



**UÇUCU KÜL ve POLİPROPİLEN LİF İÇEREN  
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN  
YÜKSEK SICAKLIK ALTINDA  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Muhammet ADAR**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Bilim Dalı**

**Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL  
2018**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**UÇUCU KÜL ve POLİPROPİLEN LİF İÇEREN KENDİLİĞİNDEN  
YERLEŞEN BETONUN YÜKSEK SICAKLIK ALTINDA  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Muhammet ADAR**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Yapı Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2018**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

UÇUCU KÜL ve POLİPROPİLEN LİF İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN  
BETONUN YÜKSEK SICAKLIK ALTINDA ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ

Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL'ün danışmanlığında, Muhammet ADAR tarafından hazırlanan bu çalışma, 07/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oyçokluğu (t.3./o.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

İmza :

Üye : Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi H. Süleyman GÖKÇE

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **27/12/2018** tarih ve **52/27** nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Mehmet KARAKAN**  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### UÇUCU KÜL ve POLİPROPİLEN LİF İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN YÜKSEK SICAKLIK ALTINDA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammet ADAR

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), geleneksel betona kıyasla işlenebilirlik, işçilik maliyetindeki azalma ve yüksek dayanım gibi önemli faydalar sağlayan yüksek performanslı bir beton türüdür. KYB üretiminde yüksek oranda ince malzeme ve/veya viskozite düzenleyici katkı ve su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı kullanılmaktadır. KYB üretiminde toz malzeme olarak çoğunlukla kireçtaşı tozu, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle KYB üretilmiş ve üretilen KYB'nin tüm karışım oranları sabit tutularak içerisine farklı oranlarda polipropilen lif eklenerek (0,25, 0,50, 0,75 ve 1.00 kg/m<sup>3</sup>) taze beton deneylerinin işlenebilirliği ve sertleşmiş kontrol numunelerinin dayanımına lif miktarının etkisi incelenmiştir. Farklı oranlarda lif içeren sertleşmiş numuneler dört farklı sıcaklıkta (25, 250, 500 ve 750°C), yüksek sıcaklık fırınında 3 saat yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına gelene kadar bekletilmiştir. Numunelerin ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılarak boşluk yapıları hakkında fikir edinilmiştir. Son olarak sertleşmiş beton deneyleri ve ultrases geçiş hızı ölçümleri arasındaki ilişki ile yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkisi incelenmiştir. Böylece farklı lif içeriği ve yüksek sıcaklıkta kendiliğinden yerleşen polipropilen lifli betonun taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri belirlenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, KYB'de polipropilen lif miktarı arttıkça betonun akıcılık özelliğini olumsuz yönde etkilediği, basınç dayanımına etki etmediği, çekme dayanımını bir miktar olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Sıcaklığın 500°C ve üzerinde olmasının, beton basınç dayanımını önemli derecede etkilediği, sıcaklık arttıkça dayanım kayıplarının arttığı ve ultrases geçiş hızı ölçümlerinin de buna paralellik gösterdiği tespit edilmiştir.

Polipropilen liflerin sıcaklık artışına bağlı olarak eridiği ve böylece beton numuneler içerisinde boşluk oluştuğu bilinmektedir. Yüksek sıcaklık etkisinde numunelerin boşluk yapısındaki artışla birlikte mukavemet kayıplarının arttığı görülmüştür. En fazla mukavemet kaybı 750°C'ye tabi tutulan numunelerde görülmüş olup, 500°C'den sonra mukavemet kaybının belirgin olarak arttığı gözlemlenmiştir.

**2018, 89 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Kendiliğinden yerleşen lifli beton, Yüksek sıcaklık, Uçucu kül, Polipropilen lif, Ultrases geçiş hızı, Sertleşmiş beton deneyleri

## ABSTRACT

MS Thesis

### INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF THE SELF-CONSOLIDATING CONCRETE CONTAINING FLYING ASH AND POLYPROPYLENE FIBER UNDER HIGH TEMPERATURE

Muhammet ADAR

Ataturk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering  
Structure Division

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

Self-consolidating concrete (SCC) is a high-performance concrete type that provides significant benefits such as workability, labor cost reduction and high strength compared to conventional concrete. A high percentage of fine material, and/or viscosity regulating additive and water reducing superplasticizer are used in the production of SCC. Limestone powder, fly ash, granulated blast furnace slag and silica fume are mostly used as powder material in the production of SCC.

In this study, firstly SCC was produced, and all mixture ratios of the produced SCC were kept constant and the effect of the amount of fiber on workability of fresh concrete tests and on the strength of the hardened control samples were investigated by adding different proportions of polypropylene fiber (0,25, 0,50, 0,75 and 1,00 kg/m<sup>3</sup>). The hardened samples containing different proportions of fiber were kept in four different temperatures (25, 250, 500, 750°C) at the high-temperature oven for 3 hours and then cooled to room temperature. Ultrasonic pulse velocity measurements of the samples were carried out and an idea was given about the space structures. Finally, the relationship between hardened concrete tests and ultrasonic pulse velocity measurements and the effect of high temperature on the concrete were investigated. Thus, fresh and hardened properties of self-consolidating fiber concrete at different fiber content and high temperature were determined.

According to the results obtained from the study, as the amount of polypropylene fiber increases in the SCC increases, it has been found that it affects the fluency of concrete negatively, does not affect the compressive strength and it affects the tensile strength in a very small amount.

It has been determined that the temperature of 500°C and above affects the concrete compressive strength significantly, as the temperature increases, it is determined that the strength losses increase and the ultrasonic pulse velocity measurements are parallel to this.

It is known that the polypropylene fibers melt due to the increase in temperature and thus the cavity in the concrete samples is formed. It was observed that the loss of strength increased with the increase in the gap structure of the samples under high-temperature effect. The maximum loss of strength was observed in samples subjected to 750°C, and after 500°C, the loss of strength was observed to be significantly increased.

**2018, 89 pages**

**Keywords:** Fiber-reinforced self-consolidating concrete, High temperature, Fly ash, Polypropylene fiber, Ultrasonic pulse velocity, Hardened concrete tests

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca ve tez sürecinde her türlü yardım ve fedakârlığı sağlayan, güler yüzü, bilgisi, önerileri ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca benim derdimi çeken bana yol gösteren ablam Sayın Arş. Gör. Elanur ADAR ve kardeşim Sayın Arş. Gör. Tuba ADAR'a sevgi ve saygılarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmaları kapsamında yardımlarını esirgemeyen, Sayın M. Selim ÖZDEMİR, Sayın Muhammet SERÇEOĞLU, Sayın Arş. Gör. İrfan KOCAMAN kardeşlerime ve laboratuvar teknisyeni Sayın İlhami AYHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamı sürekli destekleyen, bugünlere gelmemde çok emeği olan, bu süreçte ve öncesinde maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen canım aileme ve en kıymetlim, babam Hilmi ADAR'a ithaf ederim.

**Muhammet ADAR**

**Aralık, 2018**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>5</b>
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) Konusunda Yapılan Çalışmalar .....	5
2.2. Kendiliğinden Yerleşen Lifli Beton (KYL B) Konusunda Yapılan Çalışmalar ..	16
2.3. Kendiliğinden Yerleşen Uçucu Küllü Beton (KYUKB) Konusunda Yapılan Çalışmalar.....	23
2.4. Yüksek Sıcaklığın Betona Etkisi Konusunda Yapılan Çalışmalar.....	31
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>40</b>
3.1. Materyal.....	41
3.1.1. Deneyde kullanılan malzemeler .....	41
3.1.1.a. Çimento .....	41
3.1.1.b. Uçucu kül .....	43
3.1.1.c. Agregalar .....	45
3.1.1.d. Karışım suyu.....	45
3.1.1.e. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı .....	46
3.1.1.f. Polipropilen lif .....	46
3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler.....	47
3.1.2.a. Betoniyer .....	47
3.1.2.b. Çökme-yayılma deney aleti.....	47
3.1.2.c. V-Hunisi deney aleti .....	48
3.1.2.d. L-Kutusu deney aleti .....	49
3.1.2.e. Numune kalıpları .....	49
3.1.2.f. Plastik su kürü havuzu .....	50

3.1.2.g. Yüksek sıcaklık fırını .....	51
3.1.2.h. Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı .....	51
3.1.2.1. Beton test presini .....	52
3.2. Yöntem .....	53
3.2.1. KYB karışım oranları .....	53
3.2.2. KYB taze beton deneyleri .....	54
3.2.2.a. Çökme - yayılma deneyi .....	55
3.2.2.b. V-Hunisi deneyi .....	56
3.2.2.c. L-Kutusu deneyi .....	57
3.2.3. Numunelerin kürlenmesi .....	58
3.2.4. Yüksek sıcaklık uygulaması .....	58
3.2.5. Ultrases geçiş hızı ölçümleri .....	59
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>60</b>
4.1. Taze Beton Deneyleri .....	60
4.1.1. Çökme yayılma deney sonuçları .....	60
4.1.2. V-Hunisi deney sonuçları .....	61
4.1.3. L-Kutusu deney sonuçları .....	63
4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri .....	64
4.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçları .....	64
4.2.2. Eğilme dayanımı deney sonuçları .....	68
4.2.3. Ultrases geçiş hızı ölçüm sonuçları .....	71
4.2.4. Çalışma kapsamında yapılan gözlemsel incelemeler .....	76
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>79</b>
KAYNAKLAR .....	82
ÖZGEÇMİŞ .....	90



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

H <sub>1</sub>	L kutusunun kapağının arkasındaki beton yüksekliği (mm)
H <sub>2</sub>	L kutusunun uç kısmındaki beton yüksekliği (mm)
L	Geçiş uzunluğu (mm)
MPa	Megapascal
P	Kırılma anında ulaşılan en büyük yük (N)
PA	Geçme yeteneği
t	Geçen zaman (sn)
U	Geçiş zamanı (µsn)
V	Ultrases geçiş hızı (km/sn)

### Kısaltmalar

ACI	American Concrete Institute
BIBM	Uluslararası Prefabrike Beton Üreticileri Birliği
CEMBUREU	Avrupa Çimento Birliği
EDS	Enerji Dağılımı Spektroskopisi
EFCA	Avrupa Beton Katkı Üreticileri Federasyonu
EFNARC	Özel Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Avrupa Federasyonu
ERMCO	Avrupa Hazır Beton Birliği
KK	Kalsine Kaolin
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
KYLB	Kendiliğinden Yerleşen Lifli Beton
KYTHB	Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Beton
MK	Meta Kaolin
ÖPT	Öğütülmüş Pomza Tozu
PL	Propilen Lif
PP	Polipropilen
PPL	Polipropilen Lif
PUNDIT	Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester

SD	Silis Dumanı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	Termogravimetrik Analiz Cihazı
TS EN	Türk Standartları European Norm
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Değişik tipte uygulamalar için KYB sınıfları.....	10
Şekil 3.1. Karışımda kullanılan agreganın granülometri eğrisi .....	45
Şekil 3.2. Polipropilen lif .....	46
Şekil 3.3. Betoniyer .....	47
Şekil 3.4. Çökme-yayılma deney aleti .....	48
Şekil 3.5. V- hunisi deney aleti.....	48
Şekil 3.6. L- kutusu deney aleti .....	49
Şekil 3.7. Çelik ve plastik numune kalıpları.....	49
Şekil 3.8. Plastik kür havuzu.....	50
Şekil 3.9. Yüksek sıcaklık fırını.....	51
Şekil 3.10. Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı .....	52
Şekil 3.11. Beton basınç ve eğilme test presi .....	52
Şekil 3.12. Çökme-yayılma deneyi.....	55
Şekil 3.13. V-hunisi deneyi.....	56
Şekil 3.14. L-kutusu deneyi .....	57
Şekil 3.15. Yüksek sıcaklık fırını ısıtma-soğutma rejim grafiği.....	58
Şekil 4.1. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları.....	64
Şekil 4.2. Kontrol grubuna göre sıcaklık değişimine ve lif oranına bağlı olarak basınç dayanımlarındaki kayıp oranları (%).....	65
Şekil 4.3. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımları.....	68
Şekil 4.4. Kontrol grubuna göre sıcaklık değişimi ve lif oranına bağlı olarak numunelerin eğilme dayanımlarındaki kayıp oranları (%) .....	69
Şekil 4.5. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımları.....	70
Şekil 4.6. 25 °C’de numunelerin UPV – basınç dayanımı ilişkisi .....	71
Şekil 4.7. 250°C’de numunelerin UPV – basınç dayanımı ilişkisi .....	72
Şekil 4.8. 500°C’de numunelerin UPV – basınç dayanımı ilişkisi .....	72
Şekil 4.9. 750°C’de numunelerin UPV – basınç dayanımı ilişkisi .....	73
Şekil 4.10. Sıcaklık – Ultrases geçiş hızı ilişkisi .....	74
Şekil 4.11. Ultrases geçiş hızınının sıcaklığa göre değişimi.....	75

<b>Şekil 4.12.</b> Numuneler üzerinde gözlemlenen renk değişimi .....	76
<b>Şekil 4.13.</b> Numuneler üzerinde gözlemlenen agrega dağılımı .....	77
<b>Şekil 4.14.</b> Numuneler üzerinde gözlemlenen kılcal çatlaklar .....	78



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. KYB sınıfları .....	9
Çizelge 3.1. CEM I 42.5 R çimentonun kimyasal özellikleri .....	42
Çizelge 3.2. CEM I 42.5 R çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri .....	42
Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal özellikleri .....	44
Çizelge 3.4. Uçucu külün mekanik ve fiziksel özellikleri .....	44
Çizelge 3.5. Polipropilen lifin teknik özellikleri.....	46
Çizelge 3.6. KYB karışım bileşimleri için önerilen tipik değer aralıkları TS 802 (2016) .....	53
Çizelge 3.7. KYB ve KYLB grupları için malzeme miktarları (1 m <sup>3</sup> beton için) .....	54
Çizelge 4.1. Çökme-yayılma deney sonuçları .....	61
Çizelge 4.2. V-hunisi deney sonuçları .....	62
Çizelge 4.3. L-kutusu deney sonuçları.....	63
Çizelge 4.4. Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı .....	71

## 1. GİRİŞ

Beton, en basit haliyle su, çimento ve agregadan oluşmaktadır. Şekil verilebilme kolaylığı, yerel imkânlarla üretilebilmesi, maliyetinin diğer yapı malzemelerine göre daha ucuz olması, ihtiyaca göre tasarımının değiştirilebilir olması gibi özelliklerinden dolayı giderek artan talep, betonun en çok tüketilen yapı malzemeleri arasında olmasına sebep olmuştur. Beton kalitesini arttırmak için zamanla kimyasal ve mineral katkı maddeleri kullanılmaya başlanmıştır. Etkili akışkanlaştırıcıların keşfedilmesi ile betonların işlenebilirlik özellikleri artmıştır. Gelişen beton teknolojisi ile birçok yönden (işlenebilirlik, dayanım, dayanıklılık, vb.) yüksek performansa sahip beton üretim olanakları sağlanmıştır. Taze betona sıkıştırma işlemi uygulamadan yerleştirilmesi ve yüksek akış kabiliyetini sağlamak için yapılan araştırmalar ışığında “Kendiliğinden Yerleşen Beton” ortaya çıkmıştır (Okamura 1997).

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), yoğun donatılı, dar ve derin kesitlere homojenliğini ve stabilitesini (ayırışma, terleme gibi problemler olmadan) koruyarak, iç veya dış vibrasyon gerektirmeden kendi ağırlığı ile yerleşip sıkışabilen akıcı kıvamlı bir beton türüdür (Beycioğlu 2013). KYB’ler geleneksel betonun kullanımının mümkün olamayacağı durumlarda tercih edilmektedir. Genellikle, tamir, bakım ve yenileme işlerinde, sık donatılı ve dar kesit özelliklerine sahip büyük boyutlu inşaatlarda, özel kalıp gerektiren tünel gibi yapılarda kullanılmaktadır (Özkul 2002; Saf 2015).

KYB’lerde geleneksel beton içeriğinden farklı olarak, kimyasal katkı, inert veya puzolanik mineral katkı ve viskozite arttırıcı katkı maddelerinin tamamı veya bir kısmı bulunmaktadır. Betonun yüksek performansa sahip olmasını sağlamak, bileşenlerin cinsine, teknik özelliklerine, malzemelerin uygunluğuna, karışım oranları ve üretim yöntemine bağlıdır. Bu malzemelerin ve kullanılacak uygun oranların belirlenmesi için deney yöntemleri ve standartları geliştirilmektedir (Saf 2015).

KYB’de bulunan bileşenler, betonun kendiliğinden yerleşebilirlik özelliğini etkilemektedir. KYB’lerin iki temel özelliği olan yüksek akıcılık ve yüksek ayrışma direnci, çok miktarda toz malzeme ve süper akışkanlaştırıcılar ile sağlanmaktadır. Geleneksel betonda su ile akışkanlık sağlanmaya çalışılırken viskozite azalmakta ve kayma eşiği düşmektedir. Viskozite düştüğünde ise ayrışma gözlemlenmektedir. Süper akışkanlaştırıcı maddeler, çimento tanelerini benzer elektriksel yüklerle yükler ve bu taneler arasındaki sürtünmeyi azaltır. Böylece yüksek deformasyon yeteneği kazanan karışımın, ayrışmaya karşı yüksek direnç sağlaması mümkündür. KYB’lerde viskoziteyi arttırmak için toz malzemeler kullanılmaktadır. Toz malzemeler, mikrofiller malzemeler, çimento, kırma kum, silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi çapı 0,125 mm’den küçük olan malzemelerdir (Felekoğlu vd 2006; Sertbaş 2006).

Beton gevrek bir yapıya sahiptir. Betonun zayıf olan mekanik özelliklerini iyileştirmek için karışım aşamasında bazı malzemeler ilave edilebilmektedir. Lifler bu malzemelerden birisidir. Betonun gevrek yapısını daha sünek hale getirmek için bileşenleri arasına lif ilave edilmektedir. Lifler; betonda dayanım, darbe dayanımı ve durabilitenin artmasını sağlamaktadır. Homojen olarak belirli özelliklere sahip lif ile takviye edilmiş KYB, ilk görünüşte normal beton karışımlarına benzemesine rağmen değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betonlardan oldukça farklı özellikler sergiler (Şimşek 2009).

Dünyanın her tarafında binalar bazen yangına maruz kalabilmekte ve bunun sonucunda kısmen zarar görmekte veya tamamen kullanılmaz hale gelebilmektedir. Betonun yangın davranışı eskiden beri göz önünde bulundurulmuş ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle farklı karışım ve mukavemetteki geleneksel, yüksek mukavemetli ve hafif betonların çeşitli sıcaklık değerlerine kadar ısıtıldıktan sonra mekanik özelliklerinin incelenmesinin araştırılması şeklindedir (Bingöl 2008).

Yüksek sıcaklık etkisinde oluşan mukavemet kayıplarının, yapı bütünlüğü bozulmalarının önüne geçmek için beton karışımı içerisine polipropilen lifler, hava sürükleyici, büyük boyutlu elemanlar ve düşük ısı genleşmeye sahip agregalar kullanmak gerekir. Hava sürükleyiciler nem içeriğini ve boşlukların miktarını, polipropilen lifler ise sadece boşluk miktarını artırarak yüksek sıcaklık altında buhar basıncını düşürürler (Khoury 2003).

Bu tez çalışmasında; toz malzeme olarak uçucu kül içeren KYB karışımlarına farklı oranlarda polipropilen lif eklenerek üretilen Kendiliğinden Yerleşen Lifli Betonların (KYL B) taze beton özelliklerine ve sertleşmiş betonda yüksek sıcaklık etkilerinden sonra basınç ve eğilmede çekme dayanımlarına lif miktarının etkisi incelenmiştir.

Bu kapsamda toz malzeme olarak  $80 \text{ kg/m}^3$  miktarında uçucu kül ve toplam bağlayıcı miktarının %1.87 oranında yeni nesil akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak KYB'ler üretilmiştir. Lif içermeyen bu grup kontrol numuneleri olarak değerlendirilmiştir. Daha sonra 4 farklı oranda (0,25, 0,50, 0,75 ve  $1 \text{ kg/m}^3$ ) polipropilen lif kullanılarak KYLB'ler üretilmiştir. Böylelikle taze ve sertleşmiş beton özelliklerini belirlemek için toplamda 5 grup numune hazırlanmıştır. Taze beton özelliklerine lif miktarının etkisini incelemek amacıyla; çökme-yayılması, V-hunisi ve L-kutusu deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton deneyleri için 60 adet küp, 60 adet ise prizma olmak üzere toplamda 120 adet beton numunesi üretilmiştir. Standart su kürü uygulanan numuneler 28 gün sonunda 250, 500 ve  $750^\circ\text{C}$ 'de yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak yüksek sıcaklığın numunelerin basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve ultrases geçiş hızı özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Giriş kısmından sonra, ikinci bölüm olan Kaynak Özetleri kısmında kendiliğinden yerleşen betonlar ve yüksek sıcaklık etkilerinden sonra beton özellikleri ile ilgili olarak özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar sunulmuştur. Üçüncü bölüm olan Materyal ve Yöntem kısmında çalışmada kullanılan malzemeler, cihazlar ve deney yöntemleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde ise yapılan deneylerden elde edilen



sonuçlar grafiklerle desteklenerek sunulmuş ve önceki çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Çalışmanın son bölümü olan Sonuç ve öneriler başlığı altında ise deney sonuçlarından elde edilen belli başlı sonuçlar sıralanmıştır.



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışması kapsamında literatür taraması dört ayrı başlıkta yapılmış ve aşağıda verilen sırayla sunulmuştur;

- Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) konusunda yapılan çalışmalar,
- Kendiliğinden yerleşen lifli beton (KYLİB) konusunda yapılan çalışmalar,
- Kendiliğinden yerleşen uçucu küllü beton (KYUKB) konusunda yapılan çalışmalar,
- Yüksek sıcaklığın betona etkisi konusunda yapılan çalışmalar.

### 2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) Konusunda Yapılan Çalışmalar

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı ile her türlü döküm zorluğunun olduğu dar kesitlerde bile vibrasyon gerektirmeksizin ayrışma olmadan yerleşebilen özel, yüksek performanslı bir beton türüdür.

KYB ilk kez 1988 yılında Tokyo Üniversitesinde, kalıcı betonarme yapılar yapmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu konu hakkında ilk yayın Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansında Ozana tarafından 1989 yılında sunulmuştur. Ayrıca bu bildiri İstanbul'da gerçekleştirilen CANMET&ACI Uluslararası Konferansında 1992 yılında sunularak KYB'nin geniş kitlelere yayılmasını hızlandırmıştır. Son yıllarda da KYB dünyadaki mühendislerin ilgi odağı olmuştur (Sağsöz 2013).

Avrupa'da KYB'nin ilk kullanıldığı alanlardan biri de 1990 yılında İsveç karayolu sanat yapılarıdır. 1997 yılının akabinde Avrupa Birliği de KYB kullanım alanını genişletmeyi hedefleyen araştırmalar başlatmıştır. Uluslararası Prefabrike Beton Üreticileri Birliği (BIBM), Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO), Avrupa Çimento Birliği (CEMBUREU), Avrupa Beton Katkı Üreticileri Federasyonu (EFCA) ve Özel Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Avrupa Federasyonu (EFNARC), 2005 yılında bir araya gelerek komisyonca ortak bir şartname hazırlamışlardır (Duyar 2006).

KYB, yüksek akıcılık özelliğinin yanında ayrışmaya karşı dirençli olarak ve üretiminde, segragasyon durumuna mahal vermeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Yüksek akıcılık ve stabilitenin (ayrışmaya karşı direnç) sağlanması için geleneksel sıkıştırma işlemi uygulanan normal betonlardan farklı bazı tasarım ilkeleri vardır. KYB’de yüksek akıcılık özelliği yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar ile sağlanmaktadır. Yüksek akıcılığın yanında stabilitesinin de sağlanabilmesi için tane boyutu genellikle 0,125 mm’den küçük toz malzemelerin (EFNARC 2005) yüksek oranda kullanılması gerekmektedir. Ayrıca bu betonlarda dar engeller arasından geçiş yeteneği de yüksek olmalıdır. Bunun sağlanabilmesi için betonun şekil alabilme yeteneğinin geliştirilmesi gerekmektedir. KYB’nin kolay şekil alabilmesi için hamur hacminin geleneksel sıkıştırma işlemi gören beton karışımlarda olduğundan daha yüksek, toplam agrega miktarının daha düşük ve en büyük agrega tane çapının ise sınırlı (EFNARC 2005’e göre 20 mm’den düşük) olması gerekmektedir. KYB’lerde kayma gerilmesi eşiğinin düşük ve viskozitesinin uygun değere sahip olması gerekmektedir. KYB’nin akıcılık, viskozite ve geçiş yeteneğinin değerlendirilmesine yönelik tek bir deney yöntemi geliştirilememiş olmasına karşın, bu temel özelliklerinin dolaylı olarak değerlendirildiği bazı test yöntemleri (henüz tam olarak standartlaşmamış olmasına rağmen) geliştirilmiştir (Yardımcı 2007).

Gürdal ve Yüceer (2004), bu test yöntemlerini doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve geçiş yeteneği olmak üzere üç grupta toplamışlardır. KYB kendi ağırlığı ile şeklini değiştirerek deforme olma özelliğine sahip olmalıdır.

**1-Doldurma Yeteneği:** KYB’nin yüksek derecede akma yeteneğine sahip olması ve vibrasyona gerek kalmadan kalıp içinde ve tüm donatıların etrafında kendiliğinden yerleşmesi ve kendiliğinden-seviyelenmek için kendi ağırlığı altında plastikliğini korumasıdır. Çökme-yayıma deneyinde ölçülen KYB’nin yayılma çapı ve maksimum çapa ulaşılması için geçen zaman ile söz konusu özellik değerlendirilebilir. İyi bir doldurma yeteneği için, deformasyon kapasitesi ile deformasyon hızı arasında bir denge olmalıdır.

Betonun iyi şekil değiştirebilmesi için iri agrega, ince agrega ve her türlü bağlayıcı dâhil katı tanecikler arasındaki sürtünmenin azaltılması faydalı olacaktır. Ancak bu yeterli değildir; çimento hamuru fazı da iyi şekil değiştirebilir olmalıdır. Yüksek akışkanlıkla birlikte segregasyona karşı yüksek direncin sağlanması, KYB'nin engellerin arasından geçerek doldurma yeteneğinin artırılması açısından önemlidir.

Uygun doldurma yeteneği için aşağıdaki konular dikkate alınmalıdır:

- Çimento hamuru fazının şekil değiştirme becerisinin artırılması:
  - Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımına,
  - Dengelenmiş su/bağlayıcı oranına bağlıdır.
- Tanecikler arası sürtünmenin azaltılması:
  - Düşük kaba agrega hacmine (yüksek çimento hamuru fazı içeriği),
  - Kullanılan agrega ve çimentoya göre uygun değer gradasyon içeriğine bağlıdır.

**2-Ayrışmaya Karşı Direnç:** Karıştırma, taşıma ve döküm işlemleri sırasında betonun homojenliğini koruyarak ince taneli askıda madde (süspansiyon) olarak kalabilme yeteneğidir. Taze betonda segregasyon, kelime anlamı olarak, ayrışma olup, yapı dilinde, betonu oluşturan malzemenin birbirinden ayrılması, heterojen bir dağılım sergilemesidir. Bu durum yapısal özelliklerde de olumsuzluğa yol açar. Betonla alakalı yapılan hiçbir imalatta segregasyon olması istenmez. Engelsiz bir yüzeyde akış esnasında segregasyon göstermeyen taze beton, çok sık donatıların bulunduğu bir ortamda ayrışma gösterebilir.

KYB, gerek durağan gerekse akış halinde aşağıdaki tip segregasyonları göstermemelidir:

- Terleme,
- Hamur fazı ve agregaya ayrışması,
- Blokaja (kilitlenme) neden olan kaba agregaya ayrışması,
- Hava boşluğu dağılımında düzensizlik.

Uygun ayrışma direnci için aşağıdakiler dikkate alınmalıdır:

- Katı maddelerin ayrılmasını azaltmak,
  - Sınırlı agregaya içeriği,
  - Azaltılmış en büyük agregaya tane apı,
  - Düşük su/bağlayıcı oranı,
  - Viskozite arttırıcı.
- Serbest terlemenin minimize edilmesi,
  - Düşük su içeriği,
  - Düşük su/bağlayıcı oranı,
  - Yüksek yüzey alana sahip bağlayıcılar,
  - Viskozite arttırıcı.

**3-Geçiş Yeteneği:** Betonun, sık donatılar ve dar kesitlerin oluşturduğu engeller arasından, agregaya tanelerinin tıkanma yapmaksızın geçebilme yeteneğidir. KYB yeterli akıcılığa ve aynı zamanda iyi bir ayrışmaya karşı dirence sahip olduğunda yüksek bir performans sergiler. Ancak dar alanlardan geçişler ve çok sık donatılı kısımlar söz konusu olduğunda, kaba agregaların bloklanmasının engellenmesi denem kazanmaktadır.

Mükemmel doldurma yeteneğine ve ayrışma direncine sahip olan bir KYB’de bile agregada en büyük tane çapı çok büyükse ve iri agregaların içeriği çok yüksekse blokaj riski söz konusu olabilir.

Uygun geçiş kabiliyeti için; agrega ayrışmasını azaltmak ve kohezyonu arttırmak gerekmektedir. Bunun için de düşük su/bağlayıcı oranı ile beton üretmek ve viskozite artırıcı katkı kullanmak çözüm olabilmektedir. Ayrıca iri agrega hacmini ve agreganın en büyük tane çapını azaltmak uygun geçiş kabiliyeti sağlamak için alınabilecek önlemler arasındadır (Tohumcu 2011).

KYB’nin sınıflandırılmasında yayılma çapı, viskozite, geçiş yeteneği ve ayrışmaya karşı direnç göz önüne alınmaktadır. EFNARC (2005)’te belirtilen KYB sınıfları Çizelge 2.1’de görülmektedir.

**Çizelge 2.1.** KYB sınıfları

<b>Yayılma sınıfları</b>	<b>Yayılma çapı (cm)</b>	
SF1	55-65	
SF2	66-75	
SF3	76-85	
<b>Viskozite sınıfları</b>	<b>50 cm çapa yayılma süresine göre, T<sub>50</sub> (s)</b>	<b>V-kutusu akış süresine göre (s)</b>
VS1 / VF1	≤ 2	≤ 8
VS2 / VF2	> 2	9-25
<b>Geçiş yeteneği sınıfları</b>	<b>Bloklanma oranı</b>	
PA1	≥ 0,80 (2 donatı engeli ile)	
PA2	≥ 0,80 (3 donatı engeli ile)	
<b>Ayrışma direnci</b>	<b>Ayrışma direnci (%)</b>	
SR1	≤ 20	
SR2	≤ 15	

Çizelge 2.1’de 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. Bunun için istenilen özel duruma, probleme göre, çözüm odaklı KYB’ler tasarlamak gerekmektedir. 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 karışımı yeterli olabilmektedir. Başka bir ifade ile KYB’de hedeflenen reolojik özellikler ihtiyaca göre tasarım ile karşılanmalıdır. Bu nedenle EFNARC (2005)’te değişik yapı elemanlarında kullanılacak KYB’lerde göz önüne alınması gereken reolojik sınıflar gösterilmiştir. Bu sınıflamanın Walraven (2003)’in yaptığı çalışmalar doğrultusunda hazırlandığı belirtilmiştir. Şekil 2.1’de EFNARC (2005)’e göre çeşitli uygulamalar için 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 narin elemanlar	SF3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
VS1 VF1	Yer betonları ve döşemeler			SF2 ve 3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
	SF1	SF2	SF3	
	<b>Çökme - yayılma</b>			

**Şekil 2.1.** Değişik tipte uygulamalar için KYB sınıfları

KYB'nin yerleştirilmesi için vibrasyona ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu sebepten ötürü, KYB döküm esnasında çalışanların tesirinde kaldıkları yüksek ses ve titreşim miktarı düşmektedir. İşçi sağlığı ve iş güvenliği kapsamında ortamda var olan risklerin bertaraf edilmesi hem işçi hem de işverenin kazanımına yardımcı olmaktadır. Hazır beton ile prefabrik üretim yapan tesislerde, KYB'li yapı elamanlarında vibrasyona ihtiyaç olmadığından üretim kolaylaşmaktadır. KYB çok yoğun ve sık donatılar arasında kolaylıkla akar ve boşluksuz olarak yerleşir. Betonun demir donatıyı çok iyi sarması ve boşluksuz bir yapı oluşturması kalıcılığı da arttırır. KYB özellikle, depremde hasar gören yapıların onarım ve güçlendirilmesinde, tek bir noktadan yapılan dar alanlı dökümlerde, kalıp içerisinde kendiliğinden yerleşmesi, yükselmesi ve boşlukları çok iyi doldurması açısından güçlendirme projeleri için vazgeçilmez bir çözüm metodudur. KYB döküm esnasında vibrasyon gerektirmediği için işçilikten kaynaklanabilecek tüm uygulama sorunlarını ortadan kaldırır. Klasik betonlara göre KYB daha geçirimsiz olduğundan, kalıcılık (durabilite) açısından yapıların çok daha üstün bir duruma gelmesini sağlamaktadır. Şantiyelerde işin hızlı ilerlemesi, daha kolay perdahlama işlemi yapılabilmesi için işlenebilirliği arttırma adına betona su katılması çok büyük bir risktir. KYB ayrışmayı önler, işçinin hata eğilimini azaltır ve üretilen betonda hiçbir mukavemet kaybı gerçekleşmezken bu riskin oluşmasını bertaraf eder. KYB ile imal edilen her türlü sanat yapısında ve imalatta hava kabarcıksız, boşluksuz, homojen ve düzgün yüzeyli beton elde edilir. KYB ile üretim yapmak işlerin daha hızlı ilerlemesine yardımcı olur. Bir yapıda, döşeme ve düşey elemanların üretimi esnasında geleneksel betonla üretime göre, KYB ile %20 oranında zamandan tasarruf sağlanabilmektedir (Semioli 2001).

KYB içeriği, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı yanında, viskozite artırıcı katkı, su/bağlayıcı oranı, en büyük agrega tane boyutu, toplam ince ve iri agrega miktarı gibi parametreler açısından geleneksel betondan farklılıklar gösterir. KYB'nin bileşenleri açısından normal betondan en büyük farkı, 100 µ altındaki toz malzemedir. Bu toz malzemeler genel olarak betonda kullanımı kanıtlanmış olan silis dumanı, uçucu kül, taş unu, tuğla tozu ve mermer tozu gibi atık malzemelerdir (Sahmaran *et al.* 2006; Topcu *et al.* 2007).



KYB tasarım usulleri genellikle hamur ve harç karışımları üzerinde ön çalışma gerektirmektedir. Bunun en önemli nedeni KYB'nin hamur fazının geleneksel betona göre fazla olması ve betonun karakteristik özelliklerinin oluşmasında önemli rol oynamasıdır. KYB'de birçok kullanılan karışım yöntemi Okamura (2003) tarafından geliştirilmiştir. Buna göre KYB için karışım tasarımı aşağıdaki adımlarla daha homojen bir şekilde yapılabilir:

- a) KYB'de istenen hava miktarının seçilmesi,
- b) İri agregaya hacminin belirlenmesi,
- c) Kum içeriğinin belirlenmesi,
- d) Hamur bileşenlerinin belirlenmesi,
- e) Optimum su/bağlayıcı oranı ve kimyasal katkı miktarının belirlenmesi,
- f) Standart test yöntemleriyle beton özelliklerinin belirlenmesi.

KYB'de hava miktarının %2 oranında olması uygun görülürse de donma çözülme etkisi altında olan betonlar için hava miktarı daha yüksek oranlarda seçilebilir. Genellikle iri agregaya (>4 mm) hacmi toplam agregaya hacminin %50 ile %60 oranları arasında seçilmelidir. İri agregaya hacmi sınır değer olan %60'ın üzerine çıkarsa agregalar arası iç sürtünme hızla artar ve donatılar arasından geçerken KYB'de bloklaşma riski oluşur. İri agregaya hacminin %50'den daha az olması durumunda ise KYB'nin su gereksinimi daha fazla olacaktır. Ayrıca betonun bağlayıcı miktarı artacağından rötresi de artacaktır. Genellikle 0,125 mm ile 4 mm arası tane boyutu aralığındaki agregaya kum veya ince agregaya denilmektedir. KYB'de kum içeriği toplam agregaya hacminin %40 ile %50'si aralığında olmalı, daha fazla olmamalıdır. Aksi takdirde KYB'nin karışım suyu ve bağlayıcı ihtiyacı artacaktır (Uygunoğlu 2008).

KYB konusunda son yıllarda yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Bu çalışmalar kullanılan malzeme, oranlar ve gözlemlenmek istenen konu ile buna bağlı olarak kullanılan yöntemler açısından farklılık göstermektedir.

Señas *et al.* (2016), çalışmalarında geri dönüştürülmüş agregaların KYB üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Doğal agregalardan daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek su emmeye sahip olmalarına rağmen uygun miktarlarda eklendiklerinde iyi performansa sahip betonlar üretilebildiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında, geri dönüşümlü agregalar %50 oranında iri agrega ile yer değiştirilmiş ve ince agreganın (doğal kum) %20'si oranında da geri dönüşüm agregası olarak kullanılmış beton tozu kullanılmıştır. KYB'lerin taze beton özellikleri ve sertleşmiş halde fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş agregaların KYB üretiminde kullanılabileceği bildirilmiştir.

Hilal (2016), çalışmasında, atık lastik agregalı KYB'lerin karakteristik özelliklerini incelemiştir. Bağlayıcı içeriğinin %30'u F sınıfı uçucu külden oluşan toplamda 21 farklı atık lastik agregalı KYB karışımı hazırlamıştır. Beton karışımlarının işlenebilirlik özellikleri olarak çökme-yayılma çapı, T<sub>50</sub> akış süresi, V-hunisi akış süresi, L-kutusu bloklaşma oranı (H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub>) ve L-kutusu T<sub>20</sub> ve T<sub>40</sub> süreleri belirlenmiş ayrıca bu betonların reolojik davranışı ICAR reometre kullanılarak incelenmiştir. Betonların sertleşmiş özellikleri basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü, eğilmede çekme dayanımı, kırılma enerjisi ve aderans dayanımı olarak test edilmiştir. Sonuç olarak lastik atıklarının kullanımının KYB'nin taze özelliklerini ve basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediğini aktarmıştır.

Sua-iam *et al.* (2016), çalışmalarında, KYB'nin taze beton ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için atık pirinç kabuğu külü, kireçtaşı tozu ve portland çimentosu ile üçlü karışımların kullanımını araştırmışlardır. KYB karışımlarında su/bağlayıcı miktarı ağırlıkça 0,28 olarak sabit tutulmuştur. 450 kg/m<sup>3</sup> olan toplam bağlayıcı miktarında ise, puzolanik malzemeler %0-20 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. Betonların; birim ağırlık, çökme- yayılma çapı, T<sub>50</sub> süresi, J-halkası, V-hunisi akış süresi, L-kutusu, ultrases geçiş hızı (UPV) ve basınç dayanımı gibi taze ve sertleşmiş hal özellikleri araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, üçlü karışımların, EFNARC gereksinimlerini karşıladığını ve geleneksel KYB'den daha iyi işlenebilirliğe sahip betonlar üretilebildiğini belirtmişlerdir.

Yücel vd (2017), çalışmalarında, asidik pomza ile üretilen KYB'nin taze haldeki özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,32, yayılma çapı  $720\pm 20$  mm olacak şekilde normal agregası %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında kullanılan asidik pomza ile yer değiştirilerek kendiliğinden yerleşen asidik pomzalı altı farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Asidik pomzanın taze beton özelliklerine olan etkisini belirlemek amacıyla yapılan karışımlar üzerinde taze beton deneyleri yapılarak çökme-yayılma çapı,  $T_{50}$  süresi, V-hunisi boşalma süresi ve L kutusunda yükseklik oranı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney ve çalışmaların sonuçlarına göre KYB'de kullanılan asidik pomza miktarı arttıkça işlenebilirliğin arttığı tespit edilmiştir.

Öz vd (2017), çalışmalarında, KYB üretiminde, Osmaniye'de bulunan bazik pomzanın işlenebilirliğe etkisini araştırmışlardır. Bazik pomza katkılı kendiliğinden yerleşen beton üretimi için su/bağlayıcı oranı 0,32 olarak sabit tutulmuş, yüksek oranda akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak  $69\pm 2$  cm yayılma çapına sahip betonlar üretilmiştir. Kendiliğinden yerleşen bazik pomza katkılı beton (KYBB)'ların özelliklerini tespit etmek amacıyla çökme-yayılma miktarı ve  $T_{50}$  süresi, V-hunisinden boşalma süresi, L-kutusundaki yükseklik oranı ve sertleşmiş beton üzerinde 28 günlük basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. KYBB'de kullanılan bazik pomza miktarının arttıkça işlenebilirliğin giderek azaldığı yapılan deneylerle ortaya çıkarılmıştır. Bu sebeple KYBB üretimi için bazik pomzanın en fazla %60 oranında kullanılabileceği, ayrıca bazik pomzanın özgül ağırlığının kırma taştan düşük olmasından dolayı, KYBB'nin basınç dayanımında %23 oranında bir düşüşe sebep olduğu çalışmadan elde edilen sonuçlar olarak bildirilmiştir.

Korkut vd (2017), çalışmalarında, beton içerisine farklı oranlarda ilave edilen çelik ve sentetik liflerin KYB'lerin taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda, biri kontrol olmak üzere toplam on üç farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Beton karışımlarının tamamında su/bağlayıcı oranı 0,40 olarak sabit alınmıştır. Çelik ve sentetik lifler beton karışımına hacimce %0,25, 0,50 ve 0,75 oranlarında ilave edilmiştir. Kontrol grubunun hedef basınç dayanımı 40 MPa olarak belirlenmiştir. Çelik ve sentetik lif miktarının taze beton özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla çökme-yayılma, V-hunisi ve L-kutusu, sertleşmiş beton

özelliklerini belirlemek için ise, basınç, yarmada ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde, lif oranı arttıkça KYB'lerin işlenebilirlik yeteneklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak, betonun basınç dayanımında az miktarda artışlar olmasına rağmen, betonun yarmada ve eğilmede çekme dayanımlarında önemli artışlar meydana geldiği ifade edilmiştir.

Sezer (2017), çalışmasında, Çek Cumhuriyetinden temin edilmiş yüksek reaktivite değerlerine sahip meta kaolin (MK) ve yerli saflaştırılmamış kalsine kaolin (KK) kullanılarak KYB üretmiş ve bu betonların bazı sertleşmiş özelliklerini incelemiştir. Meta ve kalsine kaolin ağırlıkça %0, %5 ve %10 oranlarında portland çimentosu ile yer değiştirilerek kontrol karışımı ile birlikte toplamda 5 karışım hazırlanmıştır (Kontrol karışımı, MK5, MK10, KK5 ve KK10). Yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi kullanılan karışımlar, su/bağlayıcı oranı 0,35 ve toplam bağlayıcı miktarı  $550 \text{ kg/m}^3$  olacak şekilde üretilmiştir. Standart kür işlemi sonrasında KYB numunelerinin basınç dayanımları, basınçlı su geçirimsizlik oranları, gaz geçirimsizlikleri, su emme kapasiteleri ve kılcal su geçirimsizlikleri araştırılmıştır. Basınç dayanımı ölçümü için 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç testleri uygulanmış ve en yüksek dayanım %10 oranında MK kullanılan KYB numunelerinden (MK10) elde edilmiştir. Tüm numunelerin 28 ve 56 günlük diğer sertleşmiş özellikleri incelendiğinde, yine en iyi performanslar MK 10 numunelerinden elde edilmiştir. 56 günlük kontrol numuneleri ile MK10 numuneleri karşılaştırıldığında, MK10 numuneleri basınçlı su işlemede %63, gaz geçirimsizliğinde %60, su emme kapasitesinde %35 ve kılcal su geçirimsizliğinde %53 daha iyi performans sergilemiştir. Sonuç olarak, KYB'lerin belirtilen sertleşmiş özellikleri incelendiğinde, MK içeren KYB numuneleri diğer tüm numunelerden daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca KK içeren KYB numunelerinin kontrol amaçlı üretilen numunelerden daha iyi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

Özel (2018), çalışmasında mermer, granit ve andezit agregalarının KYB'de kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu kapsamda kalker kökenli agrega ile üretilen KYB tasarımında %25, %50 ve %75 oranlarında mermer, granit ve andezit agregası kullanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda  $350, 400$  ve  $450 \text{ kg/m}^3$  olmak üzere üç

farklı çimento dozajı kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında üretilen tüm numunelerde agrega granülometrisi sabit tutulmuştur. Sonuç olarak birim hacim ağırlığın artışı ile yayılma çapında ve basınç mukavemeti değerlerinde artış olduğu ifade edilmiştir.

Al Darraji (2018), tez çalışmasında, değişken kesitli betonarme kirişler üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Deneysel çalışma 6'sı değişken kesitli, 3'ü prizmatik olmak üzere 9 adet çelik lif katkılı betonarme kiriş dört noktalı yükleme testine tabi tutulmuştur. Kanca uçlu çelik liflerin kullanıldığı çalışmada dikkate alınan değişkenler; kiriş eğim açısı, kiriş türü ve çelik lif oranıdır. Sonuçlar eğim açısının kirişlerin kesme kuvveti kapasitesi üzerinde negatif bir etkiye sahip olduğunu, ayrıca, KYB ve çelik lifin birlikte kullanımının kirişlerin kesme mukavemetini, çatlama sonrası davranışını ve sünekliğini iyileştirdiğini göstermiştir. Çelik tel katkısı hem çatlak genişliğini azaltmış hem de göçme türünü ani ve kırılımdan süneğe dönüştürmüştür. Buna ilaveten deney sonuçlarına göre %1 oranında çelik lif ilavesinin değişken kesitli betonarme kirişlerde gerekli minimum kesme donatısı yerine kullanılabileceğini göstermiştir.

## **2.2. Kendiliğinden Yerleşen Lifli Beton (KYLİB) Konusunda Yapılan Çalışmalar**

Beton dünyada en yaygın kullanılan kompozit bir yapı malzemesidir. İçeriğinde gelişmiş güzel dağılmış agregalar barındıran, oldukça heterojen bir yapıdadır. Söz konusu bu heterojen dağılım malzemenin kırılma süresi ve kırılma şeklinde farklılıklara sebep olur. Beton içerisinde agrega yüzeyi ile çimento hamuru arasındaki ara yüzey, en zayıf ve en kritik bağı teşkil eder. Beton üretiminde, beton iç yüzeyinde bulunan kısmi mikro çatlaklar betonun yük altında göçmesine sebep olacak potansiyel çatlak uçlarını belirler.

Betonun zayıf olan mekanik, fiziksel özelliklerini iyileştirmek ve amaca uygun üretim yapmak için bazı malzemeler içeriğe ilave edilebilmektedir. Lifler de bu malzemelerden birisidir. Lifli betonların üretilmesindeki amaç malzemenin tokluğunu, darbe ve eğilme dayanımını, durabilitesini vb. iyileştirmektir. Değişik özellikleri ve çeşitleri olan liflerin, homojen olarak ilave edilmesiyle üretilen lifli betonun, ilk görünüşte normal beton karışımlarına benzese de değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans

açısından geleneksel betondan çok farklı özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Liflerin beton içerisinde gelişigüzel dağılmasına rağmen elde edilen veriler ışığında lifli betonların yük altında homojen bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir (Kozak 2013).

Normal beton içerisine lif malzemesi olarak ilave edilen cam, plastik, polipropilen ve çelik gibi malzemelerle elde edilen lif takviyeli bir betonda yüksek mukavemet artışı sağlanabilmektedir (Şimşek 2009).

Lifli beton; çimento, agrega, çeşitli tip ve özelliklere sahip liflerin su ile karıştırılmasıyla meydana gelen betona denir. Yani beton hazırlanması esnasında, özelliklerini iyileştirmek amacıyla, taze beton içerisine, çeşitli yöntemlerle, değişik miktarlarda malzemeler katılması ile elde edilen betonlardır. Lifli betonlar, içeriğinde dağılmış, gelişigüzel yönlendirilmiş lif bulundurlar (ACI 544 2002; Balık ve Kamanlı 2003).

Takviye amacı ile kullanılan, değişik biçim ve büyüklüklere sahip olan lifler genel olarak çelik, polipropilen, cam ve organik polimerlerden üretilmektedir. ACI 544'e göre; "Narinlik Oranı" lifin boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesi ile elde edilen "boy/çap" (aspect ratio) oranı olarak kabul edilmektedir. Eşdeğer lif çapı ise, alanı lifin kesit alanına eşit bir dairenin çapı olarak tanımlanmaktadır. Ancak bazı liflerin uzunluklarının ve çaplarının farklı değerler alması ve cam liflerde olduğu gibi demet şeklinde olmaları nedeniyle, lifleri sadece boy/çap oranına göre sınıflandırmanın mümkün olmadığı tespit edilmiştir (Kozak 2013).

Kullanılan lifler sayesinde, betonda oluşacak çatlamları önlemek, sünekliği, kalıcılığı ve yoğunluğu arttırmak mümkündür. Lifli betonlar köprüler, beton yollar, hava alanları, endüstriyel döşemeler, betonarme yapıların onarım-güçlendirilmesi ve kayalarda şev stabilizasyonu gibi işlerde kullanım alanına sahiptir.

Lifli uygulamanın etkinliği;

- Kullanılan liflerin miktarına,

- Liflerin şekline,
- Liflerin, beton içerisinde yönlendirilmesine ve dağılımına,
- Liflerin boy-çap oranlarına (narinlik),
- Lifli betonun sıkıştırılması yöntemine bağlıdır (Balık ve Kamanlı 2003).

Gevrek bir yapı malzemesi olan betona karışım sırasında istenilen amaca yönelik, istenilen türde lif eklenmesiyle daha sünek bir yapı elde edilerek betonun bazı mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirilebilir. Lifler; tipi, boyutu, narinlik oranı (boy/çap), geometrisi, miktarı, çekme dayanımı, yüzey özellikleri ve lif-matris aderansı gibi birçok parametreye bağlı olarak betonda dayanımı, çatlak kontrolünü, şekil değiştirme kapasitesini, darbe dayanımını ve kalıcılığı artırır. Sentetik lif çeşidi olan polipropilen lifler ise özellikle rötre çatlaklarını önleyip kalıcılığın artırılması amacıyla kullanılır. Polipropilen lif içeren betonların yüksek sıcaklığa karşı daha kararlı kalarak dayanımı arttırdığı bilinmektedir. Betonun mekanik özelliklerini iyileştirip yüksek deformasyon değerlerinde betonun taşıma kapasitesini koruyarak tokluğunu arttıran çelik liflerden beklenen performansın ise lif boyuna, narinlik oranına, lif geometrisine, dayanımına ve lif matris aderansına büyük ölçüde bağlı olduğu yapılan çalışmalarla tespit edilmiştir (ACI 544 2002).

KYB'lerde su/bağlayıcı oranının düşük olması, terlemeyi önleyici kimyasal katkı kullanılması, ince mineral malzeme (uçucu kül veya silis dumanı) miktarının artırılması ve böylece terlemenin neredeyse tamamen yok olması, betonu plastik rötreye karşı duyarlı bir duruma getirmektedir. KYB'lerde oluşabilecek plastik rötre çatlaklarını önlemek amacıyla çok az miktarda da olsa polipropilen lif kullanılması, oluşacak çatlakları önlemede ve betonun kalıcılığının artması yönünde önemli faydalar sağlamaktadır (Alkan 2004).

Yapısal olarak yarı kırılğan bir karaktere sahip olan betonun mekanik ve bazı zayıf özelliklerini geliştirebilmek için çeşitli tipte ve ebatta lifler kullanılmaktadır. Beton içerisine çelik lif ilave edilmesi betonun eğilmede çekme dayanımı, yorulma, darbe etkilerine karşı dayanımını geliştirdiği gibi, süneklik ve tokluk gibi mühendislik

özelliklerini de geliştirdiği yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir (Kyahat and Roussel 2000). Ancak beton karışımındaki lif miktarının artması, taze betonun işlenebilirliği ve akıcılığını olumsuz yönde etkilemektedir (Kyahat *et al.* 2000; Grünewald *et al.* 2001). Kullanılan lifin miktarı, boyu, narinlik oranı ve şekli, lifli taze betonun işlenebilirliğinin kontrolünde önemli rol oynar (Balaguru *et al.* 1991; Bayasi *et al.* 1992). Lifli betonların işlenebilirliği lifsiz betonlara göre daha azdır bundan dolayı sahada yapılan çalışmalarda lifsiz betonlara göre daha iyi tasarım ve işçilik gerektirir. Diğer taraftan, sertleşmiş lifli betonlardan elde edilecek performans, betonun işlenebilirliğine ve boşluksuz bir şekilde kalıba yerleştirilebilmesine büyük ölçüde bağlıdır. Lifli üretilen betonlarda etkili sıkıştırma, homojen lif dağılımının sağlanması, hapsolmuş hava boşluk miktarının azaltılması için, yerleştirmeyi kolaylaştıracak ve vibrasyona gerek duyulmayacak şekilde yeterince akıcı olarak tasarlanmalıdır (Kyahat and Roussel 2000).

Bu açıdan bakıldığında, kalıba kendi ağırlığıyla kolayca yerleşebilen ve etkili sıkıştırmanın herhangi bir ek vibrasyon enerjisine gerek duyulmadan başarılabilirdiği KYB kullanımı, beton teknolojisi ve gelişimi adına daha başarılı lifli kompozitlerin üretilmesi açısından yararlı olacaktır. Lifli betonların lifsiz betonlara göre işlenebilirliklerinin düşüklüğü ve daha iyi işçilik gereksiniminden ötürü, maliyet üzerinde dikkate alınmaya değer bir artışa neden olabilmektedir. Fakat iyi şekilde tasarlanmış KYB kullanımı, döküm aşamasında vibrasyon gerektirmemesi ile elde edilen zamansal ve işçilikten kaynaklı kazanımlarla toplam maliyette azalmaya da neden olacaktır. KYLB'ler de tıpkı lifsiz KYB gibi sadece kendi ağırlığı altında, başka hiçbir sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duymadan kalıba yerleşip, sıkışabilmeli, dar kesitlerden geçebilmeli ve herhangi bir bloklaşma ve segregasyona uğramadan kesitte homojen lif dağılımını sağlayabilmelidir. KYLB'lerde lif miktarından, şeklinden kaynaklı yerleşebilme sorunu oluşması durumunda, lifli kompozitte dayanım ve durabilite açısından olumsuz durumlar meydana gelecektir. Uygulamada kullanılan lifin tipi, boyu, narinliği ve miktarının yanında KYB karışımının tasarımı da lifli KYB'nin işlenebilirliği için çok önemli değişkenlerdir. Lifler aynı hacimdeki agregalara göre daha uzun şekle ve daha yüksek yüzey alanına sahiptirler (Grünewald and Walraven



2001). Bundan dolayı akış sırasında, içsel sürtünme ile akışa karşı koyarlar. Genel olarak lif boyu ve en büyük agrega tane çapı ile agrega hacmindeki azalma akış sırasında içsel sürtünmeyi azaltır ve işlenebilirliği artırır (Kyahat and Roussel 2000). Ayrıca lifler akış sırasında engellere takılarak akışın bloklanmasına neden olabilirler. Genel olarak lif narinliği ve miktarı arttıkça lifli kompozitin mekanik özellikleri iyileşmektedir. Lif narinliği ve miktarının artışı ile kırılma enerjisi de artmaktadır (Bayramov and Tasdemir 2004). Öte yandan, aynı lif miktarında, düşük narinliğe sahip karışımlarda daha iyi işlenebilirlik elde edilmektedir (Grünwald and Walraven 2001). KYB'ler üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen verilere göre, lif miktarı ve narinliğinin azalması veya artmasının hem taze hal hem de sertleşmiş haldeki betonun mekanik ve fiziksel performansları üzerinde önemli parametreler olduğu ortaya çıkmaktadır. Lif miktarı ve narinliğin artırılması taze haldeki betonda işlenebilirlik sorununun ortaya çıkmasına neden olacaktır. Değişik özelliklerdeki lifli betonların kolay karşılaştırılabilmesi açısından, literatürde hem lif narinliğini hem de lif miktarını içerisinde barındıran lif faktörü parametresi kullanılmaktadır. KYLB'lerde liflerin engeller karşısında bloklanmadan yerleşebilmesi için geçiş kabiliyetinin geliştirilmesi gerekmektedir. Hamur hacminin ve toz malzemenin artırılması, lifli KYB'nin geçiş yeteneğini geliştirir. Betonun işlenebilirliğinin ve hamur fazının viskozitesinin, kimyasal akışkanlaştırıcıların kullanımı ile kontrol altına alınması gerekmektedir. Genel olarak tane boyutu 0,125 mm'den küçük toz malzemeler karışım içerisinde kullanılarak viskozitede aşırı kayıp olmadan betonun işlenebilirliği artırılabilir (Yardımcı 2007).

Lif içeren KYB hakkında yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Tabatabaeian *et al.* (2017), çalışmasında hibrit liflerin yüksek mukavemetli KYB'nin reolojik, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla, kanca uçlu çelik ve polipropilen lifler olmak üzere iki tip lif kullanılmıştır. Bu çalışmada; %0,5 çelik lif, %0,5 hibrit lif (çelik ve polipropilen), %1,0 çelik lif ve %1,0 hibrit lif içeren toplamda 11 farklı grupta betonlar üretilmiştir. Reolojik özellikleri araştırmak için çökme-yayıma, J-halkası ve V-hunisi deneyleri yapılmıştır. Mekanik

özelliklerden ise, basınç ve eğilme dayanımı deneylerle belirlenmiştir. Ayrıca, ultrases geçiş hızı, ölçümleri yapılmıştır. Liflerin reolojik ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, çelik ve propilen liflerin farklı mekanik ve reolojik davranışa sahip olduğunu, liflerin betona eklenmesiyle işlenebilirliğin azaldığını, çelik ve propilen liflerin basınç mukavemetini değiştirmede çok az etkili olduğunu, lif içerikli numunelerin kontrol grubuna göre daha sünek davranış sergilediğini ve polipropilen lif içeren numunelerin elektriksel direncinin arttığı aktarılmıştır.

Cao *et al.* (2017), çalışmalarında çelik lif, polipropilen lif, çentik uçlu çelik lif ve monofilament polipropilen lifler kullanarak taze betonun işlenebilirliği ve sertleşmiş betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini incelemiştir. Doldurma yeteneği, geçiş yeteneği ve taze betonun viskozitesini belirlemek için çökme-yayıma, J-halkası ve V-hunisi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, taze betonun işlenebilirliğinin, artan lif hacmi ile azaldığını göstermektedir.

Saeedian *et al.* (2017), çalışmasında numune boyutunun polipropilen (PP) lif içeren KYB'lerde basınç dayanımı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelemiştir. Düşük ve yüksek mukavemete sahip altı beton karışımı oluşturulmuştur. Numunelerin geometrisi, 50, 100, 150 ve 200 mm çaplı dairesel kesitlere sahiptir. KYB karışımlarına iki farklı uzunlukta (6 ve 12 mm) polipropilen lifler eklenmiştir. Beklendiği üzere, numune boyutundaki artış, tüm örnekler için mukavemet azalmasına yol açmıştır. Bununla birlikte, numunelere PP liflerin eklenmesiyle mukavemet kaybı eğilimi azalmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, PP liflerin hem düşük mukavemetli hem de yüksek mukavemetli karışımlara ilave edilmesiyle, numune boyutundaki artışın etkisinin azaldığı görülmüştür.

Gültekin (2017), çalışmasında, bazalt ve cam lif içeren KYB'lerde lif boyu ve lif miktarının taze beton özelliklerine etkilerini ortaya koymak ve saha uygulamalarında çeşitli yapım türleri için ideal lif boyu ve lif miktarını tayin etmek için öneriler sunmuştur. Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen KYB karışımlarının taze halde

akıcılık, doldurma yeteneği, viskozite ve geeme yeteneği belirlenmiş daha sonra 28 gün kr uygulanan numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kılcal su emme kapasitesi ve aşınma dayanımı tespit edilmiştir. Sonuç olarak lif miktarı ve boyundaki değişimin taze beton özelliklerini olumsuz etkilediği ve bazalt lifin cam life kıyasla işlenebilirliği daha fazla düşürdüğü belirtilmiştir. Sertleşmiş beton özelliklerinden eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve aşınma dayanımının lif boyu ve lif miktarına bağlı olarak artış gösterdiği ifade edilmiştir. Ayrıca her iki lif türünde lif boyu ve miktarına bağlı olarak kılcal su emme kapasitesinin arttığı, basınç dayanımının ise genelde düştüğü aktarılmıştır.

Zhang *et al.* (2018), hibrit liflerin oda sıcaklığında eğilme performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, elik, makro polipropilen, mikro polipropilen lif ve bunların karma kullanımından oluşan on iki farklı KYLB grubunda kiriş numuneler üzerinde çalışmıştır. Sonuç olarak, elik lif ve hibrit liflerin karışıma eklenmesinin, test edilen kirişlerin nihai taşıma kapasitesini arttırabildiğini ifade etmiştir.

De Alencar Monteiro *et al.* (2018), çalışmasında, elik, polipropilen ve hibrit liflerle güçlendirilmiş KYB'nin mekanik davranışları üzerine deneysel bir araştırmanın sonuçlarını sunmuştur. Karışıma, farklı uzunluklarda ve çaplarda çentik uçlu elik lifler hacimce %0,50, %1,00 ve %2,00 ve polipropilen lifler ise %0,33, %0,66 ve %1,10 oranlarında ilave edilmiştir. Her iki lifin birlikte etkilerini incelemek için %0,50 çentik uçlu elik ve %0,66 polipropilen lif kullanılarak hibrit lifli KYB'ler üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çentik uçlu elik lif ve hibrit lif, durabilitiyi azaltıp çekme dayanımını ve tokluğu arttırırken, polipropilen lif takviyesi yapısal kompozitin sünek davranışında bir iyileşme sağlamıştır.

Cao *et al.* (2018), lif takviyeli KYB'nin klor geirirliği ve donma-çözülme direncini araştırmıştır. Bzlmeyi azaltmak, çatlakları kontrol etmek ve betonun mikro yapısını iyileştirmek için lifler kullanılmıştır. Çalışmada, toplam hacmin %0,25, %0,50 ve %0,75 oranında elik lif ve %0,05 ve %0,10 oranında monofilament polipropilen lif kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Karışımdaki polipropilen lif miktarının

artmasının, çelik life göre işlenebilirliği azalttığı ancak  $T_{50}$  süresinin belirlenmesinde daha az etkili olduğu yapılan çalışmada tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar, lif içeriğinin artmasının, numunelerin yüzeyinde dökülme hızının ve aynı zamanda kütle değişiminin de azaldığını göstermiştir.

Abdulhameed *et al.* (2018), çalışmasında hasarlı beton kirişlerin onarımında lif takviyeli KYB kullanımını değerlendirmiştir. Tasarlanan KYB karışımlarında iki tip mineral malzeme (silis dumanı ve cüruf) ve iki tip lif (çelik ve polipropilen) kullanmıştır. Sonuçlar, optimize edilmiş karışımların etkili onarım malzemeleri olduğunu ve mevcut betonla yeterli aderansı sağladığını göstermektedir. Eğilme deneyi sonuçları, onarım karışımlarının, kontrol kirişleri ile karşılaştırıldığında çatlama yükünü arttırabildiğini göstermiştir.

Şaman (2018), tez çalışmasında farklı lif oranlarındaki Normal Beton (NB) ve KYB'nin basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleriyle ilgili araştırma yapmıştır. Yapılan çalışmada hacimsel olarak %0,5 ve %1 lif içeriğine sahip toplam 32 numune üzerinde dinamik (Ed) ve statik elastisite (Ec) modülleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar farklı ülkelerin konuyla ilgili standartları tarafından ortaya konulan bağıntılarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasındaki en iyi ilişkiyi CEB-FIB 90 (İsviçre) standardının verdiği, statik elastisite modülünün, karot numune ile belirlenemediği durumlarda, ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı kullanılarak belirlenebileceğini ve ultrases geçiş hızı ölçüm cihazıyla belirlenen dinamik elastisite modülünün yapı analizi hesaplarında kabul edilebilir bir doğrulukla statik elastisite modülü yerine kullanılabilceğini ifade etmiştir.

### **2.3. Kendiliğinden Yerleşen Uçucu Küllü Beton (KYUKB) Konusunda Yapılan Çalışmalar**

Termik santrallerin çoğunda elektrik enerjisi üretimi için, yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Kömürün %80'i 75 µm elekten geçebilecek incelikte öğütülmekte ve hava ile birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla yakıt olarak püskürtülmektedir. Yakılan bu kömürden üç farklı kül elde edilir. Bunlar; göreceli

olarak iri taneli olup baca gazları ile taşınmayan ve kazan tabanına düşen taban külü; siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutularak uzaklaştırılması ile elde edilen ham kül; çok ince taneli olup baca gazları ile taşınan uçucu küldür (Cook 1983; Khurana ve Topçu 2000; Khiabani Azar 2011).

Çevreyi olumsuz etkileyebilecek bu uçucu küller, mekanik ve elektrostatik yöntem ile toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. Uçucu küllerde çok yüksek miktarda yer alan oksitler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'tür. Bunlarla birlikte  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{C}$  ve  $\text{Na}_2\text{O}$  da mevcuttur. Uçucu küllerin %60 ile %90'ı amorf durumdadır. Geri kalan bölümü de, mullit, kuvars, magnetit ve hematit gibi kristallerdir (Roy *et al.* 1984; Khurana ve Topçu 2000; Khiabani Azar 2011).

Uçucu küller, hacminin %20'si içi boş, nitrojen veya karbondioksitle dolu parçacıklardan oluşmaktadır. Genellikle özgül ağırlıkları 2,1 ile 2,7  $\text{g/cm}^3$  arasında değişir. Renkleri açık griden koyu griye doğru değişmektedir. Demir miktarı arttıkça açık griye doğru ve karbon miktarı arttıkça koyu griye doğru renk değişikliği görülmektedir. Uçucu küller; yüksek silis içeriği, amorf yapısı ve çok ince taneli olmalarından dolayı puzolanik özellik göstermektedir. Kalsiyum hidroksitle sulu ortamlarda birleştiklerinde hidrolik bağlayıcı yeteneğine sahip olurlar. Bu nedenlerden dolayı çimento üretiminde kullanılabilmeyle birlikte, katkı maddesi olarak da doğrudan beton üretiminde kullanılabilirler (Erdoğan 2010).

ASTM C 618 şartnamesinde uçucu küller F ve C tipi olarak tanımlanmaktadır. Bu şartnameye göre C sınıfı uçucu küller F sınıfı uçucu küllerden daha yüksek kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) içeriğine sahiptir. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri, kullanılan kömürün yapısına, hazırlanma şekline ve yanmasına veya toz toplama ve desülfirizasyonu gibi özelliklere bağlıdır. Uçucu küllerde az miktarda  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ , alkali ve karbon yer almaktadır.  $\text{MgO}$  hidratasyon sonucunda,  $\text{SO}_3$  ise sertleşmiş betonda genleşmeye sebep olduğu için bu maddelerin yüksek miktarda olması pek istenmeyen bir durumdur. Alkaliler de, reaktif silika içeren agregalarla reaksiyon olasılığını artırır. Karbon yüksekliği ise hava sürükleyici ihtiyacı duyulduğunda bu katkının aynı etkiyi göstermesi

için daha fazla miktar ihtiyacına sebep olur. Yüksek sıcaklıkta uçucu kül pişirildiğinde ağırlık kaybı ile karşılaşılır. Bu ağırlık kaybının çoğu uçucu külün ihtiva ettiği karbonun yanmasından kaynaklanmaktadır ve bu yüzden uçucu külün içerdiği karbon miktarı ağırlık kaybı olarak ta tanımlanmaktadır (Erdoğan 2010; Khiabani Azar 2011).

Uçucu külün mineralojik bileşimi, külün puzolanik özelliklerini de etkiler. Düşük kireçli uçucu küldeki kristalsiz fazın yapısı  $SiO_2$  açısından zengin, oldukça polimerize silis veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Silis veya alüminosilikat kristalsiz fazı, düşük kireçli külün reaktif bileşeni olup, su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek, küle puzolanik özellik kazandırmaktadır. Yüksek kireçli küldeki aktif bileşen ise içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat kristalsiz fazının yanı sıra, serbest kireç, anhidrit, kalsiyum alüminat gibi aktif kristalize fazlardır. Yüksek kireçli külün kristalsiz fazı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğın yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır (Türker vd 2009).

Uçucu külün katkı maddesi olarak betonda kullanılması olumlu ve olumsuz etkilere sebep olur. Olumlu etkiler:

- Taze betondaki işlenebilmeyi arttırmak,
- Taze betonda terlemeyi azaltmak,
- Betonun hidratasyon ısını azaltmak,
- Sertleşmiş betonun geçirimsizliğini azaltmak,
- Betonun maliyetini düşürmektir.

Olumsuz etkiler:

- Betonun prizini geciktirmek. Prizin gecikmesi donma tehlikesi olduğunda hiç istenmeyen bir olaydır.
- İlk günlerde betonun dayanım kazanma hızını düşürmek ve daha uzun bir süre kür gerektirmek.

- Uçucu kül betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok miktarda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasını gerektirir.

Uçucu küllü betonların işlenebilmesi, katkısız betonlarınkinden daha iyi olmaktadır.

Zira:

- Uçucu külün yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır bu sebepten ötürü, beton yapımı için çimento ağırlığının bir bölümünün yerine puzolanik uçucu kül kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurun hacmi artmaktadır. Daha büyük hacime sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agrega tanelerinin arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır.
- Uçucu külün tanelerinin çoğunluğunun küresel olması nedeni ile iç sürtünme azalarak betonun akıcılığı artar.

Betondaki bağlayıcı maddelerin hacminde yapılan artış ve uçucu kül kullanımı, tanecikler arasındaki içsel sürtünmeyi önemli derecede azaltarak betona daha fazla akıcılık sağlamaktadır. Böylece taze betonun pompalanabilirliğini arttırmakta, yüzeyinin daha kolay perdahlanabilir olmasına yol açmakta, kalıpları daha kolay sökülebilir duruma getirebilmektedir. Bazen, betondaki çimentonun azaltılan bölümü yerine kullanılan uçucu küle ek olarak, ince agreganın bir bölümünün yerine de uçucu kül kullanılmaktadır. Bu tür betonların pompalanabilirliği daha da artmaktadır (Erdoğan 2010; Khiabani Azar 2011).

Uçucu kül katkılı betonlarda, portland çimentosu daha az yer aldığından, bu tür betonların hidrasyon ısıları, katkısız betondakinden daha düşük olmaktadır. Beton karışımı içerisindeki toz malzeme hacminin artması, katı tanelerin yüzey alanlarının artmasına yol açmaktadır. Katı taneler, beton karışımının içerisindeki suyu kendilerine daha iyi bağlamakta ve terlemeyi azaltmaktadır. Böylelikle inceliği yüksek olan uçucu küllerden yapılan betonların terlemesi daha az olmaktadır (Erdoğan 2010; Khiabani

Azar 2011). Uçucu kül tanelerinin inceliği, betonda doldurma yeteneğini arttırırken geçirimsizliğini de azaltmaktadır.

Uçucu kül içeren KYB hakkında yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Mehdipour *et al.* (2016), çalışmasında farklı oranlarda uçucu kül ve metakoalin kullanarak elde ettiği KYB üzerinde betonun stabilite özellikleri ve malzeme performansı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Karışımların hem statik hem de dinamik stabilite özelliklerini değerlendirmek için mini kolon segregasyonu, mini V-hunisi akış süresi, görsel stabilite indeksi (VSI) ve sertleşmiş görsel stabilite indeksi (HVSI) kullanılmıştır. Deney sonuçları, bağlayıcı bileşimin dinamik ve statik kararlılık üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçlara göre, daha yüksek düzeyde akışkanlığa ve daha düşük akış süresine sahip karışımlar, daha düşük segregasyon direnci sergilemiştir.

Mohamed *et al.* (2016), çimentonun %80'inin çeşitli mineral katkıları ile kısmen yer değiştirdiği KYB karışımları üretmiştir. Çalışmada, yarmada çekme ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. KYB gruplarında en iyi basınç dayanımı sonucu, %15 uçucu kül, %15 silis dumanı ve %50 cüruf içeren karışımdan elde edilmiştir.

Ghafoori *et al.* (2016), çalışmasında, kireçtaşı tozunun büyüklüğünün ve içeriğinin KYB'nin basınç dayanımına olan etkilerini değerlendirmiştir. Çeşitli KYB karışımları, su/bağlayıcı oranı 0,45 ve bağlayıcı malzeme içeriği (çimento + uçucu kül + kireçtaşı) 475 kg/m<sup>3</sup> olarak hazırlanmıştır. F sınıfı uçucu kül ve 3-8 µm ortalama tane boyutuna sahip kireçtaşı tozu farklı ağırlıklarda çimento ile değiştirilmiştir. Çalışma sonucunda, kireçtaşı tozunun dâhil edilmesinin ve boyutunun azaltılmasının, KYB'nin basınç dayanımının iyileştirilmesinde etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Siddique and Kaur (2016), çalışmasında, F sınıfı uçucu kül ve çengelli çelik liflerle yapılan KYB'nin özelliklerini incelemiştir. Karışıma hacimce %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında çelik lif katılarak üretilen KYB'lerin taze beton özelliklerini incelemek için



çökme-yayımla, V-hunisi, L-kutusu, U-kutusu deneyleri yapılmıştır. Numunelerin sertleşmiş beton deneyleri yapılarak basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca betonun durabilite özelliklerini araştırmak için gözeneklilik, hızlı klor geçirgenliği, ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak, KYB'nin, hacimce %0,5 ve %1,0 oranında çengelli çelik liflerle takviye edilmesi durumunda işlenebilirliğinin, EFNARC tarafından belirlenen aralıkta bulunduğu ifade edilmiştir. %1,5 oranında çelik lif kullanılmasının işlenebilirliği azalttığı belirtilmiştir. Çelik lifli KYB karışımlarının, hızlı klor geçirgenliğinin çok düşük olduğu, gözenek oranının %9,3'ten %9,9'a çıktığı ve ultrases geçiş hızında 28 günde %17'lik azalma gözlemlendiği aktarılmıştır.

Benli ve Karataş (2017), C sınıfı uçucu kül ve silis dumanı ile üretilen KYB'lerde mineral katkıların mukavemet özellikleri ve dayanıklılığa etkilerini araştırmışlardır. KYB'ler, portland çimentosunun ağırlıkça %10, %20 ve %30 C sınıfı uçucu kül ve %6, %10, %14 silis dumanı ile yer değiştirilmesi sonucu üretilmiştir. Su-bağlayıcı (w/b) oranı 0,37 ile 0,48 arasında belirlenmiştir. KYB'lerin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini belirlemek için  $630 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı ile 7 farklı karışım hazırlanmıştır. Uçucu kül ve silis dumanı içeren KYB'lerin taze hal özelliklerini değerlendirmek için mini çökme-yayımla akış çapı, viskozite ve mini V-hunisi akış süresi deneyleri yapılmıştır. 7, 28 ve 180 günlük çekme dayanımı deneyleri için  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  lik numuneler, basınç dayanımı deneyleri için ise  $50 \text{ mm}^3$  lik küp numuneler hazırlanmıştır. Sonuçlar, silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanıldığı ikili karışımlarda, uçucu kül miktarının artmasıyla basınç dayanımının azaldığını göstermiştir.

Uygunoğlu vd (2017) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı tozu ve doğal kum kullanılarak üretilen epoksi esaslı KYB'lerin yayılma-çapı, V-hunisi, L-kutusu, viskozite ve katılma süresi gibi reolojik özellikleri belirlenerek karakterize edilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre yüzey alanı yüksek olan mineral katkıların kullanım oranının artmasıyla polimer esaslı harçların işlenebilirliklerinin azaldığı belirtilmiştir.

Tulga (2017), çalışmasında Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinden elde edilen uçucu külün betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında 4 farklı dayanımda beton ve KYB karışımı üretmiştir. Karışımlarda çimento miktarının %20'si oranında uçucu kül ve toplam bağlayıcı miktarının %1'i oranında ise kimyasal katkı kullanılmıştır. C20/25 beton karışımında normal, C25/30 ve C30/37 beton karışımlarında süper, C35/45 beton karışımında modifiye polikarboksilat, KYB'lerde ise polikarboksilat türevli akışkanlaştırıcı kullanmıştır. Sonuç olarak KYB'de uçucu kül kullanımının taze betonda birim ağırlık ve yayılma değerini, sertleşmiş betonda ileri yaş dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve donma-çözünme direncini arttırdığı aktarılmıştır.

Yılmaz (2018), toz malzeme olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit ikame oranlarını değiştirerek yüksek performans için ideal karışım oranı belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada, toz malzeme ve toplam çimento oranını sabit tutarak puzolanik malzemelerin performanslarını birbiriyle karşılaştırmıştır. Taze ve sertleşmiş beton deneylerinde yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen KYB'lerin en yüksek performansı gösterdiği, uçucu küllü betonların reolojik özelliklere olumlu katkı sağladığı ve zeolit miktarının toplam bağlayıcının %30, 40 ve 50'si gibi yüksek oranlarda kullanıldığı betonda su ihtiyacının yüksek oranda arttığı aktarılmıştır. Zeolitle üretilen betonlarda taze beton deneylerinin hiç birisinde başarılı olunamadığı dolayısıyla KYB üretilmediği aktarılmıştır.

Hem lif hem de uçucu kül içeren KYB hakkında yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Sertbaş (2006), tez çalışmasında, her karışımda toplam bağlayıcı ve su miktarını sabit tutarak, karışımlara değişik oranlarda polipropilen lif ilave etmiştir. Bağlayıcı olarak 350 kg/m<sup>3</sup> çimento ve 150 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül kullanılan çalışmada 3 farklı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ile KYB'ler üretilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkı çeşidi değiştirilerek, her süper akışkanlaştırıcı katkı ile 1 m<sup>3</sup>'te 3,5, 5,0 ve 7,0 kg/m<sup>3</sup> lif kullanılmıştır. Şahit numune ile birlikte toplam 12 beton karışımı hazırlanmıştır.

Yapılan çalışmada polipropilen lif miktarı arttıkça kullanılan katkı miktarı da arttırılmış ve bütün karışımlarda 60-70 cm arası yayılma değeri elde edilmiştir. Polipropilen lif miktarının KYB’de taze haldeki etkilerini incelemek üzere çökme-yayılma, V-hunisi, L-kutusu ve U-kutusu, sertleşmiş beton özelliklerinin incelenmesi için de basınç, eğilmede çekme ve elastisite modülü tayini deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiş, KYB’de artan polipropilen lif oranının V-hunisi akış süresini arttırdığı, L-kutusu ve U-kutusu deneylerinde ise 3,5 kg/m<sup>3</sup>’e kadar lif kullanımının işlenebilirliği olumsuz etkilemediği görülmüştür. Oransal olarak 1 m<sup>3</sup> karışımda 7 kg lif kullanılan çalışma numunelerinde ise deney aparatında tıkanma olduğu gözlenmiştir. Sertleşmiş beton deneylerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise beton karışımında artan polipropilen lif oranının betonun basınç dayanımı, elastisite modülü ve ultrases geçiş hızlarında önemli etkiye sahip olmadığı, bütün numunelerde eğilme dayanımını ortalama %20 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.

Aktürk (2007), çalışmasında hiper akışkanlaştırıcı katkılı dört farklı KYB karışımı (kontrol, uçucu kül, polipropilen lif, uçucu kül+polipropilen lif) üretmiş ve bu betonların performans özelliklerini birbirleriyle karşılaştırmıştır. Üretilen numuneler basınç dayanımı, yarmada ve eğilmede çekme dayanımı deneylerine tabi tutulmuş, bu sonuçlara göre KYB üretiminde kullanılan malzemelerin etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada performans kriterlerinden basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı düşünüldüğünde en uygun karışımın 1.grup (kontrol) karışımı olduğu, eğilme dayanımında ise en uygun karışımın 3.grup (polipropilen lif kullanılarak üretilen) karışım olduğu tespit edilmiştir.

Güneş (2011), çalışmasında KYB’de lif kullanımının işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bunun için deney aşamasında farklı oranlarda lif içeren numuneler üzerinde araştırma yaparak, lifli betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, KYB’de lif kullanımının betonun akıcılık özelliğini olumsuz etkilediği, özellikle donatılar arasından geçiş yeteneğinin lif varlığından en fazla etkilenen parametre olduğu, lif miktarının belirli sınırlar arasında kalması şartıyla betonun KYB olarak

değerlendirilebileceğini ifade etmiştir. Karışıma eklenen polipropilen liflerin eğilme dayanımını önemli ölçüde etkilemediği, çelik liflerin eğilme dayanımını arttırdığı ve lifli numunelerin lifsiz numunelere göre daha sünek kırıldığını belirtmiştir. Betonun dayanım ve dayanıklılığının lif çeşidine ve miktarına bağlı olarak değişik değerler aldığı aktarılmıştır.

#### **2.4. Yüksek Sıcaklığın Betona Etkisi Konusunda Yapılan Çalışmalar**

Gelişen teknoloji, sanayileşme ve nüfusun giderek çoğalmasına paralel olarak toplu yerleşim bölgelerin fazlalaşması yangın riskinin ve buna bağlı olarak yangının maddi ve manevi zararlarını arttırmıştır. Yapılarda dayanıklılık problemine yol açan başlıca fiziksel etkilerden biri de yüksek sıcaklıklardır. Bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının kullanım dışı kalmasına neden olabilmektedir. Herhangi bir nedenle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme elemanlarda betonun ve çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana gelir. Bu değişikliklerin sonucu olarak betonda çatlama ve parçalanma gözlenirken adansta da önemli kayıpların meydana geldiği tespit edilmiştir (Bingöl 2008).

Yanma, yanıcı maddelerin oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek, yanıcı madde içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir (Ashrae 1997; Sağsöz 2013). Yüksek sıcaklığa sebep olan yangın ise katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Araştırmalar tabii bir yangının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört fazdan oluştuğunu göstermektedir (Aköz ve Yüzer 1994).

Binalardaki yangınlarda 1200°C'ye kadar çıkan sıcaklıklar ölçülmüştür. Yapı malzemeleri bu sıcaklığa kadar ısıtıldığında ahşabın yandığı, çeliğin yumuşayıp mukavemet kaybettiği, beton veya taşların ise parçalanıp döküldüğü görülmüştür. Şu halde önemli yapı malzemelerinin hiçbirinin bu derece yüksek sıcaklıklara dayanmadığı tespit edilmiştir. Bu malzemelerden betonun diğerlerine kıyasla biraz

daha dayanıklı olduğu ve biraz daha uzun sürede parçalandığı rapor edilmiştir (Kocataşkın 2000).

Isıtma süresince meydana gelen çatlama, parçalanma ve soğutma esnasındaki dağılmalar yangın esnasında ve sonrasında beton üzerinde fiziksel olarak gözlenen yaygın davranışlardır. Betonda kusurlu davranışlara sebep olan faktörler şu şekilde sıralanabilir:

- Termal değişimlerin sebep olduğu termal gerilmeler,
- Çimento hamuru içindeki kalsiyum hidroksit  $[Ca(OH)_2]$  ve C-S-H jellerinin ayrışması,
- Kireçtaşı agregalarının kalsinasyonu,
- Yüksek sıcaklıklarda kuvars agregalarının  $\alpha$ -kuvars formundan  $\beta$ -kuvars formuna faz değişimi sırasında oluşan hacim genişmesi (Lin *et al.* 1996).

Yüksek sıcaklığa maruz kalan yapı elemanlarında, sıcaklık etkisinde oluşan parçalanmalar, yapı elemanının bütünlüğünü bozarak yük taşıma kapasitesinin kaybolmasına neden olur. Parça atmalar neticesinde pas payları dökülen betonarme yapılarda, bu kez donatılar yüksek sıcaklık etkisine maruz kalırlar. Beton veya betonarme yapılarda polipropilen lif ve hava sürükleyici kullanılması yüksek sıcaklık altında betonun parça atma riskini azaltmaktadır. Hava sürükleyiciler nem içeriğini ve boşlukların miktarını arttırarak boşluk basıncının düşmesine neden olur. Polipropilen lifler ise yüksek sıcaklık etkisinde yaklaşık  $170^{\circ}C$ 'de eriyerek kılcal boşlukların oluşmasına neden olurlar. Parça atmaları azaltmak için termal bariyerler, polipropilen lifler, hava sürükleyiciler, büyük boyutlu elemanlar ve düşük ısıl genişlemeye sahip agregalar kullanmak gerekir (Khoury 2003).

Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da değişir. Yüksek sıcaklık etkisi, sıcaklığın artışına bağlı olarak, betonun basınç dayanımının belirgin olarak azalması ile sonuçlanır (Riley 1991; Akman 2001).

Betonun performansını arttırmak, porozite ve permeabilitesinin düşük olması ile mümkündür. Ancak bu durum yüksek sıcaklık etkisine maruz kalındığında betonun performansının azalmasına neden olur. Son yıllarda görülen tünel yangınlarında betonda patlama ve parça atmalar görülmüştür. Betonda meydana gelen bu hasara, ısı farkının yükselmesi ile oluşan yüksek termo mekanik gerilme ve düşük permeabiliteden dolayı dışarı çıkamayan suyun meydana getirdiği su buharı basıncı neden olur.

Beton, farklı termal özelliklere sahip bileşenleri, farklı nem içeriği ve boşluk yapısından dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergiler (Li *et al.* 2004). Bu nedenle betonun yüksek sıcaklık altında davranışını daha iyi inceleyebilmek için çimento hamuru, agregalar ve mineral katkı maddeleri gibi bileşenlerin tümünün ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir.

Bu konudaki ilk çalışmalar 1920'lerde Lea ve Stradling tarafından başlatılmış ve dönemin klasik yayınlarında yüksek sıcaklıklarda betonun basınç mukavemetine etki eden faktörler belirtilmiştir (Khoury 1992; Bingöl 2008)

Yüksek sıcaklığın betona etkisi konusunda yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Bingöl ve Gül (2002) yaptıkları deneysel çalışmada, normal agrega yerine pomza kullanarak hafif betonlar üretmişlerdir. Üretilen deneysel numune gruplarında %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza kullanmışlardır. Üretilen farklı oranlarda hafif agrega muhteva eden betonları 750°C'ye kadar yüksek sıcaklık fırınında ısıtarak, hafif betonların farklı yüksek sıcaklık etkisinden sonra mukavemetinin normal betonlara göre değişimini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Beton özelliklerinin 150°C sıcaklıkta bozularak bu değerde beton numunelerinin mukavemetlerinin bir kısmını kaybetmeye başladığı, 150°C-300°C aralığında beton mukavemetinde belirgin bir kayıp olmadığı, sıcaklık 750°C'ye ulaştığında ise karışımların tümü başlangıç mukavemetlerinin çok önemli bir kısmını kaybettiği belirtilmiştir. Ancak kullanılan hafif agrega oranının artmasıyla mukavemetlerdeki kayıp oranlarının azaldığını belirtmişlerdir. Çalışmada

numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalma süresi çalışmanın diğer parametrelerinden birisi olarak belirlenmiş ancak ısıtma süresinin mukavemet kaybı üzerinde çok belirgin bir etki göstermediği, ısıtılan sıcaklığın mukavemet kayıplarında daha önemli rol oynadığı çalışma kapsamında belirtilmiştir.

Fares *et al.* (2009), çalışmalarında, yüksek sıcaklığın KYB'nin performansı üzerinde etkisini iki farklı karışım için incelemiştir. Numuneler; 150, 300, 450 ve 600°C yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakıldıktan sonra betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, geçirimsizlik ve porozite özellikleri incelenmiştir. Betonlarda ağırlık kaybını belirlemek için numunelerin kütlesi ısıtmadan önce ve sonra ölçülmüştür. Sonuç olarak numunelerde 20 ile 150°C arasında mukavemet kayıplarının başladığı, 150-300°C arasında küçük çaplı bir mukavemet artışının olduğu, 300-600°C arasında mukavemet kayıplarının hız kazandığı ve 600°C üzerinde ani mukavemet kayıplarının olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sıcaklık arttıkça, beton içerisindeki boşluk yapısının ve geçirimsizliğin arttığı çalışma kapsamında ifade edilmiştir.

Acay (2010), tarafından yapılan çalışmada, farklı oranlarda uçucu kül kullanılarak üretilen KYB'lerde yüksek sıcaklık etkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla artan sıcaklık etkisi altında beton yaşı dikkate alınarak en iyi dayanım performansı gösteren uçucu kül katkı oranı belirlenmesi amaçlanmıştır. Numuneler 28 günlük, 56 günlük ve 90 günlük standart kür gruplarına ayrılmıştır. Kür sürelerini dolduran gruplar 3'er numune seti halinde 20, 100, 400, 700 ve 900°C sıcaklık etkisine 3 saat süre ile maruz bırakılmışlardır. Numunelerin soğutulmasının ardından sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi için birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre KYB'de uçucu kül miktarının artması genel olarak basınç dayanımını düşürürken, betonun kendiliğinden yerleşebilirlik ve yüksek sıcaklık etkisi altında iken basınç dayanım kayıplarına olumlu yönde tesir ettiği görülmüştür.

Andiç-Çakır ve Hızal (2012), çalışmasını üç aşamada yürütmüştür. Birinci aşamada, A harfi ile simgelenen, kaba agrega olarak Menderes bölgesinden temin edilen pomza taşı

içeren, kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif beton (KYTHB) üretilmiştir. İkinci aşamada ise B harfi ile simgelenen ve kaba agrega olarak Kayseri bölgesinden temin edilen pomza taşı içeren, KYTHB üretilmiştir. A ve B serisi betonlarda kaba agreganın tamamı pomza olarak belirlenmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında normal ağırlıkta beton agregaları içeren, C harfiyle simgelenen, KYB üretilmiştir. B ve C karışımları için su/çimento oranı 0,55 olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı madde olarak ise tek tip çimento, CEM I 42,5/R kullanılmış, mineral katkı kullanımına gidilmemiştir. Tüm karışımlar sırasıyla 300, 600 ve 900°C'ye maruz bırakılmıştır. 300°C üzerindeki sıcaklıklarda basınç dayanımındaki en büyük düşüş kontrol karışımında görülmüştür. Dayanım kaybı 600°C sıcaklıkta %35, 900°C sıcaklıkta %89 olmuştur. Kayseri pomzası içeren karışımın dayanım kaybı ise 600°C sıcaklıkta %33, 900°C sıcaklıkta %82 olmuştur.

Atashafrzeh (2013), çalışmasında lif katkısız, 300, 600, 900 ve 1200 g/m<sup>3</sup> polipropilen elyaf (yünsü) ve çubuk lif katkılı beton numuneler üretmiştir. Polipropilen elyaf lif 12 mm ve polipropilen çubuk lif 40 mm boyunda kullanılmıştır. Numuneler laboratuvar ortamında kür edilmiş, 28. günün sonunda tüm numuneler 23, 150, 300, 450, 600 ve 750°C sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 300 g/m<sup>3</sup> yünsü polipropilen katkılı numunelerde tespit edilmiştir. Bu grup için dayanım artışı %8 olarak belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkilerinden sonra dayanımda çubuk polipropilen lifler yünsü polipropilen liflere göre daha iyi sonuçlar göstermiştir. Ayrıca veriler göstermiştir ki her iki lif grubu için 600°C'den sonra lifsiz numuneler daha iyi sonuç vermiştir. Bunun nedeni olarak yüksek sıcaklıklarda polipropilen liflerin erimesiyle, boşluklu bir ortam oluşumuna sebep olduğu gösterilmiştir.

Sağsöz (2013), çalışmasında, kendiliğinden yerleşen betonların yüksek sıcaklık etkisinde bazı mekanik, fiziksel özellikleri ve renk değişimlerini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda CEM I 42,5 R ve CEM II 42,5 (B-M)(P-L) L N tip çimento ile 0,35, 0,40 ve 0,45 su/çimento oranında beton numuneler üretmiştir. Üretilen beton numuneler farklı yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak havada ve suda soğutulmuştur. Uygulama öncesi ve sonrası fotoğraf makinesi ile görüntüleme yapılarak CIE Lab renk



uzayına göre renk ölçümü analizleri gerçekleştirilmiştir. Havada ve suda soğutulan numuneler incelendiğinde  $\Delta E$  (renk değişimi) değerinin sıcaklıkla artış gösterdiği ancak bu artışın  $400^{\circ}\text{C}$ 'de belirginleştiği,  $800^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkıldıkça  $\Delta E$  değerlerinde tekrar azalma görüldüğü aktarılmıştır. Havada ve suda soğutulan numuneler için ölçülen renk yoğunluğu değişimi ve renk tonu değişimi değerleri farklı olmasına rağmen sıcaklığa bağlı olarak değişimlerin paralellik gösterdiği ifade edilmiştir.

Öz (2014), çalışmasında uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen hibrid lifli betonların özellikleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu doğrultuda; 3 farklı lifin KYB teknolojisine uygulanması ile üretim ve kullanılabilirliğini, KYB teknolojisinin hibrid lifli betonlara uygulanmasını ve uçucu kül içeren hibrid lifli KYB'nin özelliklerini araştırmıştır. Bu amaçla deneysel çalışma üç temel grup halinde yapılmıştır. Deney karışımlarında çimento, A grubunda %10, B grubunda %15 ve C grubunda %20 oranında uçucu kül ile yer değiştirilmiştir. Tüm deneylerde 0,38 su/bağlayıcı (çimento+mineral katkı) oranı, %2 oranında çelik lif ve pirinç kaplı çelik lif ve buna ilaveten %0, %0,05 ve %0,1 oranında polipropilen lif katkılı KYB'ler üretmiştir. Üretilen betonlar üzerinde taze halde; çökme-yayılma, V-hunisi akış süresi, L-kutusu ve J-halkası deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş halde ise, mekanik özellikler açısından, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve kuru birim ağırlık, durabilite açısından ise yüksek sıcaklık etkisi ( $200$ ,  $400$  ve  $600^{\circ}\text{C}$ 'de ağırlık kaybı, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı), donma çözülme deneyi ( $50$ ,  $100$  ve  $300$  çevrimde ağırlık kaybı, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı) ve basınçlı su geçirimsizliği deneyleri yapılmıştır. Beton numunelerden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü alınarak mikro yapıları incelenmiştir. Sonuç olarak, karışımlarda çelik lif miktarı ve polipropilen lif miktarı arttıkça yayılma çapının düştüğü, uçucu kül ve pirinç kaplı çelik lif miktarının artmasıyla yayılma çapının arttığı gözlemlenmiştir. Karışımlarda uçucu kül ve çelik lif miktarı arttıkça basınç dayanımına paralel olarak yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımında da artışlar gözlemlenmiştir. Polipropilen lif içeren karışımlar, yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında basınç dayanımlarında ciddi oranda düşüşlerin olduğu ve ağırlık kayıplarında azalma olduğu tespit edilmiştir. Karışımlardaki polipropilen lif miktarı arttıkça donma çözülme etkisinde meydana gelen dayanım kaybı değerlerinde

azalmalar olduğu aktarılmıştır. SEM kullanılarak çekilen mikrograflar incelendiğinde; uçucu külün betonda mikro düzeyde doluluk sağladığı, kalsiyum hidroksiti bağlayarak CSH'ları oluşturması, ara yüzeylerde aderansın sağlanması gibi mikro yapıda olumlu etkileri olduğu ifade edilmiştir.

Lotfy *et al.* (2016), çalışmasında yüksek fırın cürufu, genişletilmiş kil ve genişletilmiş şeyl kullanılarak oluşturulan hafif KYB'lerin, dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Numuneler 1.5 saat boyunca 900°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, hafif KYB'lerde, önemli bir çatlak oluşmadığı (sadece görünür kılcal çatlaklar) ve bu betonların arta kalan dayanım açısından yangına dayanıklılık sergilediği gözlemlenmiştir.

Zhang *et al.* (2016), çalışmasında boşluk basıncını, yangına maruz kalan betonun patlaması için ana mekanizmalardan biri olarak tanımlamıştır. Bununla birlikte, yangına maruz kalma sırasında lif takviyeli KYB'nin boşluk basıncındaki araştırma çok sınırlıdır. Bu deneysel çalışma, ISO 384 yangın ısısı eğrisine maruz kaldığında, lifli KYB'nin farklı derinliklerinde boşluk basıncının birikmesini araştırmaktadır. Mikro polipropilen, makro polipropilen, çelik lif ve bunların karma kullanımı ile takviye edilmiş KYB'ler incelenmiştir. Boşluk basıncı ölçümleri, mikro polipropilen liflerin makro polipropilen lif ile karşılaştırıldığında maksimum boşluk basıncını azaltmada daha etkili olduğunu gösterirken, çelik lifin biraz düşük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Çelik lif, daha derin bölgelerde boşluk basıncını azaltmada etkili iken, makro PP elyafın, yangına maruz kalma sırasında derin bölgelere göre sığ bölgelerde daha iyi bir etkisi olduğu belirtilmiştir.

Cingi (2017), çalışmasında çimento esaslı, yüksek dayanımlı lifli kompozitlerin yüksek sıcaklık etkisi altında davranışını incelemiştir. Çalışmada kullanılan çimento esaslı lifli kompozit numunelerinin içeriğinde silis dumanı ve sarı silis kumu bulunmaktadır. Numunelerin içeriğine ayrıca; %0 (kontrol numunesi), %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 oranlarında polipropilen lif katılarak elde edilen 73 adet numune üzerinde çalışma yapmıştır. Daha sonra yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış numunelerden küçük

parçalar alınarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) laboratuvarlarında mikro yapı incelemesi ve enerji dağılımı spektroskopisi (EDS) analizi taraması yapılmış, numunelerde kimyasal değişimler ve bu değişimlere nelerin yol açtığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak kontrol reaktif pudra betonu numunelerinde kullanılan plastik lif oranı arttıkça birim ağırlıkların da arttığı, yüksek sıcaklıkta %12'lere varan birim ağırlık kayıplarının olduğu ve lif oranı arttıkça birim ağırlık kayıplarının yükseldiği aktarılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerde plastik lif oranı %0,5 iken mukavemet kayıplarının %70'leri bulunduğu, lif oranı daha da arttırıldığında ise betonların dağıldığı ölçüm alınamadığı ve plastik liflerdeki deformasyon ile oluşan boşlukların ultrases geçiş süresini arttırdığı ifade edilmiştir.

Akca (2017), tez çalışmasında yüksek sıcaklık etkisinde zarar görmüş betonda soğuma sonrasındaki rehidratasyon ve bozulma sürecini daha kapsamlı incelemiştir. Bu sebeple, yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış farklı tiplerdeki hava sürüklenmiş lifli betonlara, hava ve su kürü uygulamıştır. Kür öncesi ve sonrası mekanik özellikler basınç testleriyle, morfolojik özellikler SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDS (Enerji Dağılımı Spektroskopisi) ve TGA (Termogravimetrik Analiz Cihazı) analizleriyle incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca hava kürü sırasındaki bozulma süreci fotoğraflanarak takip edilmiş ve oluşan çatlakların beton dayanımı ile ilişkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda ciddi mekanik kayıplar ve morfolojik değişimler görüldüğü ve bu kayıpların hava kürü sırasında devam ettiğini, su kürü sırasında ise yüksek sıcaklık etkisiyle kötüleşen mekanik özelliklerin geri kazanıldığı ifade edilmiştir.

Dener (2017), çalışmasında öğütülmüş pomza tozu (ÖPT) ile üretilen kendiliğinden yerleşen lifli betonlarda (KYL) yüksek sıcaklık etkisini araştırmıştır. Bu doğrultuda kontrol karışımı ile birlikte %5, %10, %15 ve %20 ÖPT ikameli olmak üzere 5 seri beton numunesi üretmiştir. Tüm karışımlarda çelik lif, süper akışkanlaştırıcı ve su/bağlayıcı malzeme oranını sabit tutmuştur. Elde ettiği karışımları çeşitli kür sürelerinden sonra ultrases geçiş hızı ölçümleri ve basınç deneyleri yapmış, standart kür süresinden sonra 200, 400, 600 ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakmıştır. Yüksek

sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç deneyleri ve ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklıklardan sonra çelik liflerin beton içerisindeki görüntüleri incelenmiştir. Sonuç olarak yüksek sıcaklıklardan sonra ÖPT kullanılan karışımların basınç dayanımlarındaki azalmanın kontrol karışımına göre daha fazla olduğu, tüm karışımların ultrases geçiş hızlarındaki azalma oranlarının birbirine yakın olduğu ve maruz kalınan en yüksek sıcaklık değeri 800°C'den sonra dahi beton numunelerinin hiç birinde parçalanma meydana gelmediği ifade edilmiştir.

Abdulhaleem (2018), çalışmasında çelik liflerin kendiliğinden yerleşen betonun yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak çelik lif katkısının özellikle yüksek sıcaklıklardan sonra KYB'nin mekanik özelliklerini önemli bir şekilde iyileştirdiğini, polipropilen liflerin ise KYB'de ısıtma süresince patlama riskini engellediğini, çelik liflerin betonarme kısa konsolların yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan önce ve sonra olumlu yönde etkilediğini aktarmıştır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada farklı miktarlarda (0,25, 0,50, 0,75 ve 1,00 kg/m<sup>3</sup>) polipropilen lif ve mineral malzeme olarak uçucu kül içeren KYB'ler farklı sıcaklıklar altında (25, 250, 500 ve 750°C) yüksek sıcaklık fırınında 3 saat yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına gelene kadar bekletilmiştir. Betonlara ilave edilen farklı lif miktarlarının, yüksek sıcaklık etkisinden sonra betonların basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve ultra ses geçiş hızı değerlerine etkileri araştırılmıştır.

Portland çimentosu, uçucu kül, agrega, su ve kimyasal katkı birleştirilerek kontrol grubu KYB karışımları hazırlanmıştır. Elde edilen karışım oranları sabit tutularak tek çeşit polipropilen lif, farklı miktarlarda karışım içerisine ilave edilerek lifli betonlar üretilmiştir. Beş farklı beton serisi için toplamda 120 adet numune hazırlanmıştır. Taze beton numuneleri üzerinde sırasıyla çökme-yayıma, V-hunisi ve L-kutusu deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonunda taze betonlar numune kalıplarına doldurulmuştur.

Polipropilen lif içeren numunelerde homojen bir karışımın oluşması için, lif karışım aşamasında elle düzgün olarak dağıtılmıştır. Her bir seri için 12 adet küp, 12 adet prizma numune üretilmiştir. Seri içerisindeki 12 adet numune 1'den 12'ye kadar numaralandırılmış olup; 1-2-3 numaralı numuneler kontrol amaçlı oda sıcaklığında bekletilirken, 4-5-6 numaralı numuneler 250°C'ye, 7-8-9 numaralı numuneler 500°C'ye ve 10-11-12 numaralı numuneler ise 750°C'ye 3 saat süreyle maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkilerinden sonra tüm numuneler oda sıcaklığına gelinceye kadar fırın içerisinde kendi kendine soğumaya bırakılmıştır. Soğutulan küp numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı ölçümleri yapıldıktan sonra bu numuneler basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Prizma numunelerde ise eğilmede çekme deneyi yapılmıştır. Bütün deney sonuçları kendi içerisinde incelenmiş ve birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan malzeme ve deney aletleri Bölüm 3.1'de sunulmuştur.

### **3.1. Materyal**

Çalışmanın bu bölümünde, KYB üretiminde kullanılan agrega, çimento, uçucu kül, su, süperakışkanlaştırıcı katkı malzemeleri ile deneylerde kullanılan alet ve cihazların genel özellikleri açıklanmıştır.

#### **3.1.1. Deneyde kullanılan malzemeler**

##### **3.1.1.a. Çimento**

Bu çalışmada Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen TS EN 197-1 standardına uygun R tipi Portland Çimentosu (CEM I 42,5 R) kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun üretici firmadan temin edilen kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** CEM I 42,5 R çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	
Madde	Miktar (%)
SiO <sub>2</sub>	18,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,09
CaO	63,65
MgO	2,50
SO <sub>3</sub>	2,84
Kızdırma kaybı	3,90
Na <sub>2</sub> O	0,21
K <sub>2</sub> O	0,62
Toplam alkali oksit; Na <sub>2</sub> O+0,658* K <sub>2</sub> O	0,62
Cl <sup>-</sup>	0,015
Toplam	100,00
CaO (Serbest Kireç)	0,44
Çözünmeyen Kalıntı	0,55

**Çizelge 3.2.** CEM I 42,5 R çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	
İncelik 45µm elek üstü (%)	7,15
Özgül Ağırlık	3,12
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3698
Priz Başı (Saat-dakika)	2 sa-31 dk
Priz Sonu (Saat-dakika)	3 sa-11 dk
Hacim Genleşmesi (mm)	1,0
Basınç Dayanımı 2 Gün (MPa)	27,90
Basınç Dayanımı 28 Gün (MPa)	58,00
Su İhtiyacı (%)	29,5

### 3.1.1.b. Uçucu kül

Birçok termik santralde, elektrik üretimi için gerekli enerjiyi sağlayabilmek amacıyla, yakıt olarak pulvarize kömür kullanılmaktadır. Pulvarize kömürün yanmasıyla ortaya çıkan küllerin bir kısmı ocak tabanında birikirken yaklaşık %75-80'i gazlarla birlikte bacadan dışarıya sürüklenmektedir. Bu küllere “uçucu kül” ya da “pulverize yakıt külü” denilmektedir (Erdoğan 2004).

Tane boyutları 0,5-150 µm olan, kısmen veya tamamen küresel şekilli küllerin bacadan çıkarak çevreye yayılmasını önlemek gerekmektedir. TS EN 197-1 (2002) standardında belirtilen tipteki uçucu küller, elektrostatik veya mekanik olarak çöktürme ile elde edilmektedirler. ASTM C 618 (2012) standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

**a-** F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı %70'ten fazla olan küllerdir. Aynı zamanda bu küller düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

**b-** C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bir miktar bağlayıcı özelliğe de sahiptirler (Gündeşli 2008).

Bu çalışmada yapılan deneylerde Zonguldak İli, Kilimli İlçesi, Çatalağzı bölgesinde bulunan Zonguldak Eren Termik Santrali'nden temin edilen TS EN 197-1 (2002), ASTM C 618 (2012) ve TS EN 450-1/2 (2013/2008) standartlarındaki koşullara uygun olan F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu külün temin edildiği santralden alınan kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te, mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.



**Çizelge 3.3.** Uçucu külün kimyasal özellikleri

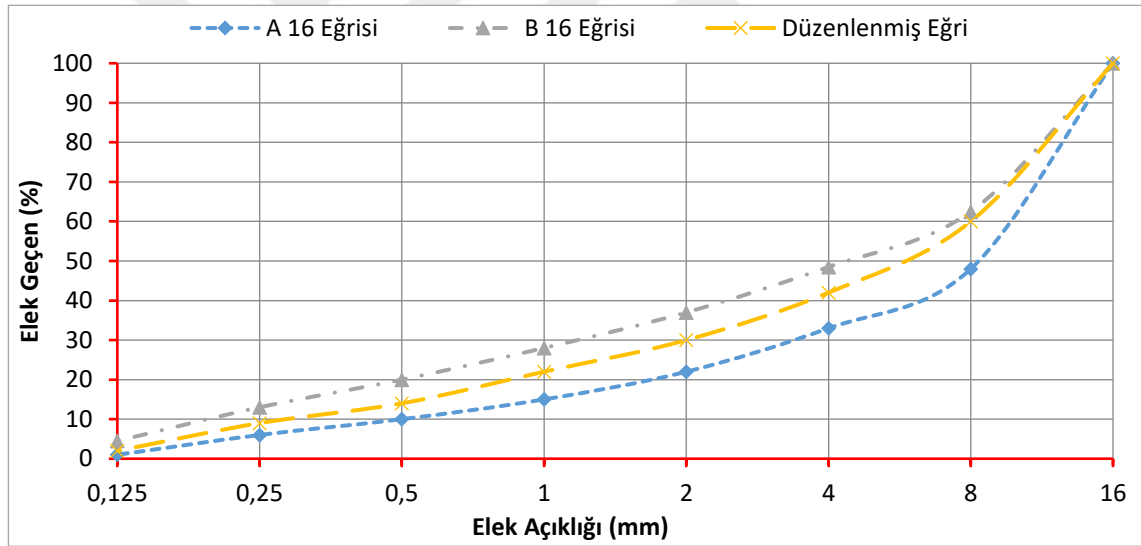
Kimyasal Özellikler	
Madde	Miktar (%)
SiO <sub>2</sub>	60,61
Çözünmeyen Kalıntı	89,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,36
CaO	2,44
MgO	1,64
SO <sub>3</sub>	0,51
K <sub>2</sub> O	1,91
Na <sub>2</sub> O	0,56
Toplam alkali oksit; (Na <sub>2</sub> O+0,658* K <sub>2</sub> O)	1,82
Cl	0,0067
Reaktif SiO <sub>2</sub>	40,9
Reaktif CaO	0,0
Serbest CaO	0,14
Kızdırma kaybı	2,71
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	88,8

**Çizelge 3.4.** Uçucu külün mekanik ve fiziksel özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	
İncelik 45 µm elek üstü (%)	29,3
İncelik 200 µm elek üstü (%)	0,8
Özgül Ağırlık	2,33
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	2475
Piriz Başlangıcı (saat)	1,25
Aktivite İndeksi (28 gün) (%)	88
Aktivite İndeksi (90 gün) (%)	91

### 3.1.1.c. Agregalar

Bu çalışmada, Erzurum ili sınırları içerisindeki Aras nehrinden temin edilen doğal kum ve çakıl kullanılmıştır. Kullanılan agregaya dere malzemesi olup maksimum agregaya tane çapı 15 mm'dir. Agregaya 0-7 ve 7-15 mm aralıklarında olmak üzere iki farklı tane dağılımında kullanılmıştır. İnce ve iri agregaya için ayrı ayrı elek analizi deneyi yapılmış ve uygun tane dağılımının sağlanması için gradasyon düzenlenmiştir. Buna göre karışımlar da %60 ince, %40 iri agregaya kullanılmıştır. Düzenlenmiş granülometri eğrisi Şekil 3.1'de verilmiştir. Karışım hesaplarında agregaların doymuş kuru yüzey yoğunlukları sırasıyla 2,63 ve 2,67 g/cm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. Karışımda kullanılan agreganın granülometri eğrisi

### 3.1.1.d. Karışım suyu

İçilebilir nitelikteki suyun beton üretiminde kullanımının uygun olduğu kabul edildiğinden, bu çalışmada Atatürk Üniversitesi içme suyu şebekesinden alınan su kullanılmıştır.

### 3.1.1.e. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı

Bu çalışmada kimyasal katkı olarak Sancak Kimya firmasından temin edilen 1,069 g/ml yoğunluğa sahip, pH değeri 6,1 olan polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı ADVA Flow 330 kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı beton karışımlarına toplam bağlayıcı miktarının yaklaşık %1,87'si kadar katılmıştır.

### 3.1.1.f. Polipropilen lif

Yapılan deneysel çalışmada Tekno Yapı Kimyasalları A.Ş.'den temin edilen polipropilen lif kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen life ait teknik özellikler Çizelge 3.5'te verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Polipropilen lifin teknik özellikleri

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Yumuşama Noktası (°C)	Ergime Noktası (°C)	Özgül Yoğunluk (kg/lt)	Görünüm	Fiber Uzunluğu (mm)
Polipropilen	350	140	165-170	0,91	Doğal Beyaz	19



**Şekil 3.2.** Polipropilen lif

### 3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler

#### 3.1.2.a. Betoniyer

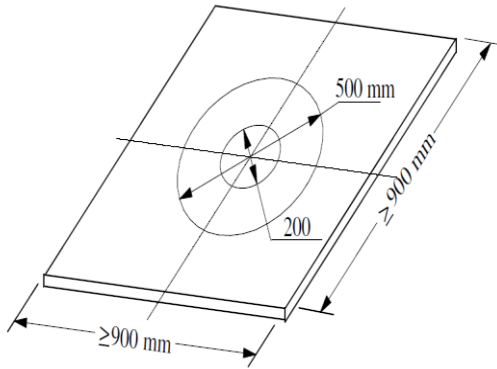
Deneyisel çalışmalardaki numune betonlarının karılması işleminde, ELE firmasının ürettiği 135° açı ile manevra yapabilen 60 dm<sup>3</sup> kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betoniyer kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Betoniyer

#### 3.1.2.b. Çökme-yayılma deney aleti

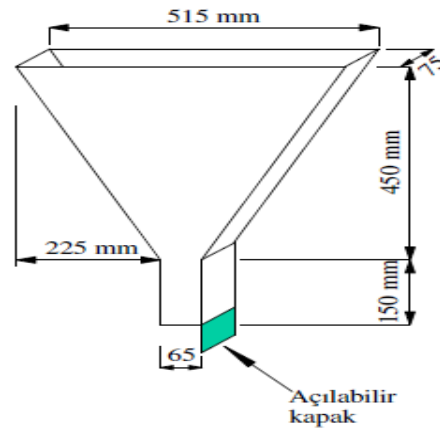
Yapılan deneysel çalışmalarda, üzerinde 20 cm ve 50 cm çaplı daireler çizili olan çelikten yapılmış bir tabla ve çökme hunisi kullanılmıştır (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4.** Çökme-yayıma deney aleti

### 3.1.2.c. V-Hunisi deney aleti

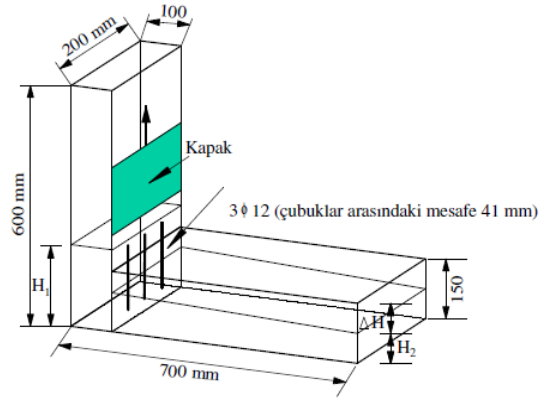
Yapılan deneysel çalışmalarda, EFNARC (2005) standardına uyumlu çelikten yapılmış olan V şekilli huni kullanılmıştır (Şekil 3.5).



**Şekil 3.5.** V- hunisi deney aleti

### 3.1.2.d. L-Kutusu deney aleti

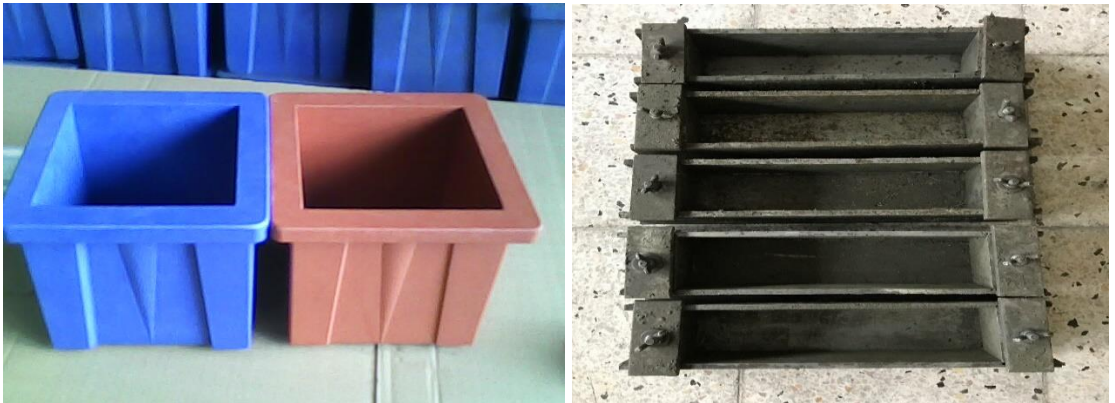
Yapılan çalışmalarda, EFNARC (2005) standardına uyumlu L şeklinde çelikten yapılmış, kutunun alt ortasında sürgülü bir kapak ve aynı zamanda engel oluşturacak 12 mm çapında 3 adet demir çubuk bulunan deney aleti kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. L- kutusu deney aleti

### 3.1.2.e. Numune kalıpları

Deneyisel çalışmalar kapsamında sertleştirilmiş plastikten imal edilmiş, 15×15×15 cm boyutlarında küp ve 7×7×28 cm boyutlarında çelikten imal edilmiş prizmatik kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Çelik ve plastik numune kalıpları

### 3.1.2.f. Plastik su kr havuzu

Yapılan deneysel çalışmalarda kirece doygun durumdaki suyu  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulabilen, çevrim pompalı tam dijital su kr havuzu kullanılmıştır (şekil 3.8).



şekil 3.8. Plastik kr havuzu

### 3.1.2.g. Yüksek sıcaklık fırını

Yapılan deneysel çalışmalarda numuneleri yüksek sıcaklığa maruz bırakmak için dijital kontrol panelli, 1200°C'ye kadar ısıtma kapasiteli içerisi seramik kaplı olan, Tahya makine firmasının üretmiş olduğu yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Yüksek sıcaklık fırını

### 3.1.2.h. Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı

Yapılan deneysel çalışmalarda numunelerin ultrases geçiş hızlarının ölçümü için Proceq marka cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.10).





**Şekil 3.10.** Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı

### 3.1.2.1. Beton test presisi

Sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanımını belirlemek amacıyla, kapasitesi 300 ton olan, ELE marka AUTOTEST 3000 modeli hidrolik beton test presisi kullanılmıştır (Şekil 3.11).



**Şekil 3.11.** Beton basınç ve eğilme test presisi

### 3.2. Yöntem

Bu bölümde, KYB üretiminde karışım seçeneklerinin belirlenmesi, taze beton numunelerine uygulanan deney yöntemleri, yüksek sıcaklık koşulları ve sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler açıklanmıştır.

#### 3.2.1. KYB karışım oranları

KYB'lerin kesin karışım hesabı için herhangi bir standart bulunmamasıyla birlikte, TS 802 (2016) ve EFNARC (2005)'de KYB'lerde kullanılacak malzeme miktarları için önerilen aralıklar sunulmuştur. Buna göre çalışmada kullanılan kontrol grubuna ait karışım hesabı TS 802 (2016)'da ön görülen oranlarla karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.6'da sunulmuştur.

**Çizelge 3.6.** KYB karışım bileşimleri için önerilen tipik değer aralıkları TS 802 (2016)

Bileşen	Kütlece tipik aralık (kg/m <sup>3</sup> )	Hacimce tipik aralık (dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Kontrol grubu
Çok ince malzeme (0,125 mm elekten geçen tüm malzeme)	380-600		560 kg/m <sup>3</sup>
Bağlayıcı hamur (Çok ince malzeme, su, hava ve katkıların hacmi)		300-380	378 dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Su miktarı	150-210	150-210	216 kg/m <sup>3</sup>
İri agrega miktarı	750-1000	270-360	651 kg/m <sup>3</sup>
İnce agrega miktarı (kum)	Bu miktar diğer bileşenlerin hacmini dengeler, tipik olarak toplam agrega ağırlığının %48 - %55 civarındadır.		%59
Hacimce su/çok ince malzeme oranı		0,85-1,10	0,95

Kendiliğinden yerleşen taze beton numuneleri için hazırlanan karışımlarda, bağlayıcı dozajı 480 kg/m<sup>3</sup>, su/bağlayıcı oranı ise 0,45 olarak sabit tutulmuştur. Mineral katkı malzemesi olarak uçucu kül, çimento miktarının ağırlıkça %20'si oranında (80 kg/m<sup>3</sup>) sabit tutularak tüm karışımlara eklenmiştir. Karışımdaki toplam çok ince malzeme miktarı (0,125 mm elekten geçen tüm malzeme) 560 kg/m<sup>3</sup> olarak kullanılmıştır.

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı tüm seriler için sabit olup toplam bağlayıcı miktarının yaklaşık %1.87'si kadar kullanılmıştır. Karışıma giren tüm oranlar sabit tutularak elde edilen lifsiz KYB'ye 0,25, 0,50, 0,75 ve 1,00 kg/m<sup>3</sup> miktarlarında polipropilen lif eklenilerek lifli KYB grupları üretilmiştir.

Belirlenmiş olan sabit dozaj ve su/çimento oranından yola çıkılarak karışım suyu miktarı 216 kg olarak hesaplanmıştır. Su miktarlarına, bağlayıcı hacmi ve bütün karışımlar için seçilen %1 hava hacmi eklenmiş ve 1000 dm<sup>3</sup>'ten çıkarılarak 1 m<sup>3</sup> betondaki toplam agrega hacmi hesaplanmıştır. Tüm gruplar için karışıma giren malzeme miktarları hesaplanmış ve Çizelge 3.7'de topluca verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** KYB ve KYLB grupları için malzeme miktarları (1 m<sup>3</sup> beton için)

Malz. Karışım	Çimento (kg)	UK (kg)	Toplam Bağlay. (kg)	İnce Agr. (kg)	İri Agr. (kg)	Su (kg)	Akış. Katkı (kg)	Lif Mik. (kg/m <sup>3</sup> )
Kontrol	400	80	480	965	651	216	9	0,00
PPL 0,25	400	80	480	965	651	216	9	0,25
PPL 0,50	400	80	480	965	651	216	9	0,50
PPL 0,75	400	80	480	965	651	216	9	0,75
PPL 1,00	400	80	480	965	651	216	9	1,00

### 3.2.2. KYB taze beton deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde, taze beton deneylerinden çökme-yayıma, V hunisi, L kutusu deneylerinde izlenen yöntemler açıklanmıştır. KYB deneylerinin sonuçları Kaynak Özetleri bölümünde Çizelge 2.1'de sunulan EFNARC (2005)'te tavsiye edilen sınır değerlere göre kontrol edilerek sınıflandırılmıştır.

### 3.2.2.a. Çökme - yayılma deneyi

EFNARC (2005)'e uygun olarak yapılan deneyde, deney aparatlarından olan tabla üzerinde, tabla merkezinden 20 cm ve 50 cm çaplı iç içe iki daire çizilmiştir. Çökme hunisi içteki 20 cm çaplı daire üzerine konulmuştur. Taze beton mikserden alınarak, çökme hunisine sıkıştırma işlemi uygulanmadan doldurulmuş ve üzeri düzeltildikten sonra huni kaldırılarak taze betonun tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. Bu sırada taze betonun çökme hunisi kaldırıldıktan sonra 50 cm çapa yayılma süresi bir süreölçer ile ölçülerek not edilmiştir ( $T_{50}$ ). Yayılma tamamlandıktan sonra tabla üzerine yayılan betonun yayılma çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek ortalaması alınmış ve bu değer yayılma çapı olarak kaydedilmiştir.

KYB'de 50 cm'ye kadar yayılma çapı ve yayılma süresi çok önem arz etmektedir. Bu değer taze betonun akış hızını belirler ve plastik viskozite hakkında fikir verir. Daha yüksek yayılma çapı daha düşük eşik kayma gerilmesini gösterir. KYB'de 50 cm yayılma çapına ulaşıncaya kadar geçen süre  $T_{50}$  olarak adlandırılır (EFNARC 2005).

Çökme-yayılma deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları bölümünde verilmiştir.



**Şekil 3.12.** Çökme-yayılma deneyi

### 3.2.2.b. V-Hunisi deneyi

EFNARC (2005)'e uygun olarak yapılan deneyde, taze beton, V hunisi deney aparatına hiçbir sıkıştırma işlemi uygulanmadan doldurulmuş ve üzeri düzeltildikten sonra alt kapak açılıp üstten bakıldığında ışık görülene kadar geçen betonun akış süresi bir süreölçer yardımıyla ölçülmüş ve V-hunisi akış süresi olarak kaydedilmiştir.

Betonun, boşluklardan geçebilme yeteneğini ölçmek için yapılan kendiliğinden yerleşebilirlik deneyidir. Deney, KYB'nin viskozitesi ve akıcılığı hakkında fikir verir (EFNARC 2005).

V hunisi deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları bölümünde verilmiştir.



Şekil 3.13. V-hunisi deneyi

### 3.2.2.c. L-Kutusu deneyi

EFNARC (2005)'e uygun olarak yapılan deneyde, taze beton mikserden alınarak L kutusuna hiçbir sıkıştırma işlemi yapılmadan doldurulmuş ve üzeri düzeltildikten sonra kapak açılarak, betonun donatılar arasından geçerek akışını tamamlayıp durması beklenmiş, L kutusu ucundaki beton yüksekliği  $H_2$  ve kapağın hemen önündeki beton yüksekliği  $H_1$  ölçülerek L kutusu bloklanma oranı ( $H_2/H_1$ ) hesaplanarak kaydedilmiştir.

Bu oran, betonun KYB özelliği taşıyıp taşımadığının göstergesi olarak kabul edilmektedir. KYB'nin doldurma yeteneğinin, geçiş yeteneğinin ve ayrılmaya karşı direncin L şeklindeki bir kutu kullanılarak belirlendiği deneydir (EFNARC 2005).

L Kutusu deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları bölümünde verilmiştir.



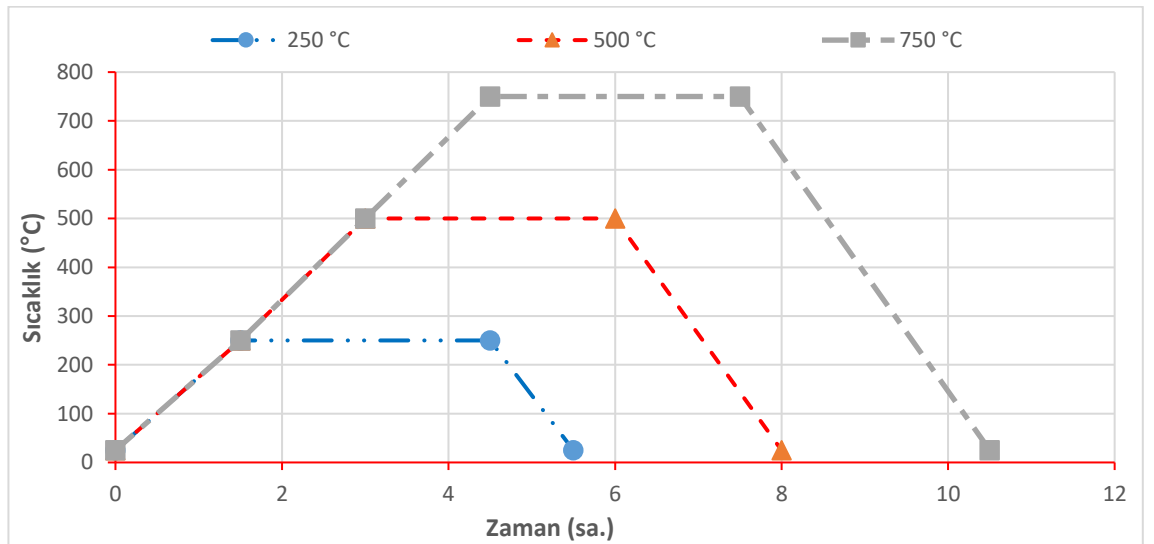
Şekil 3.14. L-kutusu deneyi

### 3.2.3. Numunelerin kürlenmesi

Üretilen toplam 120 adet numune kalıptan çıkarılmadan önce 1 gün laboratuvarında bekletilmiş, daha sonra kalıptan çıkarılan numunelere 27 gün boyunca standart su kürü uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda kirece doymun durumdaki suyu  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulabilen, çevrim pompalı tam dijital su kürü havuzu kullanılmıştır. Tüm numuneler 28 günün sonunda sudan çıkarılarak hava kurusu haline gelene kadar bekletilmiştir.

### 3.2.4. Yüksek sıcaklık uygulaması

Üretilen numuneler 28. gün sonunda yüksek sıcaklık fırınında  $250$ ,  $500$  ve  $750^{\circ}\text{C}$  derecelerde 3 saat yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakılmıştır. Kontrol numunesi olarak her gruptan 3 adet numune herhangi bir sıcaklığa maruz bırakılmamıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler üzerinde yapılan incelemelerde kılcal çatlaklar, küçük çaplı parçalanmalar ve renk değişimleri gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık fırınına ait ısıtma rejim grafiği Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15. Yüksek sıcaklık fırını ısıtma-soğutma rejim grafiği

### 3.2.5. Ultrases geçiş hızı ölçümleri

Numuneler 250, 500 ve 750°C’de 3 saat yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğuması beklenilmiş ardından TS EN 12504-4’uygun olarak ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı ile 15×15×15 cm ebatlarındaki küp numuneler üzerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir.





#### **4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA**

Bu bölümde uçucu kül ve farklı oranlarda polipropilen lif içeren KYB'lerin taze beton deney sonuçları ve yüksek sıcaklık fırınında farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler üzerinde yapılan sertleşmiş beton deney sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca tüm numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılarak sonuçlar basınç ve eğilme dayanımı değerleri ile ilişkilendirilmiştir.

Sonuçlar çizelge ve şekiller ile desteklenerek daha da anlaşılır hale getirilmiş ve teknik literatür bilgileri yardımıyla kontrol numuneleri ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Deneylerde ASTM ve TS standartları kullanılmıştır. Bazı deneylerde ise literatürde var olan, uygunluğu kabul görmüş yöntemler kullanılmıştır.

##### **4.1. Taze Beton Deneyleri**

Çalışmanın bu bölümünde uçucu kül, farklı oranlarda polipropilen lif, mineral ve kimyasal katkı içeren KYB grupları için, taze betonda çökme-yayılma, V hunisi ve L kutusu deneyleri yapılmış, KYB'lerin taze beton özellikleri belirlenerek sonuçlar çizelgeler halinde verilmiştir.

###### **4.1.1. Çökme yayılma deney sonuçları**

EFNARC (2005)'te değişik yapı elemanlarında farklı özelliklere sahip KYB'ler kullanılabileceği belirtilerek yayılma çapı için 3 farklı,  $T_{50}$  süresi için ise 2 farklı sınıflandırma yöntemine gidilmiştir. KYB deneylerinin sonuçları Kaynak Özetleri bölümünde Çizelge 2.1'de sunulan EFNARC (2005)'te tavsiye edilen sınır değerlere göre kontrol edilerek sınıflandırılmıştır.

EFNARC (2005)'e uygun olarak tüm seriler için yapılan çökme-yayılma deneyinden elde edilen yayılma çapı ve 50 cm'ye yayılma süresi ( $T_{50}$ ) değerleri tüm gruplar için Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Çökme-yayılma deney sonuçları

Karışım	Yayılma miktarı (cm)	EFNARC'a göre yayılma çapı sınıfı	$T_{50}$ süresi (sn)	EFNARC'a göre viskozite sınıfı
Kontrol	70	SF2	2,02	VS2
PPL 0,25	68	SF2	2,07	VS2
PPL 0,50	67	SF2	2,45	VS2
PPL 0,75	65	SF1	2,65	VS2
PPL 1,00	60	SF1	3,04	VS2

Laboratuvar ortamında hazırlanan tüm gruplardan elde edilen sonuçlar EFNARC (2005)'te belirtilen sınır değerler arasında kalmıştır. En düşük yayılma çapı 60 cm ile PPL 1,00 grubunda gerçekleşirken, en yüksek yayılma çapı 70 cm ile kontrol grubunda ulaşılmıştır. Yayılma çapları dikkate alındığında kontrol, PPL 0,25 ve PPL 0,50 grup numuneleri SF2, diğer grup numuneleri ise SF1 sınıfındadır. Viskozite için belirlenen  $T_{50}$  süresine göre ise; tüm gruplar VS2 viskozite sınıfı içerisinde kalmaktadır.

Çizelge 4.1 incelendiğinde polipropilen lif oranı arttıkça KYLB'nin yayılma çapının azaldığı,  $T_{50}$  süresinin ise arttığı görülmüştür. Polipropilen lif karışımında çok az miktarda kullanılmasına rağmen çökme-yayılma değerinde önemli oranda azalmaya yol açtığı görülmüştür. Benzer şekilde, Mazheripour *et al.* (2011), çalışmasında %0,3 oranında PP lif kullanımıyla betonun yayılma çapında %40'a varan azalma olduğunu ifade etmiştir.

#### 4.1.2. V-Hunisi deney sonuçları

EFNARC (2005)'te değişik yapı elemanlarında farklı özelliklere sahip KYB'ler kullanılabileceği belirtilmiştir. KYB deneylerinin sonuçları Çizelge 2.1'de sunulan

EFNARC (2005)'te tavsiye edilen sınır değerlere göre kontrol edilerek betonlar sınıflandırılmıştır.

EFNARC (2005) standardına uyumlu 10 litre kapasiteli V şekilli huni kullanılarak tüm seriler için yapılan deneyde V-hunisi akış süresi tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** V-hunisi deney sonuçları

Karışım	t (sn)	EFNARC'a göre viskozite sınıfı
Kontrol	5,85	VF1
PPL 0,25	5,88	VF1
PPL 0,50	8,19	VF1
PPL 0,75	9,10	VF2
PPL 1,00	11,05	VF2

Çizelge 4.2 incelendiğinde en düşük akış süresi 5,85 sn ile kontrol grubunda gerçekleşirken, PPL 1,00 grubu 11,05 sn akış süresiyle en yüksek değere ulaşmıştır. Deney sonuçlarına göre, hazırlanan tüm karışımlarda bloklanma riski olmadığı söylenebilir. EFNARC (2005)'e göre akış süreleri dikkate alındığında kontrol, PPL 0,25 ve PPL 0,50 grup numuneleri VF1, diğer grup numuneleri ise VF2 viskozite sınıfındadır.

Çizelge 4.2 incelendiğinde polipropilen lif oranı arttıkça KYLB'nin V-hunisi deney aletinden akış süresinin arttığı görülmüştür. Benzer olarak Mazeheripour *et al.* (2011) PP lif kullanımının V-hunisi akış süresini artırdığını belirtmiştir.

#### 4.1.3. L-Kutusu deney sonuçları

EFNARC (2005)'te değişik yapı elemanlarında farklı özelliklere sahip KYB'ler kullanılabilmesi belirtilerek geçiş yeteneği için L kutusunda bulunan donatı sayısına bağlı olarak 2 farklı (PA1, PA2) beton sınıfı tanımlanmıştır. KYB deneylerinin sonuçları Çizelge 2.1'de sunulan EFNARC (2005)'te tavsiye edilen sınır değerlere göre kontrol edilerek betonlar sınıflandırılmıştır.

EFNARC (2005) standardına uygun olarak yapılan bu deneyde, betonun donatılar arasından geçerek L kutusu ucundaki beton yüksekliği ( $H_2$ ) ile kapağın hemen önündeki beton yüksekliği ( $H_1$ ) belirlenmiş, L kutusu bloklanma oranı ( $H_2/H_1$ ) hesaplanarak, elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** L-kutusu deney sonuçları

Karışım	$H_2/H_1$	EFNARC'a göre geçme yeteneği sınıfı
Kontrol	0,89	PA2
PPL 0,25	0,85	PA2
PPL 0,50	0,82	PA2
PPL 0,75	0,79	PA2
PPL 1,00	0,72	PA2

Hazırlanan gruplardan kontrol, PPL 0,25 ve PPL 0,50  $H_2/H_1$  oranı, EFNARC (2005)'te belirtilen 0,8-1 sınır değerleri arasında kalmış, PPL 0,75 grubu ise çok yakın değer vermiştir. En düşük  $H_2/H_1$  oranı 0,72 değeri ile PPL 1,00 grubunda gerçekleşmiştir. Çalışmada 3 donatı engelli deney aleti kullanıldığı için üretilen tüm beton grupları EFNARC (2005)'e göre PA2 sınıfındadır.

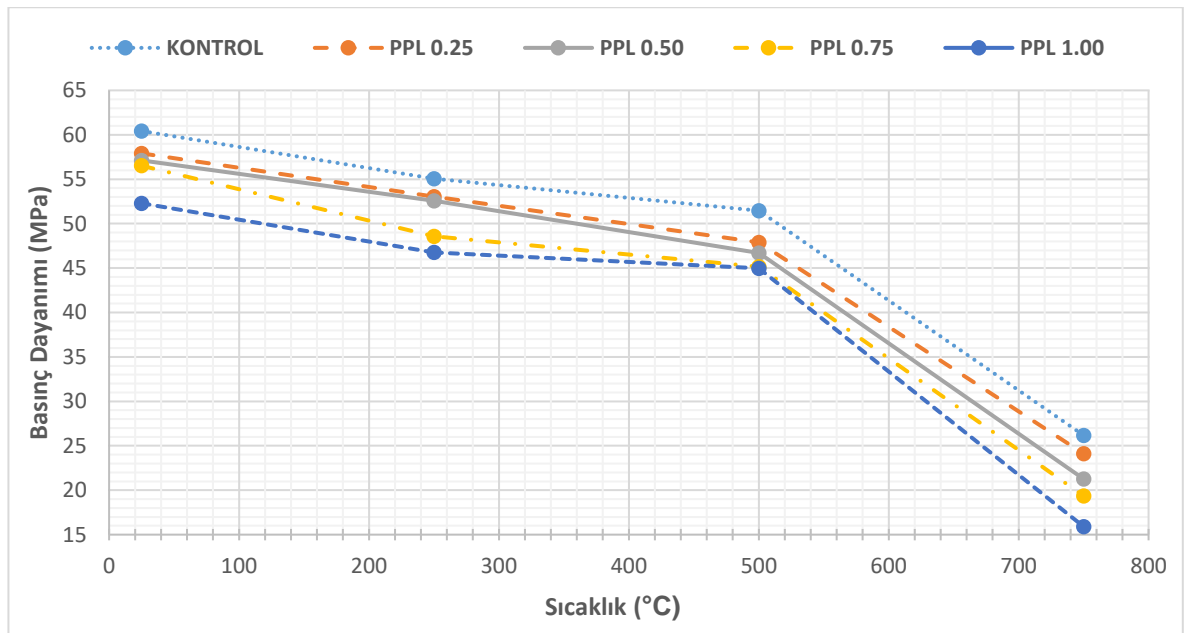
Çizelge 4.3 incelendiğinde polipropilen lif oranı arttıkça KYLB'nin L-kutusu deney kabındaki bloklanma oranının ( $H_2/H_1$ ) arttığı görülmüştür. Daha önceki çalışmalarda da benzer sonuçlara ulaşıldığı belirtilmiştir (Mazeheripour *et al.* 2011).

## 4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuş küp ve prizma numuneler üzerinde, ultrases geçiş hızı ölçümü, basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmış, KYLB'lerin sertleşmiş beton özellikleri belirlenerek sonuçlar çizelgeler halinde sunulmuştur.

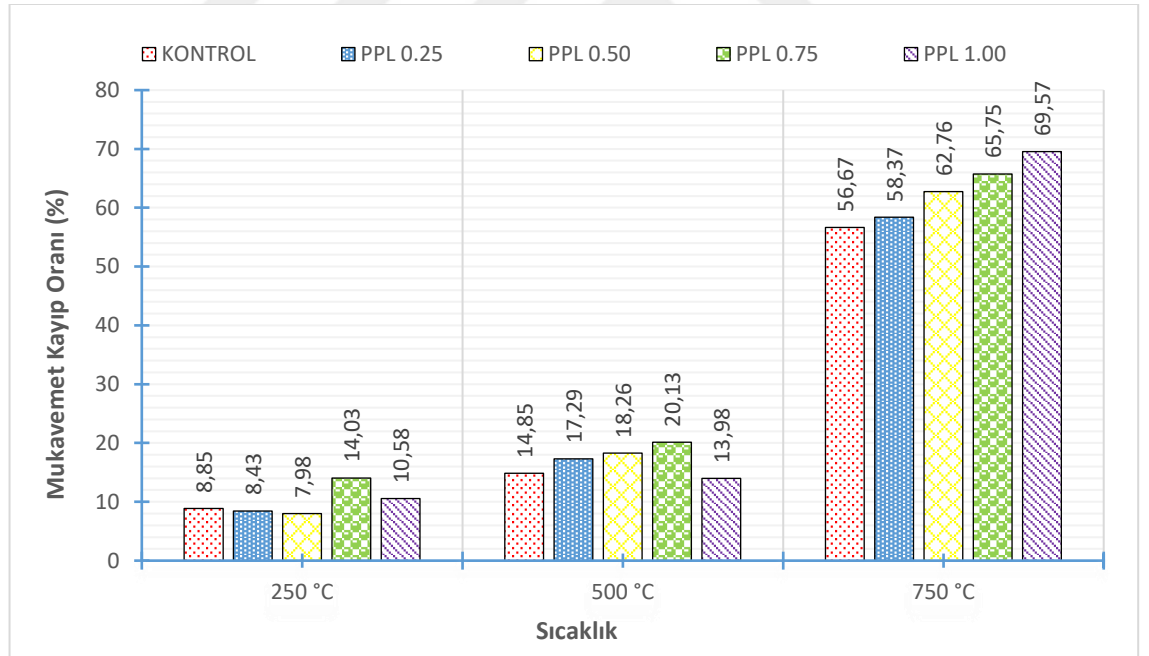
### 4.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçları

15×15×15 cm boyutlarına sahip küp numuneler kürden çıkarıldıktan sonra kurumaya bırakılmıştır. Hava kuru numuneler 250, 500 ve 750°C'de 3 saat süreyle yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına ulaşan küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yer alan ve polipropilen liflerle güçlendirilmiş KYB'lere ait yüksek sıcaklık fırınındaki 3 saatlik maruz bırakılma derecelerine bağlı basınç dayanımları Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları

Normal betonda 90°C ye kadar basınç dayanımında düşme, 90-200°C arasında basınç dayanımında artma, 200°C ve üzerindeki sıcaklıklara tabi tutulan betonlarda ise önemli derecede basınç dayanım kaybı olacağı literatür taramalarından bilinmektedir. Şekil 4.1 incelendiğinde sıcaklık arttıkça polipropilen lif ile güçlendirilmiş KYB'lerde dayanım kaybı artmaktadır. Özellikle 500-750°C arasında yaklaşık %49-65 oranında dayanım kaybı olduğu gözlenmiştir. Lif oranının artmasının ise KYB'de basınç dayanımını belirgin oranda etkilemediği bununla birlikte az da olsa dayanım kaybına neden olduğu görülmektedir. Uysal (2012), çalışmasında KYB'lerin 400°C üzerinde basınç dayanımlarını önemli ölçüde kayb ettiklerini ve PP lif katılmasının KYB'lerin basınç dayanımına negatif etki ettiğini belirtmiştir. Bunun nedeni olarak da PP lif ilavesinin beton içerisinde kapiler gözenek yapısı oluşturduğu ve KYB'nin basınç dayanımını azalttığı ifade edilmiştir.



**Şekil 4.2.** Kontrol grubuna göre sıcaklık değişimine ve lif oranına bağlı olarak basınç dayanımlarındaki kayıp oranları (%)

Şekil 4.2 incelendiğinde 250°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde basınç dayanımında yaklaşık %8-14 arasında bir kayıp olduğu görülmektedir. En yüksek kayıp oranı %14,03 ile PPL 0,75 grubunda en düşük kayıp ise %7,98 ile PPL 0,50 grubunda

görülmüştür. 500°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde ise basınç dayanımında yaklaşık %14-20 arasında bir mukavemet kaybı olduğu, en yüksek kayıp oranının %20,13 değeri ile PPL 0,75 grubunda en düşük kayıp oranının ise %13,98 ile PPL 1,00 grubunda olduğu tespit edilmiştir. 750°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde basınç dayanımında yaklaşık %60-70 arasında kayıp gerçekleştiği, en yüksek kayıp oranının %69,57 ile PPL 1,00 grubunda en düşük kayıp oranının ise %58,37 değeri ile PPL 0,25 grubunda gerçekleştiği belirlenmiştir.

Basınç mukavemet kayıp oranının 250 ve 500°C'ye maruz bırakılan gruplarda dalgalanma göstermesinin nedeni lifin beton içerisindeki homojen dağılımından, sıcaklık fırınındaki numunelerin dizilimine kadar küçük çaplı birçok parametreden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 4.2 incelendiğinde sıcaklık arttıkça mukavemet kayıp oranının arttığı ve 750°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde bu değer en yüksek olduğu görülmüştür.

Numuneler kendi içerisinde incelendiğinde polipropilen lif oranının artmasının mukavemet kaybına çok fazla etki etmediği, mukavemet kaybındaki en büyük payın artan sıcaklık değeri olduğu tespit edilmiştir.

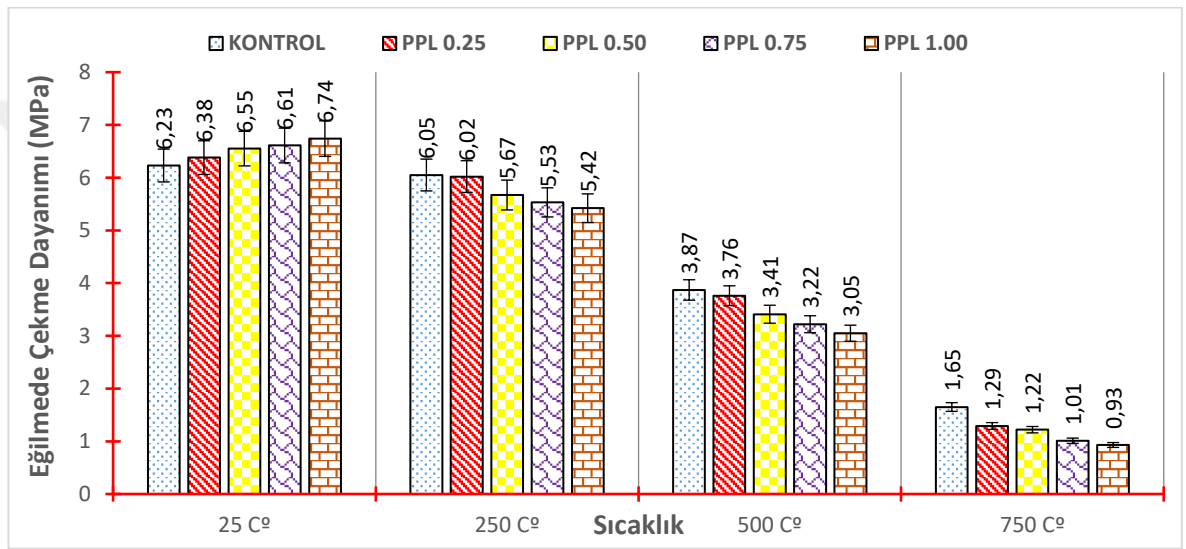
Şekil 4.1-4.2'den elde edilen sonuçlar ışığında, 500°C'ye kadar mukavemet kaybının az olduğu, 500°C'den sonraki sıcaklıklarda ise mukavemet kaybının belirgin şekilde arttığı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca lif oranı arttıkça da yüksek sıcaklıklarda mukavemet kaybının arttığı, düşük sıcaklıklarda ise lif oranının basınç değişimine fazla etki etmediği görülmektedir. Fares *et al.* (2009), tarafından yapılan çalışmada yüksek sıcaklığın KYB'nin performansı üzerinde etkisi numuneler farklı yüksek sıcaklıklara (150, 300, 450 ve 600°C) maruz bırakıldıktan sonra incelenmiştir. Numunelerin 20 ile 150°C arasında mukavemet kayıplarının başladığı, 150-300°C arasında küçük çaplı bir mukavemet artışının olduğu, 300-600°C arasında mukavemet kayıplarının hız kazandığı ve 600°C üzerinde ani mukavemet kayıplarının olduğu gözlemlenmiştir. Atashafrazeh (2013), yaptığı çalışmada betonun yüksek sıcaklık altında zarar görebileceğini, bu

durumun istenmeyen bir yapısal kusura neden olabileceğini, polipropilen liflerin betona takviyesi ile bu kusurun azaltılabileceğinden bahsetmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bıraktığı numunelerden elde ettiği deneysel sonuca göre çubuk polipropilen liflerin, yünsü polipropilen liflere göre daha iyi sonuçlar gösterdiği, lifsiz numunelerin 600°C'den sonra her iki lif grubuna sahip numunelere göre daha yüksek mukavemete sahip olduğu sonucuna varmıştır. Bunun nedenini ise 500°C'den yüksek sıcaklıklarda polipropilen liflerin erimesiyle boşluklu bir ortam oluşumunun sebep olduğunu ifade etmiştir. Khatip (2008), KYB olarak tasarlanan tüm karışımların özellikle 600°C'deki sıcaklıklara maruz kaldıklarında dayanımlarını önemli ölçüde kaybettiğini belirtmiştir. Aynı s/ç oranı ve dayanım sınıfındaki geleneksel betonlarla kıyaslandığında, KYB'lerde yüksek sıcaklık etkisinde oluşan tahribatın daha yüksek olduğunu vurgulamıştır. Bu durumu, KYB'lerin daha sıkı mikro yapıya sahip olmalarının sonucu olarak yüksek sıcaklığın etkisinde iç basınçlarının yüksek olması nedeniyle artan buhar basıncının meydana getirdiği tahribat ile açıklamıştır. 200°C'yi aşan sıcaklıklarda meydana gelen bağıl basınç dayanımındaki azalma, çimentonun bünyesindeki alüminli ve demir oksitli bileşenlerdeki bünye suyu kaybının, basınç dayanımında düşüş meydana getirmesine bağlanabilir. Ayrıca, 300°C'yi aşan sıcaklıklarda normal şartlarda buharlaşmayan bağlı suların da uçması hasarın mertebesini artırmaktadır. Böylece, beton basınç dayanımında düşüşler meydana gelmektedir. Bilindiği üzere, betonun bünyesindeki çimento hamurunda bulunan bileşenlerden birisi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'dir.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in sönmemiş kirece ( $\text{CaO}$ ) dönüşmesi 400°C civarında olmaktadır. Beton içindeki kirecin, sönmemiş kirece dönüşmesi yaklaşık %33 civarında bir büzülme oluşması anlamına gelmektedir. Kısa sürede büzülen ve genişleyen beton içinde oluşan parazit gerilmeler hasarın büyümesine neden olmaktadır. 400°C'yi aşan sıcaklıklarda ise C-S-H'lerin tahrip olmaya başladığı, beton dayanımının hızla azaldığı, 900°C civarında ise C-S-H yapısının tamamen dağıldığı görülmektedir. KYB üretiminde çimento ile ikameli olarak kullanılan uçucu külün diğer mineral katkılara göre yüksek sıcaklık etkisinde daha iyi performans göstermesi, yüksek sıcaklık ve basıncın etkisinde uçucu kül ve kirecin bir ürünü olarak meydana gelen tobermolit jel formasyonunun C-S-H jeline göre iki ya da üç kat daha güçlü ve dayanıklı olmasına bağlanabilir.



#### 4.2.2. Eğilme dayanımı deney sonuçları

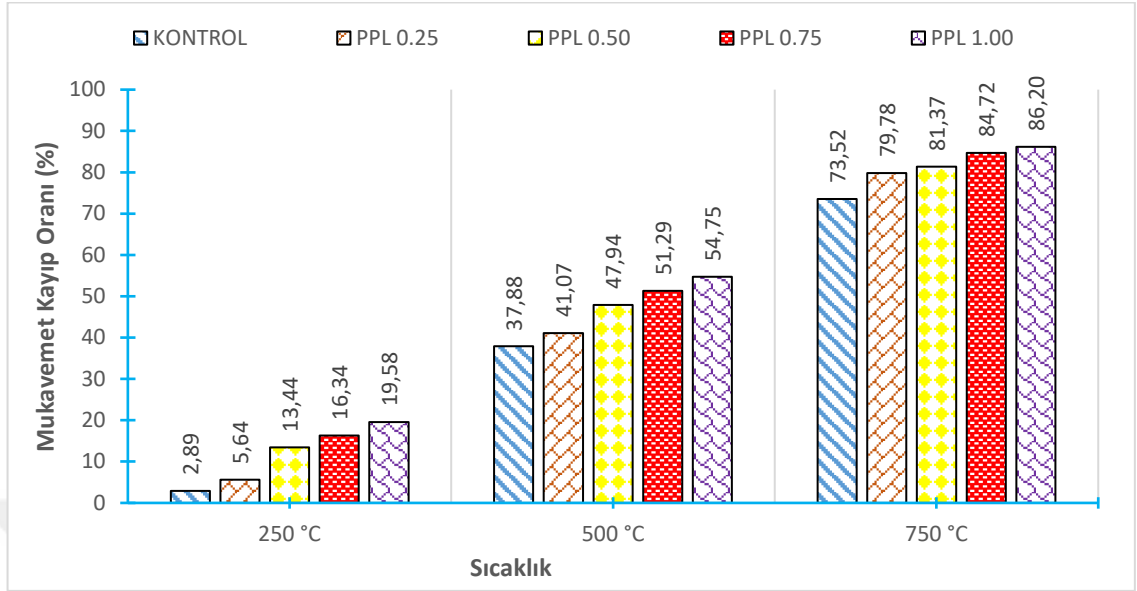
Polipropilen lif ile güçlendirilmiş KYB'ler eğilme dayanımı deneyi aşamasında 7×7×28 cm'lik kiriş numuneler üzerinde üçte bir noktalarından yüklenecek basit kiriş metodu ile yapılmıştır. Prizma numunelere ait 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.3. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımları

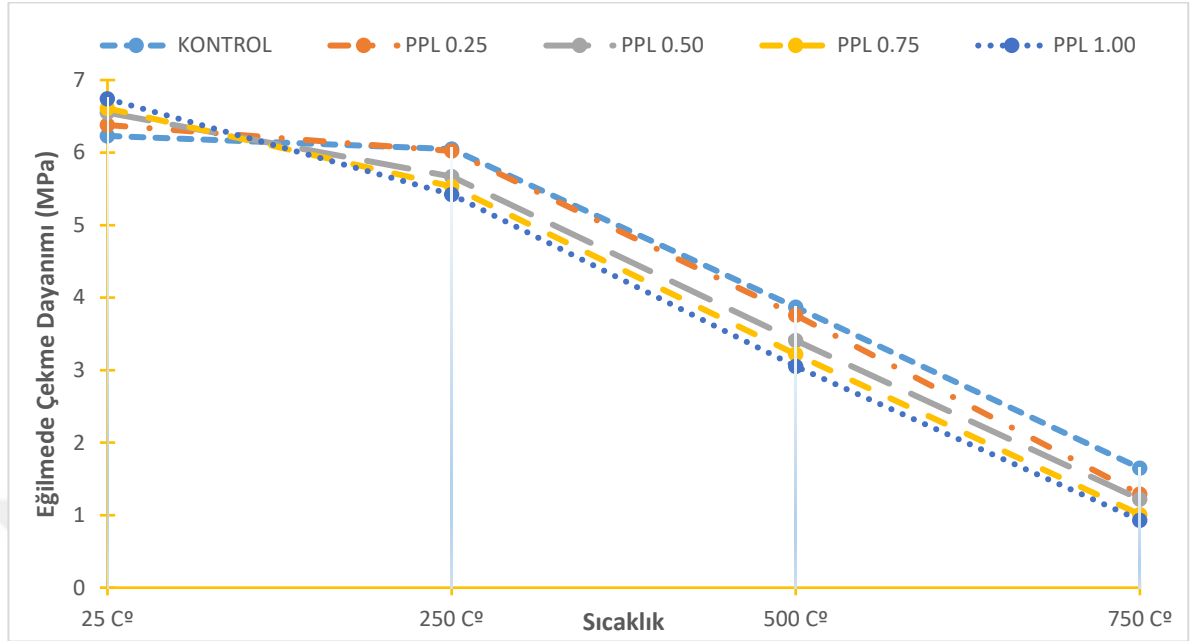
Şekil 4.3 incelendiğinde yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan farklı oranlarda polipropilen lif içeren numunelerin eğilme dayanımlarına bakıldığında lif miktarının eğilme dayanımına katkıda bulunduğu, lifli numunelerin daha sünek kırıldığı yapılan çalışma esnasında gözlemlenmiştir.

Prizma numunelere ait, kontrol grubuna göre sıcaklık değişimi ve lif oranına bağlı olarak 28 günlük eğilme dayanımlarındaki kayıp oranları %olarak Şekil 4.4'te sunulmuştur.



**Şekil 4.4.** Kontrol grubuna göre sıcaklık değişimi ve lif oranına bağlı olarak numunelerin eğilme dayanımlarındaki kayıp oranları (%)

Şekil 4.4 incelendiğinde eğilme dayanımındaki kayıp oranı, sıcaklık ve lif miktarı arttıkça artmıştır. 250°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde kayıp oranının yaklaşık %3-20 arasında değiştiği, en büyük dayanım kaybının PPL 1,00 grubunda gerçekleştiği görülmüştür. Sıcaklık 500°C'ye vardığında kayıp oranlarının yaklaşık %38-55 arasında olduğu, en büyük dayanım kaybının yine PPL 1,00 grubunda gerçekleştiği, lif miktarı arttıkça değişimin de arttığı tespit edilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük değişim oranının yaklaşık %73-86 değerleri ile 750°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde gerçekleştiği ve lif oranı arttıkça bu değişimin de arttığı fakat en önemli parametrenin lif miktarından öte sıcaklık olduğu çalışma neticesinde tespit edilmiştir. Benzer olarak literatürdeki çalışmalarda da lif miktarından çok ulaşılan sıcaklık değerlerinin dayanım kayıplarında daha belirgin bir etkisi olduğu vurgulanmıştır. Öz (2010), yüksek sıcaklığa maruz bıraktığı lifli betonlarda, PP lif miktarı arttıkça dayanım kaybı değerlerinde artışlar meydana geldiğini ve tüm karışımlarda özellikle 600°C'de dayanımlarının önemli kısmını kaybettiklerini ifade etmiştir.



**Şekil 4.5.** Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımları

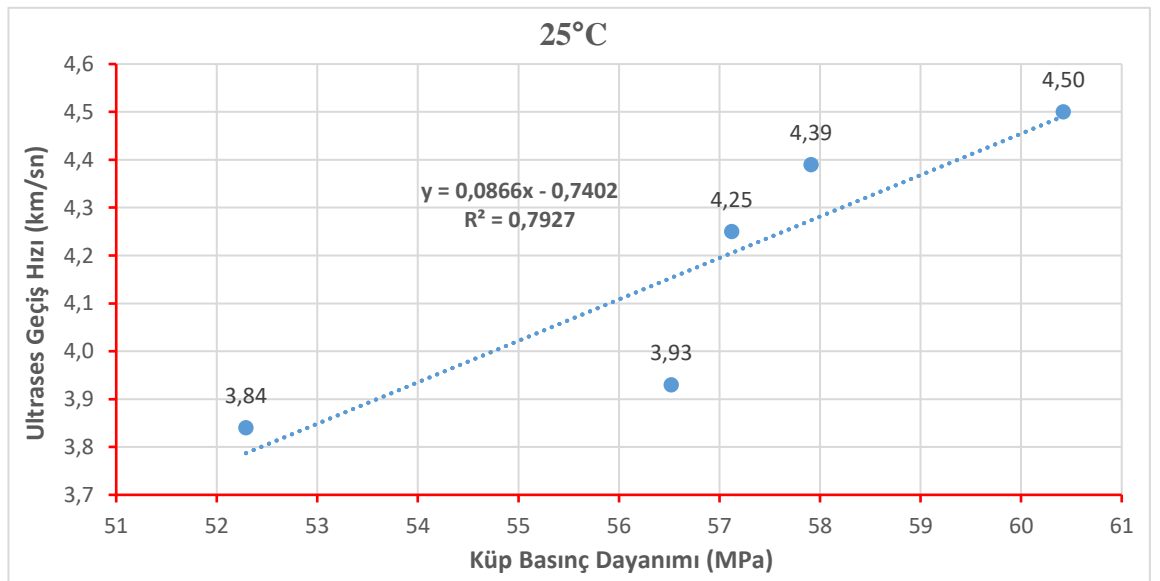
Şekil 4.3-4.5 incelendiğinde sıcaklık arttıkça eğilmede çekme dayanım değerinin sürekli azaldığı görülmektedir. Polipropilen lifin erime sıcaklığı yaklaşık 170°C olduğu düşünülürse 250, 500 ve 750°C sıcaklığa tabi tutulan tüm numunelerdeki liflerin eridiği beton içerisinde kılcal boşluklar oluştuğu düşünülmektedir. Bu boşlukların ise artan sıcaklığa bağlı olarak eğilme dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Yapılan çalışmalar neticesinde yangına maruz kalma ihtimali yüksek olan beton-betonarme yapılarda polipropilen lif kullanılmasının uygun olacağı ve betonun boşluk yapısını artırarak özellikle boşluksuz ve yüksek dayanım sınıfındaki betonlarda buhar basıncı sonucu ortaya çıkan patlayarak parçalanma riskini azaltacağı düşünülmektedir. Huang (2001), çalışmasında polipropilen lif içeren numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarında çok az bir azalma olduğunu belirtmekte ve bu durumun polipropilen liflerin oluşturduğu boşluklara bağlamaktadır. Cai *et al.* (2010) lif miktarının, lifli KYB'ler üzerinde eğilme dayanımı ve süneklik gibi özellikleri geliştirdiği sonucuna varmışlardır.

### 4.2.3. Ultrases geçiş hızı ölçüm sonuçları

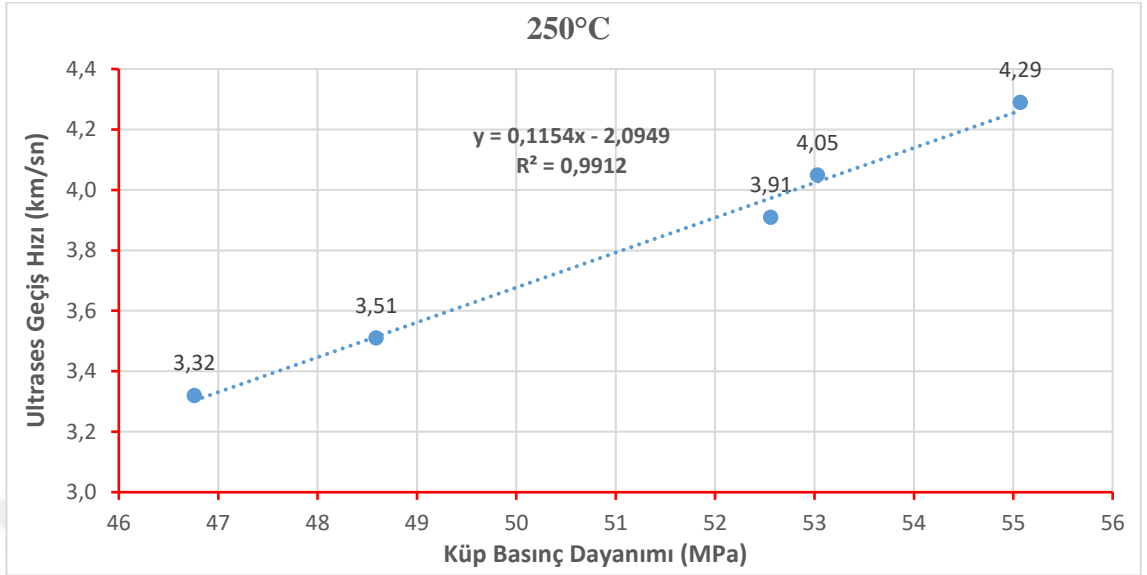
Ultrases geçiş hızı (UPV) ölçümleri 28 günlük 15×15×15 cm’lik küp numuneler üzerinde yapılmış ve ölçülen ultrases geçiş hızları basınç dayanımlarıyla birlikte Çizelge 4.4’te verilmiş, ayrıca her bir sıcaklık değeri için UPV-Basınç dayanımı ilişkisi kurularak grafik halinde Şekil 4.6-4.9’da sunulmuştur.

**Çizelge 4.4.** Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı

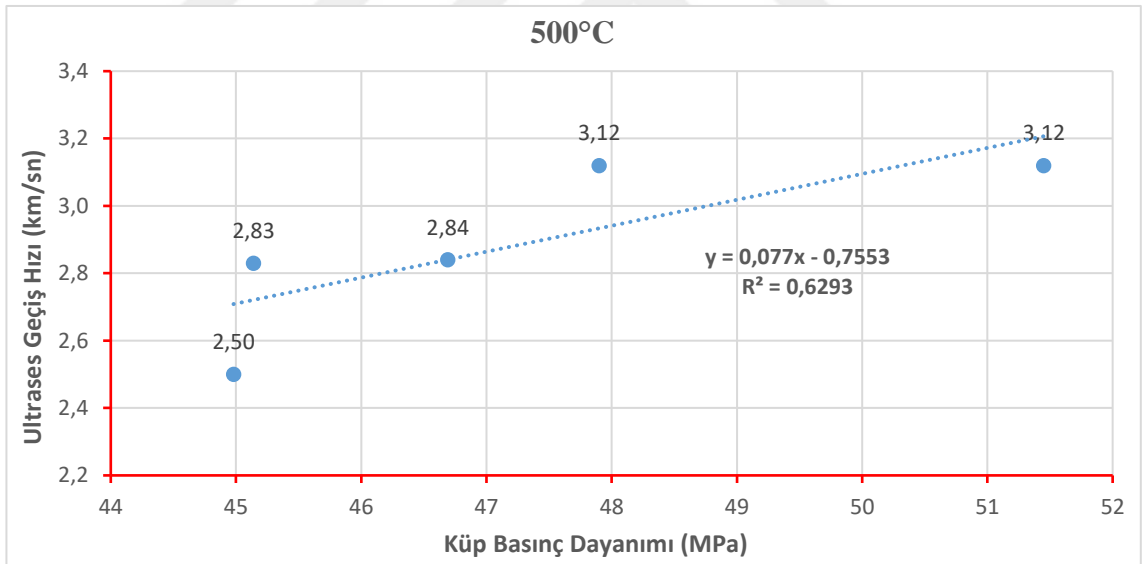
Karışım	25°C		250°C		500°C		750°C	
	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)
<b>Kontrol</b>	60,42	4,50	55,07	4,29	51,45	3,12	26,18	1,88
<b>PPL 0,25</b>	57,91	4,39	53,03	4,05	47,90	3,12	24,11	1,54
<b>PPL 0,50</b>	57,12	4,25	52,56	3,91	46,69	2,84	21,27	1,42
<b>PPL 0,75</b>	56,52	3,93	48,59	3,51	45,14	2,83	19,36	1,32
<b>PPL 0,10</b>	52,29	3,84	46,76	3,32	44,98	2,50	15,91	1,29



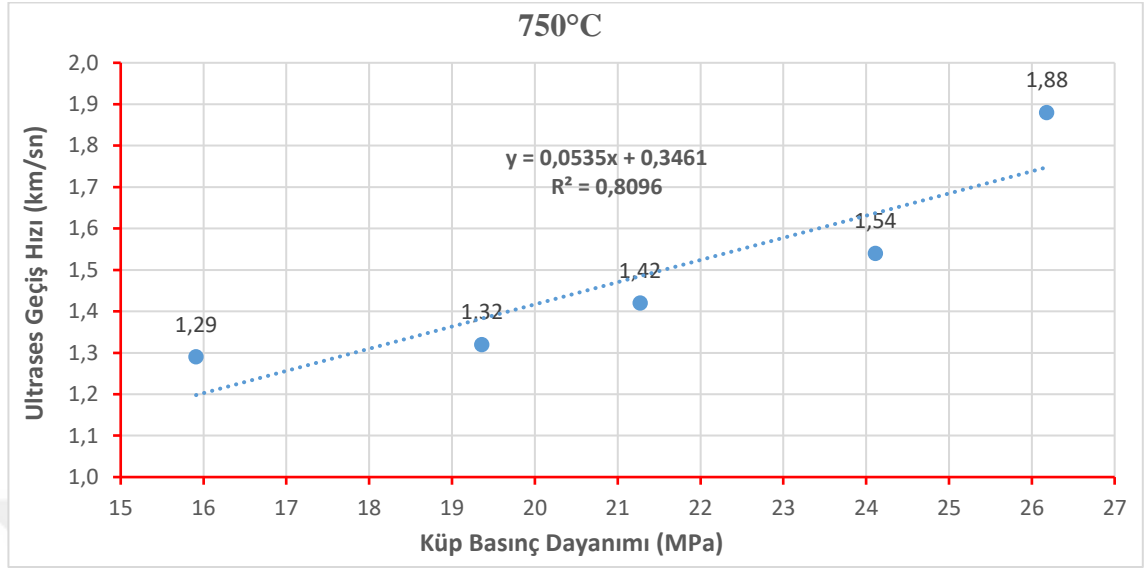
**Şekil 4.6.** 25 °C’de numunelerin UPV – basınç dayanımı ilişkisi



**Şekil 4.7.** 250°C’de numunelerin UPV – basınç dayanımı ilişkisi



**Şekil 4.8.** 500°C’de numunelerin UPV – basınç dayanımı ilişkisi



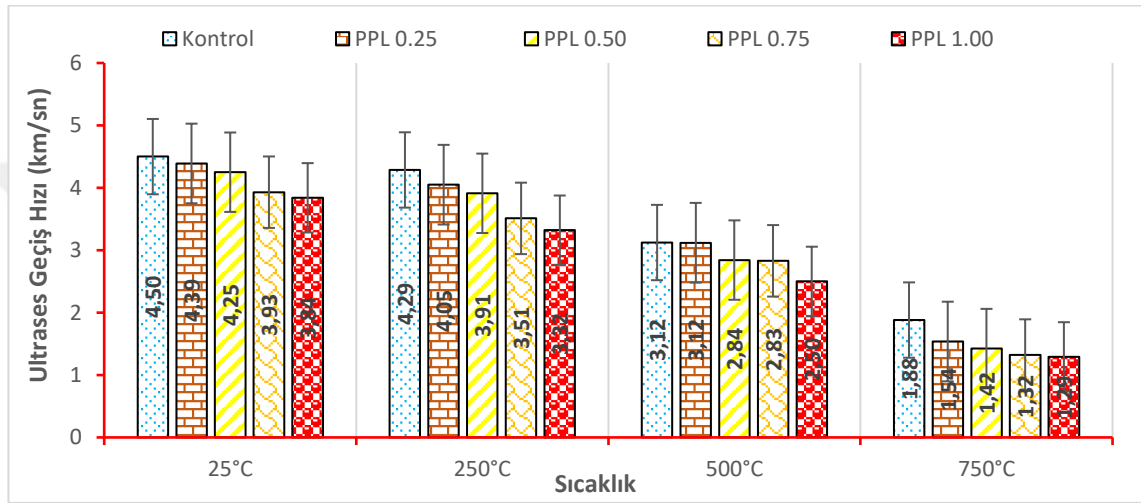
**Şekil 4.9.** 750°C’de numunelerin UPV – basınç dayanımı ilişkisi

İki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin varlığı, bu ilişkinin yönü ve şiddeti regresyon analizinin konusunu oluşturur. İki değişken arasındaki ilişkinin yönü ve derecesi korelasyon katsayısı ile ifade edilir. Korelasyon katsayısı ( $r$ )  $-1 \leq r \leq 1$  aralığında değer alır. Hesaplanan katsayının aldığı değere bağlı olarak, değişkenler arasında;

- $r = -1$  ise ters yönlü mükemmel bir ilişki,
- $r = 0$  ise ilişki yok,
- $r = 1$  ise aynı yönlü mükemmel bir ilişki,
- $r = 0,80$  aynı yönlü oldukça iyi bir ilişki,
- $r = -0,60$  ters (zıt) yönlü orta derece bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir.

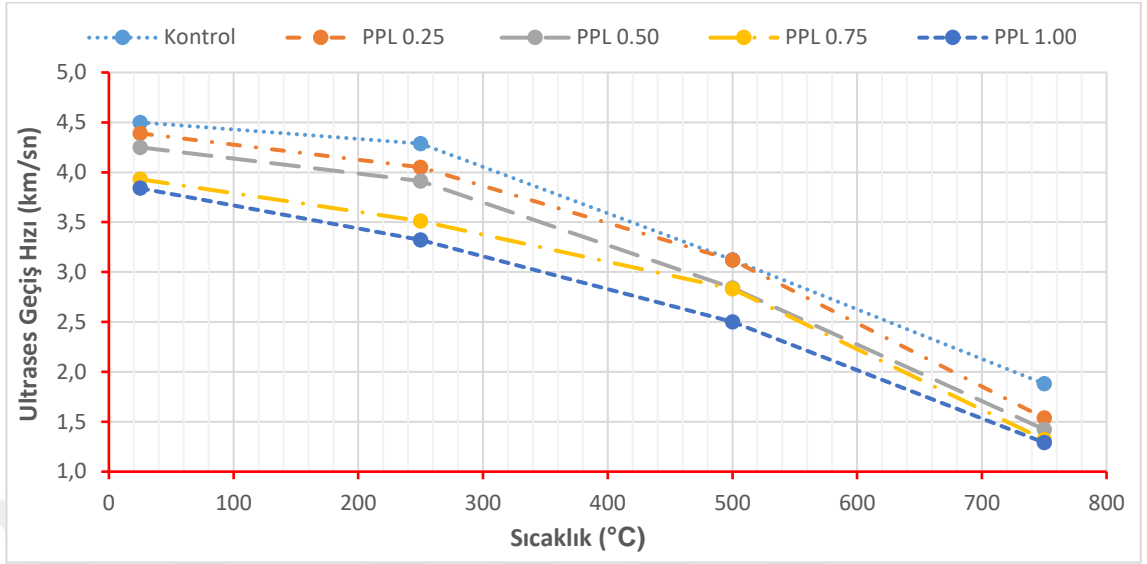
Öte yandan, tek değişkenli regresyon denklemi için hesaplanan belirlilik katsayısı ile korelasyon katsayısı arasında  $r = \sqrt{R^2}$  ilişkisi vardır. Belirlilik katsayısı  $0 \leq R^2 \leq 1$  aralığında değer alabilir. Oluşturulan regresyon denkleminin  $R^2$  değeri 1’e ne derece yakın ise denklem o derece iyi, sıfıra ne derece yakınsa denklem o derece kötü bir tahminleyici olarak kabul edilir (Çelik 2000).

Şekil 4.6-4.9 incelendiğinde  $R^2$  değerlerinin 1'e çok yakın olduğu, elde edilen denklemlerin iyi bir tahminleyici olduğu görülmektedir. Ayrıca basınç dayanımı ile ultrases geçiş hız ölçümleri arasında doğru orantılı bir ilişkinin olduğu anlaşılmaktadır. Sıcaklık değeri arttıkça basınç dayanımındaki düşüşe paralel olarak ultrases geçiş hız değerlerinin de azaldığı grafiklerden görülmektedir.



Şekil 4.10. Sıcaklık – Ultrases geçiş hızı ilişkisi

Şekil 4.10 incelendiğinde polipropilen lif içeren KYB'de lif oranı ve numunelerin maruz kaldığı sıcaklık derecesi arttıkça ultrases geçiş hızındaki azalma açık bir şekilde görülmektedir. Sıcaklığın etkisiyle liflerin erimesi sonucu beton numuneler içerisindeki boşluklu yapının artmasıyla basınç dayanımlarının da azaldığı gözlemlenmiştir. Celep (2010) yaptığı çalışmada sıcaklığın artmasıyla lifli betonların ultrases geçiş hızlarında lifsiz betona oranla daha fazla düşüş olduğunu, bunun lif miktarıyla da doğru orantılı olduğunu dile getirmiştir. Sıcaklık etkisinin artmasıyla lifli betonlardaki boşluk oranının lifsiz betonlara kıyasla daha fazla olacağı, eriyen polipropilen liflerin buharlaşarak arkalarında bıraktıkları kanalcıklarla betonun daha boşluklu yapıya sahip olmasına neden olduğunu aktarmıştır.



**Şekil 4.11.** Ultras ses geçiş hızının sıcaklığa göre değişimini

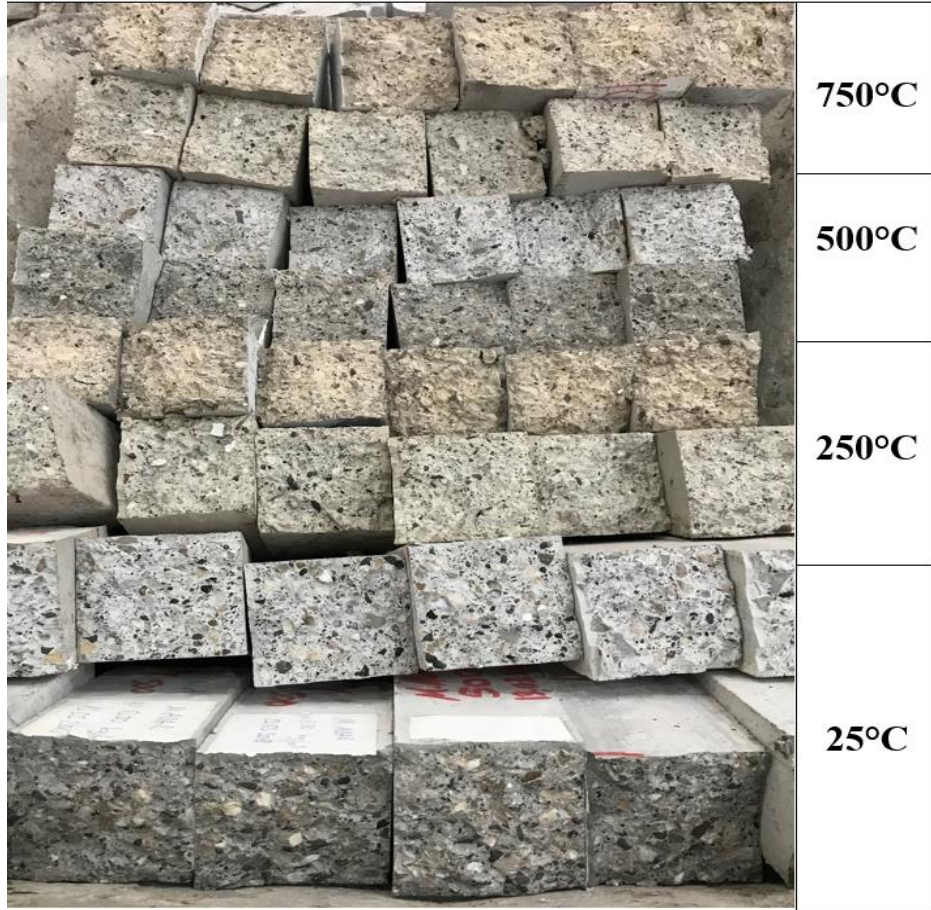
Şekil 4.11 incelendiğinde maruz kalan sıcaklık derecesi arttıkça lif oranındaki artışa da bağlı olarak ultras ses dalgalarının geçiş hızında azalma olduğu bu azalmanın özellikle 250°C'den sonra hız kazandığı görölmektedir. Ultras ses geçiş hızında maksimum azalmanın 500-750°C aralığında olduğu görölmektedir. Ultras ses geçiş hızındaki düşme, lif oranına ve sıcaklığa bağlı olarak doğru orantılı olarak artmıştır. Alonso *et al.* (2003) tarafından ultras ses ölçüm cihazında ölçölen ultras ses geçiş hızlarında görölen azalmanın nedeninin, beton bünyesindeki boşluk çapı ve miktarının sıcaklık etkisi altında değişimine bağlı olabileceğini ifade etmiştir. Uysal (2012) yaptığı çalışmasında yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin ultras ses geçiş hız değerlerinde azalma olduğunu ve özellikle 400°C üzerindeki sıcaklıklarda bu azalmanın belirginleştiğini aktarmıştır. Ultras ses geçiş hızı betonların içerisinde yüksek sıcaklıkta oluşan çatlaklardan, boşluklardan etkilenir. Sıcaklığın artmasıyla ultras ses geçiş hızındaki azalmanın bir diğer nedeni ise malzemedeki çatlakların ilerleyişinin bir ölçüsüdür. Yang *et al.* (2009) yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklık sonucunda betonda meydana gelen çatlakların, oluşan boşlukların ultras ses geçiş hızı değerini azalttığını tespit etmişlerdir. PP lif katkılı KYB'lerin ultras ses geçiş hız değerlerinin lifsiz betonlardan daha düşük değerler verdiği gözlemlenmiştir. Bu durumda karışımlara PP lif ilave edilmesinin ultras ses geçiş hızı değerleri üzerinde olumsuz etki oluşturduğu ifade edilmiştir. Betondaki mikro çatlaklar ses dalgalarının geçiş hızını azalttığı için ultras ses geçiş hızı değerleri de azalmaktadır.



Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan sadece lif oranları farklı olan beton numunelerdeki ses geçiş hızında da, lif oranı arttıkça azalma görülmektedir. Bunun sebebinin ise lifin özgül ağırlığının KYB'li beton özgül ağırlığından daha düşük olması ve lif içeriğine bağlı olarak numuneler içerisinde boşluk oluşumuna sebebiyet vermesi olduğu düşünülmektedir.

#### 4.2.4. Çalışma kapsamında yapılan gözlemsel incelemeler

Yapılan tez çalışması kapsamında, laboratuvar ortamında tüm numuneler üzerindeki değişimler fotoğraflandırılmış, kırılma şekilleri, segragasyon olup olmadığı, yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan kılcal çatlaklar ve boyutları, yüksek sıcaklık etkisiyle numunelerdeki parça atmalar gibi fiziksel değişimler gözlemsel olarak incelenmiştir.



**Şekil 4.12.** Numuneler üzerinde gözlemlenen renk değişimi

Numuneler üzerinde renk değişim analizi yapılmamakla beraber sıcaklık etkilerinden sonraki renk değişimleri gözlemsel olarak incelenmiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin başlangıç renginin farklı olduğu, sıcaklığa maruz kalma derecesi arttıkça beton numunelerin renginin değiştii ve ton farklılıklarının ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Li *et al.* (2004) tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı betonlar üzerinde 200°C’de renkte bir değişim olmazken, 400, 800 ve 1000°C’de sırasıyla açık sarı, kirli beyaz ve kırmızı renkler gözlemlenmiştir. Sağsöz (2013) ise çalışmasında, KYB’lerin yüksek sıcaklık etkisinde renk değişimini incelemiştir. Renk değişimindeki artışın 400°C’de belirginleştii, 800°C’ye çıkılınca renk değişimi değerlerinde tekrar azalma olduğunu aktarmıştır.



**Şekil 4.13.** Numuneler üzerinde gözlemlenen agrega dağılımı

Şekil 4.13 incelendiğinde agrega dağılımının homojen olduğu ve numunelerde segregasyon olmadığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.14.** Numuneler üzerinde gözlemlenen kılcal çatlaklar

Çalışma kapsamında yapılan laboratuvar incelemelerinde sıcaklığa ve lif karışım oranına bağlı olarak numuneler üzerindeki çatlak yapısının değişebileceği tespit edilmiştir. Sıcaklık arttıkça yüzeysel çatlak miktarının arttığı görülmüştür. Lif miktarı arttıkça ise yüzeysel çatlak oranının azaldığı görülmüştür.

Ayrıca çalışma kapsamında yüksek sıcaklık etkisinde kalan numuneler incelendiğinde lif oranı arttıkça beton numunelerin üzerindeki kırılma parçalanma oranının da azaldığı görülmüştür.

Tez kapsamında gözlemsel olarak yapılan değerlendirmelerin her birinin deneysel ve analitik olarak yapılacak araştırmalar sonucunda detaylı olarak belirlenebileceği bilinmektedir. Bu çalışmada sadece gözlemsel olarak yapılan değerlendirmeler sunulmuştur.

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada KYB içerisine farklı miktarlarda polipropilen lif ilave edilerek üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiş ayrıca ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır. Bununla birlikte taze beton özelliklerinin lif miktarlarına bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Ultrases geçiş hızı ölçümü ile de betonun boşluk ve çatlak yapısının, KYLB'nin basınç dayanımı ile ilişkisi araştırılmıştır. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar neticesinde yapılan değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

1. Karışımdaki lif miktarı arttıkça KYB'nin yayılma çapının azaldığı,  $T_{50}$  süresinin uzadığı, işlenebilirliğin düştüğü görülmüştür. Bu çalışmada, yayılma çapına göre lifsiz (kontrol),  $0,25 \text{ kg/m}^3$  ve  $0,50 \text{ kg/m}^3$  lif içeren grupların SF1,  $0,75 \text{ kg/m}^3$  ve  $1,0 \text{ kg/m}^3$  lif içeren grupların ise SF2 sınıfında olduğu belirlenmiştir. Viskozite verilerine göre ise tüm gruplar VS2 sınıfı içerisinde kalmıştır.

2. Karışımda lif miktarı arttıkça KYB'nin V-hunisinden akma süresinin uzadığı görülmüştür. Akış süreleri dikkate alındığında lifsiz (kontrol),  $0,25 \text{ kg/m}^3$  ve  $0,50 \text{ kg/m}^3$  lif içeren grupların VF1,  $0,75 \text{ kg/m}^3$  ve  $1,0 \text{ kg/m}^3$  lif içeren grupların ise VF2 sınıfında olduğu tespit edilmiştir.

3. Karışımda lif miktarı arttıkça KYB'nin L-kutusundan geçebilme kabiliyetinin azaldığı buna bağlı olarak  $H_2/H_1$  değerlerinin düştüğü görülmüştür. Buna ilaveten çalışmada üç donatı engelli deney aleti kullanıldığından tüm gruplar PA2 sınıfında değerlendirilmiştir.

4. Karışımdaki lif miktarı arttıkça KYB'nin basınç dayanımının az da olsa düştüğü görülmüştür.

5. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerde lif miktarının artmasıyla beraber dayanım kayıplarının daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak, liflerin erimesi sonucu artan boşluk miktarına bağlı olarak dayanım kayıplarının artması düşünülmektedir.
6. Yüksek sıcaklık etkisinde, numunelerin maruz bırakıldığı sıcaklık değeri arttıkça beton basınç dayanımındaki toplam kaybın da arttığı gözlemlenmiştir.
7. Beton basınç dayanımına hem lif miktarının hem de yüksek sıcaklıkların olumsuz etkisi olmakla beraber, dayanım kayıplarında sıcaklık değerlerinin lif miktarına göre daha belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sıcaklığın 500°C'ye ulaşmasıyla basınç dayanımı değerlerindeki azalmaların daha da arttığı, 750°C'de ise kayıp miktarının en üst seviyeye çıkarak başlangıç dayanımına göre %57-70 oranlarına ulaştığı gözlenmiştir.
8. Kırılmış numuneler üzerinde gözlemsel olarak yapılan incelemeler sonucunda betonlarda segregasyon olmadığı, numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılma derecesine bağlı olarak renk değişimlerinin oluştuğu görülmüştür.
9. Basınç dayanımına benzer olarak; karışımda lif miktarı ve sıcaklık değerlerinin artmasıyla eğilmede çekme dayanımının da azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan polipropilen lifli KYB'lerin eğilme dayanımlarının lifsiz betona göre bir miktar artış gösterdiği belirlenmiştir.
10. Polipropilen lif içeren KYB'de lif miktarı ve numunenin maruz kaldığı sıcaklık derecesi arttıkça ultrases geçiş hızında önemli ölçüde azalmalar olduğu görülmüştür. Ultrases geçiş hızındaki azalmalar basınç dayanımındaki azalmalar ile benzerlik göstermekte olup, iki değer arasındaki ilişki her bir sıcaklık için hesaplanan belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) değerleri ile de ispatlanmıştır.

Konu hakkında bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda farklı lif türleri kullanılarak üretilen KYB'lerin taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması önerilebilir. Ayrıca bu çalışmada gözlemsel olarak incelenen renk değişimi ve kırılma Şekilleri gibi konuların deneysel olarak daha detaylı bir biçimde ele alınması faydalı olacaktır.



**KAYNAKLAR**

- Abdel-Mohti, A., Shen, H. & Khodair, Y. 2016. Characteristics of Self-Consolidating Concrete with RAP and SCM. *Construction and Building Materials*, 102, 564-573.
- Abdulhaleem, K.N., 2018. Lif Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Yüksek Sıcaklıklardaki Mekanik Davranışı. Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Abdulhameed, H. A., Nassif, H. & Khayat, K. H., 2018. Use of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete to Enhance Serviceability Performance of Damaged Beams. *Transportation Research Record*, 0361198118787983.
- Acay, E., 2010. Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- ACI 544.1R-96, 2002. State of the Art Report On Fibre Reinforced Concrete, ACI, USA.
- ACI Committee 226, 1987. Use of Fly Ash in concrete, *ACI Materials Journal*, 84, 5, 381-409.
- Akca, A.H., 2017. Yüksek Sıcaklık Uygulaması Sonrası Lifli Betonun Mekanik Davranışı ve İyileşmesi. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akman, M., 2001. Betonarme Yapılarda Yangın Hasarı ve Yangın Sonunda Taşıyıcılığın Belirlenmesi. *Sika Teknik Bülten/Makaleler*, 141.
- Aköz, F. ve Yüzer, N., 1994. Yüksek Sıcaklığın Nedenleri ve Betonarme Elemanlara Etkileri, *YTÜ Dergisi*, 3, 89-98.
- Aktürk, M., 2007. Polipropilen Lif Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Al Darraji, S., 2018. Investigation of Replacement of Stirrups with Steel Fibers in Self-Compacting Reinforced Concrete Haunched Beams. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Al Jumaili, M., 2017. Strength and Permeability of Self-Compacting Concrete Incorporating Pvc Dust. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Alkan G., 2004. Polipropilen Lifli Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alonso, C., Andrade, C., Khoury, G.A., 2003. Porosity and Microcracking, *Course on Effect of Heat on Concrete*, Udine/Italy.
- Andiç-Çakır, Ö. & Hızal, S., 2012. Influence of Elevated Temperatures on The Mechanical Properties and Microstructure of Self Consolidating Lightweight Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 34, 575-583.
- Annerel, E. and Taerwe, L., 2009. Approaches for The Assessment of The Residual Strength of Concrete Exposed to Fire, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*, 245-246.

- Annerel, E. and Taerwe, L., 2011. Methods to Quantify The Colour Development of Concrete Exposed to Fire, *Construction and Building Materials*, 25, 10, 3989-3997.
- ASTM C 618, 2012. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken.
- Atashafrazeh, M., 2013. Polipropilen Lif Takviyeli Betonların Yüksek Sıcaklık Etkilerinden Sonra Basınç Dayanımlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Balaguru, P. and Shah, S., 1991. Fiber Reinforced Cement Composites, Mc. Graw Hill Inc.
- Balık, F. ve Kamanlı, M., Mart 2003. Beton Teknolojisi, Nobel Basımevi, İstanbul.
- Bayasi, M.Z. and Soroushian, P., 1992. Effect of Steel Fiber Reinforcement on Fresh Mix Properties of Concrete. *ACI Materials Journal*, V.89, No.4 pp. 369-374
- Bayramov, F.C., Tasdemir, M.A. 2004, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26-6, pp. 665-675.
- Benli, A. ve Karataş, M. 2017. Durability and Strength Properties Self-Compacting Mortars with High-Calcium Fly Ash and Silica Fume. *Karalması Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7 (2), 647-657.
- Beycioğlu, A., 2013. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Beton ile Donatı Aderansı İlişkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bingöl, A.F., 2002. Pomza ile Üretilen Hafif Betonların Yangına Karşı Dayanımı. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bingöl, A.F., 2008. Beton-Donatı Aderansına Yüksek Sıcaklıkların Etkisi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Cao, Q., Cheng, Y., Cao, M. and Gao, Q., 2017. Workability, Strength and Shrinkage of Fiber Reinforced Expansive Self-Consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*, 131, 178-185.
- Cao, Q., Gao, Q., Gao, R. and Jia, J., 2018. Chloride Penetration Resistance and Frost Resistance of Fiber Reinforced Expansive Self-Consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 719-727.
- Celep, G., 2010. Polipropilen Lifli Betonların Isıl Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Cingi, R., 2017. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık ve Yangın Etkisinde Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Cook, J.E., 1983. Fly Ash in Concrete-Technical Considerations. *Concrete International*, 5(09), 51-59.
- Çelik, C., 2000. İstatistik Ders Notları, Yayın No:46, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Erzurum.
- De Alencar Monteiro, V. M., Lima, L. R. And De Andrade Silva, F., 2018. On The Mechanical Behavior of Polypropylene, Steel and Hybrid Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 280-291.
- Dener, M., 2017. Öğütülmüş Pomza Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Lifli Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.



- Ding, Y., Zhang, C., Cao, M., Zhang, Y. and Azevedo, C., 2016. Influence of Different Fibers on The Change of Pore Pressure of Self-Consolidating Concrete Exposed to Fire. *Construction and Building Materials*, 113, 456-469.
- Duyar, O., 2006. Avrupa Kendiliğinden Yerleşen Beton Şartnamesi Işığında Tanımlar, Dizayn Yöntemi, Deney Metotları ve Mühendislik Özellikleri. *THBB Hazır Beton Dergisi*, Sayı 75, ss. 46-52.
- EFNARC, 2005. Specifications and Guidelined for Self Compacting Concrete Specification, Production and Use, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Farnham, UK, 68.
- Erdoğan, T.Y., 2010. Beton, Üçüncü Baskı, 1-8, 188-195, 377-381, 397-399, ODTÜ Yayıncılık.
- Fares, H., Noumowe, A. and Remond, S., 2009. Self-Consolidating Concrete Subjected to High Temperature: Mechanical and Physicochemical Properties. *Cement and Concrete Research*, 39 (12), 1230-1238.
- Felekoğlu, B., 2003. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Felekoğlu, B., Yardımcı, M.Y. ve Baradan, B., 2006. Uçucu Külün ve Taş Tozunun Kendiliğinden Yerleşen Betonda Aşınma Direncine Etkileri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 19(1).
- Ghafoori, N., Spitek, R. and Najimi, M., 2016. Influence of Limestone Size and Content on Transport Properties of Self-Consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 588-595.
- Grüneward, S., Walraven, J. C., 2001. Parameter-Study on The Influence of Steel Fibers and Coarse Aggregate Content on The Fresh Properties of Self Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research* 31, 1793-1798.
- Gültekin, A., 2017. Bazalt ve Cam Lif İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Değişken Lif Parametrelerinin İşlenebilirlik ve Kırılma Enerjisine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Güneş, A., 2011. Kendiliğinden Yerleşen Lifli Betonların Mühendislik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Gürdal, H. ve Yüceer, Z., 2004. Türkiye ve Dünyada Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları, *Beton 2004 Kongresi Bildirileri*, 244-254.
- Hilal, N.J., 2016. Characteristics of Self-Compacting Concretes with Tire Rubber Wastes. Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Hisseine, O. A., Basic, N., Omran, A. F. and Tagnit-Hamou, A., 2018. Feasibility of Using Cellulose Filaments as a Viscosity Modifying Agent in Self-Consolidating Concrete. *Cement and Concrete Composites*.
- Huang, W-H., 2001. Improving the Properties of Cement-Fly Ash Grout Using Fiber and Superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 31, 1033-1041.
- Karahan, O., 2006. Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Khatip, J.M., 2008. Performance of Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash, *Construction and Building Materials*, 22, 1963–1971
- Khiabani Azar, A.S., 2011. Buhar Kürünün Uçucu Küllü Kendiliğinden Yerleşen Betonların Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Khoury, G., 2003. Fire & Assessment, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Khurana, R. and Topçu, O., 2000. Role of Superplasticizers in the Development of Self Compacting Concrete, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Istanbul.
- Kızılkant, A.B., 2010. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Betonun Basınç Dayanımı Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kocataşkın, F., 2000. Yapı Malzemesi Bilimi, İstanbul, Birsen Yayınevi.
- Korkut, F., Türkmenoğlu, Z. F., Taymuş, R. B. ve Güler, S., 2017. Çelik ve Sentetik Liflerin Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 560-570.
- Kozak, M., 2013. Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması. SDU Teknik Bilimler Dergisi, 3 (5), 26-35.
- Kyahat, K.H. and Roussel, Y., 2000. Testing and Performance of Fiber Reinforced, Self Consolidating Concrete, *Materials and Structures*, Vol. 33, pp. 391- 397.
- Li, M., Qian, C. and Sun, W., 2004. Mechanical Properties of High-Strength Concrete After Fire, *Cement and Concrete Research*, 34, 6, 1001-1005.
- Lin, W.M., Lin, T.D. and Powers Couche, L.J., 1996. Microstructures of Fire-Damaged Concrete, *Acı Materials Journal*, 93, 3, 199-205.
- Lotfy, A., Hossain, K. M. and Lachemi, M., 2016. Durability Properties of Lightweight Self-Consolidating Concrete Developed with Three Types of Aggregates. *Construction and Building Materials*, 106, 43-54.
- Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A. R., Abdollahnejad, Z. and Illikainen, M., 2018. Characterization and Optimization of Hardened Properties of Self-Consolidating Concrete Incorporating Recycled Steel, Industrial Steel, Polypropylene and Hybrid Fibers. *Composites Part B: Engineering*, 151, 186-200.
- Mazeheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S.H. and Hosseinpour, I., 2011. The Effect of Polypropylene Fibers on the Properties of Fresh and Hardened Lightweight Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 351-358.
- Mehdipour, I., Vahdani, M., Amini, K. and Shekarchi, M., 2016. Linking Stability Characteristics to Material Performance of Self-Consolidating Concrete-Equivalent-Mortar Incorporating Fly Ash and Meta Kaolin. *Construction and Building Materials*, 105, 206-217.
- Mohamed, O. A., Syed, Z. I. and Najm, O. F., 2016. Splitting Tensile Strength of Sustainable Self-Consolidating Concrete. *Procedia Engineering*, 145, 1218-1225.
- Neville, A., 2006. *Properties of Concrete*, copyright© 2000, Asia, Person Education Pte. Ltd. 844p.

- Okamura, H. and Ouchi, M., 1999. Self-Compacting Concrete Development, Present Use and future, Proceeding of 1st International Rilem Symposium on Self Compacting Concrete, Sweden. 7, 3-14.
- Okamura, H. and Ouchi, M., 2003. Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 5-15.
- Okamura, H., 1997. Self Compacting High Performance Concrete, Concrete International, 19(7), 50-54.
- Ouchi, M., Hibino, M. and Okamura, H., 1997. Effect of Superplasticizer on Self-Compactability of Fresh Concrete, Advances in Concrete and Concrete Pavement Construction, 1574, 37-40.
- Öz, A., 2014. Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Hibrid Lifli Betonların Bazı Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Öz, H. Ö., Yücel, H. E. ve Güneş, M., 2017. Bazik Pomzanın Kendiliğinden Yerleşen Betonların İşlenebilirlik Özellikleri Üzerine Etkisi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6 (1), 90-97.
- Özel, C. ve Kapkan, A.N., 2017. Kendiliğinden Yerleşen Beton Özellikleri Üzerinde Agregata Özelliklerinin Etkisi. Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 1(1), 1-6.
- Özkul, M. H., 2002. Beton Teknolojisinde Bir Devrim: Kendiliğinden Yerleşen-Sıkışan Beton. THBB Hazır Beton Dergisi, 52, 64-71.
- Paksoy, A.S., 1999. Boya El Kitabı, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Ramadevi. K., Azhar, S., Jalali S., 2012. Flexural Behavior of Hybrid (Steel-Polypropylene) Fibre Reinforced Concrete Beams. European Journal of Scientific Research, Tamilnadu, India, 70(1), 81-87.
- Riley, M.A., 1991. Possible New Method for the Assessment of Fire-Damaged Concrete, Magazine of Concrete Research, 43, 155, 87-92.
- Roy, D.M., Luke, K. and Diamond, S., 1984. Characterization of Flu Ash and its Reaction.
- Saeedian, A., Dehestani, M., Asadollahi, S. and Vaseghi Amiri, J., 2017. Effect of Specimen Size on the Compressive Behavior of Self-Consolidating Concrete Containing Polypropylene Fibers. Journal of Materials in Civil Engineering, 29 (11).
- Saf, M.O., 2015. Sentetik C-S-H Bileşiklerinin Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze ve Sertleşmiş Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sağsöz, A.E., 2007. Farklı Kür Şartlarının Doğal Perlit Agregalı Betonların Mekanik Özelliklerine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Sağsöz, A.E., 2013. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisinde Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İle Renk Değişiminin İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Sahmaran, M., Christianto, H.A., Yaman, İ.O., 2006, The Effect of Chemical Admixtures and Mineral Additives on the Properties of Self-Compacting Mortars, Cement & Concrete Composites 28, 432-440.
- Semioli, W. J., 2001. Self-Placing Concrete, Concrete International, 23(12), 69-72.

- Señas, L., Priano, C. and Marfil, S., 2016. Influence of Recycled Aggregates on Properties of Self-Consolidating Concretes. *Construction and Building Materials*, 113, 498-505.
- Sertbaş, B., 2006. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Polipropilen Lif Kullanımının İşlenebilirliğe Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sezer, G.Ş., 2017. Effect of Meta Kaolin and Calcined Kaolin on Hardened Properties of Self Compacting Concrete. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Siddique, R. and Kaur, G., 2016. Strength and Permeation Properties of Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash and Hooked Steel Fibres. *Construction and Building Materials*, 103, 15-22.
- Sua-iam, G., Sokrai, P. and Makul, N., 2016. Novel Ternary Blends of Type 1 Portland Cement, Residual Rice Husk Ash, and Limestone Powder to Improve the Properties of Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 1028-1034.
- Şaman, R., 2018. Farklı Beton Türü ve Lif Oranları Kullanılarak Oluşturulmuş Numuneler İçin Dinamik ve Statik Elastisite Modülünün Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat.
- Şengül, C., Akkaya, Y. ve Taşdemir, M.A., 2006. Fracture Behavior of High Performance Fiber Reinforced Self Compacting Concrete, Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties, 171-177.
- Şimşek, O., Haziran 2009. Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Tabatabaeian, M., Khaloo, A., Joshaghani, A. and Hajibandeh, E., 2017. Experimental Investigation on Effects of Hybrid Fibers on Rheological, Mechanical, and Durability Properties of High-Strength SCC. *Construction and Building Materials*, 147, 497-509.
- Tohumcu, İ., 2011. Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri ve Basınç Dayanımları. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Tohumcu, İ., Bingöl, F., 2013. Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri ve Basınç Dayanımları. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15 (2), 31-44.
- Topcu, İ. B., Ünal, O., Uygunoğlu, T., 2007.b. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Mineral Katkıların Taze Beton Özelliklerine Etkilerinin Arastırılması, 2. Yapıda Kimyasal Katkılar Sempozyumu (Beton ve Harçlarda), 12-13 Nisan, Ankara, ss. 181-193.
- TS 3530 EN 933-1/A1, 2007. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini - Eleme Metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 639/T1, 1998. Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan Uçucu Küllerin Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 706 EN 12620, 2009. Beton Agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802, 2016. Beton Karışımı Hesap Esasları, KYB Karışım Bileşimleri İçin Önerilen Tipik Değer Aralıkları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 12390-3, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyle, Bölüm 3, Dene Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyle-Bölüm 5: Dene Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12504-4, 2004. Beton Deneyle, Bölüm 4: Ultrases Geçiş Hızının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450-1, 2013. Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450-2, 2008. Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 2: Uygunluk Değerlendirmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 932-1, 1997. Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyle, Kısım 1, Numune Alma Metotları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 932-2, 1999. Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyle, Bölüm 2, Laboratuar Numunelerin Azaltılması Metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2, 2011. Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet İçin Bölüm 2: Beton Katkıları-Tarifler ve Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tulga, İ., 2017. Endüstriyel Atıkların Çimento Yerine İkame Edilmesi ile Oluşturulan Beton Numunelerinin Mühendislik Özelliklerindeki Değişimin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli.
- Türker, P., Erdogan, B., Katnas, F., Yeginobalı, A., 2009. Türkiyede Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. TÇMB, Ankara.
- Uygunoğlu, T., 2008. Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Uygunoğlu, T., Güneş, İ., Ersoy, B. ve Evcin, A., 2017. Kendiliğinden Yerleşen Polimerik Harçlarda Mineral Katkının Reolojik Özelliklere Etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32 (4).
- Uysal, M., 2012. Self-Compacting Concrete Incorporating Filler Additives: Performance at High Temperature. Construction and Building Materials, 26, 701-706.
- Walraven, J., 2003. Structural Aspects of Self Compacting Concrete, 3rd Int. Symposium of SCC, Reykjavik, Edited by Wallevik and Nielsson, RILEM Publications PRO 33, Bagnaux, 15-22.
- Yardımcı, M.Y., 2007. Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı. Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yılmaz, İ., 2018. Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Zeolit Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların İşlenebilirlik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Yurt, Ü. ve Emiroğlu, M., 2018. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Düşük Sıcaklıklardaki Davranışının Tahribatsız Yöntemlerle İncelenmesi. Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6 (3), 8-15.

- Yücel, H. E., Öz, H. Ö., Kömür, S. ve Güneş, M., 2017. Asidik Pomza ile Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Özellikleri. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6 (1), 83-89.
- Zhang, C., Ding, Y. and Cao, M., 2016. Pore Pressure Test for Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete Exposed to High Temperature.
- Zhang, C., Li, Z. and Ding, Y., 2018. Effect of Hybrid Fibers on Flexural Performance of Reinforced SCC Symmetric Inclination Beams. Computers and Concrete, 22 (2), 209-220.



## ÖZGEÇMİŞ

Muhammet ADAR, 1987 yılında Erzurum İli, Narman İlçesi, Karapınar Köyü'nde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. Lise öğrenimini Erzurum Lisesi'nde 2004 yılında tamamladıktan sonra Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2011 yılında mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. 2013 yılından bu yana BOTAŞ Erzurum Şube Müdürlüğünde mühendis olarak çalışmaya devam etmektedir.