
Araştırma Makalesi / Research Article

Kendiliğinden Yerleşen Betonun İşlenebilirliğine ve Yüksek Sıcaklık Direncine Polipropilen Lifin Etkisi

Muhammet ADAR^{1*}, Ahmet Ferhat BİNGÖL¹, Elanur ADAR²

¹Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum

²Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Artvin
(ORCID: 0000-0002-0490-6518) (ORCID: 0000-0002-8798-8343) (ORCID: 0000-0002-9609-0439)

Öz

Konvansiyonel betona kıyasla yüksek işlenebilirlik, düşük işçilik maliyeti ve yüksek dayanım gibi avantajlar sağlayan kendiliğinden yerleşen beton (KYB) yüksek performanslıdır. Bu çalışma ile kendiliğinden yerleşen betonlarda, polipropilen lif miktarının (0,25; 0,50; 0,75 ve 1,00 kg/m³) taze betonun işlenebilirliği ve sertleşmiş betonların da bazı mekanik dayanım özellikleri üzerindeki etkisi belirlenerek; farklı sıcaklıkların (25, 250, 500 ve 750 °C) sertleşmiş KYLB'lar üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Sertleşmiş numuneler 25, 250, 500 ve 750°C sıcaklıklarına tabi tutulmuştur. Ayrıca, numunelerin boşluk yapıları hakkında fikir edinmek için ultrases geçiş hızı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, polipropilen lif miktarının artması ile kendiliğinden yerleşen betonun akıcılığının olumsuz yönde etkilendiği, basınç dayanımının değişmediği ve çekme dayanımının olumlu yönde değiştiği gözlenmiştir. 500°C ve üzeri sıcaklıklarda, beton basınç dayanımının ve ultrases geçiş hızlarının azaldığı tespit edilmiştir. Sıcaklık arttıkça polipropilen liflerin eridiği ve bunun sonucu olarak betonda oluşan boşlukların artması ile dayanımının azaldığı gözlenmiştir. 750 °C'de en fazla mukavemet kaybı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kendiliğinden Yerleşen Beton, Yüksek Sıcaklık, Uçucu Kül, Polipropilen Lif, Ultrases Geçiş Hızı, Sertleşmiş Beton Deneçleri.

Effect of Polypropylene Fiber on Workability and High Temperature Resistance of Self-Compacting Concrete

Abstract

Self-consolidating concrete (SCC) that provides advantages such as high workability, low labor cost and high strength compared to conventional concrete has high performance. The aim of this study is to determine the effect of polypropylene fiber amount (0.25; 0.50; 0.75 and 1.00 kg/m³) on the workability and strength properties of fiber reinforced self-consolidating concretes. Hardened samples were subjected to temperatures of 25, 250, 500 and 750 °C. In addition, ultrasound pulse velocity measurements were performed to obtain an idea about the void structures of the samples. As a result of the study, it was observed that as the amount of polypropylene fiber increased, the fluidity of the self-consolidating concrete negatively affected, the compressive strength did not change and the tensile strength changed positively. It was determined that the concrete compressive strength and ultrasound transition velocities decreased in the temperatures of 500°C and above. It has been observed that as the temperature increased, the polypropylene fibers melted and as a result of which, with the increase of gaps in concrete, its strength decreases. The highest loss of strength was observed at 750°C.

Keywords: Self-consolidating Concrete, High Temperature, Fly Ash, Polypropylene Fiber, Ultrasound Pulse Rate, Hardened Concrete Tests.

1. Giriş

En çok tüketilen yapı malzemelerinden betonun kalitesi yüksek olmalıdır. Çünkü Türkiye gibi deprem bölgesi olan bölgelerdeki binalar için yüksek kaliteli beton kullanımı önemlidir. Betonun kalitesinde,

*Sorumlu yazar: adarmuhammet@gmail.com

Geliş Tarihi: 30.05.2019, Kabul Tarihi: 30.07.2019

dayanımı, dayanıklılığı ve işlenebilirliği önemlidir. Deprem bölgesi ya da sağlam olmayan zeminlere inşa edilen yapılardaki kolon, kiriş, döşeme gibi yapı elemanlarında yoğun donatı kullanılması gerekmektedir. Bu gibi yerlerde betonun yerleşme ve sıkışmasının iyi yapılamaması betonun dayanımını azaltacaktır [1]. Betonun kalitesini artırmak için katkı maddeleri (kimyasal ve mineral) kullanılmaktadır. Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), yoğun donatılı, dar ve derin kesitlerde homojenliğini ve stabilitesini (ayırışma, terleme vb. olmadan) koruyan ve iç-dış vibrasyon gerektirmeden kendi ağırlığı ile yerleşip sıkışabilen akıcı kıvamlı bir beton türüdür [2]. Vibrasyon gerektirmemesi daha az enerji harcanmasını ve gürültüsüz çalışmayı sağlar. Bu ise gece beton dökümü ve iş güvenliği açısından gürültü kirliliğini azaltmayı sağlar. Konvansiyonel betonun kullanılamayacağı yerlerde (tamir, bakım ve yenileme işleri, sık donatılı ve dar kesit özelliklerine sahip büyük boyutlu inşaatlar, özel kalıp gerektiren tünel gibi yapılar vb.) KYB'ler tercih edilmektedir [3, 4]. Özellikle de deprem gibi afetlerde zarar görmüş binaların güçlendirilmesinde kendiliğinden yerleşen betonun kullanılması çok büyük kolaylıklar ve avantajlar (yüksek dayanım, dar alana döküm, az işçilik, az hata vb.) sağlamaktadır. KYB'deki bileşenler, betonun yerleşebilirlik gibi özelliklerini etkilemektedir. KYB'ler de yüksek akıcılık ve yüksek ayırışma direnci, toz malzeme ve süper akışkanlaştırıcılar ile sağlanır. Toz malzemeler; 0,125 mm'den daha küçük çaptaki malzemelerdir. Örneğin, mikrofiller malzemeler, çimento, kırma kum, silis dumanı ve öğütülmüş yüksek fırın cürufudur [5, 6]. Lif ilavesi de gevrek betonun yapısını daha sünek hale getirmektedir. Betonda lif malzemesi olarak çelik, sentetik, karbon ve cam kullanılabilir. En yaygın kullanılanları çelik ve sentetik liflerdir. Sentetik lifler, çelik liflere kıyasla daha az miktarda tercih edilmektedir [1]. Betonda liflerin görevi mukavemeti, darbe dayanımını ve durabiliteyi artırmaktır [7].

Yangına maruz kalan binalar ya kısmen zarar görmekte ya da tamamen kullanılamaz hale gelmektedir. Yangının betona etkisini belirlemek için, farklı karışım ve mukavemetteki konvansiyonel betonların farklı sıcaklıklardaki mekanik özelliklerinin değişimi hakkında çeşitli çalışmalar yürütülmüştür [8]. Yüksek sıcaklıkta mukavemet kayıplarını azaltmak için polipropilen lifler, hava sürükleyiciler, büyük boyutlu elemanlar ve düşük ısıl genleşmeye sahip agregalar ilave edilmektedir.

Bazı araştırmacılar KYB'de lif katkısının betonun işlenebilirlik özelliğini olumsuz yönde etkilediğini gözlemişlerdir [9-11]. Betona lif ilavesi optimum işlenebilirlik sağlamamasına rağmen betona lif ilave edilerek dayanım ve süneklik kapasitesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bazı çalışmalarda farklı tip lif, farklı dozaj ve narinlik oranı ile elde edilen KYLB'larda basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının arttığı belirlenmiştir [12, 13]. Sıcaklığın kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisini veya yangına karşı dayanıklılığını belirlemek için bazı araştırmacılar [14-20] tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu araştırmacılar lif malzemesi olarak çelik [15, 17, 18, 20] veya polipropilen [14, 15, 17, 19] kullanmışlardır. Uysal [14] lifli KYB'lerin özelliklerine farklı mineral katkı maddelerin (kireçtaşı, bazalt ve mermer) ve farklı yüksek sıcaklıkların (200, 400, 600 ve 800°C) etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda da 600°C üzeri sıcaklıklara maruz bırakılan tüm KYLB karışımlarında önemli basınç kaybı olduğu ve lifli betonlarda patlayarak dağılma olmadığı gözlenmiştir. Zhang vd. [17] çalışmasında lifli KYB'lerde (mikro polipropilen, makro polipropilen, çelik lif ve bunların karması) boşluk basıncının değişimini araştırmışlardır. Çalışmada, mikro polipropilen liflerin makro polipropilen liflere kıyasla boşluk basıncını azaltmada daha etkili olduğu ve çelik liflerin etkisinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Yangın esnasında, makro polipropilen lif (PPL) sığ bölgelerde daha iyi bir etkiye sahip iken çelik lifin daha derin bölgelerde boşluk basıncını azaltmada etkili olduğu ifade edilmiştir. Abdulhaleem [20] çelik lif içeren KYB'lerin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisini araştırmıştır. Polipropilenli KYB'lerde ısıtma süresince patlama riskinin olmadığı ve çelik lif katkısının yüksek sıcaklıklarda KYB'nin mekanik özelliklerini oldukça iyileştirdiğini, betonarme kısa konsolların yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini olumlu yönde etkilediğini aktarmıştır.

Bu çalışmanın amacı, mineral katkı olarak uçucu kül içeren KYB karışımlarına farklı miktarlarda eklenen polipropilen lifin taze betonun özelliklerine etkisini ve sertleşmiş betonda farklı yüksek sıcaklıkların basınç ve eğilmede çekme dayanımlarına etkisini incelemektir. Ek olarak, üretilen betonun boşluk yapıları hakkında fikir edinmek için ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar, yüksek sıcaklık direnci açısından yorumlanmıştır.

2. Malzemeler ve Yöntem

2.1. Kullanılan Malzemeler

Erzurum'da bulunan Aşkale Çimento Fabrikası'ndan TS EN 197-1 standardına uygun R tipi Portland Çimentosu (CEM I 42,5 R) temin edilmiştir. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 1'de, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Bu veriler Aşkale Çimento Fabrikası'ndan alınmıştır.

Tablo 1. CEM I 42,5 R çimentonun kimyasal özellikleri

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

Tablo 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 ² /g)	3698
Priz Başı (Saat-dakika)	2 sa-31 dk
Priz Sonu (Saat-dakika)	3 sa-11 dk
Hacim Genleşmesi (mm)	1,00
Basınç Dayanımı 2 Gün (MPa)	27,90
Basınç Dayanımı 28 Gün (MPa)	58,00
Su İhtiyacı (%)	29,50

Uçucu kül, Zonguldak İli, Kilimli İlçesi, Çatalağzı bölgesinde bulunan Zonguldak Eren Termik Santrali'nden temin edilmiştir. TS EN 197-1 (2002), ASTM C 618 (2012) ve TS EN 450-1/2 (2013/2008) standartlarındaki koşullara uygun olan F tipi malzemedir. Uçucu külün kimyasal özellikleri Tablo 3'te, mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu veriler Zonguldak Eren Termik Santrali tarafından sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan doğal kum ve çakıl, Erzurum ili sınırları içerisindeki Aras nehrinden temin edilmiştir. Temin edilen agreganın maksimum tane çapı 15 mm'dir. Agregalar 0-7 ve 7-15 mm aralıklarında kullanılmıştır. İnce ve iri agregalar için elek analizi yapılmıştır ve uygun tane dağılımının sağlanması için granülometri eğrisi çizilmiştir. Çizilen granülometri eğrisinden (Şekil 1) karışımlarda %60 ince ve %40 iri agrega kullanılacağına karar verilmiştir. İnce ve iri agregaların doygun kuru yüzey yoğunlukları sırasıyla 2,63 ve 2,67 g/cm³ olarak belirlenmiştir.

Beton karışımlarını hazırlamak için kullanılan su, Atatürk Üniversitesi içme suyu şebekesinden alınmıştır. Kimyasal katkı malzemesi olan ADVA Flow 330, Sancak Kimya firmasından ve polipropilen lif Tekno Yapı Kimyasalları A.Ş.'den temin edilmiştir. ADVA Flow 330 1,069 g/mL yoğunluğa sahip, pH değeri 6,1 olan polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcıdır. Beton karışımlarına, toplam bağlayıcı miktarının yaklaşık %1,87'si kadar süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Üretici firmadan alınan

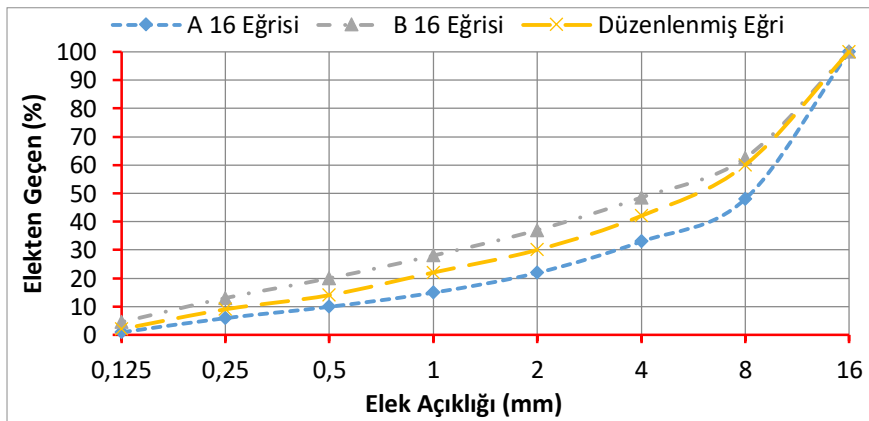
polipropilen lifin çekme dayanımı, yumuşama noktası, ergime noktası, özgül yoğunluğu, rengi ve fiber uzunluğu sırasıyla 350 MPa, 140°C, 165-170°C, 0,91 kg/L, doğal beyaz ve 19 mm'dir.

Tablo 3. Uçucu külün kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	
Madde	Miktar (%)
SiO ₂	60,61
Çözünmeyen Kalıntı	89,19
Al ₂ O ₃	20,81
Fe ₂ O ₃	7,36
CaO	2,44
MgO	1,64
SO ₃	0,51
K ₂ O	1,91
Na ₂ O	0,56
Toplam alkali oksit; (Na ₂ O+0,658* K ₂ O)	1,82
Cl ⁻	0,0067
Reaktif SiO ₂	40,90
Reaktif CaO	0,00
Serbest CaO	0,14
Kızdırma kaybı	2,71
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	88,80

Tablo 4. Uçucu külün mekanik ve fiziksel özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	
İncelik 45 µm elek üstü (%)	29,30
İncelik 200 µm elek üstü (%)	0,80
Özgül Ağırlık	2,30
Özgül Yüzey (cm ² /g)	2475
Piriz Başlangıcı (saat)	1,30
Aktivite İndeksi (28 gün) (%)	88
Aktivite İndeksi (90 gün) (%)	91



Şekil 1. Karışımda kullanılan agreganın granulometri eğrisi

2.2. Metot

Kontrol grubu KYB karışımları portland çimentosu, uçucu kül, agrega, su ve kimyasal katkı maddesi ilave edilerek hazırlanmıştır. Tablo 5'te 1 m³ betonun karışım miktarları verilmiştir. KYB karışımlarında bağlayıcı dozajı, uçucu kül ve su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Mineral katkı malzemesi ve toz madde olan uçucu kül sabit tutulmuştur ve çimento miktarının ağırlıkça %20'si oranında (80 kg/m³)

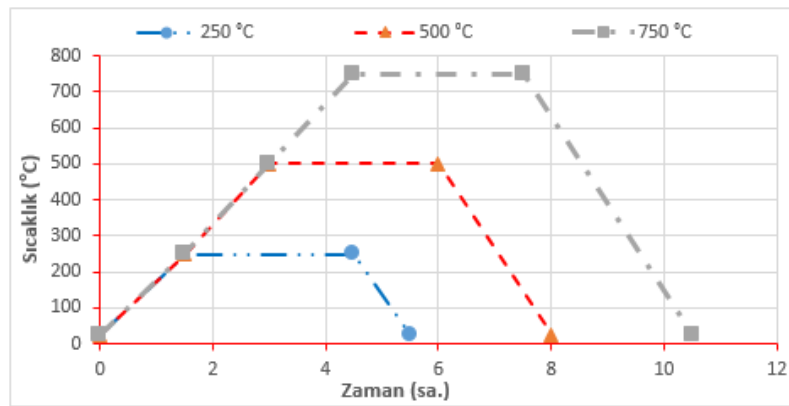
ilave edilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı da tüm karışımlarda sabit olup toplam bağlayıcı miktarının yaklaşık %1,87'si kadar kullanılmıştır. Sabit dozaj ve su/çimento oranı dikkate alınarak karışım suyu miktarı 216 kg olarak hesaplanmıştır. Su miktarlarına, bağlayıcı hacmi ve bütün karışımlar için seçilen %1 hava hacmi eklenmiştir.

Tablo 5. 1 m³ beton karışım miktarı (kg/m³)

Karışım Adı	Kontrol	PPL 0,25	PPL 0,50	PPL 0,75	PPL 1,00
Su/Bağlayıcı	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Bağlayıcı Malzeme	480	480	480	480	480
Çimento	400	400	400	400	400
Uçucu Kül	80	80	80	80	80
Agrega Büyüklüğü					
0-7 (mm)	367	367	367	367	367
7-15 (mm)	244	244	244	244	244
ADVA Flow 330	9	9	9	9	9
Polipropilen Lif	---	0,25	0,50	0,75	1,00

Lifli KYB'ler üretmek için lifsiz KYB'lere, 0,25; 0,50; 0,75 ve 1,00 kg/m³ miktarlarında polipropilen eklenilmiştir. Beş farklı beton serisi için 120 adet numune hazırlanmıştır. Taze beton numunelerinde; çökme-yayılma, V hunisi ve L kutusu deneyi EFNARC (2005) [21]'e göre, ultrases geçiş hızı ölçümü ise TS EN 12504-4 [22]'e göre gerçekleştirilmiştir. Ultrases geçiş hızı boyuna doğrultuda ölçülmüştür.

Numunelerde homojen bir karışımın olması için lif el ile düzgün olarak dağıtılmıştır. Her bir seri için 12 şer adet küp ve prizma numune üretilmiştir. Her bir seri içindeki numune 1-12 arası numaralandırılmıştır. 28 gün su kürüne tabi tutulmuştur ve kurutulduktan sonra farklı sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. 1-3 arası numuneler kontrol numunesi 25°C'de (oda sıcaklığı), 4-6 arası numuneler 250°C'de, 7-9 arası numuneler 500°C'de ve 10-12 arası numaralı numuneler ise 750°C'de 3 saat bekletilmiştir ve daha sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar fırın içerisinde bekletilerek kendi kendilerine soğumaları sağlanmıştır. Soğuyan küp numunelerde önce ultrases geçiş hızı ölçümleri ardından basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Prizma numunelerde ise eğilme çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Üç noktalı eğilme deneyleri uygulanmıştır. Şekil 2'de çalışmada kullanılan yüksek sıcaklık fırınının ısıtma-soğutma rejim grafiği verilmiştir.



Şekil 2. Yüksek sıcaklık fırını ısıtma-soğutma rejim grafiği

3. Bulgular ve Tartışma

Uçucu kül içeriğine sahip farklı oranlarda lif içeren taze beton numunelerinde gerçekleştirilen deney sonuçları ve farklı yüksek sıcaklıklarda sertleşmiş beton numunelerinde gerçekleştirilen deney sonuçları değerlendirilmiştir. Ek olarak, ultrases geçiş hızı ölçümleri sonuçları ile basınç ve eğilme dayanımı değerleri arasındaki belirlenmiştir.

3.1. Taze Beton Deneyleri

Tüm serilerde EFNARC (2005) [21]'e uygun olarak gerçekleştirilen çökme-yayılma deneyinden elde edilen yayılma çapı ve 50 cm'ye yayılma süresi (T_{50}) değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Çökme-yayılma deney sonuçları

Karışım	Yayılma miktarı (cm)	EFNARC'a göre yayılma çapı sınıfı	T_{50} süresi (s)	EFNARC'a göre viskozite sınıfı
Kontrol	70	SF2	2,0	VS2
PPL 0,25	68	SF2	2,1	VS2
PPL 0,50	67	SF2	2,5	VS2
PPL 0,75	65	SF1	2,7	VS2
PPL 1,00	60	SF1	3,0	VS2

Tüm numunelerde elde edilen yayılma ve T_{50} sonuçları EFNARC (2005) [21] sınır değerleri arasında kalmıştır. PPL 1,00 grubunda en düşük yayılma çapı (60 cm) ölçülürken kontrol grubunda en yüksek yayılma çapı (70 cm) elde edilmiştir. Yayılma çapı sınıfı olarak ise kontrol, PPL 0,25 ve PPL 0,50 grup numuneleri SF2, diğer grup numuneleri ise SF1 sınıfında olduğu görülmektedir. T_{50} süresi yani viskozite süresi tüm numunelerde 2,0-3,0 s arasında değiştiği ve hepsinin VS2 sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Polipropilen miktarı arttıkça kendiliğinden yerleşen lifli betonun (KYL B'nin) yayılma çapının azaldığı, T_{50} süresinin ise arttığı görülmektedir (Tablo 6). Polipropilenin çok az miktarı bile, çökme-yayılma değerlerinde önemli derecede azalma yaratmıştır. Mazeheripour vd. [23], %0,3 polipropilen lif ilavesiyle betonun yayılma çapında %40'a varan azalma gözlemlemiştir.

Taze beton numunelerinde EFNARC (2005) [21] standardına uygun 10 litre kapasiteli V şekilli huni ile V-hunisi akış süresi deneyi yürütülmüştür. Deneyler sonucunda elde edilen veriler Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. V-hunisi deney sonuçları

Karışım	t (s)	EFNARC'a göre viskozite sınıfı
Kontrol	5,8	VF1
PPL 0,25	5,9	VF1
PPL 0,50	8,2	VF1
PPL 0,75	9,1	VF2
PPL 1,00	11,1	VF2

Tablo 7'den de görüldüğü gibi en düşük viskozite yani akış süresi kontrol grubunda (5,9 s) iken, PPL 1,00 grubunda 11,1 s ile en yüksek akış değeri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tüm gruplarda bloklanma riski olmadığı söylenebilir. EFNARC (2005) [21]'e göre de grupların viskozite sınıfları VF1 (kontrol, PPL 0,25 ve PPL 0,50) ve VF2 (PPL 0,75 ve PPL 1,00) dir. Polipropilen lif arttıkça KYLB'nin akış süresi de artmıştır. Mazeheripour vd. [23]'ün çalışmalarında da aynı sonuç elde edilmiştir.

EFNARC (2005) [21] standardına göre L kutusu bloklanma oranı (H_2/H_1) hesaplanmıştır. Bu hesap için betonun donatılar arasından geçerek L kutusu ucundaki beton yüksekliği (H_2) ve kapağın hemen önündeki beton yüksekliği (H_1) belirlenmiştir. Elde edilen bloklanma oranı sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. L-kutusu deney sonuçları

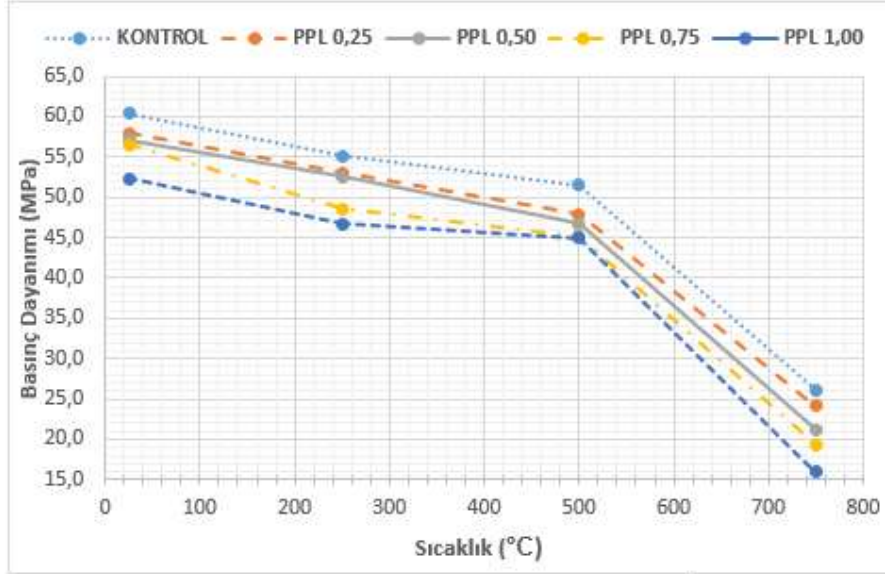
Karışım	H_2/H_1	EFNARC'a göre geçme yeteneği sınıfı
Kontrol	0,9	PA2
PPL 0,25	0,9	PA2
PPL 0,50	0,8	PA2
PPL 0,75	0,8	PA2
PPL 1,00	0,7	PA2

Grup numunelerinde bloklanma oranı 0,7-0,9 arasında değiştiği gözlenmiştir. EFNARC (2005) [21]'te belirtilen bloklanma sınır değerleri 0,8-1,0 olup kontrol, PPL 0,25 ve PPL 0,50 H_2/H_1 oranı 0,8-1 arasında iken, PPL 0,75 ve PPL 1,00 grubu ise 0,8'den küçük elde edilmiştir. 3 donatı engelli deney aleti kullanılan bu çalışmada beton gruplarının geçme yeteneği sınıfı EFNARC (2005) [21]'e göre

PA2'dir. Tablo 8 deki verilere göre, polipropilen lif oranı arttıkça KYLB'nin L-kutusu deney kabındaki bloklanma oranının (H_2/H_1) azaldığı görülmüştür. Başka çalışmada da benzer sonuç elde edilmiştir [23].

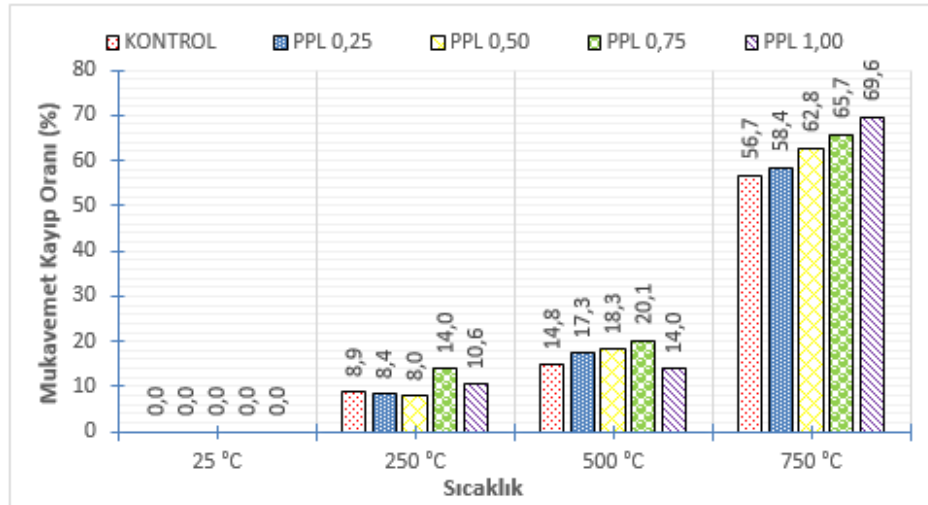
3.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş numunelerde kullanılan farklı polipropilen lif miktarının ve farklı sıcaklıkların basınç dayanım üzerindeki etkileri ve basınç dayanımlarındaki kayıp miktarları sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Oda sıcaklığına ulaşan küp numunelerde 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Polipropilen lifli KYLB'lerin basınç dayanımları Şekil 3 ve basınç dayanımlarındaki kayıp ise Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan sertleşmiş numunelerin basınç dayanımları

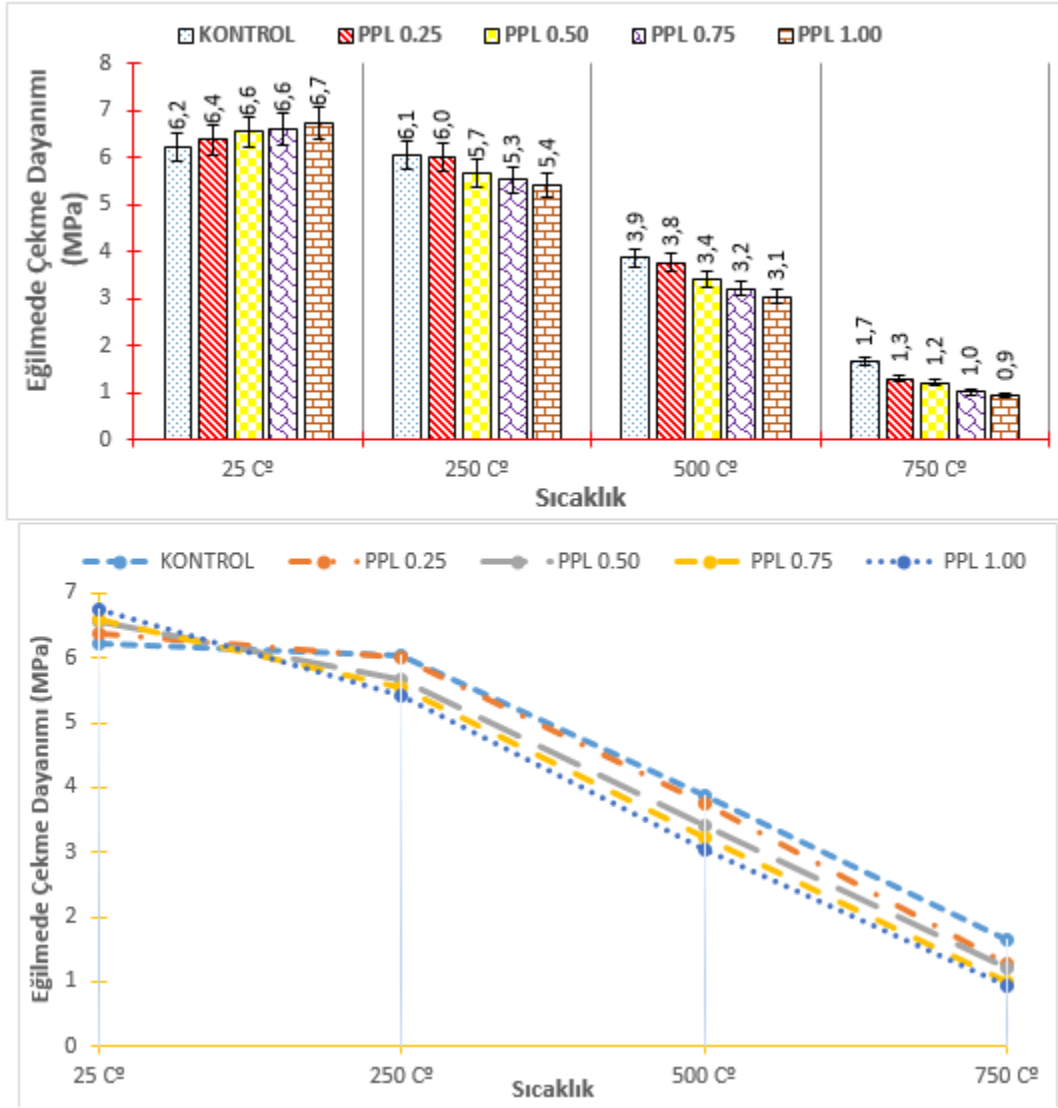
Şekil 3'ten de görüldüğü gibi sıcaklık artışı ile polipropilen lifli KYLB'lerde basınç dayanım kaybı artmaktadır. 500 °C üzeri sıcaklıklarda yaklaşık %49-65 oranında basınç dayanım kaybı olduğu söylenebilir. Lif oranı arttıkça KYB'nin basınç dayanımını önemli oranda etkilemediği görülmektedir. Uysal [14] yaptığı çalışmada 400°C üzerindeki sıcaklıklarda KYB'lerin basınç dayanımlarının önemli ölçüde azaldığını ve PPL ilavesinin basınç dayanımını üzerine olumsuz etki ettiğini ifade etmiştir. Bunun sebebinin ise PPL ilavesi ile beton içerisinde kapiler gözenek yapısının oluşması olarak açıklamıştır.



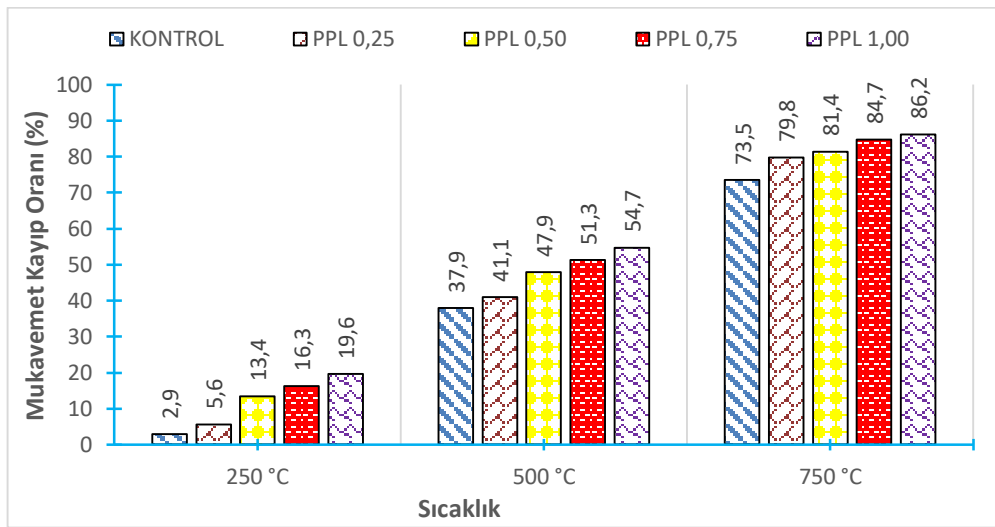
Şekil 4. Kontrol grubuna göre sıcaklık değişimine ve lif oranına bağlı olarak basınç dayanımlarındaki kayıp oranları (%)

250°C sıcaklıkta sertleşmiş numunelerde basınç dayanımındaki kayıp yaklaşık %8-14 arasındadır. PPL 0,75 grubunda en yüksek kayıp oranı (%14,0) ve PPL 0,50 grubunda ise en düşük kayıp oranı (%8,0) görülmüştür. 500°C sıcaklıkta sertleşmiş numunelerde basınç dayanımı kaybı %14-20 arasında olduğu, en yüksek kayıp oranının %20,1 ile PPL 0,75 grubunda ve en düşük kayıp oranının ise %14,0 ile PPL 1,00 grubunda olduğu gözlenmiştir. 750°C’de sertleşmiş numunelerde basınç dayanımı kaybı yaklaşık %60-70 arasında gerçekleştiği, en yüksek kayıp %69,6 ile PPL 1,00 grubunda en düşük kaybın ise %58,4 değeri ile PPL 0,25 grubunda gerçekleştiği görülmüştür. 250 ve 500°C’de sertleşmiş numunelerdeki mukavemet kaybının dalgalanma göstermesinin sebebi lifin beton içerisindeki homojen dağılımından, sıcaklık fırınındaki numunelerin dizilimi gibi farklı parametrelerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. 750°C’de dalgalanma görülmemesinin sebebi ise yüksek sıcaklıkta tüm numunelerdeki PPL’lerin erimesinden dolayı boşluk olmasıdır. PPL miktarı ile doğru orantılı olarak mukavemet kaybı görülmüştür. Şekil 3-4’teki verilerden, 25-500 °C sıcaklıklarında mukavemet kaybının az, 750°C’de mukavemet kaybının önemli miktarda arttığı gözlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda lif içeriği basınç değişimine fazla etki göstermezken yüksek sıcaklıklarda artan lif içeriği ile mukavemet kaybı da artmıştır. Fares vd. [24] KYB’nin performansı üzerine farklı sıcaklıkların (150, 300, 450 ve 600°C) etkilerini araştırmışlardır. Numunelerde, 20 ile 150°C sıcaklıklarında dayanım kayıplarının başladığı, 150-300°C sıcaklıklarında az da olsa bir dayanım artışının olduğu, 300-600°C sıcaklıklarında dayanımın kayında artış olduğu ve 600°C üzerinde ise ani dayanım kayıplarının olduğu söylenmiştir. Atashafrazeh [15] ise yüksek sıcaklık altında betonun zarar görebileceği ve istenmeyen yapısal kusurların olabileceğinden bahsetmiştir. Bu kusurların azaltılması için de polipropilen liflerin ilave edilebileceğini söylemiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerde, çubuk polipropilen liflerin yünsü türlerine göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu gözlenmiştir. Lif ilave edilmeyen kontrol numunelerinde ise 600°C üzeri sıcaklıklarda hem çubuksu hem de yünsü liflere göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun sebebinin ise 500°C üzeri sıcaklıklarda polipropilen liflerin erimesi sonucu boşluklu yapı oluşmasının olduğu ifade edilmiştir. Khatip [25] ise çalışmasında, farklı KYB karışımlarının özellikle 600°C’ye maruz kaldıklarında önemli ölçüde dayanımlarının azaldığını gözlemlemiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan KYB’ler, aynı su/çimento oranı ve dayanım sınıfındaki konvansiyonel betonlar ile karşılaştırıldığında daha yüksek tahribata uğradığı vurgulanmıştır ve bu durum daha sıkı mikro yapıya sahip KYB’lerin yüksek sıcaklıkta yüksek iç basınçlarına sahip olmalarından dolayı artan buhar basıncı ile açıklanmıştır [25]. 200°C üzerinde bağlı basınç dayanımında azalmanın ise çimentonun içeriğindeki alüminyum ve demir oksitlerdeki bağlı suyun kaybindan dolayı olabileceğine yorumlanmıştır [25]. Sıcaklık arttıkça da normal şartlarda veya düşük sıcaklıklarda buharlaşmayan bağlı suların uçması tahribatın derecesini artırarak basınç dayanımın azalmasına neden olabilmektedir [25]. Ca(OH)₂ çimento hamurunda bulunan bir bileşik olup sönmemiş kirece dönüşümü (CaO) 400°C civarı sıcaklıklarda olmaktadır. Sönmüş kirecin sönmemiş kirece dönüşmesi sonucu yaklaşık %33 civarında bir büzülme meydana gelebilmektedir. Bu parazit büzülme ve gerilmeler tahribatın derecesini artırmaktadır. 400°C civarındaki sıcaklıklarda C-S-H’ler tahrip olmaya başlamakta ve beton dayanımı hızla azalmakta, 900°C civarında ise C-S-H yapısı tamamen parçalanmaktadır. KYB üretiminde çimento ile uçucu külün birlikte kullanılmasının sebebi, yüksek sıcaklıkta diğer mineral katkılara göre daha iyi performans/dayanım göstermesidir. Bunun sebebi, yüksek sıcaklık ve basınçta uçucu kül ve kirecin reaksiyona girerek tobermolit jelin oluşmasıdır. Bu jel ise C-S-H jeline kıyasla iki ya da üç kat daha dayanıklıdır [26]. Polipropilen lif ilave edilmiş KYB’lerde eğilme dayanımı deneyi, 7×7×28 cm’lik prizma numunelerde basit kiriş metodu ile gerçekleştirilmiştir. Prizma numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5’te 25 °C’ye maruz bırakılan numunelerde lif miktarının eğilme dayanımını olumlu yönde etkilediği ve daha sünek kırıldıkları gözlenmiştir. Prizma numunelerde, kontrol grubu göz önünde bulundurularak diğer grupların sıcaklık ve lif değerlerine göre 28 günlük eğilme dayanımlarındaki kayıp oranları % olarak Şekil 6’da sunulmuştur.



Şekil 5. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan sertleşmiş numunelerin eğilme dayanımları



Şekil 6. Kontrol grubuna göre sıcaklık değişimi ve lif oranına bağlı olarak numunelerin eğilme dayanımlarındaki kayıp oranları (%)

Şekil 6'dan da görüldüğü gibi eğilme dayanımındaki kayıplar, sıcaklık ve lifin miktarının artması ile artış göstermiştir. 250°C sıcaklığında sertleşmiş numunelerde yaklaşık %3-20 arasında kaybın olduğu ve en büyük eğilme dayanım kaybı PPL 1,00 grubunda gerçekleştiği görülmüştür. Sıcaklık 500 °C'ye çıkarıldığında ise kayıpların %38-55 arasında gerçekleştiği ve yine en büyük dayanım kaybının PPL 1,00 grubunda olduğu, lif miktarının artması ile de değişimin arttığı görülmektedir. Yaklaşık %73-86 değerleri ile en büyük değişim ise 750°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde gerçekleşmiştir. Lif içeriği arttıkça da kaybın arttığı ve lif miktarından ziyade sıcaklığın eğilme kaybı üzerinde daha önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda da sıcaklığın, lif miktarından daha önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Öz [27] yürüttüğü çalışmada ise yüksek sıcaklığa maruz bırakılan lifli betonlarda PPL miktarı arttıkça dayanım kaybında da artışların olduğu ve 600°C'de tüm numunelerde önemli ölçüde dayanım kaybı olduğu açıklanmıştır.

Şekil 5-6'dan da görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça eğilmede çekme dayanım sürekli azalmaktadır. Polipropilen lif yaklaşık 170°C'de erimeye başladığı göz önünde bulundurulursa 250, 500 ve 750°C sıcaklıklarına maruz bırakılan betonlarda liflerin erimesinden dolayı kılcal boşlukların oluştuğu söylenebilir. Bu boşluklar ise artan sıcaklıkla eğilme dayanımının düşmesine, büzülme çatlaklarının ve termal hasarların oluşmasına ve matrisin bozulmasına neden olmaktadır. Yangına maruz kalma ihtimali yüksek olan beton/betonarme binalarda polipropilen lif kullanımının uygun olacağı ve özellikle boşluksuz ve yüksek basınç dayanımına sahip betonlarda buhar basıncı sonucu oluşabilecek patlamayla parçalanma riskinin azalabileceğini söyleyebiliriz.

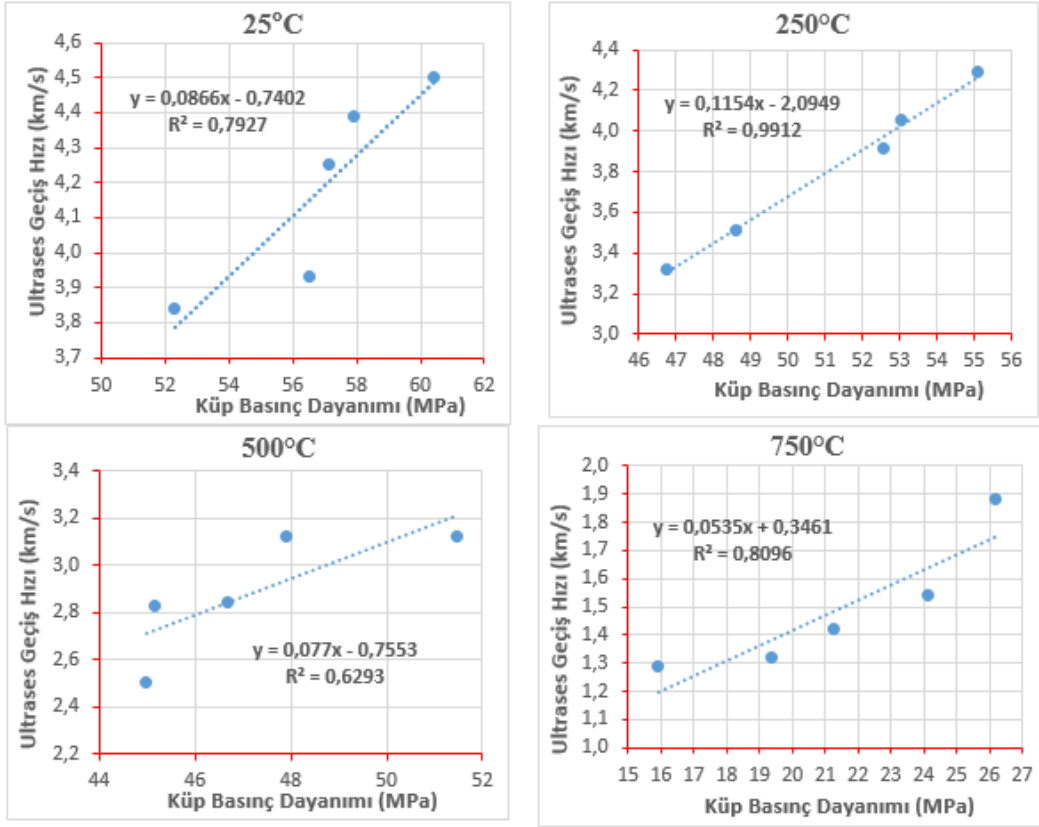
28 günlük 15×15×15 cm'lik küp numunelerde ultrases geçiş hızı (UPV) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçülen ultrases geçiş hızları basınç dayanımları ile Tablo 9'da verilmiştir. Ayrıca her bir sıcaklık için UPV-basınç dayanımı ilişkisi kurulmuştur ve Şekil 7'de verilmiştir. Sıcaklık ile UPV ilişkisi ise Şekil 8 ve 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı

Karışım	25°C		250°C		500°C		750°C	
	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)
Kontrol	60,4	4,5	55,1	4,3	51,5	3,1	26,2	1,9
PPL 0,25	57,9	4,4	53,0	4,1	47,9	3,1	24,1	1,5
PPL 0,50	57,1	4,3	52,6	3,9	46,7	2,8	21,3	1,4
PPL 0,75	56,5	3,9	48,6	3,5	45,1	2,8	19,4	1,3
PPL 0,10	52,3	3,8	46,8	3,3	45,0	2,5	15,9	1,3

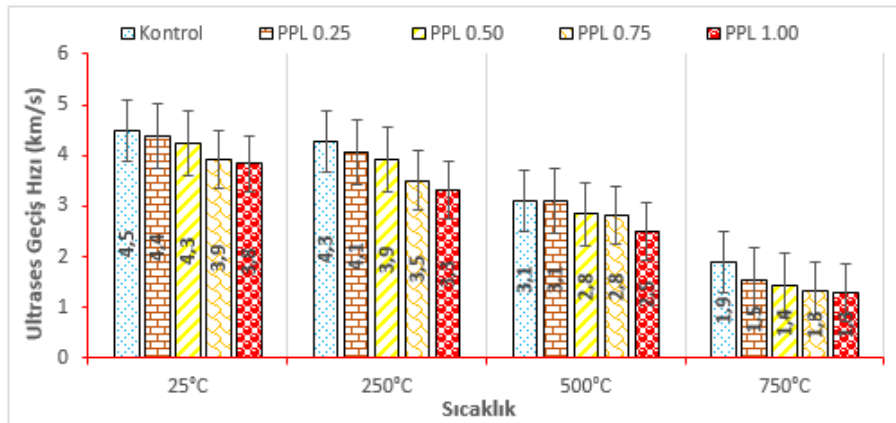
İki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin varlığı, bu ilişkinin yönü ve şiddeti regresyon analizi ile belirlenir. Dört farklı sıcaklık grubundaki betonlarda UPV ve basınç dayanımı ilişkisini belirlemek için regresyon analizi ile R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 7'den de görüleceği üzere R^2 değerlerinin 1'e yakın olduğu ve iyi bir tahminleyici olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hız ölçümleri arasında doğru orantılı bir ilişkinin olduğunu söyleyebiliriz. 250°C'de R^2 değeri en yüksek elde edilmiştir. Diğer sıcaklıklardan ise 25 ve 750°C'de yaklaşık 0,80 elde edilmiştir.

Şekil 7 ve Tablo 9'da KYB'lerde lif içeriği ve sertleşmiş numunelerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça ultrases geçiş hızında azalma olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık artışı ile liflerin erimesi ile betonlardaki boşluk yapının artmasının sonucu olarak basınç dayanımları da azalmıştır. Celep [28] sıcaklık artışı ile lifli betonlarda ultrases geçiş hızlarının daha fazla azaldığı ve bu azalmanın lif miktarı ile doğru orantılı olduğunu açıklamıştır. Ayrıca artan sıcaklık ile polipropilen liflerin erimesi sonucunda da betonda boşluklu yapıların oluştuğu gözlenmiştir.

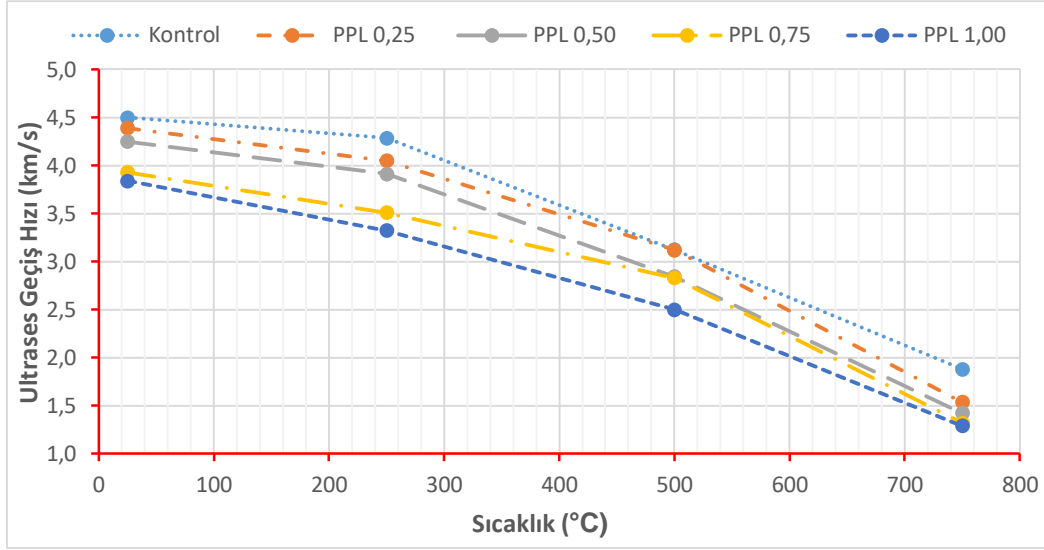


Şekil 7. Farklı sıcaklıkta numunelerin UPV – basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 8-9'da, sıcaklık ve lif miktarı arttıkça ultrases dalgalarının geçiş hızında azalma olduğu, azalmanın 250°C'den sonra hızlı olduğu görülmektedir. Ultrases geçiş hızındaki azalma, lif miktarı ve sıcaklığa bağlı olarak doğru orantılı olarak artmıştır. Farklı çalışmalarda da ultrases geçiş hızlarında azalmalar görülmüştür ve azalmanın sebeplerinin ise beton bünyesindeki boşluk yapıları ve yüksek sıcaklıktan dolayı olduğu açıklanmıştır. Boşluk çapı ve miktarının ise sıcaklığa göre değiştiği ifade edilmiştir [14, 29, 30]. Özellikle de 400°C üzerindeki sıcaklıklarda azalma daha belirginleşmiştir [14]. Bu sonuçlardan ultrases geçiş hızı, yüksek sıcaklıkta oluşan çatlaklardan, boşluklardan etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca sıcaklığın artışı ile oluşan çatlaklardaki ilerlemeden dolayı UPV'de azalmaktadır. Lifsiz betonlara kıyasla PPL'li KYB'lerin UPV'lerinin daha küçük olduğu, lif ilavesinin UPV'yi olumsuz etkilediği ifade edilmiştir [30]. UPV azalma mekanizması, betondaki mikro çatlakların ses dalgalarının geçişini azaltması ile ilgilidir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan betonlarda ise lif oranı arttıkça UPV azalmıştır. Bu ise lifin özgül ağırlığının KYB'li beton özgül ağırlığından daha düşük olmasıdır. Lif ilavesinin numunelerde boşluk oluşumuna neden olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 8. Sıcaklık – ultrases geçiş hızı ilişkisi



Şekil 9. Ultrases geçiş hızının sıcaklığa göre değişimi

4. Sonuç ve Öneriler

Mineral katkı olarak uçucu kül içeren KYB'ye farklı miktarlarda PPL ilave edilerek üretilen KYLB'lerde ve kontrol numunelerinde, taze beton deneyleri (yayılma çapı, T_{50} süresi, V-hunisi akma süresi, bloklanma oranı vb.) ve üretilen sertleşmiş numuneler 4 farklı sıcaklığa maruz bırakılarak basınç ve eğilme dayanımları ile ultrases geçiş hızı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda numunelerde lif miktarı arttıkça, KYLB'nin yayılma çapının azaldığı, T_{50} süresinin uzadığı, betonun işlenebilirliğinin azaldığı ve H2/H1 bloklanma oranlarının da azaldığı gözlenmiştir. Sertleşmiş numunelerde ise, sıcaklık ve lif miktarı arttıkça basınç-eğilmede çekme dayanımlarında ve ultrases geçiş hızlarında azalma olduğu ve dayanım kayıplarının arttığı görülmüştür. Bunun sebebi ise liflerin erimesi ile oluşan boşluk yapılarının sıcaklık artması ile de boşluk miktarının artmasıdır. Boşluk miktarına bağlı olarak da dayanım kayıplarının arttığı düşünülmektedir. Beton basınç dayanımına, hem lif miktarının hem de yüksek sıcaklıkların olumsuz etkisi olduğu ve dayanım kayıplarına sıcaklığın, lif miktarına göre daha önemli bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. 750°C 'de basınç dayanımının kaybının en fazla olduğu ve %57-70 oranlarına ulaştığı gözlenmiştir. Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi belirlemek için gerçekleştirilen regresyon analizinde R^2 değerlerinin 250°C 'de 1'e yakın olduğu ve 25 ile 750°C 'de ise yaklaşık 0,80 olarak elde edilmiştir.

Elde KYLB'lerin 500°C üzerindeki sıcaklıklara karşı dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir. PPL ilavesi ne yüksek sıcaklık direncini arttırmış ne de mekanik özelliklere fayda sunmuştur. Ayrıca işlenebilirlik düşmüştür. Polipropilen lif yüksek sıcaklık altında erimesi sonucu oluşan kanallar beton içerisindeki, buharın bir kısmının tahliyesini sağlayarak buhar basıncını azaltmakta ve patlayarak dağılmaları engellemektedir. Bu çalışmada kontrol karışımında sıcaklığa bağlı patlama şeklinde parçalanma görülmemiştir. Bu sebeple de beton karışımlarında polipropilen lif kullanımı gerekli olmayabilir. Ancak bu çalışmadaki numuneler ince kesitlidir, kalın kesitli numunelerde ihtiyaç olabilir.

Sonuç olarak, gelecek çalışmalarda çelik gibi farklı lif türleri kullanılarak üretilen KYLB'lerin yüksek sıcaklıklara dayanımları araştırılabilir. Taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması yanı sıra renk değişimi ve kırılma şekilleri gibi fiziksel parametrelerde incelenerek daha detaylı çalışmalar yapılabilir.

Yazarların Katkısı

Çalışma Muhammet ADAR'ın yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL, Muhammet ADAR'ın tez danışmanıdır. Muhammet ADAR deneysel çalışmaları danışmanla yapılan planlamaya göre gerçekleştirmiştir. Dr. Elanur ADAR çalışmanın yazımına ve makalenin son aşamaya gelinceye kadar düzeltmelerin yapılmasına katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Korkut F., Türkmenoğlu Z.F., Taymuş R.B., 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.
- [2] Beycioğlu A., 2013. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Beton ile Donatı Aderansı İlişkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [3] Özkul M.H. 2002. Beton Teknolojisinde Bir Devrim: Kendiliğinden Yerleşen-Sıkışan Beton. THBB Hazır Beton Dergisi, 52: 64-71.
- [4] 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.
- [5] Felekoğlu B., Yardımcı M.Y., Baradan B. 2006. Uçucu Külün ve Taş Tozunun Kendiliğinden Yerleşen Betonda Aşınma Direncine Etkileri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 19 (1).
- [6] Sertbaş B. 2006. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Polipropilen Lif Kullanımının İşlenebilirliğe Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Şimşek O. 2009. Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [8] Bingöl A.F. 2008. Beton-Donatı Aderansına Yüksek Sıcaklıkların Etkisi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [9] Gencel O., Özel C., Brostow C., Martínez-Barrera G. 2011. Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced with Polypropylene Fibres. Materials Research Innovations, 15: 216-225.
- [10] Akçay B., Taşdemir M.A. 2012. Mechanical Behaviour and Fibre Dispersion of Hybrid Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete. Construction and Building Materials, 28: 287-293.
- [11] Hossain K., Lachemi M., Sammour M., Sonebi M. 2012. Influence of Polyvinyl Alcohol, Steel, and Hybrid Fibers on Fresh and Rheological Properties of Self Consolidating Concrete. ASCE Journal of Civil Engineering, 24: 1211-122.
- [12] Al-Ameeri A. 2013. The Effect of Steel Fiber on Some Mechanical Properties of Self Compacting Concrete, American Journal of Civil Engineering, 1: 102-110.
- [13] Anand S., Khan M.A., Kumar A. 2016. Effect of Steel Fiber on Self Compacting Concrete: A Review, International Research Journal of Engineering and Technology, 3: 507-510.
- [14] Uysal M. 2012. Self-Compacting Concrete Incorporating Filler Additives: Performance at High Temperatures. Construction and Building Materials, 26: 701-706.
- [15] Atashafraze M. 2013. Polipropilen Lif Takviyeli Betonların Yüksek Sıcaklık Etkilerinden Sonra Basınç Dayanımlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [16] Lotfy A., Hossain K.M., Lachemi M. 2016. Durability Properties of Lightweight Self-Consolidating Concrete Developed with Three Types of Aggregates. Construction and Building Materials, 106: 43-54.
- [17] Zhang C., Ding Y., Cao, M. 2016. Pore Pressure Test for Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete Exposed to High Temperature. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, 39: 35-40.
- [18] Dener M. 2017. Öğütülmüş Pomza Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Lifli Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [19] Cingi R. 2017. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık ve Yangın Etkisinde Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- [20] Abdulhaleem K.N. 2018. Lif Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Yüksek Sıcaklıklardaki Mekanik Davranışı. Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [21] 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.
- [22] TS EN 12504-4, 2004. Beton Deneyleri, Bölüm 4: Ultrases Geçiş Hızının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [23] Mazheripour H., Ghanbarpour S., Mirmoradi S.H., 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.
- [24] Fares H., Noumowe A., Remond S., 2009. Self-Consolidating Concrete Subjected to High Temperature: Mechanical and Physicochemical Properties. *Cement and Concrete Research*, 39 (12): 1230-1238.
- [25] Khatip J.M. 2008. Performance of Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 22: 1963-1971.
- [26] Delikurt B.C., Sevim U.K., 2015. Sugözü Uçucu Külünün Betonun Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4 (1): 47-58.
- [27] Öz A. 2014. Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Hibrid Lifli Betonların Bazı Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [28] Celep G. 2010. Polipropilen Lifli Betonların Isıl Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [29] Alonso C., Andrade C., Houry G.A. 2003. Porosity and Microcracking. Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- [30] Yang H., Lin Y., Hsiao C., Liu J.Y. 2009. Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity. *Fire Safety J.*, 44: 121-130.