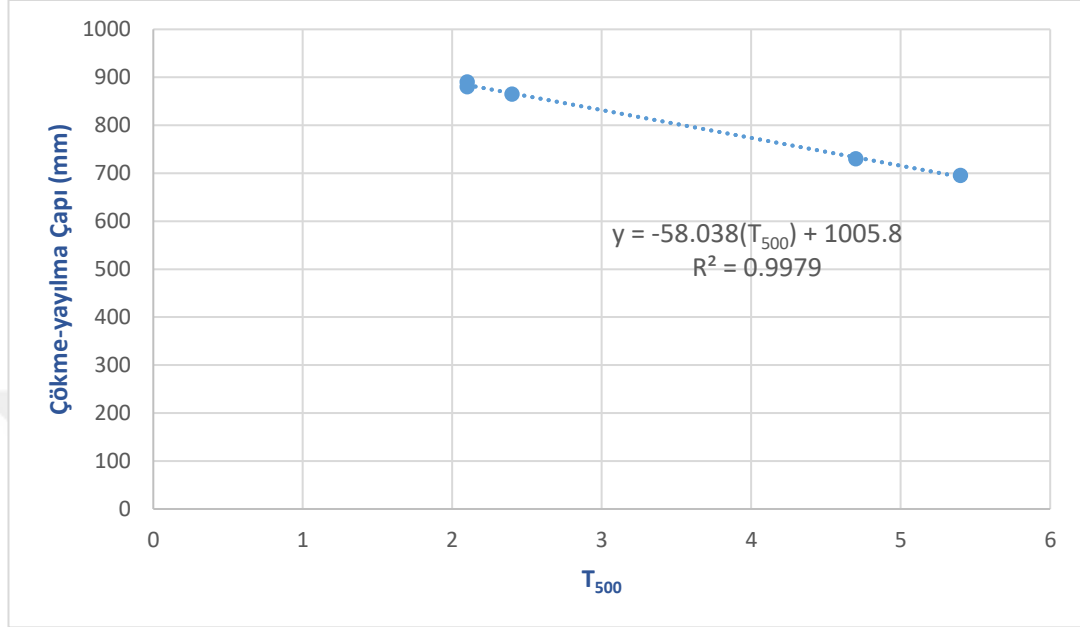
Lifsiz



Şekil 4.5 Üçlü ve dördlü mineral katkı içeren lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait çökme-yayılma görselleri

Şekil 4.5’de ise üçlü ve dördlü mineral katkı içeriğine sahip lifli ve lifsiz karışımların görsellerinden, lifli karışımların çökme-yayılma çaplarındaki kayıp lifsiz karışımlara kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum üçlü ve dördlü mineral katkı içeriğine sahip lifli karışımların daha yoğun paketlenme kapasitesine, daha kohezif ve daha homojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bunun yanında, lifli karışımlarda en iyi yayılma çapına U125Y125K50 karışımı sahip olmuştur. Lifsiz karışımlarda olduğu gibi karma lif takviyeli karışımlara da KTT eklenmesi, üçlü bağlayıcılı karışımlara kıyasla yayılma çapını bir miktar arttırmıştır.

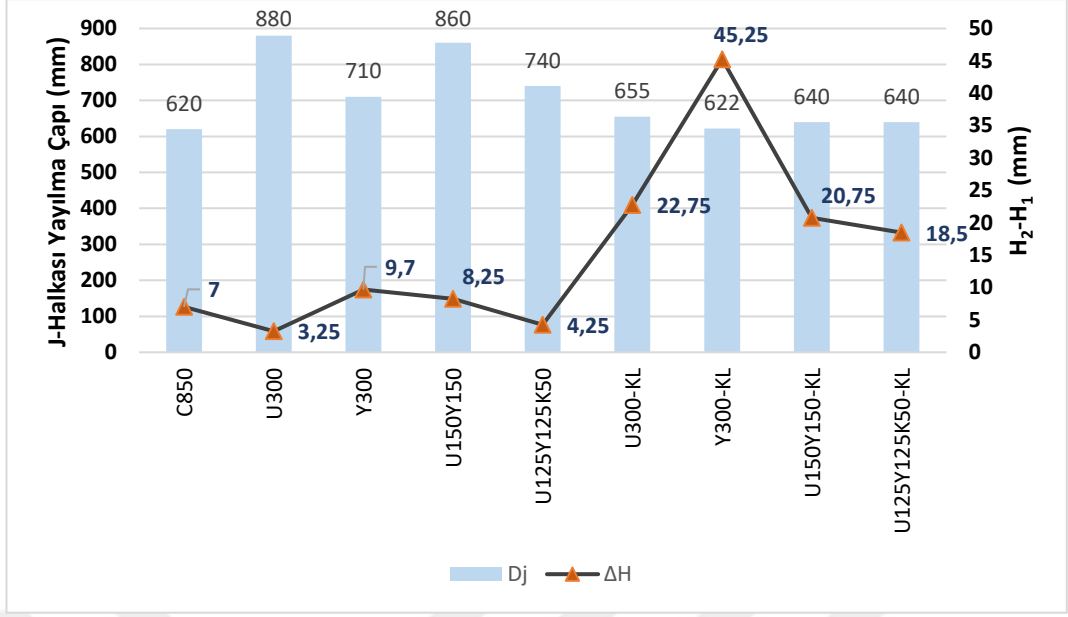
Lifsiz karışımlara ait çökme-yayılma çapı ile T_{500} değeri arasındaki ilişki incelenecek olursa, $R^2 = 0.9979$ gibi yüksek tahmin edilebilirliğe sahip negatif bir korelasyon olduğu görülmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.6 Lifsiz karışımların çökme-yayılma çapı ve T_{500} değeri arasındaki regresyon analizi

4.1.2 J-halkası deneyi

Betonun donatılar arasından geçiş kabiliyetini ve akış özelliklerini değerlendirmek için j-halkası deneyi yapılmıştır. Bu testte, 300 mm çapında ve 8 adet Ø12 dikey transmisyona sahip j-halkası aparatı kullanılmıştır. J- halkası aparatı başlangıçta 16 adet Ø18 transmisyona sahip şekilde kullanılmıştır fakat 60 mm uzunluğunda makro liflere sahip karışımların bu şekilde test edilmesi mümkün olmadığından dolayı deney aleti Şekil 3.4’de verilen hale dönüştürülmüştür. Bu deneyde, KYB karışımlarında farklı tip ve kombinasyonda mineral katkı ve karma lif kullanımının karışımların geçiş özelliklerini nasıl etkilediği ve karma lif kullanımının nasıl sonuçlar verdiği üzerinde durulmuştur. Deneye ait J-halkası geçiş yeterliliği (ΔH) ve J-halkası yayılma çapına (D_j) ait değerler Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 J-halkası yayılma çapı ve geçiş yeterliliği (H_2-H_1) değerlerinin grafiksel gösterimi

Lifsiz karışımlara ait J-halkası yayılma çapı sonuçları incelenirse, tüm karışımlar EFNARC (2002) tarafından belirtilen maksimum H_2-H_1 yüksekliği olan 10 mm'nin altında kalmıştır ve akıcı bir şekilde yayılmışlardır. Toplam %1 karma çelik ve %0,25 PP olmak üzere, hacimce yüksek oranda sayılabilecek üçlü karma lif kullanımına sahip olan karışımlar, doğal olarak EFNARC'ın 10 mm'lik sınırını karşılayamamıştır. Bununla birlikte, EFNARC (2002)'ın lif takviyesiz KYB'ler için oluşturulduğu unutulmamalıdır. Tüm lifsiz karışımlara ait j-halkası deney sonuçları, standartları karşılayan, arzu edilebilecek bir seviyedeydi fakat KYB'nin taze hal özelliklerini etkileyen bir çok faktör (karışım bileşenleri) olduğundan dolayı lif ilavesi işlenebilirliği etkileyen reolojik dinamikleri (plastik viskozite, koheziflik, akma gerilmesi vb.) değiştirmiştir.

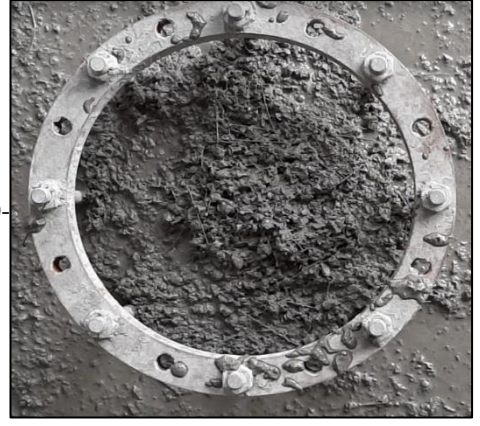
Y300 karışımı diğer karışımlara kıyasla, hem karma lifli hem de lifsiz karışımlar arasında en yüksek ΔH değerine sahiptir. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere j-halkasının engellerinin iç tarafında iri malzeme yüksek oranda blokajlanmıştır. Buna göre, bu karışımın en başarısız geçiş kabiliyeti özelliğine sahip karışım olduğu sonucuna varılabilir. Her ne kadar hem lifsiz hem de karma lifli Y300 karışımının T_{500} ve V -hünisi süresine bakılarak viskozitesi yüksek bir karışım olduğu düşünülse de pratikte geçiş özellikleri olarak başarılı sonuç alınamamıştır. Bunun sebebini ise şu şekilde açıklayabiliriz: Kullanılan mineral katkıları arasında en yüksek özgül ağırlığa sahip

katkı YFC olduğu için karışımın hacimsel olarak agrega miktarını arttıracak ve hamur miktarını azaltacaktır. Başka bir deyişle, sabit hacimde agrega miktarı ne kadar fazla olursa karışımın çimento hamuru o kadar azalmaktadır. Çimento hamuru miktarı azaldıkça hamurun agrega, lif gibi büyük parçacıkların etrafını sararak yağlama etkisi azalır. Ayrıca, agrega hacminin artmasıyla artan içsel sürtünmelerin neticesi olarak beton karışımının hareket kabiliyeti ve donatılar arasından geçiş yeteneği azalmaktadır.

Şekil 4.8'den de görüleceği üzere, UK,YFC ve KTT içeren dörütlü karışımın donatılar arasından geçiş özelliğinin, PÇ ile birlikte UK ve YFC içeren üçlü karışımına göre daha iyi olduğu açıktır. Dolayısıyla, karışımına UK ve YFC ile birlikte KTT ilavesi karışımın engeller arasından geçiş yeteneğini arttırmaktadır. Bütün bunlara ilaveten, lifli karışımın arasında, PÇ ile birlikte YFC kullanılan ikili karışımın hariç diğer tüm karma lifli karışımın geçiş kabiliyetleri üzerinde PÇ ile birlikte UK, KTT kullanımının olumlu bir etkiye sahip olduğu görülürken, karma lifli karışımın arasında en iyi geçiş kabiliyetine sahip karışımın dörütlü mineral katkı içeren ve tane dağılımına bağlı olarak paket yoğunluğu en fazla olan U125Y125K50-KL karışımının olduğu tespit edilmiştir.



U125Y125K50-
KL



U300-KL



U150Y150-KL



Y300-KL

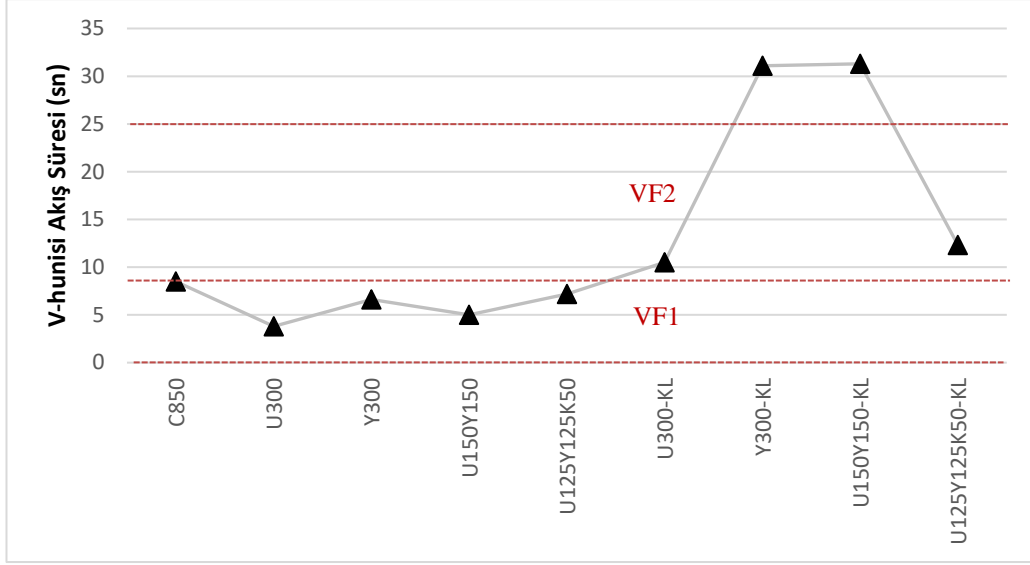


Şekil 4.8 Karma lifli karışımlara ait J-halkası deneyi görselleri

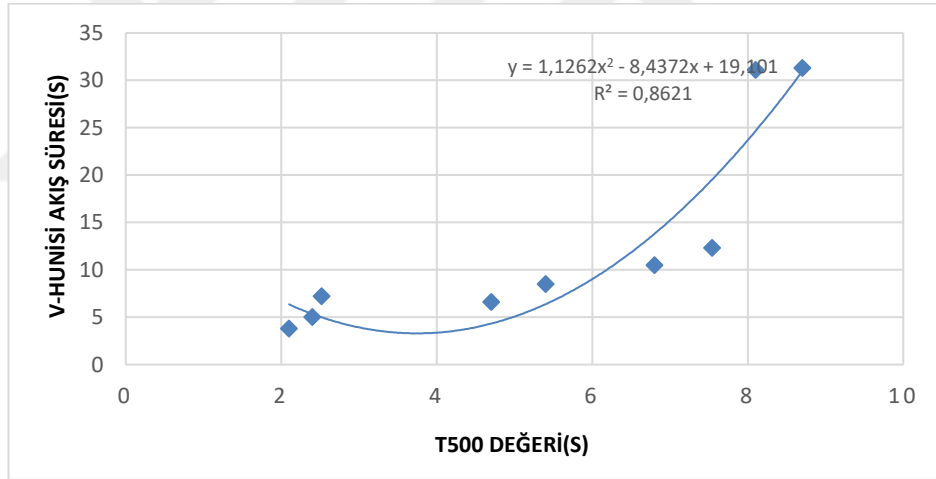
4.1.3. V-hunisi deneyi

Karışımların akıcılık ve viskozite özellikleri hakkında fikir sahibi olmak için V-hunisi deneyi gerçekleştirilmiştir. EFNARC (2005)'in akış sürelerine göre yaptığı sınıflandırmaya göre, kontrol karışımı ve tüm lifli karışımlar VF2 sınıfına, diğer mineral katkılı lifsiz karışımlar ise VF1 sınıfına dahil olmaktadır. Tüm karışımlara ait V-hunisi akış süresi (V_f) değerleri Çizelge 4.1'de ve Şekil 4.9'da verilmiştir.

Karışımlara ait V-hunisi akış süreleri ile T_{500} süreleri arasındaki regresyon analizi Şekil 4.10'de verilmiştir. Deneylere ait V-hunisi akış süreleri incelenirse, lifli ve lifsiz karışımlar arasında en düşük V-hunisi akış süresine (V_f) sahip olan karışımlar, bağlayıcı olarak UK ve PÇ'den oluşan ikili harmanlamaya sahip karışımlar olmuştur. Önceki sonuçlarda belirtildiği gibi, UK'nin nispeten düşük özgül ağırlığa sahip olması bu karışımların diğer karışımlara kıyasla çimento hamuru fazının daha yüksek hacimde olmasına ve agrega içeriğinin daha azalmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, daha fazla çimento hamuru, agrega ve lif gibi kaba parçacıkların etrafını sararak yağlama etkisi oluşturmuştur. Bunun sonucunda V_f ve T_{500} süreleri daha düşük çıkmıştır. Lifsiz karışımların T_{500} ve V_f süreleri arasındaki doğrusal ilişki, dörtlü harmanlamaya sahip lif içermeyen U125Y125K50 karışımında gözlenememiştir. Bunun sebebini, 880 mm'lik akış çapına sahip bu karışımın akışkanlık oranının fazla olması ve kohezifliğinin nispeten düşük olması sonucunda V-hunisi içerisinde bir kısım kaba taneciklerin hamurdan ayrılarak dibe çökmesi sonucu V-hunisinin ağız bölümünü bloke ederek betonun geçiş süresini arttırmasına bağlayabiliriz [51].



Şekil 4.9 Karışımlara ait V-hunisi akış süresi değerleri



Şekil 4.10 Karışımların V-hunisi akış süresi ile T₅₀₀ değerleri arasındaki ilişki

4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

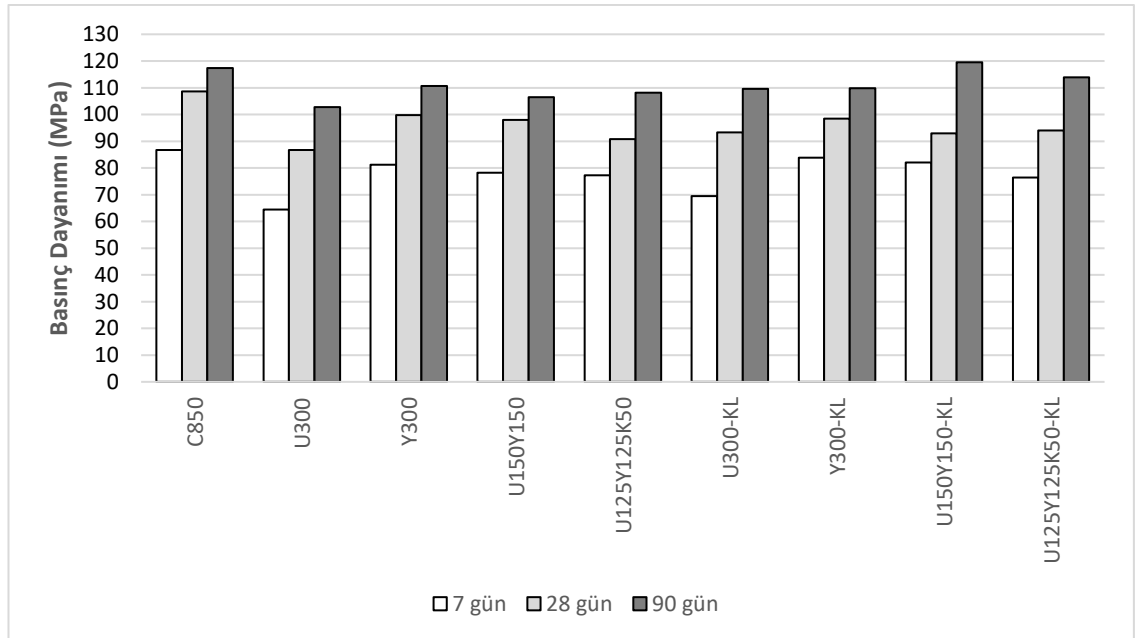
Hazırlanan tüm karışımlara ait 7, 28, 90 günlük basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı ve 90 günlük küp numunelere uygulanan ultrases geçiş hızı testi sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Beton numunelerine ait mekanik testlerin sonuçları

Karışım Kodu No	90 günlük UGH (km/s)	Basınç Dayanımı (MPa)			Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)			Eğilme Dayanımı (MPa)		
		7 gün	28 gün	90 gün	7 gün	28 gün	90 gün	7 gün	28 gün	90 gün
C850	4.11	86.5	108.5	117.5	6.7	7.2	7.6	9.42	10.59	12.09
U300	5.11	64.5	86.5	103	5.9	6.5	6.9	8.28	8.39	10.84
Y300	5.19	81	100	110.5	6.5	7	8.0	11.62	12.67	13.81
U150Y150	5.22	78	98	106.5	6.6	6.9	7.0	8.48	9.54	12.7
U125Y125K50	5.18	77.5	91	108	6.7	7.1	7.2	7.18	8.3	12.53
U300-KL	5.20	69.5	93.5	109.5	8.3	10.4	13.5	18.71	21.4	27.74
Y300-KL	5.22	84	98.5	110	9	11.2	12.2	19.24	26	26.88
U150Y150-KL	5.26	82	93	119.5	10.1	10.3	12.4	17.4	21.7	24.85
U125Y125K50-KL	5.11	76.5	94	114	9.1	11.8	12.1	13.5	21	24.9

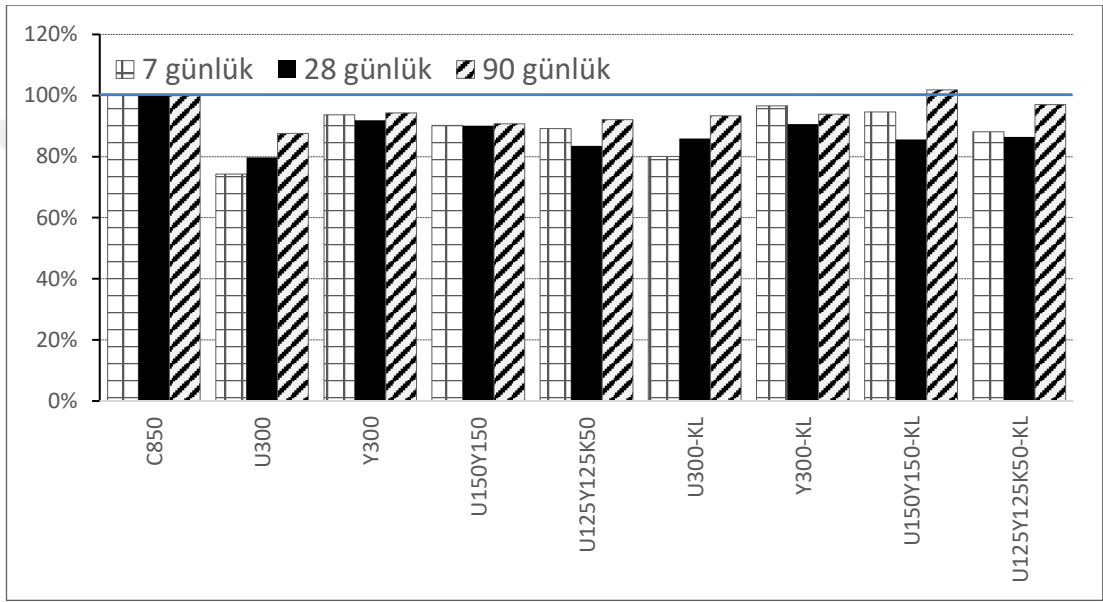
4.2.1. Basınç dayanımı

Hazırlanan karışımlarda mineral katkı türünün tekli, ikili ve üçlü kullanımında lifsiz ve karma lif takviyesiyle birlikte basınç dayanımı üzerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Her bir yaş grubu için kırılan 3 adet 100x100x100 mm küp numunenin ortalama değerleri Çizelge 4.2, Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Karışımlara ait 7,28 ve 90 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri

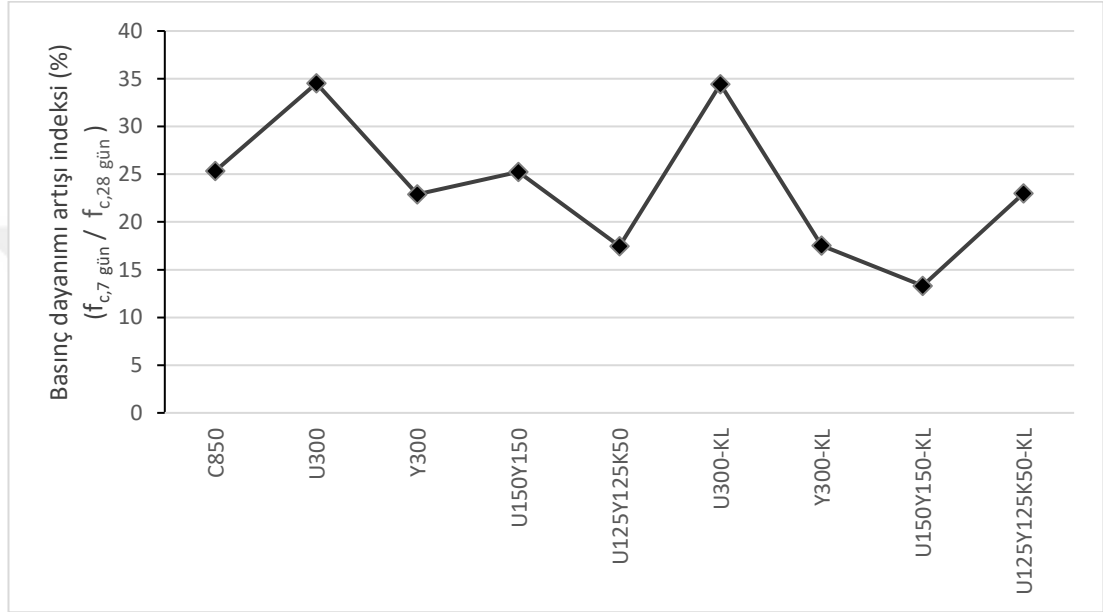
Kontrol karışımının her bir yaş serisindeki ortalama basınç dayanımı değerleri referans alınarak, tüm karışımların bu değerlere göre basınç dayanımlarındaki değişimleri yüzdesel olarak Şekil 4.12’de verilmiştir. Sonuçlar incelenecek olursa, çimentoyla ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılan mineral katkıli karışımların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, puzolanik reaksiyonların henüz tam olarak gelişmemiş olması nedeniyle kontrol karışımının altında kalmıştır. 90 günlük dayanımlarda ise sadece U150Y150-KL kodlu karışım, kontrol karışımının dayanım değerini aşmıştır. Üretilen tüm betonlar TS 13515 standartına göre yüksek dayanımlı beton sınıfına girmektedir.



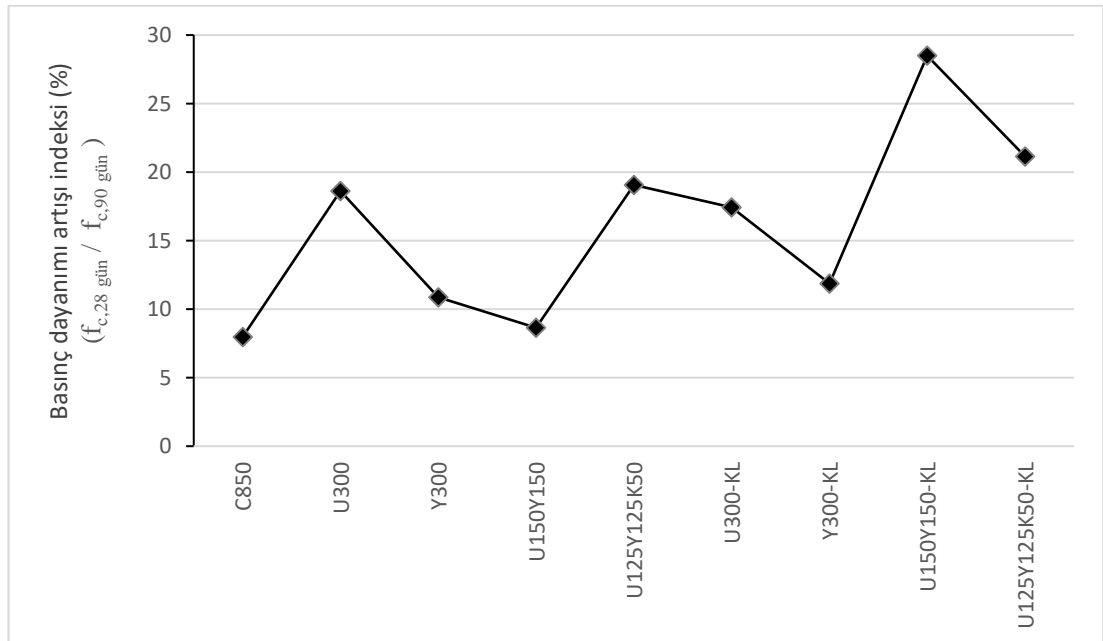
Şekil 4.12 Normalize edilmiş basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.14’de tüm karışımların 90 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımına göre indeksleri verilmiştir. Buna göre, puzolanik reaksiyon sonucu oluşan ikincil C-S-H’ların etkisiyle, mineral katkı içeren karışımların basınç dayanımı artışları kontrol karışımına göre yaklaşık %1 ile %28 arasında artmıştır. En fazla dayanım artışı yaklaşık %21 ile U150Y150-KL karışımında gerçekleşmiştir. Lifli karışımlar lifsizlere kıyasla daha yüksek bir dayanım artışı eğilimine sahiptir. Genel olarak en düşük dayanım değerlerini UK ve PÇ’den oluşan U300 karışımı sergilemiştir. Lifsiz karışımlar arasında en iyi performansı Y300 karışımı göstermiştir. Lifli karışımlarda ise 7 ve 28. gün dayanımlarda Y300-KL karışımı daha yüksek dayanıma sahiptir. YFC’nin UK’ye göre daha yüksek bir erken dayanım sağladığı literatürde belirtilmiştir [52], [53]. Yapılan bu çalışmada da Y300 karışımının 7 günlük dayanımı U300’e göre yaklaşık %26 daha fazla olmuştur(Şekil 4.12). Yine bu şekilde

görülebileceği üzere, Y300-KL karışımının U300-KL karışımına göre 7 günlük basınç dayanımı ise %20 daha fazladır. Dörtlü harmanlamaya sahip UK, YFC ve KTT içeren lifli ve lifsiz karışımların 7 günlük dayanımları nispeten düşük çöksada ilerleyen günlerde belirgin bir artış göstermiştir. Benzer sonuçlar, mevcut çalışmalarda [54-56]. KTT'nin UK veya YFC ile kullanımının sinerjik (birbirini tamamlayan) bir etki oluşturduğu bildirilmiştir.



Şekil 4.13 28 günlük basınç dayanımlarıyla 7 günlük basınç dayanımlar oranı

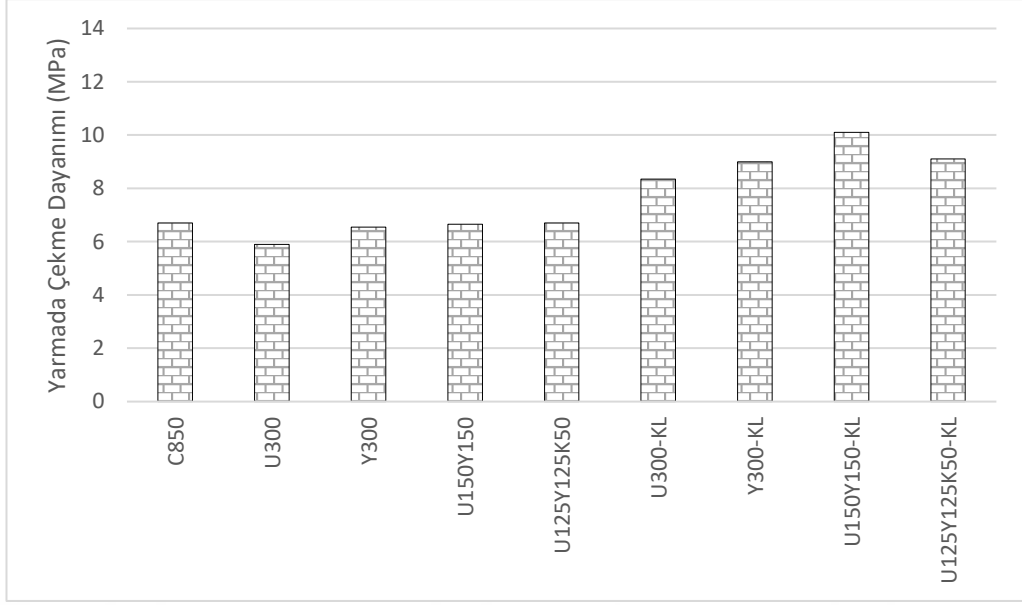


Şekil 4.14 90 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımlarına oranı

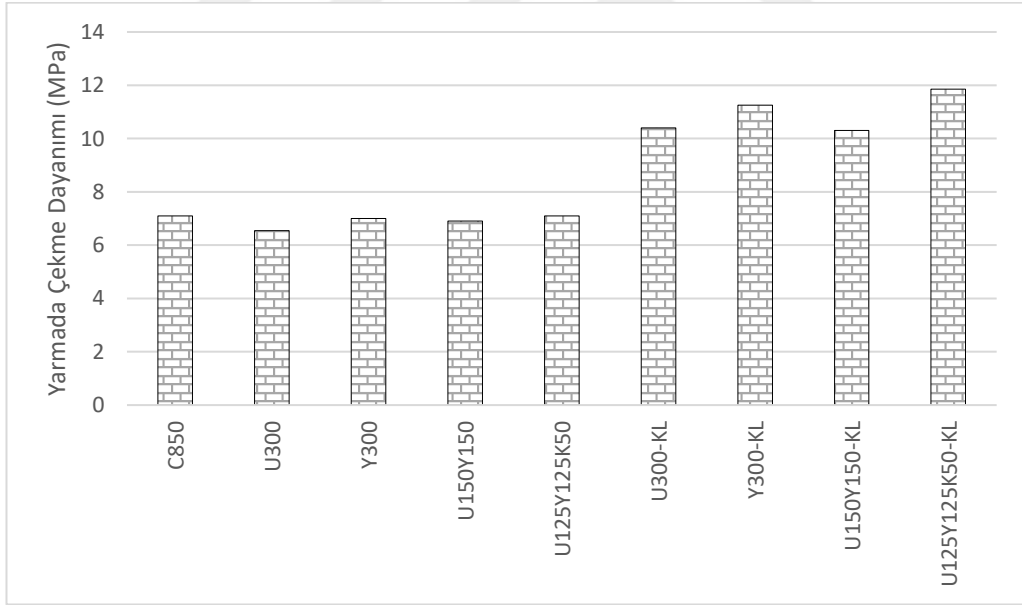
Bütün bunlara ilaveten, Tablo 4.1 ve Şekil 4.12'den de görüleceği üzere, aynı bağlayıcı harmanlamasına sahip karma lif takviyeli numunelerin basınç dayanımları lifsiz karışımlardan genel olarak daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, 90 günlük dayanımlar dikkate alındığında, lifli karışımların basınç dayanımları lifsizlere kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi, puzolanik reaksiyonların ilerlemesinin etkisiyle, beton matrisiyle lifler arasındaki aderansın artmasıyla liflerin daha etkin çatlak köprülemesine bağlanabilir.

4.2.2. Yarmada çekme dayanımı

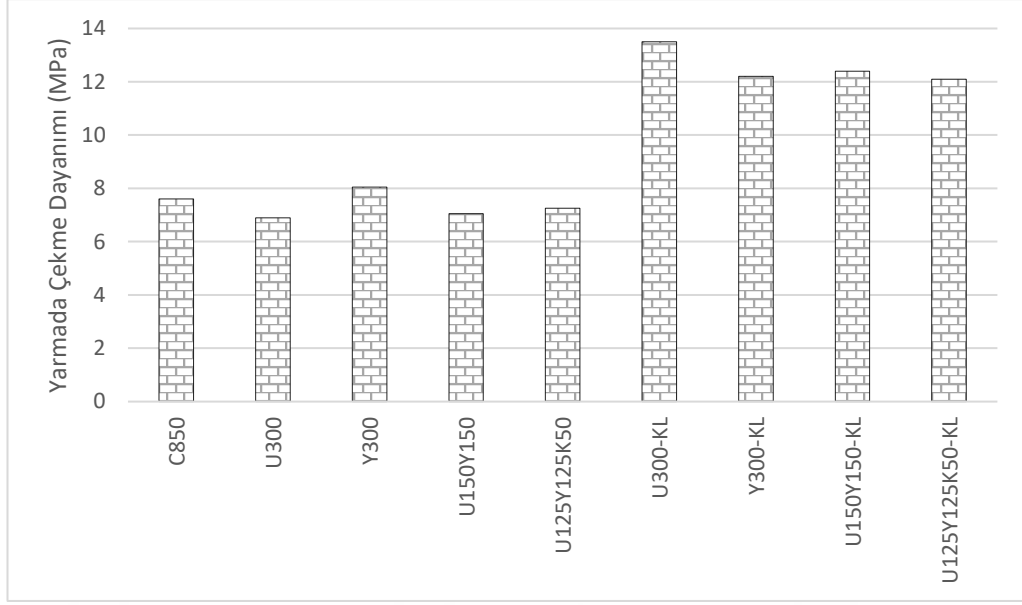
Hazırlanan tüm karışımların 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla Ø100x200 mm ölçülerinde 2 adet silindirik numune test edilmiştir. Karışımlara ait 7, 28 ve 90 günlük ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.1'de ve Şekil 4.15-17'de gösterilmiştir. Lifsiz karışımlara ait her bir yaş grubunda, yarmada çekme dayanımı değerleri incelenecek olunursa, genelde, basınç dayanımlarıyla ilişkili sonuçlar elde edilmiştir. Karma lifli karışımlarda ise liflerin matristeki dağılımlarının farklılık göstermesi sebebiyle aynı ilişki kurulamaz. Yapılan bir çok çalışmada olduğu gibi [57-61] beton karışımına karma lif takviyesi çekme dayanımını arttırmaktadır. Bu çalışmada da karma lif içeriğine sahip karışımların yarmada çekme performansları, tüm kür yaşları için lifsizlere kıyasla yüksek çıkmıştır. Lifsiz karışımlara ait değerler incelenirse, yine tüm kür yaşları için kontrol karışımına göre mineral katkı ikameli karışımların dayanımları arasında bariz farklar oluşmamıştır. Şekil 4.15-17 'den de görüleceği üzere, basınç dayanımı değerleriyle ilişkili olarak Y300 karışımının yarmada çekme dayanımı değerleri 7 günlük dayanımlar hariç diğer mineral katkı içeren lifsiz karışımlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Aynı bağlayıcı içeriğine sahip karışımlar dikkate alındığında, tüm kür yaşları için lifli karışımlar ise lifsizlere göre %25 ile %78 arasında değişen değerlerde daha yüksek dayanım sonuçları vermiştir.



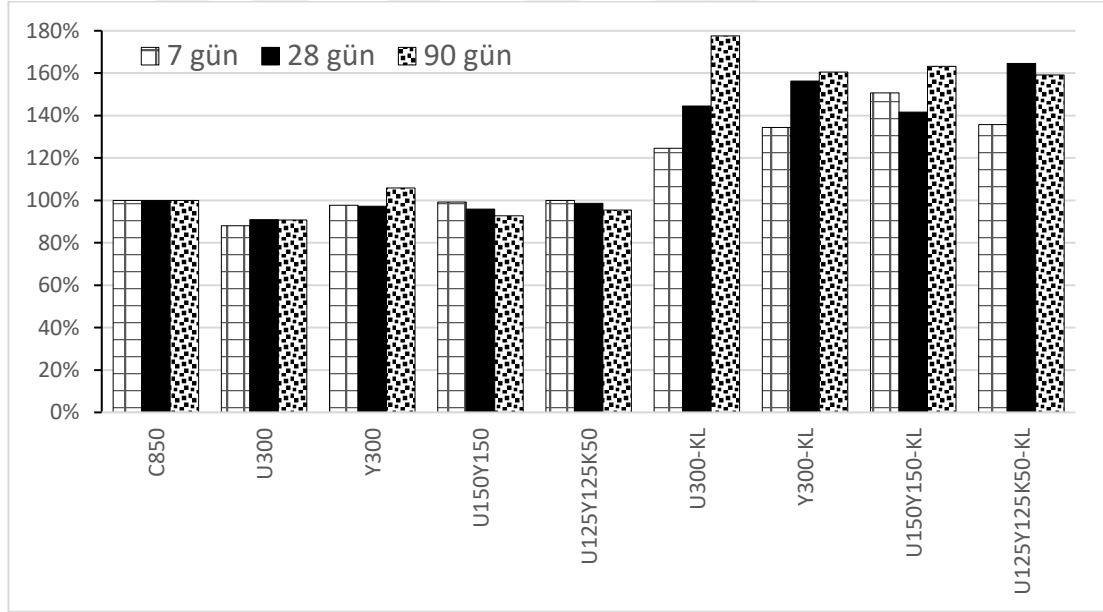
Şekil 4.15 Karma lifli ve lifsiz KYB karışımlarının 7 günlük çekme dayanımı



Şekil 4.16 Karma lifli ve lifsiz KYB karışımlarının 28 günlük çekme dayanımı



Şekil 4.17 Karma lifli ve lifsiz KYB karışımlarının 90 günlük yarmada çekme dayanımı



Şekil 4.18 Normalize edilmiş çekme dayanımı

4.2.3. Eğilme dayanımı (ASTM C1609)

Dört noktalı eğilme testlerini gerçekleştirmek için 7, 28 ve 90 günlük her bir seride 100x75x400 boyutlarında 2 adet prizmatik numune hazırlanmıştır. Deney esnasında açıklık ortası net sehim ölçülerek, yük – sehim grafikleri oluşturulmuştur. Tüm karışımlara ait 7, 28 ve 90 günlük ortalama maksimum yük ve eğilme dayanımı

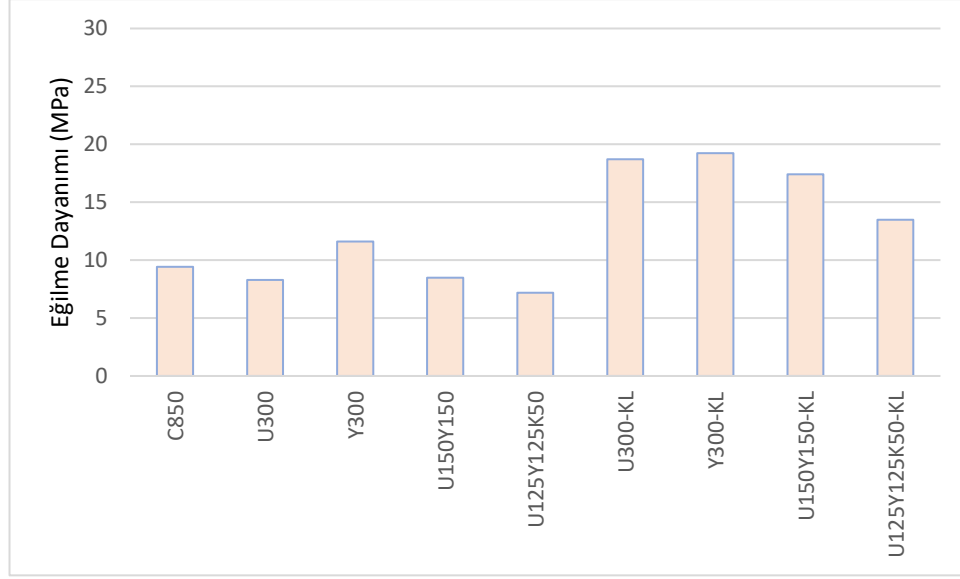
değerleri ile karma lif içeriğine sahip karışımlara ait eğilme tokluğu faktörü (FT) değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Tüm lifli ve lifsiz KYB numunelerine ait dört noktalı eğilme testi sonuçları

Karışım Kodu No	Ortalama maksimum yük (kN)			Eğilme Tokluğu Faktörü (MPa)			Eğilme Dayanımı (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün	7 gün	28 gün	90 gün	7 gün	28 gün	90 gün
C850	17.66	19.85	22.67	-	-	-	9.42	10.59	12.09
U300	15.55	15.74	20.32	-	-	-	8.28	8.39	10.84
Y300	21.8	23.77	25.9	-	-	-	11.62	12.67	13.81
U150Y150	15.9	17.88	23.81	-	-	-	8.48	9.54	12.7
U125Y125K50	13.46	15.56	23.49	-	-	-	7.18	8.3	12.53
U300-KL	35.3	40.2	59.84	17.25	19.27	19.96	18.71	21.4	31.92
Y300-KL	36.07	48.76	52.17	16.42	16.53	21.34	19.24	26	27.83
U150Y150-KL	32.7	40.67	46.6	16.38	18.45	19.13	17.4	21.7	24.85
U125Y125K50-KL	25.31	11.85	41	13.73	17.68	17.4	13.5	21	21.87

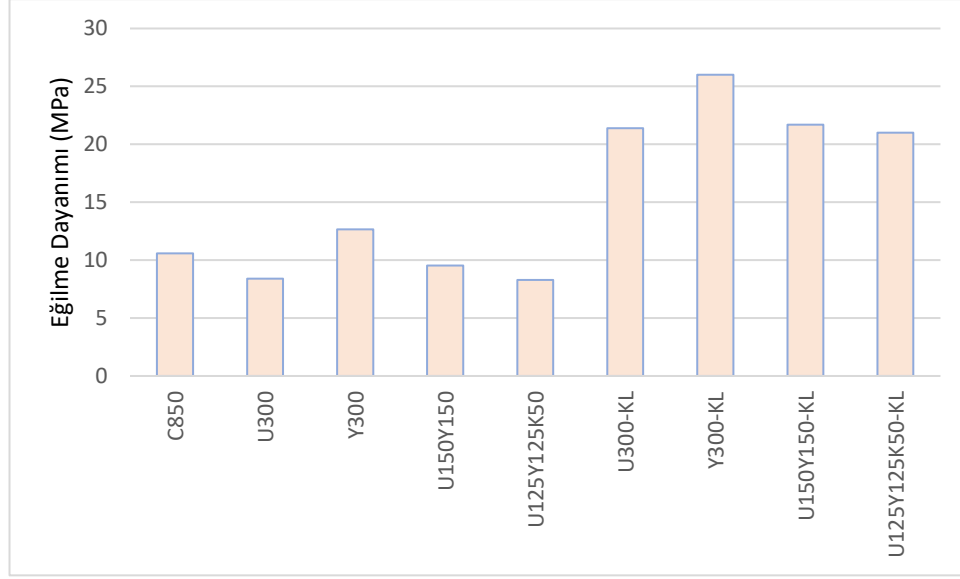
4.2.3.1 Mineral katkı tipinin eğilme dayanımı üzerine etkisi

Karma lif içeriğine sahip 7, 28 ve 90 günlük numunelere ait eğilme dayanımı grafikleri Şekil 4.19 - 21’de gösterilmiştir. Şekil 4.19’de tüm numunelere ait 7 günlük eğilme dayanımları incelenirse, lifli karışımlar lifsizlere kıyasla yaklaşık %90’a yakın bir artış görülürken, lifsiz karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 11.62 MPa ile ikili harmanlamaya sahip Y300 karışımına ait numunelerden elde edilmiştir. 7 günlük tüm karma lifli numunelere ait eğilme dayanımı sonuçları esas alındığında, ikili harmanlamaya sahip Y300-KL karışımına ait numunelerin 19.24 MPa ile en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülürken, 13.5 MPa ile en düşük eğilme dayanımının ise dörtlü harmanlamaya sahip U125Y125K50-KL karışımının olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında, U300-KL ve U150Y150-KL karışımlarına ait numunelerin eğilme dayanımları, en yüksek eğilme dayanımına sahip olan Y300-KL numunelerininin sırasıyla %97 ve %90’ı oranında çok yakın değerler aldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.19 Lifli ve lifsiz KYB numunelerine ait 7 günlük eğilme dayanımı değerleri

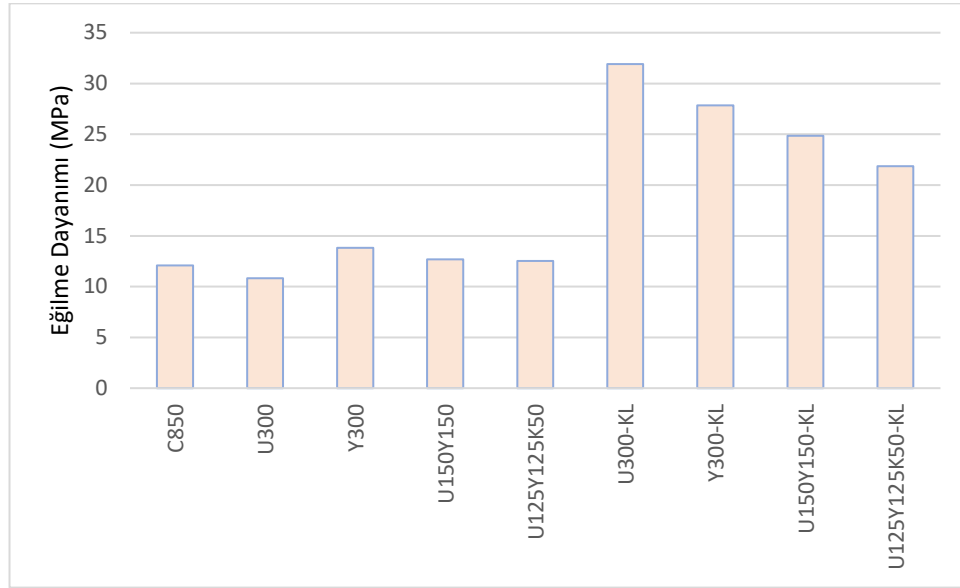
Şekil 4.20’de tüm numunelere ait 28 günlük eğilme dayanımları incelenirse, lifli karışımlar lifsizlere kıyasla yaklaşık %127’ye yakın bir artış gösterdiği tespit edilirken, lifsiz karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 12.67 MPa ile ikili harmanlamaya sahip Y300 karışımına ait numunelerden elde edilmiştir. 28 günlük tüm karma lifli numunelere ait eğilme dayanımı sonuçları esas alındığında, 7 günlük numunelerde olduğu gibi yine ikili harmanlamaya sahip Y300-KL karışımına ait numunelerin 26 MPa ile en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülürken, 21 MPa ile en düşük eğilme dayanımının ise dörtlü harmanlamaya sahip U125Y125K50-KL karışımının olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 28 günlük U300-KL, U150Y150-KL ve U125Y125K50-KL karışımlarına ait numunelerin eğilme dayanımlarının birbirine çok yakın değerlere sahip olduğu ve en yüksek eğilme dayanımına sahip olan Y300-KL numunelerinkinden yaklaşık %22 oranında düşük olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.20 Lifli ve lifsiz KYB numunelerine ait 28 günlük eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.21’de tüm numunelere ait 90 günlük eğilme dayanımları incelenirse, lifli karışımlar lifsizlere kıyasla yaklaşık %15’e yakın bir artış gösterdiği tespit edilirken, lifsiz karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 13.81 MPa ile ikili harmanlamaya sahip Y300 karışımına ait numunelerden elde edilmiştir. 90 günlük tüm karma lifli numunelere ait eğilme dayanımı sonuçları esas alındığında, ikili harmanlamaya sahip U300-KL karışımına ait numunelerin 31.92 MPa ile en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülürken, 7 ve 28 günlük numunelerde olduğu gibi 21.87 MPa ile en düşük eğilme dayanımının ise dörtlü harmanlamaya sahip U125Y125K50-KL karışımının olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 90 günlük en yüksek eğilme dayanımına sahip U300-KL numunesini 27.83 MPa ile Y300-KL, 24.85 MPa ile üçlü harmanlamaya sahip U150Y150-KL v 21.87 MPa eğilme dayanımı değeri ile dörtlü harmanlamaya sahip U125Y125K50-KL karışımları izlemektedir.

Dolayısıyla mineral katkı tipinin eğilme dayanımı üzerine etkisi değerlendirilecek olursa, lifli ve lifsiz karışımların 7 ve 28 günlük dayanımlarında YFC en olumlu etkiye sahiptir. 90 günlük dayanımlarda ise UK ve PÇ’den oluşan U300-KL karışımı en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaşmıştır. %5 oranında kireçtaşı tozu ikame edilerek oluşturulan U125Y125K50 karışımı en düşük dayanım değerlerine sahiptir. Bu durum, kireçtaşı tozunun agrega ve lif yüzeylerine yapışarak, matrisle kaba partiküller arasındaki bağ kuvvetini azaltması nedenine dayandırılabilir.



Şekil 4.21 Lifli ve lifsiz KYB numunelerine ait 90 günlük eğilme dayanımı değerleri

4.2.4 Eğilme tokluğu

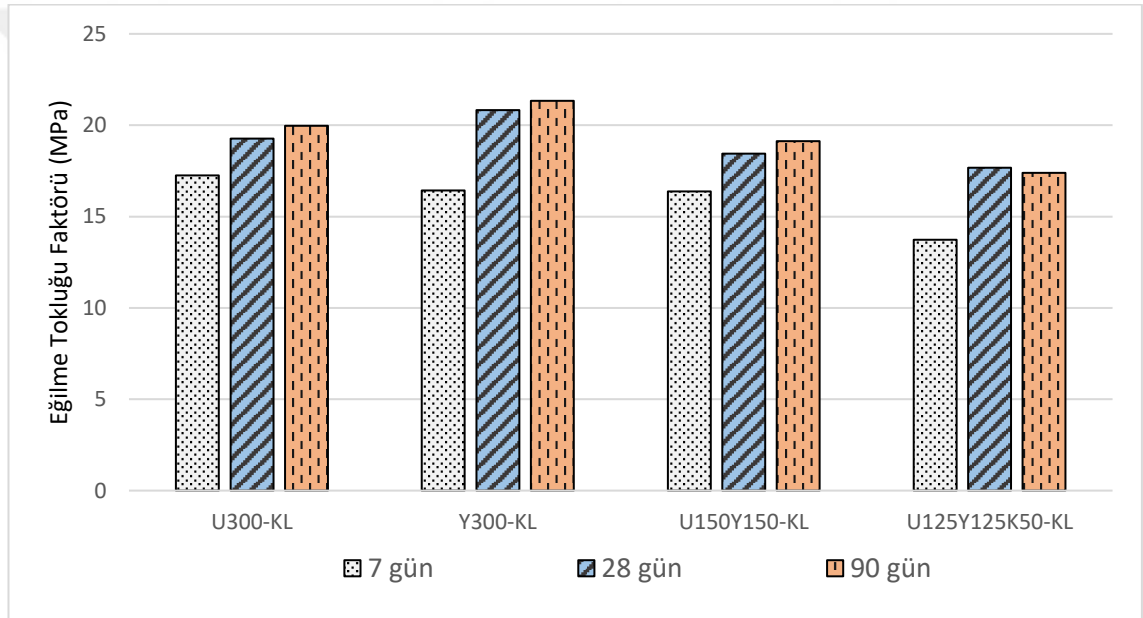
Lif takviyeli betonların eğilme tokluğu, eğilme testi sırasında elde edilen yük-sehim eğrisinin farklı standartlarca belirlenen aralıktaki alanının hesaplanmasıyla elde edilir ve enerji absorbe edebilme kapasitesiyle ilişkili olarak düşünülebilir [62]. Bu tez çalışmasında, dört noktalı eğilme testi uygulanan numunelerden elde edilen yük-sehim eğrileri vasıtasıyla, JSCE-SF4 yöntemine göre eğilme tokluğu faktörleri hesaplanmıştır. JSCE-SF4 standardına göre $L/150(300/150)$ sehim değerine kadar olan yük-sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanarak Denklem 3.2’de verilen formül yardımıyla FT (eğilme tokluğu faktörü) hesaplanmıştır.

Şekil 4.22’de karma lif takviyeli karışımlara ait 7, 28 ve 90 günlük eğilme faktörü değerleri verilmiştir. Buna göre 7 günlük eğilme tokluğu değerlerine bakılırsa, UK ve PÇ bağlayıcılarının kullanıldığı U300-KL karışımı 17.25 MPa’lık değeriyle diğer Y300-KL, U150Y150-KL, U125Y125K50-KL karışımlarından sırasıyla %5, %5, %25 daha yüksek değere sahiptir.

28 günlük eğilme tokluğu değerine göre Y300-KL karışımı 20.82 MPa değeriyle, U300-KL, U150Y150-KL, U125Y125K50-KL karışımlarından sırasıyla %8, %12.5, %18 oranlarında daha yüksek değere sahiptir. 28 günlük eğilme tokluğu değerleri

arasında 7 günlüklere göre en fazla artışı Y300-KL karışımı sağlamıştır. 90 günlük değerlerde ise Y300-KL karışımı en iyi sonucu vermiştir. U125Y125K50-KL karışımı genel olarak en düşük eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu değerlerini vermiştir. Maksimum yükten ziyade, liflerin çatlak köprüleme mekanizması eğilme tokluğu üzerine daha baskındır. Matris ve lif parametreleri çatlak köprüleme üzerinde etkilidir.

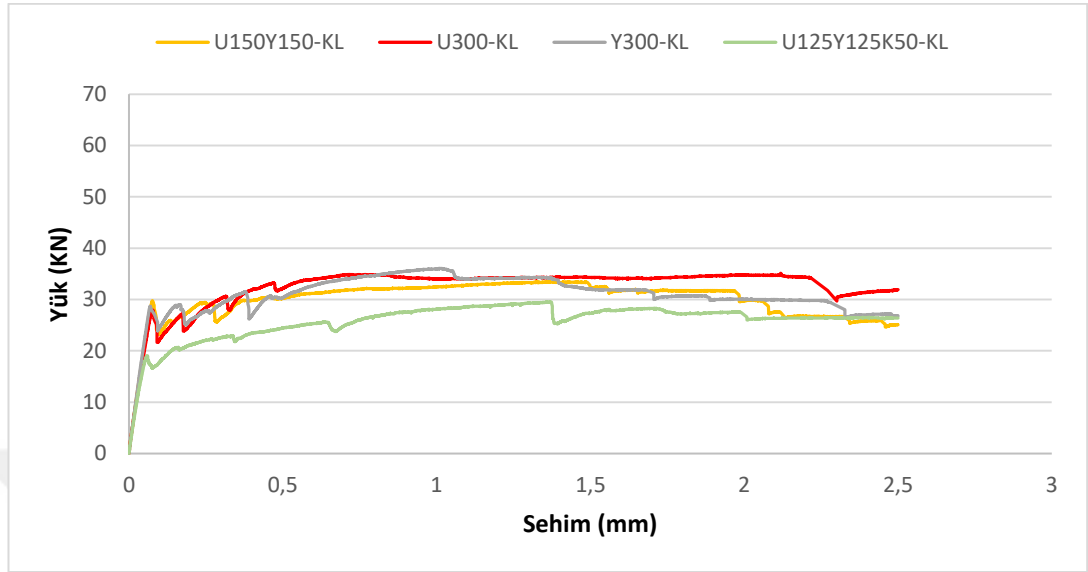
Numunelere ait kür yaşı arttıkça, matrislerin dayanım artışına ve kırılmalıklarındaki artışa bağlı olarak, liflerin sıyrılarak çıkma davranışları zayıfladığı için eğilme tokluğu artışlarında azalma görülmüştür.



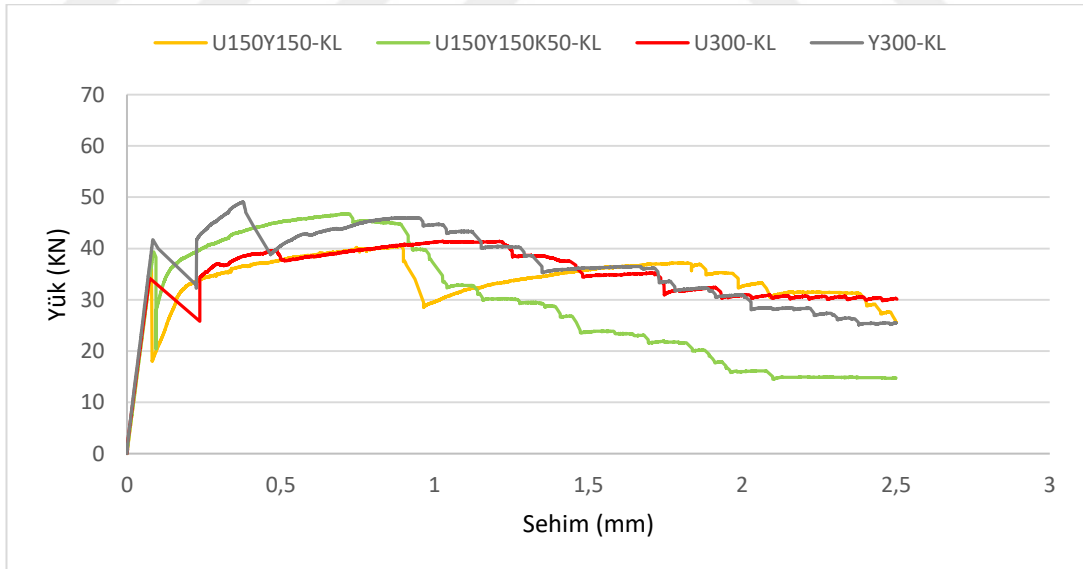
Şekil 4.22 Karma lifli ve farklı mineral katkı içeriğine sahip KYB karışımlarının eğilme tokluğu faktörü değerleri

Şekil 4.23-25'da verilen yük-sehim grafikleri incelenirse, tüm numuneler sehimsertleşmesi(deflection-hardening) davranışı sergilemiştir. Maksimum yük sonrası eğrilerde oluşan dalgalanmalar, liflerin matristen sıyrılarak ayrılmasına veya kopmasına bağlı olarak çatlak köprüleme davranışıdır. 7 günlük numunelerde yeterli dayanımın oluşmamasına bağlı olarak lif ve matris arasındaki bağ da zayıf kaldığı için eğrideki iniş çıkışlar daha uzun mesafelerde oluşmuştur. Fakat 28 ve 90 günlük yük-

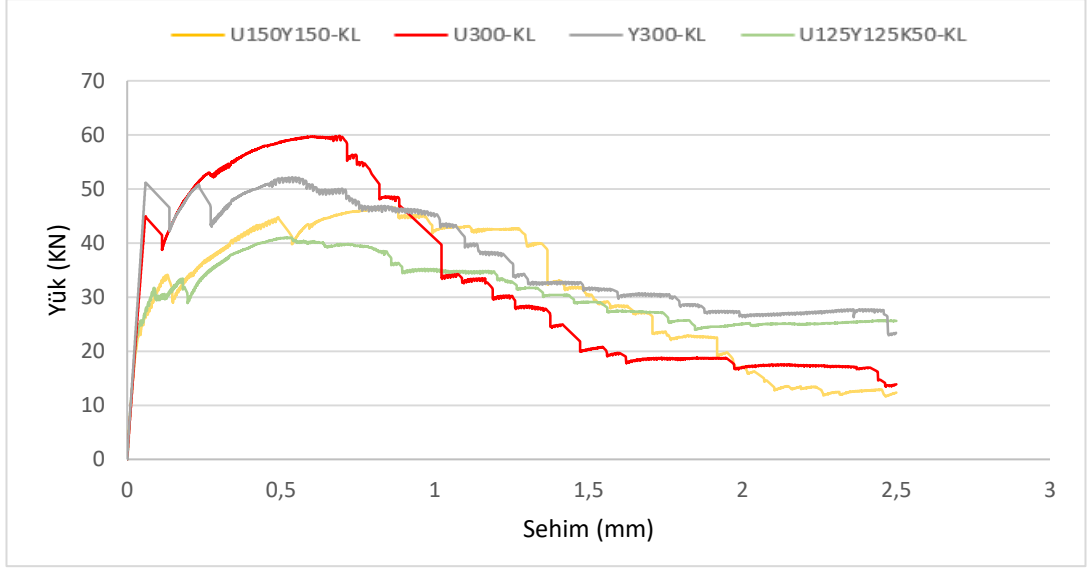
sehim eğrileri incelenirse pekleşme aralıkları 7 günlük sonuçlara göre daha az eğri aralıklarında gerçekleşmiştir.



Şekil 4.23 Karma lifli karışımların 7 günlük yük-sehim grafikleri



Şekil 4.24 Karma lifli karışımların 28 günlük yük-sehim grafikleri



Şekil 4.25 Karma lifli karışımların 90 günlük yük-sehim grafikleri

4.2.5. Ultrases geçiş hızı

Hazırlanan karışımların 90 günlük küp numuneleri üzerinde ultrases geçiş hızı (UGH) deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre mineral katkı ikameli karışımların numunelerinden, kontrol karışımına göre daha yüksek UGH değerleri elde edilmiştir. Bu durumun sebebi, çimentonun hidrasyon ürünlerinden olan etrenjitin morfolojik olarak boşluklu yapıya sahip olması sonucunda ultrases geçiş hızını azaltması olarak gösterilebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİ

Yapılan çalışmada, endüstriyel atık olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun yanı sıra dolgu malzemesi olarak kireçtaşı tozu içeren ikili, üçlü ve dördümlü harmanlı bağlayıcı sistemlerde, 60 kg/m^3 makro, 20 kg/m^3 mikro, $2,36 \text{ kg/m}^3$ polipropilen lif içeren karma lifli ve lifsiz karışımların işlenebilirlik ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Karışıma mineral katkı ilavesi kontrol karışımına kıyasla akışkanlaştırıcı ihtiyacını azaltmıştır. Mineral katkıların çimento ile ağırlıkça yer değiştirmesi sonucunda belirli bir hedef çökme-yayılma değeri daha az akışkanlaştırıcı kullanılarak elde edilebilir.
- Yapılan deneyler sonucunda karma lif içeriğine sahip KYB karışımlarının, homojen bir şekilde yayılma gösterebilmesi ve engeller arasından stabilitesi

bozulmadan geçebilmesi için yeterince yüksek kohezifliğe ve akma gerilmesine sahip olması gerektiği bulunmuştur.

- İşlenebilirlik özellikleri açısından, mineral katkı ikamesinden dolayı hamur hacminde meydana gelen değişimlere karşı lifli karışımların, lifsizlere göre çok daha hassas olduğu tespit edilmiştir.
- Karma lif takviyeli KYB'nin homojenliğinin sağlanması ve donatılar ile dar açıklıklardan geçiş yeteneğinin başarılı olabilmesi için, kendiliğinden yerleşebilirlik özelliğini karşılayabilecek kadar yüksek viskoziteye ve optimum bir akma gerilmesine sahip olması gerektiği gözlemlenmiştir.
- UK ve PÇ içeren ikili bağlayıcı harmanlamasına sahip ve karma lif içeren karışımın çökme-yayılma değeri aynı karışımın lifsiz haline göre %22 azalırken, YFC, UK, PÇ'li üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip karışım %22, YFC, UK, KTT, PÇ'li dördümlü bağlayıcı harmanlamasına sahip karışım %17, YFC ve PÇ'li ikili bağlayıcı harmanlamasına sahip karışım ise %6 kadar düşüş göstermiştir.
- Aynı bağlayıcı içeriğine sahip lifli karışımların lifsiz karışımlara göre göstermiş oldukları çökme-yayılma çapı kayıpları ile karışımların homojenlikleri arasında ters bir ilişki saptanmıştır. Örneğin, en fazla yayılma çapı kaybına uğrayan U150Y150 ve U150Y150-KL karışımları en homojen yayılma gösterirken, en az yayılma çapı kaybına uğrayan Y300 ve Y300-KL karışımları ise en fazla ayrışma gösteren karışımlar olmuştur.
- Yapılan Çökme-yayılma ve T_{500} deneyleri esas alındığında, U300 ve U300-KL karışımları, sırasıyla, lifsiz ve lifli karışımlar arasında en yüksek yayılma çapına ve en düşük T_{500} süresine sahiptirler.
- UK ve PÇ'den oluşan karışımlar her ne kadar en düşük T_{500} ve V-hunisi akış süresi değerlerine sahip olsalar da diğer mineral katkılara göre daha kohezif ve homojen özellik göstermişlerdir.
- YFC ile PÇ'nin ikili bağlayıcı harmanlamasına sahip hem lifsiz hem de lifli karışımların, kendi içinde en yüksek H_2-H_1 değerine sahip olduğu bulunmuştur. Çünkü, lifsiz Y300 karışımını EFNARC (2002)'nin 10 mm'lik ΔH sınır değerini sağlasa da, YFC'nin PÇ'ye ağırlıkça %35 oranında ikame edildiği karışımlar, diğer mineral katkı ikameli karışımlara kıyasla, en kötü geçiş kabiliyetine ve en zayıf yapısal bütünlüğe sahip olduğu tespit edilmiştir.

- UK, YFC ve KTT içeren dörtlü karışımın yayılma çapı ve donatılar arasından geçiş kabiliyeti UK ve YFC içeren üçlü karışımına göre daha üstün olmuştur. Yani UK ve YFC varlığında karışımına KTT ilavesi işlenebilirlik özelliklerini geliştirmiştir.
- Lifli ve lifsiz karışımlar arasında en düşük V-hunisi akış süresine sahip karışımlar UK ve PÇ içeren ikili karışımlardır.
- U125Y125K50 karışımı hariç tüm karışımların V-hunisini T₅₀₀ süreleri ile tahmin etmede yüksek düzeyde bir korelasyon olduğu bulunmuştur.
- Karışımların basınç dayanımı sonuçlarına göre, 7 ve 28 günlük dayanımlarda tüm karışımların basınç dayanımı değerleri kontrol karışımınınkinden altında kalmıştır. 90 günlük karışımlarda ise sadece U150Y150-KL karışımının dayanım değeri kontrol karışımınınkinden daha fazla çıkmıştır.
- Tüm kür yaşları için, aynı bağlayıcı kompozisyonundaki; karma lif takviyeli numunelerin basınç dayanımları lif takviyesiz karışımlardan genel olarak daha yüksek çıkmıştır. 90 günlük dayanım grubunda, lifli karışımların basınç dayanımları lifsizlere kıyasla daha yüksek oranda fazla çıkmıştır.
- Lifli karışımların yarmada çekme dayanımlarının, lifsizlere kıyasla %25 ile %78 arasında daha yüksek değerler aldığı bulunmuştur.
- Tüm karma lif takviyeli KYB karışımlarının eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu değerlerinin, tüm kür yaşları için lifsiz karışımlara kıyasla önemli ölçüde yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Karma lifli karışımların 7, 28 ve 90 günlük yaş gruplarından elde edilen yük-sehim grafiklerinin tümünde sehim sertleşmesi gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerin kür yaşlarının artmasına bağlı olarak matris kırılgenliğinin artması ve liflerin sıyrılarak çıkma davranışlarının azalmasından dolayı eğilme tokluğu artışları azalmıştır.
- Mineral katkıları arasında, hem karma lifli hem lifsiz karışımların eğilme dayanımı ile karma lifli karışımların eğilme tokluğu üzerinde en olumsuz etkiye kireçtaşı tozu sahiptir.

ÖNERİ

- Çökme-yayıma, T_{500} , J-halkası, V-hunisi akış süresi gibi deneyler işlenebilirlik özellikleri hakkında fikir vermektedir. Ancak, özellikle karma lifli KYB'lerin reolojik özelliklerinin daha net anlaşılabilmesi için daha kapsamlı reolojik testler yapılmalıdır ve de mikrofiller malzemelerin mineralojik, morfolojik yapılarının ve partikül dağılımlarının detaylı analiz edilmesi gereklidir.
- Uçucu külün işlenebilirlik ve nihai dayanıma sağladığı katkıdan, YFC'nin daha hızlı erken dayanım kazandırmasından, KTT'nin işlenebilirliği geliştirmesi ve YFC, UK ile sinerjik etki göstermesi özelliklerinden yararlanılarak karışım tasarımının optimize edilmesiyle talepleri karşılayacak başarılı karma lif takviyeli KYB kompozitleri oluşturulabilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Okamura, H., *Self-compacting high-performance concrete*. **Concrete international**, 19:7, (1997) 50-54.
- [2] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. *Carbon dioxide emissions from the global cement industry*. **Annual review of energy and the environment**, 26:1, (2001) 303-329.
- [3] Safiuddin, M. *Development of self-consolidating high performance concrete incorporating rice husk ash*. PhD Thesis, University of Waterloo, 2008.
- [4] Initiative, C. S. (2009). Cement industry energy and CO2 performance: getting the numbers right. *World Business Council for Sustainable Development*.
- [5] Turhan, E. Y., *Beton*, 2003, Ankara
- [6] Turk, K.. *Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume*. **Construction and Building Materials**, 37, (2012) 326-334.
- [7] Bouzoubaa, N., & Lachemi, M. (2001). *Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results*. **Cement and concrete research**, 31:3, (2001) 413-420.
- [8] Öner, M., Erdoğan, K., & Günlü, A. *Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement*. **Cement and Concrete Research**, 33:4, (2003) 463-469.
- [9] Bunsell, A.R., (1988). *Fiber Reinforcement for Composite Materials, Vol:2 Composite Materials Series*, Elsevier Science, The Netherlands
- [10] Rossi, P. *High performance multimodal fiber reinforced cement composites (HPMFRCC): the LCPC experience*. **Materials Journal**, 94:6, (1997) 478-783.
- [11] Okamura, H., Maekawa, K., & Ozawa, K. (1995). *Development of Self-Compacting High Performance Concrete*. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1995(522), 23-26
- [12] Collepardi, M. (2001, September). *A very close precursor of self-compacting concrete (SCC)*. In *Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology*, S. Francisco (USA) (pp. 431-450).
- [13] Walraven, J. (2002, November). *Self-compacting concrete in the Netherlands*. In *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete* (pp. 355-359).

- [14] Felekoğlu, B. (2003). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, Temmuz*, 251. 14
- [15] W.J. Semioli, “*Self-Placing Concrete*”, **Concrete International**, Vol. 23, No.12, pp. 69-72, 2001. 15
- [16] Skarendahl, Å., & Petersson, Ö. (Eds.). (2000). Report 23: Self-Compacting Concrete–State-of-the-Art Report of Rilem Technical Committee 174-SCC (Vol. 23). RILEM publications. 16
- [17] Tviksta, L. G. (2000). Guideline for SCC. *Brite EuRam, Task*, 9, 3-11. 17
- [18] Okamura, H., Ozawa, K., & Ouchi, M. (2000). Self-compacting concrete. *structural Concrete*, 1(1), 3-17. 18
- [19] Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4). London: Longman. 19
- [20] Khayat, K. H., & Guizani, Z. (1997). *Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete. Materials Journal*, 94(4), 332-340. 20
- [21] Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B. and Panarese, W.C. 2003. Design and control of concrete mixtures. 14th ed. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association (PCA). 21
- [22] Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D. 2003. *Concrete*. 2nd ed. USA: Pearson Education Ltd. 22
- [23] ASTM, C. (2003). 125 Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*, 4. 23
- [24] ASTM, C. (1972). 618 *Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete. American Society for Testing and Materials, Philadelphia*. 24
- [25] Gaimster, R., & Dixon, N. (2003). *Self-compacting concrete. Advanced concrete technology*, 1-9. 25
- [26] Özkul, M. H. (2002). *Beton teknolojisinde bir devrim: kendiliğinden yerleşen-sıkışan beton. THBB Hazır Beton Dergisi*, 9(32), 64-71. 26
- [27] Kuroda, M., Watanabe, T. and Terashi, N. Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash. **Cement and Concrete Research** 30:2, 2000, pp. 253–258. 27
- [28] Cook, J. E. *Fly ash in concrete-Technical considerations. Concrete International*, 5:9, (1983) 51-59. 28
- [29] Best, J. F. *Properties and use of fly ash in Portland cement concrete. Concrete International*, 4:7, (1982) 81-92. 29

- [30] Erdoğan, T. Y. (1997). *Admixtures for concrete*. Middle East Technical University Press. 30
- [31] Ramachandran, V. S. (1996). *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*. William Andrew. 31
- [32] Yahia, A., Tanimura, M., & Shimoyama, Y. *Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio*. **Cement and concrete Research**, 35:3, (2005) 532-539.
- [33] The Concrete Society (BRE) 2005. Self-compacting concrete-A review. Surrey, UK. 33
- [34] Fang, W., Jianxiong, C., Changhui Y. (1999). Studies on selfcompacting high performance concrete with high volume mineral additives. Proceedings of the First International RILEM Symposium. 34
- [35] Ramezani pour, A.A. 2014. Cement replacement materials: Properties, durability, sustainability. Concrete Technology Center, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, I. ed. Springer Geochemistry/Mineralogy Ltd. 35
- [36] Carlswald, J., Emborg, M., Utsi, S. and Oberg, P. 2003. Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete. In: O. Wallevik and I. Nielsson ed. 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. RILEM Publications SARL, Reykjavik, Iceland, pp. 143–153. 36
- [37] Memon, F.A., Nuruddin, M.F. and Shafiq, N. *Effect of silica fume on the fresh and hardened properties of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete*. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials** 20:2, (2013) pp. 205–213.
- [38] Memon, F.A., Nuruddin, M.F. and Shafiq, N. *Effect of silica fume on the fresh and hardened properties of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete*. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials** 20:2, (2013) pp. 205–213. 38
- [39] Türkel, S. & Felekoğlu B. (2003). Silika Dumanı ve Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Betonda Kendiliğinden Yerleşebilirlik ve Basınç Dayanımı Üzerine Etkileri. Kocaeli 2003 Deprem Sempozyumu, Kocaeli Üniversitesi Yer ve Uzay Bilimleri Araştırma Merkezi. 39
- [40] Skarp, U., Engstrand, J. & Jansson, I. (2002). A Concept for Enhancing Early Strength Development in Self-Consolidating and Normal Concrete by Means of Increased Stability and Homogeneity. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 363-370. 40

- [41] Bosiljkov, V.B. *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler*. **Cement and Concrete Research** 33:9, (2003) pp. 1279–1286. 41
- [42] Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, a. M. and Taerwe, L. *Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes*. **Cement and Concrete Composites** 29:2, (2007) pp. 94–102.
- [43] Carlsward, J., Emborg, M., Utsi, S. and Oberg, P. 2003. Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete. In: O. Wallevik and I. Nielsson ed. 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. RILEM Publications SARL, Reykjavik, Iceland, pp. 143–153. 43
- [44] Persson, B. 1997. *Moisture in concrete subjected to different kinds of curing*. **Materials and Structures** 30:9, (1997) pp. 533–544. 44
- [45] Williams, D. A., Saak, A. W., & Jennings, H. M. (1999). The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, 29:9, (1999) 1491-1496. 45
- [46] Ramachandran, V. S. (1996). *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*. William Andrew. 46
- [47] K. Khayat, A. Yahia, M. Sayed *Effect of supplementary cementitious materials on rheological properties, bleeding, and strength of structural grout* **ACI Mater J**, 105:6, (2008) 585-593.
- [48] Sonebi, M., & Bartos, P. J. M. *Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete*. **Materials and structures**, 35:8, (2002) 462-469
- [49] Yahia, A., Tanimura, M., Shimabukuro, A., Shimoyama, Y., & Tochigi, T. (1999, August). Effect of mineral admixtures on rheological properties of equivalent self-compacting concrete mortar. In *Proc., 7th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engineering and Construction* (Vol. 21, pp. 559-564). Japan: COMS Engineering Corp. 49
- [50] Ahari, R. S., Erdem, T. K., & Ramyar, K. *Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials*. **Cement and Concrete Composites**, 59, (2015) 26-37.
- [51] Skarendahl, Å., & Petersson, Ö. (Eds.). (2000). Report 23: Self-Compacting Concrete–State-of-the-Art Report of Rilem Technical Committee 174-SCC (Vol. 23). RILEM publications.51
- [52] Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). *Supplementary cementitious materials*. **Cement and concrete research**, 41:12, (2011) 1244-1256.
- [53] Taylor, R., Richardson, I. G., & Brydson, R. M. D. *Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement–ground granulated*

- blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag. Cement and Concrete Research*, 40:7, (2010) 971-983.
- [54] Carrasco, M. F., Menéndez, G., Bonavetti, V., & Irassar, E. F. *Strength optimization of “tailor-made cement” with limestone filler and blast furnace slag. Cement and Concrete Research*, 35:7, (2005) 1324-1331.
- [55] Menéndez, G. V. B. B., Bonavetti, V., & Irassar, E. F. *Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. Cement and Concrete Composites*, 25:1, (2003) 61-67.
- [56] De Weerd, K., Kjellsen, K. O., Sellevold, E., & Justnes, H. *Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. Cement and concrete composites*, 33:1, (2011) 30-38.
- [57] Marković, I. *High-performance hybrid-fibre concrete: development and utilisation*. IOS Press., (2006)
- [58] Vandewalle, L., Postcracking behaviour of hybrid steel fiber reinforced concrete. In *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures–FraMCoS*, in: *Proceedings of the 6th International Conference, Catania, Italy, (2007)*, pp. 17-22.
- [59] Jeenu, G., Reji, U. R., & Prakash, V. S. (2007, August). Flexural behavior of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. In *Proceedings of the International Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore*. 59
- [60] Akcay, B., & Tasdemir, M. A. *Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. Construction and Building Materials*, 28:1, (2012) 287-293.
- [61] Rambo, D. A. S., de Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2014). Effect of steel fiber hybridization on the fracture behavior of self-consolidating concretes. *Cement and Concrete Composites*, 54, 100-109. 61
- [62] Taylor, M., F.D. Lydon and B.I.G. Barr, “Toughness Measurements on Steel Fibre Reinforced High Strength Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, pp. 329–340, 1997. 62
- [63] Bibm, C., & Ermco, E. (2005). EFNARC. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use*.
- [64] EFNARC, S. (2002). *Guidelines for self-compacting concrete. London, UK: Association House*, 32, 34.
- [65] Japan Society of Civil Engineers. (1984). JSCE-SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. *Concrete library of JSCE, Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete*, (3).

- [66] Sağlam, A.R. (2000). Süperakışkanlaştırıcı ve viskozite arttırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi. Sika Teknik Bülten, 2000/4, s. 9- 16. 63
- [67] Ferraris, C. F., Ferraris, C. F., Beaupr, D., Friz, Ürdü, Ürric Chapdelaine, Domone, P., Koehler, E., ... & Wallevik, O. (2004). *Comparison of concrete rheometers: International tests at MB (Cleveland OH, USA) in May, 2003*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. 64
- [68] De Weerd, K., Kjellsen, K. O., Sellevold, E., & Justnes, H. *Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements*. **Cement and concrete composites**, 33(1), (2011) 30-38. 56
- [69] Marković, I. (2006). High-performance hybrid-fibre concrete: development and utilisation. IOS Press. 57
- [70] Vandewalle, L. (2007). Postcracking behaviour of hybrid steel fiber reinforced concrete. In *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures–FraMCoS*, in: Proceedings of the 6th International Conference, Catania, Italy (pp. 17-22). 58
- [71] Jeenu, G., Reji, U. R., & Prakash, V. S. (2007, August). Flexural behavior of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. In *Proceedings of the International Conference on Our World in Concrete & Structures*, Singapore. 59
- [72] Akcay, B., & Tasdemir, M. A. *Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete*. **Construction and Building Materials**, 28:1, (2012) 287-293.
- [73] Rambo, D. A. S., de Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2014). *Effect of steel fiber hybridization on the fracture behavior of self-consolidating concretes*. **Cement and Concrete Composites**, 54, 100-109. 61
- [74] Bui, V.K., Montgomery, D., Hinczak, I., and Turner, K., “*Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete*”, **Cement and Concrete Research**, 32:9, (2002) 1489-1496.
- [75] Assaad, J., Khayat, K.H., and Daczko, J., *Evaluation of static stability of self-consolidating concrete*, **ACI Materials Journal**, 101:3, (2004) 207-215.
- [76] Bonen, D., and Shah, S.P., *Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete*, **Progress in Structural Engineering and Materials**, 7:1, (2005) 14-26.
- [77] Saak, A.W., Jennings, H.M., and Shah, S.P., *New methodology for designing self-compacting concret*, **ACI Materials Journal**, 98:6, (2001) 363-371.
- [78] Japan Society of Civil Engineers, ‘Recommendations for Design and Construction of Antiwashout Underwater Concrete’, Concrete library of JSCE, 19 (1992) 89

- [79] Ozawa, K., Sakata, N., Okamura, H., 'Evaluation of Self-Compactibility of Fresh Concrete Using the Funnel Test', *Concrete Library of JSCE*, (25) (June 1995) 59-75.
- [80] Illston, J. M., & Domone, P. L. (2004). *Their Nature and Behaviour* (Third ed.). Spon Press, London, Construction Materials.
- [81] Porter, H. F. (1910). Preparation of concrete from selection of materials to final disposition. *Journal of the American Concrete Institute* , 6, 296.
- [82] Hillerborg, A. *Analysis of fracture by means of the fictitious crack model, particularly for fibre reinforced concrete*. **The International Journal of Cement Composites**, 2:4, (1980) 177-184.
- [83] Bentur A., Mindess, S. (1990). *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. 1st ed. London and New York, Elsevier Applied Science.
- [84] Altun, F., Haktanir, T., & Ari, K. *Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams*. **Construction and Building Materials**, 21:3, (2007) 654-661.
- [85] Shah, S. P., & Rangan, B. V. *Fiber reinforced concrete properties*. In **Journal Proceedings** 68:2, (1971) 126-137.
- [86] Bantia, N., Soleimani, S. M. *Flexural response of hybrid fiber-reinforced cementitious composites*. **ACI Materials Journal**, 102:6, (2005) 382-389.
- [87] Naaman, A. E. *Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites*. **Journal of advanced concrete technology**, 1:3, (2003) 241-252.
- [88] Ganesan, N., Indira, P. V., & Sabeena, M. V. (2014). *Behaviour of hybrid fibre reinforced concrete beam–column joints under reverse cyclic loads*. **Materials & Design**, 54, (2014) 686-693.
- [89] Sun, W., Chen, H., Luo, X., & Qian, H. *The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete*. **Cement and concrete research**, 31:4, (2001) 595-601.
- [90] Ramachandran, V. S. (1996). *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*. William Andrew, pp. 462-463.
- [91] Van Der Vurst, F., Grünewald, S., Feys, D., Lesage, K., Vandewalle, L., Vantomme, J., & De Schutter, G. (2017). *Effect of the mix design on the robustness of fresh self-compacting concrete*. **Cement and Concrete Composites**, 82, (2017) 190-201.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: İzzeddin DÖNMEZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya/1993

E-posta: izzeddin.dnmz@gmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü (2012 – 2016)

Yayın: Türk K., Donmez İ. , "*Some Properties Of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete Containing Binary And Ternary Mineral Admixture*", 4th International Energy Engineering Congress, GAZİANTEP, TÜRKİYE, 24-25 Ekim 2019, pp.1052-1065