

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARMA ÇELİK LİF İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN KESME
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

EROL ÖZTEKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MART 2019

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARMA ÇELİK LİF İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN KESME
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

EROL ÖZTEKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MART 2019

Tezin Başlığı : Karma Çelik Lif İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kesme Davranışının İncelenmesi

Tezi Hazırlayan : Erol ÖZTEKİN

Sınav Tarihi : 15.03.2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kâzım TÜRK

İnönü Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Paki TURĞUT

İnönü Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

Batman Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Karma Çelik Lif İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kesme Davranışının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hemde kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Erol ÖZTEKİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARMA ÇELİK LİF İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN KESME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Erol Öztekin

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

68+xi sayfa

2019

Danışman: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), ayrışma ve segregasyon olmadan yüksek akıcılık özelliğe sahip özel bir beton türüdür. Bu çalışmada farklı boylardaki makro ve mikro çelik liflerin, karma lifli kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) taze ve sertleşmiş özellikleri ile dört noktalı eğilmeye maruz bırakılan büyük ölçekli kirişlerin kesme dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Karışımlardaki makro ve mikro çelik liflerin etkisini araştırmak için yüksek oranda su azaltan katkı hariç, karışımdaki diğer bileşenler sabit tutulmuştur. Farklı kombinasyonlarda mikro ve makro çelik lif içeren beş karışım hazırlanmış ve her karışımda çelik lif içeriği toplamda %1 oranında sabit tutulmuştur. Karma lifli kendiliğinden yerleşen betonların taze özelliklerini belirlemek için çökme-yayılma, T_{50} ve J-Halkası testleri yapıldı. Tüm karışımların 28 ve 56 gün için basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve büyük ölçekli kiriş numuneleri üzerinde kesme dayanımı testleri yapılmıştır. Sonuçta, makro çelik lif yerine, %0.25'ten daha fazla mikro çelik lifin kullanılması, genel olarak KYB'nin işlenebilirlik özellikleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olmasına rağmen, elde edilen karışımların çökme-yayılma çapı değerleri EFNARC tarafından önerilen değerler içinde kalmıştır. Ayrıca, mikro çelik lifin karışıma dahil edilmesiyle basınç dayanım değerinde pozitif bir etkiye sahipken, eğilmede çekme dayanımında azalmaya sebep olmuştur. Karma lifli KYB karışımlardan üretilen büyük ölçekli kirişlerde, tüm lif içeren kirişler lifsiz kirişlere göre daha yüksek taşıma kapasitesinin yanında, daha sünek davranış göstermişlerdir. Ayrıca, karma lifli kiriş numunelerde, makro çelik lif yerine mikro çelik lif kullanım miktarı arttıkça kirişlerde göçme sonrası oluşan çatlakların eğik kesmeden dik eğilme çatlaklarına değiştiği gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELE: Kendiliğinden yerleşen beton, karma çelik lif, işlenebilirlik, basınç dayanımı, eğilmede çekme mukavemeti, kesme dayanımı, çoklu çatlak, sehim-sertleşmesi davranışı.

ABSTRACT

Master's Thesis

INVESTIGATION OF SHEAR BEHAVIOUR OF SELF-COMPACTING CONCRETE CONTAINING HYBRID STEEL FIBER

Erol Öztekin

Inonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

68+xi pages

2019

Supervisor: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Self compacting concrete (SCC) is a special type of concrete with high deformability without segregation and good cohesiveness. In this paper, micro and macro steel fibers having different lengths were used to understand the influences of fiber addition on the fresh and hardened properties of SCC as well as shear strength of full-scale beams subjected to four point bending. All ingredients in each mixture were constant to study the effect of macro and micro fibers except for high-range water reducing admixture (HRWRA). Five mixtures containing micro and macro steel fibers in different combinations were prepared and in each mixtures the sum of the steel fiber content was kept constant as 1%. To measure the workability, slump flow diameter, T_{50} and J-ring tests were conducted. To determine the hardened properties of SCC mixtures, compressive strength, flexural tensile strength and shear strength tests using full-scale beams for 28 and 56 curing days were conducted. The results indicated that when the micro steel fiber ratio became more than 0.25%, although the fresh properties of SCC were affected negatively, the slump-flow values of all mixtures were acceptable as per the limit values of EFNARC. The micro steel fiber inclusion had positive effect on compressive strength while it caused a reduction in flexural tensile strength. In the tests of full-scale beams produced from SCC with hybrid steel fiber, all mixtures containing steel fiber had more bearing capacity than control mixtures as well as more ductility behavior. Moreover, it was observed that in beam specimens with hybrid steel fiber, the cracks occurred after failure turned to perpendicular bending cracks from inclined shear cracks when the use of micro steel fiber instead of macro steel fiber increased.

KEYWORDS: Self-compacting concrete, hybrid steel fiber, workability, compressive strength, flexural tensile strength, multiple cracking, deflection-hardening response.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi, Prof. Dr. Kâzım TÜRK'ün danışmanlığında tamamlanmıştır.

Bu çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemedi beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kazım TÜRK'e,

Tezin deneysel aşamasında ve yazımında bana yardımcı olan Sayın hocamın doktora öğrencilerinden Ceren KINA ve Mahmut BAŞSÜRÜCÜ'ye,

Tezin deneysel çalışmalarının yapılması aşamasında yardımını bir an olsun eksik etmeyen arkadaşım Furkan YAZICIOĞLU'na,

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans çalışmalarım süresince de benden desteklerini esirgemeyen değerli AİLEM'e,

teşekkür ederim.

Bu Çalışma BAP Birimi Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: FYL-2017-595

İÇİNDEKİLER

	ÖZET.....	iv
	ABSTRACT.....	v
	TEŞEKKÜR.....	vi
	İÇİNDEKİLER.....	vii
	SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
	ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
	ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1.	GİRİŞ.....	1
2.	KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
2.1.	Kendiliğinden Yerleşen Beton.....	3
2.1.1.	Giriş.....	3
2.1.2.	Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) - Tarihçe, Tanım ve Özellikler.....	3
2.1.3.	Reoloji Hakkında Genel Bilgiler ve KYB Reolojisi.....	4
2.1.4.	KYB Tasarımı - Genel Özellikler.....	7
2.1.5.	KYB'nin Reolojik Özelliklerinin Ölçüm Yöntemleri.....	15
2.2.	Lif Takviyeli Betonlar.....	22
2.2.1.	Karma Lif Kullanımının Betonarme Elemanların Kesme Dayanımına Etkisi.....	26
2.2.2.	a/d Oranının Kesme Davranışına Etkisi.....	26
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3.1.	Materyal.....	32
3.1.1.	Çimento.....	32
3.1.2.	Mineral Katkılar.....	32
3.1.3.	Agregalar.....	33
3.1.4.	Kimyasal Katkı.....	34
3.1.5.	Lifler.....	34
3.2.	Yöntem.....	35
3.2.1.	Karışımların Hazırlanması.....	35
3.2.2.	Taze Özellikler.....	36
3.2.3.	Sertleşmiş Özellikler.....	39
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	43
4.1.	Taze Özellikler.....	43
4.1.1.	Çökme yayılma ve T50 zamanı deneyi.....	43
4.1.2.	J-Halkası deneyi.....	45
4.2.	Sertleşmiş Özellikler.....	46
4.2.1.	Birim ağırlık.....	46
4.2.2.	Basınç Deneyi.....	47
4.2.3.	Eğilmede Çekme Dayanımı.....	49
4.3.	Büyük Ölçekli Kirişlerin Kesme Dayanımı.....	55
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	60
6.	KAYNAKLAR.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

a/d	Kesme açıklığı/faydalı yükseklik
c	Donatı aralığı
D_{af}	Agrega çapı
d_m	Yayılma çapı X yönü
d_r	Yayılma çapı Y yönü
E	Elastisite modülü
$H1$	L-kutusu deneyi kapak arkası beton yüksekliği
$H2$	L-kutusu deneyi kapak önü beton yüksekliği
KYB	Kendiliğinden yerleşen beton
KLKYB	Karma lifli kendiliğinden yerleşen beton
LVDT	Değişken diferansiyel transformatör
L/d	Liflerin narinliği
μ	Plastik vizkozite
M_i	Agregaların tamamının geçtiği üst elek boyutu
M_{i-1}	Agregaların üzerinde kaldığı elek boyutu
M	Moment
nabi	L-kutusu aparatının geçiş yeteneği
Pa	Paskal
Pa.s	Paskal.saniye
PP	Polipropilen
SA	Süperakışkanlaştırıcı
SR	Kendiliğinden yerleşen betonun ayrışan kısmı
T_0	Eşik kayma gerilmesi
VMA	Vizkozite artırıcı veya düzenleyici katkılar
W_c	Elek üzerindeki beton ağırlığı
W_p	Boş kap ağırlığı
W_{ps}	Elekten geçen beton ağırlığı
σ	Gerilme
δ	Sehim miktarı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	KYB için hedef plastik viskozite, eşik kayma gerilmesi bölgesi ve en az yayılma çapı değerleri (Nielsson ve Wallevik, 2003).....	6
Şekil 2.2.	Normal sıkıştırma işlemi gören normal beton ve kendiliğinden yerleşen betonun tipik karışım oranları (Holschemacher ve ark., 2002).....	8
Şekil 2.3.	Kendiliğinden yerleşebilirliğin başarılmaması için temel yöntem (Okamura ve Ozawa, 1995).....	12
Şekil 2.4.	Japon tasarım yöntemine göre KYB'nin bileşenleri.....	13
Şekil 2.5	Donatı açıklığı (c) / agrega çapı (Daf) oranı - bloklanma oranı (η _{bi}) arasındaki ilişki (Grünewald, 2004).....	14
Şekil 2.6.	Viskozite - akış hızı ilişkisi (EFNARC, 2005).....	15
Şekil 2.7.	Çökme-yayılma testi (a) ve J-halkalı çökme-yayılma testi (b) (Groth, 2000-a).....	17
Şekil 2.8.	V-hunisi test aparatı ve boyutları (EFNARC 2005).....	18
Şekil 2.9.	L-kutusu deney aparatı ve boyutları (EFNARC 2005).....	19
Şekil 2.10.	Elek ayırma testi ve aparatları (EFNARC, 2005).....	21
Şekil 2.11.	Değişik tipte uygulamalar için KYB sınıfları (EFNARC 2005).....	22
Şekil 2.12.	a/d oranına bağlı göçme modları ve betonarme kirişlerin kesme ve moment taşıma kapasitesi diyagramı(MacGregor, 1997).....	27
Şekil 2.13.	Düzgün yayılı yüklü kirişteki asal çekme ve basınç gerilmeleri(Ersoy, 2001).....	28
Şekil 3.1.	Lifli KYB üretiminde kullanılan agregalar.....	33
Şekil 3.2.	Çalışmada kullanılan agregalara ait elek analizi grafiği.....	33
Şekil 3.3.	Çalışmada kullanılan lifler; a) DRAMIX 65/60, b) DRAMIX OL 13/16.....	34
Şekil 3.4.	Büyük ölçekli kiriş numunelerinin kür aşamaları; a) kalıptan çıkarılmış hali, b) geotekstil keçe ile örtülmüş hali, c) naylon ile kapatılmış hali.....	36
Şekil 3.5.	Çökme yayılma tablası.....	37
Şekil 3.6.	J-Halkalı çökme yayılma testi (Groth, 2000).....	39
Şekil 3.7.	Basınç test cihazı.....	39
Şekil 3.8.	3 ve 4 Nokta eğilme deneyi düzeneği, moment ve gerilme değerleri (Topçu, 2009).....	40

Şekil 3.9	Üretilen kiriş numunelerinin: a) Üretim aşamaları, b) Test düzeneği, c) Donatı, boyut ve test yükleme detayları.....	41
Şekil 3.10.	Süneklik katsayısının tanımı (Azizinamini, Pavel, Hatfield ve Ghosh, 1999).....	42
Şekil 4.1.	Taze KLKYB deneyleri: a) Çökme-yayılma ve T_{50} zamanı deneyi, b) J-Halkası deneyi.....	43
Şekil 4.2.	Mikro lif içeriğinin karma lifli KYB karışımlarının işlenebilirlik özelliklerine etkisi: a) Çökme yayılma , b) T_{50} süresi , c) J-Halkası.....	45
Şekil 4.3.	Karma lifli KYB karışımların işlenebilirlik özellikleri arasındaki ilişki: a) J-Halkası- Çökme yayılma, b) J-Halkası- T_{50}	46
Şekil 4.4.	Lif içeriğinin karma lifli KYB karışımlarının birim ağırlıklarına etkisi.....	47
Şekil 4.5.	Karma lifli KYB karışımlarının basınç dayanımı üzerinde lif içeriğinin etkisi.....	49
Şekil 4.6.	Karışımlara ait eğilme deneyi düzeneği ve ölçüleri.....	49
Şekil 4.7.	Karma lifli KYB karışımlarının eğilme dayanımı üzerinde lif içeriğinin etkisi.....	51
Şekil 4.8.	Karışımlara ait eğilme dayanımı ve sehim değerleri grafiği.....	52
Şekil 4.9.	Her bir karışıma ait 28 günlük yük-sehim eğrisi, b) Her bir karışıma ait 56 günlük yük-sehim eğrisi.....	53
Şekil 4.10.	Karışımlara ait eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri grafiği.....	54
Şekil 4.11.	a) %1 makro çelik lif içeren kirişin eğilmede çekme testi sonrası orta nokta çoklu çatlak görünümü, b)%0,75 makro çelik lif içeren kirişin eğilmede çekme testi sonrası orta nokta çoklu çatlak görünüşü.....	55
Şekil 4.12.	Karma lifli kendiliğinden yerleşen beton karışımların kesme dayanımları.....	57
Şekil 4.13.	Karma çelik lifli kendiliğinden yerleşen beton kiriş numunelerin yük-sehim eğrileri.....	57
Şekil 4.14.	Karma lifli kendiliğinden yerleşen büyük ölçekli beton kiriş numunelerinin göçme mekanizmaları ve çatlak düzenleri	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Viskozite arttırıcı toz malzemelerin sınıflandırılması (EFNARC, 2005).....	10
Çizelge 2.2.	KYB için test özellikleri ve yöntemler (EFNARC, 2005).....	16
Çizelge 2.3.	KYB sınıfları (EFNARC, 2005).....	21
Çizelge 2.4.	Betonda kullanılan bazı liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Alyousif vd., 2015).....	23
Çizelge 2.5.	Çeşitli lif tiplerinin kullanım alanları (Avar, 2006).....	24
Çizelge 2.6.	Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri (Sarı, 2013).....	24
Çizelge 3.1.	Çimento ve uçucu külün kimyasal ve fizikse kompozisyonları.....	32
Çizelge 3.2.	Çalışmada kullanılan çelik liflerin özellikleri.....	34
Çizelge 3.3.	Çalışmada üretilen karışımların isimleri ve içerdikleri bileşen miktarları (kg/m ³).....	35
Çizelge 3.4.	Kiriş örneklerine ait boyut ölçüleri ve a/d oranı.....	42
Çizelge 4.1.	Taze özelliklere ait deney sonuçları ve alt üst limitler.....	44
Çizelge 4.2.	KLKYB'lerin 28 ve 56. Günlerdeki ortalama eksenel basınç dayanımı sonuçları.....	48
Çizelge 4.3.	Karışımlara ait eğilmede çekme dayanımı, maksimum yük ve maksimum yükteki deplasman değerleri	50
Çizelge 4.4.	KLKYB karışımların, kiriş kesme dayanımı yük , akma rijitliği sonuçları.....	56
Çizelge 4.5.	KLKYB karışımların, kiriş kesme dayanımı sehim, enerji sönümleme ve göçme modları.....	56

1.GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), deprem bölgelerindeki çok sık donatı aralıklarının olduğu yapılarda kullanılmak amacıyla 1980'li yılların sonlarında Japonya'da geliştirilmiş olup, yüksek dayanım ve dayanıklılık elde etmek açısından beton teknolojisinin önemli buluşlarından (Okamura H., 2003).

Kendiliğinden yerleşen taze beton yeterli homojenliğini korurken, sadece ağırlık hareketi vasıtasıyla kalıbı tamamen doldurmak ve donatı çubuklarını sarmak kabiliyetine sahip bir beton olarak da tanımlanır. KYB' de kimyasal katkı maddeleri pahalı ve bunların kullanımı maliyeti arttırmaktadır. Ancak, elde edilmesi ucuz ve kolay olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu veya kireçtaşı tozu gibi mineral katkı maddelerinin kullanımı beton maliyetini arttırmaksızın karışım akıcılığını arttırabilir. Ayrıca, işçi maliyetindeki tasarruf artan maliyeti dengeleyebilir. Kendiliğinden yerleşen betonun en yaygın kullanımı donatıların çok yoğun olduğu ve vibratörlerin ulaşmadığı elemanlarda görülmektedir. Yüksek perdelerin üretiminde ve betonarme yapıların onarım ve güçlendirme işlerinde kendiliğinden yerleşen beton kullanılmasına başlanmıştır. Son yıllarda ise kendiliğinden yerleşen betonun yeni bir kullanım alanı olarak prefabrik sektörü öne çıkmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonun bir diğer yararı işçiliği azaltırken yapım hızını artırmasıdır. Bir yapıda döşeme ve düşey elemanların üretiminin geleneksel betonla üretime göre kendiliğinden yerleşen beton kullanılması durumunda 1/5 oranında daha kısa sürede gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir. Ancak kendiliğinden yerleşen betonun tüm inşaatlarda yaygın olarak kullanılmasına henüz geçilememiştir (Berbergil, 2006).

Beton kolay işlenebilirliği, düşük maliyeti ve kolay bulunabilmesi ile günümüzün en sık kullanılan yapı malzemesidir. Geleneksel beton; agrega, çimento ve suyun karıştırılmasıyla üretilir. Beton, üzerinde yapılan çalışmalarla basınç mukavemeti günden güne artan ve bu özelliğinden fazlasıyla yararlanılan bir malzemedir. Ancak artan basınç dayanımı betonun diğer mekanik kusurlarını kapatmamaktadır. Yüksek dayanımın yanında boşluk oranının minimuma indirilmesiyle basınç dayanımı ve durabilitesi artan betonun çekme dayanımı hep düşük seviyelerde kalmıştır. Bununla beraber artan basınç dayanımları betonu daha da gevrek bir malzeme haline getirmiştir (Sarı, 2013).

Betonda dayanım arttıkça eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta, tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve gevrek bir kırılma meydana gelmektedir. Betonda meydana gelen bu problemleri çözmek, yani betonun yüksek basınç dayanımının yanında, çekme dayanımını ve sünekliğini de artırmak için betonda lif kullanılmaktadır. Lifli betonlar, normal veya yüksek dayanımlı betonlara lif eklenmesiyle elde edilen kompozit malzemelerdir. Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polipropilen, karbon ve

alkali dirençli cam liflerdir. Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır (Avar, 2006).

Bununla beraber betonarme elemanların kesme davranışları 100 yıldan fazla bir süredir araştırmacılar tarafından yaygın olarak incelenmektedir. Betonarme elemanların kesme davranışlarını kesin olarak belirlemek için rasyonel olmayan metotlar geliştirilmiş; ancak bu metotlar kesme davranışıyla ilgili bilgi verirken; uygulanan yükün tipine, elemanın kesitine ve kesme açıklığı-etkili derinlik oranı gibi birçok parametreye bağlı olmuştur. Ayrıca, betonarme elemanların kesme mukavemetini hesaplayan güncel formüller, ikiden fazla faktör tarafından değiştirilebilir. Ancak aynı formüllerle hesaplanan eğilme mukavemeti değerleri değişimi %10'dan farklı olmamaktadır (Bentz vd., 2006; Collins vd., 2008). Saf eğilme etkisinin aksine, deneyler saf kesme etkisine maruz betonarme kirişler üzerinde yürütülemez. Bu yüzden genelde kesme davranışını önceden tahmin etmek kolay değildir, çünkü; tepkiler kiriş kesme açıklığı boyunca kesitten kesite değişir (Collins vd., 2008).

Yüksek dayanımlı betonlar; eleman kesitlerinin azalmasına, daha büyük açıklıkların geçilmesine ve birçok alt yapı elemanının durabilite özelliklerinin gelişmesine izin verdiği için popülerlikleri gün geçtikçe artmaktadır. Ancak geleneksel betonların kesme kapasitesi, beton dayanım sınıfının artmasıyla artmamaktadır. Ayrıca, beton yapılarının kesme göçmeleri genellikle gevrek olmakta ve artan basınç dayanımıyla birlikte gevreklik de önemli ölçüde artmaktadır. Yüksek dayanımlı betonların gevrekliği, gerilme şekil değiştirme eğrilerinin tepe noktasından sonraki keskin düşüşlerden de ayrıca gözlemlenebilir (Nilson, 1985; Swamy, 1985). Bununla birlikte, dayanım ile süneklik arasındaki ters ilişkinin, çimentolu kompozitlere lifler dahil edildiği zaman ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. Rastgele ve/veya düzenli yönlenmiş lifler, aşırı yüklemelere karşı koyar, mikro çatlakları engeller, gevrek ve ani kırılğan göçmeleri yüksek derecede enerji absorbe eden sünek göçmelere çevirir. Gevrek davranışta olduğu gibi, sünek davranıştaki bu gelişme de gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin tepe noktasından sonra artışa, gerilme-uzama eğrilerinin bölgesel olarak azalmasına diğer malzemelerde olduğu gibi sebep olur. Bu doğrultuda, yüksek performanslı lif katkılı çimento esaslı kompozitler geleneksel beton karışımlarının gevrekliğini azaltmak için bir çok çalışmanın sonucu olarak ortaya çıkmıştır (Naaman vd., 2003).

Bu tezde, yaklaşık aynı taze ve sertleşmiş özelliklere sahip, karma lifli (makro ve mikro) kendiliğinden yerleşen beton karışımlardan üretilen kiriş numunelerinin kesme dayanımları incelenmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, değişken parametre olarak, makro ve mikro lif miktarları esas alınmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton

2.1.1 Giriş

Bu bölümde kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) taze hal özellikleri hakkında literatür özetlenmiş, KYB reolojisi hakkında bilgi verilmiş, KYB'nin işlenebilirliğine yönelik test yöntemleri detaylı bir şekilde tanıtılmıştır.

2.1.2 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) - Tarihçe, Tanım ve Özellikler

İlk defa 1986 yılında Japonya'da Tokyo Üniversitesi'nde geliştirilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB)'nin ilk prototip uygulaması 1988 yılında yapılmıştır (Okamura ve Ouchi, 1999). KYB, Japonya'da su altında beton dökümü konusunda yapılan çalışmaların bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır (Tanaka ve ark., 1993). KYB hiçbir iç veya dış sıkıştırma enerjisi uygulanmadan kendi ağırlığı altında akabilen, dar donatı engelleri arasından yüksek geçiş yeteneğine sahip, ayrışmaya karşı yüksek dirençli, ayrışma ve aşırı terleme yapmadan kalıpta tüm boşlukların doldurulabildiği özel bir beton türü olarak tanımlanabilir (Okamura, 1997, PCI, 2003). KYB'de sıkıştırma enerjisine gerek duyulmadığından, işçilikten büyük oranda tasarruf edilerek verimlilik artırılabilir. Bu açıdan prefabrik beton endüstrisinde büyük kullanım potansiyeli vardır. Prefabrik beton endüstrisinde genellikle prefabrik yapı elemanları titreşimli kalıplarda üretildiğinden, zamanla bu kalıplar titreşim etkisi ile yıpranmaktadır. KYB'nin prefabrik endüstrisinde kullanımı ile kalıp yıpranmalarının önüne geçilebilir. Ayrıca KYB, vibratör ile sıkıştırma uygulamanın çok zor olduğu yoğun donatılı ve dar kesitlerde büyük avantaj sağlar. Kimyasal katkıların ve portland çimentosu kullanımının neden olduğu yüksek KYB maliyetini azaltmak için, daha iyi mühendislik özellikleri elde etmek için mineral katkıları (uçucu kül, silika dumanı, doğal puzolan, vb.) kullanılmaktadır (Turk, 2012). Ülkemiz gibi topraklarının büyük bir bölümü yıkıcı depremlerin tehdidi altında bulunmakta olup, bu yerlerde, özellikle kolon - kiriş birleşim bölgelerinde genellikle yoğun donatı kullanılmaktadır. Bu gibi yapı elemanı bölgelerinde betonun yerine yerleştirilmesinde büyük sorunlarla karşılaşmakta, yeterli sıkıştırma çoğu kez sağlanamamaktadır. Bu bölgelerde boşlukların varlığı mafsallı oluşumuna neden olmaktadır. KYB'nin bu gibi yapı bölgelerinde, uygun donatılandırma ile birlikte kullanımı, depreme dayanıklı yapı tasarımı amacının gerçekleştirilebilmesi açısından da üstünlük sağlamaktadır (Yardımcı, 2007).

KYB'de akıcılık özelliği yeni nesil süperakışkanlaştırıcıların kullanımı, inert veya puzolanik mineral katkıların kullanımı ve/veya viskozite düzenleyici kimyasal katkıların

kullanımı ile gerçekleşmektedir. Bunların yanında KYB'nin kendine özgü ayrı bir beton tasarım felsefesi vardır. Göz önünde bulundurulması gereken önemli bir nokta akıcı kıvamdaki her betonun KYB olarak sınıflandırılmayacağıdır (Yardımcı, 2007). KYB, PCI (2003)'e göre doldurma yeteneği, geçiş yeteneği ve stabilite ile ilgili işlenebilirlik şartlarını tam olarak sağlayabilmelidir. PCI 2003'e göre doldurma yeteneği, taze betonun stabilitesini kaybetmeden kendi ağırlığı etkisinde ne kadar hızlı akabildiği ve donatı gibi dar engeller arasını tam olarak kendi ağırlığı altında ne derecede doldurabildiğidir. Geçiş yeteneği, taze betonun donatılar arasından takılmadan geçmesi ve hiçbir sıkıştırma enerjisi uygulanmadan donatıları tamamen homojen bir şekilde sarabilmesidir. Stabilite ise ayrışmaya karşı yüksek direnci ve taşıma ve yerine yerleştirmeden sonra ayrışmadan homojenliğini koruyabilmesidir. Bu özelliklerin sağlanması KYB'yi ana hatlarıyla geleneksel sıkıştırma işlemi uygulanan betonlardan (akıcı kıvamda olsalar dahi) ayırmaktadır (PCI, 2003). KYB'nin ana tanımlayıcı özellikleri olan doldurma yeteneği, geçiş yeteneği ve stabilitesinin göreceli olarak değerlendirilebilmesi için bir takım test yöntemleri geliştirilmiştir. Fakat bu ana özellikleri belirlemeye yönelik pratik ve tek bir deney yöntemi henüz geliştirilememiştir (Yardımcı, 2007). Takip eden kısımlarda KYB'nin taze haldeki davranışını kontrol eden ana özellikler hakkında bilgi verilmiş ve daha sonra KYB'nin işlenebilirliğine yönelik sıkça kullanılan bazı test yöntemleri tanıtılmıştır.

2.1.3 Reoloji Hakkında Genel Bilgiler ve KYB Reolojisi

Reoloji bilimi, malzemelerin gerilme altında akış ve sehimu ile ilgili bir bilim dalıdır ve gerilme, birim sehim, birim sehim hızı ve zaman parametreleri arasında ilişkilerle ilgilenir (Tattersall ve Banfill, 1983). Reolojik parametrelerin ölçülmesi için reometre denilen cihazlar kullanılır. Reometre ile reolojik ölçümlerde taze beton su içerisinde katı parçacıklardan oluşan bir süspansiyon olarak göz önüne alınır. Böylece karışım özelliklerinin akış üzerindeki etkileri reometre ile ölçümler yapılarak belirlenebilir (Yardımcı, 2007). Ticari olarak kullanılan ve beton için literatürde en çok rastlanan reometreler BML-Viskozimetresi, BTRHEOM ve UBC-Reometresi'dir. Bunlardan başka değişik tiplerde viskozimetre ve reometreler de vardır (Tattersall, 1991). Su gibi çok akıcı sıvılarda uygulanan kayma gerilmesi ile kayma sehimu hızı arasında sabit bir oran vardır. Bu iki parametre arasındaki sabit oran plastik viskozite olarak adlandırılır (Yardımcı, 2007).

Newtoniyen davranış gösteren akışkanlarda, akışkanın akışa geçebilmesi için aşılması gereken eşik bir gerilme değeri bulunmamaktadır. Ancak birçok malzeme, akış davranışı olarak Newtoniyen davranışa uymaz. Genellikle malzemenin akışa geçebilmesi için aşılması gereken eşik bir gerilme değeri vardır. Böylesi malzemelerin akış davranışını ifade

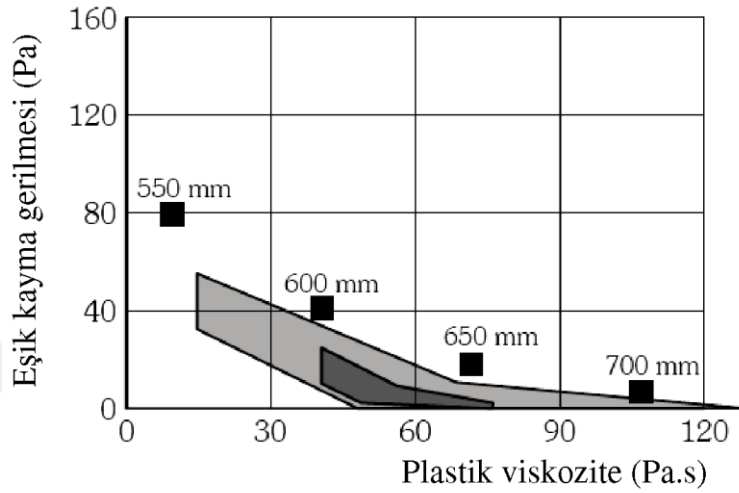
edebilmek için Bingham modeli kullanılır. Bingham modeli süspansiyonların akış davranışını daha genel olarak açıklamaktadır. Eğer göz önüne alınan akışkanın akışa geçebilmesi için herhangi bir eşik zorlamanın (gerilmenin) aşılması gerekmiyorsa Bingham modeli Newtoniyen modele dönüşür. Taze betonun da akışa geçebilmesi için aşılması gereken bir eşik kayma gerilmesi vardır ve akış davranışı genel olarak Bingham modeli ile ifade edilebilir. Taze betonun şekil alabilme yeteneği, temel olarak akmaya başlaması gerekli olan ve eşik kayma gerilmesi olarak tanımlanan minimum kayma gerilmesi, viskozitesi ve kohezyonuna bağlıdır. Taze betonun reolojik davranışını tanımlamak için Bingham modeline göre bu parametreler kullanılır (Tattersall ve Banfill, 1983). Bir süspansiyonda artan sehim hızlarına karşılık kayma direncinin artış miktarı artabilir ya da azalma gösterebilir. Kayma kalınlaşması ve kayma incilmesi olarak adlandırılan bu davranışların da göz önüne alınabilmesi için, Bingham modeli daha sonradan (plastik viskozitenin kayma parametresine bağımlılığı göz önüne alınarak) Herschel-Bulkley modeli ile daha da geliştirilmiştir (Yardımcı, 2007).

Sabit bir kayma hızı altında, süspansiyondaki parçacıkların yapısı zamana bağlı olarak değişebilir. Tiksotropik malzeme denilen bazı malzemelerde parçacıkları bir arada tutan zayıf bağlar malzeme deforme edildiğinde (örneğin süperakışkanlaştırıcı katkılı akıcı bir çimento hamuru karıştırıldığında) bozulur ve yeniden akıcılık kazanır. Malzeme deforme edilmeden kendi haline bırakıldığında bu bağlar yeniden kurulmaya başlar. Bunun tersi olarak kendi haline bırakıldığında akıcılık özelliği kazanıp deforme edildiğinde (örneğin karıştırıldığında) sertleşen malzemeler de vardır. Bu malzemeler de anti-tiksotropik davranış göstermektedirler (Grünwald, 2004).

Yapılan araştırmalar KYB'nin eşik kayma gerilmesinin (T_0) normal betona göre oldukça düşük, plastik viskozitesinin (μ) ise daha yüksek olduğunu göstermektedir. Fakat T_0 ve μ değeri ölçümde kullanılan cihaza göre değişiklik göstermektedir (Gomes, 2002). Sadran ve ark. (1996) BTRHEOM reometresiyle KYB'nin eşik kayma gerilmesini 500 Pa'dan küçük ve plastik viskozitesinin ise 100-200 Pa.s aralığında olduğunu belirtmiştir. Wallevik (2003) ise KYB'ler üzerinde yapılan reolojik ölçümlere göre plastik viskozitenin 7-160 Pa.s ve eşik kayma gerilmesinin ise 0-60 Pa arasında değiştiğini belirtmiştir.

Nielsson ve Wallevik (2003) BML-Viskozimetresi ile yaptıkları bir çalışmada değişik kompozisyonlara sahip KYB'ler için ölçülen plastik viskozite ile eşik kayma gerilmesi arasındaki uygun bölgeleri Şekil 2.1'deki gibi belirlemişlerdir. Ayrıca yayılma deneyi ile bu bölgeler için en az yayılma çapı değerlerini de ölçmüşlerdir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, yayılma çapındaki 5 cm gibi az görünen yayılma çapı farklılıkları karışımın plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi gibi reolojik parametrelerinde belirgin farklılıkların olduğunu göstermektedir. Bu araştırmacılara göre en uygun kendiliğinden yerleşebilirlik Şekil 2.1'de

600 - 650 mm yayılma çapının elde edildiği bölgede koyu renkli alanla gösterilen plastik viskozite - eşik kayma gerilmesi değerlerinde elde edilmiştir. Ayrıca bu araştırmacılar kendiliğinden yerleşebilirlik için ölçülen en az yayılma çapını da göstermişlerdir. Ancak, araştırmacıların sonuçlarının karışımından karışıma büyük farklılıklar gösterebileceği de unutulmamalıdır.



Şekil 2.1. KYB için hedef plastik viskozite, eşik kayma gerilmesi bölgesi ve en az yayılma çapı değerleri (Nielsson ve Wallevik, 2003)

Bingham modelinin KYB'nin akış davranışını yeterince tarif eden bir model olduğu (Wallevik, 2000) ve bunun yanında KYB'nin Bingham modelinin biraz daha gelişmiş olan Herschel-Bulkley modeline uyduğu (kayma kalınlaşması) belirtilmektedir (De Larrard ve ark., 1999). Temel olarak taze betonun işlenebilirliğini kontrol eden iki parametre vardır. Bunlar eşik kayma gerilmesi (içsel kayma direnci) ve plastik viskozitedir (Aitcin, 1998). Reometreler ve viskozimetre ölçümleri, KYB'nin akış davranışını tanıma açısından çok etkili olmakla birlikte bir çok faktörden etkilenmektedir. Öte yandan bu cihazlar oldukça pahalıdır ve kullanımları uzman personel gerektirmektedir. Bu nedenle KYB'nin akış davranışında önemli olan iki parametre olan eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite daha basit deneylerle göreceli olarak kontrol edilerek uygun tasarım yapılmaktadır. KYB için EFNARC 2002, 2005 VE PCI 2003 gibi tam bir standart niteliğinde olmamakla birlikte bazı tasarım rehberleri oluşturulmuştur. Bu tasarım rehberlerinde KYB'nin akış özellikleri, doldurma yeteneği, viskozite, geçiş yeteneği ve stabilitenin göreceli olarak ölçülmesine dayanan bir takım test yöntemleri ile kontrol edilmektedir. İleriki kısımlarda öncelikle KYB'nin tasarım esasları hakkında kısa bilgi verildikten sonra KYB'nin akış özelliklerine yönelik olan ve EFNARC (2005)'de tarif edilen test yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.1.4 KYB Tasarımı - Genel Özellikler

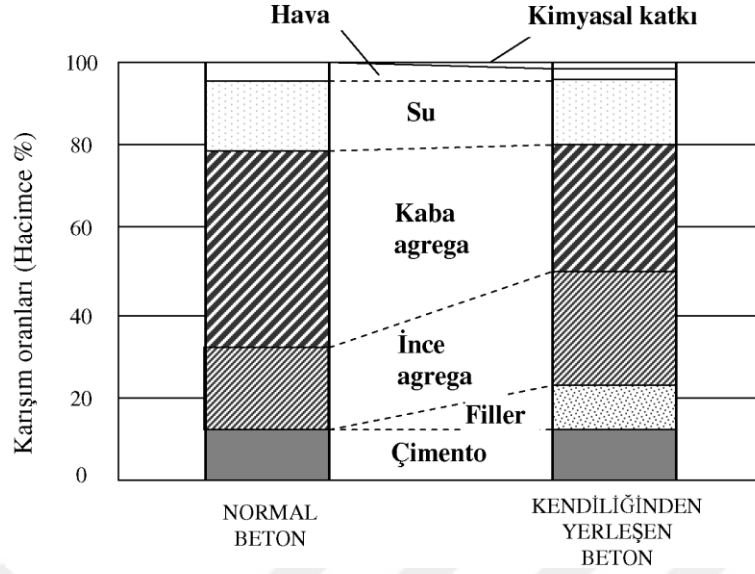
2.1.4.1 Karışım özellikleri

KYB'yi karakterize eden genel özellikler yüksek akıcılık, yüksek stabilite ve düşük bloklanma riskidir (engeller arasından iyi geçiş yeteneği). Bu özelliklerin sağlanması için taze beton akıcı kıvama, optimum viskoziteye ve kohezyona sahip olmalıdır. Bunların sağlanması için karışım tasarımı iyi yapılmalı ve uygun malzemeler uygun oranlarda kullanılmalıdır. Göz önünde bulundurulması gereken önemli bir nokta geleneksel sıkıştırma işlemi uygulanacak şekilde tasarlanmış bir betonun sadece süperakışkanlaştırıcı ilavesi ile KYB haline getirilemeyeceğidir. Genel tasarım ilkeleri; yüksek hamur hacmi, düşük kaba agregası içeriği, düşük maksimum agregası çapı, süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı ve viskozite arttırıcı inert veya puzolanik toz malzemeler ve/veya viskozite düzenleyici kimyasal katkıları kullanımıdır.

KYB'de hamur hacmi genellikle beton hacminin % 35 - % 40'ı arasındadır. Bu hamur hacmi parçacık boyutu 100 - 125 µm'dan küçük toz malzemelerin 400 - 650 kg/m³ dozajında sağlanabilmektedir. Toz malzeme içeriğinin hepsi çimento olarak kullanılmayıp uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, kırma taş tozu ve kuvars tozu gibi inert veya puzolanik mineral katkıları da toz malzeme olarak kullanılır. Genel olarak çimento dozajı 200 - 400 kg/m³ arasında olmaktadır. Genellikle su / toz malzeme oranı ağırlıkça 0,25 - 0,40 arasında değişmektedir (Domone ve Chai, 1996, Skarendahl ve Petersson, 2000).

Kaba agregası hacmi, normal betona oranla daha azdır ve toplam beton hacminin % 30 - % 45'i arasında olması önerilmektedir. Maksimum agregası çapı 10 - 20 mm arasında olması önerilir. Genellikle ince agregası hacmi toplam harç hacminin % 40'ı ile % 50'si arasında değişmektedir. Genel olarak hacimce kaba agregasının toplam agregaya oranı 0,44 ile 0,64 arasındadır (Domone ve Chai 1996, Skarendahl ve Petersson, 2000, Saak ve ark. 2001, Su ve ark. 2001). Burada verilen oranların literatürden derlenen bazı karışım oranlarına göre verildiği, geneli yansıttığı fakat kesin ve değişmez değerler olmadığı unutulmamalıdır.

KYB'de kullanılan malzemeler temelde normal beton ile aynıdır. Ancak KYB'yi normal betondan ayıran bazı anahtar tasarım parametreleri vardır. Genel olarak KYB'yi normal betondan ayıran belli başlı tasarım parametreleri normal betona göre iyi seçilmiş agregası granülometrisidir.



Şekil 2.2. Normal sıkıştırma işlemi gören normal beton ve kendiliğinden yerleşen betonun tipik karışım oranları (Holschemacher ve ark., 2002)

Şekil 2.2’de geleneksel sıkıştırma enerjisi uygulanan normal beton ile kendiliğinden yerleşen betonun tipik karışım oranları şematik olarak görülmektedir. Şekil 2.2’den görüldüğü gibi, tipik bir KYB karışımında normal betona göre kaba agrega miktarı azaltılmış ve ince agrega miktarı arttırılmıştır. Ayrıca, şekilde filler olarak gösterilen, inert veya puzolanik toz malzemeler kullanılmaktadır. Karışımında toz malzeme miktarının arttırılması, karışımın viskozitesini artırır ve eşik kayma gerilmesini düşürür. Böylece KYB karışımın akıcılığı arttırılabilmektedir (Toyoharu ve ark., 1998). İri agrega / kum oranının normal sıkıştırma işlemi gören betonların işlenebilirlik ve mekanik özellikleri üzerindeki önemli etkisi daha önce detaylı bir şekilde incelenmiştir (Akman, 1972). İnce agreganın kaba agregaya oranı KYB’nin reolojik özellikleri açısından çok önemlidir. KYB karışımın kaba agrega miktarı arttırıldıkça betonun akıcılığı ve kendiliğinden yerleşebilirliği azalmaktadır (Toyoharu ve ark., 1998). Karışımında ince agrega miktarının arttırılması akıcılığı arttırmakta ve KYB’nin dar engeller arasından geçerken bloklanma riskini düşürmektedir (Gomes, 2002). KYB’nin reolojik özellikleri karışımındaki katı parçacıkların (agregaların) miktarından değil aynı zamanda katı parçacıkların boyut, şekil ve yüzey yapısından da önemli derecede etkilenmektedir. Geiker ve ark. (2002) kaba agrega miktarı ve şeklinin KYB’nin reolojik özelliklerine etkisi üzerinde BML viskozimetresi kullanılarak yaptıkları deneysel bir çalışmada agrega tipinden bağımsız olarak karışımında kaba agrega miktarı arttıkça KYB karışımın plastik viskozitesi ve eşik kayma gerilmesinin net bir şekilde artış gösterdiğini belirlemişlerdir.

KYB karışımların akıcılığının artırılması ve geçiş yeteneğinin geliştirilmesi için yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar kullanılır. Ancak, kendiliğinden yerleşebilirlik tasarım hedefine göre özel olarak tasarlanmamış bir beton karışımı sadece yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kullanarak KYB haline getirmek mümkün değildir. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların bilinçsizce kullanımı ile karışımda yoğun ayrışma ve terleme gözlenebilir. Ayrışma ve terlemenin kontrol altına alınabilmesi için viskozite arttırıcı (veya düzenleyici) katkıları (viscosity-modifying agents, VMA) kullanılır (Okamura ve Ozawa, 1995). VMA'lar kimyasal katkıları şeklinde olabildiği gibi inert veya puzolanik özelliğe sahip, parçacık boyutu 0,125 mm'nin altında taş tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb. malzemeler de olabilir (EFNARC, 2005).

Genel olarak KYB karışımı düşük eşik kayma gerilmesine ve optimum viskoziteye sahip olmalıdır ve toz tipi ve kimyasal tipte VMA'ların uygun kombinasyonda kullanılması gereklidir (Sonebi ve ark., 2000). KYB'nin stabilitesi su kuma ve ayrışmaya karşı direncini tanımlamaktadır. KYB'nin stabilitesi karışımın kohezifliği ve viskozitesi ile yakından ilişkilidir (Khayat, 1998). Stabilitesi yüksek KYB karışımları, VMA'ların ve yeni nesil süperakışkanlaştırıcıların birlikte uygun oranlarda kullanımı ile oluşturulabilir (Khayat ve Guizani, 1997). Suda çözünebilen VMA'lar doğal polimerler (nişasta, çeşitli sakız türevleri vb.), yarı sentetik polimerler (nişasta ve türevleri, selüloz eter türevleri vb.) ve sentetik polimerlerden (etilen ve vinil kökenli) oluşmaktadır (Khayat, 1995). VMA'ların kullanımı çimento hamurunun sıvı fazını etkiler. VMA'ların suda çözünebilen polimerleri serbest suyu emerek serbest su miktarını azaltır ve hamurun viskozitesini artırır. VMA dozajının artırılması, karışımın sıvı fazının viskozitesini artırır ve böylece katı parçacıkların süspansiyon içerisinde askıda kalması sağlanır. Aynı zamanda VMA dozajının artırılmasıyla hamur fazının eşik kayma gerilmesi artar ve bu durum betonun şekil alabilme yeteneğini sınırlar. Bundan dolayı, göreceli olarak düşük eşik kayma gerilmesinin elde edilebilmesi için aynı zamanda yeni nesil süperakışkanlaştırıcıların da kullanılması gereklidir. Böylece stabilitede bir kayıp olmadan karışımın akıcılığı sağlanabilir. Ancak, süperakışkanlaştırıcıların aşırı dozajda kullanımı ile karışımın kohezyonu düşer ve ayrıca ihtiyaç fazlası olarak artan serbest su miktarı nedeniyle su kuma gözlenebilir. Ayrıca süperakışkanlaştırıcılar betonun priz süresini uzatabilir. Bundan dolayı betonun uzun süre stabilitesini koruması gereklidir (Khayat, 1998).

Akıcı kıvamdaki betonun stabilitesinin geliştirilmesi için diğer bir yol da karışımda ince toz malzeme miktarının artırılmasıdır. Değişik morfoloji ve parçacık boyut dağılımına sahip toz malzemelerin kullanımı karışımda maksimum doluluğu artırır, parçacıklar arası sürtünmeyi azaltır ve böylece betonun şekil alabilmesi, akıcılığı ve stabilitesi gelişir (Sonebi ve ark., 2000). KYB karışımın kohezyonunun yeterli düzeyde sağlanabilmesi için belirli bir

miktarda toz malzemenin kullanılması gereklidir. Kullanılan toz malzeme ile birlikte yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile ek olarak kimyasal tipte bir VMA kullanımına gerek kalmayabilmektedir (Petersson, 1999). KYB'nin kohezyon ve ayrışmaya karşı direncinin geliştirilmesi için sıkça kullanılan inert veya puzolanik özellikteki katkılar EFNARC (2005)'a göre su ile reaksiyonları açısından Çizelge 2.1'deki gibi sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.1. Viskozite arttırıcı toz malzemelerin sınıflandırılması (EFNARC, 2005)

TİP I	İnert veya yan inert	Mineral fillerler (taştözü, dolomit vb.), pigmentler
TİP II	Puzolanik	Uçucu kül, silis dumanı
	Hidrolik	Yüksek fırın cürufu

Kullanılan mineral filler malzemelerin parçacık boyut dağılımı, yüzey özellikleri ve su emme kapasiteleri KYB karışımının su ihtiyacını büyük ölçüde etkiler. Kalsiyum karbonat kökenli mineral fillerler sağladıkları üstün reolojik özellikler açısından KYB üretiminde sıkça tercih edilirler. Bu malzemenin parçacık boyutunun 0,125 mm'den küçük olması ve % 70'inin ise 0,063 mm'lik elekten geçmesi istenir (EFNARC, 2005).

Felekoğlu ve ark. (2003-a), KYB'nin stabilitesinin sağlanması açısından taş tozu ve uçucu kül kullanımının, nişasta veya yarı sentetik selüloz türevleri gibi kimyasal VMA katkılara göre daha üstün olduğunu deneysel bir çalışma ile göstermişlerdir. Ayrıca aynı çalışmada mineral katkıları açısından zengin KYB karışımların daha az mineral katkı içeren ancak, organik veya yarı organik VMA içeren karışımlara göre kendiliğinden yerleşebilirlik, priz süresi ve basınç dayanımı gelişimi açısından daha yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanımı ile sadece Portland çimentosunun kullanıldığı KYB'lerde elde edilen yayılma çapı daha düşük süperakışkanlaştırıcı katkı dozajında elde edilebilmiştir (Yahia ve ark. 1999). KYB'de uçucu kül kullanımı reolojik özellikleri geliştirir ve çimentonun hidrasyon ısısından kaynaklanan çatlakları azaltır (Kurita ve Nomura 1998). Bouzobaa ve Lachemi (2001) F sınıfı uçucu külle yaptıkları bir çalışmada 28 günlük basınç dayanımı 35 MPa olan ve % 50'ye kadar çimento yerine F sınıfı uçucu külün kullanıldığı ekonomik KYB üretilebileceğini göstermişlerdir. Yüksek oranda uçucu kül içeren bu KYB'lerin hidrasyon ısısının sadece Portland çimentosu ile üretilen KYB'ye göre 5 - 10 °C daha düşük ancak, priz süresinin ise 3 - 4 saat daha uzun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, polikarboksilik asit tipte süperakışkanlaştırıcı katkı

ve uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen harçların priz süresinin uzadığı Felekoğlu ve ark. (2003-a) ve Baoju ve ark. (2000) tarafından gösterilmiştir. Leemann ve Winnefeld (2007) mikrosilis ve nanosilis hamuru gibi inorganik VMA'lar ile yüksek moleküllü etilen oksit türevleri, doğal polisakkaritler ve nişasta türevleri gibi organik VMA'ların kendiliğinden yerleşen harç ve betonların akış özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, organik VMA'ların çimentonun erken hidratasyonu ve basınç dayanımı gelişimi üzerinde belirgin bir etkilerinin olmadığını, ancak inorganik VMA'ların hidratasyonu hızlandığını ve 1 günlük basınç dayanımını geliştirdiğini belirtmişlerdir. Özkul ve ark. (2006), KYB üretiminde çimento da dahil olmak üzere toplam ince malzeme miktarının 500 kg/m³ 'ün üzerinde tutulmasının taze beton özellikleri açısından gerekli olduğunu ve KYB'de viskozite düzenleyici katkıları kullanılarak ince malzeme miktarının 350 kg/m³ düzeyine düşürülebileceğini belirtmişlerdir. KYB'de kullanılan viskozite arttırıcı mineral katkı tipi KYB'nin dayanım ve dayanıklılık parametrelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Felekoğlu ve ark. (2003-b)'nin yaptığı bir deneysel çalışmada aynı donma çözülme çevrimi sonucunda, taş tozlu KYB serileri uçucu küllü serilere oranla daha fazla basınç dayanımı kaybına uğradığı belirlenmiştir.

2.1.4.2 KYB tasarım yöntemleri

KYB, inşaat sektöründe giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır, ancak, KYB'nin tasarım yöntemleri konusunda sürekli bir gelişme vardır (Okamura ve Ouchi, 1999, Bui ve Montgomery, 1999, Su ve ark. 2001, Saak ve ark. 2001). Yüksek akıcılık, yüksek stabilite ve düşük bloklanma riski KYB tasarımında önemle göz önüne alınması gereken temel tasarım parametreleridir. KYB karışımında bunların sağlanabilmesi için beton akışkan kıvamda, optimum viskozite ve kohezyona sahip olmalıdır. Ancak, unutulmaması gereken en önemli nokta akıcı kıvamdaki her betonun KYB olmayacağıdır. Azaltılmış agrega miktarı, düşük su/toz oranı ve uygun tipte bir süperakışkanlaştırıcı kullanımı tasarımın temellerini oluşturmaktadır (Okamura ve Ozawa, 1995). EFNARC 2005'e göre KYB tasarımının temel ilkeleri;

- Azaltılmış kaba agrega içeriği,
- Arttırılmış hamur hacmi,
- Düşük su/toz malzeme oranı,
- Arttırılmış süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı ve gerektiğinde VMA kullanımıdır.

KYB'nin akışı sırasında kaba agregaların engeller arasında bloklanmasının önlenmesi için karışımın hamur miktarının ve viskozitesinin yüksek olması gereklidir. Öte yandan,

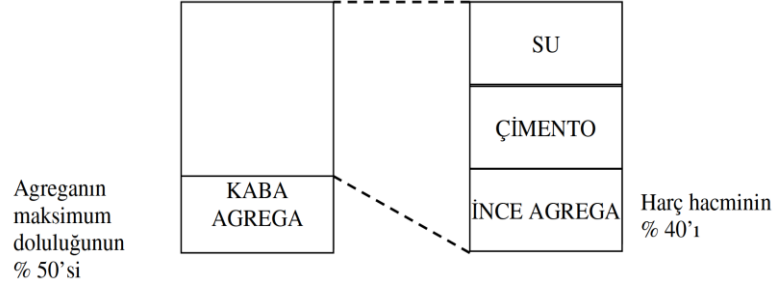
KYB karışımının ayrışma olmadan şekil alabilme yeteneğinin de yüksek olması gereklidir. KYB karışımın şekil alabilme yeteneğinin geliştirilebilmesi, karışımın su/toz oranı düşük tutularak uygun bir süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile sağlanabilir. Şekil 2.3’de şematik olarak gösterildiği gibi, karışımın şekil alabilme yeteneği ile ayrışma direnci arasında iyi bir dengenin kurulması önemlidir.



Şekil 2.3 Kendiliğinden yerleşebilirliğin başarılması için temel yöntem (Okamura ve Ozawa, 1995)

İyi bir KYB karışımı oluşturabilmek için karışımın hamur hacminin göreceli olarak yüksek, maksimum agrega çapının düşük ve sınırlı (< 20 mm) ve toplam agrega miktarının normal bir beton karışımına göre azaltılmış olması gereklidir. Başlıca iki farklı tasarım yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi Japon tasarım yöntemi ve ikincisi ise CBI yöntemidir. Bunlardan başka tasarım yöntemleri de araştırmacılarca ortaya atılmıştır. Ancak temel olarak bu iki tasarım yöntemi kullanılmaktadır.

2.1.4.2.1 Japon Tasarım Yöntemi: Japon tasarım yöntemi Okamura ve Ouchi (1999) tarafından önerilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde, KYB karışımının hamur ve harç fazı amaca göre optimize edilir ve sonuçta beton karışım oluşturulur. Yöntemde öncelikle hamur üzerinde deneyler yapılır. Daha sonra harç fazı oluşturulur. Şekil 2.4’de Japon tasarım yöntemine göre KYB’nin bileşenleri şematik olarak görülmektedir. Japon tasarım yönteminde, maksimum agrega tane çapı 20 mm’den küçük olmak üzere, kaba agreganın maksimum doluluğunun (packing density) hesaplanması gerekir. Bu miktarın % 50’ si karışımındaki kaba agrega miktarıdır. Başka bir deyişle, Japon tasarım yönteminde belirli bir hacmi dolduran kaba agrega miktarının en fazla % 50’si kullanılır. Kalan kısım KYB’nin harç fazıdır ve bu fazın % 40’ı ince agrega (< 5 mm) ve % 60’ı ise hamur fazıdır.



Şekil 2.4. Japon tasarım yöntemine göre KYB'nin bileşenleri

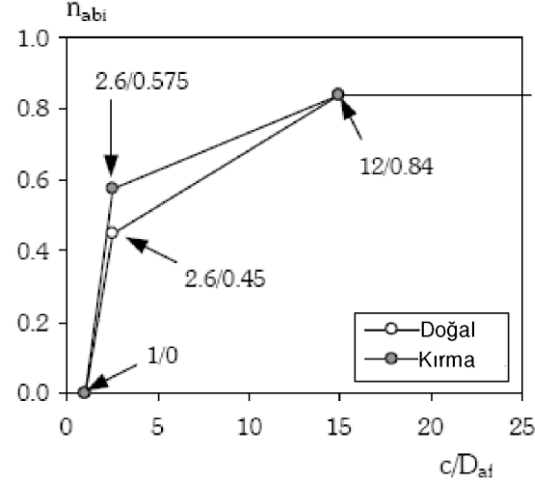
Çimento ve parçacık boyutu 0,09 mm'den küçük diğer tozların su ihtiyacı değişik su miktarları altında deneme yanılma yolu ile belirlenir. Bu aşamada, süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı miktarı ve su miktarının olabildiğince azaltılmasına yönelik olarak deneme yanılma yolu ile belirlenir. Su ve süperakışkanlaştırıcı miktarı en az 245 mm'lik harç yayılma çapı hedefine göre belirlenir. Harcın bu yayılma çapına 10 sn civarında ulaşması istenir. Kaba agregaların miktarı ve maksimum çapı betonun kullanılacağı yerdeki en dar geçiş boşluğuna göre (donatı aralığı vb.) belirlenir. Betonun su ve katkı miktarı harç deneylerinden elde edilen oranlar dikkate alınarak yeniden ayarlanır.

2.1.4.2.2 CBI Yöntemi (Bloklanma Riski Yöntemi). Bu yöntem İsveç Çimento ve Beton Araştırma Enstitüsü (CBI), tarafından önerilmiştir. Bu yöntem, agregaların boşluk miktarını ve betonun dar engeller arasından geçiş yeteneğinde agregaların etkisini göz önüne alır. Bu yöntemde, L-kutusu deneyi kullanılmaktadır. Şekil 2.5'de görüldüğü gibi, KYB'nin L-kutusu aparatından geçiş yeteneği (n_{abi}) üzerinde agregaların göreceli etkisi, donatı aralığının (c), agregaların çapına (D_{af}) bölümünden oluşan boyutsuz bir parametre (c/D_{af}) açısından değerlendirilmektedir. Burada kullanılan agregalar tek boyutlu agregadır. Agregaların eşdeğer çapı (D_{af}), Denklem (2.1) ile hesaplanır.

$$D_{af} = M_{i-1} + \frac{3}{4}(M_i - M_{i-1}) \quad (2.1)$$

Bu ifadede M_i agregaların tamamen geçtiği üst elek boyutu ve M_{i-1} ise agregaların üzerinde kaldığı alt elek boyutudur.

Şekil 2.5'den görüldüğü gibi, donatı engelleri arasındaki açıklık kullanılan agrega boyutu kadar olduğunda ($c/D_{af} = 1$) tam bloklanma ($\Gamma_{abi} = 0$) olmaktadır. Donatı açıklığı kullanılan agrega çapının 12 katı olduğunda 0,84 gibi yüksek bir bloklanma oranı elde edilmektedir. Başka bir ifade ile bloklanma, engel açıklığının kullanılan agrega çapının kaç katı olduğu ile yakından ilişkilidir. Bu yöntemde tasarımda bu nokta dikkate alınmaktadır.



Şekil 2.5. Donatı açıklığı (c) / agrega çapı (D_{af}) oranı - bloklanma oranı (η_{abi}) arasındaki ilişki (Grünwald, 2004)

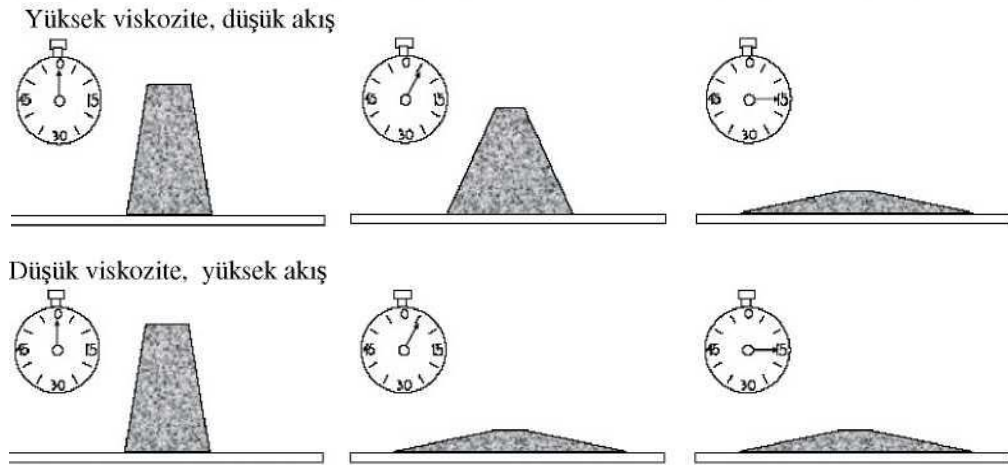
Petersson ve ark (1998), CBI modeli ve İsveç agregaları ile yaptıkları model çalışmalarında kendiliğinden yerleşebilirliği betonun dar engeller arasından geçiş yeteneğinin belirlediğini belirtmişlerdir.

KYB’de hamurun viskozitesinin arttırılma yöntemine göre KYB temel olarak üç farklı gruba ayrılabilir. Bunlar, yüksek oranda toz malzemenin kullanıldığı toz tipi KYB, segregasyona karşı direnç için VMA’ların kullanıldığı kimyasal tip KYB ve toz malzemeler ile VMA’ların birlikte kullanıldığı kombinasyon tipi KYB’dir. Toz tipi KYB, birinci nesil ve en eski KYB türüdür ve bunlar yüksek dayanım ve gelişmiş durabilite özellikleri ile öne çıkmaktadır. Bu tip KYB’lerde 550 - 650 kg/m³ dozajda toz toplam toz malzeme bulunmaktadır. Bu tozlar taze betonun plastik viskozitesini geliştirirler ve böylece ayrışmaya karşı direnç arttırılmış olur. Kimyasal tip KYB’ler ise daha çok su altı betonu dökümünde avantajlıdır ve düşük toz madde içeriklerinde bile yüksek akıcılığın elde edilebildiği bir türdür. Bu tip KYB’lerde toplam toz madde miktarı toz tipine göre bir miktar daha düşüktür (350 – 450 kg/m³). Bu denli düşük toz madde içeriği olsa da ayrışmaya karşı direnç VMA’lar ile sağlanır. Kombinasyon tipi KYB ise özel işlerde seçilebilir bir tiptir ve bunlar yüksek akıcılık ve stabilitenin elde edilebildiği bir tür olarak kabul görmektedir. Bu tip KYB’lerde toz madde miktarı 450 - 550 kg/m³ civarındadır. (Toyoharu ve ark. 1998, EFNARC,2005).

2.1.5 KYB'nin Reolojik Özelliklerinin Ölçüm Yöntemleri

Bilindiği gibi, taze betonun reolojisini temel olarak eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite parametreleri kontrol eder. Taze betonun akış davranışı iki parametrelili bir model olan (eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite) Bingham Modeli ile tanımlanır (Ferraris, 1999). Eşik kayma gerilmesi, taze betonun harekete geçmesi için gerekli olan kuvvet olarak basitçe göz önüne alınabilir. Eşik kayma gerilmesi, taze betonun işlenebilirliği ile ilgili bir parametredir ve genel olarak çökme deneyi gibi bir deneyle göreceli olarak değerlendirilebilir. Plastik viskozite ise taze betonun akışa karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Bu direnç, taze betonun içsel sürtünmesi nedeniyle oluşmaktadır. Taze betonun akış hızı plastik viskozite ile ilişkilendirilebilir. Ancak, eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite gibi reolojik parametrelerin laboratuvar şartlarında ölçümü pahalı cihazlar gerektirmektedir. Bu nedenle şantiye şartlarında da uygulanabilecek ve daha ucuz test aparatları ile göreceli olarak değerlendirilir.

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, taze betonun akış hızı, bilinen çökme deneyinde belirli bir çapa ulaşma süresi veya özel şekle sahip bir aparatın akışının süresi ölçülerek belirlenebilir. Yine aynı şekilde, KYB'nin belirli bir engel arasından geçiş yeteneği çeşitli şekillerde deney araçları kullanılarak belirlenmektedir.



Şekil 2.6. Viskozite - akış hızı ilişkisi (EFNARC, 2005)

Şekil 2.6'da şematik olarak gösterildiği gibi, taze betonun yayılma çapı değeri birbirine yakın olsa da akış hızları birbirlerinden farklı olabilir. Başka bir ifadeyle, eşik kayma gerilmesi benzer olmasına karşın, plastik viskozite değeri farklı olabilir. Ayrıca, KYB'yi karakterize eden akıcılık, viskozite, engeller arasından geçiş yeteneği gibi özelliklerin de mutlaka değerlendirilmesi gerekmektedir. KYB'nin karakteristiklerini test etmeye yarayan

tek bir deney yöntemi henüz geliştirilememiş olmasına karşın, bazı özelliklerinin göreceli olarak ölçülmesine yarayan bazı test yöntemleri geliştirilmiştir. Çizelge 2.2’de KYB için geliştirilmiş bazı test yöntemleri görülmektedir. Temel olarak akıcılık, doldurma yeteneği, viskozite, geçiş yeteneği ve ayrışma direnci gibi özelliklerin değerlendirilmesi için geliştirilen test yöntemleri bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar, en yaygın işlenebilirlik değerlendirme yöntemi olan yayılma çapı parametresi ile diğer tüm reolojik parametrelerin tahmin edilmemesi gerektiğini göstermektedir. KYB’nin reolojisinin değerlendirilmesi için en uygun yol, tek bir deney ile yetinilmeden Çizelge 2.2’de gösterildiği gibi akıcılık, viskozite, geçiş yeteneği ve ayrışma direnci parametreleri ile ilgili test yöntemlerinin kombinasyonu şeklinde değerlendirilmesidir.

2.1.5.1 Çökme - yayılma testi, J- halkalı çökme yayılma testi ve T₅₀ süresi

Çökme-yayılma testi, bir tabla üzerinde Abrams hunisi ile yapılan çökme deneyinde tabla üzerine yayılan taze betonun yayılma çapına göre akıcılığının değerlendirilmesine dayanan bir test yöntemidir. Bu deneyde ayrıca, taze betonun 500 mm çapa ulaşma süresi de ölçülebilir. Deney aparatları, üzerinde 20 cm ve 50 cm çaplı daireler çizili olan ahşap veya çelikten yapılmış, en az 900 x 900 mm boyutlarında bir tabla ve bilinen Abrams hunisidir (Şekil 2.7-a). Abrams hunisi tablanın ortasında bulunan 200 mm çaplı daireye yerleştirilir. Taze beton hiçbir sıkıştırma enerjisi uygulanmadan huniye doldurulur.

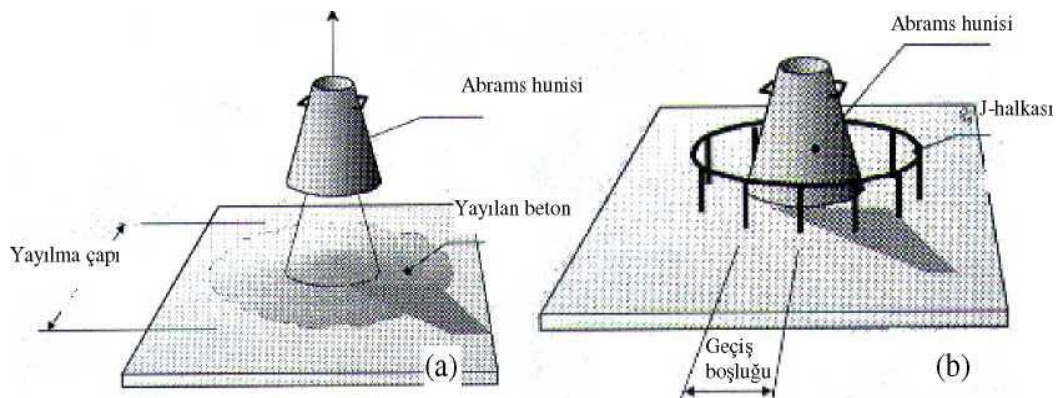
Çizelge 2.2 KYB için test özellikleri ve yöntemler (EFNARC, 2005)

Özellik	Test Yöntemi	Ölçülen Değer
Akıcılık / doldurma yeteneği	Çökme - yayılma	Toplam yayılma
	Kajima kutusu	Görsel doldurma
	T ₅₀	Akış süresi
Viskozite / akıcılık	V-kutusu	Akış süresi
	O-kutusu	Akış süresi
	Orimet	Akış süresi
	L-kutusu	Geçiş oranı

Çizelge 2.2. (devam) KYB için test özellikleri ve yöntemler (EFNARC, 2005)

Geçiş yeteneği	U-kutusu	Yükseklik farkı
	J-halkası	Yükseklik, toplam akış
	Kajima kutusu	Görsel geçiş yeteneği
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayrışması	Yüzde ayrışma
	Oturma kolonu	Ayrışma oranı

En fazla 30 sn kadar beklendikten sonra çökme deneyinde olduğu gibi huni kaldırılarak taze betonun tabla üzerinde yayılması sağlanır. Yayılma tamamlandıktan sonra birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçülür ve ortalaması yayılma çapı olarak göz önüne alınır. Ayrıca bu deneyde huni kaldırılıp taze betonun akışa geçmesinden tabla üzerinde çizili bulunan 500 mm'lik çapa ulaşana kadar geçen süre bir kronometre yardımı ile ölçülür. Bu süre 500 mm çapa ulaşma süresi, T_{500} ya da T_{50} süresi olarak kaydedilir. Deneyde tabla üzerine yayılmış betonda oluşan ayrışma, agrega kümelenmeleri, su kusma veya yayılan betonun kenarlarında oluşan aşırı su filmi gibi bulgular da not edilerek gözlemsel olarak ayrışma kontrol edilebilir.

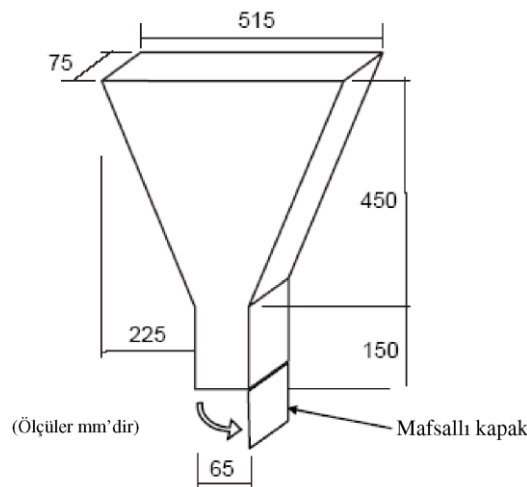


Şekil 2.7. Çökme-yayılma testi (a) ve J-halkalı çökme-yayılma testi (b) (Groth, 2000-a)

J-halkası testi olarak da bilinen J-halkalı çökme - yayılma testi ise yayılma tablası üzerine yerleştirilen halka şeklinde donatı engelleri ile yapılmaktadır. Halka testinin ekipmanları Şekil 2.7-b’de görüldüğü gibi, yayılma tablası, Abrams hunisi ve gerçek durumdaki yoğun donatıyı temsil eden halka şeklinde parmaklıklıklı çelik bir çemberdir. Halka çapı ve donatı engellerinin açıklıkları değişken olabilmektedir. J- halkalı çökme yayılma testi ile taze betonun akıcılığının yanı sıra, engeller arasından geçiş yeteneği de değerlendirilebilmektedir. Tabla üzerinde yayılan betonun yayılma sırasında ilk karşılaştığı engel çelik halkanın parmaklıklarıdır. Yayılma, tabla üzerinde son bulduktan sonra yayılan betonun halkanın hemen iç kısmındaki beton yüksekliği ile halkanın hemen dışındaki beton yüksekliğinin farkı o betonun geçiş yeteneği veya tıkanma riski hakkında bilgi verir. Prosedür olarak, ölçülen bu farklar yayılan betonda dört farklı noktadan yapılmalıdır. Halka testi, taze betonun engeller arasından geçiş yeteneği hakkında fikir verebilen pratik bir testtir. Donatı engellerinin varlığı yayılma çapını etkiler, ancak, etkileme düzeyi karışımın özellikle hamur hacmine bağlıdır. Özkul ve Doğan (2006) yaptıkları bir deneysel çalışmada, 550 kg/m³ ’lük toz madde içeren KYB’lerde halkalı ve halkasız yayılma deneylerinde elde edilen yayılma çaplarının birbirlerine yakın olduğunu göstermişlerdir

2.1.5.2 V-hunisi testi

V-hunisi deneyi de ilk defa Japonya’da geliştirilmiştir. Deney ekipmanı Şekil 2.8’de görülen, çelik malzemeden imal edilmiş, V şeklindeki deney aparatıdır. V- hunisi deneyi betonun akıcılığı ve viskozitesi hakkında fikir verir. Test en büyük agrega boyutu 20 mm olan karışımlar için uygundur.

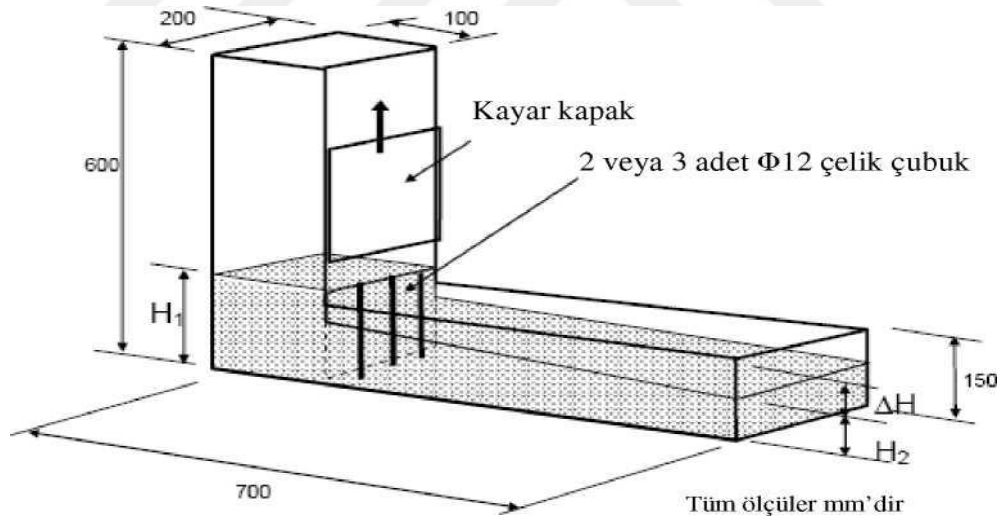


Şekil 2.8. V-hunisi test aparatı ve boyutları (EFNARC 2005)

Deney için yaklaşık 12 litre KYB, V-hunisine hiçbir sıkıştırma işlemi uygulanmadan doldurulur ve alt kapak açılır. Bir kronometre yardımı ile kapak açılıp taze betonun akmaya başladığı andan, V-hunisi haznesinin üstünden bakıldığında alttan ışık görülene kadar geçen süre ölçülür. Bu süre V-hunisi akış süresi olarak değerlendirilir. V-hunisi akış süresinin düşük değerleri taze betonun akıcılığının yüksek, viskozitesinin düşük olduğunun bir göstergesidir.

2.1.5.3 L-Kutusu Testi

L-kutusu testi, KYB'nin geçiş yeteneğinin ölçülmesine yönelik olarak geliştirilmiş bir test yöntemidir. L-kutusu testi ile KYB'nin donatılar gibi engeller arasından geçiş yeteneği ve bu engeller önünde bloklanma eğilimi değerlendirilmektedir. L-kutusu testinde Şekil 2.9'da görüldüğü gibi L harfine benzeyen bir test aparatı kullanılmaktadır.



Şekil 2.9. L-kutusu deney aparatı ve boyutları (EFNARC 2005)

L-kutusu deney düzeneğinin hazne kısmının sonunda gerçek durumdaki yoğun donatıyı simgeleyen çelik parmaklıklar vardır. Bazı hallerde bu test donatılar olmadan da yapılır. Bazı L-kutusu aparatları ahşap malzemedir, bazıları da çelik malzemedir. Ayrıca, temel felsefede farklılık olmamasına rağmen, L-kutusu aparatının boyutları da farklı olabilmektedir. L-kutusu aparatındaki donatıların açıklıkları için en büyük agrega çapının en az 3 katı kadar bir açıklık yeterlidir.

Testin yapılışı kısaca şöyledir: Bu deney için yaklaşık 14 litre beton gereklidir. L- kutusu aparatı düz bir zemin üzerine konur. Kapak kısmının normal olarak çalıştığı kontrol edildikten sonra kapak sıkıca kapatılır. L-kutusunun iç kısmı nemlendirilir. Dik duran hazne kısmına KYB örneği herhangi bir sıkıştırma enerjisi uygulanmadan doldurulur. Bir dakika kadar beklendikten sonra kapak açılarak taze betonun aparatın yatay duran kısmına doğru akışı sağlanır. Akış sırasında kapak önünden 200 mm ve 400 mm'ye akış süreleri (T20 ve T40) ölçülerek not edilir. Akış tamamen durduktan sonra kapak önü ve L-kutusunun son kısmındaki beton yükseklikleri (H1 ve H2) ölçülerek not edilir. H2/H1 oranı literatürde bloklanma oranı olarak bilinir. Testten elde edilen sonuçların yorumu kısaca şöyle özetlenebilir. Su kadar akıcı bir betonun H2/H1 bloklanma oranı doğal olarak 1'e eşittir. Dolayısıyla 1'e yakın olan değerler akıcı bir betonu işaret eder. Bloklanma oranının minimum kabul edilebilir değeri 0,80'dir. Fakat 0,60 civarında bloklanma oranı elde edilmiş karışımların da yerinde bloklanma olmadan yerleştirilebildiği rapor edilmiştir (Tviksta, 2000). T20 ve T40 akış sürelerine bakılarak da betonun akıcılığı hakkında karar verilebilir fakat bu sürelerin optimum değerleri hakkında kesin bir yargı henüz yoktur. Ayrıca bu deneyde kapak kısmındaki donatılar önündeki tıkanma eğilimi hakkında gözlemsel olarak karar verilebilir.

2.1.5.4 Elek ayrışma testi

Bu test ile KYB'nin ayrışmaya karşı direnci değerlendirilmektedir. Testin yapılabilmesi için en az 20 gram hassasiyetinde bir terazi, 5 mm kare delikli elek, 300 mm çapında ve 10-12 litre kapasiteli metal yada plastik bir kap gereklidir. Testin yapılışı şu şekildedir: 10 litre kadar taze beton bir kap içerisine alınır ve üzeri kapatılarak 15 dakika kadar sarsmadan bekletilir. Diğer taraftan, 300 mm çapındaki boş kap terazi üzerine yerleştirilir ve tartılır (Wp). Daha sonra üzerine elek yerleştirilerek yeniden tartılır. Bekleme süresinin sonunda taze betonun bekletildiği kap içerisinde oluşan su kuma görsel olarak kontrol edilir ve gerekli notlar alınır. Daha sonra bu betonun üst kısmından yaklaşık 5 kg'lık bir miktar Şekil 2.10'da görüldüğü gibi yaklaşık 500 mm yükseklikten terazi üzerinde bulunan kap üzerindeki eleğin ortasına hızlıca dökülür ve elek üzerindeki beton tartılır (Wc). Yaklaşık iki dakika beklendikten sonra elek dikkatlice kaldırılarak elekten geçen beton tartılır (Wps). KYB'nin ayrışan kısmı $SR (\%) = (Wps - Wp) / Wc \times 100$ ifadesi ile % 1 hassasiyetinde hesaplanır.



Şekil 2.10 Elek ayırma testi ve aparatları (EFNARC, 2005)

Uygulanan bu test yöntemlerinden elde edilen sonuçlara göre KYB çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. KYB'nin sınıflandırılmasında yayılma çapı, viskozite, geçiş yeteneği ve ayırmaya karşı direnç göz önüne alınmaktadır. Çizelge 2.3'de bu sınıflar görülmektedir.

Çizelge 2.3. KYB sınıfları (EFNARC, 2005)

Yayılma sınıfları	Yayılma çapı (mm)	
SF1	550 - 650	
SF2	660 - 750	
SF3	760 – 850	
Viskozite sınıfları	50 cm çapa yayılma süresine göre, T ₅₀ (s)	V-Hunisi akış süresine göre (s)
VS1 / VF1	≤ 2	≤ 8
VS2 / VF2	> 2	9 - 25
Geçiş yeteneği sınıfları	Bloklanma oranı	
PA1	≥0,80 (2 donatı engeli ile)	
PA2	≥0,80 (3 donatı engeli ile)	
Ayrışma direnci	Ayrışma direnci (%)	

Çizelge 2.3. (devam) KYB sınıfları (EFNARC, 2005)	
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

Çizelge 2.3'den görüldüğü gibi, kendiliğinden yerleşme özelliğine sahip beton karışımların reolojik özellikleri birbirlerinden oldukça farklı olabilmektedir. Bu durum her KYB karışımının her türlü yapı elemanında kullanılamayacağını da bir ölçüde göstermektedir. Örneğin, çok yoğun donatılı bir kolon - kiriş birleşim bölgesinde oldukça akıcı (örneğin yayılma sınıfı açısından SF2 veya SF3), akış hızı göreceli olarak yüksek (viskozite sınıfı açısından VS1 / VF1) ve dar engeller arasından geçiş yeteneği yüksek (geçiş yeteneği açısından PA2 sınıfında) bir karışım gereklidir. Buna karşılık, hiçbir dar engelin bulunmadığı bir saha betonunda yayılma sınıfı açısından daha düşük yayılma çapına sahip ve akışını daha uzun sürede tamamlayabilen bir KYB karışım yeterli olabilmektedir. Başka bir ifade ile, KYB'de hedeflenen reolojik özellikler ihtiyaca göre tasarım ile karşılanmalıdır. Bu nedenle, EFNARC (2005)'de değişik yapı elemanlarında kullanılacak KYB'lerde göz önüne alınması gereken reolojik sınıflar gösterilmiştir. Bu sınıflamanın Walraven (2003)'in yaptığı çalışmalar doğrultusunda hazırlandığı belirtilmiştir. Çizelge 2.4'de çeşitli uygulamalara göre tasarımda göz önüne alınması gereken KYB sınıfları görülmektedir.

Viskozite		Ayrışmaya karşı direnç / Geçiş yeteneği
VS2 VF2	Rampalar	SF1 ve 2 için geçiş yeteneği tanımlanmalı
VS1 veya 2 VF1 veya 2 Yada hedef değer	Duvarlar ve kazıklar Uzun ve narın elemanlar	SF3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
VS1 VF1	Yer betonları ve döşemeler	SF2 ve 3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
	SF1 SF2 SF3	
	Çökme - yayılma	

Şekil 2.11. Değişik tipte uygulamalar için KYB sınıfları (EFNARC 2005)

2.2. Lif Takviyeli Betonlar

Lif takviyeli çimento esaslı kompozit kirişlerin kesme davranışları ile ilgili bazı araştırmalara ait sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Lif takviyesiyle elde edilen çok yüksek performanslı betonların gerilme ve eğilme performansı birçok malzeme parametresi tarafından etkilenir. Bu parametreler; liflerin miktarı, liflerin şekli ve dağılımı, rijitliği, narinliği(L/d), liflerin poisson oranı ve lifler ile matris arasındaki ara yüzeydeki sürtünme aderansı gibi parametrelerdir (Yoo vd., 2014; Kim vd., 2011). Değişik türdeki liflere ait fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 2.4’de görülmektedir.

Çizelge 2.4. Betonda kullanılan bazı liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Alyousif vd., 2015)

Lif Cinsi	Çekme Day. (MPa)	Elastisite Mod. (10 ³ MPa)	Maksimum Uzama (%)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,10
Asbestler	552-966	83-138	0.60	3,20
Pamuk	414-690	4,8	3-10	1,50
Cam	1035-3795	69,0	1,50-3,50	2,50
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,10
Polyester	724-863	8,3	11-13	1,40
Polietilen	690	0,14-0,40	10	0,95
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,90
Pamuk-Yün	414-621	6,9	10-25	1,50
Mineral Yünü	483-759	69-117	0.60	2,70
Çelik	276-2760	200,0	0.50-35	7,80

Lif takviyeli betonlar, endüstriyel kaplamalar, öndöküm elemanlar ve püskürtme betonlarda (tüneller vb.) yaygın olarak kullanılır. Yapısal olmayan elemanların (borular, menfezler ve diğer küçük parçalar) yanı sıra, lif takviyesi özellikle büyük yapılar için cazip olabilir. Bu anlamda çelik lifler en azından, işçilik maliyetlerini azaltmak için, geleneksel donatılı beton yerine başarılı bir şekilde kabul edilebilir. Ancak, lif takviyeli betonlar tam potansiyelleriyle henüz kullanılamamaktadırlar. Bu durum esas olarak, bina yönetmeliklerinde belirli kuralların eksikliğinden kaynaklanmaktadır (Soutsos vd., 2012). Çeşitli lif tiplerinin kullanım alanları Çizelge 2.5’de görülmektedir.

Çizelge 2.5. Çeşitli lif tiplerinin kullanım alanları (Avar, 2006)

Lif Tipi	Uygulamalar
Cam	Prekast paneller, giydirme cephe kaplamaları, kanalizasyon boruları, ince beton çatılar ve beton blokların sıvası
Çelik	Çatı uygulamalarında kullanılan gözenekli betonlar, kaldırımlar, köprü döşemeleri, ateşe dayanıklı elemanlar, beton borular, havalimanları, rüzgara dayanıklı yapılar, tünel kaplamaları, gemi omurgaları
Polipropilen, naylon	Temel kazığı, öngermeli kazıklar, kaplama panelleri, yürüyüş yolları, marinaların iskele elemanları, yol yamaları, büyük çaplı sualtı borularının kaplamaları.
Asbest	Saç boru, levhalar, yangına dayanıklı malzemeler ve yalıtım malzemeleri, kanalizasyon boruları, oluklu ve düz çatı levhaları, duvar kaplamaları
Karbon	Dalgalı şekilli çatı kaplama elemanları, tek veya çift kat ince membran yapılar, tekne omurgaları, yapı iskelesi tahtaları
Mika	Çimento esaslı levhalarda, kısmen asbestin yerine, beton borular, tamirat malzemeleri

Lifler, üretildikleri malzemelerin farklı özelliklerinden dolayı çok çeşitli olabilmektedir. Genel olarak lifleri şu dört sınıf altında toplamak mümkündür;

- Metalik lifler (Çelik vb.),
- Polimerik lifler (Karbon, polietilen, polipropilen vb.),
- Mineral lifler (Cam vb.),
- Doğal olarak oluşan lifler (Selüloz vb.)

Lif takviyeli betonlarda ise genellikle çelik, karbon, cam ve polipropilen lifler kullanılır (Şengül, 2005; Avar, 2006). Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri Çizelge 2.6'de görülmektedir.

Çizelge 2.6. Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri (Sarı, 2013)

Beton Özelliği	Artış(%)
Tokluk	100-1200
Darbe Dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Çekme Dayanımı	25-100
Basınç Dayanımı	±25
Yorulma Dayanımı	500-100
Şekil Değiştirme Oranı	50-300
Eğilme Çekme Dayanımı	25-200
Kavitasyon – Erozyon Direnci	200-300
Elastisite Modülü	±25

Eğer beton tek çeşit lifle takviye edilirse sadece bir seviyedeki özellikleri artırılabilir, bütün seviyelerdeki özellikleri artırılamaz. Geçmiş çalışmalar çimento matrisinin farklı liflerle takviye edilmesiyle oluşan karma lif takviyeli kompozitin bir çok çekici özeliği olduğunu bize göstermiştir (Aslani, 2013; Ekincioğlu, 2003).

Mekanik ve iletkenlik özelliklerinin bir arada sağlanması, farklı çeşit, tip ve boyutta liflerin bir arada kullanılmasıyla elde edilebilir. Örneğin Qian ve Stroeve (2000)'in belirttiğine göre polipropilen (PP) ve çelik lifler kullanarak üretilen karma lifli sistemlerde kullanılan lifler farklı görevleri yerine getirerek aşağıdaki avantajları sağlayabilirler:

- Dayanımı ve elastisite modülü yüksek lif, ilk çatlak gerilmesini ve maksimum yükü artırırken, daha esnek ve sünek olan ikinci lif tokluğu ve maksimum yükten sonraki şekil değiştirme kapasitesini artırır (Aslani,2013).
- Kısa lifler mikro çatlaklar arasında köprü kurarak bunların büyümesini engeller. Bu kompozitin çekme dayanımını artırır. Büyük lifler ise makro çatlakları engelleyerek kompozitin tokluğuna katkıda bulunurlar (Akçay vd., 2012)
- Kullanılan liflerin dayanıklılığı farklı olabilir. Daha dayanıklı olan dayanımı ve tokluğu zamanla artırırken diğer lif öndöküm kompozit elemanların taşınması ve yerleştirilmesi sırasında olabilecek zararlara karşı kısa dönemlik performansının iyi olmasını sağlayabilir (Ekincioğlu, 2003).

Banthia'ya göre karma lifli kompozitler iki kategoriye ayrılmıştır (Banthia vd., 2003). Birincisi; farklı boyutlardaki liflerle üretilen kompozitlerdir. Büyük makro lifler çatlak açılımı sırasında tokluğu artırırken, ince mikro lifler harç fazını güçlendirir ve kompozitin çatlamadan önce veya hemen sonraki davranışına karşı iyileştirme sağlar. Mikro liflerin ayrıca makro liflerin sıyrılmasını engelleyici bir davranış sergilemesi beklenebilir. Böylece yüksek dayanıma ve tokluğa sahip kompozitler üretilebilir. İkincisi ise; benzer boyutlarda fakat farklı elastisite modüllerine sahip liflerle üretilen kompozitlerdir. Örneğin yüksek elastisite modülüne sahip çelik veya karbon lifler ile düşük elastisite modülüne sahip PP lifler bu şekildedir. Yüksek elastisite modüllü lifler eğer düzgün olarak bağ yapmışlarsa küçük ve orta büyüklükteki çatlakların açılımında takviye kapasitesini artırabilirler. PP gibi düşük elastisite modüllü lifler ise takviye kapasitesini sadece büyük çatlakların açılımı sırasında artırabilirler. Bu yüzden bunların kombinasyonunda yüksek tokluğa sahip kompozitlerin üretilmesi beklenebilir. Bu kompozitler hakkındaki bilgiler henüz yetersiz seviyelerdedir (Ekincioğlu, 2003). Bu amaçlar için, cam, polipropilen, polietilen, polyester, polivinil alkol, çelik elyaf, vb. gibi elyaflar kullanılır. Özellikle tasarlanmış çimentolu kompozitlerde mikromekanik tasarım için, polivinil alkol kullanımı üzerinde çok fazla çalışma yapıldığı için büyük önem taşımaktadır (Turk, 2013., 2017.,2018).

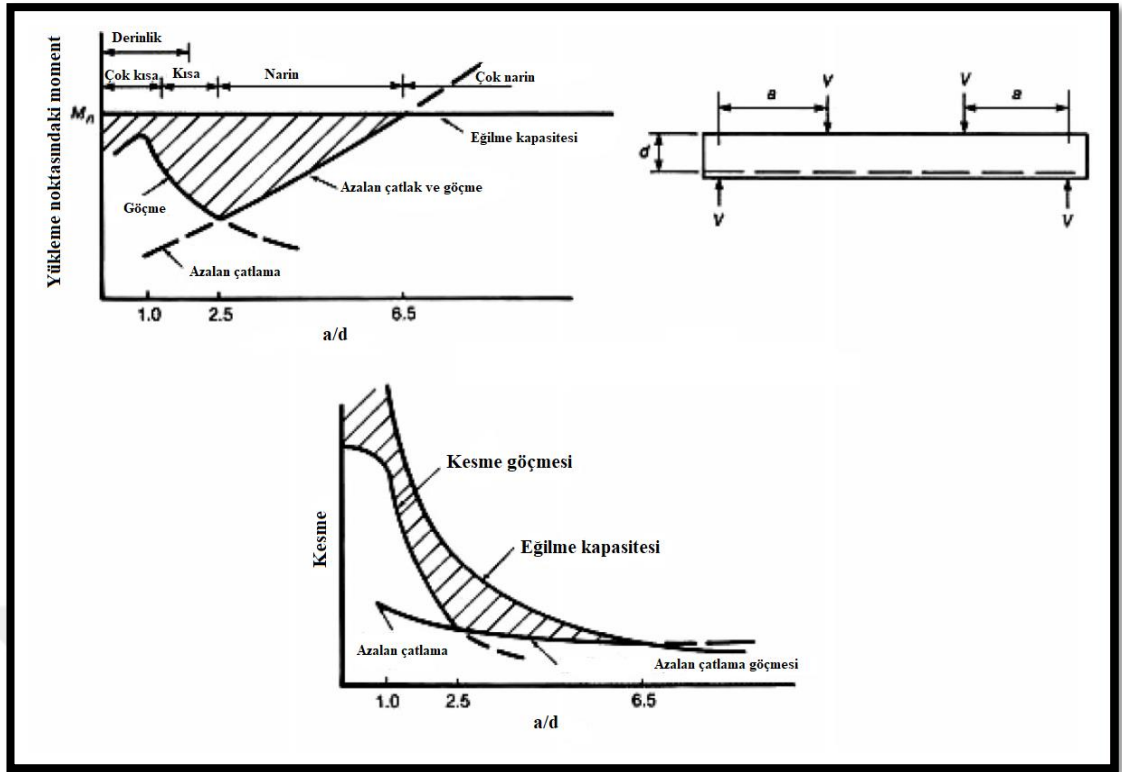
2.2.1 Karma Lif Kullanımının Betonarme Elemanların Kesme Dayanımına Etkisi

Sahoo vd., (2015) tarafından çelik ve sentetik liflerin etriyesiz betonarme kirişlerin kesme davranışına etkisi adlı çalışmada farklı tip ve miktarda betonarme kirişlere katılan liflerin, kirişlerdeki kesme dayanımına etkisi araştırılmıştır. Bir adet lifsiz betonarme (kontrol) ve altı adet lif katkılı betonarme kiriş örnekleri tek noktadan düzenli olarak artan yükler altında test edilmiş, lif katkılı betonarme kiriş örneklerinde yüksek elastisite modüllü çelik, düşük elastisite modüllü polipropilen lifler hacimsel olarak %0,5 ve %1 oranında kullanılmıştır.

Lif katkılı betonarme kiriş örneklerinde, kesme donatısı (etriye) kiriş ortasından itibaren tamamen ortadan kaldırılmıştır. Liflerin köprüleme etkisiyle çoklu çatlak (şekil-değiştirme sertleşmesi) oluşumundan dolayı, tüm lif katkılı betonarme kiriş numunelerde, maksimum yük sonrası daha iyi bir mukavemet tepkisi gözlemlenmiştir. Ayrıca kesme dayanımının göçme mekanizması ve yer değiştirme sünekliliği gibi ana parametreler araştırılmış, kesme donatısının olmaması durumunda, sadece 1% oranında sentetik lif katkılı betonarme kiriş örneklerinin, kesme dayanımındaki tepe nokta direncinin ve orta nokta deplasmanının, lifsiz betonarme kiriş numunelerinin yaklaşık %70 ve %50'sine kadar ulaştığı görülmüştür. Kesme donatısız lif katkılı beton örnekleri çelik ve sentetik liflerin kombinasyonu olarak, hacimsel olarak minimum %0,5 oranında betona katıldığında, kesme değeri, lifsiz betonarme kiriş örneklerinin aynı değerine ulaştığı görülmüştür. Ancak %1 polipropilen ve %1 çelik lif kullanıldığı zaman kesme direnci ve sehim miktarı sırasıyla %20 ve %40 oranına kadar arttığı gözlemlenmiştir. Buna ilaveten, metalik ve metalik olmayan liflerin kombinasyonundan dolayı daha iyi lif köprüleme etkisini gösteren karma lif takviyeli betonarme numunelerin göçme aşamasında daha küçük genişlikte çoklu çatlak oluşumunun dikkat çektiği görülmüştür.

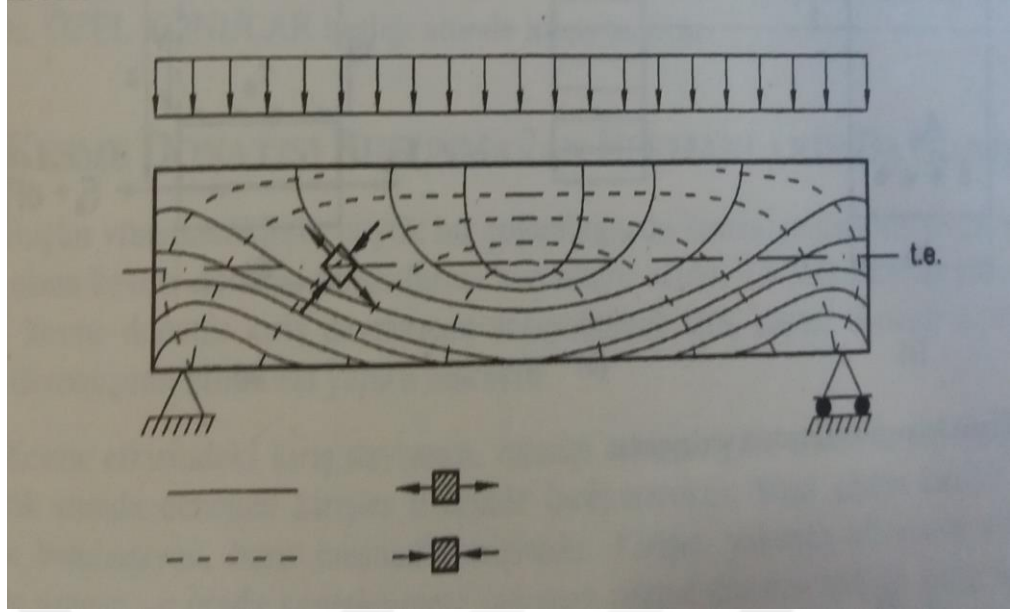
2.2.2 a/d Oranının Kesme Davranışına Etkisi

Kesme açıklığı, mesnetle yük arasındaki uzaklıktır ve genelde “a” olarak gösterilir. Yirminci yüzyıl ortalarında yapılmış araştırmalarda, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranının (a/d), betonarme kiriş elemanların davranışını etkileyen en önemli değişkenlerden biri olduğu saptanmıştır. a/d oranına bağlı olarak göçme mekanizması ve moment taşıma kapasitesi diyagramı Şekil 2.12’de görülmektedir. (a/d) oranının çok büyük olduğu durumlarda (yaklaşık olarak, $a/d > 7$) kiriş eğilmedeki taşıma gücüne erişebilecektir. Bu tür bir kirişte eğik çatlamlar oluşamayacağından, kırılma üzerinde kesme kuvvetinin etkisi olmayacaktır.



Şekil 2.12. a/d oranına bağlı göçme modları ve betonarme kirişlerin kesme ve moment taşıma kapasitesi diyagramı(MacGregor, 1997)

Bunun temel nedeni, kesme açıklığı büyük olduğundan, kirişi eğilme kapasitesine ulaştıran kesme kuvvetinin düşük düzeyde kalmasıdır. (a / d) oranının yaklaşık olarak 7'den küçük fakat 3'ten büyük olduğu durumlarda, önce kiriş eksenine dik eğilme çatlakları oluşacak, yük arttıkça kesme açıklığında oluşan eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru uzamaya başlayacaktır. (a/d) oranı daha küçük kirişlerde (yaklaşık olarak $1.5 < a/d < 3$), eğik çekme çatlağının daha önce anlatıldığı biçimde gelişmesine, noktasal yükün oluşturduğu yerel basınç gerilmeleri engel olur(Ersoy, 2001). Çatlaklar kiriş eksenine eğik bir şekilde gelişir. Şekil 2.13'de düzgün yayılı yük taşıyan basit mesnetli bir kirişte oluşan asal çekme ve basınç gerilmelerinin yönü gösterilmiştir. Sürekli çizgiler, asal çekme, kesik çizgiler ise asal basınç gerilmelerinin yönünü belirlemektedir. Bu eğriler, eşgerilme eğrileri olarak adlandırılabilir. Çatlağın asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşacağı anımsanırsa, eş gerilme eğrilerinden çatlak geometrisi ve eğimi kolayca kestirilebilir(Ersoy, 2001).



Şekil 2. 13. Düzgün yayılı yüklü kirişteki asal çekme ve basınç gerilmeleri(Ersoy, 2001)

Yapılan diğer deneysel çalışmalar ise; Chemrouk vd., (2015) tarafından yüksek dayanımlı betonların kesme davranışına çelik lifin etkisi, adlı çalışmada betonarme kirişlerde kesme güvenliğinin genellikle birçok parametre tarafından etkilendiğini, bunların en önemlilerinden biri a/d oranı (kesme-açıklık/faydalı yükseklik) olduğunu, diğer ana parametreler ise; basınç dayanımı, boyuna donatı oranı agrega ve enine etriyenin varlığı şeklinde belirtilmiştir. Betonlara çelik lifin eklenmesi, kesme direncine katkıda bulunan başka bir parametre olabileceğini ve böyle bir kesme katkısının (çelik liflerin takviye olarak eklenmesi), yüksek dayanımlı betonlarda nicelik ve niteliksel olarak değerlendirmiştir. Bu anlamda 24 adet çelik lif takviyeli yüksek mukavemetli beton kirişler etriyeli ve etriyesiz, iki noktada yüklenerek eğilme testi gerçekleştirilmiş; kirişler kesin kesme davranışına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Geleneksel enine donatıların, çelik liflerle yer değiştirilme olasılığı üzerinde çalışılmış. Bu anlamda temel test parametreleri; çelik liflerin hacimsel oranı, liflerin en-boy oranı ve etriyelerin olup olmaması olmuştur. 5 adet lif hacim oranı (%0 , %0.5 , %1 , %2 ve %3) ve 2 adet en-boy oranı ($l_f/d_f = 65 \text{ \& } 80$) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar şunu göstermiş ki; lif takviyeli yüksek mukavemetli etriyesiz beton kirişlerin kesme davranışı, daha iyi olmasa da yüksek mukavemetli etriyeli beton kirişlere benzer olmuştur. Lif takviyeli kirişler, sınırlı sayıda çapraz çatlaklara sahip olmuş ve kesme dayanımını arttırmış, özellikle lif oranı %1 - %3 için. Mevcut deneysel çalışmaya göre, yüksek mukavemetli beton kirişlerin kesme dayanımına lif katkısı, yeni bir deneysel model olarak

önerilmiştir. Önerilen model, diğer mevcut modellere ve literatürden alınan çeşitli deneysel verilere karşı değerlendirilmiş ve nispeten daha başarılı bulunmuştur.

Ulusoy (2015) tarafından yapılan çalışmada kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı 2.5'den büyük etriyesiz betonarme kirişlerde kesme mukavemetine kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı ve hacimsel çelik lif oranının katkısı araştırılmıştır. Kirişlerdeki değişkenler; kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d) 2.5, 3.5 ve 4.5, hacimsel çelik lif oranı %0, %1.0, %2.0 ve %3.0 alınmıştır. Gerçekleştirilen deneyde şu sonuçlar elde edilmiştir: 1) Çelik lif oranı artışı ile kesme mukavemetinin ve sünekliğin arttığı gözlenmiştir. 2) Tek yönlü artan yük etkilerine maruz referans kirişler ve çelik lifli betonarme etriyesiz kirişlerde a/d ve hacimsel çelik lif oranı değişiminin kesme mukavemetine etkisi incelenerek değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucu kirişlerde gözlenen çatlaklar her 5kN yük artışında işaretlenerek çatlak oluşumları gözlenmiştir. Beklenildiği gibi, yüklemenin ilk aşamalarında eğilme çatlakları tüm kirişlerin orta açıklık bölgesinde yaklaşık kiriş eksenine dik yönde kılcal şeklinde gözlenmiştir. Yük artışı ile mevcut çatlak genişlikleri ve çatlak uzunlukları artmış, kiriş mesnetlerine doğru uzunluğu azalan yeni eğilme çatlakları gözlenmiştir. Göçmeye yakın yük etkisinde, eğilme çatlakları açıklık ortasındaki yüke doğru eğik çatlak oluşumu şeklinde geliştiği ve bu eğik çatlağın nihai yüke ulaşmasıyla kesme kırılması oluşumu gözlenmiştir. Kirişlere çelik lif eklenmesi kesme kuvvetinde artışa ve çelik lifli kirişlerin referans kirişlerine göre daha sünek davranış sergilemelerini sağlamıştır. a/d azaldıkça (kemerlenme etkisi) kirişin göçme kesme mukavemeti artmaktadır. A2.5R olan referans kirişi kesme mukavemetinin A4.5R kirişi kesme mukavemetinden büyüktür. Hacimsel çelik lif oranı %2.0 olan A2.5F2.0 kirişinin kesme mukavemetinin A3.5F2.0 ve A4.5F2.0 kirişleri kesme mukavemetlerinden daha büyük, yerdeğiştirmelerin ise daha küçük olduğu görülmüştür. A2.5 serisinde (A2.5R, A2.5F1.0R, A2.5F2.0), hacimsel çelik lif oranı %1.0 ve %2.0 kullanılması kiriş kesme mukavemetini %9 ve %24 artırdığı, yerdeğiştirme kapasitesinin ise, sırasıyla, 3.02 ve 2.69 kat arttığı görülmüştür. Ayrıca, beton basınç mukavemeti yaklaşık aynı olan A2.5F1.0 ve A2.5F2.0 kirişlerinde hacimsel çelik lif oranı %1.0'den %2.0'ye artırıldığında, kesme mukavemetinin %14 arttığı fakat yerdeğiştirme kapasitesinde azalma gözlenmiştir. Referans kirişlerin beton basınç mukavemeti daha büyük olmasına rağmen hacimsel çelik lif oranı %1.0 olan betonarme kirişlerin kesme mukavemeti referans kirişlerin kesme mukavemetinden daha büyük bulunmuştur.

Anil vd. (2015) tarafından yüksek performanslı ana donatılı, lif katkılı betonarme kirişlerin, kesme açıklığının-kiriş etkili yüksekliğine oranının deneysel olarak incelenmesi, adlı çalışmada ise; çalışmalar 12 adet kiriş numunesi üzerinde gerçekleştirilmiş. 3 farklı kesme açıklığı-kiriş etkili derinliği ve 2 farklı ana donatı miktarına sahip olan kirişlere ait

sonuçlar rapor edilmiştir. 6 adet deney numunesi tasarlanmış çimentolu kompozitten (ECCs) ve diğer 6 adet deney numunesi de yüksek dayanımlı lif katkılı çimentolu kompozitten (RMC) üretilmiştir. Kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı düşük seçilerek ECC ve RMC'nin kesme dayanımı performansları, bunların karakterleri olan yüksek süneklilik-orta dayanım ve yüksek dayanım-orta süneklilik özellikleri sırasıyla araştırılmıştır. Kesmede taşıma kapasiteleri ve süneklilik oranları büyük ölçekli ECC ve RMC kirişler farklı kesme mesafeleri, enerji yutma kapasiteleri ve rijitlikleri yönünden karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Deneysel sonuçlar 3 farklı kesme mesafesi için göstermiştir ki; RMC kirişler ECC kirişlerden daha yüksek kesme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Kullanılan her iki tip beton da belirgin bir şekilde kesme çatlaklarını sınırlamış ve kirişler eğilme göçmesi göstermiştir. Genel bulgular göstermiştir ki, RMC kirişleri ECC kirişlerinden daha fazla kesme kapasitesi ve akma rijitliğine sahip iken, ECC kirişlerin daha fazla sehim oranına ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

Cattaneo vd. (2014) tarafından kendiliğinden yerleşen ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin eğilme-kesme davranışı adlı çalışmada; kendiliğinden yerleşen betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve kırılma davranışları araştırılmıştır. Geleneksel sıkıştırılan ve kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı betonlar kesme donatılı ve donatısız üretilip, 4 farklı kesme oranı için (a -kesme açıklığı/ d -etkili derinlik= 1.5, 2.5, 3.5, 4.5) 4 noktalı eğilme deneyinde test edilmiş, betonarme kirişlerin sonuçları; çatlak izlerinin sonuçlarına, ilk kırılmadaki yüke, en son kesme dayanımı ve göçme şekillerine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Normal sıkıştırılmış beton kirişler ve kendiliğinden yerleşen beton kirişler üzerindeki testler karşılaştırıldığında, daha kırılğan bir davranışa bağlı olarak benzer kesme dayanımı sergiledikleri görülmüştür. Sonuç olarak, betonarme kirişler için kod tabanlı kayma öngörülleri önerilmiştir. Eurocode 2'nin tahmin ettiği davranış şekilleri (kesme dayanımına ait koşullar) deneysel çalışmalarda daha düşük bulunmuş ve çatlakların genişlikleri kod tabanlı tahminlerin de kesin olarak belirlenemediği görülmüştür.

Etman vd. (2014) tarafından farklı tiplerdeki liflerden üretilmiş yüksek dayanımlı beton kirişlerin dayanım ve davranışları çalışmasında; toplamda 12 adet kiriş (etriyeli ve etriyesiz) eğilme testine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada lif tipi, ana donatı miktarı ve kesme donatısının olup olmaması gibi ana parametreler dikkate alınarak değişiklikler yapılmıştır. 2 tip lif (çelik ve polipropilen) karışıma eklenmiştir. Test edilen kirişlerin davranışları; her bir yük seviyesi için sehimleri ve özel tepkileri, başlangıç çatlağı, çatlak düzenleri ve en yüksek taşıdıkları yüklere göre değerlendirilmiştir. Artan miktardaki çatlak sayısı, yüklemenin son aşamalarında, liflerin kullanılması nedeniyle çatlak genişliklerinde azalma gözlenmiş, bu azalma rijitlikte ve son yük taşıma değerinde artışa sebep olmuştur.

Şen (2009) tarafından yapılan çalışmada; kiriş kesme açıklığının kiriş etkili derinliğine oranı (a/d), çelik lif oranı, lif boy-çap oranı ve beton basınç dayanımının kirişlerin kesme davranışına etkisini incelemek amacıyla bir deneysel çalışma yapılmıştır. Testlerde iki a/d oranı (2 ve 3.75), üç çelik lif oranı (0, 0.5 ve 0.75%), iki çelik lif tipi (RC-65/35-BN ve RC-80/60-BN) ve iki beton basınç dayanım seviyesi yüksek dayanımlı, normal dayanımlı beton (YDB ve NDB) kullanılmıştır. Kirişler, iki eşit yükle simetrik olarak yüklenmiştir. Uygulanan yük ve kiriş orta açıklığında meydana gelen deplasman, kiriş nihai dayanımını gösterene kadar kaydedilmiştir. Sonuçlar, çatlama gerilmesi ve kesme dayanımının, çelik lif oranı ve beton basınç dayanımının artması ve a/d oranının düşmesiyle arttığını göstermiştir. Uzun çelik liflerle güçlendirilmiş kirişlerin, kısa olan liflerle güçlendirilenlere nazaran, daha fazla kesme dayanımı gösterdiği görülmüştür. Lif oranı arttıkça, davranış kesmeden eğilmeye doğru kaymıştır. Küçük a/d oranları ile bile, 0.75%'lik lif içeriğinin kiriş kesme donatısı gibi görev yaptığı gözlemlenmiştir. 0.75%'lik lif içeriği kirişlerde minimum kesme donatısı olarak önerilmektedir. Bu lif oranına sahip kirişler, çok yüksek deplasman değerlerinde, eğilme kırılması ile kırılmışlardır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Çimento

Tez kapsamında, yapılan tüm deneysel çalışmalarda SEZA Çimento tarafından Elazığ-Baskil’de üretilen TS EN 197-1-2012’ye göre Tip II çimentosunun özelliklerini kapsayan CEM II/A-M (P-LL) 42.5 R tipli Portland kompoze çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.1.’de görülmektedir.

Çizelge 3.1. Çimento ve uçucu külün fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları

Kimyasal Kompozisyon	Çimento	Uçucu Kül
CaO(%)	58,85	1,07
SiO ₂	19,41	63,04
Al ₂ O ₃	5,58	21,63
Fe ₂ O ₃	3,67	6,77
MgO	2,12	<%3
SO ₃	3,16	0,10
K ₂ O	0,69	<%3
Na ₂ O	0,61	2,79
Kızdırma kaybı	6,07	<%10
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	28,66	91,44
Çözünmeyen Kalıntı	4,75	-
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3,06	2,31
Özgül yüzey (cm ² /gr)	4891	2920

3.1.2. Mineral Katkılar

Bu çalışmada kullanılmak üzere F sınıfı uçucu kül, pulverize taş kömürü yakılarak elde edilmekte olan Sugözü Termik Santrali’nden, İskenderun Enerji Üretim ve Tic. A.Ş. aracılığıyla temin edildi. Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.1.’de verilmektedir.

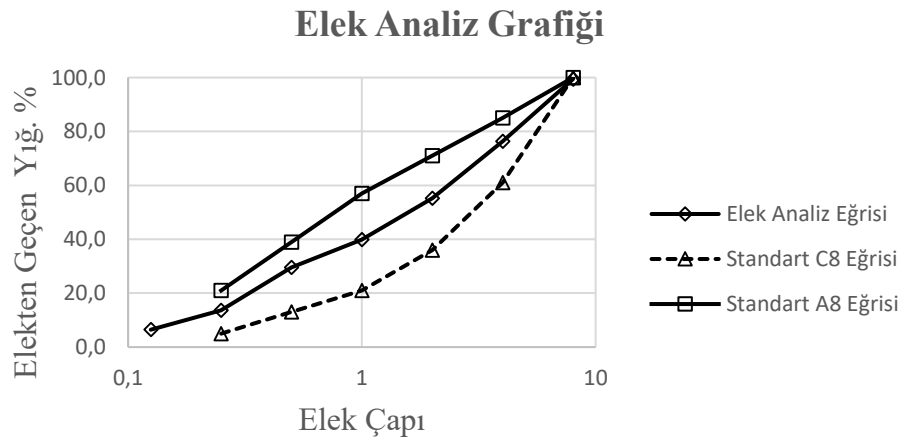
3.1.3 Agrega

Bu çalışmada Malatya Çınarlar Beton firmasının beton üretim santralinden temin edilen agregalar kullanılmıştır. İnce agrega olarak kırma taş tesisinden elde edilmiş (0-2 mm) ve (2-4 mm) kırma kum, iri agrega olarak (4-8 mm) kırma agrega kullanılmıştır. Kullanılan agregalar Şekil 3.1.'de sınıflandırılmış olarak görülmektedir.



Şekil 3.1. Lifli KYB üretiminde kullanılan agregalar

Çalışmada kullanılan agregaların su emmeleri 0-2, 2-4 ve 4-8 mm için sırasıyla, %1.57, %0.65 ve %0.20'dir. Kullanılan agregaların özgül ağırlıkları ise sırasıyla 2.43, 2.64 ve 2.68'dir. Çalışmada kullanılan agregalara ait elek analiz grafiği Şekil 3.2.'de görülmektedir.



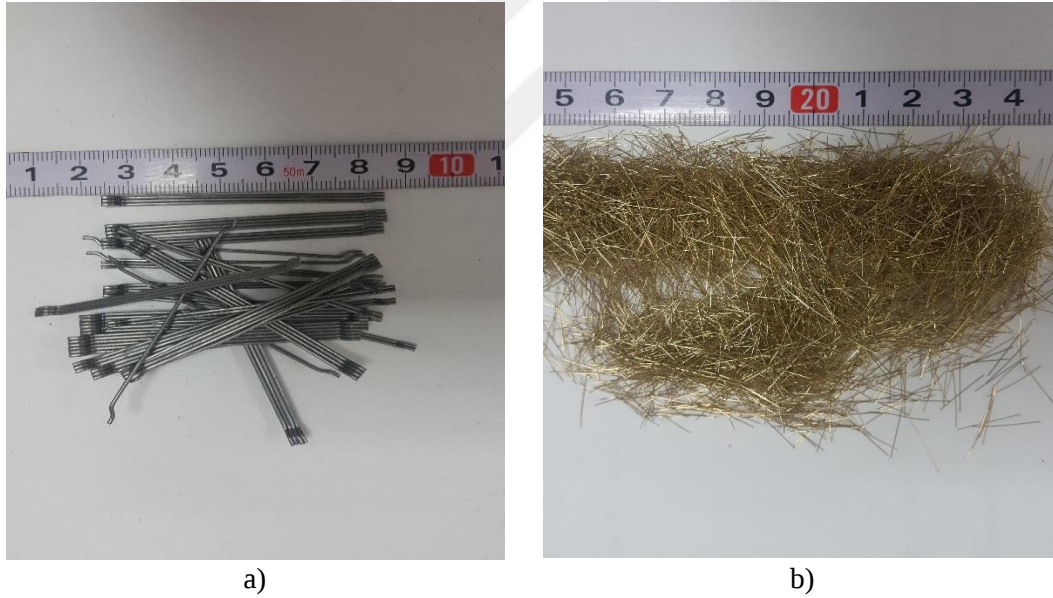
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan agregalara ait elek analizi grafiği

3.1.4. Kimyasal Katkı

Karma lifli kendiliğinden yerleşen beton karışımların işlenebilirlik değerlerini sağlayabilmek için, SİKA Yapı Kimyasalları tarafından üretilmekte olan yüksek oranda su azaltıcı, polikarboksilat esaslı bir süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı özgül ağırlığı yaklaşık 1,06 olan sıvı halde bir katkıdır.

3.1.5. Lif

Farklı tip ve özellikte olan çelik lifler beton ve harçların donatılmasında kullanılmaktadırlar. 1970'ten sonra önem kazanan çelik lifler, şekil, boyut ve yüzey yapısı olarak farklı üretildikleri için mekanik özellikleri, çekme mukavemetleri, aderansları, gerilme ve absorbe yetenekleri bakımından farklı özellikler sergilerler (Durmaz, 2007). Çalışmada, makro ve mikro olmak üzere iki tip çelik lif kullanılmış olup (Şekil 3.3.), bu lifler Hesa İnşaat'tan temin edilmiş DRAMIX OL 13/16 ve DRAMIX 65/60 ticari kodlu çelik liflerdir. Kullanılan liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2.'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan lifler; a) DRAMIX 65/60, b) DRAMIX OL 13/16

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

	Lif Boyu, l (mm)	Lif Çapı, d (mm)	Narinlik l/d	Çekme Dayanımı (MPa)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
DRAMIX 65/60	60	0,90	65	2300	7,85
DRAMIX OL 13/16	13	0,15	87	3000	7,20

3.2. Yöntem

3.2.1. Karışımların Hazırlanması

Karma çelik lif içeren kendiliğinden yerleşen betonların (KLKYB) üretiminde kullanılması planlanan, yerel kaynaklardan elde edilmiş, ince ve iri agregalar, fiziksel özellikleri belirlendikten sonra farklı boy, çap ve dayanıma sahip iki adet çelik lifin kendiliğinden yerleşen betonların reolojik ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla Çizelge 3.3'te detayları verilen toplamda 5 adet karışım üretilmiştir.

Çizelge 3.3. Çalışmada üretilen karışımların kodları ve içerdikleri bileşen miktarları (kg/m³)

Karışım Kodu	Çimento	Uçucu Kül	Su	Çelik Lif		Agrega			SA*
				Dramix 65/60	OL 13/16	0 - 2 mm	2 - 4 mm	4 - 8 mm	
KYB	350	250	167	0	0	605.1	453.8	453.8	5
MAK1-KYB	350	250	167	78,5	0,00	602.2	451.6	451.6	7
MAK0.75MİK0.25-KYB	350	250	167	58,88	19,62	598.8	449.1	449.1	10
MAK0.50MİK0.50-KYB	350	250	167	39,25	39,25	597.4	448	448	13,5
MAK0.25MİK0.75-KYB	350	250	167	19,62	58,88	593.5	445.1	445.1	15

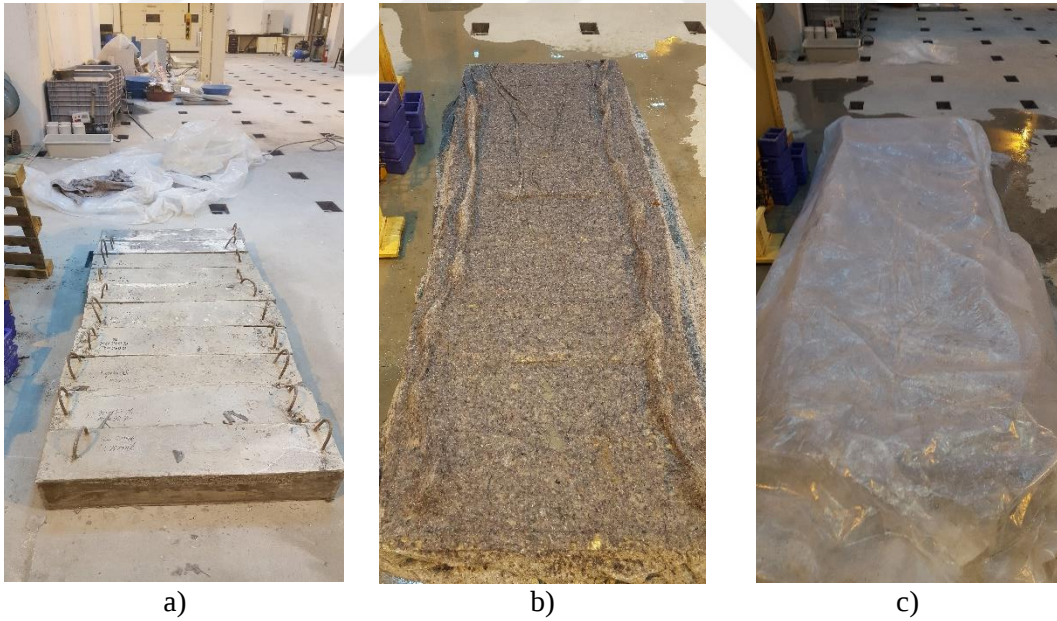
SA*: Süper akışkanlaştırıcı

Üretilen karışımlarda, su/bağlayıcı madde (çimento + uçucu kül) oranı 0,28 olarak sabit tutulmuştur. Üretilen karışımlarda toplamda makro ve mikro olmak üzere hacimce %1 oranında lif kullanılmıştır. Karışım hesapları sonucunda elde edilen toplam agrega miktarının %40 oranında 0-2 mm, %30 oranında 2-4 mm ve %30 oranında 4-8 mm sınıflarındaki agregalardan karışımlara eklenmiştir. Yapılan çalışmada kontrol karışımı olarak çelik lif ilavesi yapılmadan üretilen KYB karışımı kontrol karışımı olarak belirlenmiştir. MAK0.75MİK0.25-KYB karışımı %0,75 oranında makro çelik lif, %0,25 oranında mikro çelik lif içeren kendiliğinden yerleşen beton karışımının kodlamasıdır. Üretilen tüm karışımlarda çimento, uçucu kül, su ve agrega miktarları sabit tutulmuş ancak, lif miktarı toplamda hacimce %1 değerinde olacak şekilde makro ve mikro liflerin toplamından oluşturulmuştur. Karışımların kendiliğinden yerleşebilirlik değerlerini sağlayabilmek için süper akışkanlaştırıcı (SA) miktarı değiştirilerek karışımlara eklenmiştir.

Üretilen tüm karışımlar 300 lt kapasiteli betoniye kullanılarak hazırlanmıştır. Karışımında kullanılacak tüm agrega, çelik lif ve kullanılacak su miktarının 2/3'ü betoniye boşaltılarak 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. 3 dakikanın sonunda geri kalan 1/3'lük su ile çimento, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı karışıma ilave edilerek 7 dakika boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. Karıştırma işlemi bittikten sonra, hiç beklemeden üretilen

karışımların taze özelliklerini belirlemek amacıyla Çökme-Yayıma, T_{50} ve J-Halkası deneyleri yapılmıştır. Bununla beraber üretilen karışımların sertleşmiş özelliklerini belirlemek amacıyla üretilen betonlar herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan deney kalıplarına doldurulmuştur.

Üretilen karışımların her birinden 28 ve 56 günlük sonuçlar için, her yaşta 2 adet numune basınç testinde kullanılmak üzere toplamda 20 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numunesi, eğilmede çekme dayanımı için her yaşta 2 adet kullanılmak üzere toplamda 20 adet 10x10x40 cm boyutlarında kiriş numunesi hazırlanmıştır. Üretilen karışımların her birinden 56 günlük eğilmede kesme dayanımı sonuçları için her karışım türünden 2 adet olmak üzere toplamda 10 adet 20x20x100 cm boyutlarında büyük ölçekli kiriş numunesi hazırlanmıştır. Üretilen küp ve 10x10x40 cm lik kiriş numunelerinin, taze beton halleri bağıl nemi koruyacak şekilde bir gün kalıpta bekletildikten sonra, kalıptan çıkarılarak test gününe kadar standart kür havuzunda tutulmuştur. Büyük ölçekli kirişler kalıptan çıkarıldıktan sonra, numuneler üstüne geotekstil keçe ve buhar geçirmez naylon örtü ile kapatılmış, deney gününe kadar bağıl nemini koruyacak şekilde sulaması yapılmıştır. Büyük ölçekli kiriş numunelerinin kür aşamaları Şekil 3.4.'te görülmektedir.



Şekil 3.4. Büyük ölçekli kiriş numunelerinin kür aşamaları; a) kalıptan çıkarılmış hali, b) geotekstil keçe ile örtülmüş hali, c) naylon ile kapatılmış hali.

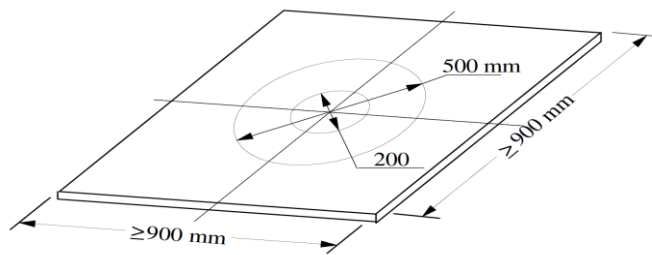
3.2.2. Taze Özellikler

Karma lifli kendiliğinden yerleşen beton karışımların taze durumdaki işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi için çökme-yayıma, T_{50} ve J-Halkası deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler yapılırken alt ve üst limitler için EFNARC 2005' teki sınırlar esas tayin edilmiştir.

3.2.2.1. Çökme yayılma ve T_{50} zamanı deneyi

Çökme-yayılma ve T_{50} zamanı, KYB' nin, bir engel olmadığında akma oranını ve akabilirliğini belirleyen bir deneydir. Çökme deneyi TS EN 12350-2' ye göre yapılır ve KYB' nin dolma yeteneğinin bir belirtisidir. T_{50} zamanı da akma hızının ve bu yüzden KYB' nin viskozitesinin bir ölçümüdür. Taze beton, TS EN 12350-2 çökme deneyindeki gibi bir koniye boşaltılır. Koni yukarı çekildiğinde, koninin yukarı çekilmesinden itibaren betonun 500 mm' lik bir çapa yayılma zamanı ölçülür. Bu zaman T_{50} zamanıdır. Betonun en büyük akma yayılma çapı ve ona dik açıdaki yayılma çapı ölçülür. Bu iki ölçümün aritmetik ortalaması çökme-yayılma değerini vermektedir. Çökme-yayılma deneyi, üzerinde betonun yerleşebileceği, en az 900 mm×900 mm' lik düzlem bir alana sahip yatay bir plaktan oluşan tabla üzerinde yapılır. Plaka düzgün ve pürüzsüz, emici olmayan, minimum kalınlığı 2 mm olan bir yüzeye sahip olmalıdır. Yüzey çimento hamurundan kolayca etkilenmemelidir ve paslanmaya eğilimli olmamalıdır. Plakanın yapısı çarpılmayı, yamulmayı önleyecek tarzda olmalıdır. Zıt kenarların merkezleri arasına düz bir kenar yerleştirildiğinde herhangi bir noktadaki düzlük sapması 3 mm'yi geçmemelidir. Şekil 3.5' te gibi tabakanın merkezi bir çaprazlamayla işaretlenmeli ve tabakanın merkezinden 200 mm ve 500 mm çapları çizilmelidir (Şekil 3.5). Deney modeli TS EN 12350-2'ye uygun olmalıdır. Deney şu şekilde yapılır (TS EN 12350-2, 2002): Koni ve tabla TS EN 12350-2' deki tanıma göre hazırlanır.

- Koni tabla üzerindeki 200 mm' lik daireyle çakışacak şekilde yerleştirilir ve betonun koni altından sızmasını engelleyecek şekilde koniye bastırılır (veya ağırlıklı halka kullanılır).



Şekil 3.5. Çökme yayılma tablası

- Koni sallanmadan ve şişlenmeden doldurulur; beton, koninin üstünden taşmayacak şekilde düz bir cisimle silinip düzeltilir. Koninin dolu bir şekilde 30 sn' den fazla olmayan bir süre kalması sağlanır; bu zaman esnasında tabladan taşan beton varsa temizlenir ve tablanın fazla sulu olmadan, nemli olması sağlanır.

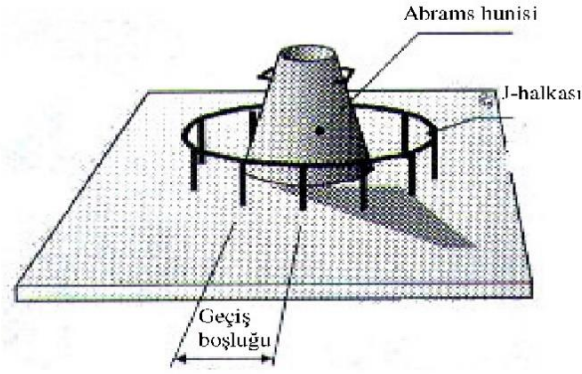
- Akan betona müdahale olmadan, bir hareketle düşey olarak koni kaldırılır. T_{50} istenmişse, tabla ile temasın son bulduğu anda süreölçer çalıştırılır ve betonun 500 mm' ye varması için geçen zaman 0,1 sn hassasiyetle kaydedilir. Tablayı veya betonu sarsmadan yayılan en büyük çap ölçülür ve 10 mm hassasiyetle d_m olarak kaydedilir. Sonra da d_m ' ye dik doğrultuda yayılma çapı 10 mm hassasiyetle ölçülür ve bu da d_r olarak kaydedilir. Çökme-yayılma değeri $\frac{d_m+d_r}{2}$ 'den hesaplanır.

-Ayrışma için betonun yayılması kontrol edilir. Çimento harcı kaba agregadan ayrışabilir. Ayrışan kaba agrega merkezi bölgede gözlemlenebilir. Ayrışmanın meydana gelip gelmediği ve bu yüzden deneyin yeterli olup olmadığı rapor edilir.

3.2.2.2. J-halkası deneyi

J-halkası testi olarak da bilinen J-halkalı çökme - yayılma testi ise yayılma tablası üzerine yerleştirilen halka şeklinde donatı engelleri ile EFNARC 2005'e göre yapılmaktadır. Halka testinin ekipmanları Şekil 3.6 'da görüldüğü gibi, yayılma tablası, Abrams hunisi ve gerçek durumdaki yoğun donatıyı da temsil eden halka şeklinde parmaklıklı çelik bir çemberdir. Halka çapı ve donatı engellerinin açıklıkları değişken olabilmektedir. J- halkalı çökme yayılma testi ile taze betonun akıcılığının yanı sıra, engeller arasından geçiş yeteneği de değerlendirilebilmektedir. Tabla üzerinde yayılan betonun yayılma sırasında ilk karşılaştığı engel çelik halkanın parmaklıklarıdır. Yayılma tabla üzerinde son bulduktan sonra yayılan betonun halkanın hemen iç kısmındaki beton yüksekliği ile halkanın hemen dışındaki beton yüksekliğinin farkı o betonun geçiş yeteneği veya tıkanma riski hakkında bilgi verir. Prosedür olarak, ölçülen bu farklar yayılan betonda dört farklı noktadan yapılmalıdır.

Halka testi, taze betonun engeller arasından geçiş yeteneği hakkında fikir verebilen pratik bir testtir. Donatı engellerinin varlığı yayılma çapını etkiler ancak etkileme düzeyi karışımın özellikle hamur hacmine bağlıdır.



Şekil 3.6. J-Halkalı çökme yayılma testi (Groth, 2000-a)

3.2.3. Sertleşmiş Özellikler

KLKYB karışımların sertleşmiş durumdaki özelliklerinin belirlenmesi için standart basınç deneyi, eğilmede çekme deneyi ve büyük ölçekli kirişlerin kesme dayanımı testleri yapılmıştır.

3.2.3.1. Basınç dayanımı

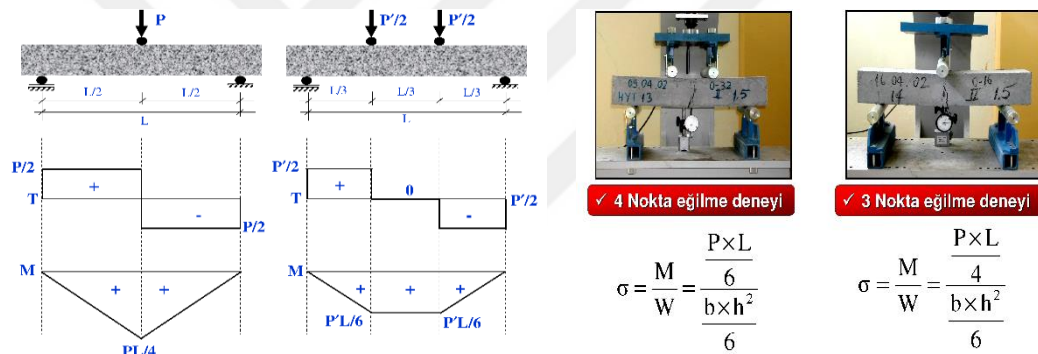
Basınç dayanım deneyleri basınç test cihazında (Şekil 3.7.) ASTM C39 standartına uygun olarak yapılmış olup, test numunelerinin yükleme hızı 6 kN/sn olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Basınç test cihazı

3.2.3.2. Eğilmede çekme dayanımı

Herhangi bir biçimde mesnetlenmiş bulunan, eksene dik veya eksene dik bileşeni bulunan yük etkisindeki yapı elemanlarında, eksenin eğilmesine neden olacak bir eğilme etkisi veya şekil değiştirme olur. Bu eğilme etkisine “eğilme momenti” denir. Eğilme momenti değeri, mesnetler arasındaki mesafe olan açıklığa ve açıklıkta etkili olan yükün büyüklüğüne bağlıdır. Eğilme momenti etkisindeki elemanlarda aynı anda çekme ve basınç gerilmesi oluşur. Ayrıca, eğilme momenti etkisinde, eleman kesitlerinde çekme ve basınç gerilmeleri yanında kayma gerilmeleri de oluşacaktır. Yük, yani eğilme momenti etkisinde, elemanın mesnetleri arasındaki açıklıkta, eksenin ilk durumdaki konumu ile yüklemenden sonraki konumu arasındaki farklılığa “sehim” veya “çökme” denir. 3 noktalı ve 4 noktalı eğilme deneylerine ait grafik ve eğilme gerilmesi hesaplama formülleri Şekil 3.8.’de görülmektedir.



Şekil 3.8. 3 ve 4 Nokta eğilme deneyi düzeneği, moment ve gerilme değerleri (Topçu, 2009)

Eğilme deneyi sonucunda eğilme momenti (M), eğilme gerilmesi (σ), elastisite modülü (E) ve sehim miktarı (δ) gibi değerler hesaplanır. Deney ASTM C1609/C1609M-12 standartına göre yapılır. Bu deney genellikle kırılğan ve gevrek malzemeler için yapılır. Örneğin; dökme demirler, yüksek mukavemetli çelikler, çelik dökümler, beton kirişler v.b. (Topçu, 2009) .

Karışımların eğilme yükü altındaki özelliklerinin belirlenmesi için boyutları 100x100x400 mm olan kiriş numuneleri üzerinde yüklerin uygulanacağı noktalar belirlenmiş ve 4 noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Kirişlerin orta nokta deplasmanlarını ölçmek için 2 adet değişken diferansiyel transformatör (LVDT) konulmuştur. Deneye başlamadan önce LVDT’lerin kalibrasyon ve sıfırlama işlemleri yapılmıştır.

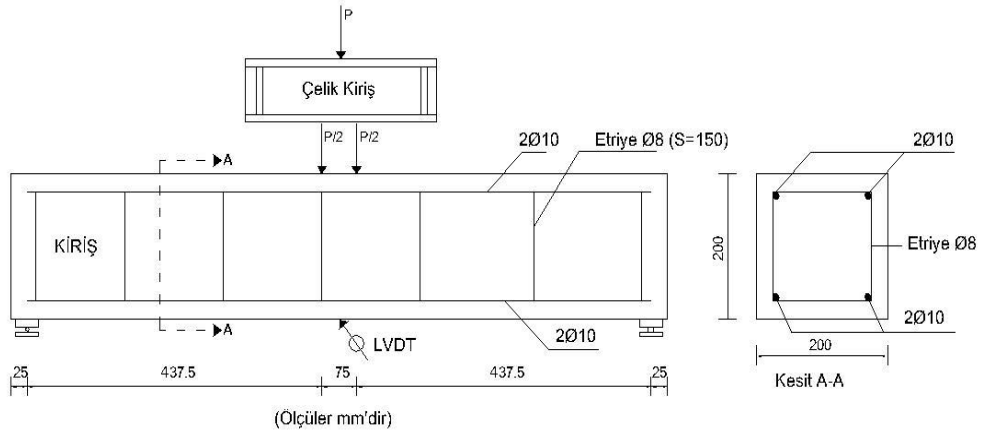
3.2.3.4. Büyük ölçekli kiriş testleri

Üretilen on adet büyük ölçekli kiriş numuneleri üzerinde dört noktali eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bütün kirişlerin testleri 56. yaş gününde yapılmış olup, bütün kirişler için aynı şartlarda kür yapılmıştır. KLKYB' li kirişlerde lif takviyesi ile beraber etriye ve boyuna donatı ilavesi de yapılmıştır. Üretilen bütün büyük ölçekli kirişlerde kesme açıklığının etkili derinliğe oranı (a/d) 2,5 olarak tercih edilmiştir. Üretilen kiriş numunelerinin üretim, ölçü ve detayları ile test düzeneği Şekil 3.8. 'da görülmektedir.



a)

b)



c)

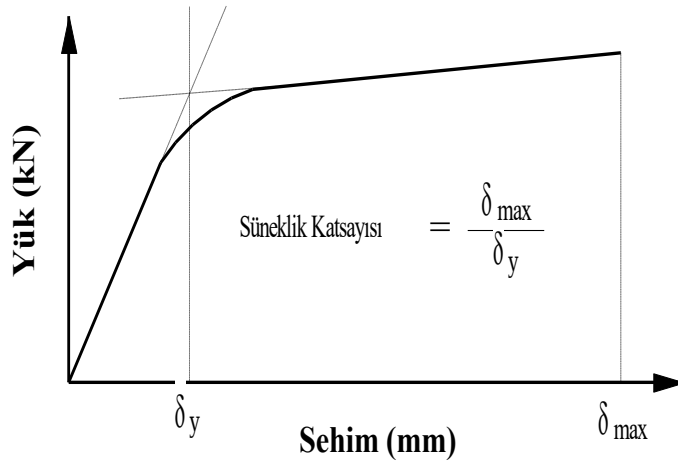
Şekil 3.9. Üretilen kiriş numunelerinin: a) Üretim aşamaları, b) Test düzeneği, c) Donatı, boyut ve test yükleme detayları

Yer değiştirme kontrollü deneyler sırasında, yükleme reaktöründen gelen yük, sert bir çelik plaka yardımı ile KLKYB kiriş numunelerine iki eşit yük parçası olarak iletildi. Her yükleme aşamasında, LVDT kullanılarak kiriş örneklerinin merkezlerindeki sehim okumaları ve bu sehim okumalarına paralel olarak kesme kuvveti değerleri kayıt altına alındı. Yükleme sonunda kiriş örneklerinde oluşan çatlak şekilleri işaretlendi. Üretilen kirişlere ait boyutsal özellikler Çizelge 3.4. 'te görölmektedir.

Çizelge 3.4. Kiriş örneklerine ait boyut ölçüleri ve a/d oranı

	Karışım Türü	Uzunluk (mm)	Etkili Derinlik (mm)	b (mm)	h (mm)	a/d oranı
1	KYB	1000	175	200	200	2.5
2	MAK1-KYB	1000	175	200	200	2.5
3	MAK0.75MİK0.25-KYB	1000	175	200	200	2.5
4	MAK0.50MİK0.50-KYB	1000	175	200	200	2.5
5	MAK0.25MİK0.75-KYB	1000	175	200	200	2.5

Karma lıflı kendiliğinden yerleşen karışımların, büyük ölçekli kiriş testlerinin sonuçlarını değerlendirmek için Azizinamini ve ark. (1999) tarafından geliştirilen süneklilik katsayısı şekil 3.10.'deki formülden yararlanılarak bulunmuştur.



şekil 3.10. Süneklilik katsayısının tanımı (Azizinamini ve ark., 1999)

Süneklilik katsayısı hesaplanırken eğrinin tepe noktası öncesi ve tepe noktası sonrasındaki kısımlara birer teğet çizilir. Bu teğetlerin çakışma noktasındaki sehim değeri okunur. Eğrinin maksimum sehim miktarı, teğetlerin çakışma noktasındaki sehim değerine bölünürerek süneklilik katsayısı hesaplanır.

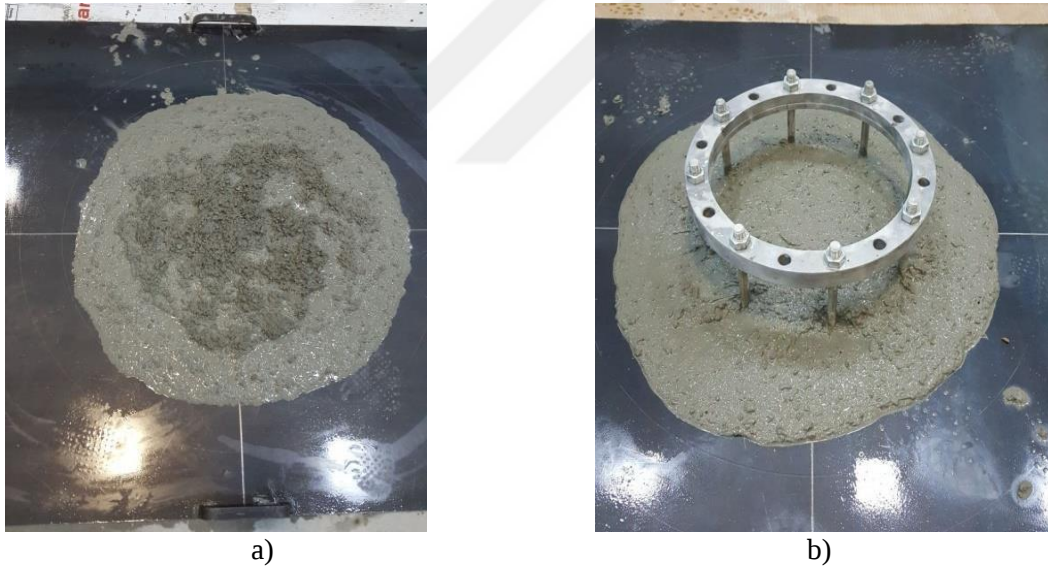
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Taze Özellikler

KYB'nin işlenebilirliği, çelik liflerin dahil edilmesinden etkilenir ve lifsiz KYB'nin taze özelliklerine oranla azalmalar ortaya çıkar. Çelik liflerin işlenebilirlik üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek için, bu çalışmada, SA'nın yanı sıra, çimento ile beraber mineral katkı olarak uçucu kül, karışımlara eklenmiştir. SA, KYB'nin akıcılığını geliştirmek için kullanılmıştır. Bu kapsamda, sadece SA miktarı düzenlenerek ve su/bağlayıcı malzeme oranı değiştirilmeden betonun işlenebilirliği artırılmıştır.

4.1.1. Çökme yayılma ve T_{50} zamanı deneyi

EFNARC (2005)'te, KYB testlerinin sonuçları için önerilen bazı değerler vardır (Çizelge 4.1.). Şekil 4.1.'de çökme-yayılma, T_{50} ve J-Halkası deneylerinin yapıışları görölmektedir.



Şekil 4.1. Taze KLKYB deneyleri: a) Çökme-yayılma ve T_{50} zamanı deneyi, b) J-Halkası deneyi

Çalışma sonucunda üretilen karışımlardan elde edilen çökme yayılma, T_{50} zamanı ve J-Halkası deneylerine ait sonuçlar Çizelge 4.1' de görölmektedir. Bu çalışmada, karışımlar makro ve mikro çelik liflerden oluşmasına rağmen Çizelge 4.1.'den anlaşılacağı üzere, deneylerden elde edilen çökme yayılma çapı değerlerinin önerilen değerler aralığında olduğu görölmüştür. Çelik lifler dahil edilmesine rağmen, karışımların yeterli akışkanlık gösterdiği

anlamına gelir. Mikro çelik lif içermeyen karışımlarda elde edilen çökme çapı sonuçları EFNARC tarafından önerilen değerlerin üst sınırlarındaydı. Mikro çelik lif içeriği arttıkça ve böylece makro çelik lif içeriği azaldıkça, çökme-yayılma çapı değerleri düşmüştür. Makro lif yerine mikro lif miktarındaki artışın, karışımın akıcılığını azalttığı anlamına gelir.

Bu anlamda, çelik lifinin en boy oranındaki artışın, lifler arasındaki etkileşime bağlı olarak betonun akma kabiliyetinde bir azalmaya neden olduğu söylenebilir. Buna benzer sonuçlar Moens (1979) tarafından da bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Taze özelliklere ait deney sonuçları ve alt üst limitler

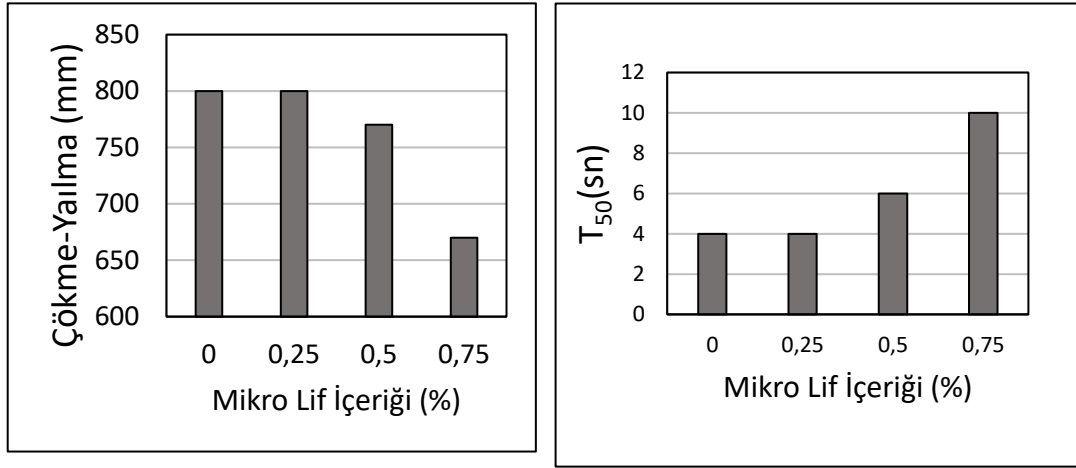
Karışım Türü	T ₅₀ (sn)	Çökme yayılma (mm)	J-Halkası (mm)
KYB	3	820	5
MAK1-KYB	4	800	9
MAK0.75MİK0.25-KYB	4	800	10
MAK0.50MİK0.50-KYB	6	770	15
MAK0.25MİK0.75-KYB	10	670	19
Limitler*	2-5	650-800	0-10

* EFNARC tarafından önerilen işlenebilirlik testleri kabul aralıkları

Mikro lifin makro lif ile yer değiştirmesi, T₅₀ süresi üzerinde önemli etkilere sahip olmuştur. Mikro lif içeriği olmadığında, akış süresi EFNARC değerleri aralığında olmuştur (Çizelge 4.1.). Bununla birlikte, akış süresi, artan mikro lif oranı ile artmıştır. Akış süresindeki bu artış, yüzey alanı makro lifden daha fazla olan mikro liflerdeki artıştan dolayı daha yüksek miktarda lif içermesine bağlanabilir.

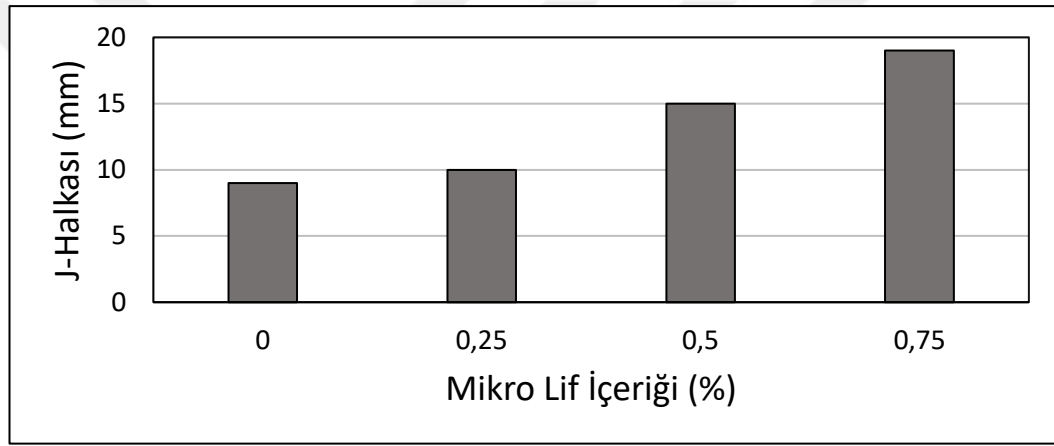
Akçay ve Taşdemir'in (2012) KYB'nin akışkanlığı ve viskozitesi konusundaki çalışmaları ile kanıtlandığı gibi, ana etken faktör, lifin mekanik özellikleri değil, lifin geometrisidir. Mikro lif içeriğine göre çökme yayılma ve T₅₀ süresi grafikleri Şekil 4.2. a) ve b)'de görülmektedir.

Mikro lifler daha yüksek narinlik oranına sahip olmasından dolayı, artan yüzey alanına bağlı olarak, su ihtiyacı artmaktadır. Bu durum Şekil 4.2. 'de görüldüğü gibi çökme yayılma değerini azaltırken, T₅₀ değerini de artırır.



a)

b)



c)

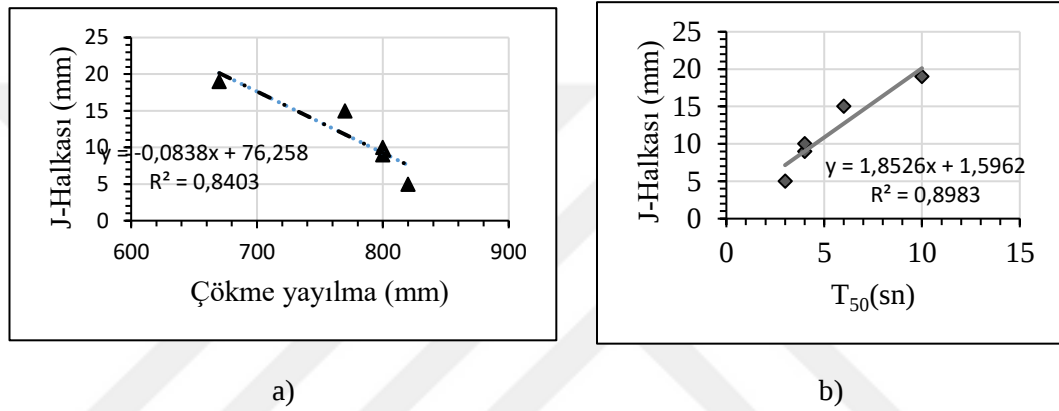
Şekil 4.2. Mikro lif içeriğinin karma lifli KYB karışımlarının işlenebilirlik özelliklerine etkisi: a) Çökme yayılma , b) T₅₀ süresi , c) J-Halkası

4.1.2. J-Halkası deneyi

J-Halkası testinde, mikro lif içermeyen karışımların test sonuçları EFNARC' ta belirtilen limitler arasında kalmıştır (Çizelge 4.1). Karışımlardaki mikro lif içeriği artmaya başlayınca, J-Halkası deneyinde daha yüksek değerler alınmaya başlanılmıştır. Mikro liflerin düz ve makro liflere göre daha fazla yüzey alanına sahip olması, karışımlarda liflerin demetlenmesine sebep olmuş, bu yüzden KLKYB karışımların engeller arasından geçiş yeteneği azalmıştır. Bazı araştırmacılar tarafından (Mangat ve Swamy,1974; Akçay ve Taşdemir, 2012) KYB'ye mikro lifin eklenmesiyle işlenebilirlik değerlerinde benzer düşüşler olduğu saptanmıştır. Mikro ve makro çelik lif içeren KYB'lerin işlenebilirlik değerlerini iyileştirmek için daha düşük yüzey alanına sahip çelik lifler kullanılarak

sağlanabilir (Kareem ve Naranyanan, 1983). Bununla beraber KYB karışımlara yüksek oranda mikro çelik lif katıldığında, karışımın taze özellikleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olmuştur. Mikro lif içeriğine göre J-Halkası deney sonuçları grafiği Şekil 4.2.c)'de görülmektedir.

Karma lifli kendiliğinden yerleşen beton karışımların mikro lif miktarı arttıkça T_{50} süresi ve J-Halkasındaki değerler artmıştır. Şekil 4.3.'te J-Halkası değerlerine kıyasla T_{50} ve çökme-yayılma değerleri arasındaki grafik ve denklemler görülmektedir. J-Halkası değerleri ile çökme yayılma değerleri arasında ters, T_{50} süresi arasında doğru orantı vardır.

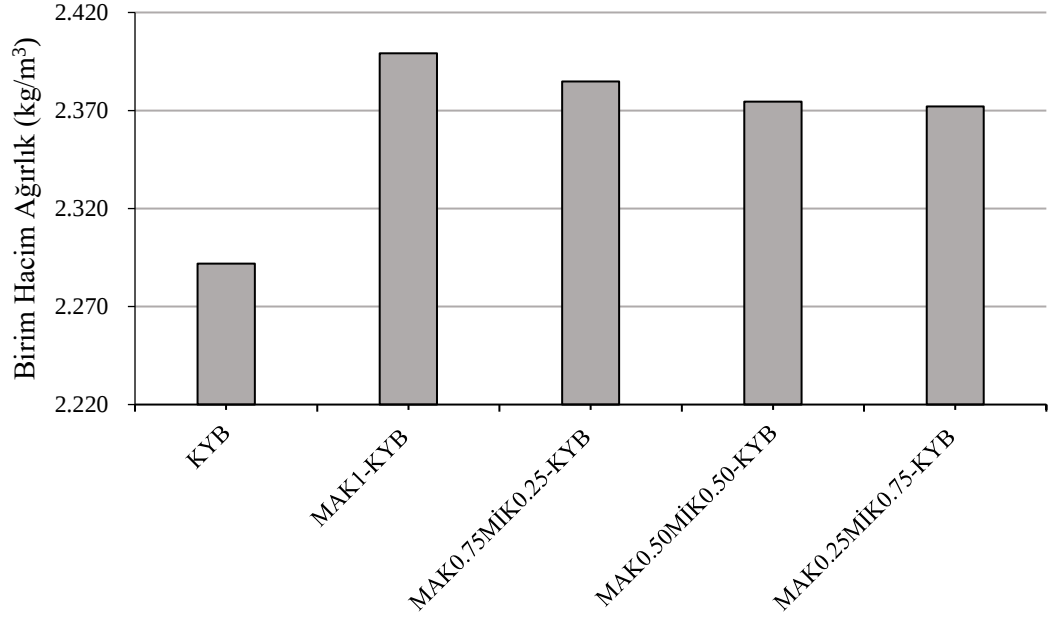


Şekil 4.3. Karma lifli KYB karışımlarının işlenebilirlik özellikleri arasındaki ilişki: a) J-Halkası- Çökme yayılma, b) J-Halkası- T_{50}

4.2. Sertleşmiş Özellikler

4.2.1. Birim ağırlık

Şekil 4.4.'ten görüldüğü üzere, kontrol karışımına kıyasla kendiliğinden yerleşen betona lif ilavesi, karışımların birim hacim ağırlıklarının artmasına neden olmuştur. Karışımlara eklenen lifler, agregalar ile yer değiştirilerek karışımlara ilave edilmiştir. Çünkü, karışımlara eklenen liflerden makro olanların birim hacim ağırlıkları $7,85 \text{ gr/cm}^3$ iken mikro liflerin ise 7.2 gr/cm^3 'tür. Bunun yanında, agregaların birim ağırlıkları $2,4$ ile 2.64 gr/cm^3 arasında değişmektedir. Dolayısıyla karışımlara lif ilavesiyle birlikte birim hacim ağırlıklarda artış gözlenmiştir. Ayrıca, lifli KYB karışımlarda ise, mikro lif oranı arttıkça karışımların birim ağırlıkları sadece makro lif içeren karışımlara nazaran azalmıştır.



Şekil 4.4. Lif içeriğinin karma lifli KYB karışımlarının birim ağırlıklarına etkisi

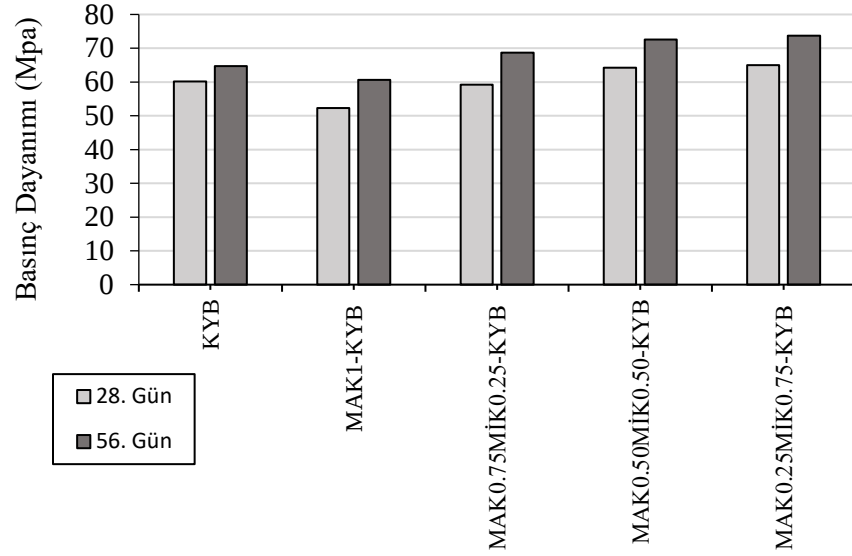
4.2.2. Basınç Deneyi

KLKYB'lerin taze özelliklerinin yanı sıra, 28 ve 56. günde küp numuneler için eksenel basınç dayanımı özellikleri belirlenmiştir. Her karışım için 28 ve 56 . günlerde 2 adet 15x15x15 cm küp deney numunesi üzerinde basınç dayanımı yapılmıştır. Her karışımın 2 adet numunesinin, test sonuçlarının ortalaması hesaplanarak, sonuçlar Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir. Çizelge 4.2.'de görülebileceği gibi, narinlik oranı 87 olan, % 0,75 mikro çelik lif içeren karışım 64.95 MPa ile en yüksek basınç dayanımına, narinlik oranı 65 olan, % 1 makro çelik lif içeren karışım 52,3 MPa ile en düşük basınç dayanımına, sahiptir. KLKYB karışımlarının mikro çelik lif içeriği azaldıkça, basınç dayanımı da azalmıştır. Bu sonucun nedeni, artan mikro çelik lif nedeniyle, karışımların gözenek yapısındaki azalmadan da kaynaklanıyor olabilir. Song ve Hwang (2004) araştırmalarında, lif narinlik oranının artmasıyla basınç dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Mikro çelik lifteki artışla basınç dayanımının artması, mikro liflerin mikro çatlak oluşumunu geciktirmesi ve mikro seviyedeki çatlak yayılmasını önlemesine bağlanabilir. Bununla beraber lif içermeyen KYB karışımının basınç test sonucu, %1 ve %0,75 makro lif içeren karışımların basınç test sonucundan daha büyük olmuştur.

Çizelge 4.2. KLKYB'lerin 28 ve 56. Günlerdeki ortalama eksenel basınç dayanımı sonuçları

Ortalama Basınç Dayanımı MPa(N/mm ²)		
Karışım Kodu	28. Gün	56. Gün
KYB	60,15	64,75
MAK1-KYB	52,3	60,65
MAK0.75MİK0.25-KYB	59,25	68,7
MAK0.50MİK0.50-KYB	64,25	72,6
MAK0.25MİK0.75-KYB	64,95	73,7

Üretilen tüm karışımların 56. günde basınç test sonuçlarına bakıldığında, karışımlarda uçucu kül kullanılmasından dolayı, 28. günde basınç test sonuçlarına oranla, yaklaşık %13'lük bir artışın olduğu görülmektedir. Yapılan başka bir çalışmada (M. Ravinkanth ve A. Krishna, 2017) karışımlarda %0, %0,5, %0,75, %1, %2, ve %3 mikro çelik lif kullanılarak bir araştırma yapılmış, %1 mikro çelik lif kullanılan karışım, basınç dayanımı açısından en iyi sonucu vermiştir. Yapılan diğer bir çalışmada (PS. Song ve S. Hwang, 2004) hacimce kullanım oranı %0,5, %1, %1,5 ve %2 olan çelik lifler, yüksek dayanımlı betona eklenmiş ve maksimum basınç dayanımı %1,5 hacimce çelik lif oranında elde edildiği sonucuna varılmıştır. Şekil 4.5.'te karma lifli kendiliğinden yerleşen betona eklenen liflerin basınç dayanımına etkisi görülmektedir.

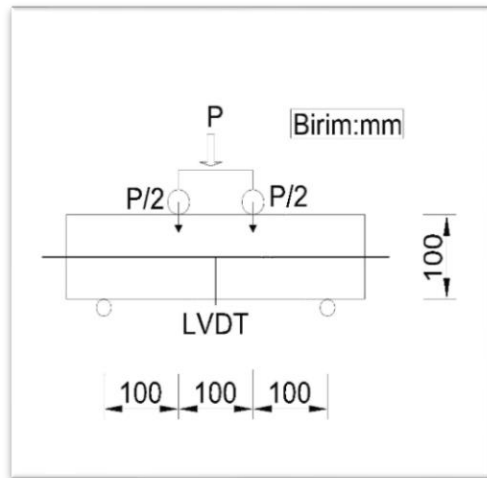


Şekil 4.5. Karma lifli KYB karışımlarının basınç dayanımı üzerinde lif içeriğinin etkisi

Mikro çelik lifteki artış ile karışımların basınç dayanımındaki artış, mikro çatlak oluşumunun geciktirilmesine ve dolayısıyla belirli bir seviyede çatlak yayılmasının önlenmesine bağlanabilir (N. Haddadou ve ark., 2014).

4.2.3. Eğilmede Çekme Dayanımı

Eğilmede çekme dayanımı testindeki sonuçlar, mukavemet değerlerinin çelik liflerin en boy oranında artma ile azaldığını göstermiştir. Şekil 4.6.'da karışımlara ait eğilme deneyi düzeneği ve ölçüleri görülmektedir. KLKYB karışımlarındaki mikro çelik lif yüzdesi arttıkça, eğilmede çekme dayanımı değerlerinin azaldığı anlamına gelir. En yüksek eğilmede çekme dayanımı, % 1 makro çelik lif içeren karışımdan elde edilmiştir.



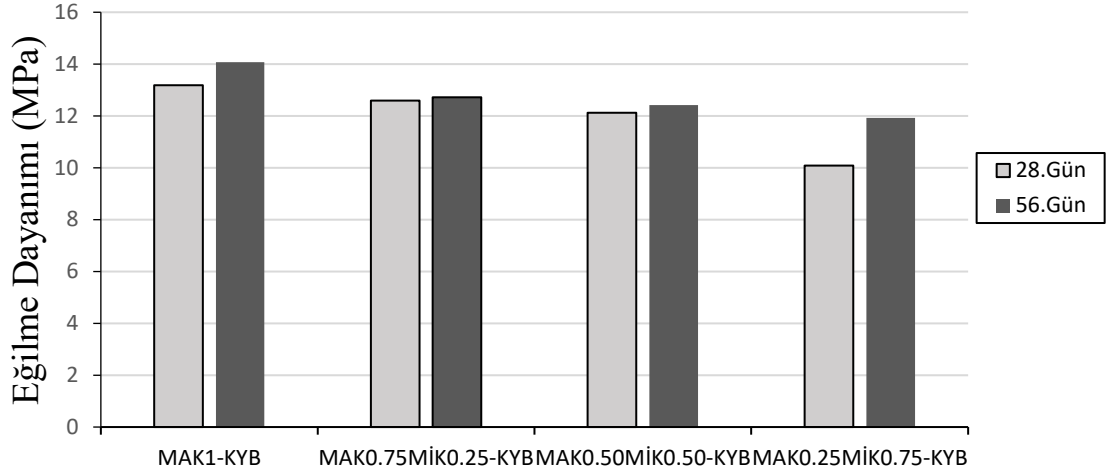
Şekil 4.6. Karışımlara ait eğilme deneyi düzeneği ve ölçüleri

Çizelge 4.3.'da görüleceği gibi, karışımdaki makro çelik lif oranının azalmasıyla eğilmede çekme mukavemetinin azalmasından, makro lifin sorumlu olduğu açıktır.

Çizelge 4.3. Karışımlara ait eğilmede çekme dayanımı, maksimum yük ve maksimum yükteki deplasman değerleri

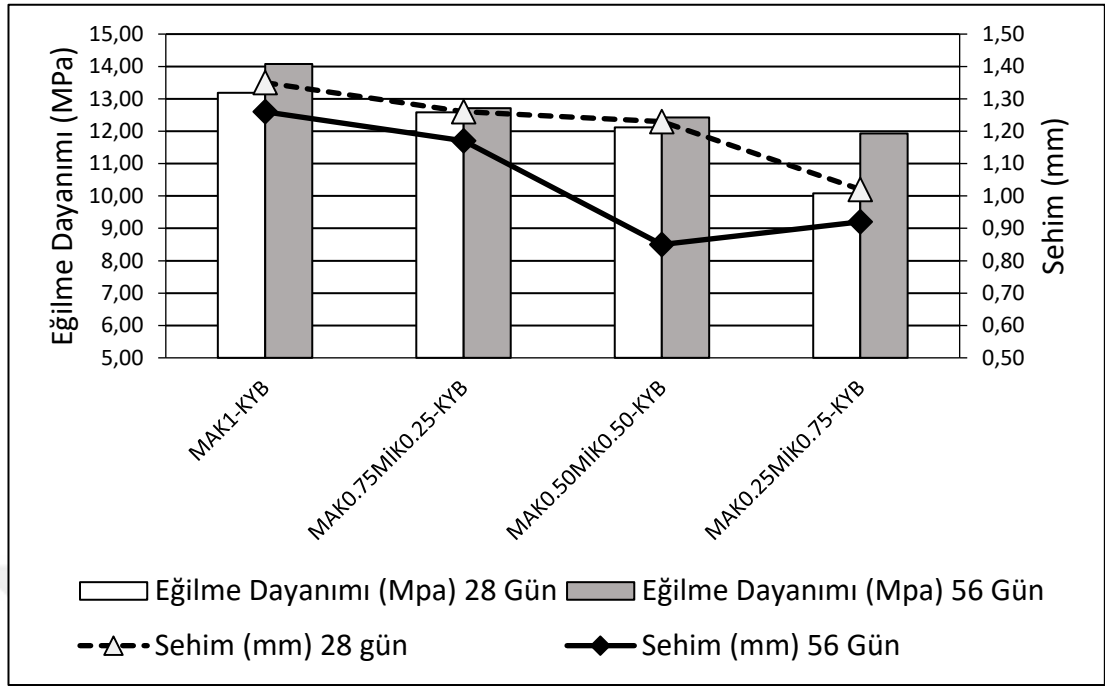
Karışım Kodu	Kür (Gün)	Maks. Yük (kN)	Maks. Ort. Yük (kN)	Maks. Yükteki Deplasman (mm)	Maks.Yükte ki Ortalama Deplasman (mm)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)
MAK1-KYB	28	37.964	43.940	1.45	1.35	11.389	13.18
		49.915		1.25		14.975	
MAK0.75MİK0.25-KYB	28	40.006	41.955	1.39	1.26	12.002	12.59
		43.904		1.12		13.171	
MAK0.50MİK0.50-KYB	28	42.540	40.402	1.26	1.23	12.762	12.12
		38.263		1.19		11.479	
MAK0.25MİK0.75-KYB	28	36.460	33.618	1.05	1.02	10.938	10.09
		30.775		0.98		9.233	
MAK1-KYB	56	43.740	47.287	1.23	1,26	13.122	14.08
		50.834		1.31		15.034	
MAK0.75MİK0.25-KYB	56	40.668	42.403	1.01	1.17	12.200	12.72
		44.138		1.33		13.230	
MAK0.50MİK0.50-KYB	56	44.049	44.415	0.83	0,85	13.215	12.42
		38.780		0.86		11.634	
MAK0.25MİK0.75-KYB	56	43.052	39.780	0.83	0.92	12.916	11.93
		36.507		1.01		10.952	

Makro çatlak ilerlemesi, makro çelik liflerle aktarılan gerilme gecikmesi ile durdurulabildiğinden ve karışımdaki makro çelik lif içeriği yetersiz olduğunda dayanım değeri azalır (N. Haddadou ve ark., 2014). Şekil 4.7'de karışımların eğilmede-çekme dayanımı üzerinde liflerin etkisi görülmektedir.



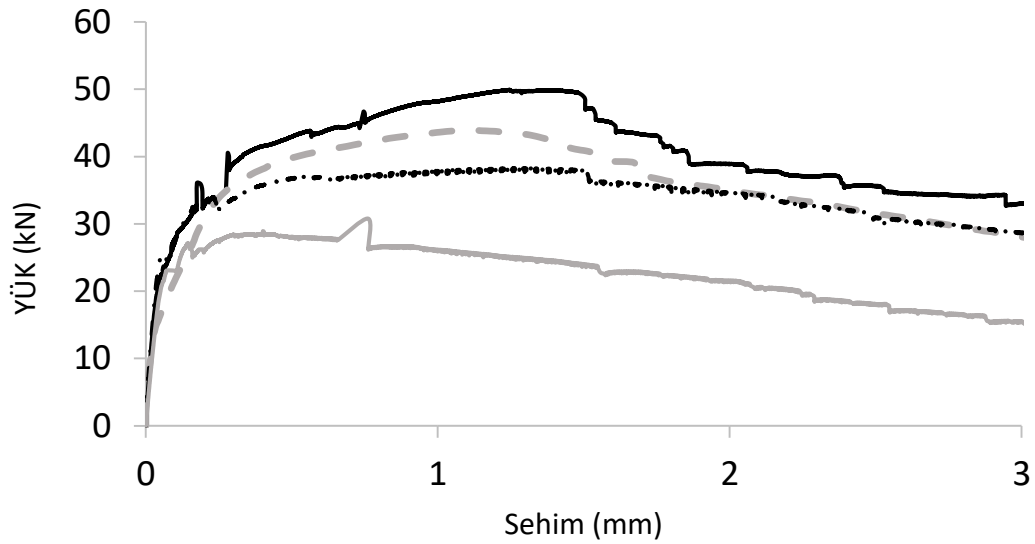
Şekil 4.7. Karma lifli KYB karışımlarının eğilme dayanımı üzerinde lif içeriğinin etkisi

En yüksek eğilmede çekme mukavemeti değeri 13,18 MPa ile %1 makro çelik lif içeren karışımlardan elde edilirken, %0,75 mikro çelik lifli karışımlar 10,09 MPa ile en düşük eğilmede çekme mukavemeti değerine sahip olmuşlardır. %0,75 ve %0,50 mikro çelik lif içeren karışımlarda, geç yaşlardaki sonuçları 28. güne kıyasla çekme mukavemetinde bir artış vardır, bu artış %0,75 mikro çelik lif içeren karışımlarda daha belirgindir. Makro çelik lifler, makro çatlakları köprülediği için, karışımlarda makro lif ile mikro liflerin yer değişimi yapılmasından dolayı, karışımın içeriğinde yeterli miktarda makro lif bulunmadığından, mikro lifler çekme dayanımını artırmada yetersiz kalmışlardır. Benzer sonuçlar N. Haddadou ve ark. tarafından (2014)'da bulunmuştur. 4 noktalı eğilme deneyi sonucunda elde edilen , karışımlara ait eğilme dayanım sonuçları ve sehim değerleri 28. ve 56. günlük yaşlar için Şekil 4.8.'de görülmektedir. Şekil 4.8.'de her bir karışımın her iki yaş günü için maksimum eğilmede çekme dayanım değerleri ve bu değerlere bağlı olarak oluşan orta nokta sehim değerleri grafikte görülmektedir.

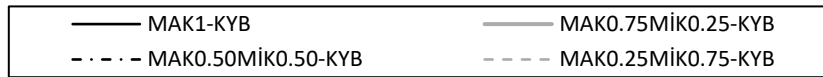
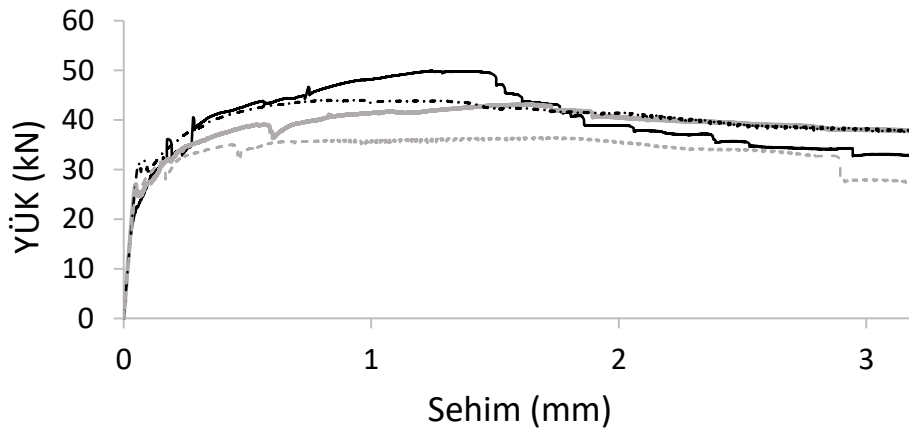


Şekil 4.8. Karışımlara ait eğilme dayanımı ve sehim değerleri grafiği

Bununla birlikte % 1 makro çelik lif içeren karışımlar hem 28 gün hemde 56 günlük numunelerde en yüksek orta nokta deplasmanına sahipken, en düşük orta nokta deplasmanına 28 günlük numunelerde % 0.25 mikro çelik lif içeren karışımda elde edilmiştir. Başka bir deyişle, karışımların sehim kapasitesi, mikro çelik lif içeriğinin artırılmasıyla azalmıştır. Bu bulgulardan, karışımda makro çelik liflerin bulunmaması sebebiyle, mikro çelik liflerin, makro çatlakları köpürüleme için yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Üretilen her bir karışım türü için 28 ve 56 günlerdeki 4 noktalı eğilme deneyleri sonucu elde edilen yük sehim eğrileri Şekil 4.9.'da görülmektedir.



a)



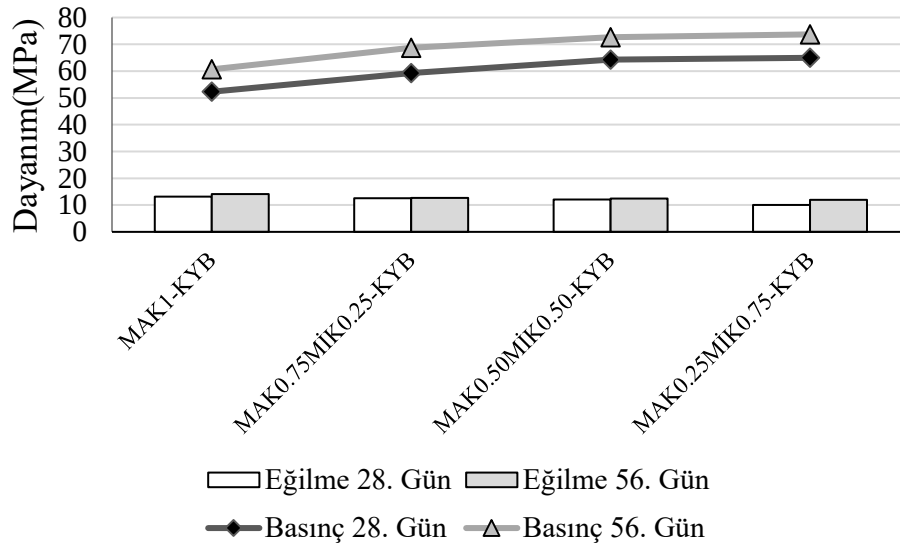
b)

Şekil 4.9. a) Her bir karışıma ait 28 günlük yük-sehim eğrisi, b) Her bir karışıma ait 56 günlük yük-sehim eğrisi

Şekil 4.9.'te görüldüğü gibi, yüksek oranda mikro çelik lif içeren karışımlarda sehim-yumuşama tepkisi gözlenirken, daha yüksek miktarda makro çelik lif içermesi durumunda sehim-setleşme tepkisi açığa çıkmıştır. Özellikle %1 ve %0,75 oranında makro çelik lif içeren karışımlarda, makro lifler betonun gevrekliğini değiştirmişlerdir. Ayrıca yüksek oranda mikro çelik lif içeren karışımlarda, pik yükten sonra, ani bir düşüş gözlenirken, yüksek miktarda makro çelik lif içerenlerde, pik yükten sonra kademeli bir azalma meydana gelmiştir. Eğriler ayrıca KLKYB karışımlarındaki makro çelik lif oranının

azalmasıyla, karışımların eğilme mukavemetinin azaldığını kanıtlamıştır. Karışımlardaki mikro liflerin görevi mikro çatlakları köprülemektir, bununla beraber numune eğrilerinin tepe noktasında da küçük bir etkisi oldu. Makro çelik liflerin, mikro çatlakların gelişimi üzerinde etkisi olmamasına rağmen, eğrilerin tepe noktasından sonraki bölümünü etkilediler.

Karışımlara eklenen makro çelik lifler hem 28 hem de 56 günlerde, karışımların yük taşıma kapasitesini arttırmışlardır. Bu nedenle, yüksek oranda makro çelik lif içeren karışımlarda daha yüksek eğilme mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Haddadou ve Naaman yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçlar bulmuşlardır (Haddadou, ve ark., 2014, A.E. Naaman, Reinhardt, 1995). Şekil 4.10'da karma lifli kendiliğinden yerleşen karışımlara ait eğilme dayanımı ve basınç dayanımı grafiği görülmektedir.



Şekil 4.10. Karışımlara ait eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri grafiği

Beton elemanlarda çatlak kontrolü betonun performansı için hayati öneme sahiptir. Aşırı yüklenmiş beton elemanlarda oluşan çatlaklar, beton elemanların bozulmasına sebep olurlar. Bu anlamda lif kullanımı önemlidir. Beton elemanlara lif takviyesi, çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin durdurma noktasında, elemanda iyileştirme sağlar (Gencel ve ark., 2011). Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi %1 ve %0,75 makro çelik lif içeren karışımlarda, KLKYB daha sünek davranmıştır. Kirişler gerilme sertleşme davranışı sergilemişlerdir. Bu durum numunelerin çatlak karakterizasyonu ile de kanıtlanabilir. Büyük ve tek bir çatlak yerine, mikro ve çok sayıda çatlak gözlemlenmiştir. Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi, %1 ve %0,75 makro çelik lif içeren kirişlerin orta noktalarında çoklu çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Ayrıca, makro çelik lif miktarının yüksek oranda karışıma dahil edilmesi durumunda,

karışımların sehim-sertleşmesi davranışı sergilediği görülmüştür. Bu nedenle, özellikle yüksek miktarda makro çelik lif içeren karışımlarda yüke karşı direnç artmış, bu da eğilmede çekme mukavemetini artırmıştır. Ghanem ve Obeid'in (2015) çalışmasında 65/60 makro çelik lif kullanılmış ve bu lifin iyi derecede enerji yutma kapasitesine sahip olup, çatlakları iyi köprülediği yaptıkları çalışmada kanıtlamışlardır.



a)



b)

Şekil 4.11. a) %1 makro çelik lif içeren kirişin eğilmede çekme testi sonrası orta nokta çoklu çatlak görünümü, b)%0,75 makro çelik lif içeren kirişin eğilmede çekme testi sonrası orta nokta çoklu çatlak görünüşü

4.3. Büyük Ölçekli Kirişlerin Kesme Dayanımı

Deneyssel çalışma kapsamında her karışımdan 2 adet olmak üzere toplamda 10 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan kiriş numuneleri 56. günde yüksek olasılıklı kesme göçmesi sağlamak için $a/d=2.5$ (a: kesme açıklığı/d: etkili derinlik) olacak şekilde, 4 noktalı yüklemeye maruz bırakılarak test edilmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlar Şekil 4.13., Çizelge 4.4. ve 4.5'te görülmektedir. Deneylere dayalı sonuçlarda görüldü ki, kiriş numunelerinin yük taşıma kapasiteleri kontrol numunesine göre, karışıma çelik liflerin

eklenmesi ile %28-%48 oranında, artmaktadır. Kendiliğinden yerleşen beton karışıma çelik liflerin ilave edilmesiyle, kirişlerin çatlak oluşumuna karşı direncinin arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.4. KLKYB karışımların, kiriş kesme dayanımı yük , akma rijitliği sonuçları

	Kiriş Kodları	Yük Kapasitesi (kN)		Kesme Dayanımı (kN)	Akma Rijitliği (kN/mm)
		İlk Çatlak	Maksimum		
1	KYB	54.53	72.39	36.19	24.78
2	MAK1-KYB	70.73	83.97	41.98	22.03
3	MAK0.75MİK0.25-KYB	69.33	82.87	41.43	36.87
4	MAK0.50MİK0.50-KYB	70.61	87.54	43.77	27.26
5	MAK0.25MİK0.75-KYB	81.13	90.41	45.20	33.25

Çizelge 4.5. KLKYB karışımların, kiriş kesme dayanımı sehim, enerji sönümlleme ve göçme modları

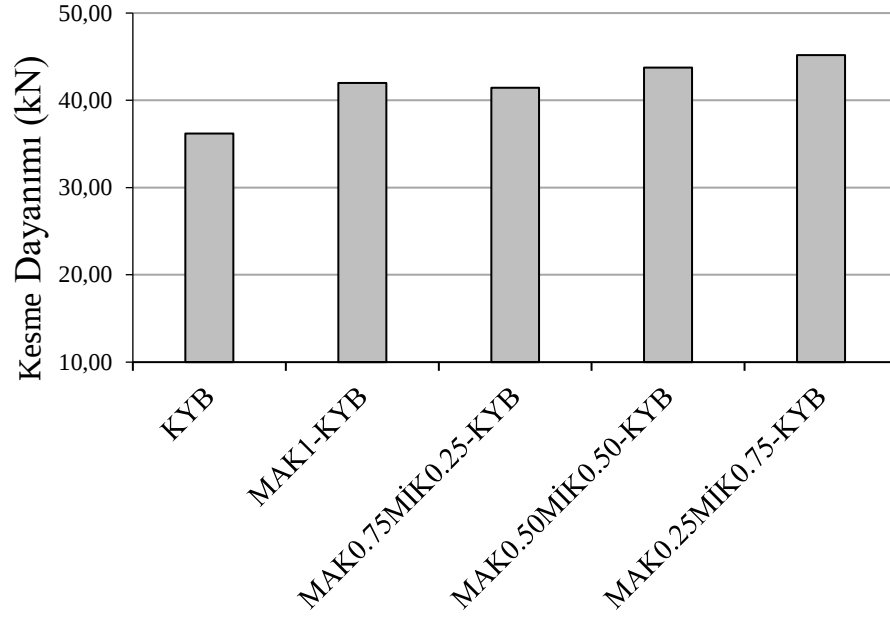
	Kiriş Kodları	Sehim (mm)		Enerji Sönümlleme Kapasitesi (kN.mm)	Süneklik oranı	Göçme Modu
		İlk Çatlak	Göçme Anı			
1	KYB	2.2	25.17	775.68	5,02	Kesme
2	MAK1-KYB	3.21	24.60	883.22	6,15	Eğilme-Kesme
3	MAK0.75MİK0.25-KYB	1.88	20.59	944.14	5,88	Eğilme
4	MAK0.50MİK0.50-KYB	2.59	28.17	1080.06	8,04	Eğilme
5	MAK0.25MİK0.75-KYB	2.44	23.59	1032.43	6,74	Eğilme

Çizelge 4.4.'ten görüleceği gibi en yüksek yük taşıma kapasitesine %0,75 mikro çelik lif içeren numunede ulaşılmıştır. Bununla beraber, lif katkılı karışımlar KYB karışımına kıyasla, maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra, hızlı yük düşüşleri göstermemiş ve sehim yapmaya devam ederken maksimum yük taşıma kapasitelerini belli bir sehim aralığında devam ettirmişlerdir.

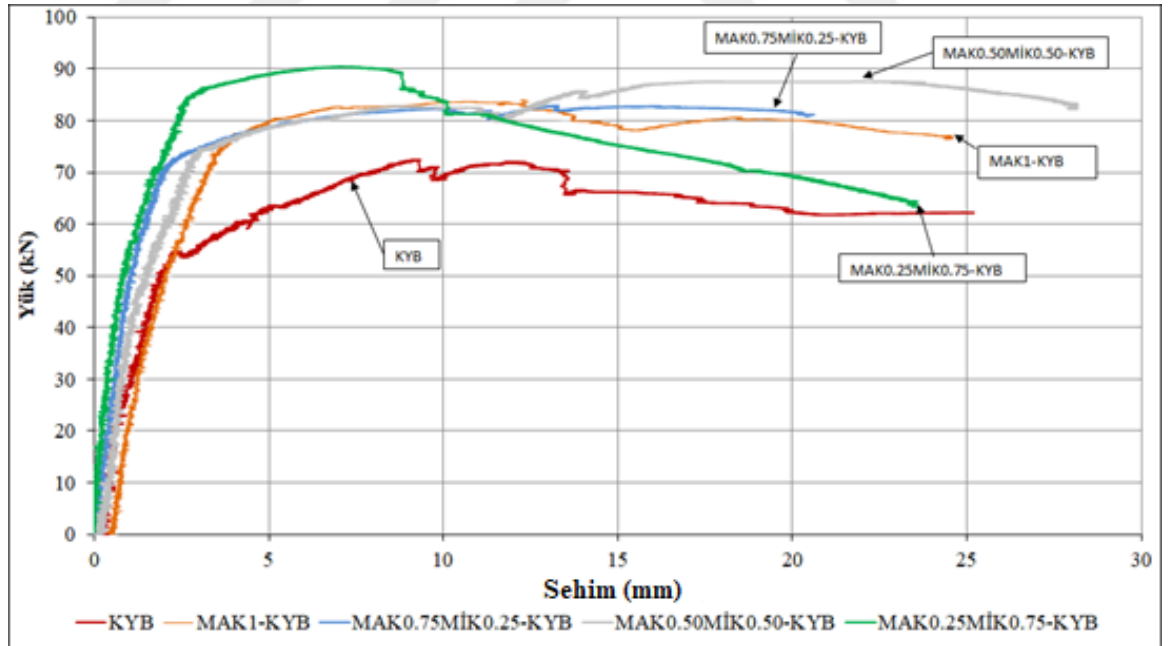
Çizelge 4.4.'ten de görüleceği gibi, en yüksek ilk çatlak yük taşıma kapasitesine %0,25 makro ve %0,75 mikro çelik lif içeren karışımda ulaşılmıştır. Bununla beraber, %0,50 makro ve %0,50 mikro çelik lif içeren KYB karışımında göçme anındaki en yüksek yük taşıma kapasitesi değeri Şekil 4.11.'de elde edilmiştir. Göçme anındaki kadar en yüksek sehim değeri ise, 28,17 mm ile %0,50 makro ve %0,50 mikro çelik lif içeren KYB karışımında olmuştur.

Şekil 4.12.'den anlaşılaacağı üzere, KLKYB karışımlardan en yüksek kesme dayanımı MAK0.25MİK0.75-KYB karışımında elde edilmiştir. Bununla beraber, akma

rijitliğine Çizelge 4.4.'ten bakıldığında en yüksek değer MAK0.75MİK0.25-KYB karışımında tespit edilmiştir.



Şekil 4.12.Karma lifli kendiliğinden yerleşen beton karışımların kesme dayanımları



Şekil 4.13. Karma çelik lifli kendiliğinden yerleşen beton kiriş numunelerin yük-sehim eğrileri

Çizelge 4.5.'ten MAK0.50MİK0.50-KYB karışımından üretilen büyük ölçekli kirişlerin enerji sönümleme kapasitesi ve maksimum yükteki sehimu en yüksek elde edilmiş olup, diğer karışımlara kıyasla daha sünek davranış sergiledikleri görülmüştür. Şekil 4.13'te yük sehim eğrilerinin tepe noktaya kadar olan yükleme kısmının lineere yakın grafik bölgesinden geçirilen doğrusal eğimli çizginin eğimine bakılmış, bu eğim değeri karışımların akma rijitliği olarak Çizelge 4.4.'de eklenmiştir. Akma rijitlik değeri en yüksek olan karışım MAK0.75MİK0.25-KYB karışımı olmuştur.

Dört noktalı eğilmeye maruz büyük ölçekli kiriş deneylerinde, kirişler yüksek olasılıklı kesme göçmesi ile göçecek şekilde teste tabi tutulmuşlardı. Ancak makro ve mikro çelik lif ilave edilerek elde edilen KYB karışımlarla üretilmiş kiriş numunelerinde, belirgin bir şekilde kesme çatlaklarının sınırladığı ve kirişlerin eğilme göçmesi ile göçtüğü tespit edilmiştir. Karışımda kullanılan makro ve mikro çelik liflerin çatlakları köprüleme işlevi böyle bir sonucun oluşmasına sebep olmuş olabilir. Sahoo ve ark. (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmada, beton karışımlarda karma lif kullanımının kesme dayanımını geliştirdiğini bulmuşlardır.

Deneyi yapılan 10 adet kiriş numunesinin, göçme şekilleri ve çatlak düzenleri Şekil 4.14.'teki fotoğraflarda görülmektedir.

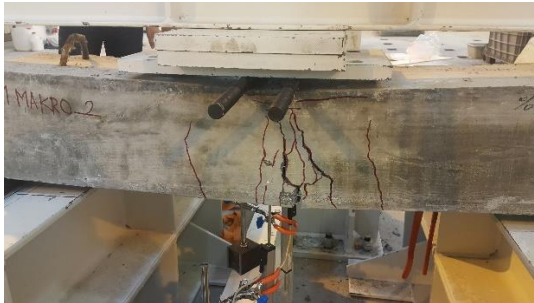


(1)



(2)

KYB



(1)



(2)

MAK1-KYB



(1)



(2)

MAK0.75MİK0.25-KYB



(1)



(2)

MAK0.50MİK0.50-KYB



(1)



(2)

MAK0.25MİK0.75-KYB

Şekil 4.14. Karma lifli kendiliğinden yerleşen büyük ölçekli beton kiriş numunelerinin göçme mekanizmaları ve çatlak düzenleri

Büyük ölçekli kiriş test sonucunda kontrol karışımında görülen, kesme çatlakları, KYB'ye makro ve mikro çelik lif ilavesi ile kesme çatlağından eğilme çatlağına döndüğü görülmüştür.

5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tezde farklı narinliğe sahip, toplam %1 oranında makro ve mikro çelik lif içeren beş karma lifli kendiliğinden yerleşen betondan (KLKYB) üretilmiş numunelerin, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve büyük ölçekli kirişlerin dört noktalı eğilmeye maruz bırakılarak kesme dayanımı gibi özellikler ile taze özellikleri incelenmiştir.

Deney bulgularına istinaden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Mikro çelik lif bulunmayan sadece % 1 makro çelik lif içeren karışımlarda yeterli akıcılık ve engeller arasından geçiş kabiliyeti olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, makro çelik lif yerine mikro çelik lif kullanımı arttıkça, KYB'nin akıcılık kabiliyeti azaldığı görülmüştür.
2. % 0,50 ve % 0,75 oranlarında mikro çelik lif kullanımı, liflerin topaklanmasına neden olmuş ve böylece betonun engeller arasından geçme kabiliyetini azaltmıştır.
3. Mevcut hem mikro hem de makro çelik liflere rağmen, çökme-yayıma akış çapları EFNARC'da tanımlanan değerleri sağlamıştır. KLKYB karışımların işlenebilirliği açısından, daha yüksek narinlik oranına sahip lifleri eklemek yerine, düşük narinlik oranına sahip çelik liflerin eklenmesi önerilebilir.
4. Basınç dayanımı açısından, karışımlara mikro çelik lifin eklenmesi, KYB numunelerinin gözenekli yapısının azalması nedeniyle, karışımın basınç dayanımının artmasına katkıda bulunmuştur. Karışıma eklenen mikro lifler mikro çatlak oluşumunun geciktirilmesine ve böylece belirli bir seviyede çatlak ilerlemesinin önlenmesini sağladıkları için basınç dayanımının arttığı düşünülmektedir.
5. Artan miktarda mikro çelik lif, karışımların eğilmede çekme dayanımı ve açıklık ortası deplasmanı üzerinde olumsuz bir etki göstermiştir. Makro çelik lif oranındaki artış ile karışımların eğilmede çekme dayanımı değerleri artmıştır. Karışımlardaki makro çelik lif içeriği düşük olan karışımlarda, (MAK0.50MİK0.50-KYB ve MAK0.25MİK0.75-KYB) eğilmede çekme dayanımı azalmıştır.
6. Yüksek oranda mikro çelik lif içeren karışımlarda sehim-yumuşaması görülürken, yüksek oranda makro çelik lif içeren karışımlarda sehim-sertleşmesi davranışı gözlemlenmiştir.
7. Eğilmede çekme deneyi sonucunda, en iyi süneklilik performansı 28 ve 56 günlük numuneler için, sırasıyla, 1.35 mm ve 1.26 mm değerleriyle %1 makro çelik lif içeren karışımda görülmüştür.

8. Dört noktalı eğilmeye maruz bırakılan karma çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betondan üretilmiş büyük ölçekli kiriş numunelerinin tümü, kontrol karışımına oranla daha sünek davranış sergileyerek göçmüşlerdir.
9. Büyük ölçekli kiriş deneyleri sonuçlarından, lif ilavesi yapılmış karışımlardan üretilmiş kirişlerin yük taşıma kapasitesinde en az %28 oranında artış olduğu görülmüştür. Bununla beraber, makro ve mikro çelik lif ilavesi yapılan karışımlardan en yüksek enerji yutma kapasitesi MAK0.50MİK0.50-KYB karışımında elde edilmiştir.
10. Büyük ölçekli kiriş deneyleri sonucunda, karma lifli kiriş numunelerde, makro çelik lif yerine mikro çelik lif kullanım miktarı arttıkça kirişlerde göçme sonrası oluşan çatlakların eğik kesmeden dik eğilme çatlaklarına değiştiği gözlemlenmiştir.



6.KAYNAKLAR

- Aitcin, P.C. (1998). *High performance concrete*, E&FN Spon, London.
- Akçay, B., and Tasdemir M.A. (2012). Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. **28**, pp. 287–293.
- Akman S. (1972). *İri agrega / kum oranının beton iç yapısı ve özelliklerine etkisi*, Doçentlik Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Alyousif, A., Anil, Ö., Sahmaran, M., vd., (2015). Tests of high-performance fiber-reinforced concrete beams with different shear span-to-depth ratios and main longitudinal reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1.5 · DOI: 10.1177/0731684415592717, **34(18)** 1491–1505
- Aslani, F., Nejadi, S., (2013). Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression, *Composites: Part B* **53** 121-133
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2012). “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).” ASTM C1609/C1609M-12, West Conshohocken.
- Avar D. (2006). *Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Azizinamini, A., Pavel, R., Hatfield, E., Ghosh, S.K. (1999). Behaviour of lap-spliced reinforcing bars embedded in high-strength concrete. *ACI Struct J* **96(5)**:826-835
- Banthia, N. and Nandakumar, N., (2003). Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement & Concrete Composites*, **25**, 3–9.
- Baoju, L., Youjun, X., Shiqiongy, Z., Qianlian, Y. (2000). Influence of ultrafine fly ash composite on the fluidity and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. **30**, 1489 - 1493.
- Bentz, E.C., Vecchio, F.J., and Collins, M.P., (2006). Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements. *ACI Struct J* **103**: 614–624.
- Berbergil V. (2006). *Kendiliğinde Yerleşen Betonlarda Çelik Lif Kullanımının İşlenebilirliğe Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Bouzoubaa, N., Lachemi, M. (2001). Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash - Preliminary results, *Cement and Concrete Research*, **31**, 413 - 420.
- Bui, V.K., & Montgomery, D. (1999). *Mixture proportioning method for selfcompacting high performance concrete with minimum paste volume*, Proceedings of the 1st International Symposium on Self-Compacting Concrete, A. Skarendahl and O. Petersson eds., RILEM publications PRO 7, pp. 373 - 384.
- Cattaneo S. vd., (2014). Bending-shear response of self-consolidating and high-performance reinforced concrete beams, *Engineering Structures* **59** 399–410
- Collins, M.P., Bentz, E.C., Sherwood, E.G., et al. (2008). An adequate theory for the shear strength of reinforced concrete structures. *Magaz Concr Res* **60**: 635–650.3.
- De Larrard, F., Ferraris, C.F., Sedran, T. (1998). Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material, *Materials and Structures*, Vol. **31**, 8/9, 494-498.

- Domone, P.L., and Chai, H.W. (1996). *Design testing of self compacting concrete*, Proceedings of International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Editors: P.J.M. Bartos, D.L. Marrs and D.J. Cleand, 223- 252.
- Durmaz, B., (2007). *Bölgesel basınca maruz lifli betonlarda yatak mukavemeti*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- EFNARC (2002). *Specification and Guidelines for Self - Compacting Concrete*.
- EFNARC (2005). *The European Guidelines for Self Compacting Concrete - Specification, production and use*, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC), May, 2005, pp. 68.
- EFNARC Guideline (2006). *Guidelines for Viscosity Modifying Admixtures for Concrete*, EFNARC, September, 2006.
- Ekincioglu Ö. (2003). Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı- Bir Optimum Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ersoy, U., Özcebe, G. (2001). Kesme Dayanımı (sayfa:461-470), Betonarme I., Evrim Yayınları, Ankara, TÜRKİYE.
- Etman, Z.A., vd. (2014). Behavior and strength of beams cast with ultra high strength concrete containing different types of fibers, *HBRC Journal* **10**, 55–63
- Felekoğlu, B., Yardımcı, M.Y., Baradan, B. (2003-a). *A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete*, Proceedings of the 3rd International Symposium of SCC, Reykjavik, Edited by Wallevik and Nielsson, RILEM publications PRO **33**, pp. 446-456.
- Felekoğlu, B., Yardımcı, M.Y., Baradan, B. (2003-b). *Kendiliğinden yerleşen betonların aşınma ve donma - çözülme direnci*, 5. Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, s. 365 - 374.
- Ferraris, C.F. (1999). Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of art report, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. **104**, Number 5, 461 - 478.
- Geiker, M. R., Brandl, M., Thrane, L.N., & Nielsen, F. (2002). On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of selfcompacting concrete, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. **24**, No.1, 3-6.
- Gencil O., Brostow, W., Datashvili, T., Thedford, M. (2011). Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Composite Interfaces* **18(2)** 169-184.
- Ghanem H., Obeid, Y. (2015). The effect of steel fibers on the rheological and mechanical properties of self compacting concrete, *European Scientific Journal* **11(21)** 85-98.
- Gomes P.C.C. (2002). *Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete*, PhD thesis, Universitat Politècnica De Catalunya, Barcelona, Spain.
- Groth P. (2000-a). *Fibre reinforced concrete - Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders*, PhD. Thesis, Lulea University of Technology.
- Grünewald S. (2004). *Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete*, PhD. Thesis, Delft University of Technology.
- Haddadou, N., Chaid, R., Ghernouti, Y., Adjou, N. (2014). The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete, *J Build Mater Struct* **1** 65-76.

- Holschemacher, K., Klug, Y. (2002). *A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC*, LACER report No. 7, 123 – 134.
- Kareem, A.S.P. and Narayanan, R. (1983). Factors influencing the workability of steel fiber reinforced concrete: *Part 2. Concrete*, **17**, pp. 432-444.
- Khayat, K.H. (1995). Frost durability of concrete containing viscosity-modifying admixtures, *ACI Materials Journal*, **92**, (6), November - December, 625 - 633.
- Khayat, K.H., Guizani, Z. (1997). Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete, *ACI Materials Journal*, **94**, (4), July - August, 332 - 340.
- Khayat, K. H. (1998). Use of viscosity modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete, *ACI Materials Journal*, **95** (2) March - April, 158 - 167.
- Khayat, K.H., Roussel, Y. (1999). *Testing and performance of fiber-reinforced self-consolidating concrete*, Proceedings of 1st International Symposium on SCC, A. Skarendahl and O. Petersson eds., RILEM publications PRO 7, 509-521.
- Kim, DJ., Park, SH., Ryu, G.S., Koh, K.T. (2011). Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers, *Construction And Building Materials* **25** 4144-4155
- Kurita, M., Nomura, T. (1998). Highly-flowable steel fiber-reinforced concrete containing fly ash, *ACI, SP 178*, Malhotra, V.M., (Ed.), 159 - 175.
- Leemann, A., Winnefeld, F. (2007). The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete, *Cement and Concrete Composites*, **29**, 341 - 349.
- MacGregor, J.G., Wight, J.K., Teng, S., et al. (1997). Reinforced concrete: Mechanics and design. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Mangat, P.S. and Swamy, R.N. (1974). Compactibility of steel fiber reinforced concrete. *Concrete*, pp **34**, 35.
- Moens, J.E.C. (1979). *Steel fiber concrete mix proportioning*. Bekaert Report, Paper presented at the ACI annual convention, pp. 1-9.
- Naaman, A.E., Reinhardt, H.W.(1995). *Characterization of high performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC2)*, in: Second International Workshop, Ann Arbor, USA.
- Naaman, A.E., Reinhardt, H.W. (2003). *Setting the stage: Toward performance-based classification of FRC composites*.In: High performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC-4), Published by RILEM S.A.R.L., pp. 1–4.
- Nilson, AH. (1985). Design implications of current research on high-strength concrete. *ACI Special Publ* **87**: 85–109.
- Okamura, H., Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol.1, No.1, 5-15, April
- Okamura, H., and Ouchi, M., (1999). “*Self compacting concrete. Development, present use and future*”, Proceedings 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Stocholm, Sweden), Editors: A. Skarendahl and O. Petersson, pp. 3-14
- Okamura, H. (1997). Self compacting high performance concrete, *Concrete International*, Vol. **19**, No:7, 50-54.
- Okamura, H., Ozawa, K. (1995). Mix-design for self compacting concrete, *Concrete Library of JSCE*, No. **25**, pp. 107-120.

- Özkuş, M.H., Doğan, Ü.A. (2006). *Rheological properties and segregation resistance of self-compacting concretes*, International Congress on Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties, Alexandrapolis Greece, pp. 463 – 468
- Özkuş, M.H., Doğan, Ü.A., Işık, İ.E., Sağlam, A.R., Parlak, N. (2006). *Kendiliğinden yerleşen beton: Temel ilkeler ve özellikler*, Hazır Beton, Mart, Nisan, 54-61.
- PCI, TR-6-03 (2003). *Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete*. Institute Member Plants, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois.
- Persson, B. (2001). A comparison between mechanical properties of self compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, *Cement and Concrete Research*, **31**, 193 - 198.
- Petersson, O., Billberg, P., Osterberg, T. (1998). *Applications of self compacting concrete for bridge castings*, Second Int. Workshop on SCC, Kochi, Edited by Ozawa and Ouchi, Concrete Engineering Series, No. **30**, Japan Society of Civil Engineers, pp. 318-327.
- Qian, C. and Stroeven, P. (2000). Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research*, **30**, 63-69.
- Ravikanth, M., Krishna, A. (2017). Significance of micro steel fibred self-compacting concrete with cement, GGBS and fly ash, *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology* 4(8) 4388-4394.
- Saak, W.A., Jennings, H.M., and Shah, S.P., (2001), New methodology for selfcompacting concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. **94**, No.6, 429 - 439.
- Sarı M. (2013). *Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Sahoo, D. R., Maran, K., Kumar, A. (2015). Effect of steel and synthetic fibers on shear strength of RC beams without shear stirrups, *Construction and Building Materials* **83** 150–158
- Skarendahl, A. (2000). *Self-compacting concrete*, State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, RILEM Publications.
- Sonebi, M., Bartos, P.J.M., Zhu, W., Gibbs, J., Tamimi, A. (2000). *Properties of hardened concrete*, Brite EuRam Project, Rational Production and Improved Working Environment Through Using SCC, Final Report, Task 4, Advanced Concrete Masonry Center, University of Paisley, Scotland, 73 p.
- Song, P.S. and Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construct. Build. Mater.*, **18(9)**, pp. 669-673.
- Soutsos, M.N., Le, T.T., Lampropulos, A.P. (2012). Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and syntetic fibres, *Construction And Building Materials* **36** 704-710
- Su, N., Hsu, K., Chai, H. (2001). A simple mix design method for self compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, No.**31**, 1799 - 1807.
- Swamy, R.N. (1985) High-strength concrete-material properties and structural behavior. *ACI Special Publ*; **87**: 110–146.
- Şengül C. (2005). *Kendiliğinden yerleşen çelik lif donatılı betonların mekanik davranışına su/ince malzeme oranı ile lif dayanımının etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Şen M. (2009). *Farklı Boy/Çap Oranına Sahip Çelik Lifli Gövde Donatısız Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

- Tahenni, T., Chemrouk, M., Lecompte, T. (2016). Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams, *Construction and Building Materials* **105** 14–28
- Tanaka, K., Sato, K., Watanabe, S., Arima, I. and Seunaga, K. (1993). *Development and Utilization of High-Performance Concrete for the Construction of the AkashiKaikyo Bridge*, High Performance Concrete in Severe Environments, ACI, 25-51, Farmington Hills, MI, USA.
- Tattersall, G.H. (1991). *Workability and Quality Control of Concrete*, E&FN Spon, London.
- Tattersall, G.H., Banfill, P.F.G. (1983). *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman Books Limited, London.
- Topçu, İ.B. (2009). Eğilme Deneyinin L/3 Noktalarında P/2 Yüğü İle Yapılması (sayfa:66), İnşaat Mühendisliğinde Malzeme Bilgisi, Yazar Yanyınevi, Ankara, TÜRKİYE.
- Toyoharu, N., Tatsuo, I., Yoshinobu, E. (1998). *State of the art report on materials and design of self compacting concrete*, International Workshop on Self Compacting Concrete, Japan, pp. 160 – 189
- TS EN 12350-2 (2002). *Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Shump) Deneyi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Turk, K. (2012). *Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume*, *Construction and Building Materials* **37** (326-334).
- Turk, K., Nehdi, M.L., (2018). *Coupled effects of limestone powder and high-volume fly ash on mechanical properties of ECC*, *Construction and Building Materials* **164** 185–192
- Turk, K., Demirhan S. (2017). *Effect of limestone powder on the rheological, mechanical and durability properties of ECC*, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **21** 1151-1170.
- Turk, K., Demirhan S. (2013). *The mechanical properties of engineered cementitious composites containing limestone powder replaced by microsilica sand*, *Can J Civ Eng* **40** 151–157.
- Tviksta, L.G., (2000), *SCC Final Report, 8.4 Quality Control*, Brite EuRam Proposal No. Be96-3801
- Ulusoy S. (2015). *Etriyesiz Çelik Lifli Betonarme Kirişlerin Kesme Mukavemeti*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Vandewalle, L., Dupont, D. (2003). *Bending Test and Interpretation, Test and Design Methods for Steel Fibre reinforced Concrete - Background and Experiences*, RILEM publication PRO 31, Bagneux, pp. 1-14.
- Walraven, J. (2003). *Structural aspects of self compacting concrete*, 3rd Int. Symposium of SCC, Reykjavik, Edited by Wallevik and Nielsson, RILEM publications PRO 33, Bagneux, pp. 15-22.
- Wang, K., Jansen, D.C., Shah, S.P., Karr, A. (1997). Permeability study of cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, **27** (3), 381-393.
- Yahia, A., Tanimura, M., Shimabukuro, A., Shimoyama, Y. (1999). *Effect of rheological parameters on self compactability of concrete containing various mineral admixtures*, Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, A. Skarendahl and Ö. Petersson, eds., pp. 523 - 535.
- Yardımcı M. Y. (2007), *Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması Ve Optimum Tasarımı*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Yoo, D.Y., Shin O.H., Yang, J.M., Yoon, S.Y. (2014). *Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibres*, Composites: Part B **58** 122-133



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Erol ÖZTEKİN

Doğum Yeri ve Tarihi: Pütürge/MALATYA, 19/04/1989

Adres: Fırat Mah. Alemdar Sok. MC1-7 Blok No:2/2-2 Battalgazi/MALATYA

E-Posta: oztekinerol@gmail.com

Lisans: Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller: 2011 yılından itibaren özel sektörde, inşaat kontrol mühendisi, saha mühendisi ve şantiye şefliği görevlerinde toplamda 7 yıl süreyle çalıştım.

TEZDEN TÜRETELEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Türk, K., Kına, C. and Öztekin E. (2018). "Effect of Micro Fiber Content on Workability of Self-compacting Concrete" *13th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2018)*, pp. 96, Izmir, Turkey, 10-12 September 2018.