

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

**KARMA ÇELİK LİFLİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN  
ELEKTRİKSEL ÖZDİRENCİ ÜZERİNDE LİF KOMBİNASYONU, LİF HACMİ  
VE MİKRO LİF BOYUNUN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Nazlı ÇİÇEK**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**TEMMUZ 2021**

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

**KARMA ÇELİK LİFLİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN  
ELEKTRİKSEL ÖZDİRENCİ ÜZERİNDE LİF KOMBİNASYONU, LİF HACMİ  
VE MİKRO LİF BOYUNUN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Nazlı ÇİÇEK  
(36183621015)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kâzım TÜRK  
Eş Danışman: Prof. Dr. Paki TURĞUT**

**TEMMUZ 2021**

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında benden hiçbir yardımını esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle yanımda olan ve kıymetli vaktini ayırarak beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kâzım TÜRK'e,

Çalışma sürecinde beni her zaman destekleyen, her konuda yardımcı olan ve karşılaştığımız tüm olumsuzlukları bilgi ve deneyimi sayesinde aşmamızı sağlayan eş danışman hocam Sayın Prof. Dr. Paki TURĞUT'a,

Tüm süreç boyunca göstermiş olduğu yardım ve katkılarından ötürü arkadaşım Metin KATLAV'a,

Her zaman olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan, aldığım kararları destekleyerek her daim arkamda duran kıymetli annem Perihan SÖYLEMEZ'e,

Çalışma sürecinde göstermiş oldukları ilgi ve yardımlarından ötürü kuzenlerim Ülkü SÖYLEMEZ'e ve Aslı SÖYLEMEZ'e,

sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP FYL-2020-2148 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve deneysel çalışmalar için sağladıkları desteklerden dolayı SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye teşekkürü borç bilirim.

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Karma Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Elektriksel Özdirenci Üzerinde Lif Kombinasyonu, Lif Hacmi ve Mikro Lif Boyunun Etkisi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Nazlı ÇİÇEK



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....	i
ONUR SÖZÜ.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT .....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Tezin Ana Hatları .....	2
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ .....</b>	<b>4</b>
2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB).....	4
2.1.1 Kendiliğinden yerleşen betonun kullanım alanları.....	4
2.1.2 Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları.....	5
2.1.3 Kendiliğinden yerleşen betonun dezavantajları .....	6
2.1.4 Kendiliğinden yerleşen betonun bileşenleri.....	7
2.1.5 Kendiliğinden yerleşen betonun karışım tasarımı.....	8
2.1.6 Kendiliğinden yerleşen betonların taze hal özellikleri .....	10
2.1.7 Taze beton deneyleri.....	12
2.1.7.1 Çökme-yayılma deneyi.....	13
2.1.7.2 T <sub>500</sub> deneyi.....	14
2.1.7.3 J-halkası deneyi.....	15
2.2 Lif Takviyeli Betonlar .....	16
2.2.1 Lif tipleri .....	17
2.2.2 Çelik lifler .....	18
2.2.3 Liflerin kullanım şekilleri .....	21
2.2.3.1 Tek tip lif takviyesi.....	21
2.2.3.2 Karma lif takviyesi.....	23
2.3 Betonun Elektriksel Özdirenci ve İletkenliği.....	25
2.3.1 Elektriksel özdirenç ve iletkenlik ölçümü.....	26
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>	<b>28</b>
3.1 Malzemeler.....	28
3.1.1 Bağlayıcılar .....	28
3.1.1.1 Çimento.....	28
3.1.1.2 Uçucu kül.....	29
3.1.2 Agregalar.....	29
3.1.3 Kimyasal katkı.....	31
3.1.4 Karışım suyu .....	31
3.1.5 Lifler .....	31
3.2 Karışımların Hazırlanması .....	32
3.3 Numune Boyutları .....	36
3.4 Numunelerin Kürü.....	36
3.5 Deneyler.....	37
3.5.1 Taze beton deneyleri.....	38
3.5.1.1 Çökme-yayılma deneyi.....	38
3.5.1.2 T <sub>500</sub> deneyi.....	38
3.5.1.3 J-halkası deneyi.....	39

3.5.2 Sertleşmiş beton deneyleri.....	39
3.5.2.1 Basınç dayanımı.....	39
3.5.2.2 Yarmada çekme dayanımı.....	40
3.5.2.3 Eğilmede çekme dayanımı ve eğilme performansı.....	41
3.5.2.4 Elektriksel özdirenç deneyi.....	42
3.5.2.5 Isıtma deneyi.....	44
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>45</b>
4.1 Taze Beton Özellikleri .....	45
4.1.1 Çökme-yayıma deneyi.....	45
4.1.2 T <sub>500</sub> deneyi .....	49
4.1.3 J-halkası deneyi.....	49
4.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	52
4.2.1 Basınç dayanımı.....	53
4.2.2 Yarmada çekme dayanımı .....	55
4.2.3 Eğilme performansı.....	56
4.2.3.1 Eğilmede çekme dayanımı.....	57
4.2.3.2 Yük-sehim eğrileri ve eğilme tokluğu.....	58
4.2.4 Elektriksel özdirenç.....	65
4.2.5 Numunelerin ısıtılması .....	68
4.2.6 Elektriksel özdirenç ve iletkenlik ile sıcaklık artışı arasındaki ilişki.....	70
<b>5. SONUÇLAR .....</b>	<b>71</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>74</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>79</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : KYB'nin tasarımına göre önerilen malzeme miktarları.....	8
Çizelge 2.2 : KYB'lere uygulanacak deney metotları.....	12
Çizelge 2.3 : Kendiliğinden yerleşen betonların kabul kriterleri .....	12
Çizelge 2.4 : Kendiliğinden yerleşen betonların yayılma çapına göre sınıflandırılması....	14
Çizelge 2.5 : KYB'lerin yayılımına göre VSI tanımlaması.....	14
Çizelge 2.6 : KYB'lerin T <sub>500</sub> sınıflandırılması.....	15
Çizelge 2.7 : KYB'lerin J-halkasına göre sınıflandırılmaları .....	16
Çizelge 2.8 : Lif takviyeli betonların mekanik özelliklerindeki artış değerleri .....	18
Çizelge 3.1 : Portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	28
Çizelge 3.2 : Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri. ....	29
Çizelge 3.3 : Makro ve mikro çelik liflerin özellikleri.....	31
Çizelge 3.4 : Karışım oranları. ....	34
Çizelge 4.1 : Karışımlara ait işlenebilirlik test sonuçları.....	46
Çizelge 4.2 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait test sonuçları.	54
Çizelge 4.3 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait maksimum yük, sehim, eğilme dayanımı ve tokluk ortalama değerleri.....	57
Çizelge 4.4 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait elektriksel özdirenç deney sonuçları. ....	66
Çizelge 4.5 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait ısıtma deney sonuçları.....	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Kendiliğinden yerleşen betonların kullanım alanları. ....	5
Şekil 2.2 : Kendiliğinden yerleşen betonların avantajları. ....	6
Şekil 2.3 : Kendiliğinden yerleşen betonların dezavantajları. ....	7
Şekil 2.4 : Kendiliğinden yerleşen betonun bileşenleri. ....	7
Şekil 2.5 : Normal beton ile KYB'nin karşılaştırılması. ....	8
Şekil 2.6 : Kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri. ....	9
Şekil 2.7 : Kendiliğinden yerleşen betonların tasarım adımlar. ....	10
Şekil 2.8 : Kendiliğinden yerleşen betonların taze hal özellikleri. ....	11
Şekil 2.9 : Çökme-yayılma deney düzeneği. ....	13
Şekil 2.10 : J-halkası deney düzeneği. ....	15
Şekil 2.11 : Liflerin avantajları. ....	16
Şekil 2.12 : Lif takviyeli betonların kullanım alanları. ....	17
Şekil 2.13 : Lif çeşitleri. ....	17
Şekil 2.14 : Çelik liflerin avantajları. ....	19
Şekil 2.15 : Çelik lifli betonların kullanım alanları. ....	19
Şekil 2.16 : Lif ilaveli betonların yük-deplasman eğrisi. ....	20
Şekil 2.17 : Çelik liflerin sınıflandırılması. ....	20
Şekil 2.18 : Liflerin çatlakları durdurması. ....	21
Şekil 2.19 : Lif takviyeli betonların gerilme-şekil değiştirme grafiği. ....	22
Şekil 2.20 : Çelik liflerin geometrik şekilleri. ....	22
Şekil 2.21 : Çelik liflerin avantajları: a) Makro liflerin avantajları b) Mikro liflerin avantajları. ....	23
Şekil 2.22 : Farklı lif boyutlarının çatlaklar arası köprü oluşturması. ....	24
Şekil 2.23 : Karma lif takviyeli betonların kullanım alanları. ....	24
Şekil 2.24 : Elektriksel özdirenç ölçüm düzeneği. ....	27
Şekil 3.1 : Agreganın karışım granülometrisi. ....	30
Şekil 3.3 : Kullanılan düşey eksenli mikser. ....	35
Şekil 3.4 : Karışımların hazırlanmasında takip edilen adımlar. ....	36
Şekil 3.5 : Numune şekilleri ve boyutları. ....	36
Şekil 3.6 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin kür edilmesi. ....	37
Şekil 3.7 : Lifsiz referans, tek lifli, ve karma lifli KYB numunelerine uygulanan deneyler. ....	37
Şekil 3.8 : Çökme-yayılma ve $T_{500}$ süresi testi. ....	38
Şekil 3.9 : J-halkası ve $T_{500}$ süresi testi. ....	39
Şekil 3.10 : Basınç dayanım testi. ....	40
Şekil 3.11 : Yarmada çekme dayanım testi. ....	41
Şekil 3.12 : Eğilmede çekme dayanım testi. ....	42
Şekil 3.13 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin elektriksel direncinin belirlenmesi a) Numunelerin hazırlanması b) İki problu elektriksel direnç deney düzeneği. ....	43
Şekil 3.14 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin elektrik akımı ile sıcaklık artışını belirlenmesi: a) Isıtma deneyi düzeneği b) Numunelerin sıcaklık ölçümü. ....	44
Şekil 4.1 : Karışımların yayılma çapları ve $T_{500}$ süreleri. ....	47
Şekil 4.2 : Lifsiz referans ve tek lifli KYB karışımlarına ait VSI değerlendirmesi. ....	48
Şekil 4.3 : Karma Lifli KYB karışımlarına ait VSI değerlendirmesi. ....	49
Şekil 4.4 : Karışımlara ait J-halkalı çökme-yayılma çapı ( $D_j$ ) ile yükseklik farkı ( $\Delta H$ ) değerleri. ....	50



<b>Şekil 4.5</b> : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarına ait J-halkalı çökme-yayımla görselleri.....	<b>52</b>
<b>Şekil 4.6</b> : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin basınç dayanım değerleri. ....	<b>55</b>
<b>Şekil 4.7</b> : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin yarmada çekme dayanım değerleri.....	<b>55</b>
<b>Şekil 4.8</b> : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin eğilmede çekme dayanım değerleri.....	<b>57</b>
<b>Şekil 4.9</b> : Toplamda %1 lif içeren tekli ve karma lifli karışımların yük-sehim eğrileri....	<b>59</b>
<b>Şekil 4.10</b> : Toplamda %1.25 lif içeren tekli ve karma lifli karışımların yük-sehim eğrileri	<b>59</b>
<b>Şekil 4.11</b> : Toplamda %1.5 lif içeren tekli ve karma lifli karışımların yük-sehim eğrileri	<b>60</b>
<b>Şekil 4.12</b> : Tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait tokluk değerleri.....	<b>61</b>
<b>Şekil 4.13</b> : Dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmış lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin çoklu çatlak davranışları.....	<b>65</b>
<b>Şekil 4.14</b> : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait; a) Elektriksel özdirenç b) İletkenlik değerleri. ....	<b>67</b>
<b>Şekil 4.15</b> : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin 30. dakikadaki sıcaklık artışı değerleri.....	<b>69</b>
<b>Şekil 4.16</b> : Tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin; a) Sıcaklık artışı-elektriksel özdirenç ilişkisi b) Sıcaklık artışı-iletkenlik ilişkisi. ....	<b>70</b>

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

<b>KYB</b>	: Kendiliğinden yerleşen beton
<b>SCC</b>	: Self-consolidating concrete
<b>KÇLT-KYB</b>	: Karma çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton
<b>EFNARC</b>	: European specification for sprayed concrete
<b>T<sub>500</sub></b>	: Yayılma süresi
<b>T<sub>500J</sub></b>	: J-halkalı yayılma süresi
<b>ΔH</b>	: Yükseklik farkı
<b>Dç</b>	: Çökme-yayılma çapı
<b>Dj</b>	: J-halkalı çökme-yayılma çapı
<b>R<sup>2</sup></b>	: Korelasyon katsayısı
<b>SFR-SCC</b>	: Steel fiber reinforced self-compacting concrete
<b>S/B</b>	: Su/Bağlayıcı Oranı
<b>VSI</b>	: Visual Stability Index
<b>P</b>	: Elektriksel özdirenç (kΩ*m)
<b>C</b>	: İletkenlik (S/m)
<b>L</b>	: Bakır elektrotlar arası mesafe (m)
<b>R</b>	: Direnç (Ω)
<b>I</b>	: Akım (amper)
<b>A</b>	: Numunenin alanı (m <sup>2</sup> )
<b>PÇ</b>	: Portland Çimentosu
<b>UK</b>	: Uçucu Kül
<b>Pi</b>	: Elekten geçen yığılımlı yüzde
<b>di</b>	: Elek ebatları
<b>D</b>	: Maksimum agrega tane çapını
<b>LFSZ-REF</b>	: Lif içermeyen referans numune
<b>MAK</b>	: Makro lif içeren numune
<b>MİK</b>	: Mikro lif içeren numune
<b>MİK6</b>	: 6 mm uzunluğundaki mikro lifi içeren numune
<b>MİK13</b>	: 13 mm uzunluğundaki mikro lifi içeren numune
<b>DYK</b>	: Doygun yüzey kuru
<b>LVDT</b>	: Deplasman ölçer
<b>DC</b>	: Doğru akım
<b>σ</b>	: Eğilme dayanımı (MPa)
<b>F</b>	: Maksimum yük (N)

- l** : İki mesnet arasındaki açıklık (mm)  
**b** : Numunenin genişliği (mm)  
**h** : Numunenin yüksekliği (mm)  
**V** : Gerilim (volt)  
 **$\Delta t$**  : Sıcaklık Artışı ( $^{\circ}\text{C}$ )



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KARMA ÇELİK LİFLİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN ELEKTRİKSEL ÖZDİRENCİ ÜZERİNDE LİF KOMBİNASYONU, LİF HACMİ VE MİKRO LİF BOYUNUN ETKİSİ

Nazlı ÇİÇEK

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

78+XI sayfa

2021

Danışman: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden beton, yüksek mekanik özelliklere sahip olmasına karşın iyi bir iletken malzeme değildir. Betona çelik lifler takviye edilerek betonun elektriksel iletkenliğine ve mekanik özelliklerine katkısı üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, karma çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (KÇLT-KYB) numunelerin elektriksel özdirencinin farklı lif kombinasyonu, lif oranı ve mikro lif boyuna bağlı olarak nasıl değiştiğini tespit etmek için 10 adet karışım tasarlanmıştır. Bu amaçla, lif içermeyen referans numune, sadece makro çelik lif içeren tek lifli ve farklı oranlarda (% 1, % 1.25, % 1.5) makro ve mikro (6 ve 13 mm boylarında iki farklı tip) çelik lif içeren karma lifli karışımlardan numuneler üretilmiştir. Çelik lif kombinasyonu ve hacmi ile mikro çelik lif tipinin KYB numunelerine elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için tüm karışımlara ait bileşenler akışkanlaştırıcı dışında sabit tutulmuştur. Karışımların kendiliğinden yerleşebilirliklerini belirleyen taze beton testleri (çökme-yayıma deneyi,  $T_{500}$  deneyi ve J-halkası deneyi) ile 90 günlük sertleşmiş beton (basınç, yarmada çekme, dört noktalı eğilmede çekme dayanımı ile elektriksel özdirenç ve ısıtma) testleri yapılmıştır. Sonuç olarak, KYB karışımlarına takviye edilen çelik lif oranının artmasıyla karışımların; çökme-yayıma çapı ( $D_c$ ), J-halkalı çökme-yayıma çapı ( $D_j$ ) ile yayılma süreleri ( $T_{500}$ ) değerlerinde azalma, yükseklik farkı ( $\Delta H$ ) değerlerinde ise artma olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, karışımlara ilave edilen çelik lif hacminin artmasıyla numunelerin basınç dayanımları genelde azalırken, yarmada çekme, eğilmede çekme dayanımı ve tokluk değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, tüm lif oranları için 13 mm boyunda mikro çelik lif içeren karma lifli karışımlara ait numunelerin elektriksel özdirenci, 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karma lifli karışımlara kıyasla daha düşük iken, iletkenliğinin ve ısınmasının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çelik lif takviyeli KYB numunelerinin sıcaklık artışı ile elektriksel özdirenç arasında  $R^2=0.76$  ve sıcaklık artışı ile iletkenlik arasında  $R^2=0.81$  ile iyi bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** KYB, Çelik lif, İşlenebilirlik, Mekanik özellikler, Elektriksel özdirenç, Sıcaklık artışı

## ABSTRACT

Master Thesis

### THE EFFECT OF FİBER COMBİNATION, FİBER VOLUME AND MİCRO FİBER LENGTH ON THE ELECTRICAL RESİSTİVİTY OF THE HYBRİD STEEL FİBER REİNFORCED SELF-COMPACTİNG CONCRETE

Nazlı ÇİÇEK

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

78+XI sayfa

2021

Supervisor: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Concrete, which is one of the commonly used building materials, is not a good conductive material despite its high mechanical properties. Many studies have been performed on the contribution of steel fibers to the concrete's electrical conductivity and mechanical properties. Within the scope of this thesis, 10 mixtures were designed to determine how the electrical resistivity of steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFR-SCC) samples changes depending on different fiber combinations (single and binary hybrid), fiber ratio by volume (1%, 1.25%, 1.5%) and micro fiber length (6 mm and 13 mm). For this purpose, one non-fiber reference sample, three single fiber reinforced SCC with only macro steel fiber and six binary hybrid steel fiber reinforced SCC containing macro and two different types micro steel fibers were produced. In order to observe the effect of steel fiber combination and volume and micro steel fiber type on the electrical properties of SCC samples, the workability properties were adjusted by plasticizer and thus, all components of mixtures were kept constant except for the plasticizer. Fresh concrete tests (slump-flow,  $T_{500}$  and J-ring tests) were carried out as per EFNARC to determine the self-compactability of the mixtures while 90-day samples were tested to find the properties of electrical resistivity and heating of steel fiber reinforced SCC as well as the compressive, splitting tensile and flexural strength. As a conclusion, with the increase of the steel fiber ratio, it was observed that there was a decrease in the slump-flow diameter ( $D_{\phi}$ ), the J-ring slump-flow diameter ( $D_j$ ) and time to 500 mm flow ( $T_{500}$ ) while the height difference ( $\Delta H$ ) values increased. On the other hand, when the inclusion of steel fiber volume into mixtures increased the splitting, flexural tensile strength and toughness values increased but the compressive strength generally affected negatively. Moreover, for all fiber ratios, the electrical resistivity of binary hybrid steel fiber reinforced SCC containing 13 mm micro steel fiber was lower than that of binary hybrid steel fiber reinforced SCC containing 6 mm micro steel fiber as well as its high conductivity and heating. In addition to all these, there were a good correlation between electrical resistivity-temperature rise and conductivity-temperature rise of the steel fiber reinforced SCC samples with  $R^2=0.76$  and  $R^2=0.81$ , respectively.

**Keywords:** SCC, Steel fiber, Workability, Mechanical properties, Electrical resistivity, Temperature rise

## 1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe kullanılan en yaygın yapı malzemesi betondur. Günümüzde betonun hem taze haldeki özelliklerinin (yüksek işlenebilirlik, homojenlik ve akıcılık) hem de sertleşmiş özelliklerinin (yüksek dayanım, dayanıklılık ve durabilite) gelişmiş olması istenmektedir [1]. Teknolojinin ilerlemesi ve yapısal ihtiyaçların farklılaşmasıyla geleneksel beton geliştirilerek kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üretilmiştir [2]. Özellikle, taşıyıcı elamanlarda kullanılan yoğun donatı nedeniyle KYB kullanımını önem kazanmıştır. [3]. KYB, yoğun donatılı veya dar kesite sahip elamanlarda segregasyona uğramadan homojen bir şekilde ve vibrasyona ihtiyaç duymadan kendi ağırlığı ile yayılabilen özel bir betondur [4]. KYB'nin yüksek akıcılığa ulaşmasını sağlamak ve su/bağlayıcı oranını düşürmek için yüksek oranda su azaltıcı katkılarına ihtiyaç duyulmaktadır [2]. KYB'nin akışkanlığı sağlanırken segregasyon ve su kasma (terleme) gibi olumsuz durumlar istenmemektedir. Betonun kararlılığını (ayırışma direnci) bozmamak adına ince malzeme miktarını arttırmak gerekmektedir. Bu amaçla betona uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi ince malzemeler eklenmektedir [5], [83]. Betona çimentoyla yer değiştirerek eklenen uçucu kül hem çimentonun hidrasyon, rötre gibi olumsuz etkilerini yok etmekte hem de maliyeti azaltmaktadır [6].

Beton gevrek bir yapı malzemesidir ve çekme dayanımı çok düşüktür. Betonun olumsuz bu özelliğini iyileştirebilmek ve onu sünek hale getirebilmek için betona çelik lifler eklenmektedir [7]. Çelik lifli KYB üretilmesindeki amaç, sertleşmiş betonun yarmada çekme, eğilme dayanımlarını arttırmak ve betonda çatlak oluşumunu kısıtlamaktır [8]. Betonda, farklı boyutlarda (makro ve mikro) lifler kullanılarak çatlak gelişimleri kontrol edilebilir. Makro lifler makro çatlakları, mikro lifler mikro çatlakları azaltmak amacıyla kullanılmaktadır [9]. Çatlaklar kontrol edilerek betonun geçirimsizliği azaltılıp, betonun dayanıklılığının yanında mekanik özellikleri de iyileştirilerek geliştirilmiş olur [2]. Lifli kendiliğinden yerleşen betonların normal betona göre üstün özellikleri bulunması nedeniyle, daha geniş alanlara yayılma imkanı bulmuştur. Örneğin, havaalanı pistleri, nükleer enerji santralleri, tüneller, köprüler, prefabrik elamanlar, askeri yapılar, su yapıları ve altyapı elamanları bu alanlardan bazılarıdır [11].

Elektrik yüklerinin serbestçe hareket edebildiği cisimlere iletken madde denir. Bir malzemenin iletkenliği elektriksel öz direncine bağlıdır. Elektriksel iletkenlik değeri ile elektriksel öz direnç değeri arasında ters orantı vardır. Çimento esaslı kompozit malzemelerden betonun elektriksel öz direnci çok yüksektir ve yalıtkan özellik

göstermektedir. Betonun özdirencini düşürüp iletken hale getirebilmek için içerisine lifler ilave edilmektedir [12]. Betonun iletken hale getirip ısınmasını sağlayarak buzlanma önlenmektedir. Havaalanı pistleri, köprüler, karayolları gibi alanlarda kışın oluşabilecek kar birikintileri ve buzlanma önlenerek insan yaşamına olan olumsuz etkiler giderilebilmektedir [13]. Betona liflerin takviye edilmesi elektriksel özdirenci düşürür ve betonu iletken hale getirir. Maddenin fiziksel özelliklerinden olan elektriksel özdirenç, çeşitli elektriksel ve elektromanyetik yöntemlerle belirlenir. Çimento esaslı kompozit malzemelerin elektriksel özdirençleri 2 veya 4 problu elektrot test yöntemiyle belirlenir [14]. Çimento esaslı kompozitlerin elektriksel özdirencinin ölçülmesinde kullanılan iki problu elektrot yöntemi laboratuvar temelli ve güvenilirdir. Ayrıca literatürde yapılmış çalışmalarda iki problu elektriksel iletkenlik ölçüm yönteminin yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir.

### **1.1 Tezin Amacı**

Özellikle kış mevsiminin çok şiddetli geçtiği bölgelerde trafik açısından araçların yapacağı kazaları önlemek ve araç sahipleri için konforlu bir kullanım sağlamak ve havaalanı pistlerinde yine kar yağışlarının olumsuz etkisini gidererek uçaklara iniş kolaylığı sağlayabilmenin çok büyük bir öneme sahip olduğu açıktır. Bu tez çalışmasında da elektriksel özdirenci düşük olan hem işçilik açısından hem de kalite bakımından avantajlı inovasyon bir beton olan karma çelik lif takviyeli KYB tasarlanması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda ilave edilmesi hedeflenmektedir.

EFNARC tarafından belirlenmiş olan işlenebilirlik kriterleri esas alınarak farklı lif oranına sahip karışımlar elde edilecektir. Elde edilen karışımlara ait taze ve sertleşmiş beton özellikleri incelenecektir. Lif içermeyen referans betona göre, farklı oranlarda lif içeren karışımlardan üretilen beton numunelerin elektriksel özdirençlerinin daha düşük olması amaçlanan hedef açısından yeterli olacaktır. Taze ve sertleşmiş beton özellikleri uygulanabilir olan karışımların elektriksel özdirençleri araştırılarak elektriksel özdirenci düşük olan başarılı bir kompozit oluşturmak ve literatürde konuyla ilgili boşluklara katkı sağlamak da akademik açıdan kazanım olarak değerlendirilebilir.

### **1.2 Tezin Ana Hatları**

Yapılan tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır.

İkinci bölümde kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) tanımı ve EFNARC (2002)'de belirtilen işlenebilirlik deneyleri tanıtılmıştır. Çelik lif özellikleri anlatılarak çimento esaslı kompozitlere sağladığı üstünlüklerden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, çimento esaslı kompoziti oluşturan malzemeler (agrega, çimento, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı, makro çelik lif, mikro çelik lif) hakkında bilgi verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan düzenekler, cihazlar ve yöntemler anlatılmıştır. İşlenebilirlik testleri sonucunda belirlenen karışım oranları verilmiştir. Çimento esaslı kompozitin taze ve sertleşmiş özelliklerini belirlemek için kullanılan deney yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez çalışması için yapılan deneylerin sonuçları hakkında bilgi verilmiş ve sonuçlar mevcut literatürde bulunan çalışmalar ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde, tez çalışması boyunca yapılan bütün deneylerin sonuçları özetlenerek verilmiştir.

Ekler bölümünde, çimento esaslı kompozitin elektriksel direnç testi görselleri sunulmuştur.



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

### 2.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı ile hareket ederek istenilen şekilde akıp donatı boşluklarını dolduran ve bunu yaparken de terleme ve segregasyona uğramayan özel bir betondur [17]. KYB, 1986 yılında Okumara tarafından geliştirilmiştir. KYB, Japonya'da 1980'lerin ortalarında bulunduktan sonra 1990'ların sonlarına doğru Avrupa'da gelişimine devam etmiştir. KYB'nin Japonya'da başarılı sonuçlar vermesi Avrupa'nın dikkatini çekmiştir. İsveç Avrupa'da KYB'yi geliştiren ilk ülkedir. Daha sonra araştırmayı İskandinav ülkeleri devam ettirmiştir [18]. KYB, üstün özellikleri sayesinde günümüzde yaygınlaşarak kullanılmaya devam etmektedir. KYB, hem şantiyede üretilmeye hem de prefabrike olarak üretilmeye olanak sağlamaktadır. Ayrıca lif katkılı beton olarak kullanılabilir [19]. Kendiliğinden yerleşen betonun inşaat süresi geleneksel betona göre kısadır. KYB yüksek akıcılığı ile donatılar arasından geçerek kalıbı hızlı bir şekilde doldurabilir. Böylelikle erken dayanıma, erken kalıp almaya ve yapının hızlı bir şekilde bitirilip kullanılmasına olanak sağlar [20].

KYB'ler yüksek akıcılık sağlarken ayrışma ve su kuma gibi olumsuz sonuçlar doğurmamalıdır. Bu tür olumsuz sonuçlardan uzak durmak ve betonun kararlılığını bozmamak için ince malzeme miktarı artırılır ve süper akışkanlaştırıcı ilave edilir. Bu sayede KYB'ler düşük su/çimento oranında yüksek dayanım ve dayanıklılık gösterdiği için yüksek dayanımlı beton sınıfına dahil olmaktadır [21].

#### 2.1.1 Kendiliğinden yerleşen betonun kullanım alanları

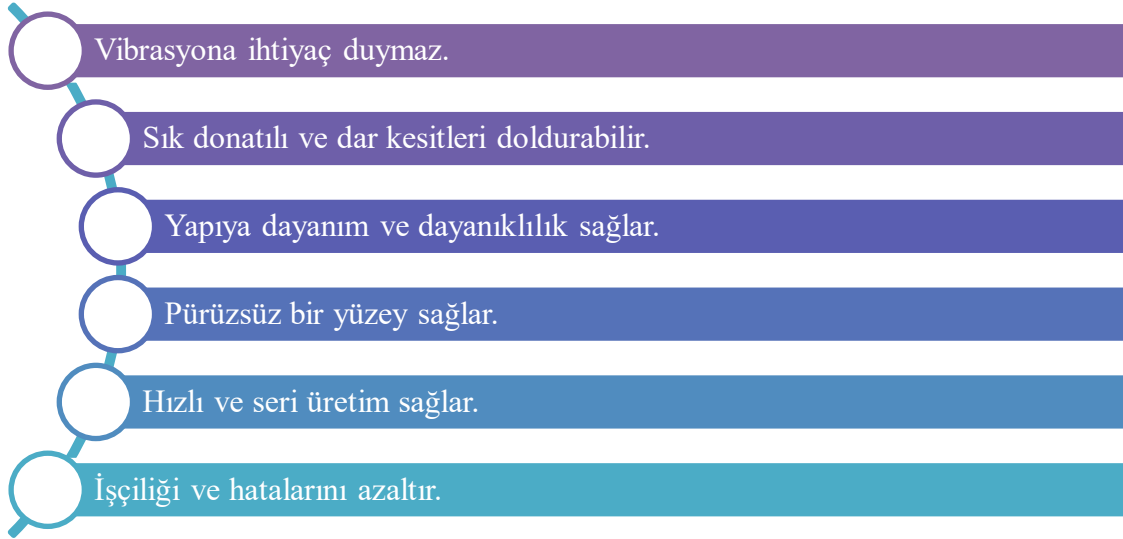
KYB'ler üstün özellikleri sayesinde geniş kullanım alanlarına sahiptir. KYB; teknik, ekonomik ve dayanıklılık gibi avantajlara sahip olmakla beraber geleneksel betonun ulaşamadığı dar kesitli alanlara çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır [22]. Bu kullanım alanları Şekil 2.1'deki gibi özetlenebilir.

Güçlendirme projeleri	Sık donatılı elamanlar	Zor ve ulaşılmaz kalıplar	Vibratör kullanılmayan yerler
Estetik tasarımlar / Detaylı kalıplar	Prefabrik elamanlar	Mimari paneller	Cephe elamanları
Geniş / Yüksek yapı elamanları	Köprü ve Viyadükler	Yapı elamanları	Hazır beton / Saha betonu

**Şekil 2.1 :** Kendiliğinden yerleşen betonların kullanım alanları.

### 2.1.2 Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları

Kendiliğinden yerleşen beton kendi ağırlığı ile hareket ettiği için vibrasyona ihtiyaç duymamaktadır. Bu sayede işçilik hataları ve gürültü kirliliği önlenmiş olur. KYB'ler, sık donatılı ve dar kesitli elamanlarda yüksek akıcılığı ile boşlukları doldurarak yerleşir. Yapı elamanı boşluksuz üretilerek elamanın dayanım ve dayanıklılığı artırılmış olur. KYB'ler belirli bir noktadan döküm imkanı sağladığı için güçlendirme projelerinde geleneksel betona göre büyük uygulama kolaylığı sağlamaktadır. Ayrıca KYB'ler, prefabrik imalatlarda üretim kolaylığı sağlarlar. İnşaat hızında artış sağlarlar. Yapım aşaması kolay ve pratik olduğu için geleneksel betona kıyasla taşıyıcı elamanların üretim süresini 1/5 oranında kısaltırlar. KYB'ler de süper akışkanlaştırıcıların kullanılması düşük S/B oranına rağmen işlenebilirliği yüksek tutar. Bu sayede yüksek mukavemetli homojen bir beton üretilmiş olur. Kendiliğinden yerleşen betonların avantajları özet olarak Şekil 2.2'de sıralanmıştır.



**Şekil 2.2 :** Kendiliğinden yerleşen betonların avantajları.

### **2.1.3 Kendiliğinden yerleşen betonun dezavantajları**

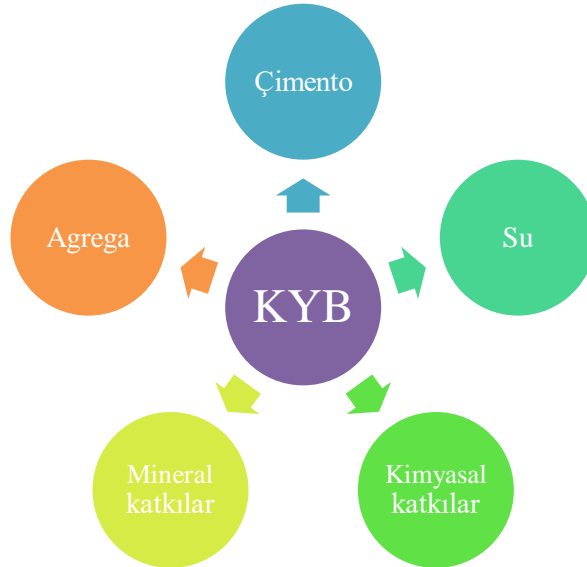
KYB'lerin birçok avantajı olmasının rağmen olumsuz tarafları da bulunmaktadır. Bu durumlar Şekil 2.3'te sıralanmıştır. KYB'lere kimyasal katkıları ilave edildiği için geleneksel betona kıyasla maliyeti artmaktadır. KYB'nin kararlılığını sağlamak için ince malzeme miktarını arttırmak ve süper akışkanlaştırıcı kullanmak gerekmektedir. Arttırılan ince malzeme dozajı sebebiyle KYB'nin hidrasyon ısı artar ve plastik büzülme çatlak riski ortaya çıkar. Ayrıca karışıma eklenen ince malzeme ve akışkanlaştırıcı sebebiyle maliyet artmaktadır. KYB'nin tasarım, üretim ve uygulama aşamasında büyük hassasiyet gerekmektedir. Özellikle sağlam bir kalıplama istemektedir. Taşınması için geleneksel betondaki yöntemlerin modifiye edilerek geliştirilmesi gerekmektedir.



**Şekil 2.3 :** Kendiliğinden yerleşen betonların dezavantajları.

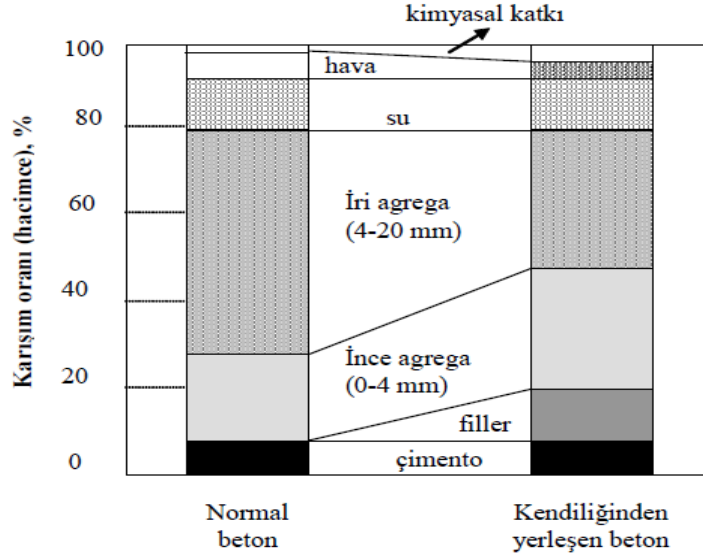
#### 2.1.4 Kendiliğinden yerleşen betonun bileşenleri

KYB'ler geleneksel betonda kullanılan tüm bileşenleri içerebilir. Geleneksel betondan farklı olarak karışıma kimyasal katkılar ilave edilmektedir. KYB'de kullanılacak malzemelerin özellikleri, genel olarak TS EN 206-1 standardında belirtilen koşullara uygun olmalıdır [23]. Özet olarak KYB'de kullanılan malzemeler Şekil 2.4'deki gibidir.



**Şekil 2.4 :** Kendiliğinden yerleşen betonun bileşenleri.

Kendiliğinden yerleşen beton ve geleneksel beton tasarımında hacimce farklılıklar bulunmaktadır. KYB’lerde akıcılığı sağlamak için iri agrega miktarı geleneksel betona göre daha az kullanılıp yerini ince agregalara bırakmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Normal beton ile KYB'nin karşılaştırılması [24].

### 2.1.5 Kendiliğinden yerleşen betonun karışım tasarımı

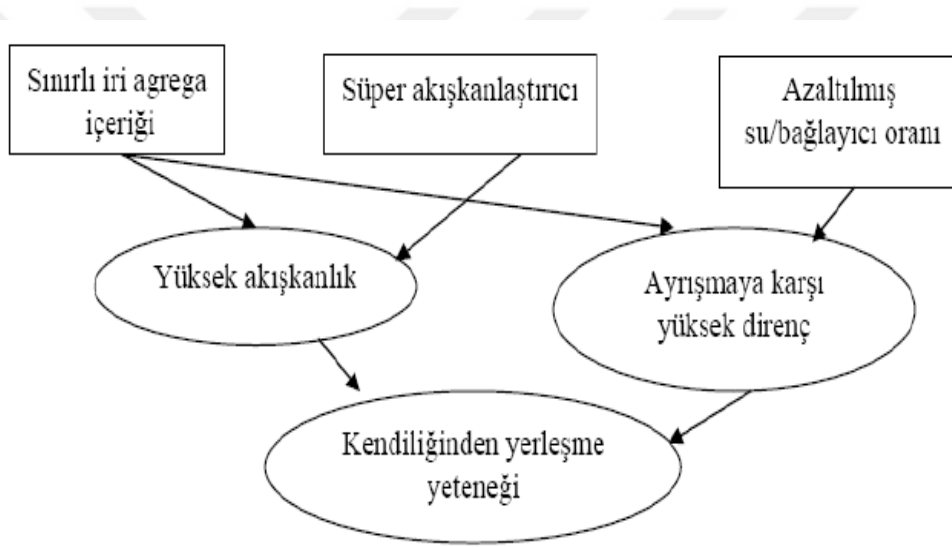
Kendiliğinden yerleşen betonların tasarımında amaç segregasyon ve terleme oluşmadan 650-800 mm çapında yayılmayı sağlamaktır. EFNARC bu şartı sağlamak için belli kriterler koymuştur (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 : KYB'nin tasarımına göre önerilen malzeme miktarları [25].

Malzeme	Miktarı
İnce Malzeme Miktarı (<0,125 mm)	400-600 kg/m <sup>3</sup>
Kum Miktarı (0.125 mm-4 mm)	Harç hacminin %40'ı
İri Agrega Miktarı (Dmax=15)	Gerçek birim ağırlığın %50'si
Uçucu Kül Miktarı	İnce malzeme miktarının %40'ı
Su/Toz malzeme	0.9-1.0 (hacimsel olarak)

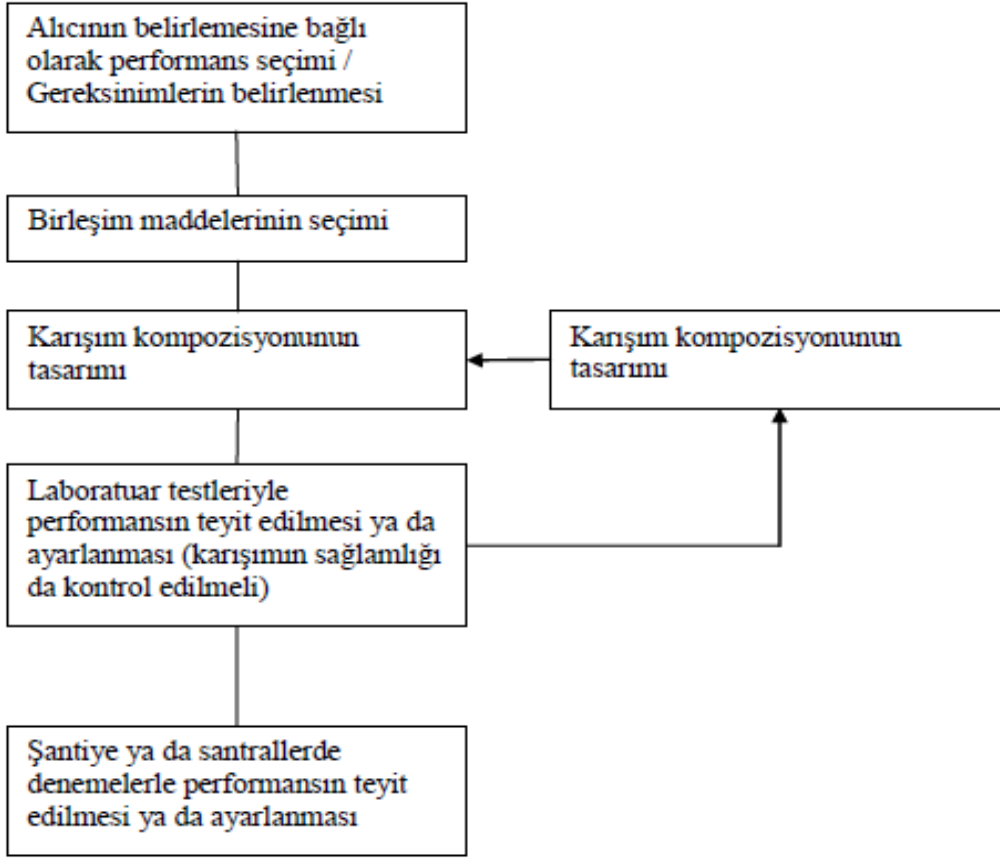
KYB'nin yüksek akıcılık gösterirken segregasyona ve terlemeye uğramaması istenmektedir. Bu özellikleri sağlaması için tasarımında dikkat edilmesi gereken noktalar bulunmaktadır. Şekil 2.6'da özetlenen özellikleri incelersek; KYB'lerde ince malzeme miktarı fazla olmalıdır. S/B oranını belirlerken çok dikkat etmek gerekmektedir. Eğer bu

oran çok yüksek olursa taze beton akış durumundayken iri ve ince agregaların ayrışmasına sebep olur. S/B oranının düşük olması ise kompozit karışımda deformasyona sebebiyet verebilir [26]. Kendiliğinden yerleşen beton tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer husus ise iri agra miktarı ve tane çapıdır. Akışkanlığı sağlamak ve içsel sürtünmeyi azaltmak için agra miktarını azaltıp hamur hacmini arttırmak gerekmektedir. Betonda mineral katkı maddesi kullanılarak ince malzeme miktarının artırılması içsel sürtünmeyi azaltarak kayma direncini düşürür [26]. Mineral katkıların kullanılması karışımın viskozitesinin bozulmasının önüne geçer. Akışkanlık sağlanırken S/B oranını düşük tutmak önemlidir. Bu oranı düşürmek için karışıma kimyasal katkı maddeleri eklenir. Süper akışkanlaştırıcılar çimento tanelerini dağıtarak taneler arasındaki sürtünmeyi azaltır ve bu sayede akıcılığı sağlar.



**Şekil 2.6 :** Kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri [26].

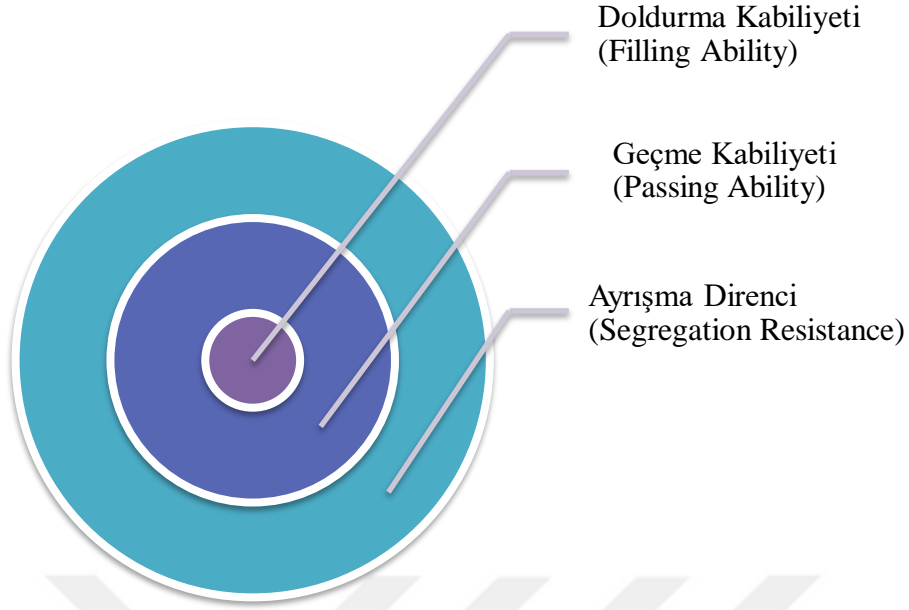
Kendiliğinden yerleşen beton tasarlanırken, stabilitesini korumak ve işlenebilirliğini sağlamak için malzeme çeşit ile miktarlarına çok dikkat etmek gerekmektedir. Tasarımdaki amaç, segregasyon ve terleme gibi olumsuz durumlarla karşılaşmadan işlenebilirliği sağlamaktır. Karışım tasarlanırken karşılaşılan herhangi bir olumsuzluk ileriki zamanlarda betonun dayanım ve dayanıklılığını düşürmektedir [4]. Karışım reçetesi hazırlanırken kompozitin taze ve sertleşmiş durumları için beklenen performans kriterlerini karşılayacak şekilde olmasına dikkat edilmelidir. KYB tasarlanırken izlenecek adımlar Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Kendiliğinden yerleşen betonların tasarım adımları [27].

### 2.1.6 Kendiliğinden yerleşen betonların taze hal özellikleri

Kendiliğinden yerleşen betonların taze haldeyken karşılamaları gereken özellikler Şekil 2.8’de şematize edilmiştir.



**Şekil 2.8 :** Kendiliğinden yerleşen betonların taze hal özellikleri.

Kendiliğinden yerleşen betonun taze hal özellikleri ileriki zamanlarda mekanik özelliklerini etkilemektedir. KYB'nin doldurma kabiliyeti, geçme kabiliyeti ve ayrışma direnci taze haldeyken karşılaması gereken özelliklerindedir.

1. Doldurma yeteneği: KYB'nin kendi ağırlığı ile şeklini değiştirerek kalıptaki boşluklara akabilme yeteneğidir. Betonun boşaltıldığı noktadan uzaklaşabileceği maksimum mesafe ve akış hızını kapsayan doldurma yeteneği çökme-yayılma deney yöntemi ile ölçülür. Doldurma kabiliyetinin geliştirilmesi için içsel sürtünmenin azaltılması gerekir. Bunu sağlamak için de ya betonun S/B oranı arttırılmalı yada karışıma kimyasal katkılar ilave edilmelidir. Böylece çimento hamur fazının deformasyon yeteneği arttırılarak uygun doldurma yeteneği elde edilmiş olur.
2. Geçme kabiliyeti: KYB'nin dar kesitli elamanlar veya yoğun donatılar arasından segregasyona uğramadan geçebilme yeteneğidir. Agregaların tıkanma yapmadan ilerleyebilmesi için iri agrega tane çapı ve miktarı düşürülerek tıkanma riski ortadan kaldırılmış olur.
3. Ayrışma direnci: Taze betonun karıştırma, taşıma ve dökme aşamalarında homojenliğini koruyarak süspansiyon halinde kalabilme yeteneğidir.

Ayrışma direncini yüksek tutmak için azaltılmış maksimum agrega tane çapı, minimum S/B oranı ve viskozite arttırıcı katkı maddeleri kullanması tavsiye edilmektedir. KYB'nin



taze hal özelliklerin belirlenebilmesi için tüm dünyaca kabul görmüş deneyler yapılmaktadır. Bu deney yöntemleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.2 : KYB’lere uygulanacak deney metotları [27].**

Özellik	Test Metodu
Doldurma Yeteneği	Çökme - Akma Deneyi
Viskozite	T <sub>500</sub> / V Hunisi Deneyi
Geçme Oranı	L Kutusu Deneyi
Ayrışma Direnci	Elek Ayrışması Deneyi

### 2.1.7 Taze beton deneyleri

KYB’nin taze hal özelliklerini belirlemek için birtakım deney yöntemleri belirlenmiştir. Kendiliğinden yerleşen betonların işlenebilirlik ve engeller arasından geçebilme kabiliyetinin belirlenebilmesi için Çökme-yayılma, J-halkası ve T<sub>500</sub> testleri geliştirilmiştir. Karışımların KYB olarak kabul edilebilmesi için EFNARC’ın belirlediği ve Çizelge 2.3’te gösterilen kriterleri sağlaması gerekmektedir.

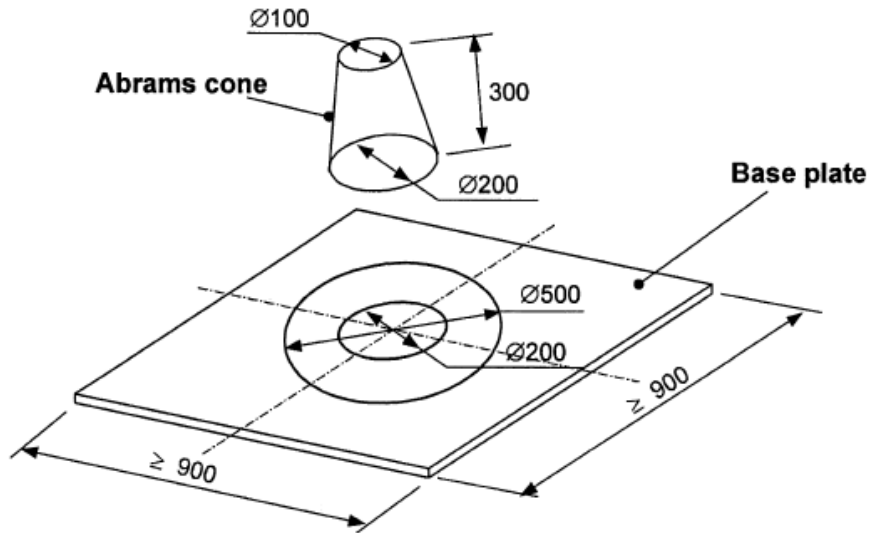
**Çizelge 2.3 : Kendiliğinden yerleşen betonların kabul kriterleri [15], [16].**

Ölçülen özellik	Deney metodu	Sınır değerler
Viskozite	V hunisi akış süresi (s)	≤ 8                      ≤ 25
Akışkanlık	Slump yayılma (mm)	550-650, 660-750, 760-850
Geçiş yeteneği	L kutusu deneyi (mm/mm)	≥ 0.8
Ayrışma direnci	V hunisi 5 dk gecikmeli akış süresi (s)	0-3 s
Ayrışma direnci	Elek testi (%)	≤ 20

### 2.1.7.1 Çökme-yayılma deneyi

Çökme-yayılma deneyi, geleneksel betonlar için kullanılan slump deneyinin geliştirilmesiyle elde edilmiştir. KYB'nin kendi ağırlığı ile ne kadar sürede ve çapta yayılacağını belirlemek için kullanılır. Deneyde, kesik koni şeklindeki Abrams konisi ve 90x90 cm boyutlarında bir tabla kullanılır. Abrams konisinden boşaltılan karışım tabla üzerinde yayılımını tamamladıktan sonra yayılma çapı ölçülür. Ölçülen çapa göre taze betonun akıcılığı belirlenmiş olur. Deneyde karışım, herhangi bir engel olmadan yayıldığı için geçme kabiliyeti belirlenemez.

Deney 90x90 cm boyutlarında bir tablanın tam ortasına Abrams konisi yerleştirilmesiyle başlar. Koni ve tabla nemlendirildikten sonra karışım herhangi bir şişleme işlemine tabi tutulmadan koniye doldurulur. Koni tablaya dik olacak şekilde yavaşça yukarı kaldırılarak karışımın yayılması sağlanır. Yayılma durduktan sonra tabladaki karışımın iki yönlü çapları ölçülür ve ortalaması alınır. Karışımın yayılma çapı doldurma kabiliyeti hakkında bilgi verir. Deney sonunda karışımlarda oluşabilecek segregasyon, terleme gibi olumsuzluklar gözlemlenmiş olur. Kendiliğinden yerleşen betonun doldurma kabiliyetini ölçmek için kullanılan en yaygın yöntem olan çökme-yayılma deney düzeneği Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : Çökme-yayılma deney düzeneği [28].

Yayılma çapı büyüklüğü arttıkça KYB'nin doldurma kapasite de artar. EFNARC (2005)'e göre KYB'lerin yayılma çaplarına göre sınıflandırılmaları Çizelge 2.4'te verilmiştir.

**Çizelge 2.4 :** Kendiliğinden yerleşen betonların yayılma çapına göre sınıflandırılması [16].

Sınıf	Yayılma Çapı (mm)
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850

Çökme-yayılma deneyinin uygulanmasıyla yayılma tablasına yayılan KYB karışımlarının ASTM C1611 (2018)'e göre kararlılıkları Visual Stability Index (VSI) olarak tanımlanmıştır. Yayılan betonun kararlılığı görsellerine göre 0-3 arası VSI değerleri ile tanımlanmaktadır (Çizelge 2.5).

**Çizelge 2.5 :** KYB'lerin yayılımına göre VSI tanımlaması [30].

VSI	Kriterler
0: Çok kararlı	Kusma ve segregasyon yok
1: Kararlı	Biraz kusma var, segregasyon yok
2: Kararlı değil	10 mm'den az harç birikmesi var veya betonun ortasında biraz segregasyon var
2: Hiç kararlı değil	10mm'den fazla harç toplanması var ve betonun ortasında segregasyon mevcut

#### 2.1.7.2 T<sub>500</sub> deneyi

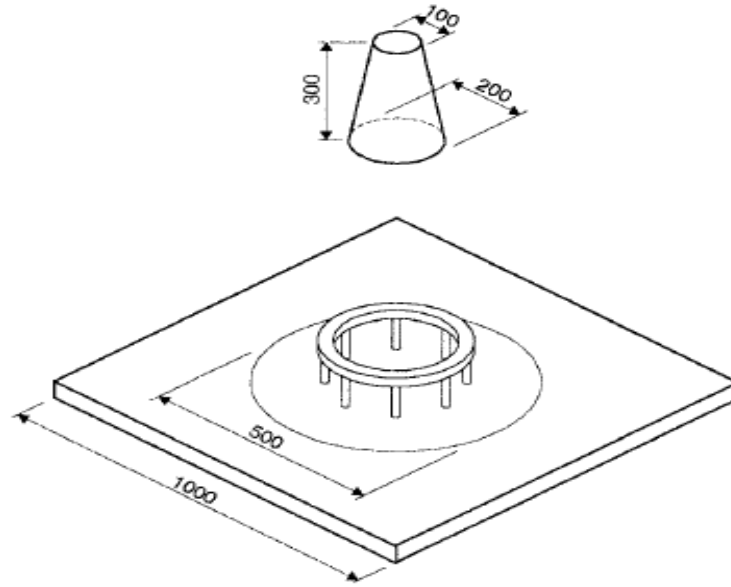
Kendiliğinden yerleşen betonların akıcılıklarının değerlendirilebilmesi için taze haldeyken T<sub>500</sub> deneyi uygulanır. Bu deney betonun viskozitesi hakkında bilgi vermektedir. Çökme-yayılma deneyinde taze betonun yayılmaya başladıktan sonra tablada çizilen 50 cm çaplı daireye ulaşması arasında geçen süre T<sub>500</sub> akma süresi olarak kaydedilir. KYB'ler yayılma sürelerine göre sınıflara ayrılmışlardır (Çizelge 2.6).

**Çizelge 2.6 :** KYB'lerin  $T_{500}$  sınıflandırılması [15].

Sınıf	$T_{500}$ (s)
VS1	$< 2$
VS2	$\geq 2$

### 2.1.7.3 J-halkası deneyi

Kendiliğinden yerleşen betonların yoğun donatılı ve dar açıklıklı engeller arasından ayrışma olmadan geçebilme yeteneğini değerlendirmek için uygulanan deney yöntemidir (Şekil 2.10). Bu deneyde Abrams konisinin etrafını çelik çubuklar ile kuşatacak şekilde tasarlanmış olan J-halkası kullanılmaktadır. Yayılma tablasının orta noktasında bulunan Abrams konisinin etrafına J-halkası yerleştirilir. Koni içerisine şişlenmeden doldurulan beton, koni tablaya dik bir şekilde yavaşça kaldırılmasıyla engeller arasından akarak yayılmaya başlar. Betonun 500 mm çaplı daireye ulaşmaya kadar geçen süre ölçülerek  $T_{500}$  süresi bulunmuş olur. Betonun yayılması tamamlandıktan sonra J-halkasının iç ve dış kısmından ölçülen yüksekliklerin farkı alınarak geçiş kabiliyeti belirlenir.



**Şekil 2.10 :** J-halkası deney düzeneği [31].

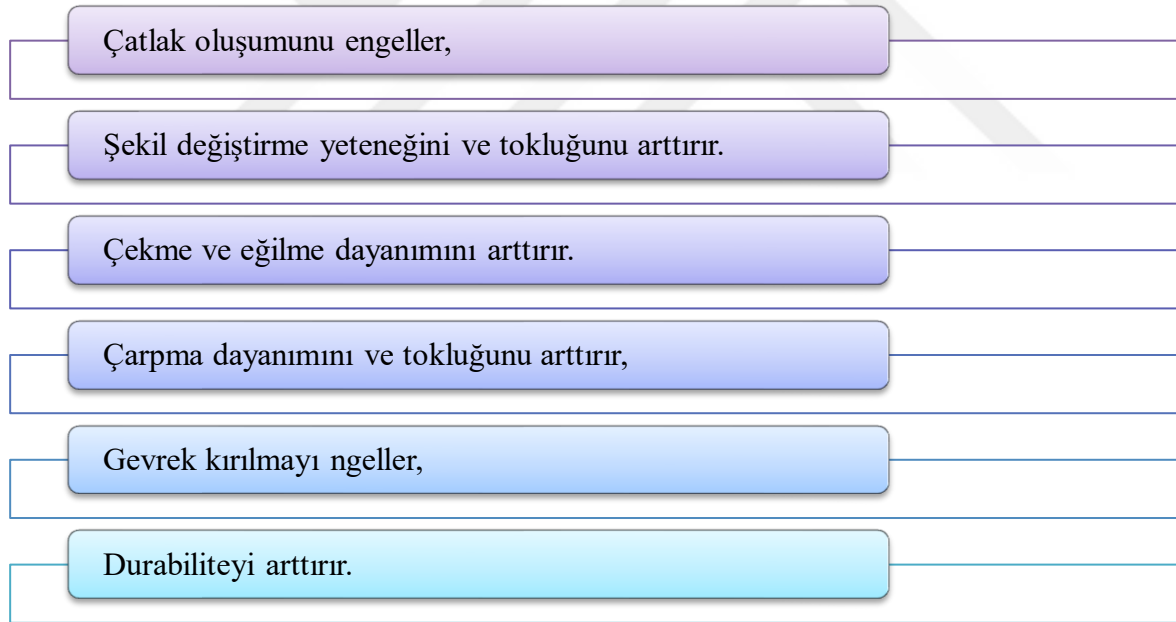
Betonun akıcılığı ve geçiş özelliklerini (geçme kabiliyeti) belirleyen J-halkası deneyi EN 12350-12'de sınıflandırılmıştır (Çizelge 2.7).

**Çizelge 2.7 : KYB'lerin J-halkasına göre sınıflandırılmaları [32].**

SINIF	J-Halkası
PJ1	$\leq 10$ ve 12 çubuk donatı
PJ2	$\leq 10$ ve 16 çubuk donatı

## 2.2 Lif Takviyeli Betonlar

Kendiliğinden yerleşen betonların önemli sorunlarından biri çekme dayanımlarının düşük olmasıdır. Bu sorunun çözülmesi ve betonun çekme dayanımının artırılması amacıyla lifler kullanılmaya başlanmıştır. M.Ö.ye dayanan saman ilaveli kerpiçler ve at kılı kullanılan harçlar lifli betonlara öncü olmuştur. 20 yy.da betona ilave edilmeye başlanan lifler KYB'nin taze ve sertleşmiş özelliklerine katkıda bulunmaktadır [33]. Liflerin betona sağladığı katkılar Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



**Şekil 2.11 : Liflerin avantajları.**

Lif takviyeli betonlar üstün avantajlarından dolayı oldukça geniş kullanım alanlarına yayılma imkanı bulmuşlardır (Şekil 2.12).

Yol kaplamaları
Uçak pistleri
Su yapıları
Köprüler
Tüneller
Askeri yapılar
Altyapı elamanları

**Şekil 2.12 :** Lif takviyeli betonların kullanım alanları.

Betonun yarı gevrek davranışını geliştirerek onu sünek hale getirebilmek amaçlanmaktadır. Dayanım ile süneklilik ters orantılıdır. Betonun dayanımı arttıkça sünekliliği azalır. Betona çelik lifler eklenerek hem dayanımı hemde sünekliliği artırılmış olur [2]. Beton göçmeye başladığında yük taşıma kapasitesini kaybederek yarı gevrek bir davranış gösterir. Betona lif ilave edilmesiyle, yükleme sonucunda ortaya çıkan çatlaklar sınırlandırılarak gevrek davranış önlenmiş olur [35]. Matrise dağılan lifler betonun enerji yutma potansiyelini arttırarak eğilme dayanımını, çekme dayanımını ve tokluk kapasitesini arttırır. Çatlakların yayılmasına karşı direnç sağlarlar.

### 2.2.1 Lif tipleri

Çimento esaslı kompozitlere, sağladığı yararlar sayesinde çeşitli lifler takviye edilmektedir. Farklı özelliklere sahip lifler malzeme türüne göre sınıflara ayrılmışlardır [36]. Bu sınıflandırma Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

Doğal Lifler:	Hayvansal Lifler
	Bitkisel Lifler
	Mineral Lifler
Sentetik Lifler:	Metalik Lifler (Çelik)
	Polimer Lifler
	Seramik Lifler

**Şekil 2.13 :** Lif çeşitleri.

Yapay malzemelerden üretilen liflerden karbon lif ve çelik lif gibi elastisite modülü yüksek olan lifler, politilen ve polipropilen gibi elastisite modülü düşük olanlara göre daha gevrek davranış sergileyerek kompozitin dayanım ve tokluğunu arttırmaktadır. Buna karşın elastisite modülü düşük olan lifler sünekliği arttırarak kompozitin çatlamasına engel olmaktadır [37], [38].

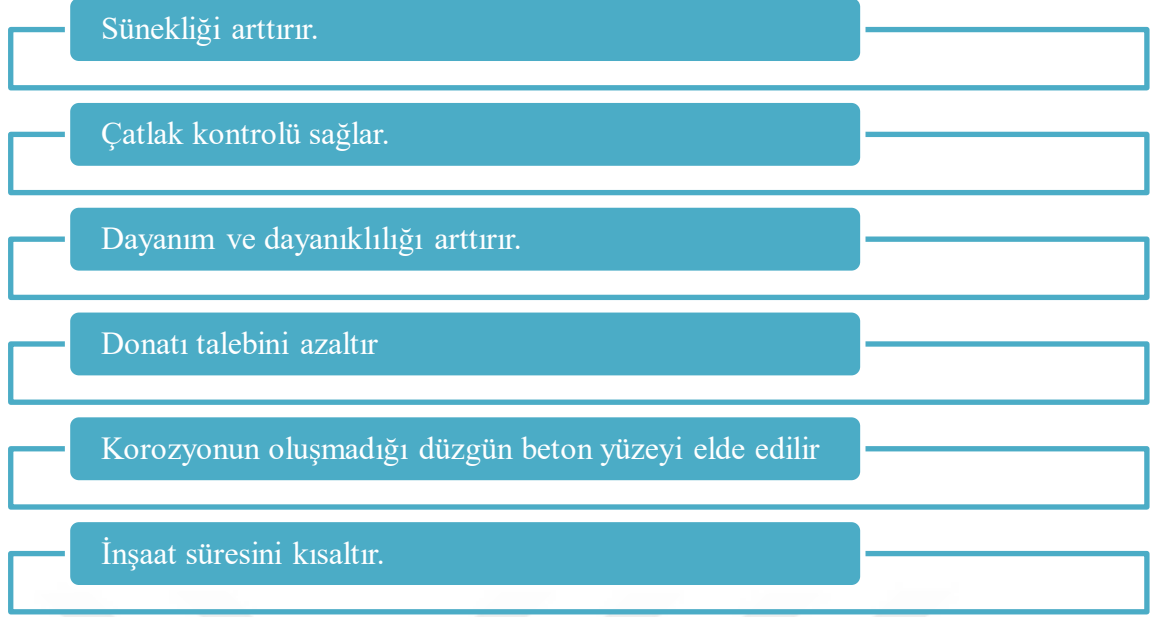
Lif katkılı betonlardan beklenecek performansa göre liflerin seçilmesi kompozitin dayanım ve dayanıklılığı açısından çok önemlidir. Çimento esaslı kompozitlere lif ilave edilmesiyle gelişen mekanik özellikler Çizelge 2.8’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.8 :** Lif takviyeli betonların mekanik özelliklerindeki artış değerleri [39].

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

### 2.2.2 Çelik lifler

Yapay malzemelerden üretilen çelik lifler en yaygın kullanılan lif çeşitlerindedir. Bunun sebebi, çelik lifin beton ile yüksek aderans ve yüksek tokluk sağlaması, kullanım kolaylığı gibi avantajlarıdır [40]. Düşük karbon içeriğine sahip C1008’den üretilen çelik lifler, yüksek çekme gerilmesi altında düşük uzama özelliğine sahiptir. Ortalama olarak çekme gerilmeleri 1200 MPa’nın üzerinde olup elastik limitleri % 0.2’nin altındadır [41]. Çelik liflerin betona sağladığı katkılar Şekil 2.14’te gösterilmiştir.



**Şekil 2.14 : Çelik liflerin avantajları.**

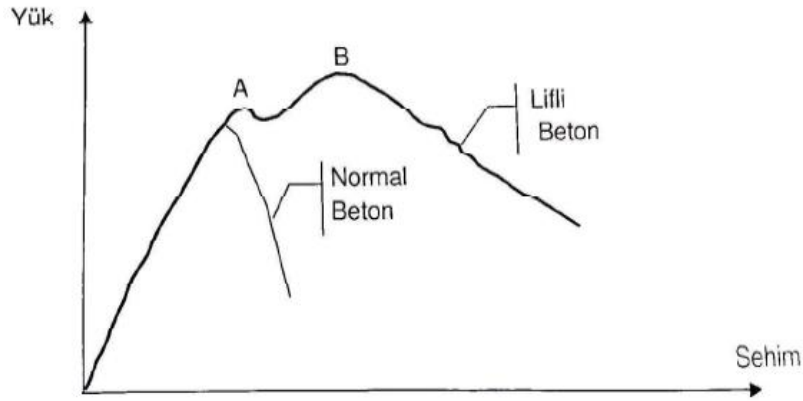
Çelik lifli betonlar sağladığı avantajlar sayesinde geniş kullanım alanına sahiptir. Şekil 2.15'te bu alanlar özetlenmiştir.

Çelik Lifli Betonlar:	Endüstri Yapılarında
	Hidrolik Yapılarda
	Yol Döşemelerinde
	Kolon - Kiriş Birleşim Bölgelerinde
	Püskürtme Beton (Shotcrete) Uygulamalarında
	Şev Stabilitesinin Sağlanmasında
	İnce Kabuk Yapılarda
	Patlamaya Karşı Dayanıklı Olması Gereken Yapılarda
	Yüksek Sıcaklık Farklarına Maruz Kalan Yapılarda
	Ön Yapımlı Beton Elemanlarda
	Çok Yüksek Mukavemetli Betonlarda
	Depreme Dayanıklı Yapılarda
	Betonarme Borular ve Altyapı Malzemelerinde
	Fabrika, Depo ve Hangar Döşemelerinde
Havaalanı Pistlerinde	
Liman Kaplamalarında	

**Şekil 2.15 : Çelik lifli betonların kullanım alanları.**



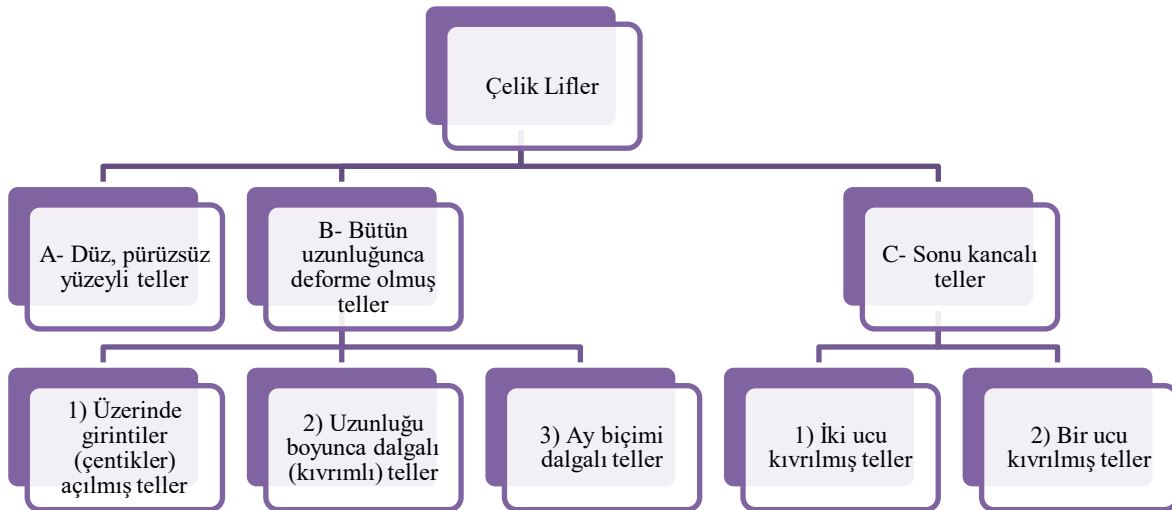
Çelik lifli betonların eğilme altında yük-sehim ilişkisi Şekil 2.16’da grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.16 : Lif ilaveli betonların yük-deplasman eğrisi [42].

Şekil incelendiğinde, eğri A noktasına kadar doğrusal ilerlemektedir. Bu noktadan sonra eğri doğrusal olmaktan çıkarak maksimum yükün taşındığı B noktasına ulaşır. A noktası ilk çatlama kuvveti, B noktası ise nihai dayanım olarak açıklanmaktadır. B noktasından sonra yükün azalma hızı liflerin miktarına, narinliğine ve matris içindeki dağılımına bağlıdır [42].

Çelik lifler şekillerine göre sınıflara ayrılmaktadır. TS 10513’e göre çelik lifler A, B ve C sınıfı olmak üzere 3 gruba ayrılmıştır (Şekil 2.17) [43].

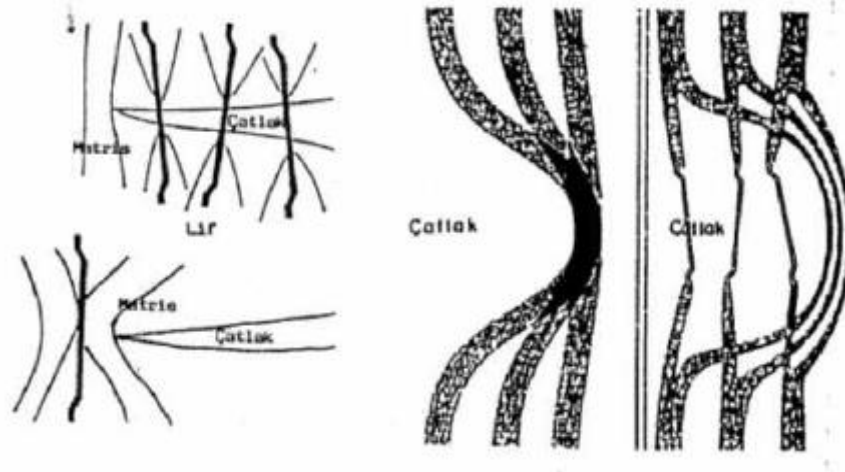


Şekil 2.17 : Çelik liflerin sınıflandırılması.

## 2.2.3 Liflerin kullanım şekilleri

### 2.2.3.1 Tek tip lif takviyesi

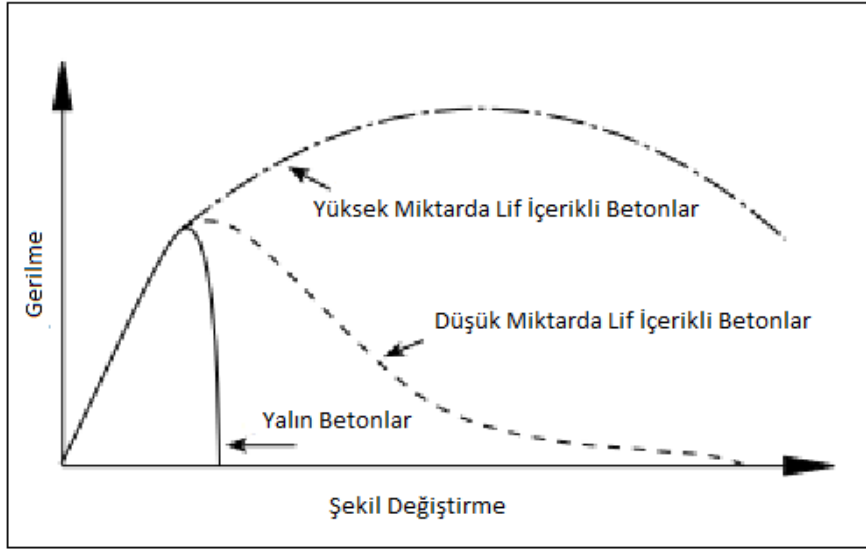
Çimento esaslı kompozitlere genellikle tek tip lifler ilave edilmektedir. Takviye edilen çelik lifler kompozit içerisine homojen bir şekilde dağılır. Bu homojen dağılım, özellikle KYB'lerde daha fazla sağlanmaktadır. Çelik lifli KYB'lerin enerji yutma kapasiteleri ve darbelere karşı dirençleri çok daha yüksektir. Bu betonlarda ilk çatlak oluşuktan sonra gerilmeler çelik lifler aracılığıyla karşılanır. Gerilmelerin bir kısmını çelik lif taşıırken kalan kısmını da köprü görevi görerek matrise aktarır [44]. Çelik lifler köprüleme etkisi sağlayarak çatlağın ilerlemesini durdururlar. Çelik lifli betonlarda ilk çatlağın oluşması ve ilerlemesi için gerekli olan enerji geleneksel betonlara göre çok daha yüksektir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 : Liflerin çatlakları durdurması [45].

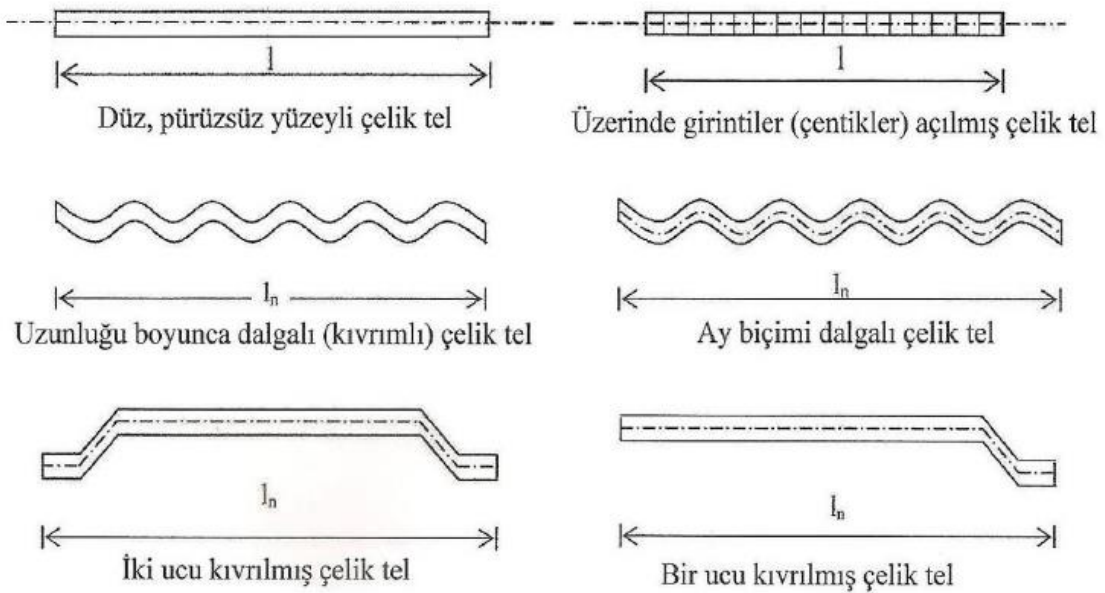
Çelik lifler yüksek çekme mukavemetine sahip olduklarından dolayı betonda oluşacak çatlakların başlangıcını, yayılmasını ve büyümesini önlerler [46]. Matrise yayılmış olan lifler betonda oluşan çatlaklardaki gerilmeleri henüz çatlak oluşmamış kısımlara iletirler. Matristeki gerilmeler liflerin üzerinden geçerek matrisin çatlama kesitlerinin dayanımından yararlanırlar [47].

Matrisin çatlak oluşan kesitinde ilave edilen lifler sayesinde taşıma gücü artırılarak betonun mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Lif miktarının betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi üzerindeki etkisi Şekil 2.19'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.19 :** Lif takviyeli betonların gerilme-şekil değiştirme grafiği [44].

Kompozitte çatlak oluştuğundan sonra kuvvetin karşılanabilmesi için lif ile matris arasında güçlü mekanik ve fiziksel bağ oluşmalıdır. Lif ile matris arasındaki bu aderansın güçlü olması için aderans kuvvetinin betonun çekme gerilmesinden büyük olması gerekmektedir [36]. Lifler ile matris arasındaki aderansı arttırmak için çeşitli geometrilere lifler tasarlanmıştır. Kullanım amacına göre lif çeşitleri Şekil 2.20’de görselleştirilmiştir.

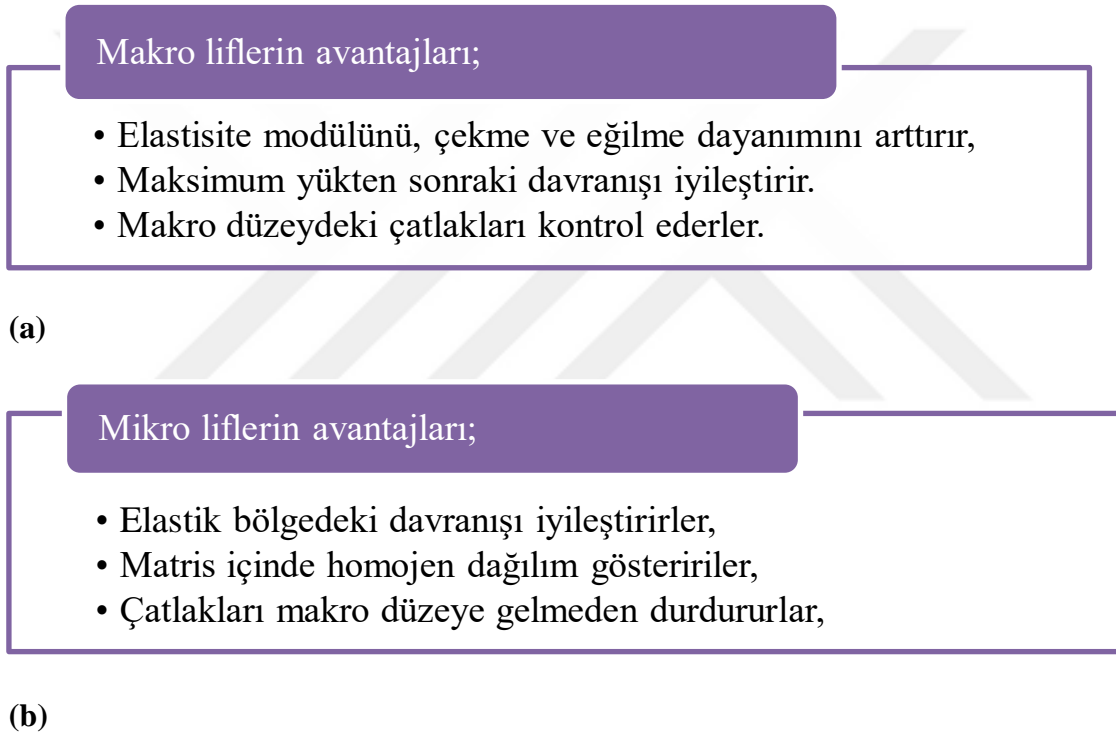


**Şekil 2.20 :** Çelik liflerin geometrik şekilleri [48].

### 2.2.3.2 Karma lif takviyesi

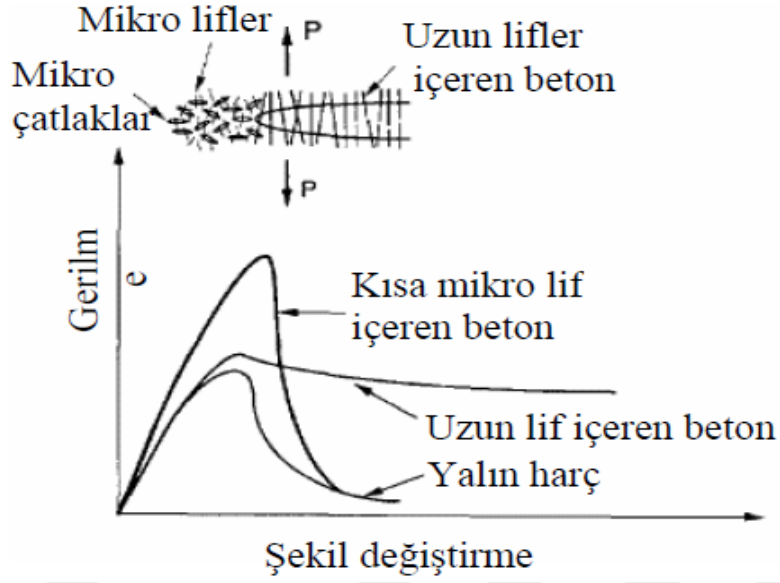
Çimento esaslı kompozitlere tek tip lif kullanmak yerine farklı tip ve boyutlarda lif kullanılmasıyla karma lifli betonlar geliştirilmiştir. Betonda oluşan mikro ve makro çatlakları engellemek için farklı boyutlarda lifler kullanılmaktadır. Boyutları numuneye göre çok küçük olan çatlaklar mikro çatlak olarak ifade edilmektedir. Makro çatlaklar ise, büyüklüğü numuneye göre çok küçük olmayan ve mikro çatlaklardan büyük olan çatlaklardır [49].

Büyük boyutlardaki çatlaklar için makro lifler, küçük boyutlu çatlaklar için ise mikro lifler kullanılarak çatlak oluşması ve ilerlemesi kontrol edilmektedir [50]. Makro ve mikro liflerin avantajları Şekil 2.21’de verilmiştir.



**Şekil 2.21** : Çelik liflerin avantajları: **a)** Makro liflerin avantajları **b)** Mikro liflerin avantajları.

Çatlaklar matriste mikro düzeyde başlar. Makro liflerin boyutları büyük olduğu için lifler arasındaki mesafe fazladır. Mikro düzeydeki çatlaklar için fazla etkili olamazlar [51]. Çatlaklar mikro düzeydeyken mikro lifler köprü vazifesi görerek çatlakların ilerlemesinin engeller. Matrise homojen dağılabilen mikro lifler, makro liflerin bulunmadığı bölgelerdeki çatlakları da karşılamaktadırlar. Mikro lifler oluşan çatlakları büyüyüp kritik hale gelmeden durdurabilme potansiyeline sahiptirler [52]. Makro ve mikro liflerin çatlakları köprülemesi Şekil 2.22’de gösterilmiştir [51].



**Şekil 2.22 :** Farklı lif boyutlarının çatlaklar arası köprü oluşturması [51].

Şekle benzer olarak mikro lifler çimento hamurunu, makro lifler ise betonu güçlendirmektedir. Makro liflerin narinliğinin katkısıyla betonun kılma enerjisi artmaktadır [52]. Karma lifli betonların kullanım alanları Şekil 2.23'te özetlenmiştir:

- Bina güçlendirilmelerinde,
- Küçük kesitli taşıyıcı elamanlarda,
- Zımbalamaya karşı kolon başlarında,
- Radyoaktif yapılarda ve nükleer santrallerde,
- Süneklik gerektiren taşıyıcı elamanların birleşim bölgelerinde,
- Prekast çatı kaplamalarında,
- Çarpma ve aşınmaya dayanım gerektiren bölgelerde kullanılmaktadır.

**Şekil 2.23 :** Karma lif takviyeli betonların kullanım alanları.

## 2.3 Betonun Elektriksel Özdirenci ve İletkenliği

Günümüzde en sık kullanılan yapı malzemelerinden beton, yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Betonun özdirenci elektriği geçirme yeteneği olan iletkenlik teorisine bağlıdır. Elektriksel iletkenlik, malzeme içerisindeki elektron veya elektron boşlukları tarafından gerçekleştirilir. Elektrik iletkenliği çimento esaslı kompozitlerde, iyonların boşluk solüsyonlarında hareket etmeleriyle sağlanır. Bu hareket boşluk solüsyonlarındaki iyon transferi sebebiyle meydana gelmekte ve frekansın artışıyla birlikte iyon transferi hızlanmaktadır. Kısacası betonda elektrik akımı, gözeneklerdeki sıvıda çözülmüş iyonlar tarafından taşınır. Bunun bir sonucu olarak iletkenlik, porozite ve boşluk solüsyonu iletkenliğine bağlıdır. Çimento esaslı kompozitin elektriksel özdirenci; gözenek büyüklüğü dağılımı, gözenek sıvısı iletkenliği, doygunluk derecesi, ve sıcaklıktan etkilenir. Doymunluk oranı yüksek ve geniş çaplı gözeneklere sahip betonlar (S/B oranı yüksek) düşük bir özdirence neden olurlar [53]. Diğer bir ifadeyle, çimento esaslı kompozitin, S/B oranının azaltılması ile elektriksel özdirenci daha yüksek değerler alır [54]. Bir malzemenin yüksek iletkenliğe sahip olması için elektriksel özdirencinin düşük olması gerekmektedir [55], [56].

Çimento esaslı kompozitlerden olan beton yalıtkandır ve elektriksel iletkenliği çok düşük seviyelerdedir. Betonun elektriksel özdirencini düşürmek için içerisine toz malzemeler, lifler ve agregalar ilave edilmektedir. Grafit, karbon ve alüminyum tozu, karbon ve çelik lif, çelik talaşı ve demir içeriği yüksek agregalar gibi malzemelerin kullanılması ile betonun iletkenlikliği arttırılmaktadır [57], [58]. Bu malzemeler belli oranlarda çimento esaslı kompozite ilave edilerek iletkenliğin arttırılması, kompozitin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve aynı zamanda ekonomik olması amaçlanmaktadır [56].

Yürüyüş yolları, havaalanı pistleri ve karayolları gibi sirkülasyonu fazla olan alanlarda kış mevsimlerinde oluşan kar ve buzlanma insan yaşamını olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuz duruma çözüm olması amacıyla iletken beton teknolojisi geliştirilmiştir. Yalıtkan özellik gösteren beton iletken hale getirilerek içerisinden elektrik akımı geçirilmekte ve beton ısıtılmaktadır. Betonun ısıtılması ile kar birikintileri eritilmekte ve buzlanma engellenmektedir [13].

İletken beton teknolojisinin buzlanmayı önlemek dışında farklı kullanım alanları da vardır. Bu alanlar kısaca; elektriksel sistem ve elektronik bileşenleri koruma amaçlı yapılar, anti statik döşemeler ve betonarme yapılarda katodik koruma olarak özetlenebilir [60], [61], [62].

Bununla beraber, Tian ve Hu (2012) betonda elektriksel iletkenlik için herhangi özel bir yönetmelik ya da standart olmamasına karşın, iletken betonun inşaat sektörü ve diğer alanlarda uygulanabilirlik açısından önem arz ettiğini belirtmişlerdir [63].

### 2.3.1 Elektriksel özdirenç ve iletkenlik ölçümü

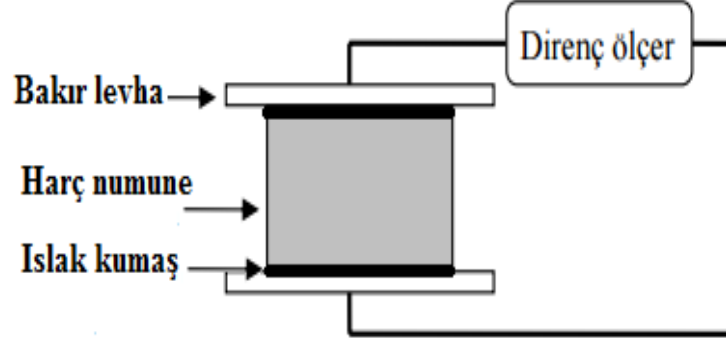
Elektriksel iletkenlik değeri elektriksel özdirenç değerinin tam tersidir. Maddenin fiziksel özelliklerinden olan elektriksel özdirenç, farklı elektriksel ve elektromanyetik yöntemlerle belirlenebilir. İki problu (sonda) ölçüm yapma teknikleri çimento esaslı kompozitlerin elektriksel dirençlerinin izlenmesinde kullanılabilen etkili ve güvenilir bir yöntemdir. Literatürde yapılmış çalışmalarda iki problu elektriksel iletkenlik ölçüm yönteminin yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu yöntemde sadece iki temas noktası bulunur ve bu noktalar arasından akım geçmektedir. Gerilim ve akım değerleri tespit edilen numunelerin elektriksel özdirençleri ve iletkenlikleri, Denklem 2.1 ve 2.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$P = R * \left(\frac{A}{L}\right) \quad (2.1)$$

$$C = \frac{1}{P} \quad (2.2)$$

Buradaki P, elektriksel özdirenci (kΩ.m); C, iletkenliği (S/m); L, bakır elektrotlar arası mesafeyi (m); R, hesaplanan direnci (Ω) ve A, numunenin alanını (m<sup>2</sup>) göstermektedir.

Ölçüm yaparken numune, elektrik bağlantısını sağlamak için ara yüzeylerinde tuzlu su çözeltisi bulunan iki paralel metal plaka arasına yerleştirilir. Numuneye, güç kaynağından doğru akım uygulanır. Bu şekilde uygulanan akım ile hesaplanan direnç değeri sayesinde elektrotlar arasındaki elektriksel özdirenç hesaplanır. Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılacak deney düzeneği Şekil 2.24'te gösterilmiştir.



**Şekil 2.24 :** Elektriksel özdirenç ölçüm düzeneği.

Deney düzeneği; elektrot görevi gören iki adet bakır levha, iletkenliği arttırmak için kullanılan iletken jel veya tuzlu su çözeltisi ve bir güç kaynağından oluşmaktadır. Numunelerin karşılıklı iki yüzeyine iletken jel sürüldükten sonra yüzeylere bakır levhalar sabitlenir. DC güç kaynağının eksi kutbu bir bakır elektroda artı kutbu da diğer bakır elektroda bağlanarak devre tamamlanır. Güç kaynağından sabit volt verilerek her bir numuneden geçen akım değerleri hesaplanır.



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tezin bu bölümünde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerden agrega, çimento, uçucu kül, çelik lifler ve kimyasal katkıdan bahsedilmiştir. Numunelerin üretilme safhaları, taze, sertleşmiş beton testleri ve elektriksel özdirenç özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

#### 3.1 Malzemeler

##### 3.1.1 Bağlayıcılar

###### 3.1.1.1 Çimento

Tez çalışması kapsamında üretilen tek ve karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında Çimsa Çimento Fabrikasına ait CEM I 42,5 R tipi Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Çimento TS-EN 197-1:2012 standartına uymakla beraber fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Özellikleri	
SiO <sub>2</sub>	% 18.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 5.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 3.36
CaO	% 63.59
MgO	% 1.57
SO <sub>3</sub>	% 2.65
K <sub>2</sub> O	% 0.77
Na <sub>2</sub> O	% 0.40
Kızdırma kaybı	%3.59
Fiziksel Özellikleri	
Özgül ağırlık	3.15 g/cm <sup>3</sup>
Özgül yüzey	4252 cm <sup>2</sup> /g

### 3.1.1.2 Uçucu kül

Tek ve karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında mineral katkı olarak kullanılan uçucu kül, İskenderli Termik Santrali'nden temin edilmiştir. ASTM C618 (2019)'a göre F sınıfına ait olan uçucu kül çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Kullanılan uçucu küle ait özellikler Çizelge 3.2'de belirtilmiştir.

**Çizelge 3.2 : Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri.**

<b>Kimyasal Özellikler</b>	
SiO <sub>2</sub>	% 63.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 21.63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 6.77
CaO	% 1.07
SO <sub>3</sub>	% 0.10
Na <sub>2</sub> O	% 2.79
Kızdırma kaybı	% 2.68
28 günlük puzolanik aktivite	% 81
<b>Fiziksel Özellikler</b>	
Özgül ağırlık	2.35 g/cm <sup>3</sup>
Özgül yüzey	2900 cm <sup>2</sup> /g

### 3.1.2 Agregat

Tek ve karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton karışımların üretilmesinde 3 farklı agregat grubu kullanılmıştır. Birinci grup ince agregat olup 0-4 mm elek aralığına sahiptir. Kuru özgül ağırlığı 2.41 g/cm<sup>3</sup>, incelik modülü 2.95 olup su emme değeri %2.2 dir. 0.125 mm elekten geçen malzeme miktarı %6.1 olarak tespit edilmiştir.

İkinci grup agregat 0-8 mm elek aralığına sahip olup özgül ağırlığı 2.58 g/cm<sup>3</sup>, incelik modülü 4.09 ve su emme değeri %2.26 dir. 0.125 mm elekten geçen malzeme miktarı ise %10 olarak hesaplanmıştır.

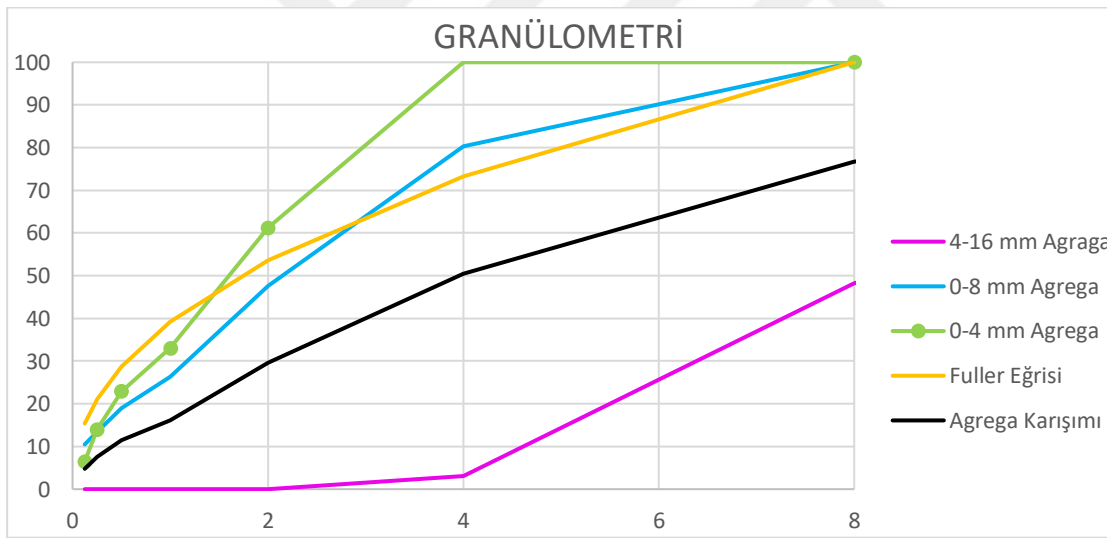
Karışımda kullanılan üçüncü grup agregat 4-16 mm elek aralığında olup tüm karışımın maksimum tane çapı 16 mm'dir. Kuru özgül ağırlığı 2.67 g/cm<sup>3</sup> olan kaba agreganın su emme değeri %1 olarak tespit edilmiştir.

Deneyisel çalışmada kullanılacak agregaların tane dağılımını belirlemek için elek analizi yapılmıştır. Elek analizinde kullanılan eleklerin çapları TS 706 EN 12620+A1 (2009) standartlarına uygun olarak seçilmiştir. Granülometrisi belirlenen agregaların uygunluğunun denetlenmesi için granülometri eğrileri fuller parabolü ile karşılaştırılmıştır. Fuller parabolünün elde edilmesi için kullanılan denklem aşağıda verilmiştir.

$$P_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^{0.45} \quad (3.1)$$

Pi: elekten geçen yığışlımlı yüzde, di: elek ebatları ve D: maksimum agrega tane çapını temsil etmektedir.

Elde edilen granülometri eğrisi ve fuller parabolü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Agregası karışım granülometrisi.

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere karışım eğrisi ile Fuller eğrisi paralellik gösterip karışımında ince agrega oranı fazladır. Hazırlanan beton karışımları, %45 0-4 mm, %30 0-8 mm ve %25 4-16 mm agregadan oluşmaktadır. Karışımında ince agreganın fazla olmasının sebebi KYB’nin işlenebilirlik özelliğini arttırmak, liflerin daha işlevsel olmasını sağlamak ve topaklanmasını engellemektir.

### 3.1.3 Kimyasal katkı

Kendiliğinden yerleşen betonların işlenebilirliğini sağlamak ve liflerin toplanmasını önlemek için tüm karışımlarda hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. TS EN 934-2+A1 (2013) standartına uygun olan ve yoğunluğu  $1.06 \text{ g/cm}^3$  olan ViscoCrete Hi-Tech 51 polikarboksilik polimer esaslı hiperakışkanlaştırıcı, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından temin edilmiştir.

### 3.1.4 Karışım suyu

Üretilen numunelerin tamamında Malaya Şebeke Suyu kullanılmıştır.

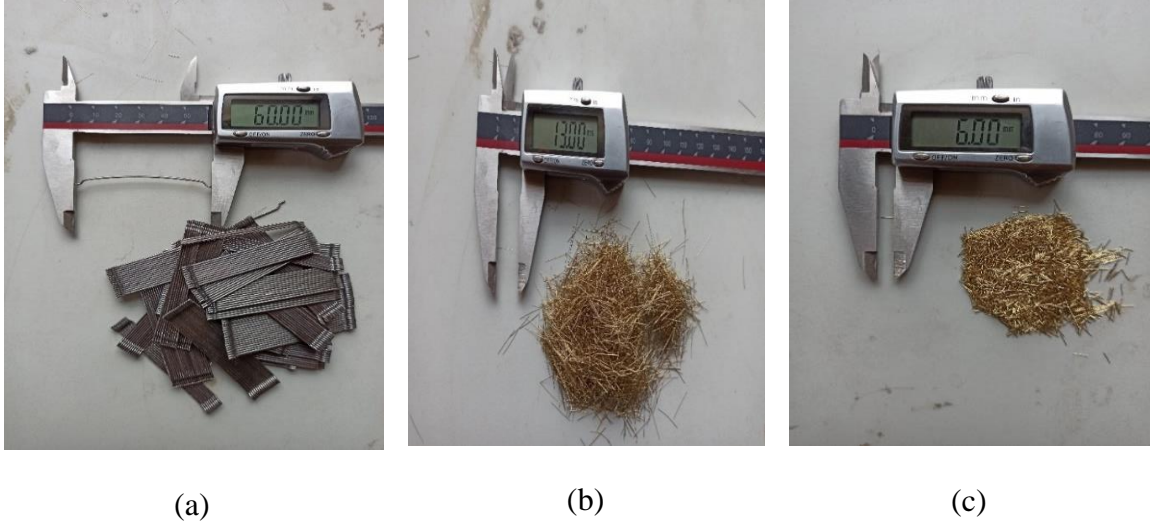
### 3.1.5 Lifler

Çalışma kapsamında bir tip makro çelik lif ve iki farklı tip mikro çelik lif kullanılmıştır. Kullanılan çelik lifler Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. işletmesinden temin edilmiştir. İki ucu kancalı olan makro lifler firma tarafından 3D 65/60 olarak adlandırılmıştır. Düz uçlu 6 mm ve 13 mm uzunluğunda mikro çelik lifleri ise, sırasıyla OL6/.16 ve OL13/.16 olarak isimlendirilmiştir.

Çelik liflere ait özellikler Çizelge 3.3'te ve görselleri Şekil 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.3 : Makro ve mikro çelik liflerin özellikleri.**

Lif Adı	Lif Tipi	Uzunluk (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık ( $\text{g/cm}^3$ )
3D 65/60	Makro Çelik Lif	60	65	1160	200	7.8
OL 13/.16	Mikro Çelik Lif	13	87	3000	200	7.2
OL 6/.16	Mikro Çelik Lif	6	40	3000	200	7.2



**Şekil 3.2 :** Kullanılan makro ve mikro çelik lifler: a) 3D 65/60 Makro çelik lif b) OL 13/.16 Mikro çelik lif c) OL 6/.16 Mikro çelik lif.

### 3.2 Karışımların Hazırlanması

Karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla ön deneyler yapılmış ve en uygun karışım oranları belirlenmiştir. Karışım oranı belirlenirken EFNARC (2002) işlenebilirlik testleri (Çökme-yayımla, J-halkası,  $T_{500}$ ) göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan gözlemler ve işlenebilirlik testleri sonucunda artan çelik lif oranlarının işlenebilirliği olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. İşlenebilirliği geliştirmek amacıyla, karışımda ince malzeme oranı ve bağlayıcı miktarı yüksek tutulmuştur. Bağlayıcı madde olarak dozajları  $540 \text{ kg/m}^3$  ve  $360 \text{ kg/m}^3$  olan sırasıyla, Portland Çimentosu (PÇ) ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Karışımda toplam  $900 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı madde vardır ve S/B oranı 0.27'dir.

Lif kombinasyonları tek ve karma lif olarak belirlenmiştir. Makro lif olarak tek tip çelik lif, mikro lif olarak ise 6 mm ve 13 mm uzunluğuna sahip 2 tip çelik lif kullanılmıştır.

Karma Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Beton (LFSZ-REF ve KÇL-KYB) numunelerin özelliklerini incelemek amacıyla 1 adet liffsiz referans numune ile birlikte tekli ve karma lifli olmak üzere; (i) toplam %1 çelik lif içeren numuneler (%1 makro, %0.8 makro + %0.2 mikro 13 mm, %0.8 makro + %0.2 mikro 6 mm ), (ii) toplam %1.25 çelik lif içeren numuneler (%1.25 makro, %1 makro + %0.25 mikro 13 mm, %1 makro + %0.25 mikro 6 mm) ve (iii) toplam %1.5 çelik lif içeren numuneler (%1.5 makro, %1.2 makro + %0.3 mikro 13 mm, %1.2 makro + %0.3 mikro 6 mm) olmak üzere 10 adet karışım tasarlanmıştır.

Karışımlara verilen kodların anlamları şu şekildedir:

- LFSZ-REF: Lif içermeyen referans numune,
- MAK: Makro lif içeren numune,
- MİK: Mikro lif içeren numune,
- MİK6: 6 mm uzunluğundaki mikro lifi içeren numune,
- MİK13: 13 mm uzunluğundaki mikro lifi içeren numuneyi temsil etmektedir.
- MAK ve MİK sembolünün önüne yazılan rakamlar ise karışıma ilave edilen liflerin hacimce yüzde miktarlarını temsil etmektedir.

Örneğin: 1.2MAK+0.3MİK13 olarak yapılan kodlamanın açılımı, %1.2 makro lif, %0.3 oranında ve 13 mm uzunluğunda mikro lif içeren numuneyi temsil etmektedir.

Tez çalışmasında kullanılan karışım oranları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.4 : Karışım oranları.**

Karışım Kodu	Bağlayıcılar (kg/m <sup>3</sup> )		Agrega "DYK" (kg/m <sup>3</sup> )				Çelik Lifler (kg/m <sup>3</sup> )			Su (kg/m <sup>3</sup> )	S/B (%)	HA (kg/m <sup>3</sup> )
	Çimento	Uçucu Kül	(0-4 mm) Agreg	(0-8 mm) Agreg	(4-16 mm) Agreg	Makro Ç.L.	Mikro (13 mm) Ç.L.	Mikro (6 mm) Ç.L.				
LFSZ-REF	540	360	472	314	262				230	0.28	10.25	
0.8MAK+0.2MİK6	540	360	461	307	256	62.80		14.50	230	0.28	9.75	
0.8MAK+0.2MİK13	540	360	460	307	256	62.80	14.50		230	0.28	10.50	
1MAK	540	360	460	307	256	78.50			230	0.28	10.25	
1MAK+0.25MİK6	540	360	457	304	254	78.50		18.13	230	0.28	11.00	
1MAK+0.25MİK13	540	360	457	305	254	78.50	18.13		230	0.28	10.50	
1.25MAK	540	360	456	304	254	98.13			230	0.28	11.25	
1.2MAK+0.3MİK6	540	360	454	303	252	94.20		21.75	230	0.28	11.00	
1.2MAK+0.3MİK13	540	360	455	303	253	94.20	21.75		230	0.28	10.25	
1.5MAK	540	360	454	303	252	117.75			230	0.28	10.75	

Karışımların hazırlanmasında Şekil 3.3'deki mikser kullanılmıştır. Yapılan ön denemeler sayesinde en iyi karışım metodu bulunmuş ve uygulanmıştır.



**Şekil 3.3 :** Kullanılan düşey eksenli mikser.

Karışımın izlenen yol şu şekildedir:

- Agregası, makro lif ve suyun 2/3'ü mikserde 3 dk boyunca karıştırıldı.
- Akışkanlaştırıcının homojen dağılması amacıyla karışıma eklenecek suyun 1/3'ü ile akışkanlaştırıcı farklı bir kaptaki karıştırma işlemine tabi tutuldu.
- Daha sonra mikserde bağlayıcı maddeler (çimento + uçucu kül) ve su ile homojen hale getirilmiş akışkanlaştırıcı eklenerek karıştırılmaya devam edildi.
- Mikro lifler topaklanmayı önlemek amacıyla karışıma azar azar eklendi. Mikser toplam 13 dk karıştırılarak karıştırma işlemi tamamlandı.

S/B oranı düşük ve katkı dozajı yüksek olan karışımlarda işlenebilirliğin sağlanması ve akışkanlaştırıcıdan istenilen verimin alınması için yeterli karıştırma süresinin sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu amaçla toplam karıştırma süresi 13 dk olmuştur. Karışımlar hazırlanırken izlenen adımlar aynı zamanda Şekil 3.4'te de şematik olarak gösterilmiştir.

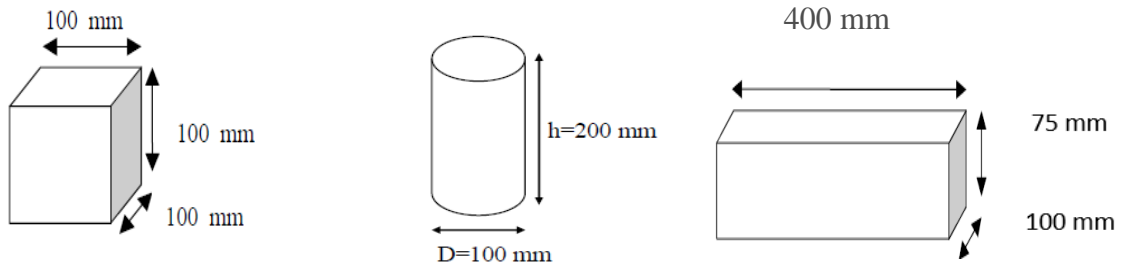




Şekil 3.4 : Karışımların hazırlanmasında takip edilen adımlar.

### 3.3 Numune Boyutları

Basınç dayanım testleri için 100x100x100 mm ölçülerinde küp numuneler, yarmada çekme, elektriksel direnç ve sıcaklık testleri için 100x200 mm ölçüsünde silindir numuneler ve eğilme testleri için ise 100x75x400 mm ölçüsünde prizma numuneler üretilmiştir. Üretilen numune boyutları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Numune şekilleri ve boyutları.

### 3.4 Numunelerin Kürü

Taze lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımları kalıplara herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan yerleştirilmiştir. Numuneler laboratuvar ortamında karışım suyunun buharlaşmasını önlemek için üstü kapalı bir şekilde 24 saat bekletilmiştir. Prizini alan numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra sıcaklığı  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de olan su dolu kür havuzunda TS EN 12390-2 (2019) standartına uygun olarak kür edilmiştir. Numuneler kür havuzunda 90 gün bekletilmiştir (Şekil 3.6).



**Şekil 3.6 :** Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin kür edilmesi.

90 gün sonra kür havuzundan çıkarılan tüm numuneler laboratuvar ortamında minimum 3 saat bekletilerek doymun yüzey kuru (DYK) hale getirilmişlerdir. DYK halindeki numuneler üzerinde sertleşmiş beton, elektriksel direnç ve çelik lifli numunelerin ısıtılma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

### 3.5 Deneyler

Tez çalışması kapsamında hazırlanan ve toplam 10 farklı karışımdan oluşan numuneler Şekil 3.7'deki tabloda verilen taze ve sertleşmiş beton deneylerine tabi tutulmuşlardır.

#### Taze Beton Deneyleri

- Çökme-Yayıma Deneyi
- T<sub>500</sub> Deneyi
- J-Halkası Deneyi

#### Sertleşmiş Beton Deneyleri

- Basınç Dayanımı Deneyi
- Yarmada Çekme Deneyi
- Dört Noktalı Eğilme Deneyi
- Elektriksel Direnç Deneyi
- Isıtma Deneyi

**Şekil 3.7 :** Lifsiz referans, tek lifli, ve karma lifli KYB numunelerine uygulanan deneyler.

### 3.5.1 Taze beton deneyleri

#### 3.5.1.1 Çökme-yayılma deneyi

EFNARC (2002) kriterlerine uygun olarak yapılan deneyde betonun işlenebilirliği ve doldurma yeteneği belirlenmiştir. Deneyde üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm ve yüksekliği 300 mm olan Abrams konisi ve 1000x1000 mm boyutlarındaki yayılma tablası kullanılmıştır (Şekil 3.8).

Abrams konisi, yayılma tablasının merkezine yerleştirilerek her iki deney aparatı da nemlendirilmiştir. Taze beton mikserden homojen olarak alındıktan sonra huni vasıtasıyla kesik koni içerisine doldurulmuş ve herhangi bir sıkıştırma işlemine tabi tutulmamıştır. Doldurma işlemi tamamlandıktan sonra kesik koni 30 sn içerisinde dik bir şekilde yukarı kaldırılmıştır. KYB karışımları tabla üzerine yayılması sağlanmıştır. Yayılan karışımın birbirine dik iki boyutu ölçülüp ortalaması alınarak çökme-yayılma çapı (D<sub>ç</sub>) belirlenmiştir. Yayılan Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımı ve deney düzeneği Şekil 3.8’de de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : Çökme-yayılma ve T<sub>500</sub> süresi testi.

#### 3.5.1.2 T<sub>500</sub> deneyi

Abrams konisine sıkıştırma işlemine tabi tutulmadan doldurulan Lifsiz referans, tek lifli, ve karma lifli KYB’nin kesik koni dik olarak yukarı kaldırıldıktan hemen sonra 500 mm çapa ulaşma süresi, tüm karışımlar için T<sub>500</sub> süresi (saniye) olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.8).

### 3.5.1.3 J-halkası deneyi

EFNARC (2002) kriterlerine uygun olarak yapılan deney, betonun donatılar arasından geçiş kabiliyetini ölçmektedir. Bu deneyde de yayılma deneyinde olduğu gibi Abrams konisi ve yayılma tablası kullanılmaktadır. Bu deneyde ek olarak 300 mm çapında ve 105 mm aralıklı düşey donatılardan oluşan J-halkası kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

J-halkası yayılma tablasının merkezine yerleştirilmiştir. Daha sonra J-halkasının içine yerleştirilen Abrams konisi nemlendirilerek çökme-yayılma deneyindeki adımlar izlenmiştir. Yayılan karışımın 500 mm çaplı daireye ulaşmasına kadar geçen süre  $T_{500J}$  olarak belirlenmiştir. Karışımın yayılması tamamlandıktan sonra birbirine dik iki ekseninin uzunlukları ölçülerek ortalaması alınmış ve yayılma çapı (DJ) bulunmuştur.

J-halkasının iç ve dış kısımlarından üçer adet olmak üzere toplam altı noktadan karışım yükseklikleri ölçülerek yükseklik farklarının ortalaması alınmış ve J-halkası yükseklik farkı ( $\Delta H$ ) belirlenmiştir.



Şekil 3.9 : J-halkası ve  $T_{500}$  süresi testi.

### 3.5.2 Sertleşmiş beton deneyleri

#### 3.5.2.1 Basınç dayanımı

Lifsiz referans, tek lifli, ve karma lifli KYB karışımlarının 90 günlük basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla her bir seriden 3 adet 100x100x100 mm ölçülerinde küp numuneler üretilmiştir. Deney, Şekil 3.10'da gösterilen ve 3000 kN kapasiteli, yük kontrollü pres makinesinde 6 kN/sn yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney uygulanırken

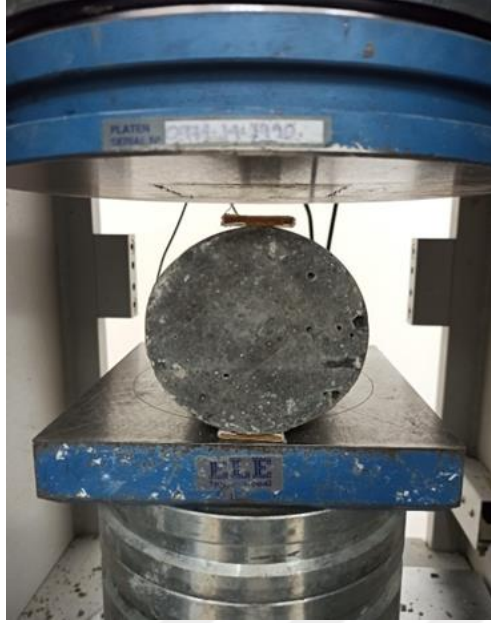
ASTMC39 (2018) standartları esas alınmıştır. Dayanım testine maruz bırakılan her bir karışıma ait numunelerin ortalaması alınarak karışımların basınç dayanımları belirlenmiştir.



**Şekil 3.10** : Basınç dayanım testi.

### **3.5.2.2 Yarmada çekme dayanımı**

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının 90 günlük yarmada çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla her bir karışımdan 3 adet 100x200 mm boyutlarında silindir numune hazırlanmıştır. Deneyde basınç dayanım testinde kullanılan pres makinesi yükleme hızı 1.6 kN/sn olacak şekilde ayarlandı. Yükün üniform dağılması için numunelerin alt ve üstüne 2.5 cm genişliğinde ve 1 cm kalınlığında ahşap plakalar numune boyunca yerleştirilerek yük uygulandı. Deneyler ASTM C496 / C496M-17 (2017) standardına uygun olarak yapıldı. Her bir karışıma ait numunelerin ortalaması alınarak yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.11’de verilmiştir.



**Şekil 3.11** : Yarmada çekme dayanım testi.

### **3.5.2.3 Eğilmede çekme dayanımı ve eğilme performansı**

Lifsiz referans, tek lifli, ve karma lifli KYB karışımlarının 90 günlük eğilme dayanımlarını tespit etmek amacıyla her bir karışımdan 2 adet 100x75x400 mm ölçülerinde prizmatik numuneler üretilmiştir. Dört noktalı eğilme dayanımı deneyi, deplasman kontrollü eğilme testi düzeneği kullanılarak 0.003 mm/sn yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12). Dört noktalı eğilme deneyleri ASTM C1609 (2012) standardına uygun olarak yapılmıştır.

Şekilde görüldüğü üzere, mesnetler arası açıklığı 300 mm (l) ve mesnet ve yükler arası 100 mm (l/3) olacak şekilde ayarlanmıştır. Prizmanın orta noktasındaki sehimi ölçmek amacıyla açıklık ortasına karşılıklı yerleştirilen 2 adet deplasman ölçerler (LVDT) kullanılmış olup, numunelerin açıklık ortası sehimi 2.5 mm olana kadar yüklemeye devam edilmiştir (Şekil 3.12). Deneyden elde edilen yük-sehim verileri veri kaydedici aracılığıyla bilgisayara aktarılmış olup, yük-sehim eğrileri excel programı kullanılarak çizilmiştir.

Dört noktalı eğilme deneyi uygulanan Lifsiz referans, tek lifli, ve karma lifli KYB numunelerine ait maksimum eğilme dayanımları Denklem 3.2'den faydalanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = F * \frac{1}{b*h^2} \quad (3.2)$$

Buradaki  $\sigma$ , Eğilme dayanımını (MPa); F, Maksimum yükü (N); L, iki mesnet arasındaki açıklığı (mm); b, numunenin genişliğini (mm) ve h, numunenin yüksekliğini (mm) göstermektedir.



Şekil 3.12 : Eğilmede çekme dayanım testi.

#### 3.5.2.4 Elektriksel özdirenç deneyi

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının elektriksel özdirenç ölçümlerinin yapılması amacıyla her bir karışımdan 2 adet 100x200 mm boyutlarında silindirik numuneler üretilmiştir. Daha sonra, silindirik numunelerin üretildiği esnada, numunelerden üniform bir akım geçişini sağlamak amacıyla karşılıklı iki başlığına kurşun metal plakalar yerleştirilmiştir. Üretilen numuneler uygun şartlarda 90 gün kür edildikten sonra etüvde  $105 \pm 5$  °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. Soğutma işleminden sonra iletkenliği arttırmak amacıyla kurşun metal plakalar ile beton arasına şırınga yardımıyla tuzlu su çözeltisi enjekte edilmiştir. (Şekil 3.13a). Numunelerin elektriksel özdirencini ölçmek için iki problu (sonda) ölçüm yapma tekniği kullanılmıştır. Numunelerin paralel iki başlıklarına, bakır plaka ve problar mengene ile sabitlenmiştir. DC güç kaynağının eksi kutbu bir bakır elektroda artı kutbu da diğer bakır elektroda bağlanarak devre tamamlanmıştır. Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan deney düzeneği Şekil 3.13b’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.13 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin elektriksel direncinin belirlenmesi a) Numunelerin hazırlanması b) İki problu elektriksel direnç deney düzeneği.

Şekil 3.13b’de gösterilen güç kaynağı vasıtasıyla tüm numunelere sabit 60 voltluk gerilim verilerek her bir numuneden geçen akım değerleri miliamper (mA) olarak dijital multimetre ile ölçülmüştür. Gerilim ve akım değerleri bilinen numunelerin elektriksel özdirençleri ve iletkenlikleri sırasıyla, Denklem 3.3 ve 3.4 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$P = R * \left(\frac{A}{L}\right) \quad (3.3)$$

$$C = \frac{1}{P} \quad (3.4)$$

Buradaki P, elektriksel özdirenci ( $k\Omega \cdot m$ ); C, iletkenlik (S/m); L, bakır elektrotlar arası mesafeyi (m); R, hesaplanan direnci ( $\Omega$ ) ve A, numunenin alanını ( $m^2$ ) göstermektedir.



### 3.5.2.5 Isıtma deneyi

Elektriksel özdirenç deneylerinde kullanılan 90 günlük, 100x200 mm boyutlarındaki silindir numuneler, elektrik akımı ile sıcaklık artışını belirlemek için yapılan deneylerde de kullanılmıştır. Lifsiz referans, tek lifli, ve karma çelik lifli KYB numunelerinin iletkenliği arttırmak amacıyla kurşun metal plakalar ile beton arasına şırınga yardımıyla tuzlu su çözeltisi bu deney öncesi tekrar enjekte edilmiştir (Şekil 3.13a). Daha sonra bakır levhalar silindir numunelerin baş kısımlarına mengene ile sıkıştırılarak düzenek sabitlenmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.14a’da verilmiştir.



(a)

(b)

**Şekil 3.14 :** Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin elektrik akımı ile sıcaklık artışını belirlenmesi: a) Isıtma deneyi düzeneği b) Numunelerin sıcaklık ölçümü.

Numunelere varyak yardımıyla 220 volt şebeke gerilimi verilmiştir. Numuneler eşit uzunluklarda dört bölüme ayrılarak (Şekil 3.14b), sıcaklık ölçümleri bu bölümler üzerinden 5 dk aralıklarla dijital lazer ısı ölçer yardımıyla ölçülmüştür.

Numuneler üzerinde eşit uzaklıklarda dört ayrı noktada işaretlenerek (Şekil 3.14b), sıcaklık ölçümleri bu noktalar üzerinden 5 dk aralıklarla dijital lazer ısı ölçer yardımıyla ölçülmüştür. Numunelerin zamana bağlı sıcaklık artış verileri belirlenip grafik haline getirilmiştir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde, lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının işlenebilirliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan taze beton deneyleri (çökme-yayılma,  $T_{500}$ , J-halkası) ve dayanımlarının belirlenmesi için de üretilen numuneler üzerinde sertleşmiş beton deneyleri (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı) ile elektriksel özdirenç ve ısıtma deneylerine ait bulgular verilmiştir.

### 4.1 Taze Beton Özellikleri

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının taze beton özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneylere ait sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

#### 4.1.1 Çökme-yayılma deneyi

Betonun doldurma yeteneği ve stabilitesinin değerlendirilmesi amacıyla yapılan çökme-yayılma çapı (Dç) testine ait bulgular Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde, Tablo 4.1’de görüldüğü gibi, EFNARC (2005)’e göre çökme-yayılma çapları esas alındığında karışımların çoğu SF2 (660-750 mm) ve bazı karışımlar da SF3 (760-850 mm) sınıfına uymaktadır.

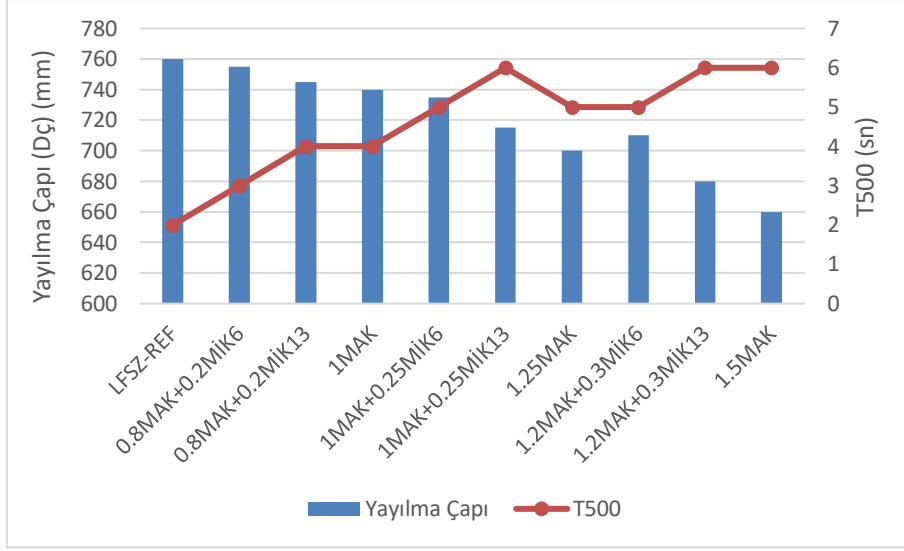
Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarından en yüksek çökme-yayılma çapı 760 mm ile LFSZ-REF karışımında, en düşük yayılma çapı ise 660 mm ile 1.5MAK karışımına aittir.

Lif kombinasyonları ve oranları dikkate alındığında, lifsiz referans karışıma kıyasla, lif oranı en yüksek olan (%1.5 makro lif) tek lifli karışımın çökme yayılma değerinde en fazla azalma görülürken, en az azalma lif oranı en düşük olan karma lifli (%0.8 makro ve 6 mm boyunda %0.2 mikro lif) karışımında gözlemlenmiştir (Şekil 4.1). Sonuç olarak karışıma eklenen lif oranları arttıkça çökme-yayılma çapının düştüğü, işlenebilirliğin olumsuz olarak etkilendiği gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar Atalay tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir [72].

Ayrıca, karışımlara dahil edilen lif oranlarının artmasıyla, oluşan topaklanmayı önlemek ve karışımların kendiliğinden yerleşebilirliği açısından gerekli olan çökme-yayılma değerini sağlamak için akışkanlaştırıcı ihtiyacının arttığı görülmüştür.

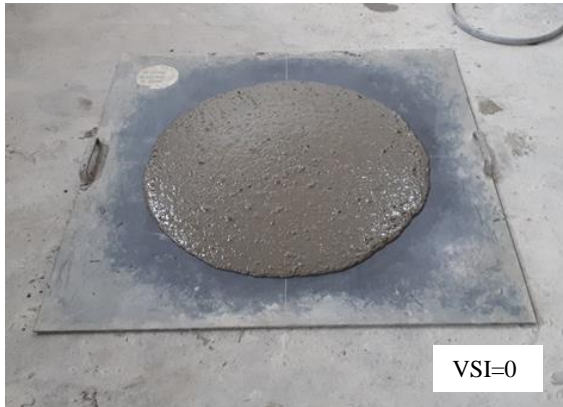
**Çizelge 4.1 : Karışımlara ait işlenebilirlik test sonuçları.**

Karışım Kodu	Çökme-Yayıllma		J Halkalı Çökme-Yayıllma				HA (kg/m <sup>3</sup> )
	Dç (mm)	T <sub>500</sub> (sn)	Dj (mm)	T <sub>500j</sub> (sn)	ΔH (mm)		
LFSZ-REF	760 (SF3)	2	760	2	2	10.25	
0.8MAK+0.2MİK6	755 (SF2)	3	760	4	5	9.75	
0.8MAK+0.2MİK13	745 (SF2)	4	715	5	8	10.50	
1MAK	740 (SF2)	4	715	6	6.5	10.25	
1MAK+0.25MİK6	735 (SF2)	5	720	6	13	11.00	
1MAK+0.25MİK13	715 (SF2)	6	700	7	15	10.50	
1.25MAK	700 (SF2)	5	685	6	20	11.25	
1.2MAK+0.3MİK6	710 (SF2)	5	700	6	25	11.00	
1.2MAK+0.3MİK13	680 (SF2)	6	660	7	31	10.25	
1.5MAK	660 (SF2)	6	650	7	40	10.75	

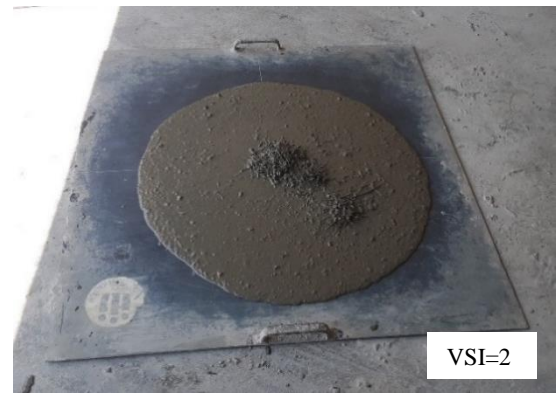


**Şekil 4.1 :** Karışımların yayılma çapları ve T<sub>500</sub> süreleri.

ASTM C1611 (2018)'e göre karışımların kararlılıklarının değerlendirilmesinde kullanılan Visual Stability Index (VSI) değerlerine göre Şekil 4.2'deki görseller sınıflandırılmıştır. Bu şekil incelendiğinde, lifsiz referans karışımının VSI değerinin 0 olduğu; tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının VSI değerlerinin ise, 1.25MAK ve 1.5MAK karışımları dışında genelde 2 olduğu tespit edilmiştir. Karışımların VSI değerlerinin 2 olması, çelik lif oranlarının artmasına ve 1.25MAK ve 1.5MAK karışımlarının VSI değerlerinin 3 olması ise makro lif miktarının fazla olmasından kaynaklı lif kümelenmesine dayandırılabilir. Sonuç olarak, bu çalışmaya konu olan KYB karışımlarının genelde kabul edilebilir bir stabiliteye sahip olduğu görülmüştür.



LFSZ-REF



1MAK

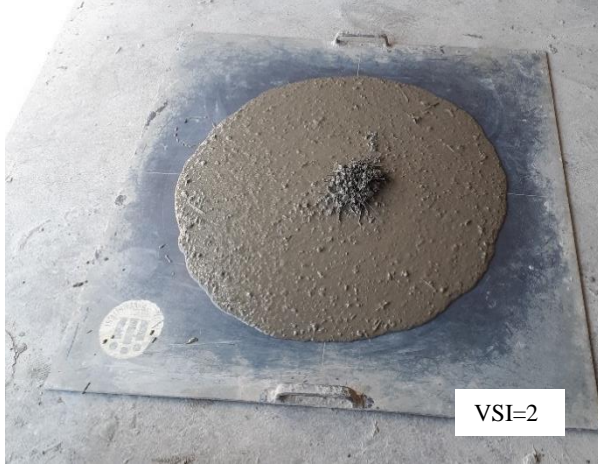


1.25MAK



1.5MAK

Şekil 4.2 : Lifsiz referans ve tek lifli KYB karışımlarına ait VSI değerlendirmesi.



0.8MAK+0.2MİK6



0.8MAK+0.2MİK13



1MAK+0.25MİK6



1MAK+0.25MİK6



1.2MAK+0.3MİK6



1.2MAK+0.3MİK13

Şekil 4.3 : Karma Lifli KYB karışımlarına ait VSI değerlendirmesi.

#### 4.1.2 T<sub>500</sub> deneyi

Taze beton karışımlarının çökme-yayılma testi esnasında yayılma tablası üzerinde işaretli 500 mm çapa sahip daireye ulaşmasına kadar geçen süre T<sub>500</sub> değeri olarak kaydedilmiş ve Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Yayılma süreleri incelendiğinde, karışıma eklenen lif oranlarının artmasıyla yayılma süresinin uzadığı tespit edilmiştir. Kına tarafından yapılan çalışmalarda da benzer bulgular elde edilmiştir [11].

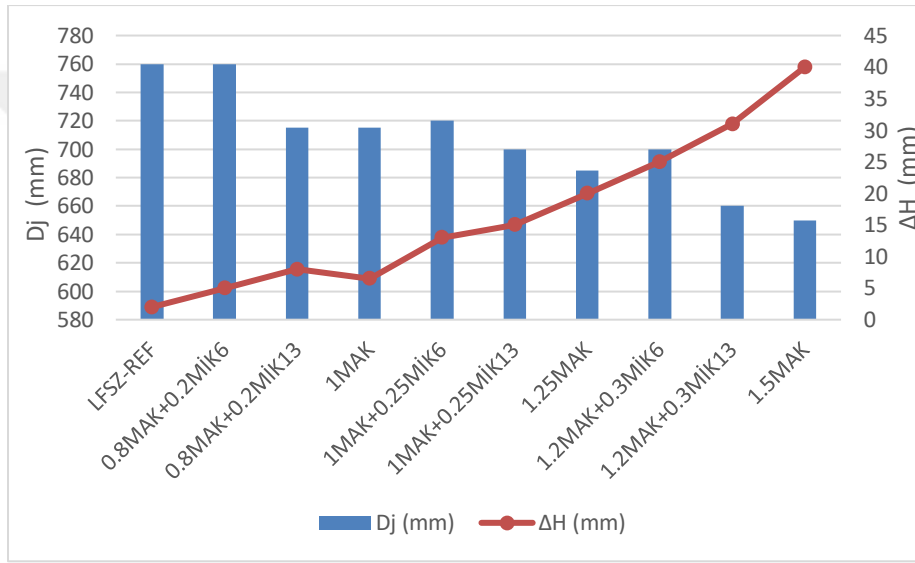
Tüm lifli KYB karışımlarının EFNARC (2002)’ye göre VS2/VF2 viskozite sınıfına ait oldukları belirlenmiştir. Karışımlara ait T<sub>500</sub> süreleri arttıkça viskozitelerinin de artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Tüm karışımlarda T<sub>500</sub> sürelerinin 2 sn ve üzerinde olması, kendiliğinden yerleşebilirliği sağlayabilmek amacıyla, yüksek oranda bağlayıcı malzeme (çimento+uçucu kül) ve ince agrega kullanılmasına dayandırılabilir.

#### 4.1.3 J-halkası deneyi

Betonun engeller arasından geçiş kabiliyetini ölçmek için yapılan deneyde, yükseklik farkı ( $\Delta H$ ) değerinin yanında yayılma çapı ( $D_j$ ) ve T<sub>500j</sub> değerleri de belirlenmiştir. Deneyde, 300 mm çaplı ve 8 adet Ø12 düşey donatılardan oluşan J-halkası kullanılmıştır. Bu çalışmada lifli karışımlar (makro lif boyu 60 mm) kullanıldığı için J-halkasına yerleştirilen düşey donatılar arasındaki mesafe iki katına (118 mm) arttırılmıştır. Deneyde, KYB

karışımlarında lif oranlarının artması ve farklı lif kombinasyonlarının kullanılması durumlarında karışımların geçiş kabiliyetinin etkilenme durumları incelenmiştir.

Deneyde elde edilen lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarına ait yükseklik farkı, yayılma çapı ve yayılma süresi Çizelge 4.1’de verilmiştir. KYB karışımlarında yer alan çelik lifler ve agregalar J-halkasında bulunan engellere takılarak çökme-yayılma çaplarında azalmaya sebep olmuştur. Engellere takılan bu malzemeler halkanın iç ve dış kısmında yükseklik farkı ( $\Delta H$ ) oluşturmuştur. Ayrıca tüm karışımların J-halkalı çökme-yayılma çapı ( $D_j$ ) ile yükseklik farkı ( $\Delta H$ ) değerleri Şekil 4.4’te verilmiştir.



**Şekil 4.4 :** Karışımlara ait J-halkalı çökme-yayılma çapı ( $D_j$ ) ile yükseklik farkı ( $\Delta H$ ) değerleri.

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarına ait yükseklik farkları ( $\Delta H$ ) incelendiğinde, en yüksek  $\Delta H$  değeri 40 mm ile %1.5 makro çelik lifli karışımına, en düşük  $\Delta H$  değerinin ise 2 mm ile lifsiz referans karışımına ait olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca karışımlara ilave edilen lif oranları arttıkça  $\Delta H$  değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Karma lifli KYB karışımları içerisinde 6 mm uzunluğundaki mikro çelik lif içeren karışımların yükseklik farklarının 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lif içeren karışımlara göre engeller arasından daha iyi bir geçme kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum çelik liflerin boylarının artması sonucu karışımların geçme kabiliyetinin azalması ile ilgilidir. Benzer sonuçlar Türk vd. tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir [74]. Bunlara ilaveten, lifsiz referans ve toplam %1 lif oranına sahip KYB karışımlarına ait J-halkalı çökme-yayılma değerleri genelde EFNARC (2002) kriterlerini sağlarken, %1.25 ve

%1.5 lif oranına sahip karışımlarının J-halkası yükseklik farkı değerleri EFNARC (2002) sınır değerleri dışında kalmaktadır.

KYB karışımlarından en yüksek J-halkalı çökme-yayılma çapı 760 mm ile LFSZ-REF ve 0.8MAK+0.2MİK6 karışımlarına, en düşük yayılma çapı ise 650 mm ile 1.5MAK karışımına aittir. Karışımlara karma olarak mikro çelik lif ilave edilmesi genelde J-halkası yükseklik farkı ( $\Delta H$ ) ve  $T_{500j}$  süresi değerlerinin azalmasına ve J-halkalı çökme-yayılma değerlerinin de artmasına neden olmuştur. Bu sonuç, karışımlara makro lif yerine belli oranlarda mikro lif ilave edilmesiyle karışımdaki makro lif miktarının azalmasına dayandırılabilir. KYB karışımlarına ilave edilen toplam lif oranlarının (%1, %1.25 ve %1.5) artmasıyla, karışımlara ait J-halkası yükseklik farkı değerleri artarken çökme-yayılma değerleri de azalmıştır. Atalay tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir [72].

Tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarında çelik lif oranları aynı olan karışımlar incelendiğinde, daha az miktarda makro çelik lif içeren karma lifli karışımlar ile mikro çelik lif boyu daha kısa olan karma lifli karışımların J-halkalı çökme-yayılma çapı ( $D_j$ ) değerlerinde artma gözlemlenmiştir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).



LFSZ-REF



0.8MAK+0.2MİK13





1MAK



1MAK+0.25MİK13



1.2MAK+0.3MİK6



1.2MAK+0.3MİK13

Şekil 4.5 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarına ait J-halkalı çökme-yayıma görselleri.

#### 4.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlar kalıplara yerleştirilip 24 saat laboratuvar ortamında bekletildiler. Daha sonra prizini alan numuneler kalıplardan çıkarılarak sıcaklığı  $23\pm 2$  °C'de olan kür havuzunda 90 gün beklitilmiştir. Tüm numuneler kür süresinin sonunda havuzdan çıkarılıp laboratuvar ortamında minimum 3 saat bekletilerek doygun yüzey kuru (DYK) hale getirilmiştir. DYK halindeki numunelere sertleşmiş beton testleri (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, dört noktalı eğilme dayanımı, elektriksel direnç ve ısıtma testleri) uygulanmış ve test sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

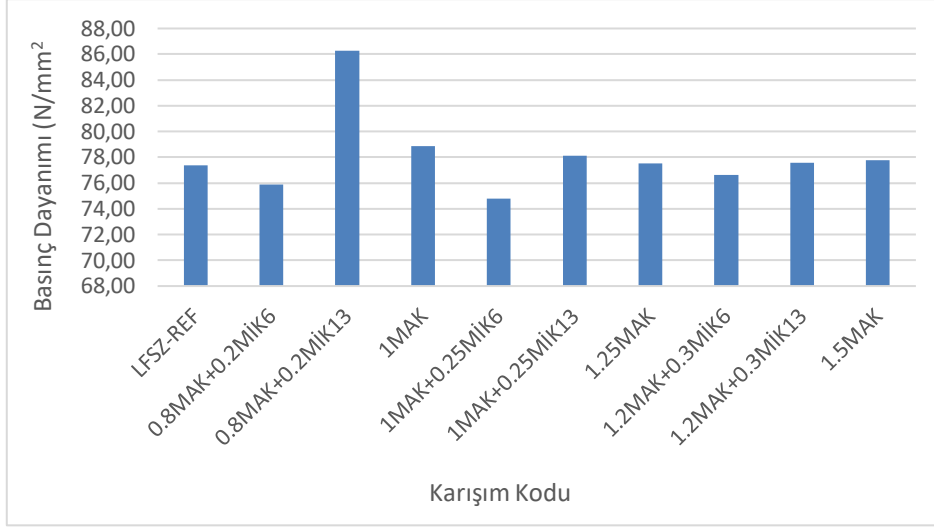
#### 4.2.1 Basınç dayanımı

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının 90 günlük basınç dayanımı değerlerini belirlemek amacıyla, 100x100x100 mm ölçülerinde 3 adet küp numune test edilmiştir. Numunelere ait ortalama basınç dayanım değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

KYB numunelerinin tek eksenli basınç deneyi sonuçları incelendiğinde, genelde lif hacminin artmasıyla lifli karışımların basınç dayanımının lifsiz referans karışıma kıyasla azaldığı tespit edilmiştir. Çünkü karışıma dahil edilen lif hacmindeki artış karışımın işlenebilirliğini olumsuz etkilediğinden, bu durumun liflerin hamur içerisinde homojen olarak yönlendirmesini engelleyip boşluklu bölgelere sebep olduğu söylenebilir. Benzer sonuca Ahmed ve Umar tarafından yapılan çalışmada da ulaşılmış olup, liflerin özellikle agregalardan dolayı farklı yönlendirmesi ve matris içerisinde zayıf bölgelere sebep olan liflerin homojen olmayan yayılmasından kaynaklandığını söylemişlerdir [10]. Toplamda % 1 lif içeren karışımların basınç dayanımı ortalama % 4 artarken sadece 6 mm boyunda mikro lif içeren karma lifli karışımın basınç dayanımı yaklaşık % 2 azalmıştır. Buradan görülebildiği gibi, betona lif takviyesinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi değişkenlik göstermektedir. Lif takviyeli betonlarla ilgili yapılan çalışmalarda, betona lif ilave edilmesinin basınç dayanımını yaklaşık olarak  $\pm\%25$  oranında değiştirdiği görülmüştür [34]. Bunun yanında, en yüksek basınç dayanımı değeri 86.27 MPa ile % 0.8 makro ve 13 mm boyunda % 0.2 mikro çelik lif içeren karışımdan elde edilirken, 1MAK+0,25MİK6 karışımının ise 74.77 MPa ile en düşük basınç dayanımı değerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, 13 mm boyunda mikro lif içeren karma lifli tüm karışımların basınç dayanımı lifsiz referans karışımına kıyasla tüm lifli karışımlar içerisinde en fazla artışı göstermiştir. Bu sonuç mikro lifin mikro çatlakları köprüleyerek makro çatlaklara dönüşmesini geciktirmesine ve böylece numunenin bütünlüğünü daha uzun süre korumasına dayandırılabilir. Yapılan benzer çalışmalarda da yük altında olan lifli betonlardaki mikro liflerin kısa olmasından dolayı mikro çatlakları köprüleyerek çatlakların yayılmasını ve büyümesini engellediği tespit edilmiştir [10], [46]. Böylece mikro liflerin betonun basınç dayanımını daha çok iyileştirdiği tespit edilmiştir [11].

**Çizelge 4.2 : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait test sonuçları.**

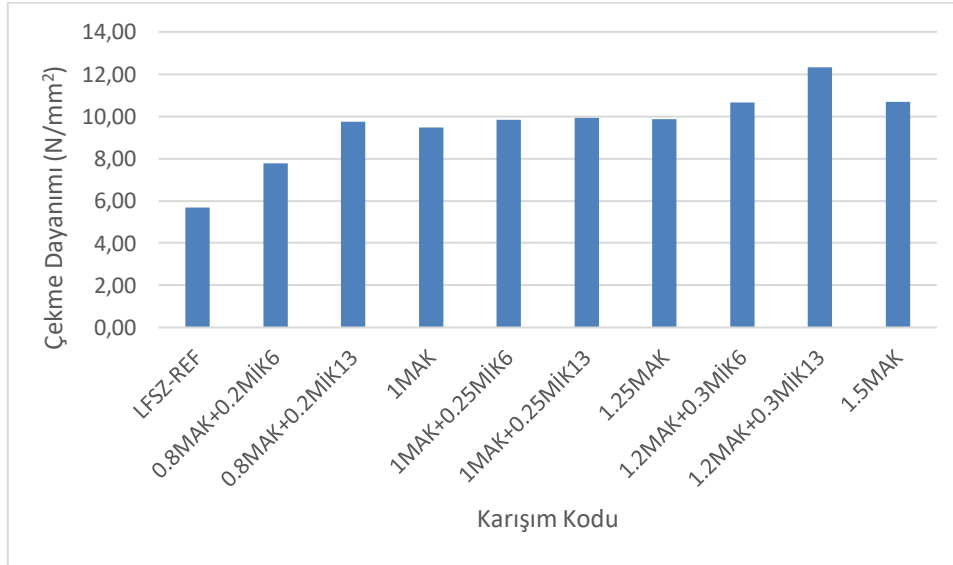
Karışım Kodu	Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Eğilme Dayanımı (MPa)	Elektriksel Özdirenç (kohm.m)	İletkenlik (s/m)	Sıcaklık Artışı (°C)
LFSZ-REF	77.37	5.67	12.43	7.56	0.13	1.33
0.8MAK+0.2MİK6	75.87	7.77	14.29	3.93	0.25	1.89
0.8MAK+0.2MİK13	86.27	9.73	17.31	3.14	0.32	5.14
1MAK	78.87	9.47	18.37	3.15	0.32	4.30
1MAK+0.25MİK6	74.77	9.83	19.88	2.94	0.34	6.65
1MAK+0.25MİK13	78.10	9.93	21.47	2.57	0.39	6.84
1.25MAK	77.50	9.87	21.85	2.98	0.34	6.74
1.2MAK+0.3MİK6	76.63	10.67	22.08	2.47	0.40	5.16
1.2MAK+0.3MİK13	77.59	12.33	22.16	1.74	0.58	14.30
1.5MAK	77.77	10.70	23.32	2.73	0.37	2.94



**Şekil 4.6 :** Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin basınç dayanım değerleri.

#### 4.2.2 Yarmada çekme dayanımı

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının 90 günlük yarmada çekme dayanımını belirlemek amacıyla Ø100x200 mm ölçülerinde 3 adet silindir numune test edilmiştir. Numunelere ait 90 günlük ortalama yarmada çekme dayanım değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Tüm KYB numuneleri incelendiğinde, en düşük yarmada çekme dayanımı 5.67 MPa ile LFSZ-REF numunesine ait iken, en yüksek yarmada çekme dayanımı 12.33 MPa ile 1.2MAK+0.3MİK13 numunesinden elde edilmiştir.



**Şekil 4.7 :** Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin yarmada çekme dayanım değerleri.

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi, lifsiz referans numuneye kıyasla, tüm lifli numunelerin yarmada çekme dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, hacimce lif oranının %1’den %1.25’e ve %1.5’a artmasıyla birlikte, daha fazla makro ve mikro çelik lif tarafından çatlakların oluşmasının önlenmesinin sonucu olarak tüm lif kombinasyonları için yarmada çekme dayanım değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Turk vd. tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuç elde edilmiş olup, karışımlara hacimce daha fazla lif ilave edilmesinin (%1.5) çekme dayanım değerlerinde artışa sebep olduğu bulunmuştur [7]. Diğer taraftan, ikili lif kombinasyonuna sahip numunelerin yarmada çekme dayanımlarının, aynı oranda sadece makro çelik lif içeren numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum karma liflerin birbirleriyle etkileşim halinde olarak bir sinerji oluşturmasına ve yüksek performans göstermesine bağlanmaktadır. Dönmez tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar bulunmuştur [6]. Bunlara ilaveten, ikili lif kombinasyonuna sahip numuneler kendi aralarında kıyaslandığında, en yüksek çekme dayanımının 13 mm uzunluğundaki mikro çelik liflere sahip numunelere ait olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise, mikro çelik liflerin boyları uzadıkça beton içerisindeki çatlakları köprülemede devamlılık sağlamasına dayandırılabilir.

#### **4.2.3 Eğilme performansı**

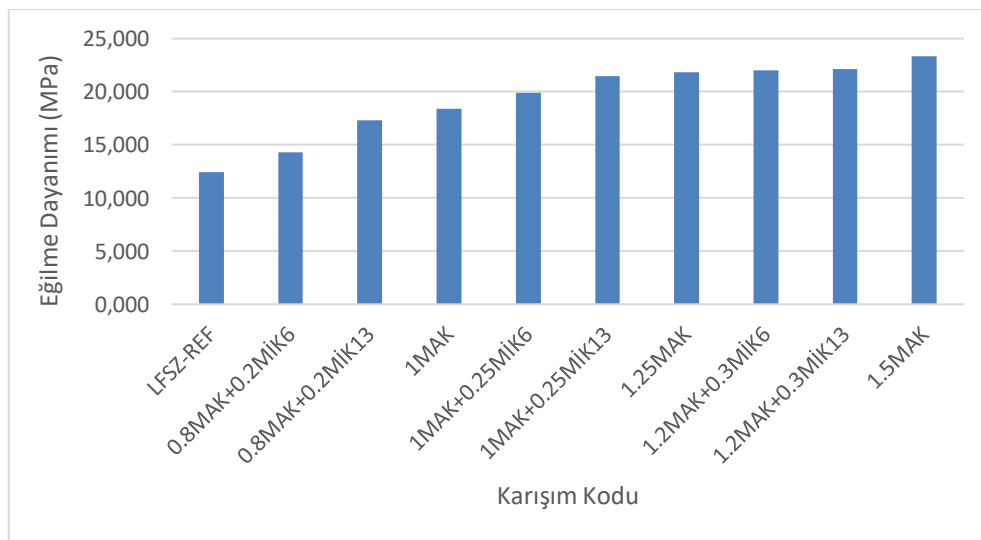
Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının 90 günlük eğilme performansını belirlemek amacıyla 100x75x400 mm ölçülerinde 2 adet prizmatik numuneler dört noktalı eğilme testine teste maruz bırakılmıştır. Deneylerden elde edilen numunelere ait 90 günlük ortalama maksimum yük ve eğilme dayanım değerleri ile eğilme tokluğu değerleri Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3 :** Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait maksimum yük, sehim, eğilme dayanımı ve tokluk ortalama değerleri

Karışım Kodu	Maksimum Yük (kN)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Tokluk (kN.mm)
LFSZ-REF	23.30	12.43	-
0.8MAK+0.2MİK6	26.80	14.29	88.47
0.8MAK+0.2MİK13	32.47	17.31	90.53
1MAK	34.44	18.37	92.24
1MAK+0.25MİK6	37.28	19.88	94.97
1MAK+0.25MİK13	40.25	21.47	100.70
1.25MAK	40.98	21.85	104.59
1.2MAK+0.3MİK6	41.27	22.08	113.81
1.2MAK+0.3MİK13	41.55	22.16	124.79
1.5MAK	43.73	23.32	183.16

#### 4.2.3.1 Eğilmede çekme dayanımı

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin 90 günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, Lifsiz referans numuneye kıyasla tüm lifli KYB karışımlarının eğilmede çekme dayanım değerleri daha yüksek çıkmıştır. En düşük eğilmede çekme dayanımı 12.43 MPa ile lifsiz referans numuneye ait iken, en yüksek eğilmede çekme dayanımı 23.32 MPa ile %1.5 makro çelik lif içeren numuneye aittir.



**Şekil 4.8 :** Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin eğilmede çekme dayanım değerleri.

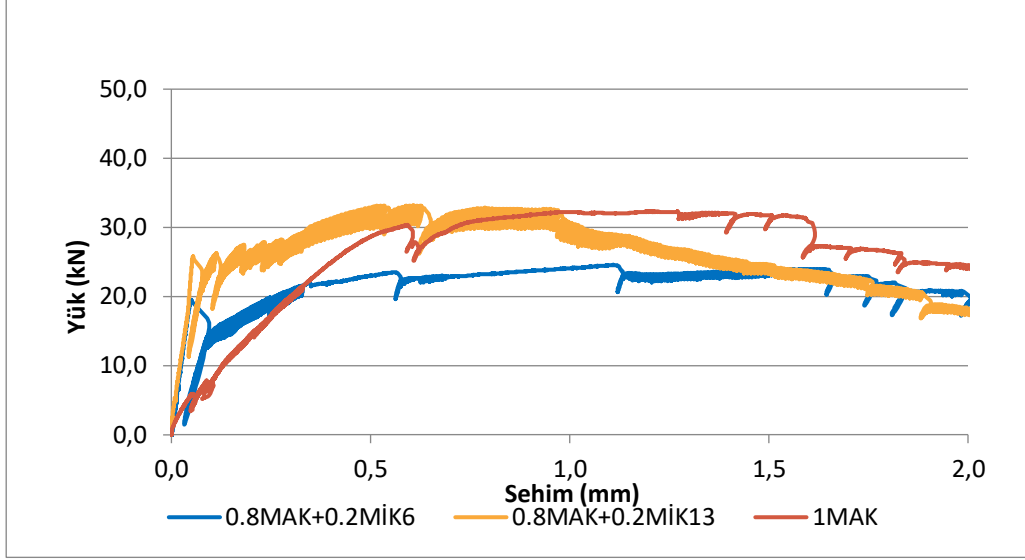
Ayrıca, karışımlara dahil edilen hacimce lif oranının artmasının, tüm lif kombinasyonlarında eğilme dayanım değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durum, karışımlara ilave edilen çelik liflerin matristeki çatlakları köprüleyerek çatlak başlamasını ve büyümesini engellemesi ve geciktirmesi ile açıklanabilir [75].

Lif hibridizasyonu dikkate alındığında, sadece (%1, %1.25 ve %1.5) makro çelik lif içeren numunelerin eğilme dayanımlarının, aynı orana sahip karma çelik lifli numunelerin eğilme dayanımlarından daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. İkili lif kombinasyonuna sahip numuneler kendi aralarında kıyaslandığında ise, 13 mm uzunluğunda mikro çelik lif içeren karışımların eğilmede çekme dayanım değerlerinin, 6 mm uzunluğunda mikro çelik lif içeren karışımların eğilmede çekme dayanımlarından daha yüksek çıktığı görülmüştür.

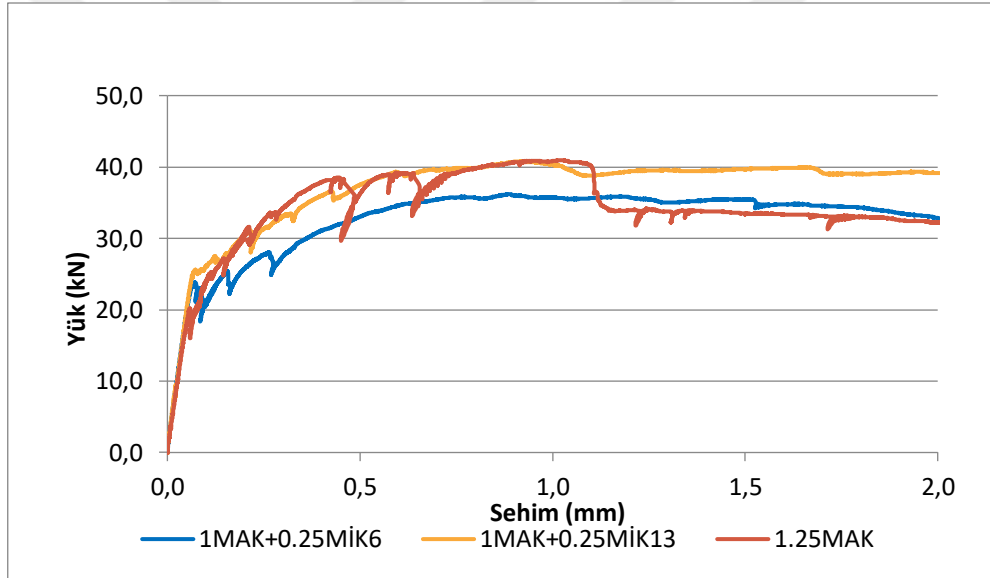
Sonuç olarak, karışımlara ilave edilen liflerin uzunluklarının artması ile karışımların eğilme dayanımları arasında güçlü bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Çünkü numunelerdeki çelik liflerin uzunluklarının artmasıyla, liflerin çatlakları köprülemede süreklilik arz ettiği ve eğilmede çekme dayanımlarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Benzer bulgular Song ve Hwang tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir [76].

#### **4.2.3.2 Yük-sehim eğrileri ve eğilme tokluğu**

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin sehim kontrollü dört noktalı eğilme testinden elde edilen yük-açıklık ortası sehim eğrileri Şekil 4.9-4.12'de gösterilmiş olup sehim eğrilerinin altındaki alanların hesaplanmasıyla elde edilen tokluk değerleri ise Çizelge 4.3'te verilmiştir.

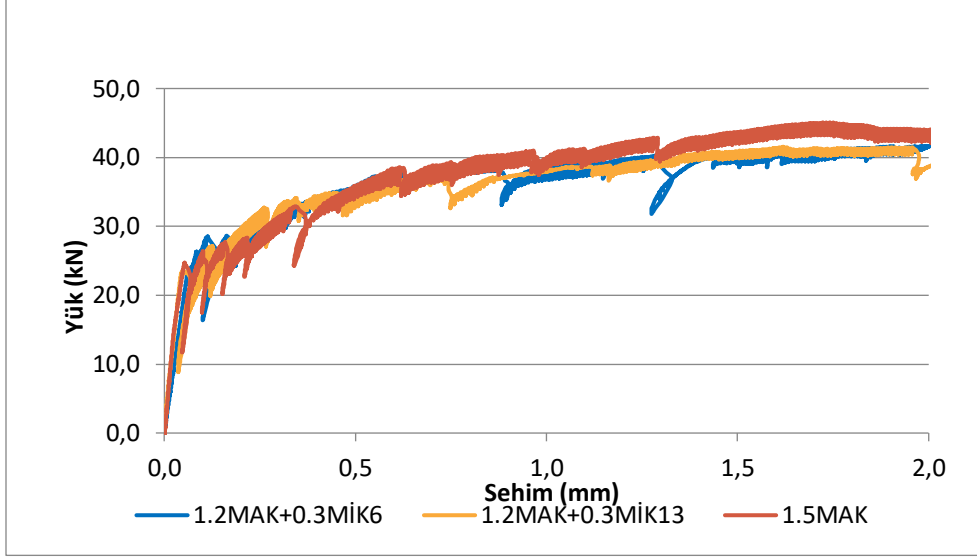


Şekil 4.9 : Toplamda %1 lif içeren tekli ve karma lifli karışımların yük-sehim eğrileri



Şekil 4.10 : Toplamda %1.25 lif içeren tekli ve karma lifli karışımların yük-sehim eğrileri

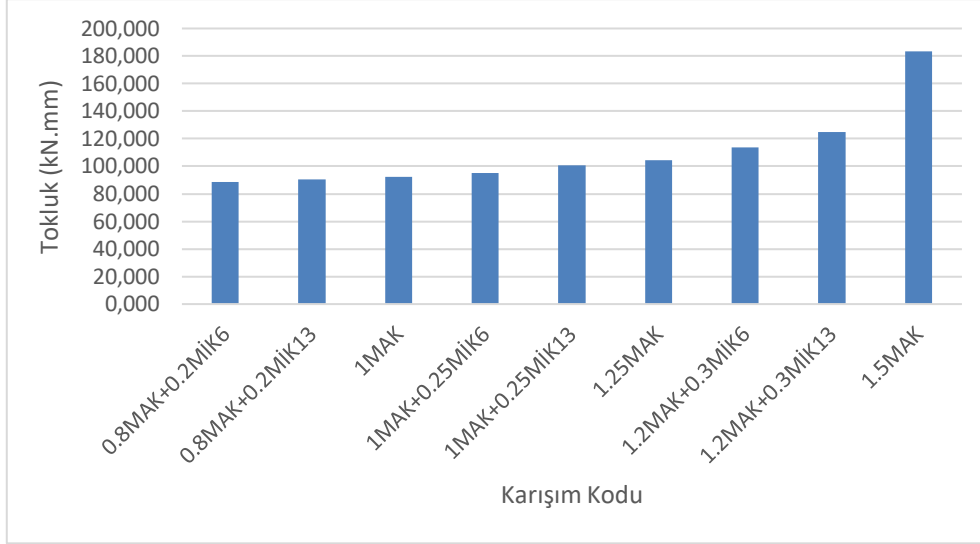




**Şekil 4.11** : Toplamda %1.5 lif içeren tekli ve karma lifli karışımların yük-sehim eğrileri

Şekil 4.9-4.11 incelendiğinde, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait yük-sehim eğrilerinin genelde sehim-sertleşmesi davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.

Tüm lifli KYB karışımlarına ait numunelerin dört noktalı eğilme testleri sonucunda çekme bölgesindeki ilk çatlak meydana gelmesi sonucunda dayanımdaki ilk azalmanın görüldüğü dayanım ilk çatlak dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Numunenin gösterebileceği maksimum yük ve bu yüke karşılık gelen sehime de açıklık ortası sehim denir. Tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin yük-sehim eğrilerinden görüldüğü üzere, %1.2 makro çelik lif ve 6 mm uzunluğunda % 0.3 mikro çelik lif içeren numuneler 2 mm ile en fazla deplasmana sahipken, %0.8 makro çelik lif ve 13 mm uzunluğunda %0.2 mikro çelik lif içeren numunelerin ise 0.61 mm ile en az deplasmana sahip olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.12 :** Tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait tokluk değerleri.

Tüm lif takviyeli KYB numunelerinin 90 günlük tokluk değerleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Tokluk değerlerine bakıldığında, en yüksek tokluk 183.16 kN.mm ile 1.5MAK numunesine aittir. 0.8MAK+0.2MİK6 numunesi ise 88.47 kN.mm ile en düşük tokluk değerini vermiştir. Karışımlara ilave edilen çelik lif oranının artırılmasının, tokluk değerlerini arttırdığı ve böylece betonun mekanik özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir. Çünkü karışımlara daha fazla lif ilave edilmesi daha fazla çatlakların köprülenmesi ve böylece daha çok sayıda çatlak oluşumu ile sünek göçme oluşmasına sebep olacaktır. Iqbal vd. ile Banthia, Sappakittipakorn yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçlar elde etmişlerdir [77], [78].

Ayrıca toplamda hacimce aynı oranda lif içeren karma lifli KYB numuneleri kendi aralarında kıyaslandığında, 13 mm uzunluğundaki mikro çelik liflerin kullanıldığı numunelerin tokluk değerlerinin daha yüksek çıktığı görülmüştür. Diğer taraftan, sadece makro çelik lif içeren karışımlara ait numunelerin ise tokluk değerlerinin, hacimce aynı oranda lif içeren karma lifli numunelere kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, betona ilave edilen çelik liflerin boylarının artması ile çatlaklar arası köprülemede devamlılık sağlamasına ve böylece, numunelerin sünekliğinin ve yük taşıma kapasitelerinin artmasına dayandırılabilir.

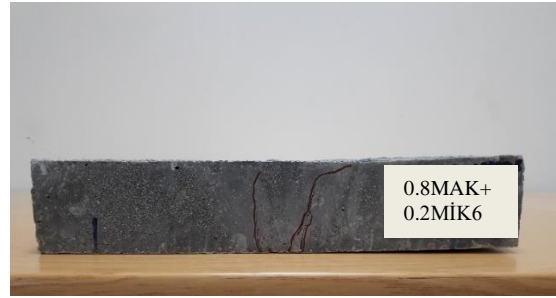
#### 4.2.3.3 Çatlak karakterizasyonu

Tüm lifli KYB numunelerinin genelde sehim-sertleşmesi davranışı göstererek göçtüğü gözlemlenmiştir. Sehim-sertleşmesi davranışı, eğilmeye maruz bırakılan lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerden üretilen prizmatik numunelerde, ilk çatlak oluşumundan sonra çok sayıda mikro çatlak oluşması şeklinde açıklanabilir. Çok sayıda çatlak oluşumu davranışında belirleyici olan yük-sehim eğrisinin maksimum noktasından sonraki davranışı olup, karışıma ilave edilen çelik liflerin tipi ve kombinasyonu da önemli bir role sahiptir. Yapılan araştırmalar göz önüne alındığında, kancalı uçlu çelik liflerin sehim sertleşmesine, düz çelik liflerin ise sehim yumuşaması davranışına sebep olduğu görülmüştür [79], [80], [81].

Şekil 4.13'ten görüldüğü gibi, sehim sertleşmesi davranışının bir sonucu olarak tüm numunelerde çoğunlukla çoklu çatlak oluşumu görülürken, karışımlara dahil edilen hacimce lif miktarının artmasıyla çoklu çatlak oluşumunda artış görülmüştür. Bunun yanında karma lifli karışımların 13 mm boyunda mikro çelik lif içeren numunelerin dört noktalı eğilme altında 6 mm mm boyunda mikro çelik lif içeren numunelere kıyasla daha fazla çoklu çatlak oluşumu sergilediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, numunelere ilave edilen makro çelik liflerin makro çatlakları ve mikro çelik liflerin ise mikro çatlakları köprülemesiyle oluşan sinerjiye bağlı olarak geniş bir çatlak yerine çok sayıda ve mikro boyutlarda çatlaklara neden olmasına dayandırılabilir. Ayrıca mikro çelik liflerin boyunun fazla olması mikro çatlakların büyümesini ve yayılmasını daha etkili bir şekilde geciktirmesinin de numunelerin sünek davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.



(1)



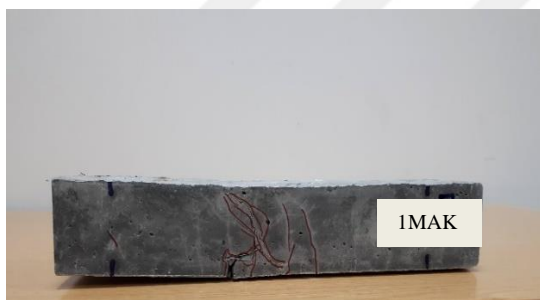
(2)



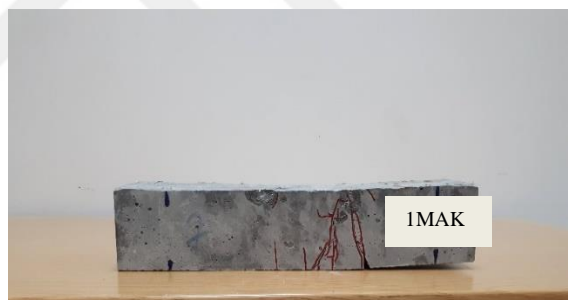
(1)



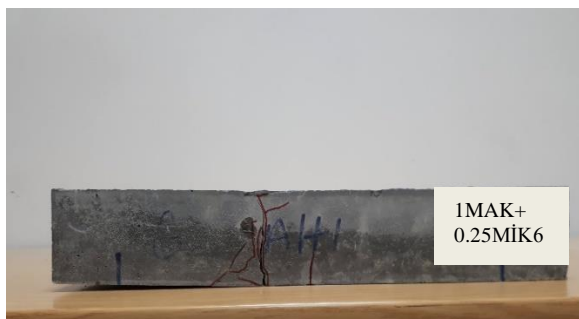
(2)



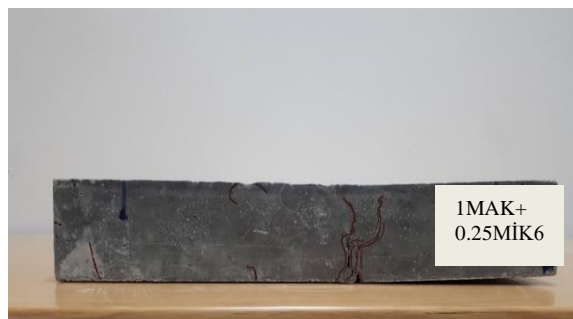
(1)



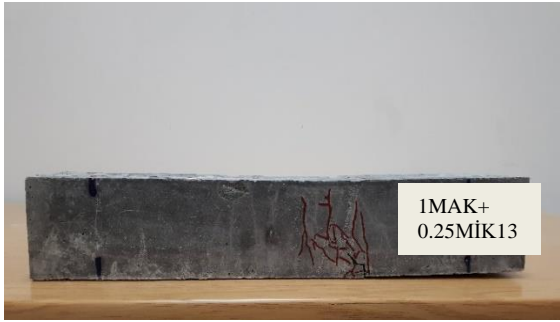
(2)



(1)



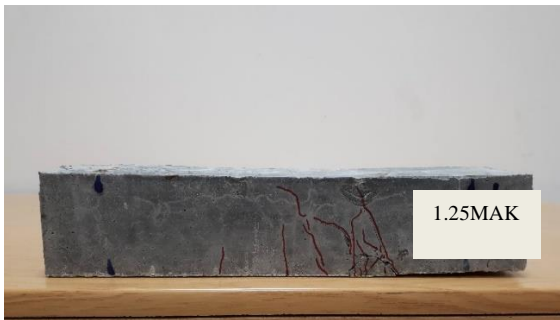
(2)



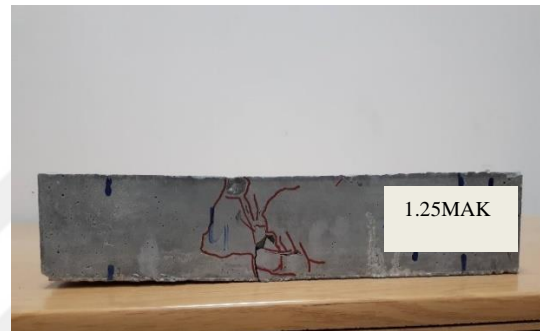
(1)



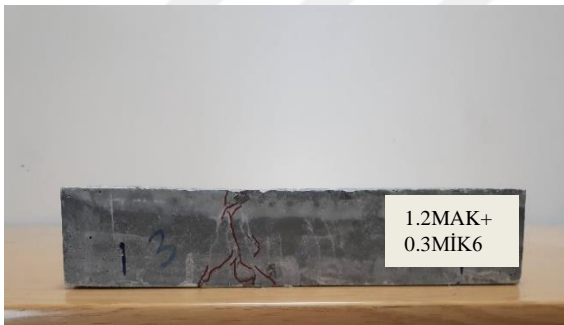
(2)



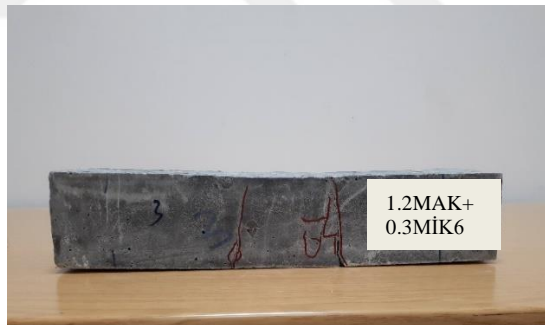
(1)



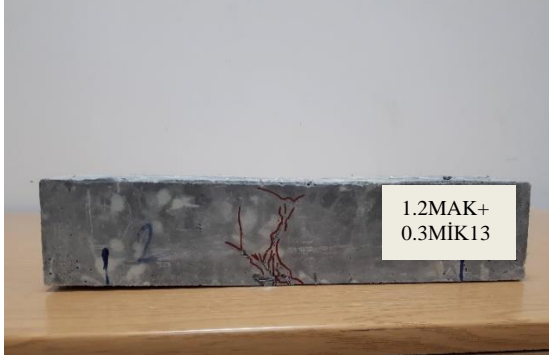
(2)



(1)



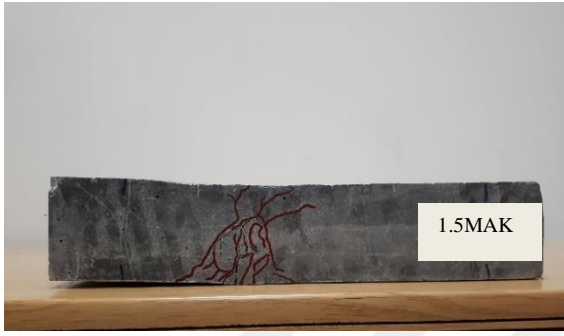
(2)



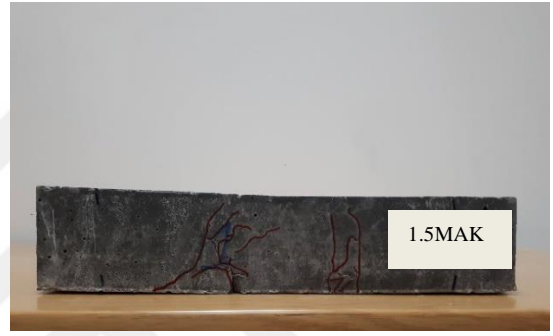
(1)



(2)



(1)



(2)

**Şekil 4.13 :** Dört noktali eğilmeye maruz bırakılmış lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin çoklu çatlak davranışları.

#### 4.2.4 Elektriksel özdirenç

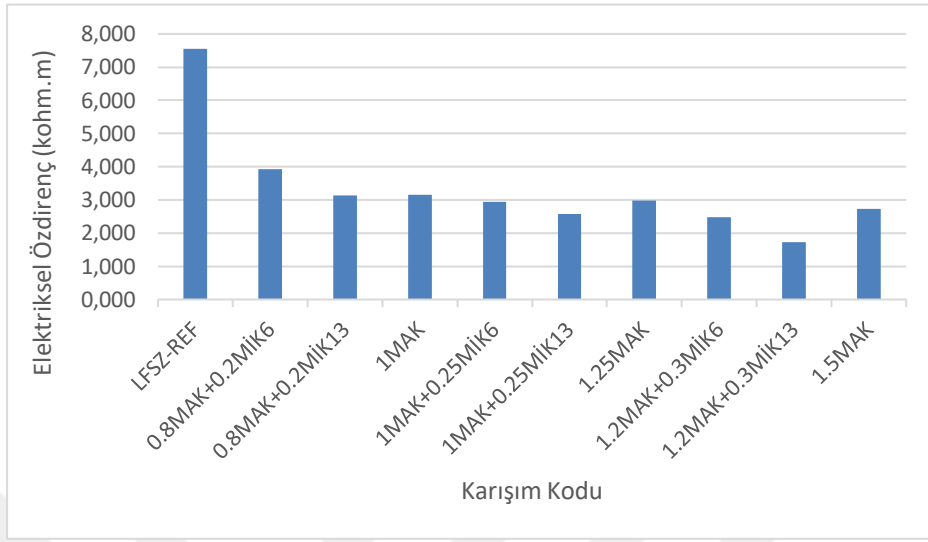
Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının 90 günlük elektriksel özdirençlerinin belirlenmesi amacıyla 2 adet Ø100x200 mm ölçülerinde silindir numune test edilmiştir. Bu amaçla, numunelerin sabit 60 volt gerilim altındaki direnç (R), akım (I), elektriksel özdirenç (P) ve iletkenlik (C) değerleri belirlenerek Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.4 :** Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait elektriksel özdirenç deney sonuçları.

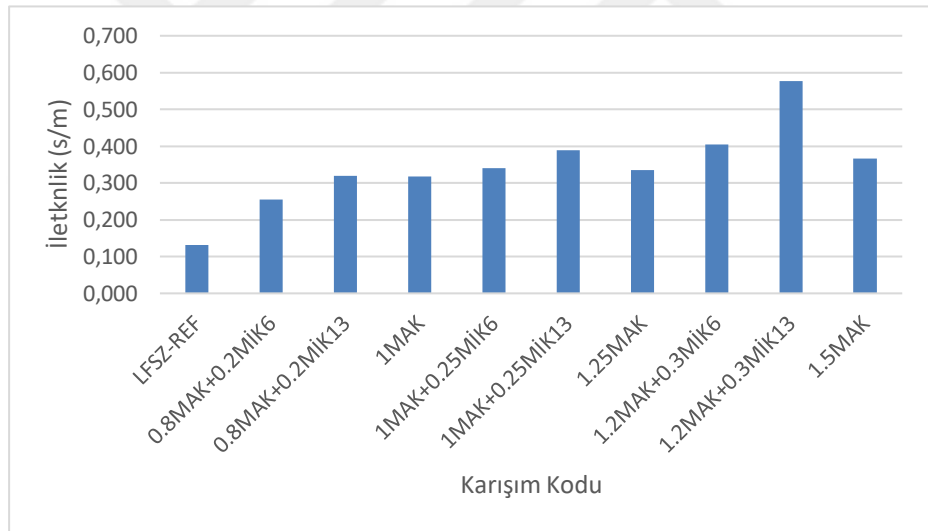
Karışım Kodu	V (volt)	I (amper)	R (ohm)	P (kohm.m)	C (s/m)
LFSZ-REF	60	0.003	19261.637	7.560	0.132
0.8MAK+0.2MİK6	60	0.006	10008.340	3.928	0.255
0.8MAK+0.2MİK13	60	0.008	7994.670	3.138	0.319
1MAK	60	0.007	8021.390	3.148	0.318
1MAK+0.25MİK6	60	0.008	7500.000	2.944	0.340
1MAK+0.25MİK13	60	0.009	6550.218	2.571	0.389
1.25MAK	60	0.008	7604.563	2.985	0.335
1.2MAK+0.3MİK6	60	0.010	6295.908	2.471	0.405
1.2MAK+0.3MİK13	60	0.014	4421.518	1.735	0.576
1.5MAK	60	0.009	6952.491	2.729	0.366

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.14 a ve b’den görüldüğü gibi, lifsiz referans karışıma kıyasla, tüm lif takviyeli KYB numunelerinin yüksek akım ve iletkenlik değerlerine ulaşması, numunelere ilave edilen çelik liflerin elektriksel özdirenci düşürdüğünü açıkça göstermektedir. Bunun yanında, en yüksek iletkenlik değeri 0.576 s/m ile 1.2MAK+0.3MİK13 karışımından elde edilmiş ve bunun bir sonucu olarak numunenin elektriksel özdirenç değeri de 1.735 kohm.m ile en düşük çıkmıştır. Diğer taraftan lifsiz referans numunenin 7.7560 kohm.m ile en yüksek elektriksel özdirence sahip olduğu ve dolayısıyla 0.132 s/m ile en az iletkenliğe sahip olduğu görülürken, lif takviyeli KYB numunelerinde ise en düşük iletkenlik değeri 0.255 s/m ile 0.8MAK+0.2MİK6 karışımından elde edilmiştir. Karışımlara ilave edilen lif oranının hacimce (%1’den %1.25’e ve %1.5’a) artması ise, numunelerin daha fazla iletken olmasına sebep olmuştur. Sonuçta, karışımlara hacimce daha fazla çelik lif ilave edilmesinin elektriksel özdirenci düşürdüğü ve dolayısıyla numunenin iletkenliğini arttırdığı sonucuna varılabilir. Boğa tarafından yapılan çalışmada da numunelere ilave edilen liflerin elektriksel özdirenci düşürdüğü tespit edilmiştir [12]. Bütün bunlara ilaveten, karma lif takviyeli karışımlara ilave edilen mikro liflerin boyu dikkate alındığında, 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lif içeren tüm karma lifli karışımların aynı lif oranına sahip karışımlara kıyasla, daha düşük elektriksel özdirenç ve daha yüksek iletkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum uzunluk artışının lifler arası bağlantıyı daha iyi sağlaması ile numune boyunca doğrusal bir iletken yol oluşturmasına dayandırılabilir. Benzer davranışlar literatürde karşılaşılan çalışmalarla da desteklenmektedir [82]. Sarwary

tarafından yapılan çalışmada da yüksek uzunluğa sahip liflere sahip numunelerin elektriksel iletkenliğinin çok daha yüksek değerlere ulaştığı elde edilmiştir [29].



(a)



(b)

**Şekil 4.14** : Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait; a) Elektriksel özdirenç b) İletkenlik değerleri.

Bütün bunlara ilaveten, çelik lif takviyeli numunelerin iletkenliklerinin yüksek ve elektriksel özdirenç değerlerinin de düşük çıkması, iletkenlik ile özdirenç arasındaki ters çalışma prensibini sağladığını göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da yüksek



iletkenliğe sahip numunelerin elektriksel özdirenç değerlerinin düşük olduğu belirlenmiştir [55], [56].

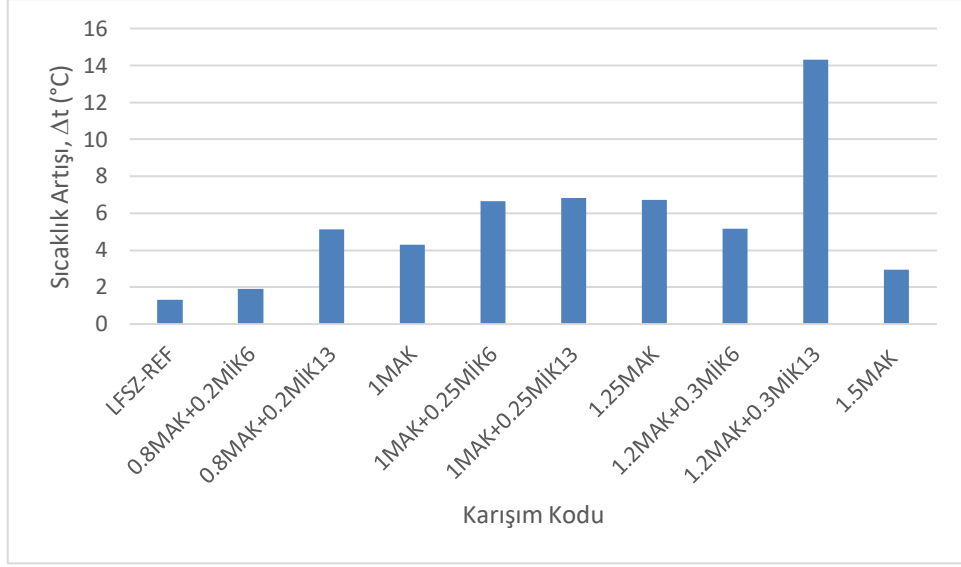
Sonuç olarak, çelik lif takviyeli KYB karışımlarına ait elektriksel özdirenç ve mekanik özellikler birlikte değerlendirildiğinde, lifsiz referans numunelere kıyasla karışımlara çelik lif ilave edilmesi ile numunelerin elektriksel özdirençlerinin azalması ve iletkenliklerinin artmasının yanında mekanik özelliklerinin de iyileştiği tespit edilmiştir [59].

#### 4.2.5 Numunelerin ısıtılması

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarının elektrik akımı ile sıcaklık artışını belirlemek için 2 adet Ø100x200 mm ölçülerinde silindir numune test edilmiştir. Numunelere varyak yardımıyla 220 volt şebeke gerilimi verilmiş ve bu sabit gerilim altındaki numunelerin 30. dakikadaki sıcaklık artışı değerleri ( $^{\circ}\text{C}$ ), numunelerin akım verilmeden önceki ilk sıcaklıkları esas alınarak belirlenmiştir (Çizelge 4.5 ve Şekil 4.15).

**Çizelge 4.5 :** Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerine ait ısıtma deney sonuçları.

Karışım Kodu	Sıcaklık Artışı, $\Delta t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
LFSZ-REF	1.326
0.8MAK+0.2MİK6	1.888
0.8MAK+0.2MİK13	5.136
1MAK	4.300
1MAK+0.25MİK6	6.650
1MAK+0.25MİK13	6.838
1.25MAK	6.738
1.2MAK+0.3MİK6	5.163
1.2MAK+0.3MİK13	14.300
1.5MAK	2.938



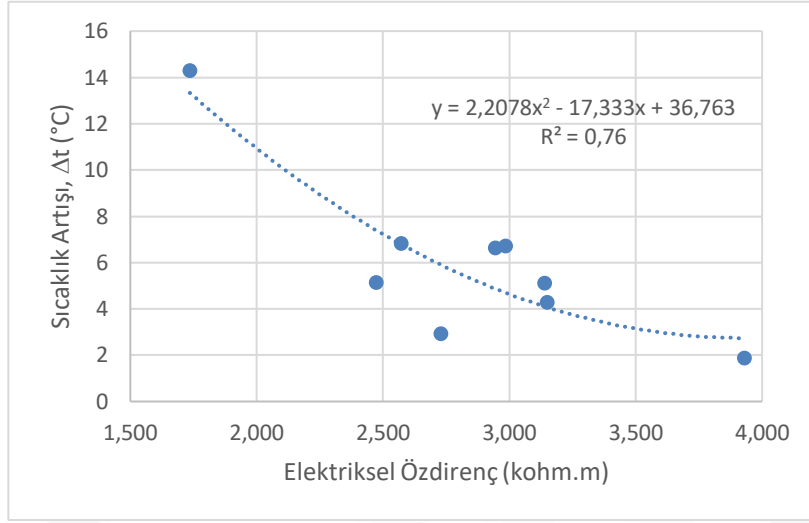
**Şekil 4.15 :** Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin 30. dakikadaki sıcaklık artışı değerleri.

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.15'ten görüldüğü üzere, 30 dakikalık zaman dilimi içerisindeki elektrik akımı ile en fazla sıcaklık artışı 14.3 °C ile 1.2MAK+0.3MİK13 karışımından elde edilmiştir. En düşük sıcaklık artışı ise 1.33 °C ile lifsiz referans numunesinden ölçülmüştür. Bunun yanında, lif takviyeli KYB numuneleri içerisinde en düşük 30. dakikadaki sıcaklık artışı 1.89 °C ile 0.8MAK+0.2MİK6 karışımından elde edilmiştir. KYB numunelerine lif ilave edilmesinin numunelerin sıcaklık artışında genellikle olumlu bir etki gösterdiği açıkça görülmüştür.

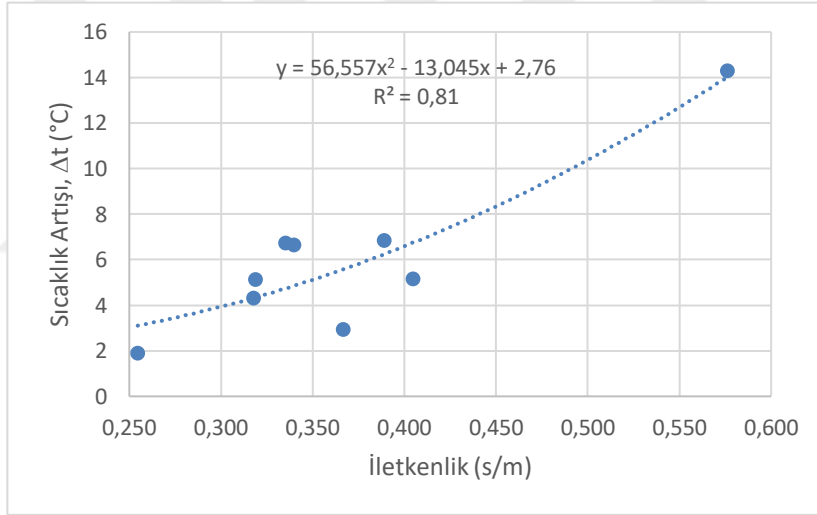
Aynı lif oranına sahip tek ve karma lifli tüm KYB numuneleri dikkate alındığında, 13 mm boyundaki mikro çelik lif içeren karma lifli numunelerin, elektrik akımı ile en yüksek sıcaklık artışına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde, çelik lif ilaveli KYB numunelerinin elektrik akımı ile sıcaklık artışları, lifsiz referans numunenin sıcaklık değişiminden çok daha yüksek çıkarak ölçümlerin tutarlı ve güvenilir sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

#### 4.2.6 Elektriksel özdirenç ve iletkenlik ile sıcaklık artışı arasındaki ilişki



(a)



(b)

**Şekil 4.16 :** Tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin; a) Sıcaklık artışı-elektriksel özdirenç ilişkisi b) Sıcaklık artışı-iletkenlik ilişkisi.

Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB numunelerinin sıcaklık artışı-elektriksel özdirenç ilişkisi ve sıcaklık artışı-iletkenlik ilişkisi Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, KYB numunelerinin sıcaklık artışı-elektriksel özdirenç ilişkisi arasındaki korelasyon katsayısı 0.76 bulunurken, numunelerin sıcaklık artışı-iletkenlik ilişkisi arasındaki korelasyon katsayısı ise 0.81 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen korelasyon katsayıları yüksek değerlere ulaştığı için KYB numunelerinin sıcaklık artışı ile elektriksel iletkenliği arasında kuvvetli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, lif takviyeli KYB numunelerinin sıcaklık artışı değerleri elektriksel özdirenç ve iletkenlik değerleri kullanılarak herhangi bir deney yapılmadan ikinci dereceden denklem yardımıyla önemli bir doğruluk oranında tahmin edilebilir.

## 5. SONUÇLAR

Yürütülen tez çalışmasında, kendiliğinden yerleşen beton karışımlarına farklı hacim ve kombinasyonlarda makro çelik lif ile 6 mm ve 13 mm boyunda mikro çelik lifler ayrı ayrı ilave edilmiştir. Lifsiz referans, tek lifli ve karma lifli KYB karışımlarına ait işlenebilirlik, mekanik, elektriksel özdirenç, iletkenlik ve ısınma özelliklerinin belirlenmesi için testler yürütülmüştür. Yapılan testlerden elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. Farklı kombinasyonlarda çelik lif içeren KYB numunelerine eklenen lif oranları arttıkça karışımlara ait çökme-yayıma çapı, J-halkalı çökme-yayıma çapı ile yükseklik farkı ( $\Delta H$ ) değerlerinde azalmaya, yayılma sürelerinde ( $T_{500}$ ) ise artışa neden olmuştur. Karma lif takviyeli karışımlara ilave edilen mikro lif boyuna gelince, 6 mm uzunluğunda mikro çelik lif içeren karışımların akıcılığı ( $D_j$ ) ile engeller arasından geçme kabiliyetinin, tüm lif oranları için 13 mm uzunluğunda mikro çelik lif içeren karışımlara kıyasla daha iyi olduğu görülmüştür.
2. KYB karışımlarına dahil edilen makro ve mikro çelik lif hacminin artmasının genelde karışımlara ait basınç dayanımlarında azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca, tüm lifli karışımlar içerisinde basınç dayanımında en fazla artış, genelde tüm lif oranları için 13 mm boyunda mikro lif içeren karma lifli KYB numunelerinde görülmüştür.
3. Lif takviyeli tüm KYB karışımlarının, yarmada çekme dayanımları lifsiz referans karışımlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Karışımlara ilave edilen toplam çelik lif oranının artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanım değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Karma çelik lif takviyeli numunelerin yarmada çekme dayanımlarının, aynı oranda sadece makro çelik lif içeren numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tüm bunlara ilaveten, karma çelik lif takviyeli numuneler dikkate alındığında, en yüksek yarmada çekme dayanımı tüm lif oranları için 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lif içeren karışımlardan elde edilmiştir.

4. Lifsiz referans numuneye kıyasla, tüm çelik lif takviyeli KYB karışımlarının eğilmede çekme dayanım değerleri daha yüksek çıkmıştır. Karışımlara hacimce takviye edilen çelik lif oranının artmasıyla, eğilmede çekme ve tokluk değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Lif hibridizasyonu dikkate alındığında ise, sadece %1, %1.25 ve %1.5 makro çelik lif içeren numunelerin eğilme dayanımları ile tokluk değerlerinin, aynı orana sahip karma çelik lifli numunelerin eğilme dayanımı ve tokluk değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, karma çelik lif takviyeli numuneler içerisinde 13 mm uzunluğunda mikro çelik lif içeren karışımlara ait numunelerin eğilme dayanımları ile tokluk değerlerinin, tüm lif oranları için 6 mm uzunluğunda mikro çelik lif içeren karışımlara ait numunelerin eğilme dayanımları ve tokluk değerlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
5. Makro ve mikro çelik lif takviyeli KYB numuneleri genelde sehimsertleşmesi davranışı göstermiştir. Sehim sertleşmesi davranışının bir sonucu olarak tüm numunelerde çoğunlukla çoklu çatlak oluşumu görülürken, karışımlara dahil edilen hacimce lif miktarının artmasıyla çoklu çatlak oluşumunda artış görülmüştür. Karma lifli KYB numuneleri dikkate alındığında, 13 mm boyunda mikro çelik lif içeren numunelerin dört noktalı eğilme altında, tüm lif oranları için 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren numunelere kıyasla daha fazla çoklu çatlak oluşumu sergilediği belirlenmiştir.
6. Çelik lif takviyeli tüm KYB karışımlarının elektriksel özdirenç değerlerinin lifsiz referans karışımlara kıyasla daha düşük ve iletkenlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülürken, karışımlara ilave edilen lif oranının hacimce artmasıyla birlikte numunelerin elektriksel özdirençinde düşüş ve iletkenliklerinde artış gözlemlenmiştir. Karma çelik lifli karışımlara ilave edilen mikro çelik lif boyuna gelince, tüm lif oranları için 13 mm boyunda mikro çelik lif içeren karışımlara ait numunelerin elektriksel özdirenç, 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karışımlara kıyasla daha düşük iken, iletkenliğinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bütün bunlara ilaveten, karma çelik lif takviyeli 13 mm uzunluğunda mikro çelik lif içeren farklı lif hacmine sahip tüm karma lifli karışımlar, aynı lif oranına sahip diğer tek ve

karma lifli karışımlara kıyasla, daha düşük elektriksel özdirenç ve daha yüksek iletkenliğe sahip oldukları gözlemlenmiştir.

7. Çelik lif takviyeli KYB karışımlarına ait elektriksel özdirenç ve mekanik özellikler birlikte değerlendirildiğinde, lifsiz referans numunelere kıyasla karışımlara çelik lif ilave edilmesi ile numunelerin elektriksel özdirençlerinin azalması ve iletkenliklerinin artmasının yanında mekanik özellikleri ile eğilme performansının da iyileştiği görülmüştür.
8. Çelik lif takviyeli tüm KYB karışımlarının sıcaklık artışı değerlerinin lifsiz referans karışımlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı lif oranına sahip tek ve karma lifli tüm KYB numuneleri dikkate alındığında, 13 mm boyunda mikro çelik lif içeren karma lifli numunelerinin elektrik akımı ile en yüksek sıcaklık artışına sahip olduğu tespit edilmiştir.
9. Çelik lif takviyeli KYB numunelerinin sıcaklık artışı ile elektriksel özdirenç arasında korelasyon katsayısı ( $R^2 = 0.76$ ) ile iyi bir ilişki olduğu görülürken, sıcaklık artışı ile iletkenlik arasında korelasyon katsayısı ( $R^2 = 0.81$ ) ile daha iyi bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Sonuçta, çelik lif takviyeli KYB numunelerine ait sıcaklık artışı değeri, elektriksel özdirenç ve iletkenlik değerlerinden faydalanılarak herhangi bir deneye gerek kalmadan ikinci dereceden bir denklem yardımıyla önemli bir doğruluk oranında tahmin edilebileceği bulunmuştur.

Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonlara farklı oran ve kombinasyonlarda çelik lif takviye edilerek betonun elektriksel iletkenliği arttırılmıştır. İçerisinden elektrik akımı geçirilerek ısıtılan betonda buzlanma engellenmekte veya mevcut buzlanma eritilmektedir. Çalışma sonucunda toplam %1.5 çelik lif içeren 1.2MAK+0.3MİK13 karışımından en yüksek elektriksel iletkenlik değerleri tespit edilmiştir. Özellikle kış mevsiminin çok şiddetli geçtiği bölgelerde, araçların yapacağı kazaları önlemek, araç sahipleri için konforlu bir kullanım sağlamak ve havaalanı pistlerinde yine kar yağışlarının olumsuz etkisini gidererek uçaklara iniş kolaylığı sağlayabilmek için bu alanlara, 1.2MAK+0.3MİK13 karışımı önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Topsakal, A. & Özel, C.** (2012). Kendiliğinden yerleşen betonlarda çökme kaybının ve kalıplama zamanının sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkisi. *SDU International Technologic Science*, (pp. 124-134)
- [2] **Turk, K., Öztekin, E., & Kına, C.** (2019). Self-compacting concrete with blended short and long fibres: experimental investigation on the role of fibre blend proportion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-14.
- [3] **Zengin, B., & Özel C.** (2019). Kendiliğinden yerleşen hematit agregali betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 5(2), 95-102.
- [4] **Okamura, H., Ozawa, K., & Ouchi, M.** (2000). Self-compacting concrete. *Structural concrete*, 1(1), 3-17.
- [5] **Gödek, E., Felekoğlu, B., & Felekoğlu, K. T.** (2015). Hazır beton sektörüne uygun polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı seçimi ve kendiliğinden yerleşen beton üretimindeki performansı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 8-18.
- [6] **Dönmez, İ.** (2020). *Dörtlü sistemlerde mineral katkı ikameli karma lifli kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirlik ve mühendislik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [7] **Turk, K., Bassurucu, M., & Bitkin, R. E.** (2021). Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber. *Construction and Building Materials*, 266, 120944.
- [8] **Fantilli, A. P., Vallini, P., & Chiaia, B.** (2011). Ductility of fiber-reinforced self-consolidating concrete under multi-axial compression. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 520-527.
- [9] **Turk, K., & Kına, C.** (2017). Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 671-678.
- [10] **Ahmad, S., & Umar, A.** (2018). Fibre-reinforced Self-Compacting Concrete: A Review. *Mater. Sci. Eng.* 377, 012117.
- [11] **Kına, C.** (2019). *Yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen karma lifli beton geliştirilmesi* (Doktora tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [12] **BOĞA, A. R.** (2017). Harçların mekanik ve elektriksel iletkenlik özelliklerine karbon lifi ve çelikhane cürufu kullanımının etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 1066-1075.
- [13] **Tuan, C.Y.** (2004). Conductive Concrete for Bridge Deck Deicing and Anti-icing, Project No. SPR-PL-1(037) P512, *Nebraska Department of Roads*, July.
- [14] **Teomete, E., Kolatar A. Ö., Demircilioğlu E. & Kahraman, S.** (2015). 3. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, DEÜ. Ekim 14-16.
- [15] **EFNARC.** (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. European project group, UK.
- [16] **EFNARC.** (2005). *European Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Specification and Production and Use, Association House, UK.

- [17] **Okamura, H.** Self-compacting high-performance concrete. *Concrete international*, 19:7, (1997) 50-54..
- [18] **Rols, S., Ambroise, J. ve Pera, J.** (1999). Effects of Different Viscosity Agents on The Properties of Self-Leveling Concrete. *Cement and Concrete Research*, 29, 2, 261-266.
- [19] **Skarendahl, A., Tangtermsirikul, S., Kamal, K., & Takada, K.** (2000). *Self Compacting Concrete-State-of-the-Art Report of RILEM TC 174-SCC*. RILEM report, 23.
- [20] **Okamura, H., & Ouchi, M.** (2003). Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, 1(1), 5-15.
- [21] **Topçu, İ. B., Bilir, T., & Baylavlı, H.** (2008). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 1-22.
- [22] **Anon.** (2006). Betonda mucizevî çözümler: Kendiliğinden Yerleşen Betonlar. *Hazır Beton Dergisi*, sayı:74, 20-36.
- [23] **TS EN 206-1/A2.** (2006). *Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [24] **Felekoğlu, B.** (2003). *Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi)*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [25] **Baylavlı, H.** (2008). *Lastik Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Taze Beton Özelliklerine Farklı Katkuların Etkileri (Yüksek Lisans Tezi)*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [26] **Yılmaz, B.** (2007). *Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik ve mekanik özelliklerine su/ince malzeme oranı ile lif katkısının etkisi (Yüksek lisans tezi)*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27] **Kaya, A. O.** (2010). *Farklı türde mineral katkı kullanımının kendiliğinden yerleşen betonun taze faz ve mekanik özelliklerine etkisi. (Yüksek lisans tezi)*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] **Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. A., Despotovic, I. M., & Ristic, N. S.** (2010). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1129-1133.
- [29] **Sarwary, M. H.** (2017). *Kendiliğinden algılama kabiliyetine sahip çimento bağlayıcı kompozitlerin büyük ölçekli yapısal giriş elemanlarda performansları (Doktora tezi)*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [30] **Daczko, J. A. & Kurtz, M. A.** (2001). Development of High Volume Coarse Aggregate Self-Compacting Concrete (pp:403-412). *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*. 23-25 October, Tokyo, Japan.
- [31] **Grünwald, 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(12), 1793-1798.
- [32] **TS EN 12350-12.** (2011) *Beton-Taze beton deneyleri-Bölüm 12: Kendiliğinden yerleşen beton - J halkası deneyi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.



- [33] **Hannant, D.J.** (1987). *Fiber Cements and Fiber Concrete*. Chichester, UK, Wiley.
- [34] **Pierre R.** (2000). Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRC): An overview, *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes*, Lyon, France, September 13-15.
- [35] **Bentur A., Mindess, S.** (2007). *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. 2nd ed. New York, USA, Taylor and Francis.
- [36] **Sertbaş, B.** (2006). *Kendiliğinden yerleşen betonlarda polipropilen lif kullanımının işlenebilirliğe etkisi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] **Kawamata, A., Mihashi, H., Fukuyama, H.** (2003). Properties of hybrid fiber reinforced cement based composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 283-290.
- [38] **Lawler, J., Zampini, D., Shah, S.** (2005). Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 595-604.
- [39] **Ersoy, H. Y.** (2001). Kompozit Malzeme. *Literatür Yayınları*, 66, İstanbul, Türkiye.
- [40] **Holschemacher, K., Mueller, T., Ribakov, Y.** (2010). Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design*, 31(5), 2604-2615.
- [41] **Topçu, İ. B.** 2006, *Beton Teknolojisi*, Uğur Ofset A.Ş., Eskişehir.
- [42] **Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S.** (2015). *Beton*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Türkiye, 681 s.
- [43] **TS 10513.** (1992). *Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [44] **Sarı, M.** (2013). *Farklı tipteki liflerin betonun mekanik davranışına etkisi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [45] **Kızıllığın, B.** (2009). *Çelik ve karbon lifli harçların sülfat etkilerine dayanıklılığının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [46] **Sahmaran, M., Yurtseven, A., Yaman, I.O.** (2005). Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, *Building and Environment*, 40, 1672-1677.
- [47] **Url-1** < <http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/yapimalzemesi/beton/6>. **HTM**.
- [48] **TS EN 197-1.** (2012), “Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [49] **Rossi, P.** (2000). Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes. In *PRO 15: 5<sup>th</sup> RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)-BEFIB'2000* (Vol. 15, p. 87). RILEM Publications.
- [50] **Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D. H. ve Moczko, A.** (2000). Fracture Properties and Acoustic Emission Response of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre Reinforced Concrete. *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, 491-500, Lyon, France.
- [51] **Betterman, L. R., Ouyang, C. & Shah, S. P.** (1995). Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar, *Adv. Cem. Bas. Mat.*, 2, 53-61.

- [52] **TAŞDEMİR, M. A., & Bayramov, F.** (2010). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İTÜ DERGİSİ/d*, 1(2).
- [53] **Das, B, Pandey S.** (2011), Influence Of Fineness Of Fly Ash On The Carbonation And Electrical Conductivity Of Concrete, *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 23(9), 1365-1368.
- [54] **Polder, R.B.** (2001), Test Methods For On Site Measurement Of Resistivity Of Concrete – A RILEM TC – 154 Technical Recommendation, *Construction And Building Materials*, 15, 125-131.
- [55] **Huang, B.S. Chen, X.W. And Shu, X.** (2009), Effects Of Electrically Conductive Additives Laboratory-Measured Properties Of Asphalt Mixtures. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 21(10), 612–617.
- [56] **Pan, P. Wu, S. Xiao, F. Pang, L. And Xiao, Y.** (2015), Conductive Asphalt Concrete: A Review On Structure Design, Performance, And Practical Applications. *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, 26(7), 755-769.
- [57] **Gopalakrishnan, K, Ceylan, H. Kim, S, Yang, S. And Abdulla, H.** (2015), Electrically Conductive Mortar Characterization For Self Heating Airfield Concrete Pavement Mix Design. *International Journal Of Pavement Research And Technology*, 8(5), 315-324.
- [58] **García A, Schlangen E. Ven M. And Liu Q.** (2009), Electrical Conductivity Of Asphalt Mortar Containing Conductive Fibers And Fillers. *Construction And Building Materials*, 23, 3175–3181.
- [59] **Lin, V. W., Li, M., Lynch, J. P., & Li, V. C.** (2011, April). Mechanical and electrical characterization of self-sensing carbon black ECC. In *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2011* (Vol. 7983, p. 798316). International Society for Optics and Photonics..
- [60] **Tumidajski P.J.** (1997), Electrical conductivity of Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 26(4), 529-534.
- [61] **Chung, D.D.L.** (2004), Electrically conductive cement-based materials. *Advanced in Cement Research*, 26(4), 167-176.
- [62] **Bertolini, L. Bolzoni, F. Pastore, T. and Pedferri, P.** (2004), Effectiveness of a conductive cementitious mortar anode for cathodic protection of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 681-694.
- [63] **Tian, X. & Hu, H.** (2012), Test and Study on Electrical Property of Conductive Concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*, 5(2011), 83–87.
- [64] **ASTM C618.** (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [65] **TS 706 EN 12620+A1.** (2009). *Beton agregaları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [66] **TS EN 934-2+A1.** (2013). *Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları-Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [67] **EFNARC.** (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. European project group, UK.

- [68] **TS EN 12390-2.** (2019). *Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması.* Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [69] **ASTM C39.** (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.* ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [70] **ASTM C496/C496M-17.** (2017). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.* ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [71] **ASTM C1609.** (2012). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [72] **Atalay, E.** (2020). *Karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun yüksek sıcaklığa direncinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [73] **ASTM C1611.** (2018). *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete,* ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [74] **Turk, K., Kina, C., & Oztekin, E.** (2020). Effect of macro and micro fiber volume on the flexural performance of hybrid fiber reinforced SCC. *Advances in concrete construction*, 10(3), 257-269.
- [75] **Bentur, A. & Mindess, S.** (1990). *Fiber Reinforced Cementitious Composites.* 1st ed. London and New York, Elsevier Applied Science.
- [76] **Song, P. S., & Hwang, S.** (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.
- [77] **Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., & Bier, T. A.** (2015). Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC). *Construction and Building Materials*, 98, 325-333.
- [78] **Banthia, N., & Sappakittipakorn, M.** (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366-1372.
- [79] **Rashiddadash, P., Ramezaniapour, A. A. & Mahdikhani, M.** (2014). Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice. *Constr. Build. Mater.*, 51, 313-320.
- [80] **Pajak, M. & Ponikiewski, T.** (2013). Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Construction and Building Materials*, 47, 397-408.
- [81] **Lawler, J., Zampini, D. & Shah, S.** (2005). Microfiber and macrofiber hybrid fiber reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17, 595-604.
- [82] **Chen, B., Wu, K. ve Yao, W.** (2004). Conductivity of carbon fiber reinforced cementbased composites. *Cement and Concrete Composites*, 26 (4), 291-297.
- [83] **Turk, K.** (2012). Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 37, 326-334.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Nazlı ÇİÇEK

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (Bölüm İkincisi)
- **Yüksek Lisans** : 2021, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM:

- (2020-Devam) Samsun Büyükşehir Belediyesi'nde çalışıyor