

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

**KARMA LİF TAKVİYELİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN  
BETONUN YÜKSEK SICAKLIĞA DİRENCİNİN  
ARAŞTIRILMASI**



**YÜKSEK LİSANS**

**ESMA ATALAY**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**NİSAN 2020**

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

**KARMA LİF TAKVİYELİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN  
BETONUN YÜKSEK SICAKLIĞA DİRENCİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS**

**ESMA ATALAY  
(13617210104)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**NİSAN 2020**

**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

**KARMA LİF TAKVİYELİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN**  
**YÜKSEK SICAKLIĞA DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

DANIŞMAN  
**PROF.DR.KÂZIM TÜRK**

HAZIRLAYAN  
**ESMA ATALAY**

Jürimiz tarafından 20/04/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda bu tez oybirliği ile başarılı bulunarak İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul etmiştir.

**Jüri Üyelerinin Unvanı Adı Soyadı**

1. Prof. Dr. Kâzım TÜRK (İnönü Üniversitesi)
2. Prof. Dr. Paki TURĞUT (İnönü Üniversitesi)
3. Dr. Öğr. Üyesi Ceren KINA (Malatya Turgut Özal Üniversitesi)

**İmza**


**O N A Y**

Bu tez, İnönü Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../20... tarih ve 20.../..... sayılı Kararıyla da uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Kâzım TÜRK  
Enstitüsü Müdürü



*Canım ailem Asim, Sevgi, Kıymet, Esragül ve Abdüssamed ATALAY'a,*

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kazım TÜRK'e,

Çalışmalarım boyunca maddi, manevi her anlamda yanımda olan ve özellikle deneysel çalışmalarımda bütün imkanlarını benim için seferber eden canım babam Asim ATALAY'a, laboratuvarında beton dökümlerim sırasında beni yalnız bırakmayan ve var gücüyle bana yardım eden canım annem Sevgi ATALAY'a ve her konuda motivasyonumu arttıran bana destek olan canım kardeşlerim Kıymet ATALAY, Esragül ATALAY ve Abdüssamed ATALAY'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımın her safhasında bana yardım eden, destek veren değerli arkadaşım Ceren KINA'ya ve laboratuvardaki işlerim için bana yardım eden İlhami BAYSAL'a teşekkür ederim.

Tezin uygulama aşamasında İÜ-BAP FYL-2017-844 numaralı projesi ile vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı, İnönü Üniversitesi BAP birimine

teşekkür ederim.

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Karma Lif Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Yüksek Sıcaklığa Direncinin Araştırılması” 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.

ESMA ATALAY



## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....                                                                                              | i   |
| ONUR SÖZÜ .....                                                                                                      | ii  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                                                     | iii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                                                                               | v   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                                                 | vi  |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                                                                 | ix  |
| ÖZET.....                                                                                                            | xi  |
| ABSTRACT .....                                                                                                       | xii |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                                        | 1   |
| 1.1. Tezin Amacı.....                                                                                                | 3   |
| 1.2. Tezin Ana Hatları .....                                                                                         | 3   |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ.....                                                                                              | 5   |
| 2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB).....                                                                         | 5   |
| 2.1.1. Karışım özellikleri .....                                                                                     | 5   |
| 2.1.2. KYB reolojisi.....                                                                                            | 9   |
| 2.1.2.1. Çökme-yayılma deneyi, J-halkası deneyi, J-halkalı çökme yayılma deneyi ve t <sub>50</sub> akma süresi ..... | 10  |
| 2.1.2.2. V-hunisi testi .....                                                                                        | 12  |
| 2.1.2.3. L-kutusu testi .....                                                                                        | 13  |
| 2.1.2.4. Elek ayrışma testi.....                                                                                     | 14  |
| 2.2. Çimento Esaslı Kompozitlere Lif Takviyesi .....                                                                 | 15  |
| 2.2.1. Lif takviyesinin kompozitin davranışına etkisi .....                                                          | 15  |
| 2.2.2. Lif tipleri.....                                                                                              | 18  |
| 2.2.3. Liflerin kullanım şekilleri.....                                                                              | 21  |
| 2.2.3.1. Tek tip lif takviyesi .....                                                                                 | 21  |
| 2.2.3.2. Karma lif takviyesi .....                                                                                   | 21  |
| 2.2.3.3. Mikro ve makro liflerin davranışa etkisi .....                                                              | 23  |
| 2.2.3.4. Mikro ve makro liflerin taze beton özelliklerine etkisi .....                                               | 23  |
| 2.2.3.5. Farklı türlerdeki liflerin kombinasyonunun incelenmesi .....                                                | 24  |
| 2.2.3.6. Lif kullanımının yangına karşı dayanımına etkisi.....                                                       | 24  |
| 3. MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMA.....                                                                               | 26  |
| 3.1. Malzemeler .....                                                                                                | 26  |
| 3.1.1. Çimento ve u qucu kül.....                                                                                    | 26  |
| 3.1.2. Agrega .....                                                                                                  | 26  |
| 3.1.3. Kimyasal katkı.....                                                                                           | 27  |
| 3.1.4. Karışım suyu.....                                                                                             | 28  |
| 3.1.5. Lifler .....                                                                                                  | 28  |
| 3.1.6. Kullanılan kalıplar .....                                                                                     | 29  |
| 3.2. Deneysel Çalışma .....                                                                                          | 31  |
| 3.2.1. Karışımların hazırlanması .....                                                                               | 31  |
| 3.2.2. Yerleştirme ve kür koşulları .....                                                                            | 34  |
| 3.3. Deneysel Program.....                                                                                           | 35  |
| 3.3.1. Taze beton deneyleri.....                                                                                     | 37  |
| 3.3.1.1. Taze birim hacim ağırlığı (TBHA).....                                                                       | 37  |
| 3.3.1.2. Çökme-yayılma deneyi.....                                                                                   | 38  |
| 3.3.1.3. J-halkası ve J-halkalı çökme-yayılma deneyi.....                                                            | 39  |
| 3.3.2. Sertleşmiş beton deneyleri.....                                                                               | 41  |
| 3.3.2.1. Yüksek sıcaklık deneyi .....                                                                                | 41  |
| 3.3.2.2. Basınç dayanımı deneyi .....                                                                                | 42  |

|                                                                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3.2.3. Yarmada çekme dayanımı deneyi .....                                                                                      | 43         |
| 3.3.2.4. Eğilmede çekme dayanımı deneyi .....                                                                                     | 44         |
| 3.3.2.5. Ultrases geçiş hızı (USGH) deneyi.....                                                                                   | 46         |
| 3.3.2.6. Birim ağırlık tayini deneyi (BA).....                                                                                    | 48         |
| <b>4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>                                                                                      | <b>49</b>  |
| 4.1. Taze Beton Özellikleri.....                                                                                                  | 49         |
| 4.1.1. Taze beton birim hacim ağırlığı (TBHA).....                                                                                | 49         |
| 4.1.2. Çökme-yayılma deneyi yayılma çapı ( $D_c$ ) ve yayılma süresi ( $t_{50}$ ).....                                            | 57         |
| 4.1.3. J-halkalı çökme-yayılma deneyi yayılma çapı ( $D_J$ ), yayılma Süresi ( $t_{50J}$ ) ve yükseklik farkı ( $\Delta H$ )..... | 55         |
| 4.2. Yüksek Sıcaklık Altında Sertleşmiş Beton Özelliklerine Ait Bulgular.....                                                     | 60         |
| 4.2.1. Birim ağırlık (BA).....                                                                                                    | 68         |
| 4.2.2. Ultrases geçiş hızı (USGH) .....                                                                                           | 69         |
| 4.2.3. Basınç dayanımı .....                                                                                                      | 78         |
| 4.2.4. Yarmada çekme dayanımı .....                                                                                               | 75         |
| 4.2.5. Eğilmede çekme dayanımı .....                                                                                              | 78         |
| 4.2.6. Eğilme performansı .....                                                                                                   | 80         |
| 4.2.6.1. Yük-sehim eğrileri .....                                                                                                 | 80         |
| 4.2.6.2. Çatlak Karakterizasyon.....                                                                                              | 87         |
| <b>4. SONUÇLAR .....</b>                                                                                                          | <b>91</b>  |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                                             | <b>94</b>  |
| <b>EKLER.....</b>                                                                                                                 | <b>102</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                                              | <b>110</b> |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 : Taze KYB özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test metotları EFNARC (2002). .... | 11 |
| Çizelge 2.2 : KYB yayılımına göre VSI tanımlaması (Daczko ve Kurtz, 2001). ....                     | 13 |
| Çizelge 2.3 : KYB sınıfları (EFNARC(2002)) .....                                                    | 16 |
| Çizelge 2.4 : Lif tiplerinin fiziksel özellikleri (Kurt, 2006).....                                 | 19 |
| Çizelge 2.5 : Çeşitli lif tiplerinin kullanım alanları [17],(Avar, 2006). ....                      | 21 |
| Çizelge 3.1 : Çimento, uçucu kül kimyasal kompozisyonları.....                                      | 26 |
| Çizelge 3.2 : Makro ve mikro liflerin özellikleri. ....                                             | 29 |
| Çizelge 3.3 : Karışım oranları (kg/m <sup>3</sup> ).....                                            | 33 |
| Çizelge 3.4 : Hazırlanan karışımlara uygulanan deneyler. ....                                       | 36 |
| Çizelge 3.5 : Taze beton deneyleri ve deneylerden elde edilen özellikleri .....                     | 37 |
| Çizelge 3.6 : Sertleşmiş beton deneyleri ve detayları .....                                         | 41 |
| Çizelge 3.7 : USGH değerine göre beton sınıfları (Şimşek, 2007).....                                | 47 |
| Çizelge 4.1 : Taze beton deney sonuçları.....                                                       | 50 |
| Çizelge 4.2 : Oda sıcaklığında bekletilmiş numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri .....        | 61 |
| Çizelge 4.3 : 250 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri. ....       | 62 |
| Çizelge 4.4 : 500 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri. ....       | 63 |
| Çizelge 4.5 : 750 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri. ....       | 64 |
| Çizelge 4.6 : Lif takviyeli karışımlara ait enerji yutma kapasitesi ve göçme davranışları.. ....    | 81 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 : Geleneksel beton ve kendiliğinden yerleşen betonun tipik karışım oranları (Holschemacher, 2004) .....             | 8  |
| Şekil 2.2 : Kendiliğinden yerleşen betonun bileşim özellikleri (Gürdal ve Yüceer, 2004; Skarendahl ve Petersson, 2003). ..... | 9  |
| Şekil 2.3 :Bingham sıvının reolojik parametreleri (Özkul, 2005). .....                                                        | 10 |
| Şekil 2.4 : Çökme-yayılma testi (Topçu vd., 2008). .....                                                                      | 12 |
| Şekil 2.5 : J-halkası deneyi aparatı (Groth, 2000). .....                                                                     | 12 |
| Şekil 2.6 : VSI değerlerinin tanımlanması. ....                                                                               | 13 |
| Şekil 2.7 : V-hunisi deney düzeneği (EFNARC(2002)). .....                                                                     | 14 |
| Şekil 2.8 : L-kutusu deney düzeneği (EFNARC (2002)). .....                                                                    | 15 |
| Şekil 2.9 : Elek ayrışma deney düzeneği (EFNARC (2002)). .....                                                                | 16 |
| Şekil 2.10 : Lif/matris mekanizması (Zollo, 1997). .....                                                                      | 17 |
| Şekil 2.11 : Liflerin işlevi (Kızıllılgın, 2009) .....                                                                        | 18 |
| Şekil 2.12 : Çatlamış matriste lif-matris ilişkisi (Shah ve Balaguru, 1992). .....                                            | 18 |
| Şekil 2.13 : Değişik tipteki lifli betonların çekme altındaki davranışları (Kızıllılgın, 2009) .....                          | 20 |
| Şekil 2.14 : Bazı çelik lif şekilleri (Bayramov, 2004). .....                                                                 | 20 |
| Şekil 2.15 : Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi (Avar, 2006; Skarendahl ve Petersson, 2000). .....          | 23 |
| Şekil 3.1 : Karışımlarda kullanılan agrega yığınının gradasyon eğrisi. ....                                                   | 27 |
| Şekil 3.2 : Kullanılan liflerin görselleri. ....                                                                              | 29 |
| Şekil 3.3 : Tez çalışmasında kullanılan kalıplar. ....                                                                        | 30 |
| Şekil 3.4 : Tez çalışmasında kullanılan kalıplar. ....                                                                        | 31 |
| Şekil 3.5 : Yerleştirme ve priz alma koşulları. ....                                                                          | 34 |
| Şekil 3.6 : Kür koşulları. ....                                                                                               | 35 |
| Şekil 3.7 : Karışımların hazırlanmasında kullanılan düşey eksenli mikser. ....                                                | 36 |
| Şekil 3.8 : Çökme-yayılma deney düzeneği. ....                                                                                | 38 |
| Şekil 3.9 : Çökme-yayılma deneyi. ....                                                                                        | 39 |
| Şekil 3.10 : J-halkalı çökme-yayılma deney düzeneği. ....                                                                     | 40 |
| Şekil 3.11 : J-halkalı çökme-yayılma deneyi. ....                                                                             | 40 |
| Şekil 3.12 : Yüksek sıcaklık deneyi düzeneği. ....                                                                            | 42 |
| Şekil 3.13 : Basınç dayanım deneyi. ....                                                                                      | 43 |
| Şekil 3.14 : Yarmada çekme dayanımı deneyi .....                                                                              | 44 |
| Şekil 3.15 : Dört noktalı eğilmede çekme dayanımı deney ekipmanı. ....                                                        | 45 |
| Şekil 3.16 : Dört noktalı eğilmede çekmede dayanımı deneyi .....                                                              | 46 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.17 : Y ük-sehim eğrisi (Kim vd., 2008).....                                                                      | 46 |
| Şekil 3.18 : Ultrases geçirgenlik hızı (USGH) deneyi .....                                                               | 47 |
| Şekil 4.1 : Karışımlara ait TBHA değerleri .....                                                                         | 51 |
| Şekil 4.2 : Karışımlara ait yayılma çapı ve yayılma süresi değerleri.....                                                | 52 |
| Şekil 4.3 : Lifsiz kontrol karışımına ait çökme-yayılma çapı görsellerine göre VSI değerlendirmesi.....                  | 53 |
| Şekil 4.4 : Mak1.00 karışımına ait çökme-yayılma çapı görsellerine göre VSI değerlendirmesi.....                         | 53 |
| Şekil 4.5 : İkili lif kombinasyonuna sahip karışımlara ait çökme-yayılma çapı görsellerine göre VSI değerlendirmesi..... | 54 |
| Şekil 4.6 : Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımlara ait çökme-yayılma çapı görsellerine göre VSI değerlendirmesi.....  | 55 |
| Şekil 4.7 : Karışımlara ait J-halkalı çökme-yayılma çapı ve yayılma süresi değerleri .....                               | 56 |
| Şekil 4.8 : Karışımların $D_c$ ve $D_j$ değerlerinin karşılaştırılması.....                                              | 57 |
| Şekil 4.9 : Karışımların J-halkalı çökme yayılma deneyi $D_j$ ve $\Delta H$ sonuçları.....                               | 58 |
| Şekil 4.10 : Lifsiz kontrol karışımına ait J-halkalı çökme-yayılma çapı görselleri. ..                                   | 58 |
| Şekil 4.11 : Mak1.00 karışımına ait J-halkalı çökme-yayılma çapı görselleri.....                                         | 59 |
| Şekil 4.12 : İkili lif kombinasyonuna sahip karışımlara ait J-halkalı çökme-yayılma çapı görselleri.....                 | 59 |
| Şekil 4.13 : Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımlara ait J-halkalı çökme-yayılma çapı görselleri.....                  | 60 |
| Şekil 4.14 : Numunelerin 250 °C öncesi ve sonrası fiziksel görünümü.....                                                 | 65 |
| Şekil 4.15 : Numunelerin 500 °C öncesi ve sonrası fiziksel görünümü.....                                                 | 66 |
| Şekil 4.16 : Numunelerin 750 °C öncesi ve sonrası fiziksel görünümü.....                                                 | 67 |
| Şekil 4.17 : Numunelere ait birim ağırlık değerleri .....                                                                | 69 |
| Şekil 4.18 : Oda sıcaklığı, 250 °C , 500 °C ve 750 °C sıcaklıklar için numunelere ait USGH değerleri.....                | 70 |
| Şekil 4.19 : Yüksek sıcaklık etkisiyle eriyen sentetik liflerin bıraktığı boşluklar .....                                | 71 |
| Şekil 4.20 : Numunelere ait basınç dayanımı değerleri. ....                                                              | 73 |
| Şekil 4.21 : SEM görüntüsü .....                                                                                         | 74 |
| Şekil 4.22 : Numunelere ait basınç dayanımı sonrası görüntüler.....                                                      | 75 |
| Şekil 4.23 : Numunelere ait yarmada çekme dayanımı değerleri. ....                                                       | 77 |
| Şekil 4.24 : Numunelere ait eğilmede çekme dayanımı değerleri. ....                                                      | 79 |
| Şekil 4.25 : Numunelere ait enerji yutma kapasitesi değerleri.....                                                       | 82 |
| Şekil 4.26 : MAK1.00 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.....                                                            | 82 |
| Şekil 4.27 : MAK1.00+PVA0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.....                                                    | 83 |

|                     |                                                                                                                                                  |     |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.28 :</b> | MAK1.00+PP0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.                                                                                              | 83  |
| <b>Şekil 4.29 :</b> | MAK0.75+MİK0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.                                                                                             | 84  |
| <b>Şekil 4.30 :</b> | MAK0.50+MİK0.50 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.                                                                                             | 84  |
| <b>Şekil 4.31 :</b> | MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri..                                                                                    | 85  |
| <b>Şekil 4.32 :</b> | MAK0.75+MİK0.25+PP0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.....                                                                                  | 86  |
| <b>Şekil 4.33 :</b> | MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri..                                                                                    | 86  |
| <b>Şekil 4.34 :</b> | MAK0.50+MİK0.50+PP0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.....                                                                                  | 87  |
| <b>Şekil 4.35 :</b> | Oda sıcaklığında bekletilmiş dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmış tokluk değeri en yüksek numunelerin çoklu çatlak davranışı görselleri. ....  | 89  |
| <b>Şekil 4.36 :</b> | 750 °C sıcaklıkta bekletilmiş dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmış tokluk değeri en yüksek numunelerin çoklu çatlak davranışı görselleri. .... | 90  |
| <b>Şekil A.1 :</b>  | Oda sıcaklığında bekletilmiş numunelerin dört noktalı eğilmeye maruz bırakıldıktan sonra oluşan çatlak davranışı görselleri.....                 | 103 |
| <b>Şekil A.2 :</b>  | 250 °C sıcaklıkta bekletilmiş numunelerin dört noktalı eğilmeye maruz bırakıldıktan sonra oluşan çatlak davranışı görselleri.....                | 105 |
| <b>Şekil A.3 :</b>  | 500 °C sıcaklıkta bekletilmiş numunelerin dört noktalı eğilmeye maruz bırakıldıktan sonra oluşan çatlak davranışı görselleri.....                | 107 |
| <b>Şekil A.4 :</b>  | 750 °C sıcaklıkta bekletilmiş numunelerin dört noktalı eğilmeye maruz bırakıldıktan sonra oluşan çatlak davranışı görselleri.....                | 109 |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

|                              |                                                                      |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b><math>\Delta H</math></b> | : J-halkası çökme-yayılma deneyi yükseklik farkı (mm)                |
| <b>A</b>                     | : Taze betonun ağırlığı (gr)                                         |
| <b>AFm</b>                   | : $C_4A\bar{S}H_{18}$ ailesi (Kalsiyum-al ümino mono s ülfat hidrat) |
| <b>B</b>                     | : Kap ağırlığı (gr)                                                  |
| <b>b, h</b>                  | : Numunenin en kesit boyutları (mm)                                  |
| <b>c</b>                     | : Tarafsız eksen derinliği (mm)                                      |
| <b>D</b>                     | : Maksimum tane çapı (mm)                                            |
| <b><math>D_{\phi}</math></b> | : Yayılma çapı (mm)                                                  |
| <b><math>d_i</math></b>      | : Elek analizinde kullanılan elek ebatlar                            |
| <b><math>D_j</math></b>      | : J-halkası çökme-yayılma çapı (mm)                                  |
| <b>DYK</b>                   | : Doygun yüzey kuru                                                  |
| <b>F</b>                     | : Maksimum yük (N)                                                   |
| <b><math>H_1</math></b>      | : J-halkasının iç kısmındaki beton yüksekliği (mm)                   |
| <b><math>H_2</math></b>      | : J-halkasının dış kısmındaki beton yüksekliği (mm)                  |
| <b>HA</b>                    | : Hiperakışkanlaştırıcı                                              |
| <b>I</b>                     | : Atalet momenti ( $mm^4$ )                                          |
| <b>KLTKYB</b>                | : Karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonlarda              |
| <b>KYB</b>                   | : Kendiliğinden yerleşen beton                                       |
| <b>L</b>                     | : İki mesnet arasındaki açıklık (mm)                                 |
| <b>LTKYB</b>                 | : Lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton                         |
| <b>M</b>                     | : Açıklık ortası momenti (N.mm)                                      |
| <b>MAK</b>                   | : 3D 65/35 Makro çelik lif                                           |
| <b>MİK</b>                   | : OLI 6/16 Mikro çelik lif                                           |
| <b>PÇ</b>                    | : Portland çimentosu                                                 |
| <b><math>P_i</math></b>      | : Elekten geçen yığılımlı yüzde (%)                                  |
| <b>PP</b>                    | : Polipropilen lifi                                                  |

|                        |                                                   |
|------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>PVA</b>             | : Polivinilalkol lifi                             |
| <b>t<sub>50</sub></b>  | : Çökme-Yayılma Deneyi Akma Süresi (sn)           |
| <b>t<sub>50j</sub></b> | : J-Halkası Çökme-Yayılma Deneyi Akma Süresi (sn) |
| <b>TBHA</b>            | : Taze birim hacim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )  |
| <b>UK</b>              | : Uçucu kül                                       |
| <b>USGH</b>            | : Ultrases geçiş hızı                             |
| <b>V</b>               | : Kalıp hacmi (dm <sup>3</sup> )                  |
| <b>VSI</b>             | : Visual Stability Index                          |
| <b>σ<sub>e</sub></b>   | : Eğilme dayanımı (MPa)                           |

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KARMA LİF TAKVİYELİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN YÜKSEK SICAKLIĞA DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI

ESMA ATALAY

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

110+XII sayfa

2020

Danışman: Prof. Dr. KAZIM TÜRK

Bu tez çalışmasında, karma lifli kendiliğinden yerleşen beton numunelerinin yüksek sıcaklığa karşı direncinin ve mekanik özelliklerinin lif oranına ve tipine bağlı olarak nasıl ve ne ölçüde etkilendiğini belirlemek için toplam on adet kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımı tasarlanmıştır. Bu amaçla, bir adet lifsiz, bir adet sadece makro çelik lif içeren tek lifli karışım, dört tip ikili lif içeren karışım ve dört tip üçlü lif içeren karışım benimsenmiştir. Üretilen KYB’lerde farklı tip (çelik ve sentetik), narinlik ve boyutlarda (makro ve mikro) dört adet lif kullanılmıştır. Tüm karışımlarda, bağlayıcı madde olarak Portland çimentosu (PÇ) ve uçucu kül (UK) kullanılmış olup, su/bağlayıcı oranı 0.23 ve toplam bağlayıcı içeriği  $900 \text{ kg/m}^3$  olarak sabit tutulmuştur. Çökme-yayılma testi esas alınarak deneme yanılma yoluyla elde edilen karışımlara EFNARC tarafından belirlenen işlenebilirlik testleri (çökme-yayılma, J-halkası ve J-halkalı çökme-yayılma deneyi ve  $t_{50}$ ) uygulanmıştır. Daha sonra, karışımlar  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki suda 90 gün kür edilmiştir. Kür edilen numunelere, oda sıcaklığında bekletildikten ve  $250^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$  ve  $750^\circ\text{C}$  yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, dört noktalı eğilmede çekme dayanımı, birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı (USGH) testleri uygulanmıştır.

Sonuç olarak, makro çelik lif ile birlikte mikro çelik lifin karışıma eklenmesinin, numunelerin basınç dayanımında artışa neden olduğu görülürken, yarmada çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve enerji yutma kapasitesini azalttığı bulunmuştur. Mikro sentetik liflerin ise basınç dayanımını azaltırken, yarmada çekme dayanımında, eğilme dayanımında ve enerji yutma kapasitesinde ise artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel bulgular esas alındığında, lifsiz kontrol KYB betonuna kıyasla, tüm lif takviyeli KYB’lerin yüksek sıcaklık altındaki mekanik özelliğindeki bozulmaların daha hafif olduğu tespit edilirken, sentetik lif içeren KYB karışımlarına ait numunelerin daha yüksek bir yüksek sıcaklığa direnç performansını geliştirmede ve parçalanmayı hafifletmede üstün bir özellik sergilemiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yangın Direnci, Karma Lif, Kendiliğinden Yerleşen Beton, Süneklik

## ABSTRACT

Master Thesis

### INVESTIGATION OF HIGH TEMPERATURE RESISTANCE OF HYBRID FIBER REINFORCED SELF-COMPACTING CONCRETE

ESMA ATALAY

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

110+XII sayfa

2020

Supervisor: Prof. Dr. KAZIM TÜRK

In this thesis study, a total of ten different self-compacting concrete (SCC) mixtures were designed to determine how and to what extent the high temperature resistance and mechanical properties of hybrid fiber self-compacting concrete mixtures are affected depending on the fiber ratio and type. For this purpose, one types mixture having no fiber, one types of single reinforced mixtures having only macro steel fiber, four types of binary reinforced mixtures and four types of ternary reinforced mixtures were adopted. Four different types (steel and synthetic), aspect ratio and size (macro and micro) of fibers were used to investigate the effect of fibers in designed SCC. In all mixes, Portland Cement (PC) and fly ash (FA) were used as binders, the water/binder ratio was kept constant at 0.23 and total binder content at 900 kg/m<sup>3</sup>. The mixtures obtained by trial and error on the based of the slump-flow test were subjected to workability tests (slump-flow, J-ring and j.-ring slump-flow test and  $t_{50}$ ) determined by EFNARC. The mixtures were then cured for 90 days in 20 ± 3 °C water. After cured samples were kept at room temperature and exposed to high temperatures of 250 °C, 500 °C and 750 °C, compressive strength, splitting tensile strength and four-point flexural strength tests were applied.

Consequently, it was found that the addition of both micro steel fiber and macro steel fiber to the mixture caused an increase in the compressive strength of the samples, while it reduced the splitting tensile strength, flexural strength and the energy absorption capacity. It was observed that micro synthetic fibers decrease compressive strength while it provides an improvement in the splitting tensile strength, flexural strength and the energy absorption capacity. According to the experimental findings, it was determined that the deterioration in the mechanical properties of all fiber reinforced SCC under high temperature was less compared to the control SCC concrete with no fiber, while samples of SCC mixtures containing synthetic fiber exhibited superior properties by improving a higher fire performance in concrete and reducing disintegration .

**Keywords:** Fire Resistance, Hybrid Fiber, Self-Compacting Concrete, Ductility

## 1. GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen betonlar, dünyada ilk defa 1980'lerin ikinci yarısında Japonya'da deprem bölgelerindeki sık donatılı betonarme elemanlarda sıkıştırma işlemine gerek olmadan yerleşebilen beton ihtiyacından dolayı geliştirilmiştir (Okamura ve Quchi, 1999).

Lif takviyeli beton ile ilgili ilk çalışmalar 1950 ve 1960'larda çelik lif takviyeli betonun mekanik davranışını anlamak amacıyla yapılmıştır (Hannant, 1987). Lif takviyeli beton, gelişigüzel yönlendirilmiş lifler içeren beton olarak tanımlanmaktadır (Bentur, 1989). Liflerin beton karışımlarına katılması çatlakları önleyici bir etki yapar. Lifler; betonun çekme, basınç ve eğilme dayanımı ile rötre, sünme, yorulma gibi mekanik özelliklerini ve yangına dayanıklılığını, lifin miktarına, şekline, beton içindeki dağılımına, uzunluğuna, hangi malzemeden yapıldığına ve narinlik adı verilen boy/çap oranına göre etkilemektedirler. Lifli betonda lifsiz betona göre oluşan en önemli performans artışı, kırılma esnasında enerji yutma kapasitesinin artmasından ileri gelmektedir. Bu malzemeler, mükemmel darbe dayanımı özelliklerine sahip olmaları nedeniyle endüstriyel zeminlerde, trafik yoğunluğunun çok olduğu beton yollarda, askeri yapılarda, depreme karşı stratejik yapılarda, betonarme yapıların güçlendirilmesinde, küçük veya orta ölçekteki prefabrik elemanların üretiminde kullanılabilirler. Uygulamada kullanılan lif çeşitleri genelde saman, yonca, plastik, seramik-cam ve çelik liflerdir. Çelik lif takviyeli betonun mekanik özellikleri; lifin boyu, şekli ve beton içerisindeki miktarı, liflerin narinlik oranı, çimento cinsi ve miktarı, numunelerin boyutu, şekli, hazırlanma metodları, su/bağlayıcı oranı, kullanılan agregaların cinsi ve tane dağılımı ile yakından ilgilidir. Ayrıca, ısıtma işlem uygulamasının da lifli betonun mekanik özelliklerine etkisi büyüktür. Bu tip etkenler normal betonun zayıf olan birçok özelliğini iyileştirerek performansını artırır (Aral, 2006). Üstün çekme dayanımı ve kırılma tokluğu elde etmek için organik (PP, naylon) ve inorganik liflerin (cam, asbest ve karbon) bir arada kullanılmasının faydaları 40 yıl önce Walton ve Majumdar (1975) tarafından fark edilmiştir.

Birden çok süreksiz lif tipinin karışımı ile geleneksel beton matrisinin birleşiminden elde edilen lif takviyeli betona karma lif takviyeli beton denilmektedir (Ding vd., 2010; Sukontasukkul vd., 2012). Beton karışımında karma çelik lif birleşimi görüşü ilk olarak Rossi ve diğ. (1987) tarafından önerilmiştir.

Karma lif takviyeli kompozitte, bir tip lif varlığı diğer lif özelliklerini faydalı kıldığı için daha ilgi çekici mühendislik özellikler sunar (Mobasher ve Cheng,1996; Akçay, 2012). Uzun ve çekme dayanımı yüksek lifler büyük çatlakları, kısa ve çekme dayanımı düşük olan lifler ise çatlak başlaması ve ilerlemesini kontrol amacıyla kullanılırlar (Aral, 2006). Bentur ve Mindess (1990) tarafından, makro lif ilk çatlak gerilmesini ve nihai mukavemeti geliştirirken, mikro lif çatlama sonrası bölgedeki gelişmiş tokluk ve şekil değiştirme kapasitesini arttırdığı ve karma lif sisteminin önemli bir avantajı olarak tespit edilmiştir. Sentetik ve çelik lifin bir arada kullanılması durumunda, çelik lifler yüksek süneklik sağlarken ve betondaki çatlak yayılımını azaltırken, polipropilen lifler ise betondaki parçalanmayı hafifletebilirler (Rodrigues vd., 2010). Böylece beton için arzu edilen ısısal stabiliteye ulaşılır (Yan vd., 2013).

Beton elemanlar için önemli özelliklerden biri de yüksek sıcaklıklara karşı göstereceği dayanıklılıktır. Fakat bu özellik özel amaçlı yapılar dışındaki yapı tasarımlarında göz önünde bulundurulmaz. Normal çevresel şartlarda nem içeriğinde değişiklik olmadıkça betonun ısı özelliklerinde bir değişiklik olmaz. Ancak yüksek sıcaklıklarda betonu oluşturan bileşenlerin nem içeriğindeki değişim, çimento hamurundaki bozulma ve agreganın bazı durumlardan dolayı beton özelliklerinde değişiklikler söz konusu olmaktadır. Bu bozulma süreçleri, sıcaklık artışının hızına, sıcaklığın maksimum değerine ve yüksek sıcaklığın ne kadar sürede devam ettiğine bağlıdır. Genelde betonun yüksek sıcaklığa karşı gösterdiği tepki, betonun başlangıçtaki özelliklerine ve betonu oluşturan bileşenlere bağlıdır. Dolayısıyla yangın sırasında açığa çıkan ısı ile birlikte betonda çatlamlar oluşarak parçalanmalar gözlenebilir. Çelik ve polipropilen lif içeren karma lif takviyeli beton, belirgin üstün yangın performansı, özellikle de parçalanmayı hafifletmesi nedeniyle daha çok ilgi çekmiştir (Suhaendi ve Horiguchi, 2006; Bangi ve Horiguchi, 2011). Polipropilen lifler yaklaşık olarak 160-170°C 'de erir. Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimento esaslı kompozitte (SHCC) polimerik lif olarak en çok polivinil alkol (PVA) lifleri kullanılır. Yaklaşık 225 ° C'de erir. Ancak, bugüne kadar PVA lifleri ile SHCC'nin yangın dayanımını incelemek için çok sınırlı bir çalışma yapılmıştır. Çimento esaslı bir malzemenin yangın direnci genel olarak ikiye ayrılabilir: yani yüksek sıcaklıkta mekanik özellikler ve yüksek sıcaklıktaki patlamadan oluşan parçalanma (Liu ve Tan, 2017).

## 1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonların yerel agregalar ve atık durumda olan mineral katkıların (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, kireç taşı tozu gibi) çimento yerine kullanılarak üretilmesi ve bu üretilen inovasyon kompozitlerin yangına direncinin deneysel olarak incelenmesiyle kompozit malzemelerin geliştirilmesidir. Ayrıca, kendi ağırlığı ile sık donatılı, dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen ve bu özellikleri sağlarken, ayrışma ve terleme gibi işlenebilirlik problemlerine yol açmayan bu kompozit malzemenin kullanılabilirliğinin ve performansının araştırılmasıdır. Yürütülecek deneysel çalışmalarda, farklı tip ve oranlarda karma liflere sahip kendiliğinden yerleşen beton numunelerin yangın direncinin lif tipi ve oranına bağlı olarak nasıl/ne ölçüde etkilendiğinin belirlenmesi de amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, lifsiz, tek lifli ve karma lifli (ikili ve üçlü) kendiliğinden yerleşen beton karışımı kullanılacaktır. Lif olarak, karma makro çelik lif ve mikro çelik veya mikro sentetik lif kullanılacaktır. Burada makro ve mikro çatlaklar köprülenerek dayanım kaybını azaltmak, ayrıca karma lifli kendiliğinden yerleşen numunelerinin yangın direncinin lif oranına ve tipine bağlı olarak nasıl ve ne ölçüde etkilendiğinin belirlenmesi de amaçlanmaktadır. Ayrıca, karma makro çelik lif ve mikro çelik veya mikro sentetik takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun yangın direnci ile ilgili bu konuda literatürde çok az çalışma olması sebebiyle, bu çalışmanın literatüre önemli bir katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

## 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. Ayrıca lif tipleri ve özellikleri ile ilgili genel bilgiler verilerek lif takviyeli çimento esaslı kompozitler ve karma lif takviyeli kompozitler anlatılmıştır. Bununla birlikte, liflerin çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklere etkileri anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, tez çalışması aşamalarında kullanılan agrega, çimento, uçucu kül, kimyasal katkı, makro çelik lif, mikro çelik lif, sentetik lifler ile deneysel çalışmalarda kullanılan düzenekler, cihazlar ve yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Elde edilen karışım oranları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Ayrıca, karışımların taze beton özelliklerini elde

etmek amacıyla uygulanan işlenebilirlik deneyleri ve sertleşmiş beton özelliklerinin tespiti için yapılacak deneyler detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, tez çalışması kapsamında yapılmış olan deneylerden elde edilen bulgular verilmiş ve bu bulgular, literatürde bulunan mevcut çalışmalar ile değerlendirilmiş ve desteklenerek tartışılmıştır.

Beşinci bölümde, tez kapsamında yapılan bütün deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tez çalışmasının Ekler bölümünde karışımlara ait, oda sıcaklığında, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarda bekletilmiş tüm numunelerin dört noktalı eğilmeye maruz bırakıldıktan sonra oluşan çatlak davranışı görselleri verilmiştir.



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

### 2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)

Kendiliğinden yerleşen betonlar, dünyada ilk olarak 1980'lerin ikinci yarısında Japonya'da deprem bölgelerindeki sık donatılı betonarme elemanlarda sıkıştırma işlemine gerek olmadan yerleşebilen beton ihtiyacından dolayı geliştirilmiştir (Okamura ve Quchi, 1999). Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı ile sık donatılı, dar ve derin kesitlere yerleşebilen, hiçbir vibrasyon işlemi yapılmadan kendiliğinden sıkışabilen, ayrışma ve kuma gibi problemler oluşturmeyen, akıcı bir özel bir beton türüdür (Felekoğlu ve Baradan, 2004). Kendiliğinden yerleşen betonların akıcı olması, minimum işçilik gerektirmesi, ekonomik olması ve hızlı uygulanabilmesi gibi özelliklerinden dolayı geleneksel betonlardan avantajlıdır (Kılınç, 2012). KYB' ler vibrasyon gerektirmediği için gürültü kirliliğinin ortadan kaldırılmasına ve daha hızlı üretime olanak sağlamaktadır. Ayrıca, iri agrega hacminin sınırlandırılması, en büyük agrega dane boyutunun azaltılması ve ayrışma direncini arttırmak için viskozite değiştiricilerin eklenilmesi yüksek akışkanlığı koruyarak betonun sık donatılar arasından geçerek dar kesitlerde çalışma imkânı ve istenilen kalıpta boşluksuz beton üretimini mümkün kılmaktadır (Gaimster ve Dixon, 2003).

#### 2.1.1. Karışım özellikleri

KYB' nin kalıpları doldurma kabiliyeti, akıcılık, geçiş kabiliyeti ve yüksek ayrışma direnci olmak üzere dört temel özelliği vardır. Kalıpları doldurma ve akıcılık özelliği süperakışkanlaştırıcı ile sağlanırken yüksek ayrışma direnci ise, ince malzeme miktarının yüksek olması ve viskozite düzenleyici bir katkıyla elde edilebilir (Özkul, 2002). Bu özelliklerin sağlanabilmesi için taze betonun yüksek viskoziteye ve düşük kayma gerilmesine sahip olması gerekmektedir. Kayma gerilmesinin düşürülmesi için karışım suyunun artırılması ile birlikte viskozitenin de düşürülmesine neden olmaktadır. Viskozitenin düşmesi ise ayrışmaya neden olmaktadır (Özkul, 2014). Kayma gerilmesinin düşürülmesi ve viskozitede uygun miktarda bir azalma sağlayabilmek amacı ile süperakışkanlaştırıcı kullanılmaktadır. Ancak, geleneksel bir beton karışımına sadece süperakışkanlaştırıcı ilave edilerek KYB elde edilemez. Ayrıca, KYB karışımları, yüksek miktarda ince taneli inorganik malzemelerden oluşur; günümüzde bu tozlar, genellikle hi çir pratik uygulamada talep görmeyen ve elden çıkarılmaları pahalı olan atık ürünlerdir

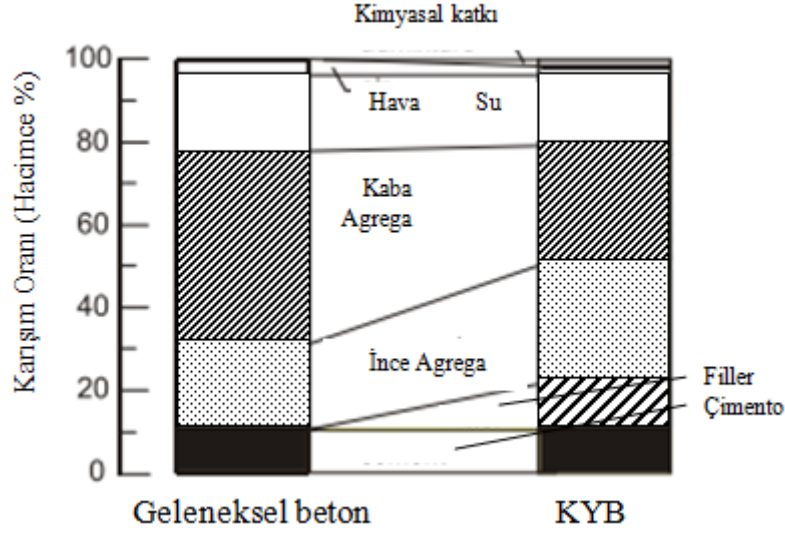
(Yahia vd., 1999). Viskozitenin arttırılması amacı ile uçucu kül, silis dumanı ve taş tozu gibi malzemeler kullanılmaktadır (Persson 2001).

Sınırlı tutulmuş kaba agrega hacmi, azaltılmış en büyük agrega dane çapı, mikrofiller malzemeler yardımı ile arttırılmış toplam ince malzeme miktarı, viskozite arttırıcı katkı kullanılarak arttırılmış ayrışma direnci KYB' lerin bileşim özelliklerindendir. KYB' nin bileşimlerinde kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı ile elde edilen düşük su/çimento oranı ile birlikte hem yüksek dayanıma hem de üstün dayanıklılığa sahip olmasından dolayı KYB' ler yüksek performanslı betonlar sınıfına girebilmektedir (Özkul, 2002; Sağlam vd.,2005).

KYB karışımlarında ince malzeme miktarına geleneksel betonda kullanılan ince malzeme miktarından daha fazlasına ihtiyaç duyulmaktadır. İnce malzeme miktarının artması ile genellikle yüksek oranda  $450-500 \text{ kg/m}^3$  arasında çimento dozajı kullanımı ortaya çıkmaktadır. Yüksek oranda çimento kullanımı maliyeti arttırırken diğer taraftan da rötre çatlaklarına neden olacağından dolayı ince malzeme olarak çimentonun yanı sıra silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları da kullanılmaktadır. EFNARC (2005) tarafından, ayrışma direncini sağlamak amacı ile miktarı  $380-600 \text{ kg/m}^3$  arasında değişkenlik gösteren  $125 \text{ m}^3$ 'den küçük toz malzemelerin kullanılması gerektiği ve su/ince malzeme oranının hacimsel olarak değeri 0.85-1.10 arasında tutulması önerilmektedir.

KYB karışımlarının geleneksel beton karışımlarına oranla kaba agrega hacmi daha azdır. EFNARC (2005) tarafından toplam agrega ağırlığının %48- %55 'i kadar ince agrega kullanımı, kaba agrega miktarının da toplam birim ağırlığın %50' si ile sınırlandırılması gerektiği ve maksimum agrega tane boyunun ise 10-20 mm arasında olması önerilmektedir.

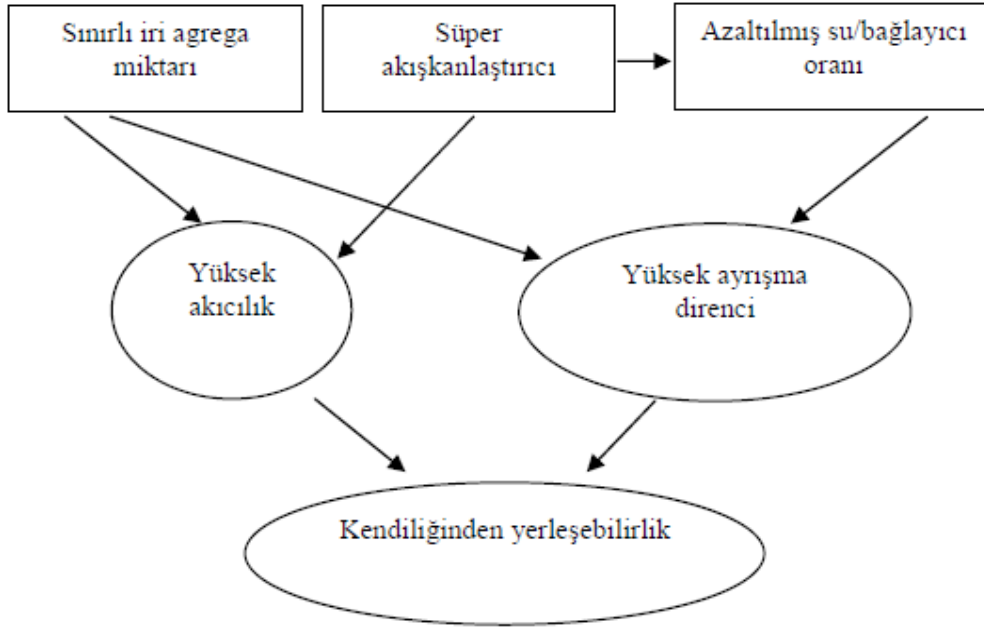
Geleneksel beton ve KYB karışımlarında temelde aynı malzemeler kullanılmaktadır. Ancak, KYB' karışımını gelenekse beton karışımından ayıran bir takım değişiklikler bulunmaktadır. KYB karışımlarının kaba agrega oranı ve su/bağlayıcı madde oranı daha düşüktür (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1 :** Geleneksel beton ve kendiliğinden yerleşen betonun tipik karışım oranları (Holschemacher, 2004).

Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi KYB tasarımında geleneksel beton karışımına göre granülometrisinde kaba-ince agregat oranı daha azdır, bağlayıcı madde miktarı daha yüksektir. Bundaki amaç, her bir kaba agregat tanesinin, harç tarafından çevrelenmesinin sağlanması ve betonun kendiliğinden yerleşebilmesini sağlamaktır (Topçu vd., 2008). KYB’ lerde kaba agregat/toplam agregat oranı reolojik özelliği etkileyen parametrelerden biridir. Şekil 2.2’ de bir KYB karışımının iyi performans sergilemesi için gerekli olan bileşim özellikleri verilmektedir. Sınırlandırılmış kaba agregat miktarı, engeller arasından geçiş yeteneği sağlamakta, hamur hacmini arttırmakta, su/bağlayıcı madde oranını azaltmaktadır (Gürdal ve Yüceer, 2004; Skarendahl ve Petersson, 2003). İnce malzemenin artmasından dolayı hamur hacmi de artarak karışımın akıcılık özelliğini sağlamaktadır (Toyoharu vd. 1998).

KYB’ nin tasarımı esnasında kullanılacak olan malzeme oranlarının belirlenmesi çok büyük özen teşkil etmektedir. Çünkü KYB karışımının sertleşinceye kadar göstereceği performansı farklıdır. KYB’ nin kusmaya ve ayrışmaya dirençli olmalı ve aynı zamanda da düşük kayma gerilmesine sahip olması gerekmektedir. Su/bağlayıcı madde oranının artırılması ile yüksek şekil değiştirmeyi sağlarken diğer yandan da kohezyonu düşürerek segregasyonun oluşmasından kaynaklanan karışımın akış tıkanıklıklarına sebep olabilmektedir (Baradan vd., 2015).



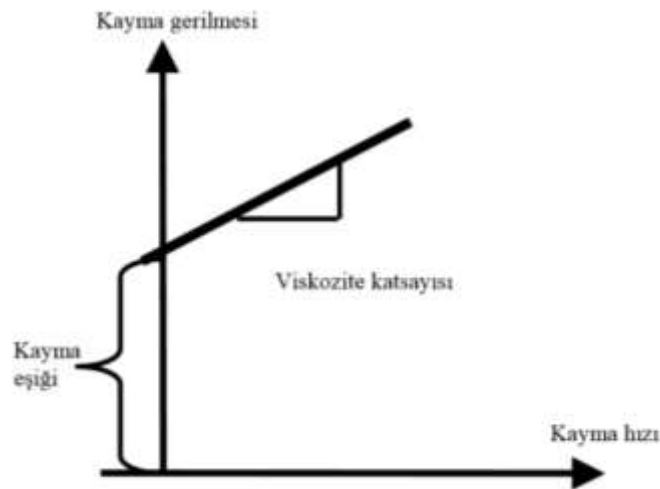
**Şekil 2.2 :** Kendiliğinden yerleşen betonun bileşim özellikleri (Gürdal ve Yüceer, 2004; Skarendahl ve Petersson, 2003).

Agregalar ve ince malzeme taneciklerinin arasında, akmaya karşı iç direnci arttıran iç sürtünme bulunmaktadır. Artan iç direnç nedeni ile KYB' nin şekil değiştirme özelliği ve akış hızı azalmaktadır. Tanecikler arasında oluşan bu iç sürtünme, katı tanecikler arasında daha fazla olduğu için özellikle dar olan kesitlerde betonun akışını büyük ölçüde etkilemektedir. Bundan dolayı, viskozitesi düşük olan beton karışımlarında bölgesel agregâ yoğunluğundaki artışlar kümelenmeye yol açmakta ve beton karışımının dar olan kesitlerde hareket etmesinde engelleyici olmaktadır (Sağlam, 2000).

KYB' lerde akıcılık özelliği su oranı arttırılmadan akışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak sağlanabilmektedir. Polikarboksilik asit bazlı olan yeni nesil akışkanlaştırıcı olarak adlandırılan bu katkıları, sadece elektrostatik etki ile çimento tanelerinin beton içerisinde dağıtılmasını sağlamaz, aynı zamanda uzun yan dallara sahip olan polimer zincirleri ile sterik etki oluşturarak çimento tanelerini ayırıp işlenebilirlik özelliğini arttırmaktadır (Gaimster ve Dixon, 2003; Uyan vd., 2003). Akışkanlaştırıcı katkıların ve bağlayıcı medde oranının KYB' de geleneksel beton karışımına göre daha yüksek olmasından dolayı maliyette artmaktadır. Artan maliyeti düşürmenin bir yolu ise karışım içerisine uçucu kül, silis dumanı gibi mineral katkı ilave etmektir (Khayat ve Guizani, 1997; Felekoğlu vd., 2003).

### 2.1.2. KYB reolojisi

Reoloji bilimi malzemelerin akış kabiliyetini ve deformasyonunu incelemektedir (Hackley ve Ferraris, 2001). Betonun reolojisi, taze betonun dökülmesi ve yerleştirilmesi gibi özelliklerini etkileyen temel özelliğidir. KYB karışımları için esas alınan reolojik özellikler, yeterli plastik viskozite ve düşük akma eşiği değeridir. Eşik kayma değeri, taze betonun hareket etmesi için gerekli olan kuvveti ifade etmektedir. Plastik viskozite ise, taze betonun eşik kayma değerini geçtikten sonra akmaya karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Eşik kayma değeri çökme deneyine benzer bir deney yardımı ile belirlenebilmektedir. Plastik viskozite ise kullanılan malzemeye, malzeme oranlarına ve döküm tekniği gibi parametrelere bağlıdır. KYB’ lerde kayma eşiğinin düşük olması betonda ayrışmaya neden olmakta ve betonun kararsızlığını olumsuz etkilemektedir. Taze beton karışımında ayrışmanın olmaması için betonun yüksek viskoziteye sahip olması gerekmektedir (Topçu vd., 2007). Eşik kayma gerilmesi karışım içerisindeki su miktarını arttırmamak amacı ile akışkanlaştırıcı kullanarak sağlanabilir. Viskozite ise, viskozite arttırıcı katkı kullanılarak sağlanabilir. KYB tasarımlarında genellikle Şekil 2.3’ te verilen Bingham sıvısı modeli kullanılmaktadır (Özkul, 2005).



**Şekil 2.3 :** Bingham sıvısının reolojik parametreleri (Özkul, 2005).

Kendiliğinden yerleşen betonların taze özelliklerinin belirlenmesinde, çökme-yayılma, V-hunisi, L kutusu ve J-halkası deneyleri yapılmaktadır (Kılınç, 2012). EFNARC’a (2005) göre, bir karışımın KYB olma şartı için, bir önceki cümlede bahsi geçen işlenebilirlik testlerine ait sınır değerlerin sağlanması gerekmektedir. KYB karışımlarının reolojik özelliklerinin belirlenebilmesi için Çizelge 2.1’ de verilmiş olan

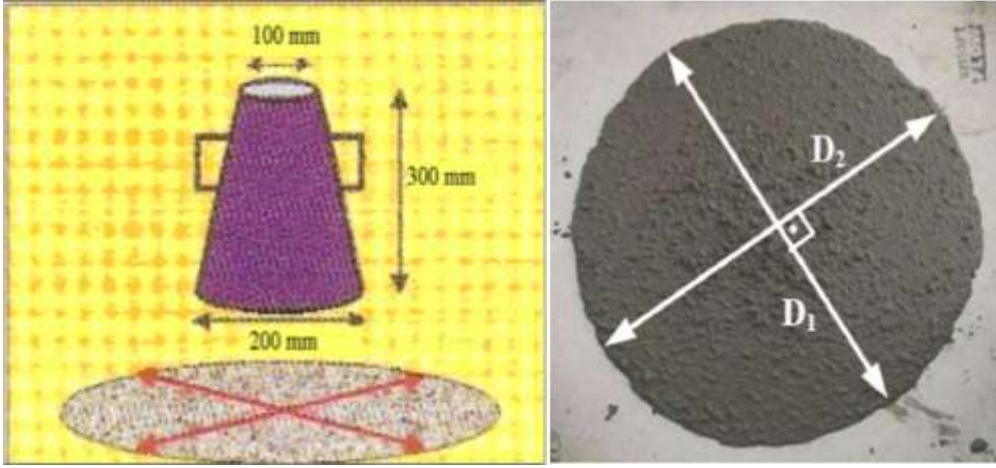
akıcılık, doldurma kabiliyeti, ayrışmaya karşı direnci ve viskozite gibi parametreler ile ilgili deney yöntemlerinin hepsinin uygulanması gerekmektedir.

**Çizelge 2.1 :** Taze KYB özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test metotları EFNARC (2002).

| Özellik                           | Test Metodu                                 | Ölçülen değer                                                      |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Akıcılık/doldurma yeteneği        | Çökme-yayılma<br>Kajima kutusu<br>$t_{500}$ | Toplam yayılma<br>Görsel doldurma<br>Akma süresi                   |
| Viskozite/akıcılık                | V-hunisi<br>O-hunisi<br>Orimet<br>L-kutusu  | Akma süresi<br>Akma süresi<br>Akma süresi<br>Geçme oranı           |
| Engeller Arasından Geçiş Yeteneği | U-kutusu<br>J-halkası<br>Kajima kutusu      | Yükseklik farkı<br>Yükseklik, toplam akma<br>Görsel geçme yeteneği |
| Ayrışma direnci                   | Penetrasyon<br>Elek ayrışma<br>Oturak kolon | Derinlik<br>Yüzde ayrışma<br>Ayrışma oranı                         |

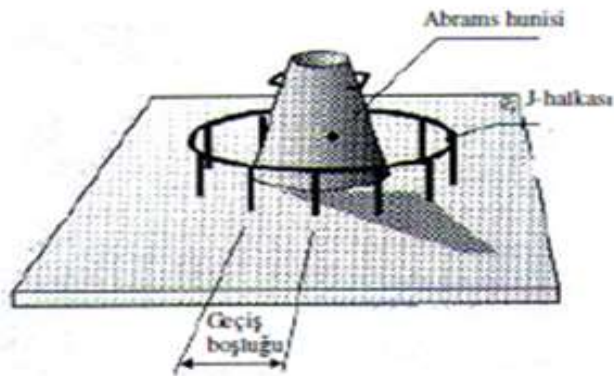
#### 2.1.2.1. Çökme-yayılma deneyi, J-halkası deneyi, J-halkalı çökme-yayılma deneyi ve $t_{50}$ akma süresi

Çökme-yayılma deneyi, KYB karışımlarının taze haldeki akıcılığının ve yayılma yani doldurma kabiliyetinin belirlenmesi amacı ile kullanılan bir deney yöntemidir. Tabla üzerinde kendi ağırlığı ile hiçbir engel olmadan yayılması sağlanan KYB karışımlarının yayılma çapı ölçülerek akıcılık değerlendirilmektedir. Diğer yandan, taze betonun 50 cm çapına ulaşana kadar geçen süre ölçülerek elde edilen  $t_{50}$  akma süresi ile viskozite tespit edilmektedir. Deneyde üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm boyutlarına sahip olan kesik koni şeklindeki Abrams hunisi ve 90x90 cm boyutunda bir yayılma tablası kullanılır. Tabla düz bir zemine yerleştirildikten sonra yüzeyi nemlendirilir. Yayılma tablasının merkezine yerleştirilen kesik koni şişleme işlemi yapılmadan doldurulur ve hiç beklemeden dik bir konumda yavaş bir şekilde yukarıya doğru kaldırılarak taze betonun kendi ağırlığı ile yayılma tablası üzerinde yayılması beklenir. Yayılma tamamlandıktan sonra iki farklı doğrultudan yayılma çapı ölçülür ve ortalaması alınır (Şekil 2.4). Taze betonun yayılma tablası üzerine önceden çizilmiş olan 50 cm çaplı daireye ulaşınca kadar geçen süre kronometre ile ölçülür ve  $t_{50}$  süresi tespit edilir. Yapılan gözlemler sonunda taze betonda ayrışma, terleme gibi problemlerin oluşması durumu kaydedilir.



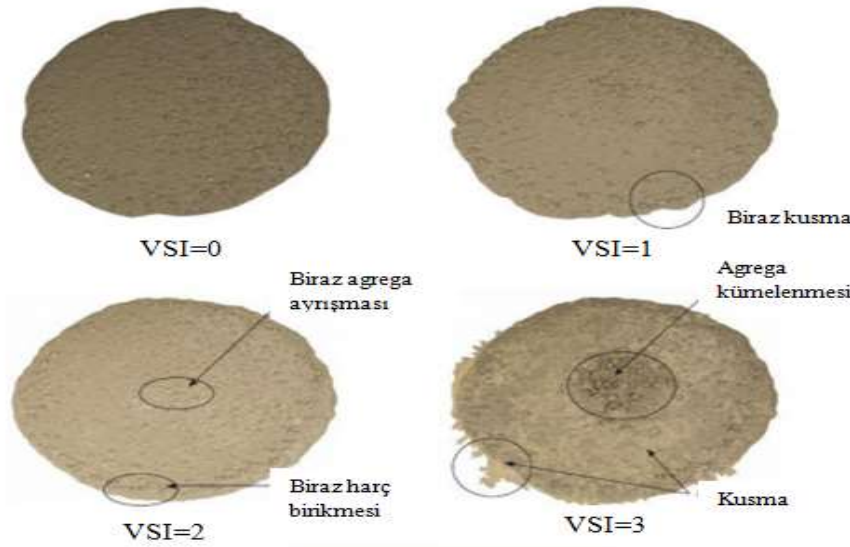
**Şekil 2.4 : Çökme-yayılma testi (Topçu vd., 2008).**

J-halkası deneyi taze betonun engeller arasından geçiş kabiliyetini incelemek amacı ile uygulanan bir yöntemdir. J-halkalı çökme-yayılma deneyinde çökme-yayılma deneyinden farklı olarak Şekil 2.5’de gösterilen bir halka kullanılmaktadır. Yayılma tablası düz bir zemin üzerine yerleştirildikten sonra deney aparatları nemlendirilir. J-halkası yayılma tablası üzerinde yer alan 30 cm çaplı çember üzerine yerleştirilir. Abrams hunisi yayılma tablasının merkezine yerleştirildikten sonra şişleme yapılmadan doldurularak dik bir şekilde yavaşça yukarıya doğru kaldırılır. Yayılma tamamlandıktan sonra iki farklı doğrultudan yayılma çapı ölçülür ve ortalaması alınır. Taze betonun yayılma tablası üzerine önceden çizilmiş olan 50 cm çaplı daireye ulaşınca kadar geçen süre kronometre ile ölçülür ve  $t_{50}$  süresi tespit edilir. Bununla birlikte, halkanın iç kısmındaki ve dış kısmındaki beton seviyeleri üç noktadan ölçülüp seviye farkları hesaplanır. Bu şekilde taze KYB betonunun geçiş kabiliyeti hakkında bilgi edilmektedir.



**Şekil 2.5 : J-halkası deneyi aparatı (Groth, 2000).**

Çökme-yayılma testinden elde edilen sonuçlara bakılarak yayılan KYB betonunun kararlılığı ile ilgili olarak ASTM C1611 (2018) tarafından bazı indeksler tanımlanmıştır. Visual Stability Index (VSI) Şeklinde ifade edilen bu yöntemde, yayılan betonun ayrışmaya karşı direnci ile ilgili görsel olarak karar verilmekte ve ayrışma potansiyeline göre karışımlar 0'dan 3'e kadar VSI değerleri ile tanımlanmaktadır (Şekil 2.6). Belirtilen kriterlere denk düşen VSI değerleri Çizelge 2.2'de verilmektedir.



**Şekil 2.6 : VSI değerlerinin tanımlanması.**

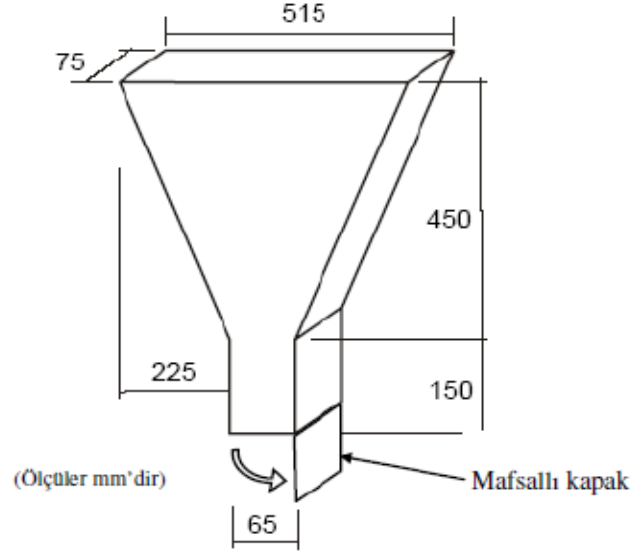
**Çizelge 2.2 : KYB yayılımına göre VSI tanımlaması (Daczko ve Kurtz, 2001).**

| VSI                   | Kriterler                                                                                                   |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 = Çok kararlı       | Herhangi bir kuma ve segregasyon yok                                                                        |
| 1 = Kararlı           | Segregasyon yok, biraz kuma var                                                                             |
| 2 = Kararlı değil     | 10 mm'den az harç birikmesi var ve/veya betonun ortasında biraz agrega ayrışması var                        |
| 3 = Hiç kararlı değil | 10mm'den fazla ve belirgin şekilde harç toplanması var ve betonun ortasında geniş agrega kümelenmesi mevcut |

#### 2.1.2.2. V-hunisi testi

V-hunisi deneyi, taze betonun dar bir kesitten geçiş kabiliyetini ve viskozitesini değerlendirmek amacı ile yapılmaktadır. Şekil 2.7' de verilen yaklaşık 12 litre hacme sahip olan huni nemlendirildikten sonra tamamen taze beton ile sıkıştırma işlemi uygulanmadan doldurulur. Betonun yerleşmesi için 10 saniye beklenilir. Daha sonra deney düzeneğinin alt kısmında bulunan mafsallı kapak açılır ve betonun akması sağlanır. Betonun akmaya

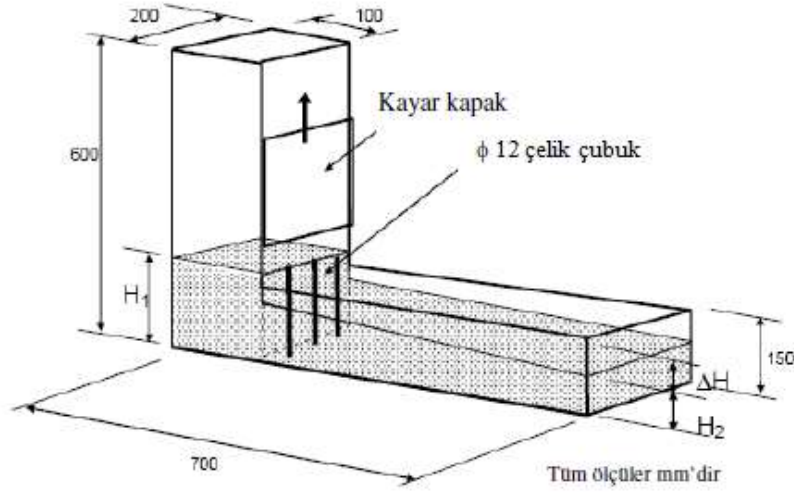
başlaması ile üstten bakıldığında huninin alt kısmında ışık görülmesine kadar geçen süre kronometre kullanılarak ölçülür ve V-hunisi akma süresi elde edilir. Taze betonun akış hızının yüksek olması betonun ayrışma riskini de artırır (Duyar, 2006).



Şekil 2.7 : V-hunisi deney düzeneği (EFNARC(2002)).

#### 2.1.2.3. L-kutusu testi

L-kutusu deneyi, taze KYB' nin geçiş ve yerleşme kabiliyetini, akıcılığını ve betonun tıkanma riskini değerlendirmek amacı ile yapılmaktadır. Kutunun alt kısmında 12 mm çaplı demir donatı bulunmaktadır (Şekil 2.8). Donatılar arasındaki mesafe taze betonun karışımında kullanılan maksimum agrega boyutuna göre değişebilir. Deney düzeneğinin yüzeyleri nemlendirildikten sonra kapak kapatılarak dikey hazne yaklaşık 14 litre KYB karışımı ile sıkıştırma işlemi yapılmadan doldurulur. 1 dakika beklenip kapak açılarak betonun yatay hazne içine yayılması beklenir. Önceden hazne üzerinde kapaktan itibaren 20 cm ve 40 cm' lik mesafeler belirlenir. Kapağın kaldırılması andan itibaren betonun bu mesafelere ulaştığı ana kadar süre kronometre yardımıyla ölçülür. Bu süreler  $T_{20}$  ve  $T_{40}$  akış süreleri kaydedilir. Betonun yayılması tamamlandıktan sonra haznenin iki ucundaki taze beton seviyeleri ( $H_1$  ve  $H_2$ ) ölçülüp oranlanır. Elde edilen oran "bloklanma oranı" olarak tanımlanır. Bloklanma oranının 1' yaklaşması taze betonun akıcılığının artmasına anlamına gelmektedir.



**Şekil 2.8 :** L-kutusu deney düzeneği (EFNARC (2002)).

#### 2.1.2.4. Elek ayrışma testi

Elek ayrışma testinin amacı, taze KYB' nin ayrışmaya karşı gösterdiği direnci saptamaktır. Bu deneyde elek göz açıklığı 5 mm olan kare delikli elek, derinliği 40 mm ve çapı 300 mm olan kap, en az 10 kilogramlık hassas terazi kullanılmaktadır. KYB karışımı hazırlandıktan sonra kap içerisinde 15 dakika bekletilerek taze betonda kusmanın oluşup oluşmadığı tespit edilir. 300 mm çaplı kap boş halde iken tartılır ve  $W_p$  olarak kaydedilir. Daha sonra bu kap üzerine elek yerleştirilerek tartılır. Bekleme süresi dolan taze betonun üzerinden yaklaşık 5 kilogram alınarak kap üzerinde bulunan elek içerisine yaklaşık 500 mm yükseklikten dökülür ve tartılır. Bu tartım  $W_c$  olarak kaydedilir. Taze betonun elekten geçmesi için iki dakika beklenir. Elek üzerinde kalan beton tartılır ve  $W_{ps}$  olarak kaydedilir (Şekil 2.9). KYB' nin ayrışan kısmı Denklem (2.1)' de verilen eşitlikten elde edilir.

$$SR(\%) = (W_{ps} - W_p) / W_c \quad (2.1)$$



**Şekil 2.9 : Elek ayırma deney düzeneği (EFNARC (2002)).**

Taze KYB karışımlarının sınıflandırılması uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlara göre Çizelge 2.3’de verilmektedir.

**Çizelge 2.3 : KYB sınıfları (EFNARC(2002)).**

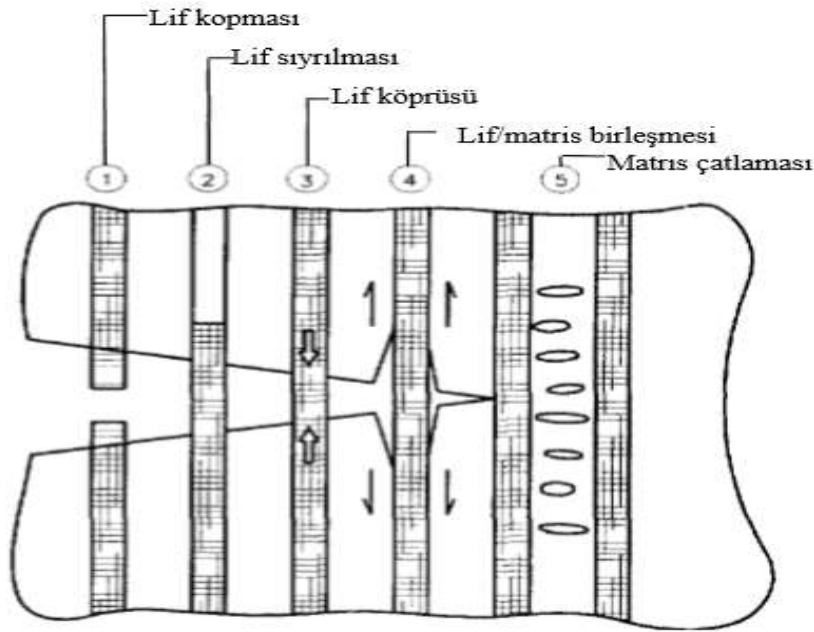
| Sınıf                                  | Yayılma<br>çapı (mm ) | t <sub>500</sub><br>(sn) | V-hunisi<br>akış<br>süresi(sn) | Geçme<br>yeteneği   | Ayrışma<br>direnci<br>(%) |
|----------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------|
| <b>Çökme-yayılma sınıfı</b>            |                       |                          |                                |                     |                           |
| SF1                                    | 550 ~ 650             |                          |                                |                     |                           |
| SF2                                    | 660 ~ 750             |                          |                                |                     |                           |
| SF3                                    | 760 ~ 850             |                          |                                |                     |                           |
| <b>Viskozite sınıfı</b>                |                       |                          |                                |                     |                           |
| VS1/ VF1                               |                       | ≤ 2                      | ≤ 8                            |                     |                           |
| VS2/ VF2                               |                       | > 2                      | 9 ~ 25                         |                     |                           |
| <b>Engeller arasından geçme sınıfı</b> |                       |                          |                                |                     |                           |
| PA1                                    |                       |                          |                                | ≥ 0,80<br>2 qubuklu |                           |
| PA2                                    |                       |                          |                                | ≥ 0,80<br>3 qubuklu |                           |
| <b>Ayrışma direnci sınıfı</b>          |                       |                          |                                |                     |                           |
| SR1                                    |                       |                          |                                |                     | ≤ 20                      |
| SR2                                    |                       |                          |                                |                     | ≤ 15                      |

## 2.2. Çimento Esaslı Kompozitlere Lif Takviyesi

### 2.2.1. Lif takviyesinin kompozitin davranışına etkisi

Lif takviyeli betonlar, geleneksel betonlara betonu güçlendirmek amacıyla lif ilave edilmesiyle elde edilen özel bir betondur. Beton içerisine lif eklenmeye 1960’ larda başlanmıştır (Shah ve Balaguru, 1992). Lif takviyeli betonlar, endüstriyel yapılarda, depreme dayanıklı yapılarda, köprü, tünel, yol kaplamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

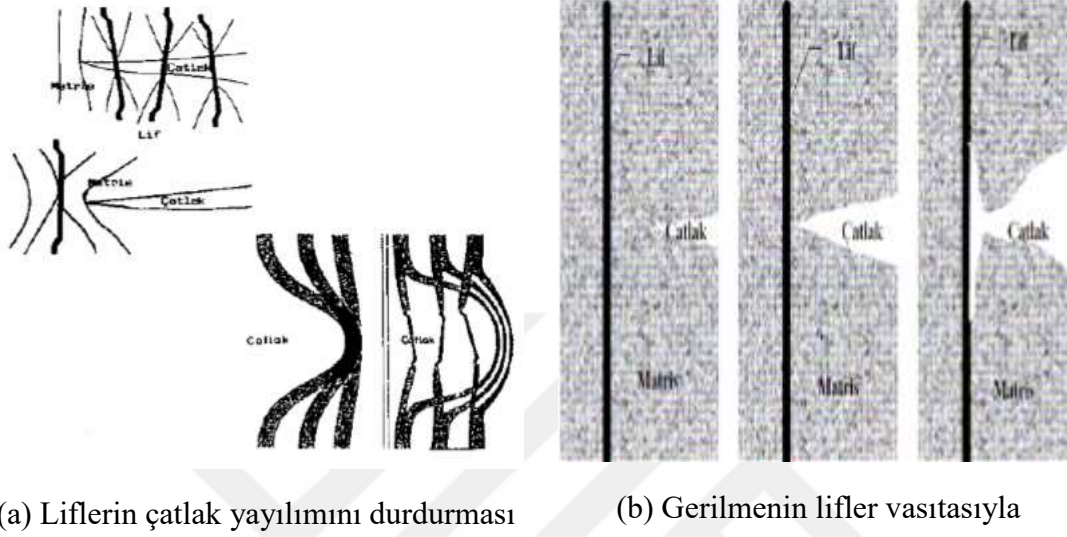
Çimento esaslı kompozitlerin kırılmaları gevrek ve çekme dayanımları oldukça düşüktür (Li ve Zhang, 2005). Betonun heterojen yapıya sahip olması, bünyesinde mikro çatlakların oluşmasını sağlayan gerilmeleri düzgün iletmez ve taşıma gücünü aşması durumunda ani göçmesine neden olur. En başta süneklik olmak üzere betonun mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla ve ani göçmeleri engellemede daha etkili olmak amacıyla betonun içerisine lif ilavesi yöntemi kullanılmaktadır (Şengül, 2005). Matris içerisinde lifler üç boyutta rastgele dağılırlar ve betonun enerji yutma kapasitesini artırırlar. Betonun enerji yutma ve çatlak genişlemesini kontrol etme mekanizması Şekil 2.10' da verilmiştir.



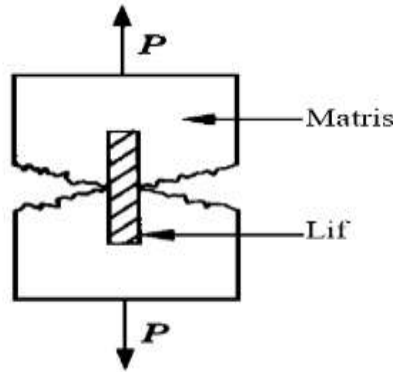
**Şekil 2.10 : Lif/matris mekanizması (Zollo, 1997).**

Lif takviyeli betonların içerisinde yer alan liflerin çekme dayanımlarını yüksektir. Bundan dolayı, betonda çatlakların başlamasını, ilerlemesini ve birbiriyle birleşmelerini engellemektedir (Şahmaran vd., 2005). Yüke maruz kalan betonun zayıf bölgelerinde taşıyacağı yükün aşılmasıyla çatlak oluşumu başlar. Lifin yeterli oranlarda kullanılmasında, lifler yükü alarak çatlak oluşumunu engellemede bir köprü vazifesi yaparlar. Lifler matristeki gerilmelerin üzerlerinden geçerek köprüleme yaparlar (Fırat, 1996). Şekil 11' de liflerin çatlak yayılımını durdurması ve gerilimi dağıtması verilmiştir. Lif takviyeli kompozitler çekme gerilmesine maruz kaldığı zaman matris çatlar. Çatlayan matriste lifler yükü bir taraftan diğer tarafa yükü köprü görevi yaparak aktarır (Şekil 2.12). Matristeki gerilmelerin artmasıyla liflerin özelliklerine ve aderansa bağlı olarak liflerin kopması ve ya

sıyrılması gerçekleşebilmektedir. Bu durumu engellemek için kanca uçlu lifler kullanılarak aderans artırılabilir (Wu, 2006). Lif oranlarının belirlenmesinde, narinlik oranı ve lif geometrisi gibi parametreler dikkate alınması gerekmektedir (Mindess ve Young, 2000; Shi vd., 2002).



**Şekil 2.11 : Liflerin işlevi (Kızıllılgın, 2009).**



**Şekil 2.12 : Çatlamış matriste lif-matris ilişkisi (Shah ve Balaguru, 1992).**

Lif takviyeli betonlarda tek tip lif kullanılması matris içerisinde belirli bölgelerde ve belirli özellikleri iyileştirmede etkilidir. Bundan dolayı, betonun değişik özelliklerini iyileştirmek amacıyla birden fazla lif tipinin kullanılarak karma lif takviyeli beton geliştirilmiştir. Kompozitin özelliklerini iyileştirmede lif boyutu önemli bir etkidir. Mikro boyuttaki çatlakları mikro lifler, makro boyuttaki çatlakları ise makro lifler köprülemektedir.

### 2.2.2. Lif tipleri

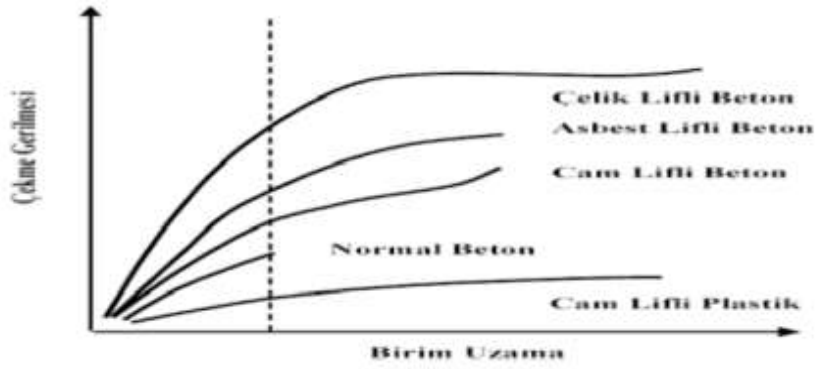
Üretildikleri malzemelerin özellikleri ve kullanımları bakımından birçok farklı tipte lif bulunmaktadır. Lifleri genel olarak metalik lifler (Çelik vb.), polimerik lifler (Karbon, polietilen, polipropilen vb.), mineral lifler (Cam vb.) ve doğal olarak oluşan lifler (Selüloz vb.) olmak üzere dört ana başlık altında toplanabilir (Şengül, 2005). Ayrıca lifler makro lif ve mikro lif olarak da sınıflandırılabilir. Mikro liflerin boyutları yaklaşık 2-10 mm uzunluğunda ve 0,1-1 mm çapındadır. Makro liflerin uzunluğu ise 20-60 mm arasındadır (Bothma, 2013). Bazı lif tiplerinin kullanım alanları ise Çizelge 2.4’ te verilmiştir.

**Çizelge 2.4 : Lif tiplerinin fiziksel özellikleri (Kurt, 2006).**

| Lif Tipi       | Çekme dayanımı (MPa) | Elastisite modülü (GPa) | Maksimum uzama (%) | Yoğunluk |
|----------------|----------------------|-------------------------|--------------------|----------|
| Akrilik        | 207-414              | 2.1                     | 25-45              | 1.1      |
| Asbestler      | 552-966              | 83-138                  | 0.6                | 3.2      |
| Pamuk          | 414-690              | 4.8                     | 3-10               | 1.5      |
| Cam            | 1035-3795            | 69                      | 1.5-3.5            | 2.5      |
| Naylon         | 759-828              | 4.1                     | 16-20              | 1.1      |
| Polyester      | 724-863              | 8.3                     | 11-13              | 1.4      |
| Polietilen(PE) | 690                  | 0.14-0.4                | 10                 | 0.95     |
| YP-PE          | 2700                 | 120                     | 5                  | 0.97     |
| Polipropilen   | 552-759              | 3.5                     | 25                 | 0.90     |
| Pamuk-Y ün     | 414-621              | 6.9                     | 10-25              | 1.5      |
| Mineral Y ün ü | 483-759              | 69-117                  | 0.6                | 2.7      |

Elastisite modülü yüksek olan lifler elastisite modülü düşük olan liflere göre daha gevrek malzemelerdir. Bundan dolayı, elastisite modülü yüksek olan çelik lif, karbon lif gibi lifler betonun tokluğunu ve dayanımını olumlu etkiler. Diğer yandan elastisite modülü düşük olan polipropilen gibi lifler ise, betonun sünekliliğini sağlar (Kawamata vd. 2003; Lawler vd. 2005). Şekil 2.13’ te görüldüğü üzere elastisite modülü en yüksek olan çelik lifler, çekme gerilmesi altında en iyi performansı sergilemiştir.

En yaygın olarak kullanılan metalik lifler çelik liflerdir. Bazı çelik lif şekilleri Şekil 2.14’ te verilmiştir. Çelik lif ilave edilmiş olan betonların mekanik özellikleri, kullanılan lif oranı, lif tipi, lif boyu, numune boyutu gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Ayrıca betona yüksek sıcaklık uygulanması da betonun mekanik özelliklerini etkilemektedir. Çelik liflerin betona ilavesi, betonun eğilme dayanımını ve yarmada çekme dayanımını iyileştirmektedir. Lif oranı arttıkça bu özellikler de artmaktadır (Bayramov, 2004).



**Şekil 2.13 :** Değişik tipteki lifli betonların çekme altındaki davranışları (Kızıllıgın, 2009).

|                         |                    |  |
|-------------------------|--------------------|--|
| En kesit                | Yuvarlak           |  |
|                         | Yassı              |  |
|                         | Yarı yuvarlak      |  |
| Biçim ve deformasyonlar | Düz                |  |
|                         | Dalgalı            |  |
|                         | Kancalı uçlu       |  |
|                         | Geniştirilmiş uçlu |  |
|                         | Çarpık             |  |
|                         | Yassı uçlu         |  |
|                         | Deforme edilmiş    |  |
|                         | Zikzak biçimli     |  |

**Şekil 2.14 :** Bazı çelik lif şekilleri (Bayramov, 2004).

Çimento esaslı kompozitlerde sentetik lif olarak en yaygın kullanılan polivinilalkol (PVA), polipropilen (PP), polietilen (PE), akrilik (PAN) lifleridir. PVA lifleri sentetik lifler arasında elastisite modülü ve dayanıklılığı yüksek olan bir liftir. PVA lifler bu özelliğinden dolayı çatlak ilerlemesini engellemede iyi performans sergilerler. PVA lifleri ile matrisin oluşturduğu aderans yüksek orandadır (Horikoshi vd., 2005). PVA lifi içeren betonlar ile

ilgili yapılan çalışmalardan elde edilen bulgulardan, PVA lifinin betonun eğilme dayanımını ve enerji yutma kapasitesini arttırmasından dolayı betona süneklik kazandırdığı tespit edilmiştir (Uğur, 2007). Farklı lif tiplerine ait bazı özellikler Çizelge 2.5’ te verilmiştir.

**Çizelge 2.5 : Çeşitli lif tiplerinin kullanım alanları [17],(Avar, 2006).**

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

### **2.2.3. Liflerin kullanım şekilleri**

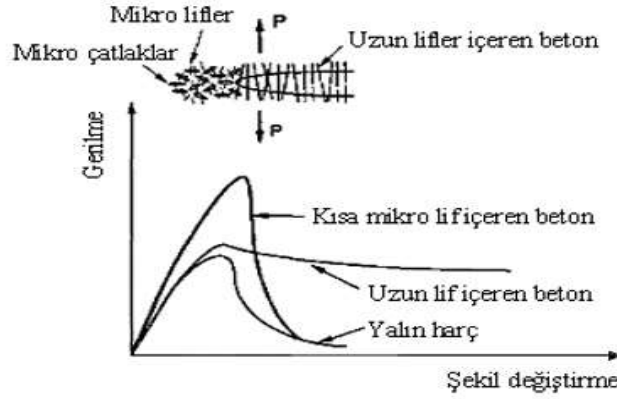
#### **2.2.3.1. Tek tip lif takviyesi**

Lif takviyeli kompozitlerde çoğunlukla tek lif kullanımı tercih edilmektedir. Lif takviyeli kompozitlerin özellikleri ve matris ile lifler arasında oluşan etkileşimi, betonda kullanılan lifin tipine, geometrisine, boyutuna, narinlik oranına ve yüzdesine bağlıdır (Kurt, 2006). Liflerin betonda kullanılmasının amacı, meydana gelen çatlaklar arasında köprüleme görevi yaparak çatlakların genişlemesine ve yayılmasına engel olarak betona sünek özellik kazandırmaktır. Beton yüke maruz kaldığında yapısında daha önce oluşmuş olan mikro çatlaklar genişleyerek birleşir ve daha büyük çatlaklar oluşturur. Oluşan bu makro çatlaklar yayılınca betonda çökme meydana gelir. Betonda çökme olayı aşama gerektiren bir durum ve çok ölçeklidir. Bundan dolayı, beton çökmesinin lifin şekil değiştirmesinin olduğu sınırlı alanda ve tek seviyede etkili olmasını gerektirir (Banthia ve Soleimani, 2005). Betona tek lif takviye edilmesi betonun tek ölçekte oluşan çatlak bölgelerinin korunması anlamına gelmektedir.

#### **2.2.3.2. Karma lif takviyesi**

Betonun yüke maruz kaldığında oluşan çatlakları kontrol altına alabilmek için karma lif takviyeli betonlar geliştirilmiştir. Lif boyutu, geometrisi gibi özellikleri bakımından tek tip lif kullanmak yerine aynı tipte farklı boyutlarda ve ya farklı tip farklı boyutlarda liflerin beraber kullanılması ile edilen betonlara karma lif takviyeli beton denilmektedir (Uğur, 2007).

Karma lif takviyeli kompozitlerdeki amaç, çatlakları henüz mikro boyutlardayken kontrol altına almaktır. Boyutları farklı olan lifler farklı çatlama aşamalarında görev almaktadır. Boyutlarından dolayı mikro lifler matris içerisinde sık bir dağılım sergiler, makro boyuta ulaşmadan çatlakları engellerler. Mikro lifler matris içerisinde her bölgeye dağılarak makro lifin olmadığı bölgelerde çatlak oluşumunu ve ilerleyişini engeller. Makro lifler ise, çekme ve eğilme dayanımında, elastisite modülünde olumlu etki yaparak makro boyutundaki çatlakları kontrol altında tutar (Betterman vd., 1995; Skarendahl ve Petersson, 2000). Çatlakların köprülenmesinde lif boyunun etkisi Şekil 2.15' te verilmiştir.



**Şekil 2.15 :** Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi (Avar, 2006; Skarendahl ve Petersson, 2000).

Benthur ve Mindess' e (1990) göre, karma lif takviyesinin bazı avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Daha sert ve güçlü olan bir lif tipi ilk çatlak gerilmesini ve nihai dayanımını geliştirir ve daha esnek olan ikinci lif tipi ise, çatlama sonrası bölgesinde sünekliği ve tokluğu geliştirir.
- Kullanılan liflerin birinci türü küçük, ikinci türü daha büyüktür. Çatlakların başlamasını kontrol altına alan ve mikro boyutta oluşan çatlakları köprüleyerek betonun çekme dayanımını arttıran daha kısa olan liflerdir. Makro boyuttaki çatlakların genişlemesini ve yayılmasını engelleyerek betonun tokluğunu ve dayanımını arttırmaktadır.
- Karma lif takviyeli kompozit içerisinde yer alan liflerin dayanıklılığı birbirinden farklıdır. Bu lifler içinde daha dayanıklı olan liflerin varlığı, betonun ilerideki yaşlarda mukavemet ve tokluk ilişkisini arttırırken, daha az dayanıklılığa sahip olan lifler ise, elemanların taşınması ve montajı esnasında kısa vadede performans sağlamaktadır.

Karma lif takviyeli kompozitlerin içerisinde narinliği, boyu ve elastitise modülü farklı olan lifler içermektedir. Bu şekilde farklı özelliklere sahip liflerin bir arada kullanılmasının etkilerinin araştırılmasından elde edilen bulgular doğrultusunda bazı lif kombinasyonları arasında sinerji olduğu sonucuna varılmıştır. (Banthia ve Soleimani, 2005; Banthia ve Nandakumar, 2003). Mindess (2007)' ye göre farklı özellikteki liflerin ikili ve ya daha fazla miktarda bir arada kullanılması eğilme performansını arttırmaktadır.

### **2.2.3.3. Mikro ve makro liflerin davranışa etkisi**

Çimento esaslı kompozitlerin davranışlarını geliştirmek amacı ile yapılan çalışmalarda farklı tip ve boylardaki liflerin kullanımı artmıştır. Bu çalışmalar esnasında narinliği düşük olan mikro lifler ve narinliği yüksek olan makro lifler kullanılmaktadır (Rambo vd. 2014). Makro lifler, mikro çatlak alanından uzakta ise oluşan bu mikro çatlakları engelleyemezler. Ancak mikro çatlaklar genişleyerek makro çatlakları oluşturmaya başlarsa makro lifler devreye girmeye başlar ve betonun tokluğunu artırır. Bunun aksine, mikro lifler mikro çatlakları engelleyerek çatlaklar arası köprü görevi yapar. Mikro çatlakların birleşerek genişlemesini engeller ve betonun çekme dayanımını artırır (Betterman vd., 1995).

Sato ve diğerleri (2000), yaptığı çalışmalar doğrultusunda makro lif oranının artmasının betonun sünekliliği açısından mikro liflerden daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Unutulmaması gereken bir nokta ise, liflerin birincil görevi betonun dayanımını arttırmaktan ziyade çatlak meydana geldikten ve genişledikten sonra gerilmelerin aktarımını sürdürülmesi ve tokluğun artırılmasıdır (Bentur ve Mindess 1990; Shah1991; Li ve Maalej 1996).

### **2.2.3.4. Mikro ve makro liflerin taze beton özelliklerine etkisi**

Yapılan deneylerden elde sonuçlara göre, taze beton içine lif takviyesi işlenebilirlik özelliğini düşürmektedir (Bayasi ve Soroushian, 1991). Akçay ve Taşdemir (2012), liflerin akıcılık özelliğine etkisinin geometrisinden kaynaklandığını, lif ilavesinin akıcılık oranını değiştirdiğini ifade etmişlerdir. Betonda düz uçlu liflerin kullanımı işlenebilirliği arttırmaktadır. Bu nedenle, düz uçlu lifler, kanca uçlu liflere kıyasla daha yüksek oranda kullanılabilme imkânı sunmaktadır. Aynı zamanda narinliğin artması ile işlenebilirliğin azalmasından dolayı lif oranında azalma olmaktadır. Lif miktarının belirlenmesinde narinlik, lifin geometrisi gibi parametreler göz önünde bulundurulmalıdır (Mindess ve Young, 2000; Shi vd., 2002).

Agrega ile çelik liflerin karıştırılması zordur. Özellikle lif oranı yüksek olan betonlarda, lifler kenetlenerek beton içerisinde üniform bir şekilde dağılmaz ve işlenebilirliği azaltır. Liflerin kenetlenmesi topaklaşma olarak adlandırılmaktadır. Topaklaşma riskinin düşük olması için betonun yüksek işlenebilirliğe sahip olması gerekmektedir. Yüksek işlenebilirliği sağlamak amacıyla genellikle süperakışkanlaştırıcı kullanılmaktadır.

İşlenebilirlik özelliği üzerinde mikro lifler makro liflere kıyasla daha olumlu bir etki yapmaktadır (Chung, 2005). Mikro liflerin kullanımı zor olmaktadır. Betona ilave edilen agregalardan dolayı hamur hacminde azalma olmaktadır. Bundan dolayı mikro liflerin dağılacağı bölgelerde azalma olmaktadır. Diğer yandan, mikro lif ve agreganın betona ilavesi işlenebilirliği azaltmaktadır (Lawler, 2001). Hazırlanan standartlar incelendiğinde mikro liflerin yüzey alanlarının tamamen kaplanabilmesi için hamur hacminin yüksek olması gerektiğini ortaya koymuştur.

#### **2.2.3.5. Farklı türlerdeki liflerin kombinasyonunun incelenmesi**

Lif takviyeli betonlarda karma lif takviyesinin etkilerini araştırmak amacı ile farklı liflerin kombinasyonlarının olduğu bazı çalışmalar şu şekildedir; PP+çelik (Kawamata vd., 2003 (Öz, 2014)), PVA+ çelik (Liu ve Tan, 2017), PVA-karbon (Metaxa vd. 2011), PVA-PE (Felekoğlu vd., 2009). Kawata vd. (2003) (Öz, 2014), sentetik liflerin betonun sünekliliğini arttırmak için kullanıldığını, karma liflerin dayanım ve süneklilik açısından tek olarak kullanılan liflerden daha üstün performans sergilediğini ifade etmişlerdir. Metaxa vd. (2011) tarafından yapılan araştırmada, karbon ve PVA lifinin beraber kullanılmasıyla kompozitin elastisite modülünün, eğilme dayanımının ve tokluğunun arttığı bulunmuştur.

PP lifleri betonun yangın performansında üstün performans sergilemektedir. PP lifinin yangın testinden betonun yüzeyinde meydana gelen dökülmeleri engellediği tespit edilmiştir. Lifin erimesiyle birlikte betonda boşluklar meydana gelir. Oluşan bu boşluklar sayesinde buhar basıncı azalır. Böylelikle betonun dökülmeye karşı direnci artar (Han vd, 2005).

#### **2.2.3.6. Lif kullanımının yangına karşı dayanımına etkisi**

Yüksek dayanımlı betonlar oldukça az miktarda boşluğa sahip oldukları için yangına karşı dirençleri düşüktür. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonda betonun yapısından dolayı su buharlaşamaz ve buhar basıncı artar. Buhar basıncının artmasıyla birlikte betonda kabarmalar ve dökülmeler meydana gelmektedir. Dökülmelerden dolayı açığa çıkan donatılar korunmasız kalır. Betonda oluşan bu sorun, betona polipropilen lif takviyesi yapılarak yüksek sıcaklık altında betonun yapısında lifin erimesiyle boşluklar oluşturup su buharının bu boşluklardan dışarı çıkması sağlanarak çözülmektedir. Böylece, betonda dökülmeler engellemektedir (Taşdemir vd., 2004).

C-S-H jeli  $560^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta bozulmaya başlamakta ve  $800^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta  $\text{C}_2\text{S}$  ve  $\text{C}_3\text{S}'$  ye dönüşerek bozulmaktadır (Peng ve Huang, 2008). CH,  $370^{\circ}\text{C}$  sıcaklık civarında çok belirgin oranda bozulmaya başlamaktadır.  $580^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta %98 oranında bozulmaktadır. Etrenjit  $110\text{-}114^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta, kalsiyum sülfat hemihidrat, su ve muhtemelen AFm fazı olan amorf bileşene dönüşerek bozulmaktadır (Zhou ve Glasser, 2001).



### 3. MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde tez çalışması aşamalarında kullanılan agrega, çimento, uçucu kül, kimyasal katkı, makro çelik lif, mikro çelik lif, sentetik lifler ile deneysel çalışmalarda kullanılan düzenekler, cihazlar ve yöntemler hakkında bilgi verilecektir.

#### 3.1. Malzemeler

##### 3.1.1. Çimento ve uçucu kül

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan ve üretilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımlarının hepsinde Çimsa Çimento Fabrikası tarafından üretilen CEM I 42,5 R tipi Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Bu çimentoya ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.1’ de verilmiştir. Deney sonuçlarının etkilenmemesi için deneysel çalışmada kullanılacak olan çimentonun tümü önceden temin edilmiş olup tazeliğini koruyacak şekilde kuru bir ortamda iki kat torbalanarak muhafaza edilmiştir. Çimentonun yoğunluğu 3.15’ tir.

Karışımlarda mineral katkı olarak, ağırlıkça çimentonun yerine kullanılan uçucu kül (UK) ise İskan Sugözü Termik Santralinden temin edilmiştir. ASTM C618 (2019)’ e göre F sınıfı olan bu uçucu küle ait kimyasal analiz sonucu Çizelge 3.1’ de verilmiştir. Uçucu kül ün yoğunluğu ise 2.24’ tür.

**Çizelge 3.1 : Çimento, uçucu kül kimyasal kompozisyonları.**

| (%) | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO   | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | MnO | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | SrO | Kızdırma Kaybı |
|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-----------------|------------------|-------------------|-----|-------------------------------|------------------|-----|----------------|
| PÇ  | 18.90            | 5.15                           | 3.36                           | 63.59 | 1.57  | 2.65            | 0.77             | 0.40              | -   | -                             | -                | -   | 3.59           |
| UK  | 63.09            | 3.74                           | 6.11                           | 6.75  | 10.53 | 0.63            | 5.63             | -                 |     | 1.43                          | 1.62             | 0.2 | 2.6            |

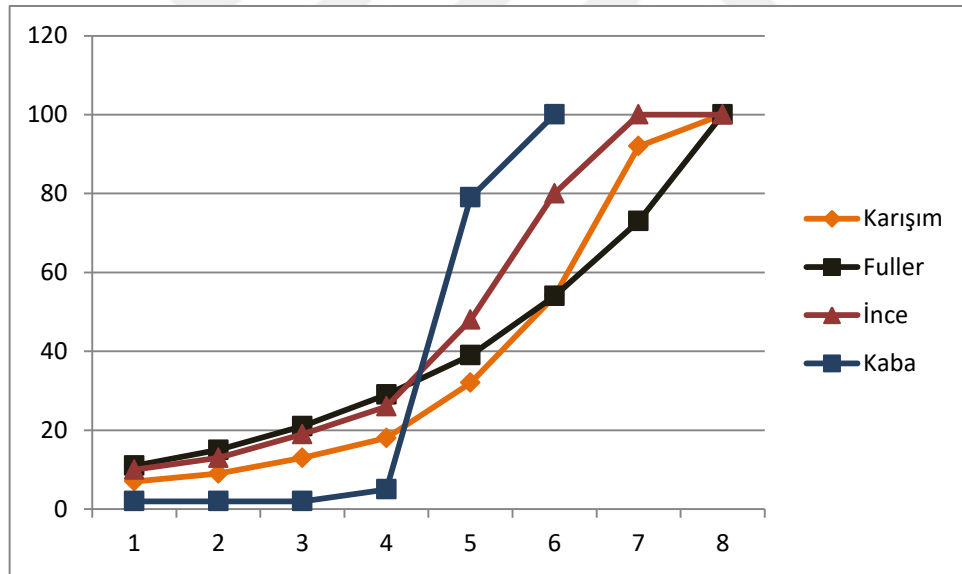
##### 3.1.2. Agrega

Lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (LTKYB) karışımlarının üretiminde Malatya Çınarlar Beton firmasından temin edilen 0-5 mm ve 5-10 mm elek aralığına sahip iki farklı tipte agrega kullanılmıştır. İnce agreganın kuru özgül ağırlığı 2.49 g/cm<sup>3</sup> olup, su emme değeri %2.2’ dir. İri agreganın ise kuru özgül ağırlığı 2.63 g/cm<sup>3</sup> olup, su emme değeri ise %0.3’ tür. Tez çalışması boyunca kullanılacak olan agregaların tane dağılımını elde etmek amacıyla elek analizi yapılmıştır. Kullanılan elek çapları TS 706 EN 12620 (2003)’ye uygun olarak seçilmiştir.

Şekil 3.1’ de de görüldüğü gibi, kullanılan agregaların granülometrisinin uygunluğunun belirlenebilmesi amacıyla, agrega yığınlarına ait granülometri eğrileri Denklem (3.1)’ de verilen Fuller parabolü ile karşılaştırılmıştır. Çizilen granülometri eğrileri Şekil 3.1’ de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, elde edilen karışım agregasına ait granülometri eğrisi Fuller eğrisi ile paralellik gösterip daha çok ince malzeme içermektedir. Çünkü karışımlarda liflerin topaklanmasını engellemek ve KYB açısından işlenebilirlik özelliklerini sağlamak için ince agrega oranının daha büyük olması gerekmektedir. Tüm karışımlarda %85 oranında ince agrega ve %15 oranında iri agrega içeren agrega karışımı kullanılmıştır.

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

Bu denklemde  $P_i$  elekten geçen yığışımly yüzdeyi,  $d_i$  elek analizinde kullanılan elek ebatlarını ve  $D$  ise maksimum tane çapını göstermektedir.



Şekil 3.1 : Karışımlarda kullanılan agrega yığınının gradasyon eğrisi.

### 3.1.3. Kimyasal katkı

Tüm karışımlarda kendiliğinden yerleşebilirlik ölçütlerini sağlamak, kullanılan liflerin işlenebilirlik özelliği üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak ve su/bağlayıcı madde oranını düşürmek amacıyla, özgül ağırlığı 1.06 olan yüksek oranda su azaltıcı polikarboksilik polimer esaslı ViscoCrete Hi-Tech 51 hiperakışkanlaştırıcı (HA) kimyasal

katkı kullanılmıştır. Bu hiperakışkanlaştırıcı katkı SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından temin edilmiştir.

#### **3.1.4. Karışım suyu**

Tez çalışması süresince numunelerin üretiminde Malatya şebeke suyu kullanılmıştır.

#### **3.1.5. Lifler**

Tez çalışması kapsamında bir tip makro çelik lif, üç adet farklı tip mikro lif olmak üzere toplamda dört farklı tipte lif tercih edilmiştir (Şekil 3.2. a, b, c, d). Mikro lif olarak mikro çelik ve sentetik lif kullanılmıştır. Sentetik lif olarak Polivinil-alkol (PVA) ile Polipropilen (PP) lifleri tercih edilmiştir. Makro ve mikro çelik lifler Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş., PVA lifi Arkem Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş., PP lifi ise Dost Kimya Endüstriyel Ham. San. ve Tic. LTD. ŞTİ. işletmesinden temin edilmiştir.

Makro çelik liflerin iki ucu kancalıdır ve firma tarafından 3D 65/35 olarak adlandırılmıştır. Mikro lif ise düzdür ve firma tarafından OL 6/.16 olarak adlandırılmıştır. Makro ve mikro çelik lifler ile PVA ve PP lifinin bazı özellikleri Çizelge 3.2' de verilmiştir.



(a) Makro çelik lif (3D 65/35)



(b) Mikro çelik lif (OL 6/.16)



(c) Mikro sentetik lif (PVA)



(d) Mikro sentetik lif (PP)

Şekil 3.2 : Kullanılan liflerin görselleri.

Çizelge 3.2. Makro ve mikro liflerin özellikleri

| Lif Adı  | Lif Türü     | Boy (mm) | Narinlik | Çekme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Erime Noktası (°C) |
|----------|--------------|----------|----------|----------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 3D 65/35 | Çelik Lif    | 35       | 65       | 1345                 | 200                     | 7.8                           | 1450-1520          |
| OL 6/.16 | Çelik Lif    | 6        | 40       | 3000                 | 200                     | 7.2                           | 1450-1520          |
| PVA      | Sentetik Lif | 8        | 200      | 1600                 | 41                      | 1.3                           | 240                |
| PP       | Sentetik Lif | 6        | -        | 350                  | -                       | 0.94                          | 165                |

### 3.1.6. Kullanılan kalıplar

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, basınç dayanımı tespitinde kullanılacak numuneler için 100x100x100 mm ölçüsünde küp kalıplar, yarmada-çekme dayanımı tespitinde kullanılacak numuneler için 100x200 mm ölçüsünde silindir kalıplar, eğilme

dayanımı tespitinde kullanılacak numuneler için 100x100x400 mm ölçüsünde prizma kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.3. a, b, Şekil 3.4 (devam). c).



(a) K p Kalıp



(b) Silindir Kalıp

**Şekil 3.3 :** Tez çalışmasında kullanılan kalıplar.



(c) Prizma Kalıp

**Şekil 3.4 (devam) :** Tez çalışmasında kullanılan kalıplar.

### 3.2. DeneySEL Çalışma

#### 3.2.1. Karışımların hazırlanması

Bu tez çalışması kapsamında karışım oranlarını belirlemek amacıyla çok sayıda deneme karışımları hazırlanmıştır. Deneme dökümlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda bağlayıcı madde, su, agrega, hiperakışkanlaştırıcı ve lif miktarlarına karar verilmiştir. Bağlayıcı madde olarak Portland çimentosu ve uçucu kül kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonunda mikro ve makro liflerin kullanılmasının işlenebilirlik özelliklerini olumsuz etkilediğinden ve sentetik liflerin topaklanmasından dolayı karışımlarda ince malzeme oranının yüksek olmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda, tüm karışımlarda bağlayıcı madde miktarı ve ince agrega oranı arttırılmıştır. Karışım oranlarının belirlenmesinde, karışımların kendiliğinden yerleşebilirlik şartını belirleyen EFNARC (2002)' a göre işlenebilirlik testleri (çökme-yayılma,  $t_{50}$  ve J-halkası) göz önüne alınmıştır. Bu amaçla, karışımlarda PÇ ve UK, sırasıyla, 600 ve 300 kg/m<sup>3</sup> olarak kullanılmıştır.

Deneme karışımlarından sonra karar verilerek geliştirilen karışım oranları Çizelge 3.3' te verilmiştir. Buna göre, karışımlar 0.23 su/bağlayıcı madde oranına (s/b) ve toplam 900 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı madde içeriğine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. İnce agrega oranı %85 ve kaba agrega oranı %15 olarak ayarlanmıştır.

KYB ve LTKYB' nin betonun yüksek sıcaklıklar altında sergilediği mekanik özelliklerini incelemek amacıyla, 1 adet lifsiz kontrol betonu, 1 adet sadece makro çelik lif

içeren tek lif takviyeli karışım, 4 adet ikili lif takviyeli karışım (% 0.75 makro çelik+% 0.25 mikro çelik lif ve % 0.50 makro çelik+% 0.50 mikro çelik lif ve % 1 makro çelik lif+% 0.25 PVA ve % 1 makro çelik lif+% 0.25 PP), 4 adet üçlü lif takviyeli karışım (% 0.75 makro çelik lif+% 0.25 mikro çelik lif +% 0.25 PVA ve % 0.75 makro çelik lif +% 0.25 mikro çelik lif +% 0.25 PP ve % 0.50 makro çelik lif +% 0.50 mikro çelik lif+% 0.25 PVA ve % 0.50 makro çelik lif+% 0.50 mikro çelik lif+% 0.25 PP) olmak üzere toplamda 10 adet karışım üretilmiştir. Bu karışımlara ait isimlendirmede kullanılan ifadelerin ne anlama geldiği şu şekildedir;

- ✓ Kontrol: kendiliğinden yerleşen lif içermeyen beton
- ✓ MAK1.00: sadece makro çelik lif içeren beton karışımı
- ✓ MAK: makro çelik lif (3D 65/35)
- ✓ MİK: mikro çelik lif (OL 6/.16)
- ✓ PVA: Polivinil-alkol lifi
- ✓ PP: Polipropilen lifi

MAK, MİK, PVA, PP' nin sağ tarafına yazılan rakamlar ise karışıma ilave edilen liflerin hacimce yüzde miktarlarını ifade etmektedir. Örneğin; MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25 şeklinde isimlendirilen karışım, %0.75 oranında makro çelik lif, %0.25 oranında mikro çelik lif ve %0.25 oranında PVA lifi içermektedir.

**Çizelge 3.3 : Karışım oranları (kg/m<sup>3</sup>).**

| Karışım No | Karışım Kodu             | s/b* (%) | Bağlayıcı Madde |     | Su  | Agrega (DYK**) |          | Çelik Lif |         | Sentetik Lif |      | HA**** |
|------------|--------------------------|----------|-----------------|-----|-----|----------------|----------|-----------|---------|--------------|------|--------|
|            |                          |          | PÇ              | UK  |     | (0-5)mm        | (5-10)mm | 3D 65/35  | OL 6/16 | PVA          | PP   |        |
|            |                          |          |                 |     |     |                |          |           |         |              |      |        |
| 1          | Kontrol                  | 0.23     | 600             | 300 | 203 | 973.8          | 171.8    | 0         | 0       | 0            | 0    | 15     |
| 2          | MAK1.00                  | 0.23     | 600             | 300 | 204 | 952.0          | 168.0    | 80        | 0       | 0            | 0    | 16     |
| 3          | MAK1.00+PV A0.25         | 0.23     | 600             | 300 | 204 | 918.5          | 162.1    | 80        | 0       | 3.25         | 0    | 20     |
| 4          | MAK1.00+PP0.25           | 0.23     | 600             | 300 | 204 | 922.6          | 162.8    | 80        | 0       | 0            | 2.38 | 18     |
| 5          | MAK0.75+MIK0.25          | 0.23     | 600             | 300 | 204 | 949.5          | 167.6    | 60        | 20      | 0            | 0    | 19     |
| 6          | MAK0.50+MIK0.50          | 0.23     | 600             | 300 | 204 | 949.0          | 167.5    | 40        | 40      | 0            | 0    | 19     |
| 7          | MAK0.75+MIK0.25+PV A0.25 | 0.23     | 600             | 300 | 204 | 914.0          | 161.3    | 60        | 20      | 3.25         | 0    | 22     |
| 8          | MAK0.75+MIK0.25+PP0.25   | 0.23     | 600             | 300 | 204 | 914.0          | 161.3    | 60        | 20      | 0            | 2.38 | 22     |
| 9          | MAK0.50+MIK0.50+PV A0.25 | 0.23     | 600             | 300 | 204 | 929.6          | 164.0    | 40        | 40      | 3.25         | 0    | 18     |
| 10         | MAK0.50+MIK0.50+PP0.25   | 0.23     | 600             | 300 | 204 | 937.7          | 165.5    | 40        | 40      | 0            | 2.38 | 18     |

\* s/b : Su/bağlayıcı madde oranı

\*\* DYK : Doygun Yüzey Kuru

\*\*\* HA : Hiperakışkanlaştırıcı

### 3.2.2. Yerleştirme ve kür koşulları

Mikser içerisinden homojen bir şekilde alınan KYB karışımları kalıplara doldurulmuştur. Yerleştirme esnasında herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan taze beton kürekle kalıplar içerisine dökülerek yerleştirilmiştir. Daha sonra kalıpların dörtkenarına onar defa olmak üzere plastik tokmakla vurularak minimum boşlukta yerleştirme sağlanmaya çalışılmıştır. KYB karışımlarına ait numuneler laboratuvar ortamında buharlaşmanın önlenmesi amacıyla üstlerine naylon örtü kapatılarak 24 saat bekletilmiştir (Şekil 3.5). Prizini alan numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra sıcaklığı  $23\pm1^{\circ}\text{C}$ 'de olan kür havuzuna konulmuş ve 90 gün boyunca bekletilmiştir (Şekil 3.6). KYB karışımlarına ait numuneler kür süresinin sonunda havuzdan çıkarıldıktan sonra yaklaşık 3 saat bekletilerek doymuş yüzey kuru (DYK) hale getirilmiştir. DYK haline getirilen numuneler sertleşmiş beton deneylerine (basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı (USGH) ve yüksek sıcaklık testleri) tabi tutulmuşlardır.



Plastik tokmak

Şekil 3.5 : Yerleştirme ve priz alma koşulları.



**Şekil 3.6 : Kür koşulları.**

### **3.3. DeneySEL Program**

Lifsiz KYB karışımının ve LTKYB karışımlarının hazırlanması aşamasında Şekil 3.7’ de verilen 30 litre kapasiteli düşey eksenli mikser kullanılmıştır. Karışımların hepsinde makro çelik lif ve mikro liflerin (çelik ve sentetik) topaklaşma olmadan homojen dağılımını sağlamak amacıyla karıştırılma süreleri sabit tutulmuştur. Bu amaçla, ilk aşamada, hesaplanan miktarlarda ince agreg, kaba agreg, makro ve mikro çelik lif tartılarak karışım suyunun üçte ikisi ile birlikte mikserde yerleştirilip 3 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra çimento esaslı maddeler (PÇ ve UK), başka bir kap içerisinde karışım suyunun geriye kalan üçte biri ile birlikte hazır hale getirilen akışkanlaştırıcı mikser içine eklenerek 15 dakika daha karıştırılmaya devam edilmiştir. Bu 15 dakikalık zaman diliminin 7. dakikasında liflerin topaklanmasını engellemek amacıyla sentetik lifler karışım içerisine mikser döndüğü esnada azar azar eklenmiştir. Yapılan deneme karışımlarından elde edilen sonuçlardan sentetik liflerin (PVA, PP) karışıma hacimce %0.50 ve üzerinde katılmasının topaklanmalara neden olduğu ve bu nedenle ön karıştırma yapılmadan karma lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonlarda (KLTKYB) kullanılamayacağı tespit edilmiştir. Bu sebeple, karışımların hazırlanmasında herhangi bir ön karıştırma yapmadan aynı mikserde tek seferde karışımları hazırlamak amacıyla sentetik lif oranı %0.25 seçilmiştir.



**Şekil 3.7 :** Karışımların hazırlanmasında kullanılan düşey eksenli mikser.

Hazırlanan numunelere, taze beton deneyleri, sertleşmiş beton deneyleri ve tez çalışması kapsamında belirlenen sıcaklıklar ( $250^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$ ,  $750^{\circ}\text{C}$ ) ile ilgili yüksek sıcaklık deneyleri uygulanmıştır (Çizelge 3.4).

**Çizelge 3.4 :** Hazırlanan karışımlara uygulanan deneyler.

| <b>Taze Beton Deneyleri</b>      | <b>Sertleşmiş Beton Deneyleri</b>           |
|----------------------------------|---------------------------------------------|
| Çökme-yayılma deneyi             | Birim ağırlık (BA)                          |
| J-halkası                        | Basınç dayanımı deneyi                      |
| J-halkalı çökme-yayılma deneyi   | Yarmada çekme deneyi                        |
| Taze birim hacim ağırlığı (TBHA) | Dört noktalı eğilmede çekme dayanımı deneyi |
|                                  | Ultrases geçiş hızı (USGH)                  |
|                                  | Yüksek sıcaklık                             |

### 3.3.1. Taze beton deneyleri

KLTKYB karışımların taze haldeki özelliklerini elde etmek amacı ile uygulanan deneyler ve bu deneylerin sonucunda elde edilen özellikler Çizelge 3.5’ te verilmiştir.

**Çizelge 3.5 : Taze beton deneyleri ve deneylerden elde edilen özellikler.**

| <b>Taze Beton Deneyleri</b>                 | <b>Deneyden Elde Edilen Özellikler</b> |
|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| Çökme-yayılma deneyi                        | Yayılma çapı (D <sub>Ç</sub> )         |
|                                             | Yayılma süresi (t <sub>50</sub> )      |
| J-halkası ve J-halkalı çökme-yayılma deneyi | Yayılma çapı (D <sub>J</sub> )         |
|                                             | Yayılma süresi (t <sub>50J</sub> )     |
|                                             | Yükseklik farkı (ΔH)                   |
| Taze birim hacim ağırlığı (TBHA)            | Taze birim ağırlık                     |

#### 3.3.1.1. Taze birim hacim ağırlığı (TBHA)

Lifli ve lifsiz KYB karışımlarının taze birim hacim ağırlığının belirlenmesinde belirli hacme sahip bir kap kullanılmıştır. Hazırlanan taze haldeki karışımlar mikserin içerisinde homojen bir şekilde alınarak kap içerisine doldurulmuştur. Kap içerisine doldurulma yapılırken, karışımlara herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. Daha sonra, hacmi belli kap içerisine doldurulan KYB karışımları hassas terazide tartılarak TBHA değerleri Denklem (3.2)’ de verilen eşitlikten hesaplanmıştır.

$$TBHA = \frac{A - B}{V} \quad (3.2)$$

Burada;

TBHA: Taze birim hacim ağırlığı (kg/m<sup>3</sup>)

A: Taze betonun ağırlığı (gr)

B: Kap ağırlığı (gr)

V: Kalıp hacmi (dm<sup>3</sup>)

### 3.3.1.2. Çökme-yayılma deneyi

Bu deney betonun doldurma yeteneğini ölçmek amacıyla uygulanmaktadır. Çökme-yayılma deneyleri EFNARC (2002) kriterleri göz önüne alınarak yapılmıştır. Çökme-yayılma deneyi esnasında kesik koni şeklindeki üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm, yüksekliği 30 cm olan Abrams hunisi ile yayılma tablası kullanılmıştır (Şekil 3.8). Yayılma tablası düz bir zemin üzerine yerleştirilerek tablanın yüzeyi ve Abrams hunisinin iç yüzeyi nemlendirilir. Abrams hunisi yayılma tablasının üzerinde bulunan dairelerden çapı 200 mm olan daire üzerine yerleştirilmiştir. Taze haldeki karışımlar mikser içerisinde homojen bir şekilde alındıktan sonra, herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan huni içerisine doldurulmuştur. Taze beton ile huni tam olarak doldurulup üst kısmı düzeldikten sonra bu işlem toplam 30 saniye içerisinde tamamlanarak huni dik bir şekilde yukarı kaldırılmıştır. Şekil 3.8’ de görüldüğü üzere KYB karışımlarının yayılma tablası üzerinde yayılması sağlanmıştır. Abrams hunisinin kaldırılmasından itibaren taze betonun tabla üzerinde işaretlenen 500 mm çaplı daireye ulaştığı süre kronometre ile ölçmüştür ve süre  $t_{50}$  olarak kaydedilmiştir. Karışımın yayılma tablasına tamamen yayıldıktan sonra çökme-yayılma çapı ( $D_c$ ) birbirine dik iki boyutun ortalaması alınarak bulunmuştur (Şekil 3.9).



**Şekil 3.8 :** Çökme-yayılma deney düzeneği.



**Şekil 3.9 : Çökme-yayılma deneyi.**

#### **3.3.1.3. J-halkası ve J-halkalı çökme-yayılma deneyi**

Bu deney betonun donatılar arasından geçiş kabiliyetini ölçmek için uygulanmaktadır. J-halkalı çökme-yayılma deneyleri EFNARC (2002) kriterleri göz önüne alınarak yapılmıştır. J-halkalı çökme-yayılma deneylerinde de yine Abrams hunisi ve yayılma tablası kullanılmış olup Şekil 3.10’da da görüldüğü gibi bunlara ek olarak J-halkası kullanılmıştır. J-halkası yayılma tablası üzerinde bulunan dairelerden çapı 300 mm olan daire üzerine yerleştirilmiştir. J-halkasının üzerinde bulunan ayakların arasındaki mesafe KYB karışımları içerisinde kullanılan en uzun lif boyutu yani makro çelik lif boyutu dikkate alınarak ayarlanmıştır.



**Şekil 3.10 :** J-halkalı çökme-yayılma deney düzeneği.

Abrams hunisi J-halkasının içerisine yerleştirildikten sonra çökme-yayılma deneyindeki işlem adımları gerçekleştirilmiştir. KYB karışımının tabla üzerinde bulunan 500 mm çaplı daireye ulaştığı süre kronometre ile ölçmüştür ve süre  $t_{50j}$  olarak, yayılma çapı ise  $D_j$  olarak kaydedilmiştir. Ayrıca KYB yayıldıktan sonra J-halkasının iç kısmından ( $H_1$ ) ve dış kısmından ( $H_2$ ) 3'er noktada karışım yükseklikleri ölçülerek ortalamaları alınıp iç kısım ve dış kısım arasındaki yükseklik farkları  $\Delta H$  olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.11).



**Şekil 3.11 :** J-halkalı çökme-yayılma deneyi.

### 3.3.2. Sertleşmiş beton deneyleri

KLTKYB karışımlarının mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile uygulanan deneyler Çizelge 3.6’ te verilmiştir. KLTKYB karışımlarına ait numunelerin mekanik testleri, kür havuzu içerisinde çıkarıldıktan yaklaşık 3 saat sonra doygun yüzey kuru halinde iken gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.6 : Sertleşmiş beton deneyleri ve detayları.**

| Deney Yöntemi                        | Numune Boyutları (mm) | Test Yaşı (gün) | Numune Adedi (Her yaş için) |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|
| Basınç Dayanımı                      | 100x100x100 (küp)     | 90              | 2                           |
| Yarmada Çekme Dayanımı               | 100x200 (silindir)    | 90              | 2                           |
| Dört Noktalı Eğilmede Çekme Dayanımı | 100x100x400 (prizma)  | 90              | 2                           |
| Birim Ağırlık                        | 100x200 (silindir)    | 90              | 2                           |

#### 3.3.2.1. Yüksek sıcaklık deneyi

Yüksek sıcaklık, yangın direnci gibi farklı isimler ile adlandırılan bu deney farklı sıcaklıklara (oda sıcaklığı, 250 °C, 500 °C ve 750 °C) maruz bırakılan tek lifli, karma lifli ve lifsiz KYB’ nin altındaki mekanik özelliklerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Lifli ve lifsiz KYB numunelerinin yüksek sıcaklık altındaki mekanik özelliklerini inceleyebilmek için numunelerin oda sıcaklığındaki özellikleri ile yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki özellikleri kıyaslanmıştır. Numuneler yüksek sıcaklık deneyinde kullanılan fırın içine kromdan yapılmış bir kafes içerisinde yerleştirilmiştir (Şekil 3.12). Yüksek sıcaklık fırını içerisinde istenilen sıcaklığa ulaşıldıktan sonra, numuneler bu sıcaklıkta 2 saat bekletilmiştir ve süre sonunda fırının kapağı açılmadan sadece bacası açılıp soğutma işlemi yavaş bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3. 12 :** Yüksek sıcaklık deneyi düzeneği.

### **3.3.2.2. Basınç dayanımı deneyi**

Tez çalışması kapsamında, tüm karışımların 90 günlük basınç dayanımlarını tespit etmek amacı ile her bir karışım ve sıcaklık için ikişer adet olmak üzere toplam 80 adet 100x100x100 mm ölçülerinde küp numune üretilmiştir. Daha sonra numunelere yükleme hızı 6 kN/sn olacak biçimde ayarlanmış pres cihazı ile ASTM C39 (2018) standardına uygun olarak basınç testi uygulanmıştır. Oda sıcaklığına ve yüksek sıcaklıklara (250 °C, 500 °C, 750 °C) maruz bırakılmadan önce ve sonra basınç dayanımı testi uygulanan numunelerin ortalaması alınarak her bir karışıma ait basınç dayanımı değerleri tespit edilmiştir (Şekil 3.13.a, b).



a) Basınç dayanım testi düzeneği

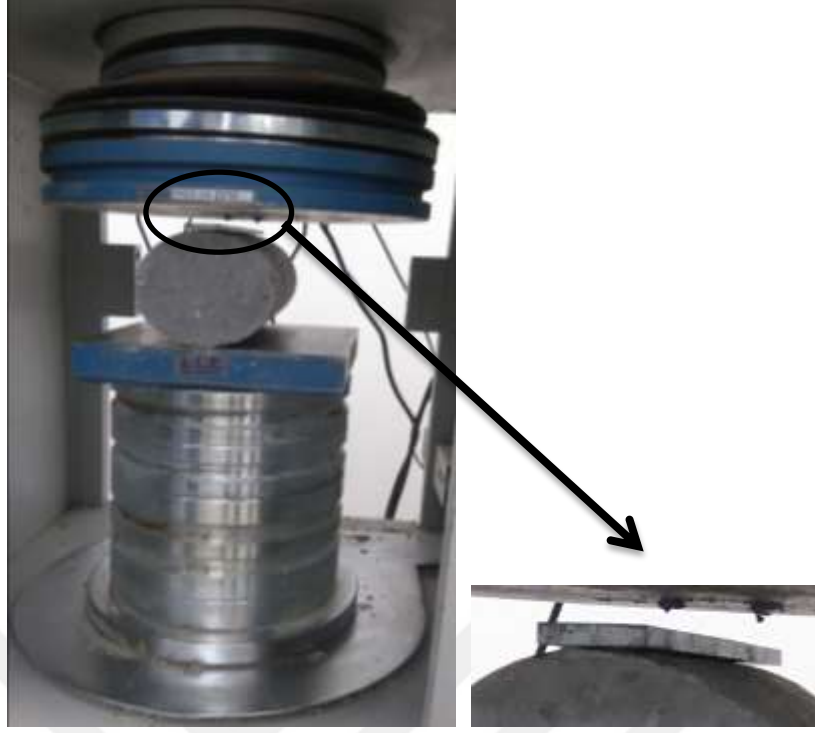


b) Basınç dayanım testi

**Şekil 3.13 : Basınç dayanım deneyi.**

### 3.3.2.3. Yarmada çekme dayanımı deneyi

Tez çalışması kapsamında, tüm karışımların 90 günlük yarmada çekme dayanımlarını tespit etmek amacı ile her bir karışım ve sıcaklık için ikişer adet olmak üzere toplam 80 adet 100x200 mm ölçülerinde silindir numune üretilmiştir. Numunelerin yarmada çekme dayanımlarının tespiti için, basınç dayanımı deneyinde kullanılan pres cihazı kullanılmıştır ve deneyde ASTM C496 / C496M-17 (2017) standardı esas alınmıştır. Ayrıca deney esnasında numune yükleme hızı 1.7 kN/sn olacak biçimde ayarlanmıştır. Çizgisel yükü numunelerin eksenini boyunca sağlamak amacıyla numunelerin alt ve üst bölümlerine aparat yerleştirilmiştir. Oda sıcaklığına ve yüksek sıcaklıklara (250 °C, 500 °C, 750 °C) maruz bırakılmadan önce ve sonra yarmada çekme dayanımı testi uygulanan numunelerin ortalaması alınarak her bir karışıma ait yarmada çekme dayanımı değerleri tespit edilmiştir (Şekil 3.14).



**Şekil 3.14 :** Yarmada çekme dayanımı deneyi.

#### **3.3.2.4. Eğilmede çekme dayanımı deneyi**

Dört noktalı eğilmede çekme dayanımı deneyinde Şekil 3.15’ te verilen deney ekipmanı kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında, tüm karışımların 90 günlük eğilme dayanımlarını tespit etmek amacı ile her bir karışım ve sıcaklık için ikişer adet olmak üzere toplam 80 adet 100x100x400 mm ölçülerinde prizma numune üretilmiştir. Dört noktalı eğilmede çekme deneyi 0.003 mm/sn yükleme hızıyla yapılmıştır. KYB karışımlarının testi ASTM C78-02 (2002)’ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İki mesnet arası açıklığa  $L$  denilirse, numune üzerindeki mesnet yerleri uygulanan yükler arası mesafenin  $L/3$ ’ ü olacak şekilde belirlenmiştir. Bundan dolayı mesnetler arası mesafe 300 mm olarak ayarlanmıştır. Numelerin orta noktasındaki sehimini tespit etmek amacı ile numunenin açıklık ortasına gelecek şekilde iki adet deplasman ölçer (LVDT) yerleştirilmiştir ve numunenin orta noktasındaki sehim 2.5 mm olana kadar numune yüklenmeye devam edilmiştir (Şekil 3.16). Deney sırasında elde edilen yük-sehim verileri cihazın bağlı olduğu bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan yük-sehim verileri daha sonrasında excell programı kullanılarak grafik haline dönüştürülmüştür. Elde edilen yük-sehim eğrilerinden numunelerin sehim-sertleşmesi davranışı veya sehim-yumuşaması davranışından hangisini sergilediklerine Şekil 3.17’ ye bakılarak karar verilmiştir.

Numuneler oda sıcaklığına ve yüksek sıcaklıklara (250 °C, 500 °C, 750 °C) maruz bırakılmadan önce ve sonra eğilme dayanımı testi uygulanan numunelerin ortalaması alınarak her bir karışıma ait eğilme dayanımı değerlerini tespit etmek için Denklem (3.3)' te verilen eşitlikten faydalanılmıştır.

$$\sigma_e = M.c/I = F.L/(b.h^2) \quad (3.3)$$

Burada;

$\sigma_e$ : Eğilme dayanımı (MPa)

M: Açıklık ortası momenti (N.mm)

c: Tarafsız eksen derinliği (mm)

I: Atalet momenti (mm<sup>4</sup>)

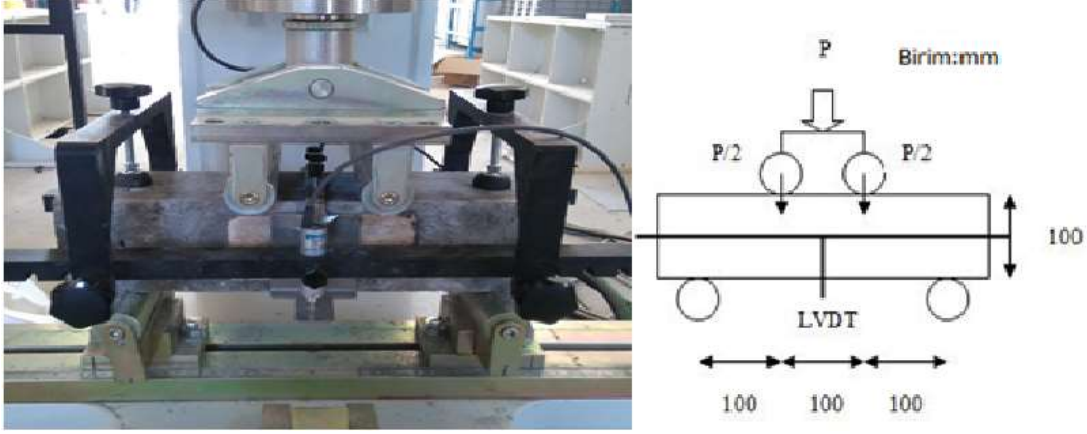
F: Maksimum yük (N)

L: İki mesnet arasındaki açıklık (mm)

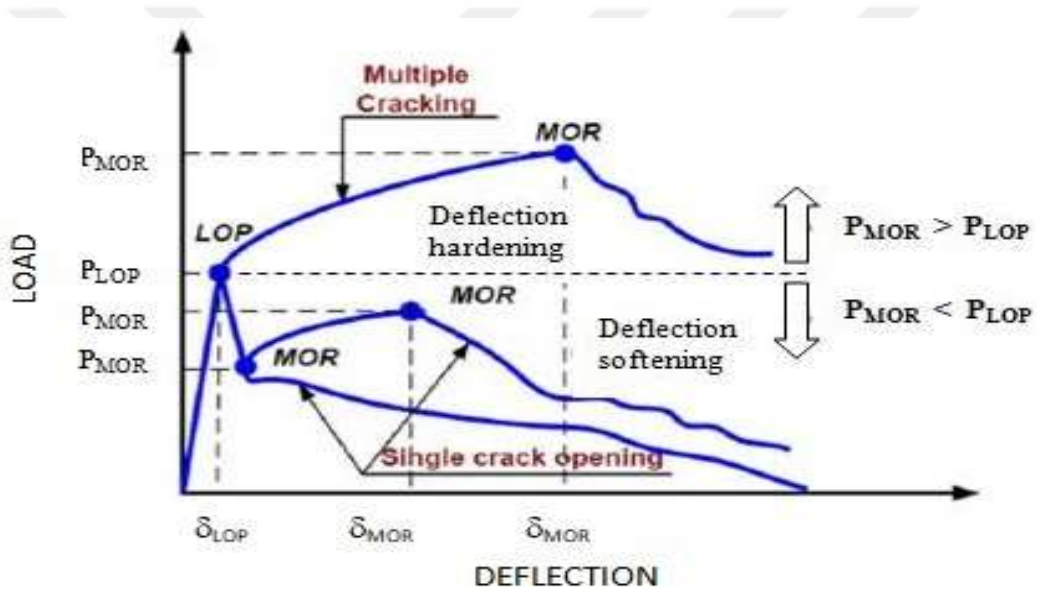
b,h: Numunenin en kesit boyutları (mm)



**Şekil 3.15 :** Dört noktalı eğilmede çekme dayanımı deney ekipmanı.



Şekil 3.16 : Dört noktalı eğilmede çekmede dayanımı deneyi.



Şekil 3.17 : Yük-sehim eğrisi (Kim vd., 2008).

### 3.3.2.5. Ultrases geçiş hızı (USGH) deneyi

Ultrases geçiş hızı (USGH) deneyinde Pundit cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.18.a). USGH deneyi, sertleşmiş lifli ve lifsiz tüm KYB numunelerine basınç deneylerinden önce uygulanmıştır (Şekil 3.18.b). Deney 90 gün kür süresine sahip 100x100x100 mm küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler kürden çıkarıldıktan yaklaşık 3 saat sonra doygun yüzey kuru halde iken düz bir zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemi döküm yönüne dik karşılıklı iki yüzeyde yapılmıştır. USGH ölçümü esnasında deneyin yapılacağı yüzeylerin orta noktası tespit edildikten sonra cihaza ait problemlerin yüzeyine özel bir jel sürülmüştür. Oda sıcaklığına ve yüksek sıcaklıklara (250 °C, 500 °C, 750 °C) maruz

bırakılmadan önce ve sonra USGH testi uygulanan numunelerin ortalaması alınarak her bir karışıma ait USGH değerleri tespit edilmiştir. Çizelge 3.7’ de verilen değerler doğrultusunda betonun kalitesi hakkında yorumlar yapılmıştır.



a) USGH cihazı



b) USGH deneyinin uygulanması

**Şekil 3.18 :** Ultrases geçirgenlik hızı (USGH) deneyi.

**Çizelge 3.7 :** USGH değerine göre beton sınıfları (Şimşek, 2007).

| USGH (km/sn) | Beton Kalitesi |
|--------------|----------------|
| >4.5         | Mükemmel       |
| 3.5-4.5      | İyi            |
| 3.0-3.5      | Şüpheli        |
| 2.0-3.0      | Zayıf          |
| <2.0         | Çok Zayıf      |

### **3.3.2.6. Birim ağırlık tayini deneyi (BA)**

Tüm KYB karışımlarının birim ağırlıkları tayini deneyinde 100x200 mm ölçülerindeki silindir numuneler kullanılmıştır. Birim ağırlık tayini deneyinde, numuneler tüm sıcaklıklar için öncelikle doymuş yüzey kuru haldeyken belirlenmiştir. Yani, oda sıcaklığına ve yüksek sıcaklıklara (250 °C, 500 °C, 750 °C) maruz bırakılmadan önce ve sonra birim ağırlık testi uygulanan numunelerin ortalaması alınarak her bir karışıma ait birim ağırlık değerleri tespit edilmiştir.



## 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında tasarlanan lifsiz, tek lifli, ikili ve üçlü lif kombinasyonlarına sahip KYB karışımlarının belirlenmesi için EFNARC (2005)' te belirtilen çökme-yayılma işlenebilirlik testi esas alınarak karışımlar elde edilmiştir. Elde edilen karışımlara yine EFNARC (2005)' te belirtilen işlenebilirlik testleri (çökme-yayılma, J-halkası, J-halkalı çökme-yayılma, TBHA) her bir karışım için uygulanmıştır. Daha sonra elde edilen karışımlardan alınan numuneler 90 gün kür edilmiştir. Kür edilen numunelere ise, sertleşmiş beton deneyleri (yüksek sıcaklık, basınç dayanımı, yarmada çekme, dört noktalı eğilmede çekme dayanımı, USGH, birim ağırlık) uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen bulgular bu bölümde verilecektir.

### 4.1. Taze Beton Özellikleri

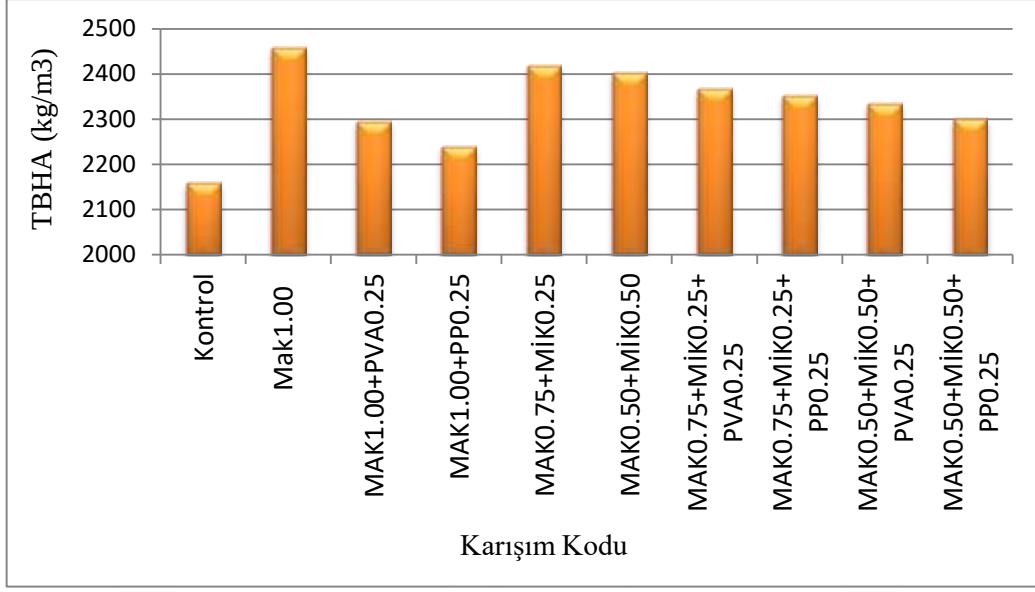
Taze beton özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1' de verilmiştir.

#### 4.1.1. Taze beton birim hacim ağırlığı (TBHA)

Tüm karışımlara ait TBHA değerleri Çizelge 4.1' de verilmiştir. Şekil 4.1' den de görüldüğü üzere, tüm karışımlar arasında lif takviyeli karışımlara kıyasla en düşük TBHA değeri lifsiz kontrol karışımında elde edilirken, en yüksek TBHA değeri sadece makro lif içeren tek lif takviyeli karışımında elde edilmiştir. Bunun nedeni, özgül ağırlıkları fazla olan çelik liflerin karışım içinde agregalar ile hacimce yer değişmesinden ve kullanım oranının en fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü çelik liflerin özgül ağırlıkları (makro lif  $7.8 \text{ g/cm}^3$ , mikro çelik lif  $7.2 \text{ g/cm}^3$ ), agregaların özgül ağırlıklarından (ince agrega  $2.5 \text{ g/cm}^3$ , kaba agrega  $2.6 \text{ g/cm}^3$ ) daha fazladır. Benzer sonuçlar aynı zamanda Kına (2019) tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir.

**Çizelge 4.1 : Taze beton deney sonuçları.**

| Karışım No | Karışım Kodu            | TBHA<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Çökme-Yayılma       |                      | J-Halkası, J-Halkalı Çökme-Yayılma |                       |         | HA |
|------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------|---------|----|
|            |                         |                              | D <sub>Ç</sub> (mm) | t <sub>50</sub> (sn) | D <sub>J</sub> (mm)                | t <sub>50J</sub> (sn) | ΔH (mm) |    |
| 1          | Kontrol                 | 2159                         | 770                 | 4                    | 780                                | 4                     | 0.3     | 15 |
| 2          | MAK1.00                 | 2458                         | 750                 | 5                    | 730                                | 6                     | 4       | 16 |
| 3          | MAK1.00+PVA0.25         | 2296                         | 710                 | 7                    | 685                                | 10                    | 7       | 20 |
| 4          | MAK1.00+PP0.25          | 2239                         | 718                 | 6                    | 690                                | 8                     | 6.5     | 18 |
| 5          | MAK0.75+MİK0.25         | 2419                         | 742                 | 5                    | 724                                | 7                     | 3.5     | 19 |
| 6          | MAK0.50+MİK0.50         | 2404                         | 735                 | 6                    | 735                                | 8                     | 2.3     | 19 |
| 7          | MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25 | 2368                         | 723                 | 6                    | 698                                | 9                     | 5       | 22 |
| 8          | MAK0.75+MİK0.25+PP0.25  | 2353                         | 730                 | 5                    | 700                                | 8                     | 4.7     | 22 |
| 9          | MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25 | 2334                         | 707                 | 7                    | 703                                | 10                    | 5.6     | 18 |
| 10         | MAK0.50+MİK0.50+PP0.25  | 2301                         | 714                 | 6                    | 710                                | 9                     | 5.3     | 18 |



Şekil 4.1 : Karışımlara ait TBHA değerleri.

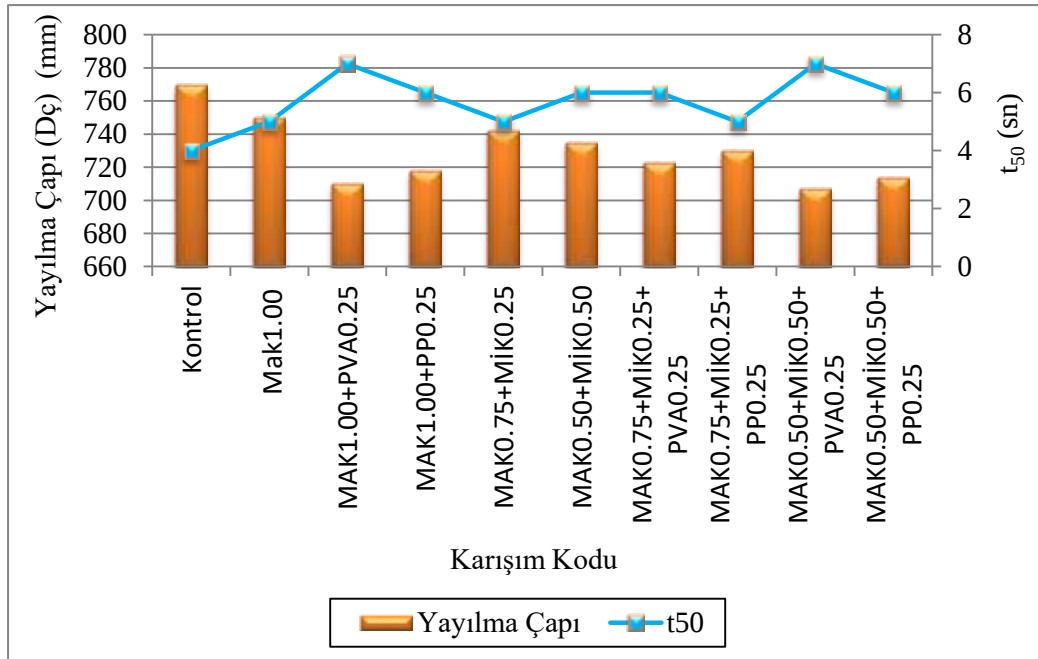
#### 4.1.2. Çökme-yayılma deneyi yayılma çapı ( $D_ç$ ) ve yayılma süresi ( $t_{50}$ )

Çökme-yayılma deneyinin yapılış aşamaları hakkında detaylı bilgi bir önceki bölümde verilmiştir. Çökme-yayılma deneyi betonun doldurma yeteneğini ölçmek amacıyla yapılmaktadır. Deneyden elde edilen lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait yayılma çapı ( $D_ç$ ) ve yayılma süreleri ( $t_{50}$ ) Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2’ de verilmiştir. Şekil 4.2’ de de görüldüğü gibi, hem lifsiz KYB hem de lifli KYB karışımlarının EFNARC (2002)’ de sınıflandırılan (SF1, SF2, SF3) çökme-yayılma çapı kriterlerini sağladığı gözlemlenmiş olup bu çalışmadaki lifli karışımların tümü SF2 sınıfına girmektedir. Fakat yayılma süreleri incelendiğinde, EFNARC (2002)’ de önerilen yayılma süresi (2-5 sn) kriterlerine bütün karışımların uymadığı görülmüştür. Fakat EFNARC (2002) işlenebilirlik kriterlerinin lif içermeyen KYB karışımları için olduğu unutulmamalıdır.  $t_{50}$  yayılma süresi arttıkça, karışımların viskozitesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Tüm karışımlar arasında en yüksek çökme-yayılma değeri 770 mm ile lifsiz kontrol KYB karışımında, en düşük yayılma çapı ise 707 mm ile üçlü lif kombinasyonuna sahip MAK0.50+MIK0.50+PVA0.25 karışımında elde edilmiştir. Çünkü karışıma lif takviyesi çökme yayılma çapını düşürmüştür ve yayılma süresini uzatmıştır. Pereira de Oliveira vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada da, çelik liflerin beton içerisinde oranı arttıkça yayılma çapının azaldığı tespit edilmiştir. Buna ilaveten, lifsiz kontrol karışımından sonra en yüksek yayılma çapı 750 mm ile tek lifli KYB karışımından elde edilmiştir.

Karışımların lif kombinasyonları dikkate alındığında, lifsiz karışımlara kıyasla çökme-yayılma değerlerindeki en fazla azalma üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımlarda görülmüşken, en yüksek çökme-yayılma değerleri ise tek lifli karışımlarda gözlemlenmiştir (Şekil 4.2). Dolayısıyla, ikili ve üçlü lif kombinasyonuna sahip mikro lif içeren karışımlarda, hem mikro çelik liflerin hem de mikro sentetik liflerin karışımların işlenebilirlik özellikleri üzerinde negatif etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi, aynı zamanda ikili ve üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımlardaki PVA' nın narinliğinin yüksek olmasına ve hidrofilik yapısına (Yang ve Li; 2006) da dayandırılabilir.

Lif takviyesi aynı zamanda karışıma ilave edilecek olan akışkanlaştırıcı miktarında artışa da neden olmuştur. Ayrıca bu tez kapsamında, kullanılan OL 6/16 çelik mikro lif, PVA ve PP sentetik mikro lifler içerisinde lifsiz karışıma göre yayılma çapını ve yayılma süresini olumsuz yönde en fazla etkileyen mikro lifin sentetik lifler olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, Mazheripour vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada da PP lifinin betona takviye edilmesiyle yayılma çapında düşüş olduğu bulunmuştur. Bu durum, özgül yüzey alanı ve narinliği fazla, özgül ağırlığı düşük olan mikro liflerin karışım içerisine daha fazla hacimde katılmasına dayandırılabilir (Öztekin, 2019; Öztekin vd., 2018).



**Şekil 4.2 :** Karışımlara ait yayılma çapı ve yayılma süresi değerleri.

Lifli ve lifsiz karışımların ASTM C1611 (2018)'e göre kararlılığını değerlendirmek için Visual Stability Index (VSI) değerleri esas alınarak Şekil 4.3' te verilen görseller incelendiğinde, lifsiz kontrol karışımının, tek lifli karışımın ve ikili lif kombinasyonuna sahip karışımlardan makro çelik lif ile mikro çelik lif içeren karışımların VSI değeri 0 olduğu tespit edilmiştir. Geriye kalan ikili (makro çelik lif ile sentetik lif içeren karışımlar) ve üçlü lif kombinasyonuna sahip KYB karışımlarına ait VSI değerlerinin 2 olduğu görülmüştür (Şekil 4.3, Şekil4.4, Şekil 4.5, Şekil4.6). VSI değerinin 2 çıkmasında, karışım içerisine sentetik liflerin katılmasının bazı noktalarda az da olsa yığılma oluşturması etkili olmuştur. Dolayısıyla tüm karışımların genelde kabul edilebilir bir stabiliteye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



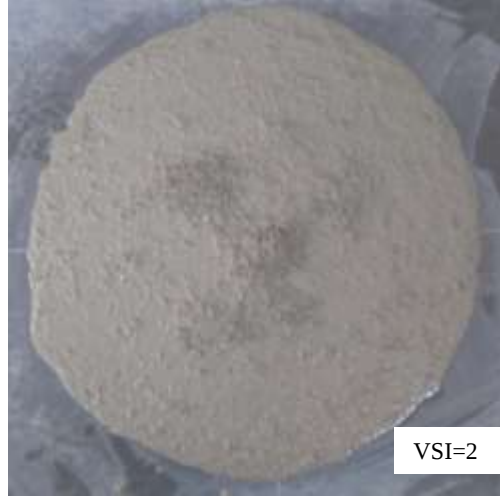
**Şekil 4.3 :** Lifsiz kontrol karışımına ait çökme-yayılma çapı görsellerine göre VSI değerlendirmesi.



**Şekil 4.4 :** Mak1.00 karışımına ait çökme-yayılma çapı görsellerine göre VSI değerlendirmesi.



(a) MAK1.00+PVA0.25



(b) MAK1.00+PP0.25



(c) MAK0.75+MİK0.25



(d) MAK0.50+MİK0.50

**Şekil 4.5 :** İkili lif kombinasyonuna sahip karışımlara ait çökme-yayılma çapı görsellerine göre VSI değerlendirmesi.



(a) MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25



(b) MAK0.75+MİK0.25+PP0.25



(c) MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25



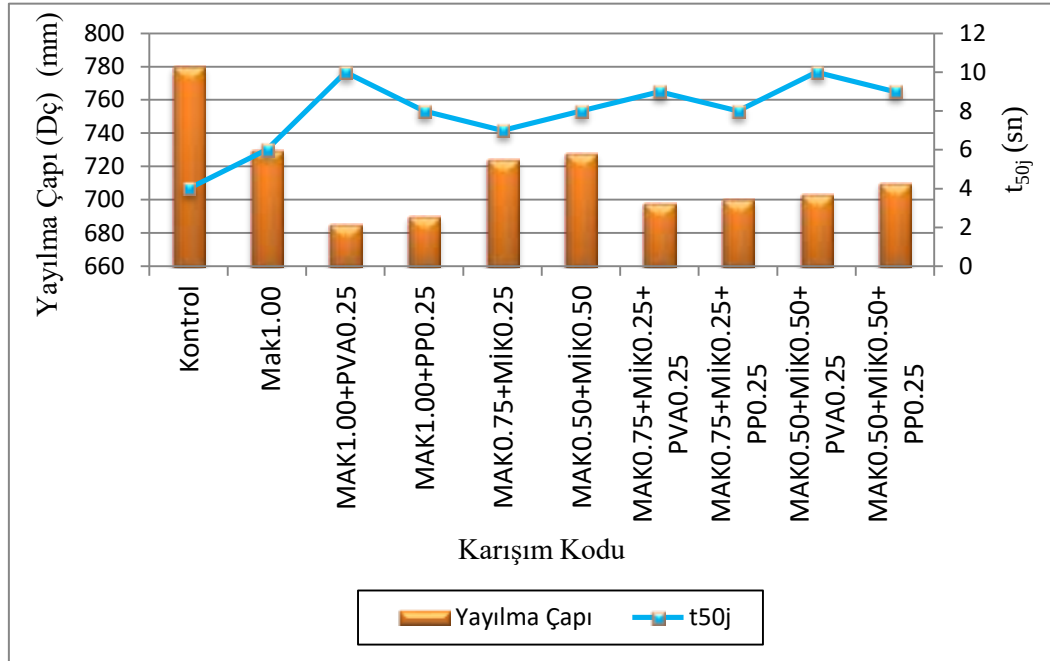
(d) MAK0.50+MİK0.50+PP0.25

**Şekil 4.6 :** Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımlara ait çökme-yayılma çapı görsellerine göre VSI değerlendirmesi.

#### 4.1.3. J-halkalı çökme-yayılma deneyi yayılma çapı ( $D_J$ ), yayılma Süresi ( $t_{50J}$ ) ve yükseklik farkı ( $\Delta H$ )

J-halkalı çökme-yayılma deneyi betonun engeller arasından geçiş kabiliyetini ölçmek amacıyla yapılmaktadır. Bu deneyde dikkat edilmesi gereken nokta, halkanın levha üzerinde yer alan 30 cm çaplı daire üzerine yerleştirilmesidir. Taze betonun 50 cm çaplı daire gelinceye kadar geçen süre, taze betonun engellerin varlığında yayılmasını nasıl etkilediğini belirlemede kullanılır. Ayrıca bu tez kapsamında üretilen betonlar lif takviyeli beton karışımı içerdiğinden dolayı deneyde kullanılan halka üzerindeki ayaklar arası mesafe iki katına çıkartılmıştır. Çünkü EFNARC (2002) lifsiz betonlar için işlenebilirlik

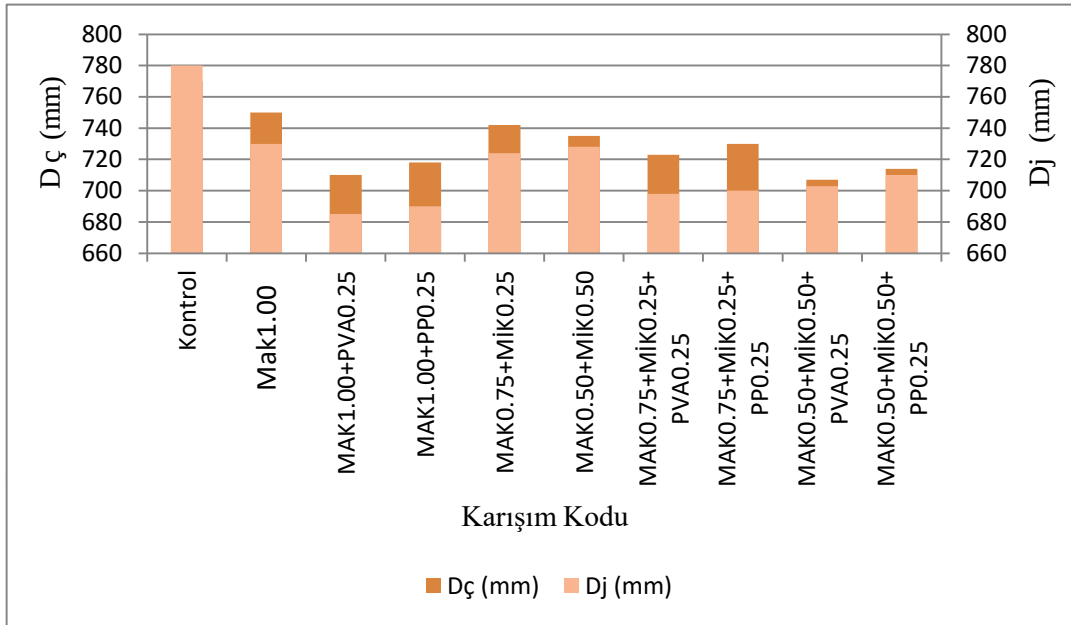
testlerini içermektedir. Deneyden elde edilen lifli ve lifsiz KYB karışımlarına ait J-halkalı yayılma çapı ( $D_j$ ) ve yayılma süreleri ( $t_{50j}$ ) Çizelge 4.1 ve Şekil 4.7’ de verilmiştir.



**Şekil 4.7 :** Karışımlara ait J-halkalı çökme-yayılma çapı ve yayılma süresi değerleri.

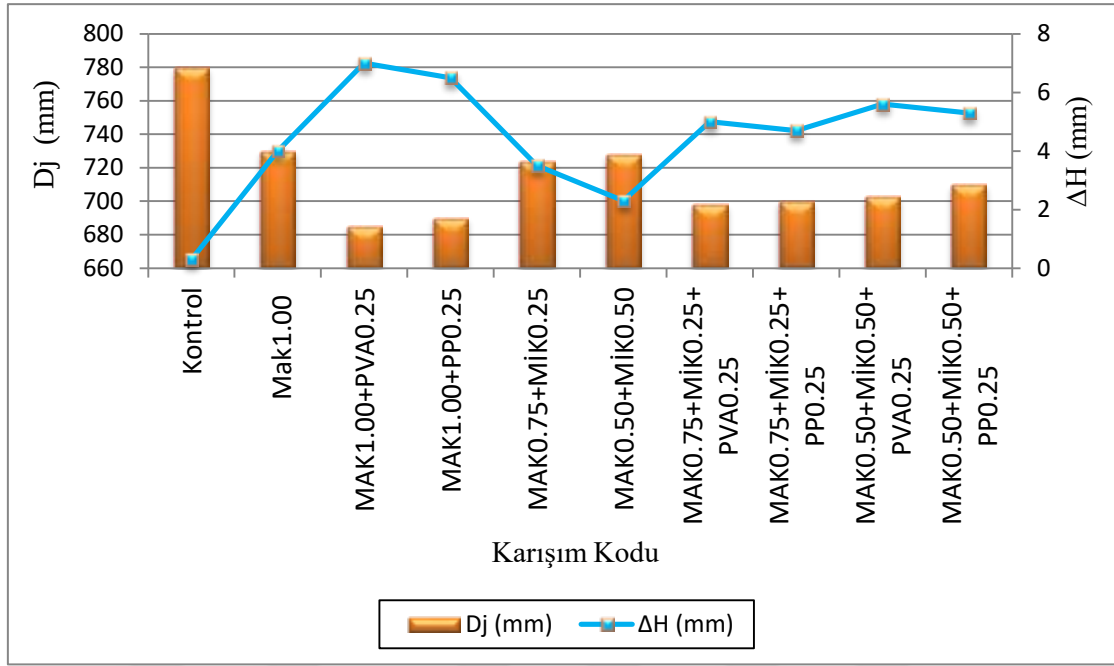
Tüm karışımlar arasında en yüksek J-halkalı çökme-yayılma çapı 780 mm ile lifsiz kontrol KYB karışımında, en düşük yayılma çapı ise 685 mm ile ikili lif kombinasyonuna sahip MAK1.00+PVA0.25 karışımında elde edilmiştir. Karışımların lif kombinasyonları dikkate alındığında, lifsiz karışıma kıyasla, en düşük J-halkalı çökme-yayılma çapı değerlerinin 685 mm ve 690 mm ile, sırasıyla, ikili lif kombinasyonuna sahip %1 makro çelik lif ile PVA içeren MAK1.00+PVA0.25 ve PP lif içeren MAK1.00+PP0.25 karışımlarda elde edilirken, en yüksek J-halkalı çökme-yayılma çapı değerinin ise, 728 mm ile MAK0.50+MIK0.50 karışımında olduğu gözlemlenmiştir. Karışıma makro çelik lif, mikro çelik lif ve sentetik mikro liflerin katılması J-halkalı çökme-yayılma değerlerini azalttığı ve yayılma süresini arttırdığı tespit edilmiştir. Özellikle karışıma sentetik liflerin eklenmesinin de J-halkası değerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar, Öz (2014) tarafından yapılan çalışmada da bulunmuştur. Karışımlara ait yayılma çapı değerlerinde azalmalar meydana gelmesine rağmen, yayılma çapı değerleri EFNARC (2002) kriterlerini sağlamaktadır. Şekil 4.8’ de de görüldüğü üzere, J-halkalı çökme yayılma değerleri ve yayılma süreleri üzerinde liflerin narinliklerinin ve tiplerinin etkisinin, J-halkasız standart

çökme-yayılma deneyinde elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Benzer bulgular, Kına (2019) tarafından yapılan çalışmada da bulunmuştur.



**Şekil 4.8 :** Karışımların  $D_{\check{c}}$  ve  $D_j$  değerlerinin karşılaştırılması.

Karışımların yayılma çaplarında meydana gelen azalmaların nedeni, karışımın içiğinde yer alan agrega ve liflerin halka üzerinde yer alan engellere takılması şeklinde açıklanabilir. Beton karışımında yer alan bu katı malzemelerin engeller arasından geçememesi halkanın iç ve dış kısmında yükseklik farkının ( $\Delta H$ ) oluşmasına neden olmaktadır. J-halkalı çökme-yayılma deneyi ve J-halkası değerleri ( $\Delta H$ ) Şekil 4.9’ da verilmiştir. Karışıma çelik ve sentetik liflerin katılması J-halkası değerlerinde artış meydana getirmektedir. Aynı çelik lif hacmine sahip karışımlarda makro çelik lifin artmasının J-halkası değerinde artışa, mikro çelik liflerin artmasının J-halkası değerinde düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13).



Şekil 4.9 : Karışımların J-halkalı çökme yayılma deneyi  $D_j$  ve  $\Delta H$  sonuçları.



Şekil 4.10 : Lifsiz kontrol karışımına ait J-halkalı çökme-yayılma çapı görselleri.



**Şekil 4.11 :** Mak1.00 karışımına ait J-halkalı çökme-yayılma çapı görselleri.



(a) MAK1.00+PVA0.25



(b) MAK1.00+PP0.25



(c) MAK0.75+MİK0.25



(d) MAK0.50+MİK0.50

**Şekil 4.12 :** İkili lif kombinasyonuna sahip karışımlara ait J-halkalı çökme-yayılma çapı görselleri.



(a) MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25



(b) MAK0.75+MİK0.25+PP0.25



(c) MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25



(d) MAK0.50+MİK0.50+PP0.25

**Şekil 4.13 :** Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımlara ait J-halkalı çökme-yayıma çapı görselleri.

#### 4.2. Yüksek Sıcaklık Altında Sertleşmiş Beton Özelliklerine Ait Bulgular

Tez çalışması kapsamında tasarlanan lifsiz ve lifli KYB karışımlarına ait numuneler, oda, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarında bekletildikten sonra mekanik özelliklerinin belirlenmesi için birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı testleri yapılmış olup, ortalama sonuçlar Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’ te verilmiştir.

**Çizelge 4.2 : Oda sıcaklığında bekletilmiş numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.**

| Karışım No | Karışım Kodu            | İstatistiksel Değerler     | Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | USGH (m/sn)   | Basınç Dayanımı (MPa) | Yarmada Çekme Dayanımı (MPa) | Eğilme Dayanımı (MPa) | Sehim (mm) |
|------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------|
| 1          | Kontrol                 | Ortalama<br>Standart sapma | 2246<br>1.30                       | 4830<br>12.73 | 85.1<br>1.98          | 3.2<br>0.07                  | 8.3<br>0.28           | 0.04       |
| 2          | MAK1.00                 | Ortalama<br>Standart sapma | 2320<br>7.10                       | 4854<br>5.66  | 100.4<br>5.52         | 8.4<br>0.57                  | 12.5<br>0.13          | 0.84       |
| 3          | MAK1.00+PVA0.25         | Ortalama<br>Standart sapma | 2271<br>9.49                       | 4901<br>14.14 | 92.4<br>3.39          | 8.9<br>0.42                  | 20.9<br>1.24          | 0.93       |
| 4          | MAK1.00+PP0.25          | Ortalama<br>Standart sapma | 2253<br>2.25                       | 4854<br>4.24  | 87.9<br>3.11          | 8.8<br>0.42                  | 17.6<br>0.11          | 1.28       |
| 5          | MAK0.75+MIK0.25         | Ortalama<br>Standart sapma | 2313<br>12.64                      | 4926<br>12.73 | 101.0<br>2.83         | 8.6<br>0.28                  | 12.4<br>0.10          | 0.71       |
| 6          | MAK0.50+MIK0.50         | Ortalama<br>Standart sapma | 2310<br>3.08                       | 4854<br>4.24  | 103.6<br>1.63         | 8.2<br>0.14                  | 12.1<br>0.17          | 0.93       |
| 7          | MAK0.75+MIK0.25+PVA0.25 | Ortalama<br>Standart sapma | 2309<br>7.04                       | 4854<br>5.66  | 94.9<br>5.30          | 10.2<br>1.06                 | 16.4<br>0.13          | 0.96       |
| 8          | MAK0.75+MIK0.25+PP0.25  | Ortalama<br>Standart sapma | 2288<br>3.44                       | 4901<br>14.14 | 93.1<br>0.42          | 10.0<br>0.57                 | 15.7<br>0.07          | 1.05       |
| 9          | MAK0.50+MIK0.50+PVA0.25 | Ortalama<br>Standart sapma | 2278<br>2.89                       | 4945<br>7.07  | 99.6<br>0.28          | 9.7<br>0.42                  | 15.7<br>0.10          | 1.01       |
| 10         | MAK0.50+MIK0.50+PP0.25  | Ortalama<br>Standart sapma | 2264<br>0.72                       | 4834<br>5.66  | 97.9<br>0.64          | 9.5<br>0.85                  | 14.1<br>0.17          | 1.43       |

**Çizelge 4.3 : 250 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.**

| Karışım No | Karışım Kodu            | İstatistiksel Değerler     | Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | USGH (m/sn)   | Basınç Dayanımı (MPa) | Yarmada Çekme Dayanımı (MPa) | Eğilme Dayanımı (MPa) | Sehim (mm) |
|------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------|
| 1          | Kontrol                 | Ortalama<br>Standart sapma | 2196<br>9.90                       | 4756<br>7.07  | 61.1<br>4.53          | 2.9<br>0.14                  | 8.3<br>0.17           | 0.03       |
| 2          | MAK1.00                 | Ortalama<br>Standart sapma | 2318<br>11.31                      | 4845<br>9.90  | 97.3<br>3.75          | 7.6<br>0.21                  | 9.4<br>0.10           | 0.20       |
| 3          | MAK1.00+PVA0.25         | Ortalama<br>Standart sapma | 2214<br>8.49                       | 4657<br>8.49  | 86.5<br>0.78          | 7.8<br>1.70                  | 15.7<br>0.07          | 1.02       |
| 4          | MAK1.00+PP0.25          | Ortalama<br>Standart sapma | 2208<br>4.24                       | 4637<br>11.31 | 85.5<br>0.85          | 7.7<br>0.14                  | 12.2<br>0.07          | 1.22       |
| 5          | MAK0.75+MIK0.25         | Ortalama<br>Standart sapma | 2293<br>8.49                       | 4901<br>14.14 | 98.4<br>1.84          | 7.7<br>0.21                  | 8.9<br>0.08           | 1.12       |
| 6          | MAK0.50+MIK0.50         | Ortalama<br>Standart sapma | 2277<br>2.83                       | 4845<br>12.73 | 101.0<br>0.57         | 7.1<br>0.42                  | 8.8<br>0.11           | 1.20       |
| 7          | MAK0.75+MIK0.25+PVA0.25 | Ortalama<br>Standart sapma | 2271<br>4.24                       | 4801<br>8.49  | 93.2<br>0.64          | 8.0<br>0.78                  | 11.4<br>0.13          | 1.94       |
| 8          | MAK0.75+MIK0.25+PP0.25  | Ortalama<br>Standart sapma | 2268<br>7.07                       | 4761<br>9.90  | 91.3<br>0.40          | 7.9<br>0.42                  | 10.3<br>0.10          | 1.01       |
| 9          | MAK0.50+MIK0.50+PVA0.25 | Ortalama<br>Standart sapma | 2262<br>1.41                       | 4878<br>18.38 | 97.5<br>0.85          | 6.5<br>0.57                  | 9.6<br>0.14           | 0.19       |
| 10         | MAK0.50+MIK0.50+PP0.25  | Ortalama<br>Standart sapma | 2234<br>7.07                       | 4801<br>8.49  | 96.1<br>4.24          | 6.15<br>0.64                 | 9.3<br>0.10           | 0.17       |

**Çizelge 4.4 : 500 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.**

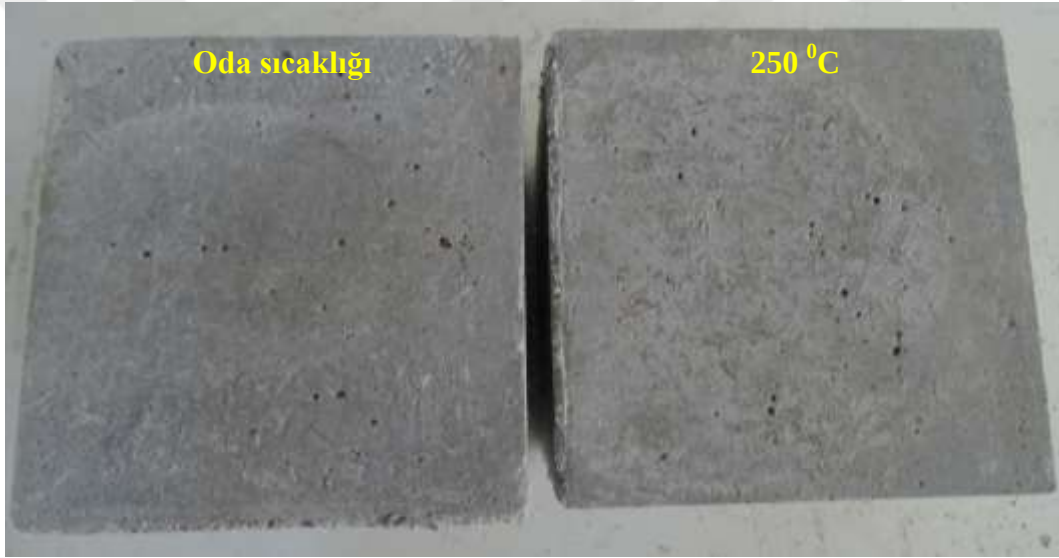
| Karışım No | Karışım Kodu            | İstatistiksel Değerler            | Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | USGH (m/sn)   | Basınç Dayanımı (MPa) | Yarmada Çekme Dayanımı (MPa) | Eğilme Dayanımı (MPa) | Sehim (mm) |
|------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------|
| 1          | Kontrol                 | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2087<br>5.66                       | 1915<br>11.31 | 60.9<br>0.35          | 1.8<br>0.07                  | 3.2<br>0.10           | 0.14       |
| 2          | MAK1.00                 | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2170<br>18.38                      | 2437<br>14.14 | 79.1<br>4.81          | 5.7<br>0.78                  | 6.1<br>0.18           | 0.82       |
| 3          | MAK1.00+PVA0.25         | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2123<br>24.04                      | 3081<br>7.07  | 64.1<br>0.71          | 6.2<br>1.20                  | 8.5<br>0.11           | 0.98       |
| 4          | MAK1.00+PP0.25          | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2118<br>22.63                      | 2770<br>8.49  | 63.6<br>2.33          | 5.9<br>0.28                  | 8.3<br>0.18           | 0.65       |
| 5          | MAK0.75+MİK0.25         | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2163<br>5.66                       | 3064<br>15.56 | 79.3<br>1.84          | 5.8<br>0.07                  | 5.4<br>0.11           | 1.29       |
| 6          | MAK0.50+MİK0.50         | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2150<br>1.41                       | 2117<br>12.73 | 83.6<br>0.35          | 5.3<br>0.35                  | 5.4<br>0.11           | 1.29       |
| 7          | MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25 | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2143<br>8.49                       | 1415<br>8.49  | 68.9<br>2.12          | 6.3<br>1.06                  | 8.3<br>0.14           | 1.10       |
| 8          | MAK0.75+MİK0.25+PP0.25  | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2138<br>9.90                       | 2795<br>8.49  | 67.8<br>0.21          | 6.2<br>0.99                  | 7.0<br>0.23           | 1.24       |
| 9          | MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25 | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2126<br>4.24                       | 2763<br>12.73 | 71.6<br>1.06          | 5.1<br>0.35                  | 6.5<br>0.13           | 0.84       |
| 10         | MAK0.50+MİK0.50+PP0.25  | Ortalama<br><i>Standart sapma</i> | 2126<br>5.66                       | 2642<br>4.24  | 71.3<br>1.77          | 4.8<br>0.71                  | 6.4<br>0.14           | 0.63       |

**Çizelge 4.5 : 750 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.**

| Karışım No | Karışım Kodu            | İstatistiksel Değerler     | Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | USGH (m/sn)   | Basınç Dayanımı (MPa) | Yarmada Çekme Dayanımı (MPa) | Eğilme Dayanımı (MPa) | Sehim (mm) |
|------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------|
| 1          | Kontrol                 | Ortalama<br>Standart sapma | 1957<br>1.41                       | 1393<br>11.31 | 19.4<br>0.71          | 1.6<br>0.57                  | 1.6<br>0.13           | 0.16       |
| 2          | MAK1.00                 | Ortalama<br>Standart sapma | 2111<br>4.24                       | 1552<br>9.90  | 34.3<br>0.42          | 2.6<br>0.07                  | 3.2<br>0.16           | 0.16       |
| 3          | MAK1.00+PVA0.25         | Ortalama<br>Standart sapma | 2029<br>9.90                       | 2283<br>14.14 | 25.7<br>2.97          | 3.0<br>0.49                  | 5.5<br>0.20           | 1.48       |
| 4          | MAK1.00+PP0.25          | Ortalama<br>Standart sapma | 2025<br>5.66                       | 2236<br>1.41  | 23.8<br>2.62          | 2.9<br>0.21                  | 5.1<br>0.25           | 2.33       |
| 5          | MAK0.75+MIK0.25         | Ortalama<br>Standart sapma | 2107<br>15.56                      | 2485<br>5.66  | 34.8<br>0.14          | 2.8<br>0.42                  | 2.5<br>0.96           | 0.38       |
| 6          | MAK0.50+MIK0.50         | Ortalama<br>Standart sapma | 2099<br>9.90                       | 2492<br>5.66  | 36.6<br>1.20          | 2.5<br>0.21                  | 2.0<br>0.62           | 0.17       |
| 7          | MAK0.75+MIK0.25+PVA0.25 | Ortalama<br>Standart sapma | 2094<br>4.24                       | 2431<br>14.14 | 30.7<br>3.32          | 3.2<br>0.21                  | 4.6<br>0.88           | 1.67       |
| 8          | MAK0.75+MIK0.25+PP0.25  | Ortalama<br>Standart sapma | 2090<br>4.24                       | 2371<br>4.24  | 27.2<br>0.64          | 3.1<br>0.14                  | 3.8<br>1.03           | 0.81       |
| 9          | MAK0.50+MIK0.50+PVA0.25 | Ortalama<br>Standart sapma | 2052<br>8.49                       | 2397<br>1.41  | 32.9<br>0.28          | 2.3<br>0.28                  | 3.5<br>0.64           | 0.56       |
| 10         | MAK0.50+MIK0.50+PP0.25  | Ortalama<br>Standart sapma | 2050<br>2.83                       | 2069<br>9.90  | 31.7<br>2.47          | 2.2<br>0.28                  | 3.3<br>0.51           | 0.16       |

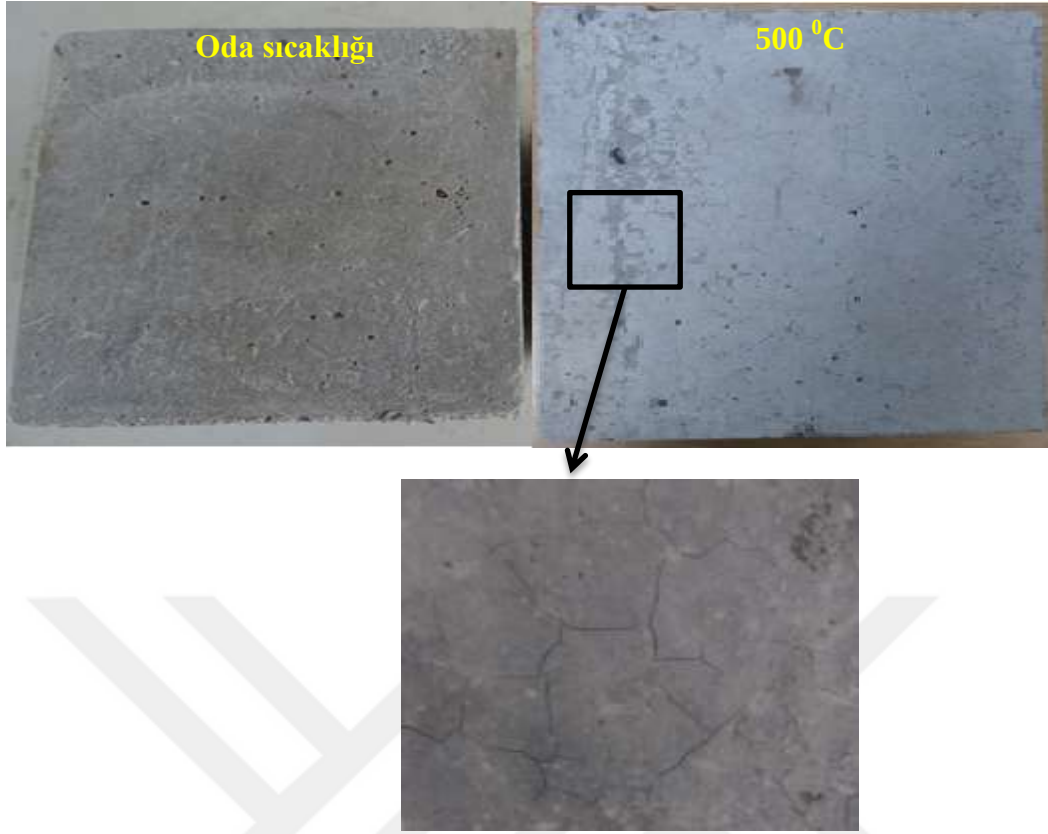
Tez kapsamında hazırlanan lifsiz, tek lifli, ikili ve üçlü lif kombinasyonuna sahip KYB numuneleri 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonra mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Uygulanan yüksek sıcaklardan sonra lifsiz ve lifli karışımların hepsinde fiziksel olarak bazı değişimler gözlemlenmiştir. Sıcaklığın derecesine göre betonların yüzeyinde çatlaklar, dökülmeler ve renk değişimi gibi değişiklikler meydana gelmiştir.

Şekil 4.14’ te görüldüğü üzere, 250 °C’ ye maruz bırakılan beton yüzeyinde renk değişimi, çatlak veya kabarıp dökülmeler meydana gelmemiştir. Literatürde bulunan çalışmalarda da 300 °C’ den itibaren betonun etkilendiği, bu sıcaklığa kadar betonun yangına dayandığı tespit edilmiştir (Uysal, 2004).



**Şekil 4.14 :** Numunelerin 250 °C öncesi ve sonrası fiziksel görünümü.

500 °C sıcaklık uygulandıktan sonra Şekil 4.15’ ten de görüleceği gibi betonun yüzeyinde çatlaklar meydana gelmiştir. Aynı zamanda beton renk değişimine uğrayarak oda sıcaklığındaki betona göre beyaza dönük bir gri renk almıştır.



**Şekil 4.15 :** Numunelerin 500 °C öncesi ve sonrası fiziksel görünümü

750 °C' ye maruz bırakılan numunelerde ise, Şekil 4.16' dan da görüleceği üzere, çatlaklar çoğalmıştır ve aynı zamanda betonun yüzeyinde kahverengiye dönük olan önemli renk değişimleri olmuş, bazı yerlerde siyaha yakın renkler de oluşmuştur. Bunun yanında, Şekil 4.16' te görüldüğü gibi, numunelerde kabarıp dökülmeler meydana gelmiştir. Kabarıp dökülmeler genellikle sentetik lif içeren karışımlarda gözlemlenmemiştir. Benzer bulgular, Liu ve Tan (2017) tarafından da bulunmuş olup, yaptıkları çalışmalarında PVA ve çelik lifin kullanılmasının parçalanmalara karşı direnç sağladığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 4.16 : Numunelerin 750 °C öncesi ve sonrası fiziksel görünümü

#### 4.2.1. Birim ağırlık (BA)

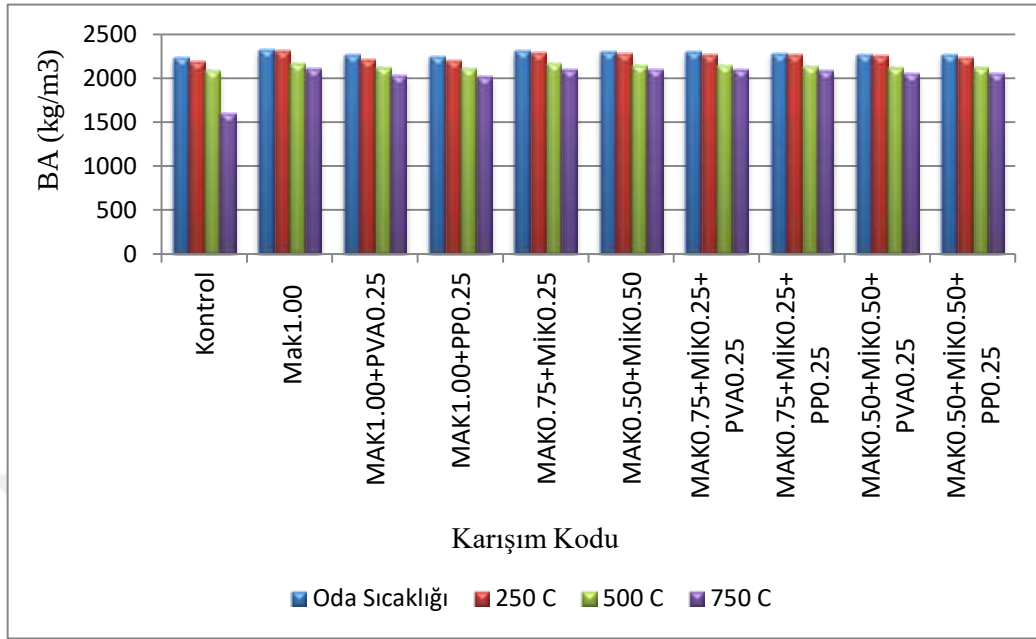
Lifsiz, tekli, ikili ve üçlü lif içeren KYB karışımlardan üretilen numuneler 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce ve sonra elde edilen birim ağırlık değerleri 90 günlük yarmada çekme dayanımı deneyinde kullanılan silindir numunelerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Tüm karışımlara ait birim ağırlık değerleri maruz kaldıkları sıcaklıklara göre oda sıcaklığı, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklık değerleri için sırasıyla, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Şekil 4.17' de verilmiştir.

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.17' den de görüldüğü gibi, 250 °C sıcaklığa maruz bırakılmış tüm karışımlar arasında en düşük birim ağırlığa lifsiz kontrol karışımı, en yüksek birim ağırlık değerine tek lifli karışım sahiptir. 250 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin birim ağırlık değerleri, oda sıcaklığındaki bekletilen kontrol karışımların birim ağırlık değerleri ile karşılaştırıldığında, ortalama %1.24 oranında çok az bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni, betonun bünyesindeki kapiler boşluklarda yer alan suyun sıcaklıktan dolayı kaybolması şeklinde açıklanabilir. Karışımların birim ağırlık değerleri incelendiğinde, içerdikleri lif miktarı ve kombinasyonu bakımından oda sıcaklığındaki birim ağırlık değerleri ile paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.17' den de görüldüğü gibi, 500 °C sıcaklığa maruz bırakılmış tüm karışımlar arasında 250 °C'ye maruz bırakılan numunelerde olduğu gibi, en düşük birim ağırlığa lifsiz kontrol karışımı, en yüksek birim ağırlık değerine sadece çelik makro lif içeren MAK1.00 karışımı sahiptir. Bu değerler oda sıcaklığındaki birim ağırlık değerleri ile karşılaştırıldığında ortalama %6.52 oranında azalmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, betonun bünyesinde yer alan kapiler boşluklardaki, agregaların boşluk yapısındaki ve jel boşluklarındaki suyun sıcaklıktan dolayı kaybolması şeklinde açıklanabilir.

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.17' den de görüldüğü gibi, 750 °C sıcaklığa maruz bırakılmış tüm karışımlar arasında 250 °C ve 500 °C'ye maruz bırakılan numunelerde olduğu gibi, en düşük birim ağırlığa lifsiz kontrol karışımı, en yüksek birim ağırlık değerine sadece çelik makro lif içeren MAK1.00 karışımı sahiptir. Bu değerler oda sıcaklığındaki birim ağırlık değerleri ile karşılaştırıldığında ortalama %9.44 oranında azalmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, betonun bünyesinde yer alan kapiler boşluklardaki, agregaların boşluk yapısındaki ve jel boşluklarındaki suyun sıcaklıktan dolayı fazla

miktarda kaybolmasının yanında Şekil 4.16'dan da görüldüğü üzere, numunelerde oluşan kabarmalar sonucunda beton yüzeyinde meydana gelen dökülmelerle açıklanabilir.



**Şekil 4.17 :** Numunelere ait birim ağırlık değerleri.

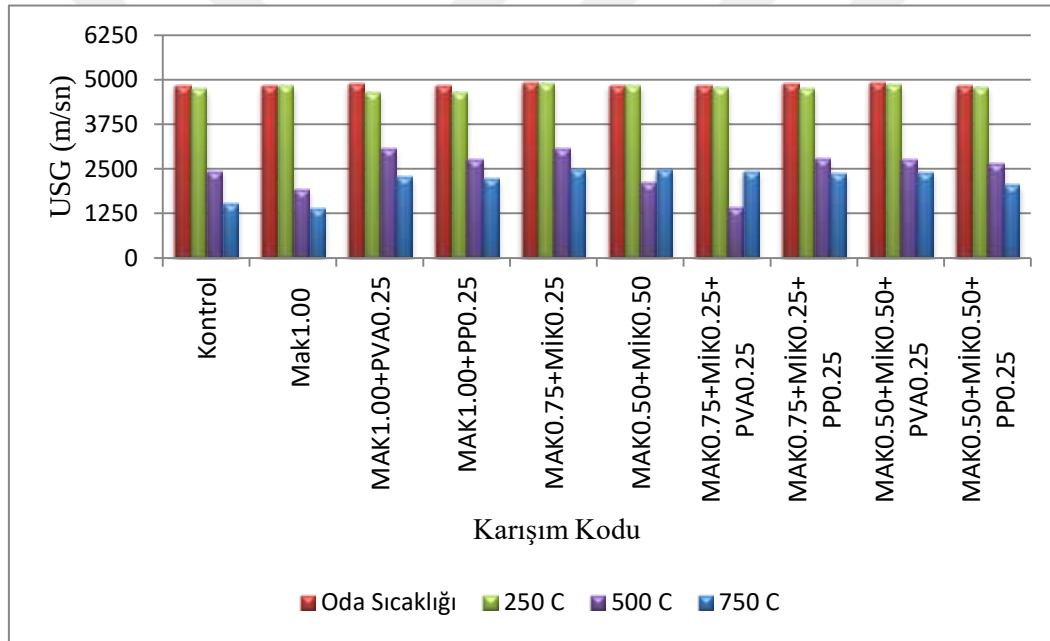
Sonuç olarak, tüm bulgular göz önüne alındığında, Şekil 4.17' den de görüldüğü gibi, sıcaklığın artmasıyla beraber yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı betonda meydana gelen ağırlık kayıpları da artmıştır. Ancak, Öz (2014) tarafından yapılan çalışmada da elde edildiği gibi, en az kayıp sentetik lif içeren karışımlarda gözlemlenmiştir. Bu durum, PP gibi sentetik liflerin yüksek sıcaklıkta erimesiyle beton içinde yeni genleşme kanalları oluşturup diğer iç kanallarla birleşmesi (Pliya vd., 2011) ve bu şekilde su buharı basıncını azaltarak betonun daha fazla parçalanma durumunu azaltması şeklinde açıklanabilir (Uyan vd., 2003; Uğur, 2007).

#### 4.2.2. Ultrases geçiş hızı (USGH)

Lifsiz, tekli, ikili ve üçlü lif içeren KYB karışımlardan üretilen 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılmış numunelere ait 90 günlük USGH değerleri oda sıcaklığı, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklık değerleri için sırasıyla, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Şekil 4.18' de verilmiştir. USGH değerleri, basınç deneyi uygulanacak numunelere basınç deneyinden önce uygulanıp, numunelerin ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıyla USGH değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalmanın

nedeni olarak, sıcaklıkla beraber betonun yapısında boşluk miktarının da artması gösterilebilir. Çünkü betonda boşluk az ise USGH değeri yüksek, boşluk fazla ise USGH değeri düşük çıkmaktadır.

Şekil 4.48 görüldüğü gibi, 250 °C sıcaklığa maruz kalan betonların USGH değerlerinde düşme meydana gelmesine rağmen, yine de bu betonların çok kaliteli beton sınıfına (USGH>4500 m/sn ise çok kaliteli beton, USGH <3500 m/sn ise kalitesiz beton (Şimşek, 2007)) girdiği söylenebilir. 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarda betonun yapısında oluşan boşlukların artması USGH değerlerinde belirgin düşüşlere neden olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.18 incelendiğinde, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklardaki betonların artık çok kaliteli beton sınıfından kalitesiz beton sınıfına geçtiği görülmektedir.



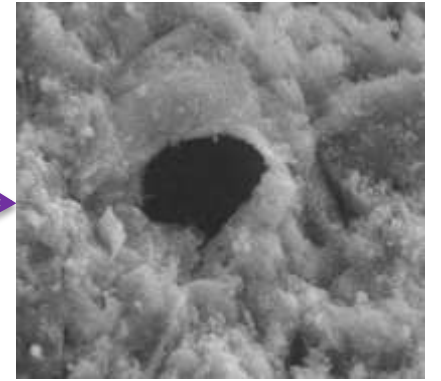
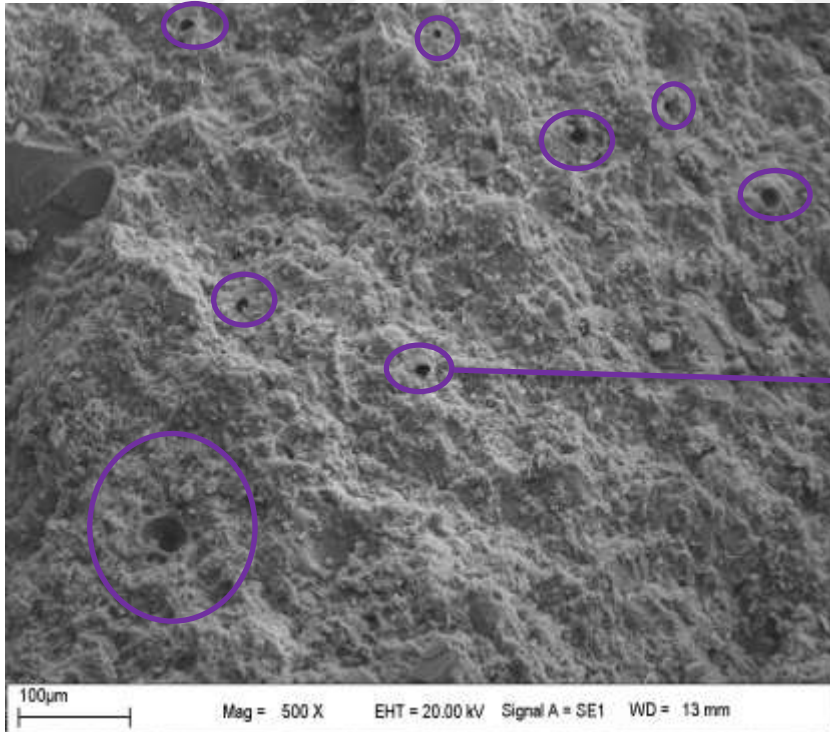
**Şekil 4.18 :** Oda sıcaklığı, 250 °C , 500 °C ve 750 °C sıcaklıklar için numunelere ait USGH değerleri.

Sonuç olarak, Şekil 4.18'e bakıldığında sıcaklığın artmasıyla beraber USGH değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Oda sıcaklığına kıyasla, lif takviyeli numunelerin USGH değerlerindeki azalmalar, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklar için sırasıyla, ortalama %1.81, %48.68 ve %54.13 oranlarında gerçekleşmiştir. Bu azalmalara karışım içinde bulunan sentetik liflerin erimesi (Şekil 4.19 a,b) ve betonun bünyesinde bulunan boşluklardaki suyun buharlaşmasıyla oluşan boşluklu yapı ile yüksek sıcaklıkta betonun iç yapısında bulunan hidratasyon ürünlerinin bozulması

(Şekil 4.21) neden olmaktadır. Yani, USGH' deki bu azalma, betonun yüksek sıcaklığa maruz kaldığında mikro yapısının bozulmasına ve sertleşen beton içindeki C-S-H jelinin bozulmasına bağlı olabilir (Mahapatra ve Barai, 2019). Eidan vd. (2019) PP lifi kullanarak yaptıkları çalışmada da benzer bulgular elde etmişlerdir.



(a) Fotoğraf görüntüsü



(b) SEM görüntüsü

**Şekil 4.19 :** Yüksek sıcaklık etkisiyle eriyen sentetik liflerin bıraktığı boşluklar.

#### 4.2.3. Basınç dayanımı

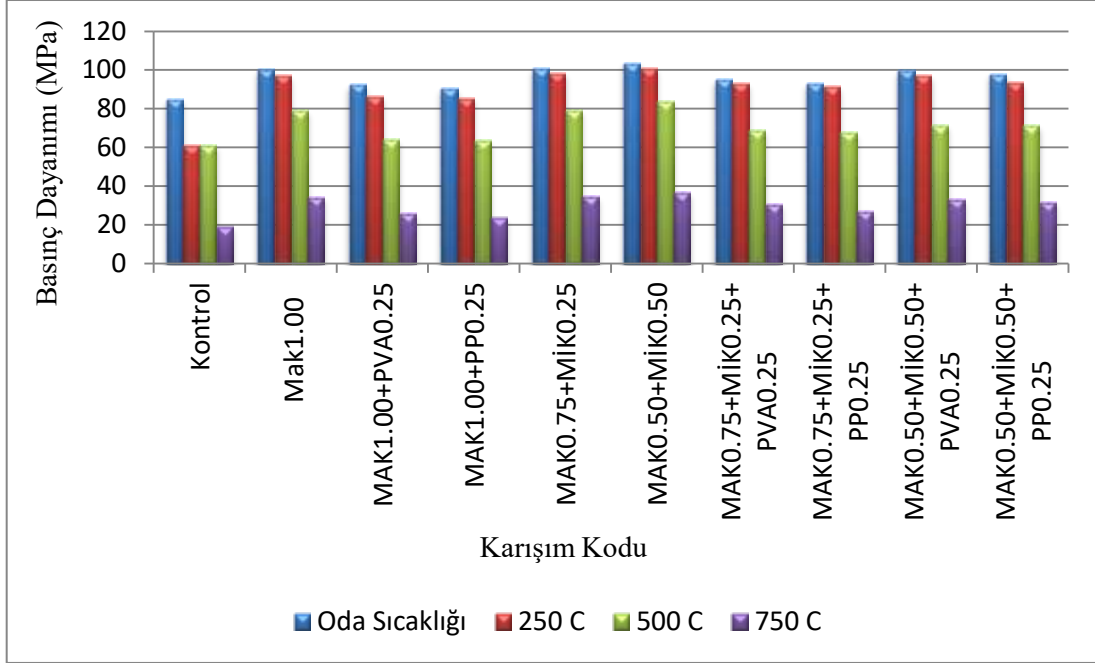
Lifsiz, tekli, ikili ve üçlü lif içeren KYB karışımlardan üretilen numuneler 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce ve sonra elde edilen 90 günlük basınç dayanımı değerleri oda sıcaklığı, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklık değerleri için sırasıyla, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Şekil 4.20’ de verilmiştir. Lifsiz ve lifli KYB karışımlarının tek eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen bulgulara genel olarak bakıldığında, numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklar için en düşük basınç dayanımı değeri lifsiz kontrol karışımından elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı değerine ise MAK0.50+MİK0.50 karışımının sahip olduğu belirlenmiştir.

İkili lif kombinasyonuna sahip karışımlar kendi arasında kıyaslandığında, en yüksek basınç dayanımı MAK0.50+MİK0.50 karışımında, en düşük basınç dayanımı MAK1.00+PP0.25 karışımında olmuştur.

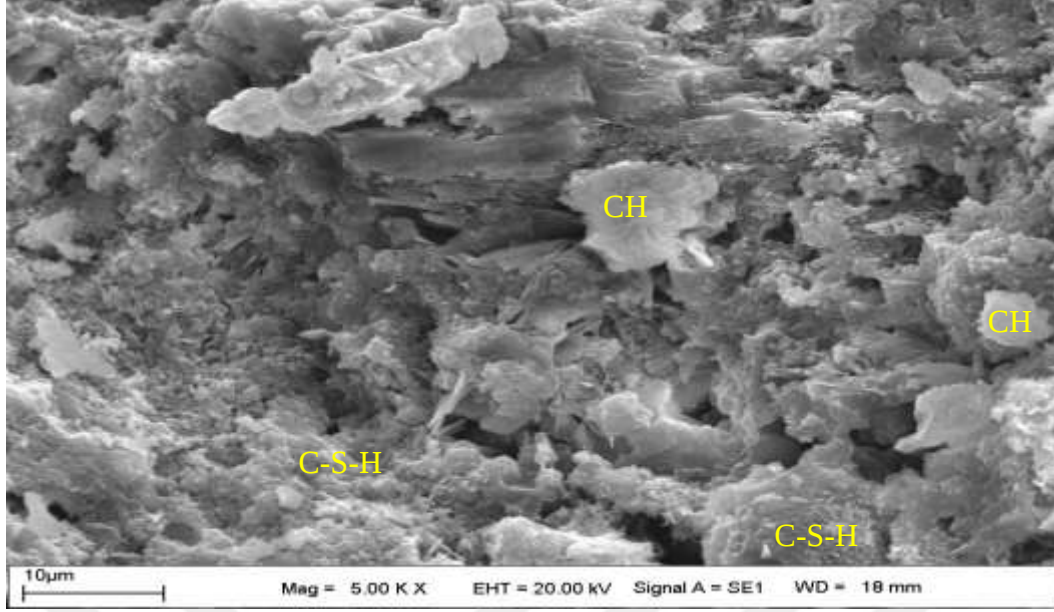
Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımlar kendi arasında kıyaslandığında ise, en yüksek basınç dayanımı MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25 karışımında, en düşük basınç dayanımı MAK0.75+MİK0.25+PP0.25 karışımında elde edilmiştir.

Oda sıcaklığında bekletilen numunelerde olduğu gibi, 250, 500 ve 750 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde de lifsiz kontrol karışımına ve tek lifli karışımlara kıyasla, mikro çelik lifin basınç dayanımının gelişimi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmektedir, sentetik liflerin basınç dayanımını azalttığı bulunmuştur. Sentetik liflerin yüksek sıcaklık altındaki basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise PP lifinin PVA lifine göre basınç dayanımı üzerinde daha fazla olumsuz etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, PP lifinin PVA lifine göre özgül ağırlığının düşük olmasından dolayı, karışım içinde hacimce daha fazla miktarda yer almasına dayandırılabilir. Numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklarda PVA ve PP lifleri eridiğinden, iç yapıdaki boşluklar ve böylece betondaki boşluk miktarının artacağı açıktır. Sonuç olarak, artan boşluk miktarı ile birlikte yüksek sıcaklığa maruz bırakılan tüm numunelerin gözenekliliğinin artmasıyla mikro yapıda meydana gelen bozulmalardan dolayı basınç dayanımlarının düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, mikro çatlakları köprülemede görev alan mikro çelik lif ile PVA ve PP gibi sentetik mikro lifler dikkate alındığında, sentetik lifler eridiği için çatlakları köprüleme görevini yerine getirememektedirler (Şekil 4.19 a,b). Bazı araştırmacılar (Khaliq ve Kodur, 2011; Eidan vd., 2019; Deshpande vd., 2019) tarafından yapılan ve PVA ile PP sentetik liflerinin kullanıldığı çalışmalardan da benzer bulgular

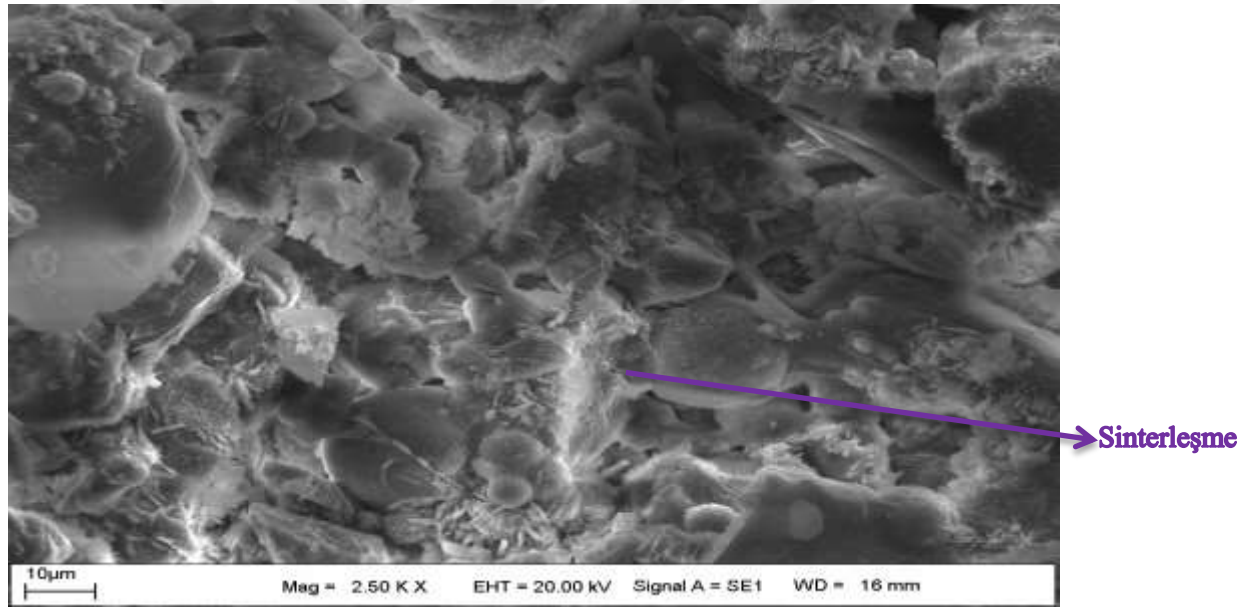
bulunmuştur. Aynı zamanda, sıcaklığın artmasıyla beraber betonun yapısındaki C-S-H jellerinde de bozulmalar meydana gelmekte (Şekil 4.21) ve dolayısıyla basınç dayanımında düşmeler oluşmaktadır (Liang vd., 2018). Şekil 4.21 b' de görüldüğü gibi, hidratasyon ürünleri yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra sinterleşmiştir.



Şekil 4.20 : Numunelere ait basınç dayanımı değerleri.



(a) Oda sıcaklığındaki hidratasyon ürünlerinin SEM görüntüsü



(b) Yüksek sıcaklık sonrasında bozulan hidratasyon ürünlerinin SEM görüntüsü

**Şekil 4.21 : SEM görüntüsü**

Sonuç olarak, tüm bulgular göz önünde bulundurulduğunda, Şekil 4.20' den de görüldüğü üzere, sıcaklığın atmasıyla beraber basınç dayanımları azalmaktadır. Oda sıcaklığına kıyasla, lif takviyeli numunelerin basınç dayanımlarındaki azalmalar, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklar için sırasıyla, ortalama %3.13, %25.86 ve %68.37 oranlarında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, tüm sıcaklık etkileri kendi içerisinde

değerlendirildiğinde, tüm lif takviyeli betonların basınç dayanımları, lifsiz kontrol betonunun basınç dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, Şekil 4.22’de görüldüğü gibi, 500 °C ve 750 °C gibi daha yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerde basınç dayanımı testi sonrası numunelerde parçalanma ve dağılmalar görülürken, oda ve 250 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerde basınç dayanımı testi sonrası çok hasar oluşmadığı görülmektedir.



Şekil 4.22 : Numunelere ait basınç dayanımı sonrası görüntüler.

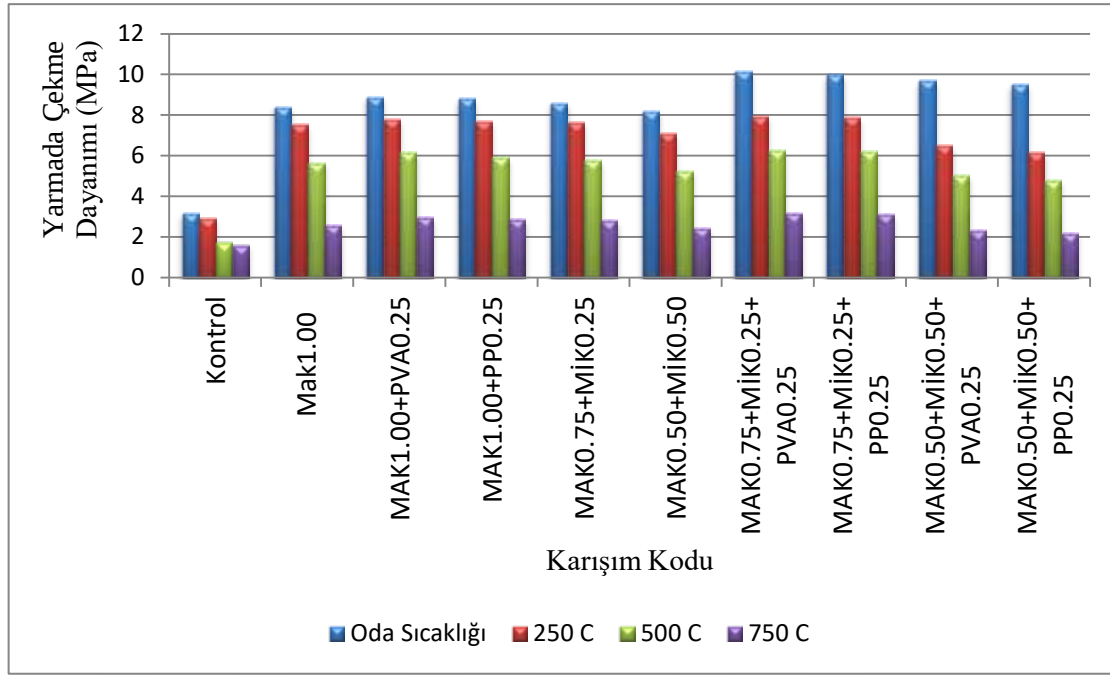
#### 4.2.4. Yarmada çekme dayanımı

Lifsiz, tekli, ikili ve üçlü lif içeren KYB karışımlardan üretilen numuneler 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce ve sonra elde edilen 90 günlük basınç dayanımı değerleri oda sıcaklığı, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklık değerleri için sırasıyla, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Şekil 4.23’ te verilmiştir. Lifli ve lifsiz KYB karışımları incelendiğinde, numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklar için en düşük yarmada çekme dayanımı değerine lifsiz kontrol karışımı, en yüksek yarmada çekme dayanımı değerine ise MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25 karışımı sahiptir. Bunun yanında, üçlü lif kombinasyonuna sahip MAK0.75+MİK0.25+PP0.25 karışımının yarmada çekme dayanımı değerleri ile MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25

karişımının yarmada çekme dayanımı değerleri arasındaki fark %0.88 oranı ile oldukça dūřtıktır. Lifsiz kontrol karişımına kıyasla, karişıma lif takviyesi yarmada çekme dayanımlarında artışa neden olduğu görülmektedir (Farhad ve Nejadi, 2013). Bu durum, sinerji olarak da adlandırılan, ikili ve daha fazla lif kombinasyonuna sahip kompozitlerde liflerin birbiriyle etkileşim halinde olmasının sonucunda tek lifin göstereceği performanstan daha fazlasını karma lifin göstermesiyle açıklanabilir. Çünkü mikro lifler mikro çatlakları kpryelip onların genişleyerek daha büyük çatlaklara dönüşmesini geciktirerek çekme dayanımının artmasına sebep olmuşlardır.

İkili lif kombinasyonuna sahip karişımlar tüm sıcaklıklar için kendi aralarında kıyaslandığında, en yüksek yarmada çekme dayanımı değeri MAK1.00+PVA0.25 karişımında, en düşük yarmada çekme dayanımı değeri ise MAK0.50+MİK0.50 karişımında elde edilmiştir. Bu durum, betonun içindeki çatlak genişliğinin iki ucunu kprlemede daha etkili olan kancalı uçlu ve uzun makro liflerin karişım içerisinde hacimce azalmasına dayandırılabilir (şahmaran ve Yaman, 2007).

l lif kombinasyonuna sahip karişımlar kendi arasında kıyaslandığında ise, yine tüm sıcaklıklar için en yüksek yarmada çekme dayanımı MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25 karişımında, en düşük yarmada çekme dayanımı MAK0.50+MİK0.50+PP0.25 karişımında elde edilmiş olup PVA' nın çekme dayanımının PP' ye göre daha yüksek olmasına rağmen PVA veya PP içeren karişımların çekme dayanımları arasında ortalama 0.15 MPa gibi küçük bir dayanım farkı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, PP lifinin PVA lifine göre özgül ağırlığının düşük olmasından dolayı karişıma hacimce daha fazla miktarda dahil edilmesine ve PP lifinin işlenebilirlik açısından karişım içerisinde topaklanmadan daha üniform dağılım göstermesine dayandırılabilir. Aynı zamanda, yarmada çekme dayanımındaki artış karma lif kullanılan karişımlarda liflerin beraber çalışarak bir sinerji oluşturmalarına ve bunun yanında özgül ağırlıkları elik liflere kıyasla oldukça düşük olan sentetik liflerin karişıma eklenmesine bağlı olarak lif hacminin artmasına dayandırılabilir. Bozkurt (2009) ve Kına (2019) tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 4.23 :** Numunelere ait yarmada çekme dayanımı değerleri.

Sonuç olarak, Şekil 4.23 'ten de görüldüğü üzere sıcaklığın artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanımı düşmüştür. Oda sıcaklığına kıyasla, lif takviyeli numunelerin yarmada çekme dayanımlarındaki azalmalar, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklar için sırasıyla, ortalama %18.93, %37.73 ve %70.31 oranlarında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, tüm sıcaklık etkileri kendi içerisinde değerlendirildiğinde, tüm lif takviyeli betonların yarmada çekme dayanımları, lifsiz kontrol betonunun yarmada çekme dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, sıcaklığın artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanımı değerlerinde en fazla düşüş sentetik lif içeren karışımlarda meydana gelmiştir. Bu durum sentetik liflerin sıcaklığın etkisiyle eriyerek (PVA'nın ergime noktası 240 °C, PP' nin ergime noktası 160 °C) köprüleme görevini yerine getirememesiyle açıklanabilir. Bozkurt (2009)' da yaptığı çalışmada yüksek sıcaklık sonrasında yarmada çekme dayanımında en fazla kaybın sentetik lif içeren betonda olduğunu tespit etmiştir. Bunlara ilaveten, 500 °C ve 750 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde matrisin yapısının (hidratasyon ürünlerinin) bozulmasıyla birlikte çelik lif ile matris arasındaki aderans azaldığından veya tamamen oratadan kalktığından liflerin çatlak köprüleme görevini yerine getirmesinin mümkün olamayacağı açıktır.

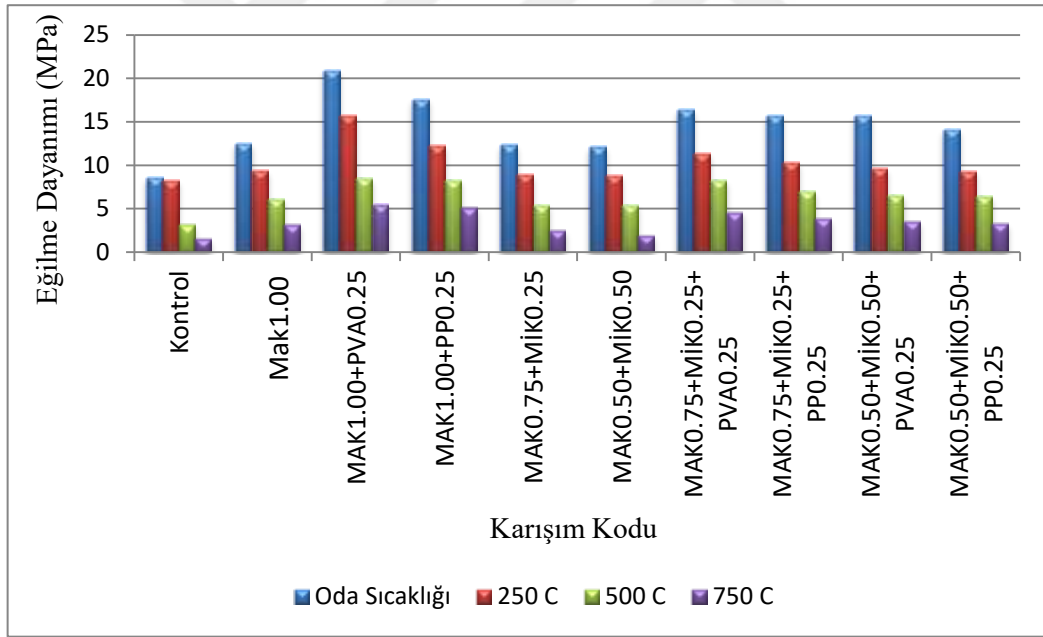
#### 4.2.5. Eğilmede çekme dayanımı

Lifsiz, tekli, ikili ve üçlü lif içeren KYB karışımlardan üretilen numuneler 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce ve sonra eğilmede çekme dayanımları hesaplanırken orta açıklık deplasmanı 2.5 mm' ye kadar çizilen yük-sehim eğrilerinden elde edilen maksimum yük kullanılarak Denklem (3.3) yardımıyla hesaplanmıştır. Karışımlardan üretilen 100x100x400 mm<sup>3</sup> prizma numunelerin sehim kontrollü dört noktalı eğilme testi sonucu elde edilen 90 günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri oda sıcaklığı, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklık değerleri için sırasıyla, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Şekil 4.24' te verilmiştir. Lifli ve lifsiz KYB karışımları incelendiğinde, numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklar için en düşük eğilmede çekme dayanımı değerine lifsiz kontrol karışımı, en yüksek eğilmede çekme dayanımı değerine ise MAK1.00+PVA0.25 karışımının sahip olduğu görülmüştür. Lifsiz kontrol betonuna kıyasla, tüm lif takviyeli karışımların eğilme dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, karışıma ilave edilen liflerin, çatlakları köprüleme yaparak çatlak başlamasını ve büyümesini geciktirmesi veya engellemesiyle açıklanabilir (Bentur ve Mindess, 1990). Aynı zamanda, sentetik lifli karışımların %1' den daha fazla lif içermesi sebebiyle, bu karışımlara ait eğilmede çekme dayanımı değerlerinin arttığı düşünülmektedir. Benzer sonuç, Yazıcı vd. (2007) tarafından lif hacminin kompozitin mekanik özellikleri üzerine etkisi ile ilgili çalışmalarında da elde edilmiştir.

İkili lif kombinasyonuna sahip karışımlara bakıldığında, en iyi eğilmede çekme performansı MAK1.00+PVA0.25 karışımından, en düşük eğilmede çekme performansı ise MAK0.50+MİK0.50 karışımından elde edilmiştir. Bu durum, MAK1.00+PVA0.25 karışımının ikili lif içeren karışımlar arasında en fazla makro çelik lif içermesine ve yine yukarıda belirtildiği gibi sentetik lifli karışımların %1' den daha fazla lif içermesine dayandırılabilir. Çünkü, hem tek lifli hem de makro çelik ve mikro çelik liften oluşan ikili karışımlara sentetik liflerin dahil edilmesinin eğilmede çekme dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Benzer bulgular, Kına (2019) tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir.

Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımlara bakıldığında ise, en iyi eğilmede çekme dayanımı değerleri MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25 karışımında, en düşük eğilmede çekme dayanımı değerleri ise, MAK0.50+MİK0.50+PP0.25 karışımından elde edilmiştir. Tek lifli karışıma kıyasla, KYB karışımına makro çelik lif ile yer değiştirilerek karışıma mikro çelik lif ilave edilmesinin eğilmede çekme dayanımını oda sıcaklığına maruz numunelerde

ortalama %1.6 oranında ihmal edilecek düzeyde, 250 °C' ye maruz bırakılan numunelerde ortalama %5.9 oranında düşük düzeyde, 500 °C' ye maruz bırakılan numunelerde ortalama %11.6 oranında ve 750 °C' ye maruz bırakılan numunelerin eğilmede çekme dayanımlarında ise %0.25 ve %0.50 mikro çelik lif içeren numuneler için sırasıyla, %19.9 ve %38.3 oranında önemli düzeyde azalmalara sebep olduğu görülmüştür. 500 °C ve 750 °C sıcaklığa maruz kalan numunelere ait eğilmede çekme dayanımı değerlerindeki önemli oranlardaki düşüşlerin sebebi, matrisin yapısının (hidratasyon ürünlerinin) bozulmasıyla birlikte çelik lif ile matris arasındaki aderansın azalmasına veya tamamen oratadan kalkmasına ve dolayısıyla liflerin çatlak köprüleme görevini yerine getirememesine dayandırılabilir. Sentetik lifler kendi arasında kıyaslandığında ise PVA lifinin üstün mekanik özelliklerinin yanında matris ile güçlü bir kimyasal aderansa sebep olan hidrofilik özellik (Blunt ve Ostertag; 2009) göstermesinden dolayı da, PP lifine göre daha yüksek performans sergilemiştir. Kına (2019) da yaptığı çalışmada, PVA lifinin eğilme dayanımını arttırdığını tespit etmiştir.



**Şekil 4.24 :** Numunelere ait eğilmede çekme dayanımı değerleri.

Sonuç olarak, Şekil 4.24 'ten de görüldüğü üzere, tüm numunelerde sıcaklığın artmasıyla birlikte eğilme dayanımı düşmüştür. Oda sıcaklığına kıyasla, lif takviyeli numunelerin eğilmede çekme dayanımlarındaki azalmalar, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklar için sırasıyla, ortalama %30.37, %54.85 ve %76.12 oranlarında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, tüm sıcaklık etkileri kendi içerisinde değerlendirildiğinde, tüm lif

takviyeli betonların eğilme dayanımları, lifsiz kontrol betonunun eğilme dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, sıcaklığın artmasıyla birlikte eğilme dayanımı değerlerinde en fazla düşüş sentetik lif içeren karışımlarda meydana gelmiştir. Bu durum sentetik liflerin sıcaklığın etkisiyle eriyerek (PVA'nın ergime noktası 240 °C, PP' nin ergime noktası 160 °C) köprüleme görevini yerine getirememesiyle açıklanabilir. Bozkurt (2009)' da yaptığı çalışmada, yarmada çekme dayanımında olduğu gibi yüksek sıcaklık sonrasında eğilmede çekme dayanımında da en fazla kaybın sentetik lif içeren betonda olduğunu tespit etmiştir. Diğer taraftan, 500 °C ve 750 °C sıcaklığa maruz kalan numunelere ait eğilmede çekme dayanımı değerlerinin %50'nin üzerinde düşüşlere sebep olması, betonun mikro yapısının bozulmasıyla birlikte çelik lif ile matris arasındaki aderansın azalmasına ve böylece liflerin çatlak köprüleme görevini yerine getirememesine dayandırılabilir.

#### **4.2.6. Eğilme performansı**

##### **4.2.6.1. Yük-sehim eğrileri**

Lifsiz, tekli, ikili ve üçlü lif içeren KYB karışımlardan üretilen numunelerin 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce ve sonra sehim kontrollü dört noktalı eğilme testi sonucu elde edilen yük-açıklık ortası sehim eğrileri Şekil 4.26-Şekil 4.34' te gösterilmiştir. Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5' te' de verilen açıklık ortası sehim değerleri maksimum yüke karşılık gelen sehimdir. Yukarıda bahsi geçen şekillerden görüleceği üzere, bu çalışmaya konu olan bütün lif takviyeli KYB karışımlarına ait numunelerin hepsi oda sıcaklığında ve 250 °C sıcaklıktaki yük-sehim eğrileri sehim-sertleşmesi davranışı sergilemiştir. Liflerin betona takviyesi gevrek kırılmayı önleyerek sehim-sertleşmesi davranışı oluşturmuş ve böylece betonun daha sünek davranmasını sağlamıştır. Benzer sonuç Kına (2019) tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. Diğer taraftan, 500 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin yük-sehim eğrilerinde sehim-yumuşaması eğiliminde ve 750 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin ise yük-sehim eğrilerinde sehim-yumuşaması davranışı tespit edilmiştir.

Tekli, ikili ve üçlü lif içeren KYB karışımlarının yük-sehim eğrileri altında kalan alan dikkate alındığında, Çizelge 4.6 ve Şekil 4.25' ten de görüldüğü gibi %1 makro çelik lif ile %0.25 PVA sentetik lif içeren karışımdan üretilen numunelerin en fazla enerji absorbe ettiği, %0.50 makro çelik lif ile %0.50 mikro çelik lif içeren karışımdan üretilen numunelerin ise en az enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir.

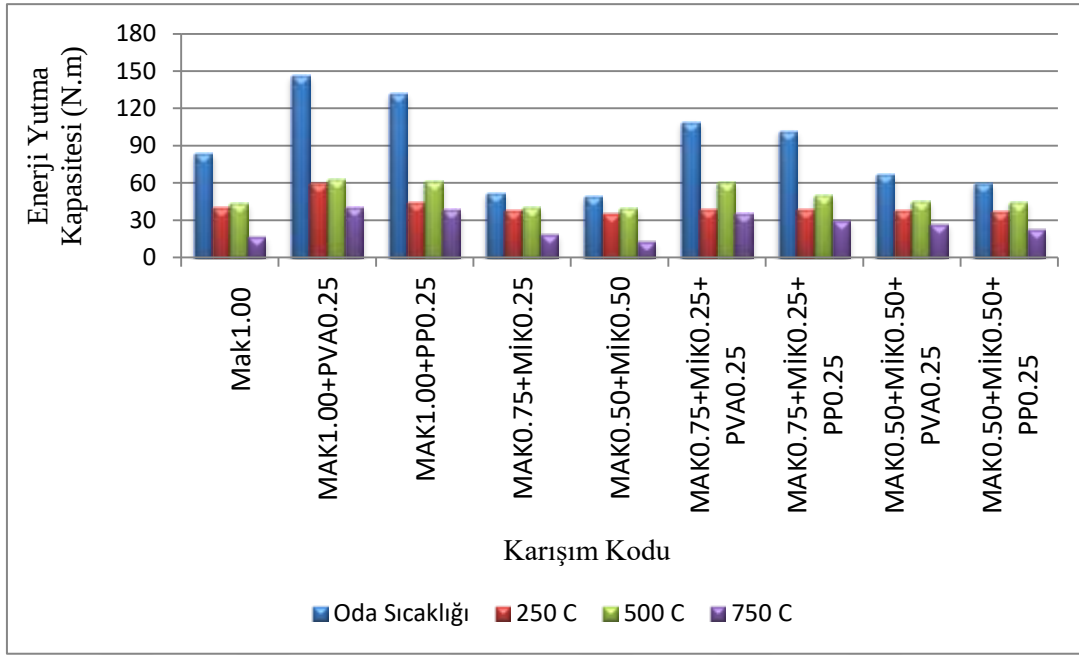
**Çizelge 4.6 :** Lif takviyeli karışımlara ait enerji yutma kapasitesi ve göçme davranışları.

| Karışım No | Karışım Kodu            | Enerji Yutma Kapasitesi (N.m) |        |        |       | Göçme Davranışları |        |        |       |
|------------|-------------------------|-------------------------------|--------|--------|-------|--------------------|--------|--------|-------|
|            |                         | Oda Sıcaklığı                 | 250 °C | 500 °C | 750°C | Oda Sıcaklığı      | 250 °C | 500 °C | 750°C |
| 1          | MAK1.00                 | 83.92                         | 40.25  | 43.58  | 16.85 | SS*                | SS*    | SYE**  | SY*** |
| 2          | MAK1.00+PVA0.25         | 146.23                        | 59.90  | 62.67  | 40.67 | SS*                | SS*    | SYE**  | SY*** |
| 3          | MAK1.00+PP0.25          | 131.73                        | 44.85  | 61.58  | 38.66 | SS*                | SS*    | SYE**  | SY*** |
| 4          | MAK0.75+MİK0.25         | 52.04                         | 38.33  | 40.18  | 18.83 | SS*                | SS*    | SYE**  | SY*** |
| 5          | MAK0.50+MİK0.50         | 48.79                         | 35.58  | 39.19  | 12.93 | SS*                | SS*    | SYE**  | SY*** |
| 6          | MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25 | 109.09                        | 39.06  | 60.82  | 35.67 | SS*                | SS*    | SYE**  | SY*** |
| 7          | MAK0.75+MİK0.25+PP0.25  | 101.84                        | 38.80  | 50.43  | 30.03 | SS*                | SS*    | SYE**  | SY*** |
| 8          | MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25 | 66.85                         | 37.88  | 44.88  | 26.92 | SS*                | SS*    | SYE**  | SY*** |
| 9          | MAK0.50+MİK0.50+PP0.25  | 59.59                         | 37.17  | 44.68  | 22.44 | SS*                | SS*    | SYE**  | SY*** |

\*SS: Sehim-sertleşmesi

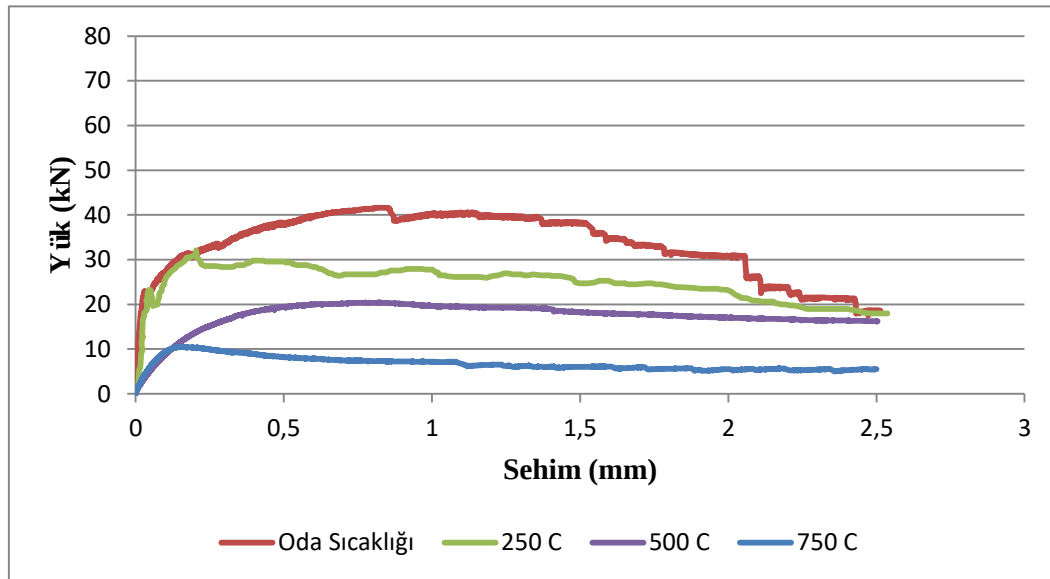
\*\*SYE: Sehim-yumuşaması eğiliminde

\*\*\* SY: Sehim-yumuşaması

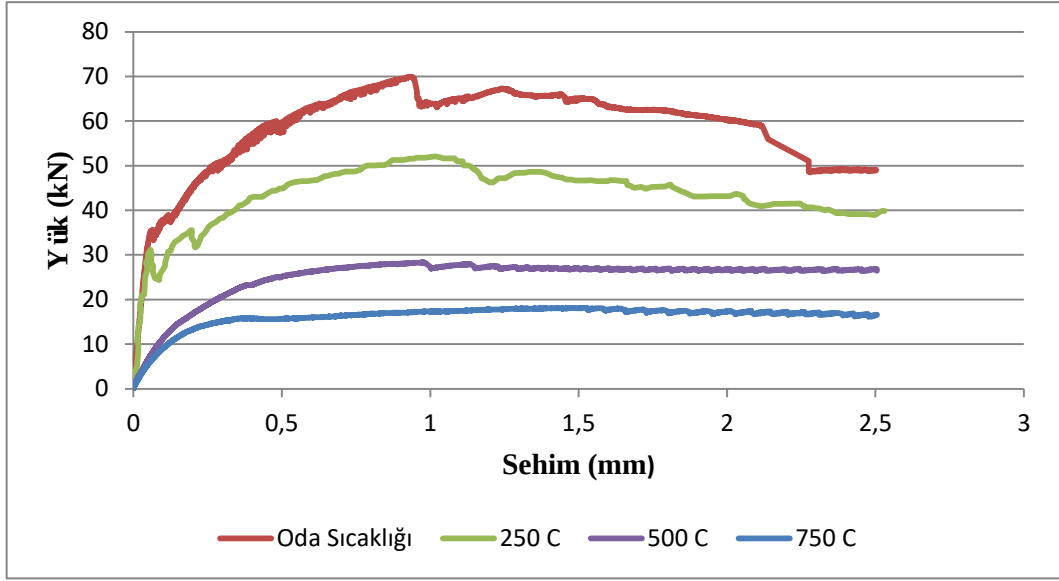


Şekil 4.25 : Numunelere ait enerji yutma kapasitesi değerleri.

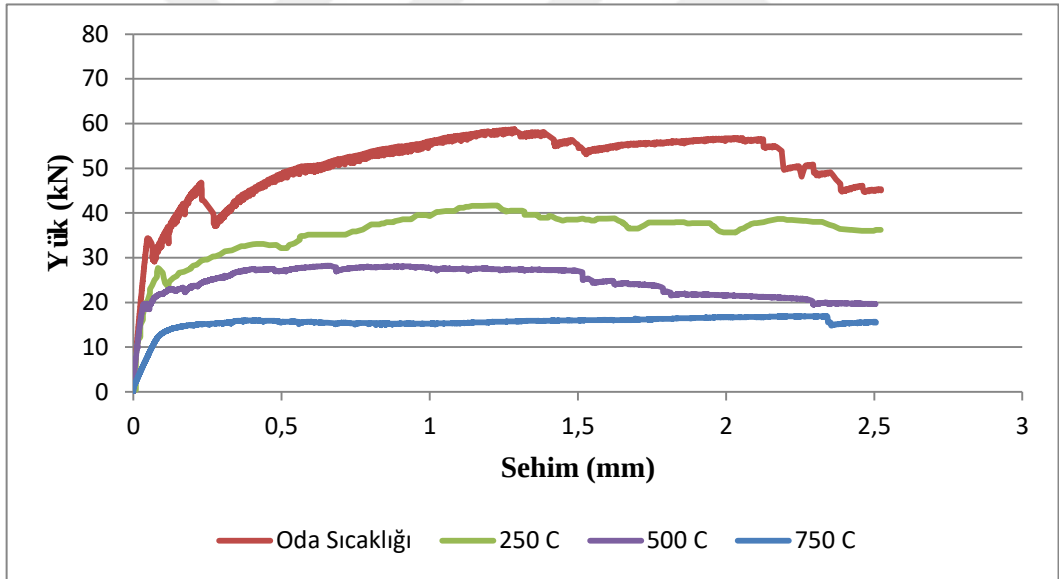
İkili lif kombinasyonuna sahip karışımların yük-sehim eğrileri altında kalan alan incelendiğinde, Çizelge 4.6' dan da görüldüğü gibi en fazla %1 makro çelik lif ile %0.25 PVA sentetik lif içeren karışımdan üretilen numunelerin en fazla enerji absorbe ettiği, %0.50 makro çelik lif ile %0.50 mikro çelik lif içeren karışımdan üretilen numunelerin ise en az enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir.



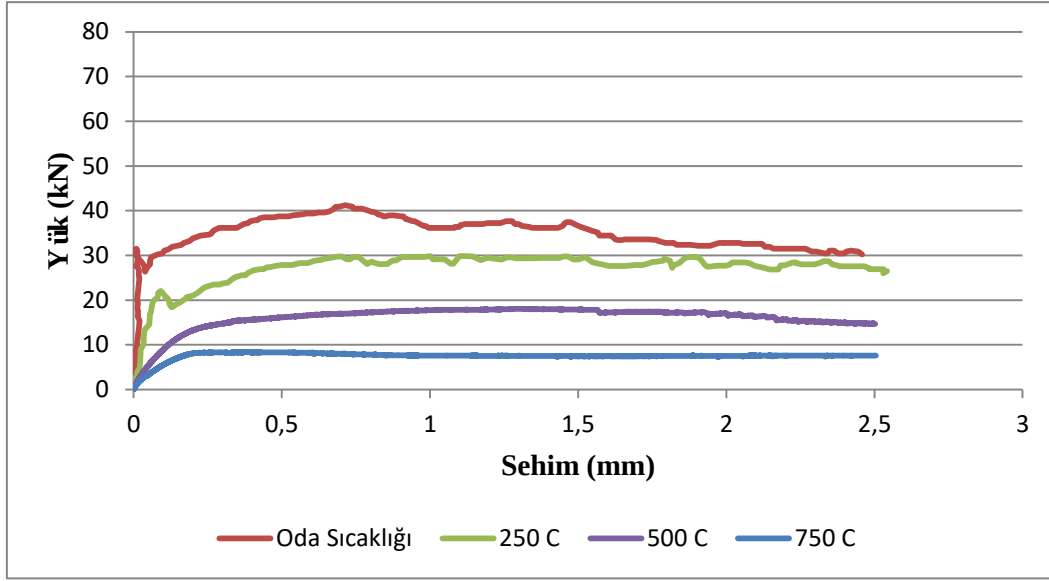
Şekil 4.26 : MAK1.00 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.



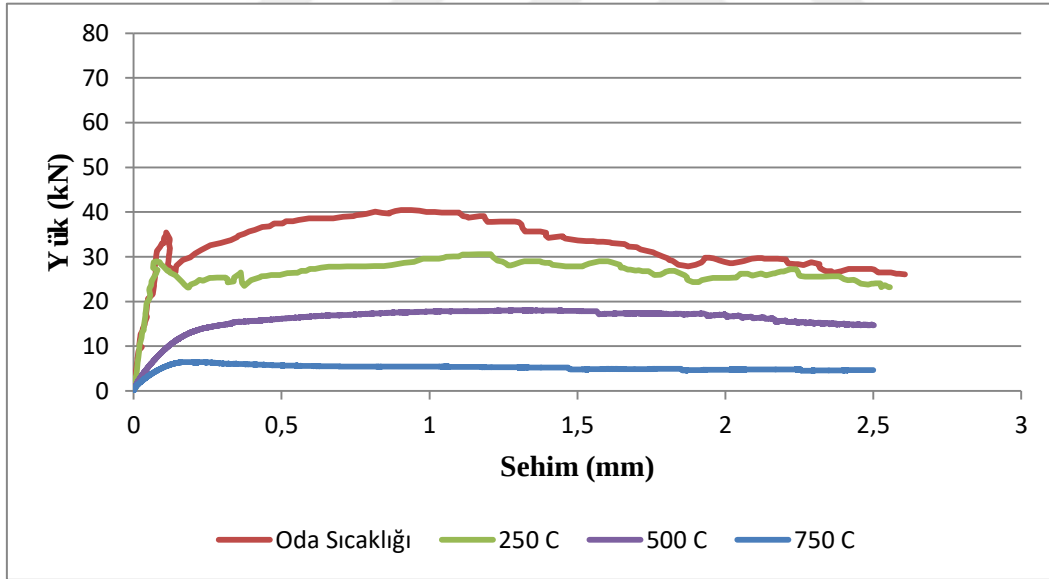
Şekil 4.27 : MAK1.00+PVA0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.



Şekil 4.28 : MAK1.00+PP0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.



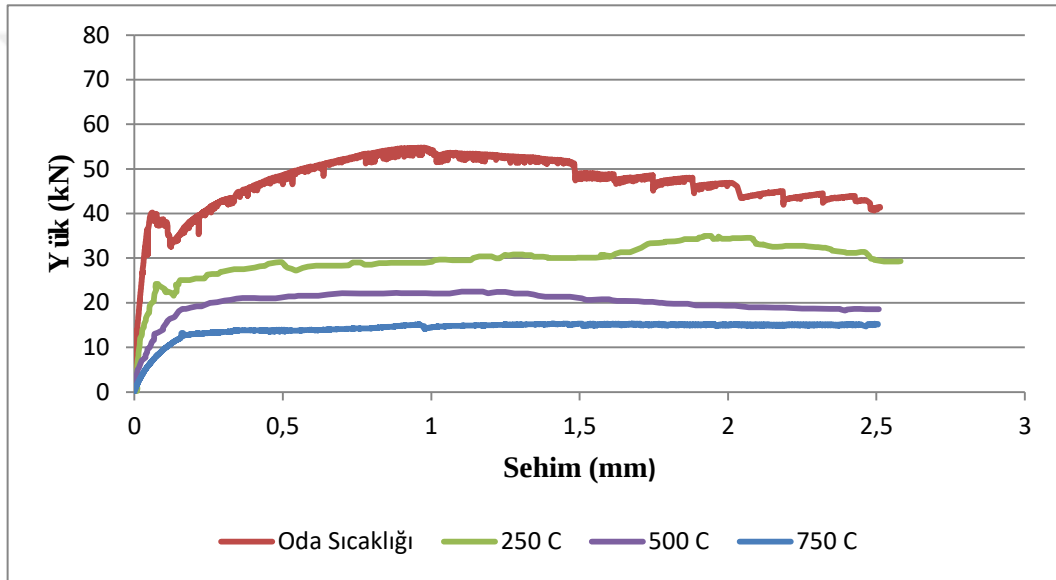
Şekil 4.29 : MAK0.75+MİK0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.



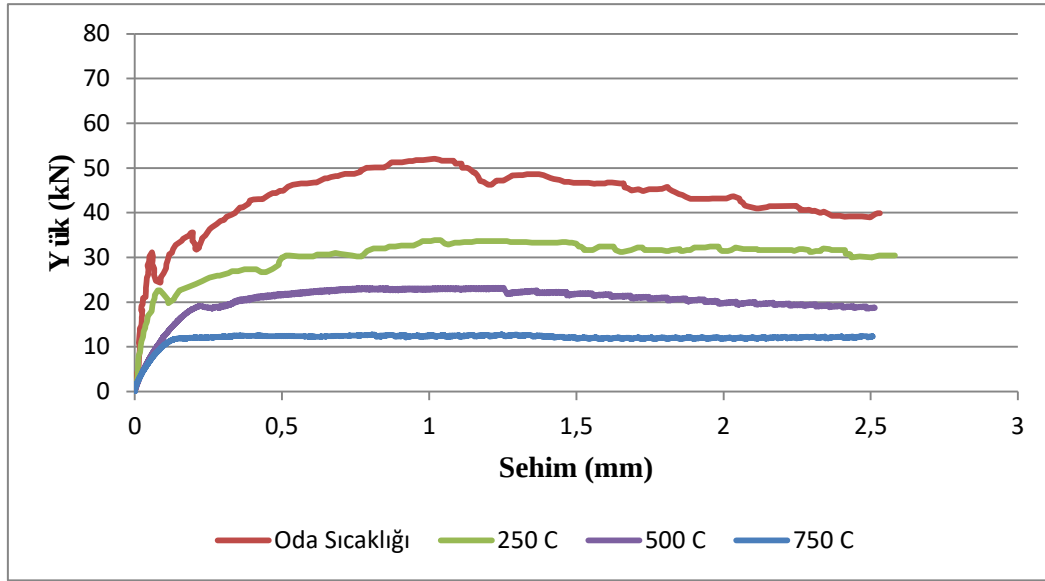
Şekil 4.30 : MAK0.50+MİK0.50 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.

Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımların yük-sehim eğrileri altında kalan alan incelendiğinde ise, yine Çizelge 4.6' dan da görüldüğü gibi %0.75 makro çelik lif ve %0.25 mikro ile %0.25 PVA sentetik lif içeren karışımdan üretilen numunelerin en fazla enerji absorbe ettiği, %0.50 makro çelik lif ve %0.50 mikro çelik lif ile %0.25 PP i çeren karışımdan üretilen numunelerin ise en az enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir. Sadece %1

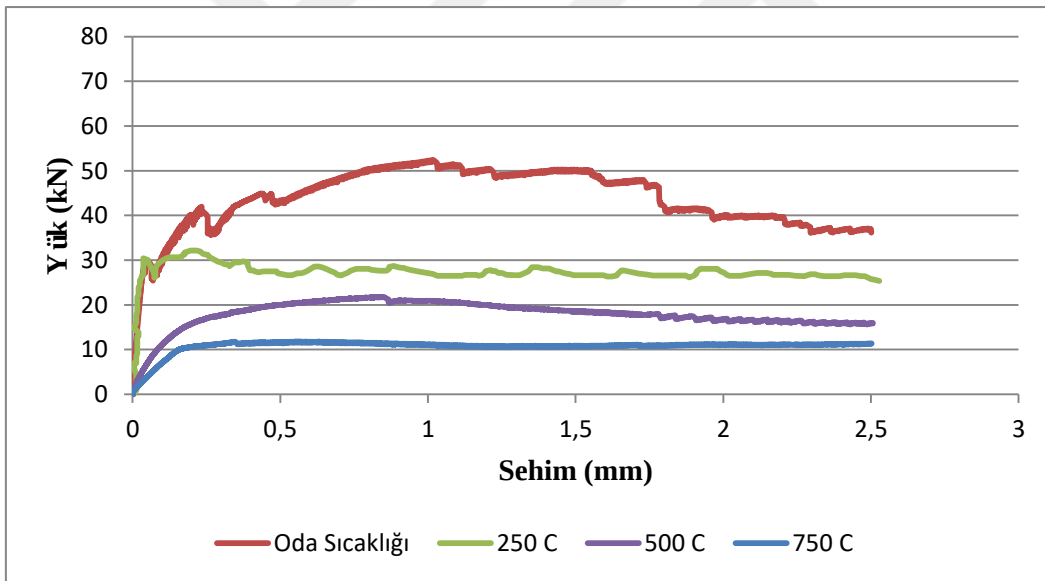
makro çelik lif içeren tekli, %0.75 makro çelik lif ve %0.25 mikro çelik lif içeren ve %0.50 makro çelik lif ve %0.50 mikro çelik lif içeren ikili karışımlara, PVA veya PP sentetik lif ilave edilerek elde edilen ikili ve üçlü lif kombinasyonundan oluşan karışımlara ait numunelerin yük-sehim eğrileri incelendiğinde sentetik liflerin eğrilerin altında kalan alanın arttığı görülmüştür. Sentetik lifler kendi arasında kıyaslandığında ise, PVA eklenmesinin numunelerin absorbe ettiği enerji bakımından PP lifine göre daha olumlu etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında, fazla miktarda makro çelik lif içeren tek lifli karışımlar ile PVA içeren ikili ve üçlü karışımlara ait numunelerin diğer numunelere kıyasla çok daha duktıl davrandıkları belirlenmiştir. Benzer bulgular, Türk ve Atalay (2019) tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir.



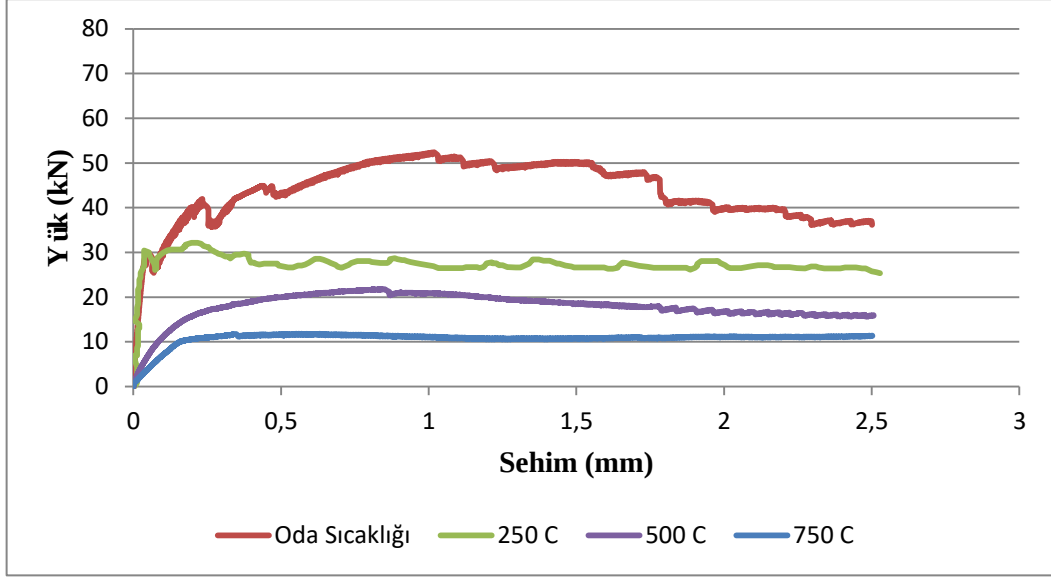
**Şekil 4.31:** MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.



Şekil 4.32 : MAK0.75+MİK0.25+PP0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.



Şekil 4.33 : MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.



**Şekil 4.34 :** MAK0.50+MİK0.50+PP0.25 numunelerine ait yük-sehim eğrileri.

Sonuç olarak, tüm yük-sehim eğrilerinden görüldüğü üzere, makro lifin azalmasıyla birlikte numunelere ait enerji yutma kapasitelerinin azaldığı, sentetik liflerin karışım içerisine eklenmesiyle birlikte ise numunelere ait enerji yutma kapasitelerinin arttığı görülmüştür. Makro çelik lif mikro çatlakların köprülenmesinde herhangi bir role sahip olmamasına rağmen, eğrinin maksimum yük sonrası kısmının oluşmasında etkilidir. Dolayısıyla, yüksek oranda makro çelik lif içeren karışımlarda yük-sehim eğrisi altında kalan alan genelde daha fazla olmaktadır. Benzer sonuçlar aynı zamanda Haddou ve ark. (2014) ile Naaman ve Reinhardt (1995) tarafından yapılan çalışmalarda da bulunmuştur.

#### 4.2.6.2. Çatlak Karakterizasyonu

Tez çalışmasında tasarlanan karışımlara ait numunelerin oda, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarına maruz bırakılma durumlarına göre dört noktalı eğilme testi neticesinde lifsiz KYB numunelerinin gevrek göçtüğü görülmüştür. Bununla birlikte, lif takviyeli diğer bütün numunelerin 500 °C ve 750 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numuneler hariç Şekil 4.26-4.34'te verildiği üzere, genelde sehim-sertleşmesi davranışı sergileyerek göçtüğü belirlenmiştir. Ayrıca, 500 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin eğilme testi sonucunda elde edilen eğrilerden sehim-yumuşaması eğilimi gösterdiği görülürken, 750 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin yük-sehim eğrilerinden tamamen sehim-yumuşaması davranışı sergiledikleri belirlenmiştir. Sehim-sertleşmesi davranışı, eğilme testine maruz bırakılan prizmatik kiriş numunelerinde, ilk çatlak sonrası az sayıda geniş

çatlaklar yerine, çok sayıda mikro çatlakların oluşması anlamına gelen ve lif ilave edilmiş çimento esaslı kompozitlerin performansının artırılması şeklinde tanımlanabilir. Çimento esaslı kompozitlerde çok sayıda çatlak oluşumu davranışının belirlenmesinde esas alınan yük-sehim eğrisinin maksimum yük değerinden sonraki davranışı, karışıma ilave edilen liflerin miktarından ve tipinden etkilenmektedir. Literatürde mevcut olan bazı araştırma makalelerinde (Rashiddadash vd. 2014; Pajak ve Ponikiewski, 2013; Lawler vd. 2005) kancalı uçlu çelik lif ve PVA lifinin kullanıldığı çimento esaslı karışımlara ait numunelerin genelde sehim-sertleşmesi, düz çelik lif içeren numunelerin ise sehim-yumuşaması davranışı gösterdiği belirtilmiştir.

Şekil 4.35' te, oda sıcaklığında bekletilmiş dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmış ve enerji yutma kapasiteleri diğer numunelere kıyasla, yüksek olan numunelerin tümünün çoklu çatlak davranışı sergiledikleri görülürken, tüm numuneler içerisinde en yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olan MAK1.00+PVA0.25 numunesinin çatlak sayısında en fazla olduğu ve belirgin bir çoklu çatlak davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir (Tüm numunelerin dört noktalı eğilme testinden sonra oluşan çatlak görselleri Ek'te mevcuttur). Bunun yanında, oda sıcaklığına maruz bırakıldıktan sonra eğilme testi neticesinde MAK1.00+PVA0.25 numunesinden sonra 131.73 N-m ile en yüksek enerji yutma kapasitesine sahip MAK1.00+PP0.25 numunesi de belirgin bir çoklu çatlak davranışı sergilerken, diğer numunelerde çoklu çatlak davranışı göstermiştir.



(a) MAK1.00+PVA0.25



(b) MAK1.00+PP0.25



(c) MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25



(d) MAK0.75+MİK0.25+PP0.25



(e) MAK1.00

**Şekil 4.35 :** Oda sıcaklığında bekletilmiş dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmış tokluk değeri en yüksek numunelerin çoklu çatlak davranışı görselleri.

Şekil 4.36' da görüldüğü üzere, 750 °C sıcaklığında bekletilmiş dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmış numunelerin az sayıda genişliği fazla olan çatlakların oluştuğu bir davranış sergilediği görülürken, tüm numunelerin genelde aynı tip çatlak karakterizasyonuna sahip olduğu ve numune yan yüzlerinde bir geniş çatlakla birlikte bu çatlak etrafında gelişmiş kısa az sayıda çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, yüksek sıcaklıkta çelik liflerin matrisle olan aderansının azalmasına ve sentetik liflerin

(PVA ve PP) ise eriyerek işlevselliğini tamamen yitirmesine ve dolayısıyla liflerin çatlak köprülemedeki etkinliğinin azalmasına veya tamamen ortadan kalkmasına dayandırılabilir.



(a) MAK1.00+PVA0.25



(b) MAK1.00+PP0.25



(c) MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25



(d) MAK0.75+MİK0.25+PP0.25



(e) MAK1.00

**Şekil 4.36 :** 750 °C sıcaklıkta bekletilmiş dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmış tokluk değeri en yüksek numunelerin çoklu çatlak davranışı görselleri.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada yürütülen deneylerden elde edilen bulgular dikkate alındığında, aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

- Karışımlar arasında en yüksek taze ve sertleşmiş beton birim hacim ağırlık değerine sadece %1 makro çelik lif içeren karışımın sahip olduğu görülürken, agregası ile yer değiştirilerek kullanılan çelik liflerin özgül ağırlığının yüksek olmasından dolayı tüm lifli karışımların hem taze hem de sertleşmiş beton için birim hacim ağırlık değerleri lifsizlerinkinden daha yüksek bulunmuştur.
- Tüm karışımlar arasında en yüksek çökme-yayılma çapı lifsiz kontrol KYB karışımında, en düşük yayılma çapı ise üçlü lif kombinasyonuna sahip %0.50 makro çelik lif ve %0.50 mikro çelik lif ile %0.25 PVA içeren karışımında elde edilmiştir. Bunun yanında, tek lifli KYB karışımına kıyasla, karışıma hem mikro çelik lifin hem de sentetik lifin katılmasının çökme-yayılma değerlerini olumsuz etkilediği gözlemlenirken, PVA lifinin PP lifine göre işlenebilirlik üzerinde daha olumsuz bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm karışımlar arasında en düşük J-halkalı çökme-yayılma çapı, ikili lif kombinasyonuna sahip %1 makro çelik lif ile %0.25 PVA içeren karışımında elde edilirken, karışıma çelik ve sentetik liflerin katılması J-halkalı çökme-yayılma değerlerinde azalmalar meydana getirdiği bulunmuştur. Ayrıca, karışıma çelik ve sentetik liflerin katılması J-halkası yükseklik farkı değerlerinde ve yayılma süresinde artışlar meydana getirdiği bulunmuştur.
- Lifsiz ve lifli KYB karışımlarının basınç dayanımı değerleri dikkate alındığında, numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklar için en yüksek basınç dayanımı değerine ikili lif içeriğine sahip %0.50 makro ve %0.50 mikro çelik lif içeren karışımın sahip olduğu görülmüştür.
- Tüm sıcaklıklar için lif takviyeli KYB karışımlarına mikro çelik lifin eklenmesinin, basınç dayanımında artışa neden olduğu ve sentetik liflerin karışıma eklenmesinin basınç dayanımını düşürdüğü görülürken, PVA lifinin PP lifine göre basınç dayanımı üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Lifsiz ve lifli KYB karışımlarının yarmada çekme dayanımı değerleri dikkate alındığında, numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklar için en yüksek

yarmada çekme değerine üçlü lif içeriğine sahip %0.75 makro ve %0.25 mikro çelik lif ile %0.25 PVA içeren karışımın sahip olduğu görülmüştür.

- Numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklar için lif takviyeli KYB karışımlarına ilave edilen makro çelik lifin azalmasının, yarmada çekme dayanımında düşüşe neden olduğu ve sentetik liflerin karışıma eklenmesinin yarmada çekme dayanımını arttırdığı görülürken, PVA lifinin PP lifine göre yarmada çekme dayanımı üzerinde daha fazla olumlu bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Lifsiz ve lifli KYB karışımlarının eğilmede çekme dayanımı değerleri dikkate alındığında, numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklar için en yüksek eğilmede çekme değerine, ikili lif içeriğine sahip %1.00 makro çelik ve %0.25 PVA içeren karışımın sahip olduğu görülmüştür.
- Numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklar için yarmada çekme dayanımında olduğu gibi lif takviyeli KYB karışımlarına ilave edilen makro çelik lifin azalmasının eğilme dayanımını düşürdüğü tespit edilmiştir. Ancak, sentetik liflerin karışımlara eklenmesinin hem ikili lif hem de üçlü lif içeren karışımlarda eğilme dayanımını arttırdığı görülürken, yarmada çekme dayanımında olduğu gibi PVA lifinin PP lifine göre eğilme dayanımı performansını daha olumlu etkilediği bulunmuştur.
- Tüm lif takviyeli KYB karışımlarına ait numunelerin oda sıcaklığında ve 250 °C sıcaklıktaki eğilme performansları incelendiğinde, bütün numunelerin sehim-sertleşmesi davranışı gösterdiği tespit edilirken, tüm lif takviyeli KYB karışımlarına ait numunelerin 750 °C sıcaklıktaki eğilme performansları dikkate alındığında ise, sehim-yumuşaması davranışı olduğu gözlemlenmiştir.
- Tüm sıcaklıklar için tekli, ikili ve üçlü lif içeren KYB karışımlarının yük-sehim eğrileri altında kalan alan dikkate alındığında, makro çelik lifin azalmasıyla numunelere ait enerji yutma kapasitesinin azaldığı bulunmuştur. Bunun yanında, tüm sıcaklıklar için, sadece makro çelik lif içeren tekli ve hem makro hem de mikro çelik lif içeren ikili lif takviyeli KYB karışımlarına sentetik lif eklenmesinin enerji yutma kapasitesini iyileştirdiği görülürken, PVA lifinin PP lifine göre karışımların enerji yutma kapasitesini daha olumlu etkilediği bulunmuştur.

- Oda sıcaklığına maruz bırakılmış numunelerin genelde çoklu çatlak davranışı sergiledikleri görülürken, tüm numuneler içerisinde en yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olan MAK1.00+PVA0.25 numunesi belirgin bir çoklu çatlak davranışı göstermiştir.
- 750 °C sıcaklığına maruz bırakılmış numunelerin az sayıda genişliği fazla olan çatlakların olduğu bir davranış sergilediği görülmüştür. Ayrıca, tüm numunelere ait çatlak karakterizasyonunun numune yan yüzlerinde genelde aynı tip bir geniş çatlakla birlikte bu çatlak etrafında gelişmiş kısa az sayıda çatlak oluşumu şeklinde meydana geldiği gözlemlenmiştir.



## KAYNAKLAR

- Akçay, B.** (2012). Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete. *Compos: Part B*, 43, 766–78.
- Akçay, B. ve Tasdemir, M. A.** (2012). Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 28, 287-293.
- Aral, M.** (2006). *Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir-Optimum Tasarım* (Yüksek lisans tezi). İTÜ, İstanbul.
- ASTM C1611** (2018). *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C39** (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 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.
- ASTM C618** (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C78-02** (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Avar, D.** (2006). *Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi* (Yüksek lisans tezi). İTÜ, İstanbul.
- Bangi, M. R. & Horiguchi, T.** (2011). Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41, 1150–1156.
- Banthia, N. & Nandakumar, N.** (2003). Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 25:1, 3-9.
- Banthia, N. & Soleimani, S. M.** (2005). Flexural response of hybrid fiber-reinforced cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 102:6, 382-389.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S.** (2015). *Beton*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Türkiye, 681 s.
- Bayasi, Z. & Soroushian P.** (1991). Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 88, 129-134.

- Bayramov, F.** (2004). *Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Optimum Tasarımı* (Doktora tezi). İTÜ, İstanbul.
- Bentur, A. & Mindess, S.** (1990). *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. 1st ed. London and New York, Elsevier Applied Science.
- Bentur, A.** (1989). Fiber-reinforced cementitious materials. In *Material Science of Concrete*. J.P. Skalny, (ed.), The American Ceramic Society, Westerville, Ohio. 223-285.
- Betterman, L. R., Ouyang, C. & Shah, S. P.** (1995). Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar, *Adv. Cem. Bas. Mat.*, 2, 53-61.
- Blunt, J. & Ostertag, C. P.** (2009). Performance based approach for the design of a deflection hardened hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 135:9, 978-986.
- Bothma, J.** (2013). Literature Review on Macro Synthetic Fibres in Concrete. *Institute of Structural Engineering*. ISI2013-15.
- Bozkurt, N.** (2009). *Fiber Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Betonunmekanik Ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması* (Doktora tezi). Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Chung, D. D. L.** (2005). Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites Part B: Engineering*, 31:6-7, 511-526.
- 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.
- Deshpande, A. A., Kumar, D. & Ranade, R.** (2019). Influence of high temperatures on the residual mechanical properties of a hybrid fiber-reinforced strain-hardening cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 208, 283–295.
- Ding, Y. N., You, Z. & Jalali, S.** (2010). Hybrid fiber influence on strength and toughness of rc beams. *Compos Struct*, 92, 2083–9.
- Duyar, O.** (2006). Avrupa kendiliğinden yerleşen beton şartnamesi ışığında tanımlar, dizayn yöntemi, deney metotları ve mühendislik özellikleri. *THBB Hazır Beton Dergisi*, 75, 46-52.
- EFNARC** (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. European project group, UK.
- EFNARC** (2005). *European Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Specification and Production and Use, Association House, UK.
- Eidan, J., Rasoolan, I., Rezaeian, A. & Poorveis, D.** (2019). Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. *Construction and Building Materials*, 198, 195–206.

- Farhad, A. & Nejadi, S.** (2013). Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression. *Composites Part B: Engineering*, 53, 121-133.
- Felekoğlu, B., Yardımcı M. Y. ve Baradan, B.** (2003). A comparative study on the use of powder and chemical types of viscosity enhancers in self compacting concrete (pp: 446-456). *Proceedings of the 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete*, Iceland.
- Felekoğlu, B. ve Baradan, B.** (2004), Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri (pp.234-243). *Beton 2004 Kongresi Bildirileri*. 10-12 Haziran.
- Felekoğlu, B., Tosun, K. ve Baradan, B.** (2009). Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites. *Cement and Concrete Research*, 39,1023-1032.
- Fırat, M.T.** (1996). *Silis Dumanı İçeren Yüksek Mukavemetli Betonların Enerji Tutma Kapasitelerinin Arttırılmasında Çelik Lif Kullanımının Etkisi* (Yüksek lisans tezi). İTÜ, İstanbul.
- Gaimster, R. & Dixon, N.** (2003). Self-compacting concrete. *Advanced Concrete Technology*, 1-9.
- Groth, P.** (2000). *Fibre reinforced concrete – fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders*. PhD. Thesis, Lulea University of Technology.
- Gürdal, H. ve Yüceer, Z.** (2004). Türkiye’de Ve Dünya’da Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları (pp: 244-254). *Hazır Beton Kongresi*, Bildiriler Kitabı, İstanbul.
- Hackley, V. A. ve Ferraris, C. F.** (2001). The use of nomenclature in dispersion science and technology. *NIST recommended practice guide, special publication*, 960-3, Washington: National Institute of Standards and Technology, 72.
- Haddadou, N., Chaid, R., Ghernouti, Y. & Adjou, N.** (2014). The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete. *Build Mater Struct*, 1, 65-76.
- Han, C. G., Hwang, Y-S., Yang, S. H. & Gowripalan, N.** (2005). Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement and Concrete Research*, 35, 1747-1753.
- Hannant, D. J.** (1987). Fiber cements and fiber concrete. *Chichester*, UK, Wiley.
- Holschemacher, K.** (2004). Hardened Properties Of Self-Compacting Concrete. *The 8th International Conference*. May 19-21.

- Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T. & Hoshiro, H.** (2005). Properties of Polyvinylalcohol Fiber as Reinforcing Materials for Cementitious Composites. *International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Compositesin Structural Applications*, Honolulu, HI, USA.
- Kawamata, A., Mihashi, H. & Fukuyama, H.** (2003). Properties of hybrid fiber reinforced cement based composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, 283-290.
- Khaliq, W. & Kodur, V.** (2011). Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41, 1112–1122.
- Khayat K. H. & Guizani Z.** (1997). Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete. *ACI Materials Journal*, 94, s.332-340.
- Kılınç, C.** (2012). Kendiliğinden yerleşen betonlar. *Hazır Beton*. Temmuz–Ağustos, 70-75.
- Kına, C.** (2019). *Yüksek Performanslı Karma Lif Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Beton Geliştirilmesi* (Doktora tezi). İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Kızıllıgın, B.** (2009). *Çelik Ve Karbon Lifli Harçların Sülfat Etkilerine Dayanıklılığının İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Kim, D. J., Naaman, A. E. & El-Tawil, S.** (2008). Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cem. Concr. Compos.*, 30(10), 917–28.
- Kurt, G.** (2006). *Lif İçeriği Ve Su-Çimento Oranının GRC'nin Mekanik Davranışına Etkileri* (Yüksek lisans tezi). İTÜ, İstanbul.
- Lawler, J., Zampini, D. & Shah, S.** (2005). Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17, 595-604.
- Lawler, J. S.** (2001). *Hybrid Fiber Reinforcement in Mortar and Concrete*. PhD Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA.
- Li, V. C. & Maalej, M.** (1996). Toughening in cement based composites. *Cement and Concrete Composite*, 18, 223-237.
- Li, Z. & Zhang, Y.** (2005). High-performance concrete. *Handbook of Structural Engineering*, CRC Press, Boca Raton, Fla, USA.
- Liang, X., Wu, C., Su, Y., Chen, Z. & Li, Z.** (2018). Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance. *Construction and Building Materials*, 179, 400–412.
- Liu, J. & Tan, K. H.** (2017). Fire resistance of strain hardening cementitious composite with hybrid PVA and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 135, 600-611.

- Mahapatra, C. K. & Barai, S. V.** (2019). Temperature impact on residual properties of self-compacting based hybrid fiber reinforced concrete with fly ash and colloidal nano silica. *Construction and Building Materials*, 198, 120–132.
- Mazeheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. H. & Hosseinpour, I.** (2011). The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 351-358.
- Metaxa, Z. S., Konsta Gdoutos, M. S. & Shah, S. P.** (2011). *Crack Free Concrete Made with Nanofiber Reinforcement*. Robert R. McCormick School of Engineering and Applied Science, Year 3 Final Report, 115-124.
- Mindess, S.** (2007). Thirty years of fibre reinforced concrete research at the UWM British, Colombia. *The international conference sustainable construction materials and technologies*.
- Mindess, S. & Young, J. F.** (2000). *Concrete*. Prentice-Hall Inci, USA.
- Mobasher, B. & Li Cheng, Y.** (1996). Mechanical properties of hybrid cement based composites. *ACI Materials Journal*, 93, 284–92.
- Okamura & Quchi** (1999). Self-Compacting Concrete (pp 3-14). *Development Present Use and Future. Proceedings of the First International RILEM Symposium*. Edited by A. Skarendahland 6. Peterson.
- Öz, A.** (2014). *Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Hibrid Lifli Betonların Bazı Özelliklerinin Araştırılması* (Doktora tezi). Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Özkul, M. H.** (2014). Kendiliğinden yerleşen betonlar. *Hazır Beton Dergisi*, 61-71.
- Özkul, M. H.** (2002). Beton Teknolojisinde bir devrim: kendiliğinden yerleşen-sıkışan beton, *THBB Hazır Beton Dergisi*, 52, 64-71.
- Özkul, M.H.** (2005). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Genel Özellikleri. (pp: 119-136). *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 24-25 Mart, Bildiriler Kitabı, Ankara.
- Öztekin, E.** (2019). *Karma Çelik Lif İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kesme Davranışının İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Öztekin, E., Kına, C. ve Türk, K.** (2018). Effect of micro fiber content on workability of self-compacting concrete. *13th International Congress on Advances in Civil Engineering*, ACE, İzmir, Turkey, 12/14 September.
- 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.
- Peng, G. F. & Huang, Z. S.** (2008). Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 22, 593.

- Pereira de Oliveira, L. A., Castro Gomes, J. P., Bernardo, M. M. M. & Ramos, L. F. A.** (2013). Evaluation of dry mortar ratio as mix design parameter for steel fibre reinforced self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 642-649.
- Persson, B.** (2001). A comparison between mechanical properties of self compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 193 – 198.
- Pliya, P., Beaucour, A. L. & Noumowé A.** (2011). Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature. *Constr. Build. Mater.*, 25, 1926–1934.
- Rambo, D. A. S., Silva, F. D. A. & Filho, R. D. T.** (2014). Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: materials and structural aspects. *Materials & Design*, 54, 32-42.
- 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.
- Rodrigues, J. P. C., La ím, L. & Correia, A. M.** (2010). Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire. *Compos. Struct*, 95, 1263–1268, 2010.
- Rossi, P., Acker, P. & Malier, Y.** (1987). Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure. *Mater Struct.*, 20, 436–9.
- Sağlam, A. R.** (2000). Süperakışkanlaştırıcı ve viskozite artırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi (Derleme). *Sika Teknik Bülteni*, 4, 9-16.
- Sağlam, R. A., Parlak, N., Doğan, A., Ü. ve Özkul, M.,H.** (2005). Kendiliğinden yerleşen betonda çimento katkı uyumu (s. 213-224). *6.Ulusal Beton Kongresi*. İTÜ, 16-18 Kasım, İstanbul.
- Sato, Y., Van Mier, J. G. M. & Walraven, J. C.** (2000). Mechanical Characteristics Of Multi-Modal Fiber Reinforced Cement Based Composites. *Fifth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France, 13-15 September.
- Shah, S.P. & Balaguru, P.N.** (1992). *Fiber-Reinforced Cement Composites*. McGraw-Hill Inc., Singapore.
- Shah, S. P.** (1991). Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes. *ACI Material Journal*, 88, 6, 595-602.
- Shi, Y., Matsui, I. & Feng, N.** (2002). Effect of compound mineral powders on workability and rheological property of HPC. *Cement and Concrete Research*, 32, 71–78.
- Simsek, O.** (2007). *Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri*. 2.Baskı, Ankara

- Skarendahl, A. & Petersson, Ö.** (2003). Self-compacting concrete. *State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, RILEM Publication.
- Skarendahl, A. & Petersson, Ö.** (2000). Self compacting concrete. *State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, RILEM publication.
- Suhaendi, L. S. & Horiguchi, T.** (2006). Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition. *Cement and Concrete Research*, 36, 1672–1678.
- Sukontasukkul, P. & Jamsawang, P.** (2012). Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil–cement column. *Constr Build Mater.*, 29, 201–5.
- Şahmaran, M. ve Yaman, İ. Ö.** (2007). Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Journal of Construction and Building Materials*, 27, 150-156.
- Şahmaran, M., Yurtseven, A. ve Yaman, İ. O.** (2005). Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. *Building and Environment*, 40, 1672-1677.
- Şengül, C.** (2005). *Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışına Su/İnce Malzeme Oranı İle Lif Dayanımının Etkisi* (Yüksek lisans tezi). İTÜ, İstanbul.
- Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Kocatürk A .N. ve Yerlikaya M.** (2004). Betonun Performansına Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler. *Beton 2004 Kongresi*. İstanbul, 10-12 Haziran, s. 24-57.
- Topçu, İ. B., Bilir, T. ve Baylavlı, H.** (2008). Kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri. *Eskisehir Osmangazi Üniversitesi Muh.Mim.Fak.Dergisi*, 21:1, 1-22.
- Topçu, İ. B., Ünal, O. ve Uygunoğlu T.** (2007). Kendiliğinden Yerleşen Yarı-Hafif Betonların Özelliklerinin Araştırılması (pp: 181-193). 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi*. Milli Kütüphane, Ankara.
- Toyoharu, N., Tatsuo, I. & Yoshinobu, E.** (1998). State Of The Art Report On Materials And Design Of Self Compacting Concrete (pp:160 – 189). *International Workshop on Self Compacting Concrete*, Japan.
- Türk, K. ve Atalay, E.** (2019). The Properties Of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete With Different Type Micro Fiber (pp.1040-1051). 4. *Uluslararası Enerji ve Mühendislik Kongresi*. UEMK 2019 Proceedings Book, 24/25 October 2019 Gaziantep University, TURKEY.
- TS 706 EN 12620** (2003). *Beton Agregaları*. TS Standardı, Ankara
- Uğur, A.** (2007). *Lif Donatılarının Yüksek Dayanımlı Betonlarda Yarma Dayanımı Basınç Dayanımı İlişkisine Etkisi* (Yüksek lisans tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.

- Uyan, M., Pekmezci, B. Y. ve Yıldırım, H.** (2003). Akışkanlaştırıcı katkı kür ve koşullarının betonun geçirimsizlik özellikleri üzerine etkileri. *Sika Teknik Bülten*, 1, 10–14.
- Uysal, A.** (2004). *Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri* (Yüksek lisans tezi). İTÜ, İstanbul.
- Walton, P. L. & Majumdar, A. J.** (1975). Cement-based composites with mixtures of different types of fiber. *Composites*, 6:5, 209–216.
- Wu, H. C.** (2006). *Advanced Civil Infrastructure Materials*. Woodhead Publishing Limited, Washington.
- Yahia, A., Tanimura, M., Shimabukuro, A. & Shimoyama, Y.** (1999). Effect Of Rheological Parameters On Self Compactability Of Concrete Containing Various Mineral Admixtures (pp.523-535), in: A. Skarendahl, O. Petersson (Eds.), *Proceedings of the First RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*. Stockholm, September.
- Yan, Z. G., Zhu, H. H. & Ju, J. W.** (2013). Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield tbn tunnel linings exposed to high temperatures. *Constr. Build. Mater*, 38, 610–618.
- Yang, E. & Li, V. C.** (2006). A micromechanical model for fiber cement optimization and component tailoring. *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125*. November 15-18, Sao Paulo – Brazil.
- Yazıcı, Ş., İnan, G. ve Tabak, V.** (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21, 1250–1253
- Zhou, Q., & Glasser, F. P.** (2001). Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120 °C. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1333–1339.
- Zollo, R. F.** (1997). Fibre-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement Cement and Concrete Composites*, 19, 107-122.

## EKLER

**Ek A :** KYB numnelerine ait oda sıcaklığında bekletilmiş numunelere ait eğilme testlerinden sonraki çatlak oluşumları

**Ek A**



(a) Kontrol



(a) MAK1.00



(b) MAK1.00+PVA0.25



(c) MAK1.00+PP0.25



(d) MAK0.75+MİK0.25



(e) MAK0.50+MİK0.50



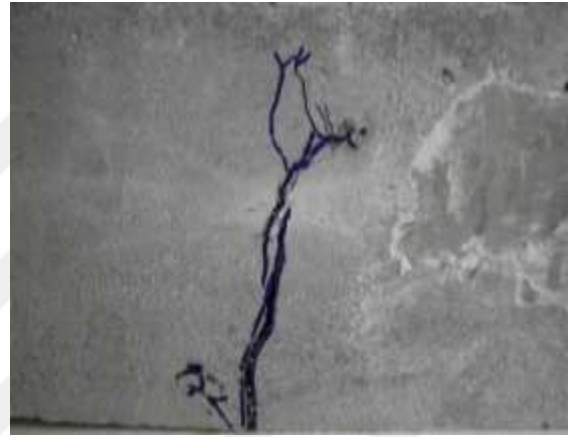
(f) MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25



(g) MAK0.75+MİK0.25+PP0.25



(h) MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25



(i) MAK0.50+MİK0.50+PP0.25

**Şekil A.1 :** Oda sıcaklığında bekletilmiş numunelerin dört noktalı eğilmeye maruz bırakıldıktan sonra oluşan çatlak davranışı görselleri.



(a) MAK1.00



(b) MAK1.00+PVA0.25



(c) MAK1.00+PP0.25



(d) MAK0.75+MIK0.25



(e) MAK0.50+MIK0.50



(f) MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25



(g) MAK0.75+MİK0.25+PP0.25



(h) MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25



(i) MAK0.50+MİK0.50+PP0.25

**Şekil A.2 :** 250 °C sıcaklıkta bekletilmiş numunelere ait dört noktalı eğilmeye maruz bırakıldıktan sonra oluşan çatlak davranışı görselleri.



(a) MAK1.00



(b) MAK1.00+PVA0.25



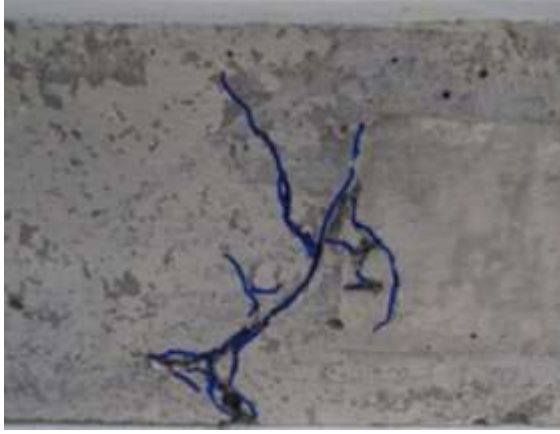
(c) MAK1.00+PP0.25



(d) MAK0.75+MİK0.25



(e) MAK0.50+MİK0.50



(f) MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25



(g) MAK0.75+MİK0.25+PP0.25



(h) MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25



(i) MAK0.50+MİK0.50+PP0.25

**Şekil A.3 :** 500 °C sıcaklıkta bekletilmiş numunelere ait dört noktalı eğilmeye maruz bırakıldıktan sonra oluşan çatlak davranışı görselleri.



(a) MAK1.00



(b) MAK1.00+PVA0.25



(c) MAK1.00+PP0.25



(d) MAK0.75+MIK0.25



(e) MAK0.50+MIK0.50



(f) MAK0.75+MİK0.25+PVA0.25



(g) MAK0.75+MİK0.25+PP0.25



(h) MAK0.50+MİK0.50+PVA0.25



(i) MAK0.50+MİK0.50+PP0.25

**Şekil A.4 :** 750 °C sıcaklıkta bekletilmiş numunelere ait dört noktalı eğilmeye maruz bırakıldıktan sonra oluşan çatlak davranışı görselleri.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad** : Esmâ ATALAY  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Malatya – 15.06.1994  
**E-Posta** : esmaatalayinsaatt@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2020, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

### Mesleki Deneyim ve Ödüller:

**Pozisyon** : İnşaat Mühendisi/ Kontrol Elemanı  
**Firma** : Eroğlu Yapı Denetim LTD.ŞTİ.

### Yayın Listesi:

**Türk, K. ve Atalay, E. (2019).** The Properties Of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete With Different Type Micro Fiber. 4.Uluslararası Enerji ve Mühendislik Kongresi. UEMK 2019 Proceedings Book, 24/25 October 2019 Gaziantep University, TURKEY, pp.1040-1051.[http://uemk.gantep.edu.tr/upload/files/UEMK2019-Book3\\_compressed%20\(1\)-928-1399.pdf](http://uemk.gantep.edu.tr/upload/files/UEMK2019-Book3_compressed%20(1)-928-1399.pdf)