



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK FİBER VE POLİPROPİLEN FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YÜKSEK  
PERFORMANSLI BETON ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE SİLİS DUMANI VE  
METAKAOLİNİN ETKİSİ

FARUK SOYSAT

Eylül 2019



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK FİBER VE POLİPROPİLEN FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YÜKSEK  
PERFORMANSLI BETON ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE SİLİS DUMANI VE  
METAKAOLİNİN ETKİSİ

FARUK SOYSAT

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Eylül 2019

Faruk SOYSAT tarafından Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR danışmanlığında hazırlanan “Çelik Fiber ve Polipropilen Fiberle Güçlendirilmiş Yüksek Performanslı Beton Özellikleri Üzerine Silis Dumanı ve Metakaolinin Etkisi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. İbrahim Özgür DENEME, Aksaray Üniversitesi

ONAY:

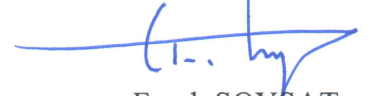
Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun ....../...../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Murat BARUT  
MÜDÜR

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Faruk SOYSAT

## ÖZET

### ÇELİK FİBER VE POLİPROPİLEN FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YÜKSEK PERFORMANSLI BETON ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE SİLİS DUMANI VE METAKAOLİNİN ETKİSİ

SOYSAT, Faruk  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği AnaBilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR  
Eylül 2019, 137 sayfa

Bu yüksek lisans tezinde, yüksek sıcaklıklara ve donma-çözünme döngüsüne maruz kalan metakaolin (MK), silis dumanı (SD) ve MK+SD içeren hibrit fiberle güçlendirilmiş yüksek dayanımlı betonların (HFGYDB) mekanik ve mikroyapısal özellikleri araştırılmıştır. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz beton karışımlarında, MK, SD ve MK+SD ağırlıkça çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. 0.25 su-bağlayıcı oranı ile toplam yirmi sekiz beton karışımı hazırlanmıştır. Ortam ve yüksek sıcaklıklara (300, 400 ve 500 °C) maruz kalan HFGYDB'ların ultrases geçiş hızı ( $U_{pv}$ ), basınç dayanımı ( $f_c$ ), yarmada çekme dayanımı ( $f_{sts}$ ) ve eğilme dayanımı ( $f_s$ ) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca donma-çözünme döngüsüne maruz kalan HFGYDB'ların ( $U_{pv}$ ) ve ( $f_c$ ) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dahası, ortam sıcaklığına, yüksek sıcaklıklara ve donma-çözünme döngüsüne maruz kalan hibrit fibersiz betonların matris arayüzey ve agregasındaki değişiklikler taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ve polarize ışık mikroskobu (PLM) ile analiz edildi. MK, SD ve MK+SD yer değişim seviyelerinin yüksek dayanımlı betonların mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu test sonuçları göstermiştir. Dahası hibrit fiberli betonların  $f_c$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_s$  değerlerinin, diğer betonların  $f_c$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_s$  değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_s$  değerlerinin sıcaklık artışı ile azaldığı görülmüştür.

*Anahtar Sözcükler:* Metakaolin, Silis dumanı, Hibrit fiberle güçlendirilmiş yüksek dayanımlı beton, Yüksek sıcaklık, Donma-çözünme döngüsü, Mekanik ve mikroyapısal özellikler

## SUMMARY

### EFFECT OF SILICA FUME AND METAKAOLIN ON THE PROPERTIES OF STEEL FIBER AND POLYPROPYLENE FIBER REINFORCED HIGH PERFORMANCE CONCRETE

SOYSAT, Faruk  
Nigde Omer Halisdemir University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor: Professor Dr. Mustafa SARIDEMİR

September 2019, 137 pages

In the master thesis, mechanical and microstructural properties of hybrid fibers reinforced high strength concretes (HFRHSCs) containing metakaolin (MK) and metakaolin + silica fume (MK + SF) subjected to elevated temperatures and freezing-thawing (F-T) cycles were investigated in this paper. In the concrete mixtures without and with hybrid fibers, MK, SF and MK + SF were replaced with eight percentage of cement by weight. A total of twenty eight concrete mixtures were produced at a water-to-binder ratio of 0.25. Ultrasound pulse velocity ( $U_{pv}$ ), compressive strength ( $f_c$ ), splitting tensile strength ( $f_{sts}$ ) and flexural strength ( $f_{fs}$ ) tests were performed to evaluate the properties of HFRHSCs subjected to ambient and elevated temperatures (300, 400 and 500 °C). The  $U_{pv}$  and  $f_c$  tests of HFRHSCs subjected to F-T cycles were also conducted. Moreover, the alterations in the matrix, interface zone and aggregate of concretes without hybrid fibers subjected to ambient temperature, elevated temperatures and F-T cycles were analyzed by scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and polarized light microscope (PLM). The results of tests have shown that the replacement levels of MK and MK + SF have important influences on the mechanical and microstructural properties of high strength concretes. Moreover, the mechanical results have shown that the concretes with hybrid fibers have higher  $f_c$ ,  $f_{sts}$  and  $f_{fs}$  than other concretes. The results have also shown that the  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{sts}$  and  $f_{fs}$  values of concretes without and with hybrid fibers decrease, as the temperature increases.

*Keywords:* Metakaolin, Silica fume, Hybrid fiber reinforced high strength concrete, Elevated temperature, Freezing-thawing cycles, mechanical and microstructural properties,

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, çimento yerine belirli oranlarda silis dumanı, metakaolin ve metakaolin+silis dumanı kullanılan çelik fiber ve polipropilen fiberle güçlendirilmiş yüksek performanslı betonun mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada, yüksek performanslı taze betonun birim ağırlık ve çökme değerleri araştırılmıştır. Sertleşmiş beton özelliklerinden basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu tez çalışmasında silis dumanı, metakaolin ve silis dumanı + metakaolinin birlikte kullanıldığı bütün karışımlarda düşük su-bağlayıcı oranında yüksek performanslı beton elde edilebileceği gözlenmiştir.

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasının yürütülmesi sırasında, çalışmalarına yol gösteren, yardımlarını, değerli deneyim ve bilgilerini benden esirgemeyen danışman hocam, sayın Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR'e teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimim süresince maddi ve manevi her desteği sağlayan aileme teşekkür ederim. Ayrıca, Yüksek Lisans Tez çalışmamda bana destek olan Makine Mühendisi Osman Hasan YAŞAR'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|   |     |
|---|-----|
| ÖZET .....  | iv  |
| SUMMARY .....   | v   |
| ÖN SÖZ .....  | vi  |
| İÇİNDEKİLER .....   | vii |
| ÇİZELGELER .....  | x   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....   | xi  |
| FOTOĞRAFLAR VB. MALZEMELER DİZİNİ .....                               | xiv |
| SİMGE VE KISALTMALAR .....  | xv  |
| BÖLÜM I GİRİŞ .....   | 1   |
| BÖLÜM II GENEL BİLGİLER VE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR .....                  | 5   |
| 2.1 Silis Dumanı .....  | 5   |
| 2.1.1 Silis dumanının yapısı.....                                     | 7   |
| 2.1.2 Silis dumanının kimyasal yapısı .....                           | 7   |
| 2.1.3 Silis dumanının aktivitesi .....                                | 8   |
| 2.1.4 Silis dumanının çimento ve beton üretiminde kullanılması .....  | 9   |
| 2.1.5 Silis dumanının beton özelliklerine etkisi.....                 | 11  |
| 2.1.5.1 Silis dumanının betonun basınç dayanımına etkisi .....        | 11  |
| 2.1.5.2 Silis dumanının betonun eğilme dayanımına etkisi.....         | 13  |
| 2.1.5.3 Silis dumanının betonun yarmada çekme dayanımına etkisi ..... | 14  |
| 2.1.6 Silis Dumanı ile yapılmış çalışmalar .....                      | 15  |
| 2.2 Metakaolin .....  | 19  |
| 2.2.1 Metakaolinin yapısı .....                                       | 20  |
| 2.2.2 Metakaolinin kimyasal yapısı.....                               | 21  |
| 2.2.3 Metakaolinin aktivitesi .....                                   | 21  |
| 2.2.4 Metakaolinin çimento ve betonda kullanılması.....               | 22  |
| 2.2.5 Metakaolinin beton özelliklerine etkisi .....                   | 23  |
| 2.2.5.1 Metakaolinin betonun basınç dayanımına etkisi .....           | 28  |
| 2.2.5.2 Metakaolinin betonun eğilme dayanımına etkisi .....           | 30  |
| 2.2.5.3 Metakaolinin betonun yarmada çekme dayanımına etkisi .....    | 31  |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.2.6 Metakalon ile yapılmış çalışmalar.....                                  | 32        |
| <b>BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>                                       | <b>43</b> |
| 3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri.....                                       | 43        |
| 3.1.1 Çimento.....  | 43        |
| 3.1.2 Silis dumanı .....  | 43        |
| 3.1.3 Metakaolin .....  | 45        |
| 3.1.4 Çelik fiber .....   | 45        |
| 3.1.5 Polipropilen fiber .....  | 45        |
| 3.1.6 Agregası.....   | 46        |
| 3.1.7 Süper akışkanlaştırıcı.....   | 47        |
| 3.1.8 Karışım suyu.....   | 48        |
| 3.2 Beton Karışım Oranları.....   | 48        |
| 3.3 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları ..... | 50        |
| 3.4 Taze Beton Deneyleri .....  | 53        |
| 3.4.1 Çökme (Slump).....  | 53        |
| 3.4.2 Taze birim ağırlık .....  | 53        |
| 3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri .....  | 54        |
| 3.5.1 Sertleşmiş birim ağırlık.....   | 54        |
| 3.5.2 Ultrases geçiş hızı .....   | 55        |
| 3.5.3 Basınç dayanımı.....  | 56        |
| 3.5.4 Yarmada çekme dayanımı .....  | 58        |
| 3.5.5 Eğilme dayanımı .....   | 59        |
| 3.5.6 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık deneyi .....                      | 60        |
| 3.5.7 Donma-çözülme etkisine dayanıklılık deneyi .....                        | 61        |
| 3.6 Sertleşmiş Beton Özellikleri Arasındaki İlişkiler .....                   | 62        |
| 3.7 Mikroyapı Analizleri.....   | 62        |
| <b>BÖLÜM IV DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>                   | <b>64</b> |
| 4.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....                     | 64        |
| 4.1.1 Çökme (Slump).....  | 64        |
| 4.1.2 Taze birim ağırlık .....  | 64        |
| 4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....               | 67        |
| 4.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık.....   | 67        |
| 4.2.2 Ultrases geçiş hızı .....   | 68        |
| 4.2.3 Basınç dayanımı.....  | 73        |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2.4 Yarmada çekme dayanımı .....   | 80  |
| 4.2.5 Eğilme dayanımı .....  | 81  |
| 4.2.6 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık .....                                  | 83  |
| 4.3 Sertleşmiş Beton Özellikleri Arasındaki İlişkilerin değerlendirilmesi .....    | 98  |
| 4.3.1 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki.....               | 98  |
| 4.3.2 Basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki .....           | 98  |
| 4.3.3 Basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki .....                  | 99  |
| 4.3.4 Eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki .....           | 100 |
| 4.3.5 Fibersiz özellikler ile hibrit fiberli özellikler arasındaki ilişkiler ..... | 100 |
| 4.4 Mikroyapı Analizleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....                      | 102 |
| BÖLÜM V SONUÇLAR.....  | 113 |
| KAYNAKLAR .....  | 115 |
| ÖZ GEÇMİŞ .....  | 136 |
| TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER .....   | 137 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| Çizelge 2.1. SD içeren yüksek dayanımlı beton karışım örnekleri.....                            | 10 |
| Çizelge 2.2. Yüksek dayanıma sahip beton karışım örnekleri.....                                 | 10 |
| Çizelge 2.3. MK'nin bazı fiziksel yapıları.....   | 21 |
| Çizelge 2.4. MK içeren betonların priz süresi ve slump değerleri .....                          | 24 |
| Çizelge 2.5. MK içeren harçların priz alma süresi ve su ihtiyacı .....                          | 25 |
| Çizelge 2.6. Numunelerde bulunan gözenekler .....   | 27 |
| Çizelge 2.7. MK içeren betonların yoğunlukları ve basınç dayanımları .....                      | 29 |
| Çizelge 2.8. Betonun basınç dayanımına MK ve SD katkısının etkisi .....                         | 30 |
| Çizelge 2.9. MK katkılı beton numunelerin $f_{sts}$ değerleri .....                             | 32 |
| Çizelge 2.10. MK katkılı betonlar basınç dayanım ve elastisite modülü .....                     | 33 |
| Çizelge 2.11. MK katkılı betonların eğilme dayanımı.....  | 33 |
| Çizelge 2.12. MK içeren karışımlardaki küçük gözenek miktarı .....                              | 34 |
| Çizelge 2.13. MK içeren karışımlarda gözenek hacmi .....  | 34 |
| Çizelge 2.14. Hızlı klor geçirgenliği ve direnç değerleri.....                                  | 36 |
| Çizelge 2.15. MK ve ÖP'li numunelerin basınç dayanımı .....                                     | 40 |
| Çizelge 2.16. Betonda MK katkısının basınç dayanımına etkisi .....                              | 41 |
| Çizelge 3.1. Çimento esaslı malzemelerin özellikleri.....                                       | 44 |
| Çizelge 3.2. Hibrit fiberlerin özellikleri.....   | 45 |
| Çizelge 3.3. Agregaların fiziksel özellikleri .....   | 46 |
| Çizelge 3.4. Standart sınırlar ve toplam agregaların elek analizi .....                         | 47 |
| Çizelge 3.5. Süper akışkanlaştırıcının özellikleri .....  | 48 |
| Çizelge 3.6. Bir metreküp yüksek dayanımlı beton karışımı için malzeme miktarları               | 50 |
| Çizelge 4.1. $U_{pv}$ değerlerine göre belirlenen beton kalitesi .....                          | 73 |
| Çizelge 4.2. MK ve MK+SD içeren betonların normalize edilmiş mekanik özellikleri                | 75 |
| Çizelge 4.3. SD ve SD+MK içeren betonların normalize edilmiş mekanik özellikleri                | 78 |
| Çizelge 4.4. MK ve MK+SD içeren betonların normalize edilmiş $U_{pv}$ ve $f_c$ değerleri        | 89 |
| Çizelge 4.5. SD ve SD+MK içeren betonların normalize edilmiş $U_{pv}$ ve $f_c$ değerleri..      | 90 |
| Çizelge 4.6. MK ve MK+SD içeren betonların normalize edilmiş $f_{sts}$ ve $f_{fs}$ değerleri.   | 95 |
| Çizelge 4.7. SD ve SD+MK içeren betonların normalize edilmiş $f_{sts}$ ve $f_{fs}$ değerleri .. | 97 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| Şekil 3.1. Beton karışımlarında kullanılan agreganın elek analizi .....  | 47 |
| Şekil 4.1. Fibersiz MK ve MK+SD betonların birim ağırlıkları.....  | 65 |
| Şekil 4.2. Hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların birim ağırlıkları. ....                                       | 65 |
| Şekil 4.3. Fibersiz SD ve SD+MK betonların birim ağırlıkları .....   | 66 |
| Şekil 4.4. Hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların birim ağırlıkları.....  | 66 |
| Şekil 4.5. Fibersiz MK ve MK+SD betonların $U_{pv}$ değerleri .....  | 69 |
| Şekil 4.6. Hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların $U_{pv}$ değerleri. ....                                      | 70 |
| Şekil 4.7. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK betonların $U_{pv}$ değerlerinin üç boyutlu değişimi.....     | 70 |
| Şekil 4.8. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK+SD betonların $U_{pv}$ değerlerinin üç boyutlu değişimi.....  | 70 |
| Şekil 4.9. Fibersiz SD ve SD+MK betonların $U_{pv}$ değerleri.....   | 72 |
| Şekil 4.10. Hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların $U_{pv}$ değerleri .....                                     | 72 |
| Şekil 4.11. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD betonların $U_{pv}$ değerlerinin üç boyutlu değişimi.....    | 72 |
| Şekil 4.12. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD+MK betonların $U_{pv}$ değerlerinin üç boyutlu değişimi..... | 73 |
| Şekil 4.13. Fibersiz MK ve MK+SD betonların $f_c$ değerleri. ....  | 75 |
| Şekil 4.14. Hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların $f_c$ değerleri. ....  | 76 |
| Şekil 4.15. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK betonların $f_c$ değerlerinin üç boyutlu değişimi.....       | 76 |
| Şekil 4.16. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK+SD betonların $f_c$ değerlerinin üç boyutlu değişimi.....    | 76 |
| Şekil 4.17. Fibersiz SD ve SD+MK betonların $f_c$ değerleri.....   | 78 |
| Şekil 4.18. Hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların $f_c$ değerleri. ....  | 79 |
| Şekil 4.19. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD betonların $f_c$ değerlerinin üç boyutlu değişimi.....       | 79 |
| Şekil 4.20. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD+MK betonların $f_c$ değerlerinin üç boyutlu değişimi.....    | 79 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.21. Fibersiz ve hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların $f_{sts}$ değerleri .....  | 80 |
| Şekil 4.22. Fibersiz ve hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların $f_{sts}$ değerleri.....   | 81 |
| Şekil 4.23. Fibersiz ve hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların $f_{fs}$ değerleri.....  | 82 |
| Şekil 4.24. Fibersiz ve hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların $f_{fs}$ değerleri.....  | 83 |
| Şekil 4.25. Sıcaklık etkisi altında fibersiz MK ve MK+SD betonların $U_{pv}$ değerleri.....  | 85 |
| Şekil 4.26. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli MK ve MK ve MK+SD betonların $U_{pv}$<br>değerleri .....  | 85 |
| Şekil 4.27. Sıcaklık etkisi altında fibersiz MK ve MK+SD betonların $f_c$ değerleri.....   | 85 |
| Şekil 4.28. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların $f_c$ değerleri  | 86 |
| Şekil 4.29. Yüksek ısıda (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların $f_c$<br>değerleri .....  | 86 |
| Şekil 4.30. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK ve<br>MK+SD betonların $f_c$ değerlerinin üç boyutlu değişimi.....  | 86 |
| Şekil 4.31. Sıcaklık etkisi altında fibersiz SD ve SD+MK betonların $U_{pv}$ değerleri.....  | 88 |
| Şekil 4.32. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların $U_{pv}$ değerleri   | 88 |
| Şekil 4.33. Sıcaklık etkisi altında fibersiz SD ve SD+MK betonların $f_c$ değerleri.....   | 88 |
| Şekil 4.34. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların $f_c$ değerleri .  | 89 |
| Şekil 4.35. Sıcaklık etkisine maruz kalan (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD ve<br>SD+MK betonların $U_{pv}$ değerlerinin üç boyutlu değişimi.....      | 89 |
| Şekil 4.36. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD<br>ve SD+MK betonların $f_c$ değerlerinin üç boyutlu değişimi ..... | 90 |
| Şekil 4.37. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan fibersiz MK ve MK+SD betonların<br>$U_{pv}$ ve $f_c$ değerleri arasındaki ilişki .....                    | 91 |
| Şekil 4.38. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan hibrit fiberli MK ve MK+SD<br>betonların $U_{pv}$ ve $f_c$ değerleri arasındaki ilişki.....               | 91 |
| Şekil 4.39. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan fibersiz SD ve SD+MK betonların<br>$U_{pv}$ ve $f_c$ değerleri arasındaki ilişki .....                    | 92 |
| Şekil 4.40. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan hibrit fiberli SD ve SD+MK<br>betonların $U_{pv}$ ve $f_c$ değerleri arasındaki ilişki.....               | 92 |
| Şekil 4.41. Sıcaklık etkisi altında fibersiz MK ve MK+SD betonların $f_{sts}$ değerleri.....   | 93 |
| Şekil 4.42. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların $f_{sts}$ değerleri  | 94 |
| Şekil 4.43. Sıcaklık etkisi altında fibersiz MK ve MK+SD betonların $f_{fs}$ değerleri.....  | 94 |
| Şekil 4.44. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların $f_{fs}$ değerleri.  | 94 |
| Şekil 4.45. Sıcaklık etkisi altında fibersiz SD ve SD+MK betonların $f_{sts}$ değerleri .....  | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 4.46. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların $f_{sts}$ değerleri   | 96  |
| Şekil 4.47. Sıcaklık etkisi altında fibersiz SD ve SD+MK betonların $f_{fs}$ değerleri .....  | 97  |
| Şekil 4.48. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların $f_{fs}$ değerleri.   | 97  |
| Şekil 4.49. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların $U_{pv}$ ve $f_{fs}$ değerleri arasındaki ilişki .....                           | 98  |
| Şekil 4.50. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların $f_{sts}$ ve $f_c$ değerleri arasındaki ilişki .....                             | 99  |
| Şekil 4.51. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların $f_{fs}$ ve $f_c$ değerleri arasındaki ilişki .....                              | 99  |
| Şekil 4.52. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların $f_{sts}$ ve $f_{fs}$ değerleri arasındaki ilişki .....                          | 100 |
| Şekil 4.53. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların fibersiz $U_{pv}$ ve hibrit fiberli $U_{pv}$ değerleri arasındaki ilişki .....   | 101 |
| Şekil 4.54. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların fibersiz $f_c$ ve hibrit fiberli $f_c$ değerleri arasındaki ilişki .....         | 101 |
| Şekil 4.55. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların fibersiz $f_{sts}$ ve hibrit fiberli $f_{sts}$ değerleri arasındaki ilişki ..... | 101 |
| Şekil 4.56. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların fibersiz $f_{fs}$ ve hibrit fiberli $f_{fs}$ değerleri arasındaki ilişki .....   | 102 |

## FOTOĞRAFLAR VB. MALZEMELER DİZİNİ

|  |     |
|--|-----|
| Fotoğraf 2.1. MK'nin SEM fotoğrafı ile büyütülmüş hali.....                            | 20  |
| Fotoğraf 3.1. Beton karışımlarda kullanılan mineral katkı ve hibrit fiber .....        | 44  |
| Fotoğraf 3.2. Taze beton üretimi görünümü .....  | 51  |
| Fotoğraf 3.3. Taze betonun kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırılması.....            | 52  |
| Fotoğraf 3.4. Kalıplara yerleştirilmiş taze ve sertleşmiş beton.....                   | 52  |
| Fotoğraf 3.5. İsimlendirilmiş ve kür uygulanan beton örnekleri .....                   | 52  |
| Fotoğraf 3.6. Sertleşmiş beton birim ağırlık deneyi .....                              | 55  |
| Fotoğraf 3.7. Beton üzerinde $U_{pv}$ deneyinin yapılışı .....                         | 56  |
| Fotoğraf 3.8. Beton üzerinde $f_c$ deneyinin yapılışı .....                            | 57  |
| Fotoğraf 3.9. $f_c$ deneyi sonucunda kırılmış numune örnekleri.....                    | 57  |
| Fotoğraf 3.10. Beton üzerinde $f_{sts}$ deneyinin yapılışı ve kırılmış numuneler ..... | 58  |
| Fotoğraf 3.11. Beton üzerinde $f_{fs}$ deneyinin yapılışı.....                         | 59  |
| Fotoğraf 3.12. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan MK ve MK+SD serisi betonlar ..     | 61  |
| Fotoğraf 3.13. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan SD ve SD+MK serisi betonlar....    | 61  |
| Fotoğraf 3.14. MK ve MK+SD serisi betonların PLM analizi için ince kesit örnekleri     | 63  |
| Fotoğraf 3.15. SD ve SD+MK serisi betonların PLM analizi için ince kesit örnekleri..   | 63  |
| Fotoğraf 4.1. K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu betonların SEM analizi.....                    | 103 |
| Fotoğraf 4.2. K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu betonların EDS nokta analizi .....             | 104 |
| Fotoğraf 4.3. K, 15SD ve 10SD+5MK kodlu betonların SEM analizi.....                    | 105 |
| Fotoğraf 4.4. K, 15SD ve 10SD+5MK kodlu betonların EDS nokta analizi.....              | 106 |
| Fotoğraf 4.5. K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu betonların matrislerinin PLM analizi ..        | 108 |
| Fotoğraf 4.6. K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu betonların ara yüzeyinin PLM analizi.          | 109 |
| Fotoğraf 4.7. K, 15SD ve 10SD+5MK kodlu betonların matrislerinin PLM analizi ...       | 111 |
| Fotoğraf 4.8. K, 15SD ve 10SD+5MK kodlu betonların ara yüzeyinin PLM analizi ..        | 112 |

## SİMGE VE KISALTMALAR

| <b>Simgeler</b> | <b>Açıklama</b>             |
|-----------------|-----------------------------|
| $\Delta$        | Taze betonun birim ağırlığı |
| $\mu s$         | Mikro saniye                |
| %               | Yüzde                       |
| $^{\circ}C$     | Santigrat derece            |
| $\mu m$         | Mikrometre                  |
| $\Omega$        | Ohm                         |
| $\pi$           | Pi sayısı                   |
| >               | Büyük                       |
| <               | Küçük                       |
| $\Delta Q$      | Değiştirilmiş kuvars        |
| /               | Bölme                       |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>        |
|--------------------|------------------------|
| ASTM               | Amerikan Standartları  |
| A                  | Küp Numunenin Uzunluğu |
| Au                 | Altın                  |
| b                  | Numune Eni             |
| BA                 | Bazalt Agregası        |
| Ca                 | Kalsiyum               |
| cm                 | Santimetre             |
| CH                 | Kalsiyum Hidroksit     |
| CSH                | Kalsiyum Silika Hidrat |
| C <sub>3</sub> A   | Trikalsiyum Alüminat   |
| d                  | Numune Yüksekliği      |
| dk                 | Dakika                 |
| DK                 | Doğal Kum              |

|           |  |
|-----------|--|
| DK-I      | Doğal Kum-I  |
| dm        | Desimetre  |
| EDS       | Enerji Dağılım Spektroskopi                          |
| $E_c$     | Statik Elastisite Modülü                             |
| $E_d$     | Dinamik Elastisite Modülü                            |
| Fel       | Feldspar   |
| $f_c$     | Basınç Dayanımı                                      |
| $f_{fs}$  | Eğilme Dayanımı                                      |
| $f_{sts}$ | Yarmada Çekme Dayanımı                               |
| FrM       | Ferromagnezyum                                       |
| FeSi      | Ferrosilisyum  |
| g         | Gram   |
| gmol      | Grammol  |
| GPa       | Gigapascal   |
| HF        | Hibrit Fiber   |
| HFGYDB    | Hibrit Fiberle Güçlendirilmiş Yüksek Dayanımlı Beton |
| k         | Katsayı  |
| kg        | Kilogram   |
| km        | Kilometre  |
| kN        | Kilonewton   |
| KT-I      | Kırmataş I   |
| KT-II     | Kırmataş II  |
| KK- I     | Kırılmış Kalker I                                    |
| KK- II    | Kırılmış Kalker II                                   |
| L         | Numune Uzunluğu                                      |
| LA        | Kireçtaşı Agrega                                     |
| lt        | Litre  |
| M         | Matriks  |
| m         | Metre  |
| mg        | Miligram   |
| mm        | Milimetre  |
| MK        | Metakaolin   |
| MPa       | Megapascal   |
| N         | Kırılmaya Neden Olan Yük                             |

|                 |  |
|-----------------|--|
| NaO             | Sodyum Karbonat  |
| nm              | Nanometre  |
| O               | Oksijen  |
| ÖP              | Öğütölmüş Pomza  |
| P               | Taze Beton Ağrlığı   |
| Plj             | Plajiyoklaz  |
| PLM             | Polarize Işık Mikroskobu   |
| Q               | Kuartz   |
| R <sup>2</sup>  | Düzeltilmiş Korelasyon Katsayısı                                 |
| s               | Saniye   |
| S               | Dalganın Gönderildiği Yüzey ile Alındığı Yüzey Arasındaki Mesafe |
| SD              | Silis Dumanı   |
| SEM             | Elektron Mikroskobu  |
| Si              | Silisyum   |
| TS              | Türk Standartları  |
| t               | Süre ve Ton  |
| UK              | Uçucu Kül  |
| U <sub>pv</sub> | Ultrases Geçiş Hızı  |
| vd.             | Ve Diğerleri   |
| V <sub>h</sub>  | Taze Betonun Hacmi   |

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Son yıllarda, metakaolin (MK), silis dumanı (SD), uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları, yüksek performanslı ve mukavemetli beton üretiminde kullanılır. Bu tür mineral katkıları, belirli oranlarda çimento yerine beton karışımlarında ağırlıkça kullanıldığı zaman ekstra performans ve dayanım sağlar. Ayrıca, bu katkıları donma-çözülme (Mardani vd., 2013; Mardani vd., 2014) sülfat krizi (Mardani vd., 2013; Vuk vd., 2002; Atahan vd., 2011), asit krizi (Aydın vd., 2007), alkali-agrega reaksiyonu (Shafaatina vd., 2013) ve korozyon (Shia vd., 2011) gibi betonun dayanıklılık özelliklerini geliştirmek için de kullanılır. Özellikle, bu mineral katkıların ekstra dayanım ve dayanıklılık sağlaması, bu katkıların  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girmesiyle üretilen ekstra kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelinden kaynaklanmaktadır (Neville vd., 1996; Mermerdaş vd., 2012; Sarıdemir vd., 2016). Ayrıca, bu özelliklerin iyileştirilmesi, bu malzemelerin doldurma etkisinden dolayı mikro yapıdaki gözeneklilik ve gözenek büyüklüğü dağılımının azaltılması ile de sağlanır (Sarıdemir vd., 2016; Khatib vd., 2013; Henry vd., 2014). Dahası, beton karışımlarında mineral katkıların çimento yer değiştirme malzemesi olarak kullanılması, çevre kirliliğinin azalması, enerji tasarrufu ve maliyetin azalması ile tüm dünya için önemli avantajlar sağlamaktadır (Mehta, 1999; Hossain, 2006; Ghrici vd., 2007).

MK, alümina silikat bazlı bir amorf malzemedir. Yüksek derecede aktif olan kaolin kilinin yaklaşık olarak 500 ile 950 °C arasında bir sıcaklıkta kalsine edilmesiyle üretilir (Ganesan vd., 2007; Kannan vd., 2014; Khatib vd., 2009; Khatib vd., 2005). Kaolin kilinin termal olarak aktifleştirilme işlemi genellikle kimyasal bileşenlerine bağlıdır (Kakali vd., 2001; Shvarzman vd., 2003; Güneyisi vd., 2012). Karakteristik olarak, MK malzemesinin  $\text{SiO}_2$  içeriği %50 ile 70 aralığındadır (Güneyisi vd., 2012; Poon vd., 2006). Yapay puzolanlardan biri olarak bilinen SD, ferrosilikon ve silikon metal endüstrilerinin bir yan ürünüdür (Mardani vd., 2014; Zhang vd., 2013). SD malzemesi %85 ile 98 oranında amorf  $\text{SiO}_2$  içerir ve çimento parçacıklarıyla karşılaştırıldığında ultra ince parçacıklardan oluşur (Mardani vd., 2014; Köksal vd., 2008; Zhang vd., 2013). Özellikle, bu puzolonların çimento ile yer değiştirilerek beton karışımlarında kullanılması, agrega ile matris arasındaki ara yüzey bölgesinde dikkate değer iyileştirmeler yapmasından

dolayı, geçirimsiz, yüksek dayanımlı ve dayanıklı beton üretiminde önemli bir yere sahiptir. Bu durum, SD ve MK malzemelerinin dolgu etkilerinin pozolanik etkisinden daha baskın olduğunu göstermektedir (Zhang vd., 2013; Köksal vd., 2008). Dahası, SD ve MK malzemeleri ultra ince parçacıklardan oluştuğundan dolayı, ara yüzey bölgesi daha yoğun hale gelir ve böylece çimento macunu ile agrega arasındaki bağ kuvveti artar (Köksal vd., 2008; Aitcin 1998). Bu nedenle yüksek performanslı ve dayanımlı beton üretiminde çimento yerine kullanılırlar (Khatib vd., 2009). Son yıllarda, fiber tiplerinin birçoğu, betonun mekanik ve yapısal özelliklerini geliştirmek için tekli veya ikili olarak kullanılmıştır (Fanella vd., 1985; Holschemacher vd., 2010). Beton karışımlarına fiber eklenerek geliştirilen özellikler arasında basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, kayma dayanımı, darbe dayanımı, eğilme tokluğu, elastisite modülü ve dayanıklılık sayılabilir (Fanella vd., 1985; Holschemacher vd., 2010; Mohammadi vd., 2008; Atiş vd., 2009). Dahası, beton karışımlarına fiber eklenmesi, daha yüksek enerji yutma kapasitesi ile yapıların daha sünek ve daha az büzülmesine neden olmaktadır (Atiş vd., 2009; Giner vd., 2009). Genel olarak, bu özelliklerin gelişimi ve artması, ilave edilen liflerin miktarına, türüne, boyutuna, geometrisine, dağılımına, konsantrasyonuna ve yönüne bağlıdır (Fanella vd., 1985; Holschemacher vd., 2010). Beton karışımlarına eklenen fiberlerin optimum hacim oranı genellikle toplam beton hacminin %0.5 ile %2.5'i arasında değişmektedir (Atiş vd., 2009; Yazıcı vd., 2007).

Beton ve betonarme yapılar hizmet ömrü boyunca yangın, HT, F-T, dinamik yükler, aşınma ve kimyasal ortam gibi olumsuz etkilere maruz kalabilir (Düğenci vd., 2015; Jeyaprabha vd., 2016). Bu tür etkilere maruz kalan betonların mekanik ve dayanıklılık özellikleri, yapıların bakımı ve güvenliği açısından büyük öneme sahiptir. Özellikle, betonun diğer inşaat malzemeleriyle karşılaştırıldığında yangına dayanıklı bir yapı malzemesi olduğu bilinmesine rağmen, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında fiziksel özelliklerinde ve kimyasal bileşiminde önemli değişiklikler meydana gelir (Wu vd., 2014). Bu değişiklikler yüksek sıcaklığa maruz kalma süresine, ulaşılan maksimum sıcaklığa, ısıtma hızına ve soğutma oranına bağlıdır (Biolzi vd., 2013). Betonun türü ve betonun nem içeriği de bu değişimler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Awal vd., 2015). Betonlarda ve betonarme yapılarda meydana gelen bu değişikliklerin etkileri; mikro ve makro çatlama, renk değişimi, dağılma, gözeneklerde artış,  $Ca(OH)_2$ , CSH jelleri ve diğer çimentolu ürünlerin oksidasyonu ve dehidrasyonu şeklindedir (Biolzi vd., 2013; Alonso vd., 2004). Betonun mikroyapı, dayanıklılık ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde

etkilerler. Eğer beton yaklaşık 200 °C'ye kadar olan sıcaklıklara maruz kalırsa, etrenjitin yapısı (Li vd., 2017) parçalanır, betondaki serbest su buharlaşır ve betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlenmez. Ancak, eğer yüksek buhar basıncına neden olan ısıtma hızı yüksek ise, betonda mikro çatlaklar meydana gelebilir (Ergün vd., 2013). Eğer beton yaklaşık olarak 200 ile 400 ° C arasındaki sıcaklıklara maruz kalırsa, Ca(OH)<sub>2</sub>, CSH ve kalsiyum sülfö-alüminat hidrat jelleri içindeki ara tabaka ve bağlanmış su, buharlaşır ve betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler gözlenmeye başlar (Nadeem vd., 2013). Eğer beton yaklaşık 350 ile 550 °C arasındaki sıcaklıklara maruz kalırsa, Ca(OH)<sub>2</sub> kalsiyum oksit ve su olarak ayrışır ve bu sıcaklıklarda C-S-H jelleri tamamen dehidrate olur ve 700 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise ayrışır. Betonun fiziksel, mikroyapısal ve mekanik özellikleri 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bozulmaya başlar. Ancak bozulma oranı, beton karışımının hacminin %70-80' ini oluşturan agrega özelliklerine ve tipine göre farklılık gösterir (Kou vd., 2014; Horszczaruk vd., 2017). Beton yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, agrega hacimleri artar ve etrafındaki matris sarmanına baskı oluşturur (Hager, 2013). Agregaların ısı özellikleri, betonun ısıl iletkenliğini doğrudan etkiler. Mikroyapı özellikleri, gözeneklilik ve mineralojik kompozisyonlardaki farklılıklar nedeniyle, farklı agrega türleri çeşitli termal iletkenlik göstermektedir (Horszczaruk vd., 2017; Haneefa vd., 2013). Silis içeren agregalarda bozulmalar ve çatlaklar yaklaşık olarak 500 °C sıcaklıklarda ortaya çıkarken, karbonat içeren agregalarda yaklaşık ise 700 °C sıcaklıkta ortaya çıkarlar (Aydın vd., 2007; Chan vd., 2000). Yukarıdaki açıklamalar yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun en zayıf bileşenlerinin matris ve silis içeren agregalar olduğunu göstermektedir.

Çimento ağırlığına göre yer değiştirme malzemesi olarak kullanılan MK ve SD malzemelerinin, betonların mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Ancak, ortam sıcaklığına, yüksek sıcaklıklara ve donma-çözünme döngülerine maruz kalan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli yüksek dayanımlı betonların mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerine çimento yerine ağırlıkça kullanılan MK, SD ve MK+SD malzemelerin etkisinin araştırıldığı çok az çalışma vardır. Bundan dolayı, bu çalışmada, ortam ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan MK, SD ve MK+SD içeren hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ( $U_{pv}$ ), basınç dayanımı ( $f_c$ ), yarmada çekme dayanımı ( $f_{sts}$ ) ve eğilme dayanımı ( $f_{fs}$ ) sonuçları araştırılmıştır. Dahası, donma-çözünme döngüsüne maruz kalan MK, SD ve MK+SD içeren hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların ( $U_{pv}$ ) ve ( $f_c$ ) değerleri

araştırılmıştır. Ek olarak, ortam sıcaklığına (25 °C), 300, 400 ve 500 °C yüksek sıcaklıklara ve donma-çözünme döngülerine maruz bırakılan hibrit fibersiz betonların matris, arayüz bölgesi ve agregalarında meydana gelen değişiklikler, oksitlenmeler ve çatlaklar taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve polarize ışık mikroskobu (PLM) ile araştırıldı. Dahası, SEM analizi ile birlikte yapılan enerji dağılım spektroskopisi (EDS) nokta analizi ile de bu olumsuz etkilerden dolayı betonların kimyasal yapılarında meydana gelen değişiklikler incelendi.



## BÖLÜM II

### GENEL BİLGİLER VE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

#### 2.1 Silis Dumanı

Silis dumanı (SD) ince taneli nano boyutta tozdur. Bu toz ferrosilisyum (FeSi) alaşımı veya silisyum metallерinin üretimi esnasında elektrik ark fırınlarında saflık oranı yüksek kuvarsitin, odun parçacıkları ve kok kömürü ile redüksiyonu sonucunda ortaya çıkar. Yüksek sıcaklık etkisiyle gaz haline geçen SiO, daha düşük sıcaklığa sahip elektrik ark fırınının üst kısımlarında veya sisteme monta edilen kolektörlerde hızla okside olur. Bu oksitlenme sonucu tamamen amorf yapıda olan SiO<sub>2</sub>'in olarak yüzey alanı 220.000-300.000 cm<sup>2</sup>/g değerine ulaşır ve SD bileşiminin tamamına yakın kısmını oluşturur. SD tanelerinin büyük çoğunluğunun boyutu mikrometre olarak 0.1 ile 0.2 arasındadır. SD malzemesi 1969 yılında Norveç'te çimentoda katkı malzemesi olarak denenmiş, ancak beton akışkanlaştırıcıların kullanıma girmesiyle birlikte son yıllarda betonda katkı malzemesi olarak ya da çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ülke sınırları içerisinde Antalya ilinde bulunan Eti Elektrometalürji A.Ş. tesislerinde atık yan ürün olarak SD ortaya çıkmaktadır. SD ultra ince taneli, yani nano boyutta olduğu için depolaması ve nakliyesi sırasında dikkatli olunmalıdır. Özellikle boşaltma esnasında ince toz halinde bulunun SD etrafa kolayca yayılabilir. Piyasaya sunulması sırasında, böyle olumsuz durumların önlenmesi amacıyla içerisine ağırlıkça yaklaşık olarak %50 oranında su karıştırılabilir. Ayrıca bu durumdaki SD malzemesi variller vasıtasıyla taşınabilir. Ayrıca, SD ile çalışılan yerlerde ortamda bulunan toz parçacıkları en aza indirilmelidir ve bu ortamda çalışan kişilerin maske kullanarak gerekli önlemleri alması gerekir (Yeğınobalı, 2002; Yüzer, 1998; Kurt, 2007).

Yukarıda da belirtildiği gibi silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi sırasında meydana gelen gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılmasıyla elde edilen ve içerisinde %85 ile %98 oranları arasında silis bulunan amorf yapıya sahip çok ince nano boyutta katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış SD” veya kısaca “SD” adı verilir. SD yerine, bazı kaynaklarda “mikrosilis” veya “silis tozu” veya “silica füme” gibi değişik isimler de kullanılır. SD, amorf yapıda ve çok ince nano boyutta taneli

malzeme yapısına sahip olduğu için ve yüksek oranda SiO<sub>2</sub> içermesi nedeniyle, mükemmel bir puzolanik özellik gösteren malzemedir (Erdoğan, 2003; Güneşli, 2008). SD nano parçalara ve yüksek puzolanik reaktivite özelliğine sahip olduğu için, çok yüksek dayanıma sahip ( $\geq 100$  MPa) beton üretmek için ya da erken günlerde yüksek dayanıma sahip beton elde etmek için yüksek seviyede suyu azaltan özelliğe sahip süper akışkanlaştırıcı katkıları ile beraber karışımlarda kullanılabilir. Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi için kullanılan kuvars ve kömürün kompozisyonu, SD malzemesinin kimyasal özelliklerini ve kompozisyonunu büyük oranda etkiler (Güneşli, 2008; Malhotra, 1997).

Çimento ve beton üretimlerinde kullanılan enerjinin korunumu için yapılan son çalışmalar; uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve doğal puzolanlar gibi malzemelerin bu üretimlerde kullanılması üzerinde yoğunlaşmıştır. En son olarak üzerinde yoğunlaşılacak malzeme ise çimento üretiminde ya da beton karışımında çimento yerine belirli oranlarda bir mineral katkı maddesi olarak ilave edilebilen SD olmuştur (Malhotra ve Currence, 1982). SD çok etkili ve yüksek bir puzolanik aktiviteli malzeme yapısına sahip olmasına rağmen, beton üretiminde değerlendirildiği zaman birtakım problemler oluşturur (İlter, 2007; Yeğinoğlu, 2002). SD malzemesinin kullanılması esnasındaki zorluk, aşırı küçük taneli yapıya sahip olması ve çimentoyla karıştırıldığında su ihtiyacının yüksek olmasıdır. Yaklaşık olarak 1976 yılı itibarıyla kullanılmaya başlanan SD malzemesinin performansına ilişkin araştırmalar halen sürdürülmektedir (Malhotra ve Currence, 1982; İlter, 2007).

SD genellikle gri renkli nano boyutta tozudur. SD taneleri daha büyük çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurarak granülometriyi iyileştirir ve daha yoğun bir yapı oluşturur. Ancak bu olumlu etkiye rağmen, meydana getirdikleri çok büyük yüzey alanı net su ihtiyacını artırır. Çimento yerine yaklaşık %5 oranında SD katılması halinde su ilavesine gerek duyulmazken, daha fazla miktarlarda kullanılması akışkanlaştırıcı kullanılmasını gerektirir (Yeğinoğlu ve Erdoğan, 2001; Duman, 2010). Bu malzemenin çimento ve beton üretiminde kullanımı başta Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere tüm dünyada artmıştır. Bugün dünyanın hemen hemen her yerinde SD katkılı çimento ile üretilmiş önemli beton yapıları vardır (Duman, 2010; Güvercin, 2002).

### 2.1.1 Silis dumanının yapısı

Yüzey alanı yaklaşık olarak 220.000-300.000 cm<sup>2</sup>/g olan SD; nano boyutta, küresel tanecikli, düzgün yüzeyli ve amorf bir yapıda ortaya çıkmaktadır. Nano boyutta çok ince taneli ve hafif malzeme yapısına sahip olduğu için özgül yüzey bazında inceliğini tayin edebilmek için Blaine aleti kullanılır. Genellikle, nano boyuttaki malzemelerde özgül yüzey Azot Adsorpsiyon yöntemi ile belirlenir. Bu tür malzemelerde özgül yüzey, çok küçük yapıya sahip tanelerin dış yüzey ve bu tanelerin içinde bulunan açık boşlukların iç yüzeylerinden oluşan toplam alanları, 1 molekül kalınlığında bir tabaka ile kaplayan azot gazı miktarından hesaplanır. Bu özgül yüzey alanı ölçümü, nano boyuttaki çok küçük taneler arasından hava geçiş hızını esas alan Blaine yöntemi ile aynı olmadığı için iki yöntemle elde edilen sayısal sonuçların doğrudan kıyaslanması mümkün değildir (İlter, 2007; Yeğınobalı, 2002; Dodson, 1990).

### 2.1.2 Silis dumanının kimyasal yapısı

SD tanecikleri yaklaşık olarak %90 civarında amorf olarak SiO<sub>2</sub> içerir. Ayrıca, yapısında demir, kalsiyum, karbon, magnezyum, sülfür, sodyum ve potasyum oksit çok az oranlarda bulunur. SD malzemesinin kimyasal yapısı alaşımın türüne ve üretildiği metalin türüne göre değişiklik gösterir. Örneğin, bir ferrosilisyum fırınından alınan SD malzemesi, çoğunlukla silikon metali fırınından elde edilen SD malzemesinden daha çok oranda demir ve magnezyum oksit içerir (Malhotra ve Carette, 1982; İlter, 2007).

SD malzemesinin kimyasal yapısı, fırında üretilen alaşım veya metalin tipine göre değişiklik göstermektedir. Üretilecek olan hammadde %50 ferrosilisyum ise SiO<sub>2</sub> içeriği % 60-85, %75 ferrosilisyum ise SiO<sub>2</sub> içeriği % 85-89, metal silisyum ise SiO<sub>2</sub> içeriği %88-98 civarlarındadır (Yeğınobalı, 2002). SD malzemesinin içinde bulunan ikinci ana bileşen ise yanmamış karbon kalıntılarıdır. SD malzemesinin içinde %1 ile %2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği bulunur. %1'den daha az miktarlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve K<sub>2</sub>O gibi oksitler genellikle bulunur (Özcan 2005).

SD malzemesinin esas kimyasal etkisi, kalsiyum hidroksit (Ca(OH)<sub>2</sub>) ile girdiği reaksiyonun yüzey alanının yüksek olmasıyla ve Ca(OH)<sub>2</sub> ile amorf halde silis içeren diğer puzolanlara göre daha kısa sürede reaksiyona girmesiyle ortaya çıkmaktadır.

Genellikle, 20 °C 'de kür edilmiş SD içeren beton için puzolanik reaksiyon ilk günden başlayıp 28. günde tamamlanır. SD malzemesinin Ca(OH)<sub>2</sub> ile meydana getirdiği reaksiyonda porozite azalır. Çünkü puzolanik reaksiyon sonucu oluşan kalsiyum silika hidrat ürünleri, SD ve Ca(OH)<sub>2</sub> ürünlerinin toplam yüzey alanından daha az yüzey alanı oluşturur (İlter, 2007; Bayasi ve Zhou, 1993).

### 2.1.3 Silis dumanının aktivitesi

Genel olarak %90 oranında silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub> (S)) içeren SD malzemesi, çok az miktarda karbon (C) ve diğer bileşenleri içerir. İçerikte bulunan karbon hidratasyona katılmaz ve diğer bileşenler de çok düşük miktarda katılır. Bu nedenle SD malzemesinin %87.3 oranında silis içerdiği kabul edilir. Sonuç olarak, SD malzemesinin aktivite bağlantısı aşağıdaki Denklem (2.1) ile hesaplanır.



H konsantrasyonu ve porozite sonuçları incelendiğinde, reaksiyona ilave edilen suyun, Ca(OH)<sub>2</sub> (CH) moleküllerinden daha fazla bağlayıcı özelliği olduğu görülür. Bu duruma göre, z=0 ise reaksiyon ürünleri Cy Sx Hy şeklinde olur.

Sellevoid vd. (1982), tarafından yapılan bir çalışmaya göre kalsiyum silika hidrat (CSH) yapısındaki bağlanmış suyun yüzde miktarı, SD ile puzolanik reaksiyona giren malzemenin yüzde miktarı kadardır. Bununla beraber bu çalışmada, SD içeren çimento pastasındaki çimentonun bir gramındaki bağlanmış suyun yüzde miktarının giderek arttığı gözlenmiştir. Tamamen yok edilen Ca(OH)<sub>2</sub> bileşiminin toplam denge değeri de y/x oranını ortaya koyar. Hidratasyondan 1 yıl sonra SD hacmi ve yakılan Ca(OH)<sub>2</sub> miktarlarını, yazarlar 3 farklı numune için sırasıyla 41, 79 ve 106 kg/m<sup>3</sup> olarak gözlemişlerdir. Yine bu çalışmada aktif SD malzemesinin içeriği; birinci numunede = (% 87.3) × 25.73 kg/m<sup>3</sup> = 22.46 kg/m<sup>3</sup>, ikinci numunede = 44.92 kg/m<sup>3</sup> ve üçüncü numunede = 67.38 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Buradan y/x oranları şu şekilde hesaplanmıştır (SiO<sub>2</sub> ve Ca(OH)<sub>2</sub>'in moleküler miktarları 60.08 ve 74.10 alınmıştır).

$$74.10y/60.08x = 41 / 22.46 \Rightarrow y/x = 1.48 \quad 74.10y / 60.08x = 79 / 44.92 \Rightarrow y/x = 1.43$$

$$74.10y / 60.08x = 106 / 67.38 \Rightarrow y/x = 1.28$$

Yukarıdaki işlemlere bağlı olarak, y/x oranı 1.5 olarak tanımlanabilir. Bu durumda CSH Denklem (2.2)'deki gibi elde edilir. SD ve CH reaksiyonunun sonuç ürünü  $C_3S_2H_3$ 'nin,  $C_3S$  ve  $C_2S$ 'in hidrasyonu sonucu elde edilen ürünle aynıdır. Bu çalışmaya ilave olarak birkaç araştırmacı da bu sonuçlara benzer sonuçlar elde etmişlerdir (İlter, 2007).



#### 2.1.4 Silis dumanının çimento ve beton üretiminde kullanılması

Yeğinobalı (2002), yüksek dayanımlı veya yüksek performanslı beton üretiminde SD miktarının genellikle çimentoyla %15 yer değişim oranında kullanılabileceğini belirtmiştir. SD katkılı çimentolardaki SD miktarı da yaklaşık olarak bu değer civarındadır. SD katkılı çimentolar ilk olarak İzlanda'da üretilmiş, daha sonra bunu diğer ülkeler takip etmiştir. Kanada'da bulunan iki büyük çimento şirketi %6.5 ile %8 oranlarında SD katkılı çimentolar üretmekte ve bu katkılı çimentoları normal portland çimentosundan yaklaşık %10 daha pahalı olarak ülke piyasasında satmaktadır (Khayat ve Aitcin, 1992; Alper, 2005). Türk standartlarını uyumlu hale getirdiğimiz Avrupa standartlarında olduğu gibi, ülkemizdeki TS EN 197-1 standardı da genel çimentolar içinde %6 ile %10 arasında SD içeren çimentoya yer verir (TS EN 197-1, 2012). Ayrıca, SD ile süper akışkanlaştırıcı katkıları da içeren bazı karışımlar formüle edilerek klinkerle birlikte öğütüldükleri zaman, yüksek performanslı ve dayanımlı çimentolarda üretilmiştir (Alper, 2005). SD kullanılan betonların karışımını belirlemek için yapılan karışım hesapları normal betonların karışım hesaplarından farklıdır. Dahası yüksek dayanım, geçirimsizlik gibi bazı özelliklerin göz önünde bulundurulması ile süper akışkanlaştırıcı kullanma gereği de önemlidir. SD içeren betonların belli bir genel karışım hesabı yöntemi bulunmamaktadır. SD malzemesinin betonda kullanımını için daha önce denenmiş karışımlar göz önünde bulundurularak önce projede kullanılacak malzemeler ile deneme karışımlarının hazırlanması önerilir. Yüksek dayanımlı betonlarda çimento dozajı yaklaşık olarak  $350 \text{ kg/m}^3$  ile  $600 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmektedir. Bu dozajlarda çimento ağırlığının %5 ile %20 oranları arasında SD, çimento yerine kullanılmaktadır ve yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcılar ile su-bağlayıcı oranı 0.20 değerine kadar düşürülebilmektedir. Geçirimsizlik ve dayanıklılık faktörlerinin önem kazandığı yerlerde genellikle %5 ile %15 kadar SD çimento yerine kullanılmakta ve su azaltıcı katkıları ile su-bağlayıcı oranı 0.30 ile 0.45 arasında tutulmaktadır. Pratikte kullanılmış olan SD

katkılı ve yüksek dayanımlı beton bileşimlerinden bazı örnekler Çizelge 2.1. ve 2.2.'de verilmiştir. Normal beton için uygulanan karışım hesaplarındaki su bağlayıcı oranının dayanım ilişkilerine göre yeniden belirlenmesi gerekir. Karışımlarda, kullanılacak kimyasal katkıların çeşitliliği ve her bir yenisinin ortaya çıkması, su azaltıcı etkilerine rağmen priz sürelerine etkileri ve zamana bağlı olarak çökme değerlerine etkileri deneme karışımlarının önemini ortaya koymaktadır (Alper, 2005; ACI Committee 234, 1996).

**Çizelge 2.1.** SD içeren yüksek dayanımlı beton karışım örnekleri (Alper, 2005)

| Karışım No.   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Su-bağlayıcı oranı                                  | 0.287 | 0.290 | 0.220 | 0.231 | 0.320 | 0.280 |
| Bileşenler (kg/m <sup>3</sup> )                     |       |       |       |       |       |       |
| Su  | 160   | 155   | 144   | 151   | 141   | 158   |
| Çimento   | 475   | 487   | 564   | 475   | 327   | 564   |
| Silis dumanı  | 24    | 47    | 89    | 74    | 27    | -     |
| Uçucu kül   | 59    | -     | -     | 104   | 87    | -     |
| İri agrega  | 1070  | 1070  | 1070  | 1070  | 1120  | 1070  |
| İnce agrega   | 659   | 676   | 593   | 593   | 742   | 647   |
| Kimyasal katkılar (lt/m <sup>3</sup> )              |       |       |       |       |       |       |
| Süper akışkanlaştırıcı                              | 11.6  | 11.2  | 20.1  | 16.4  | 6.3   | 11.6  |
| Süper akışkanlaştırıcı (Priz geciktirici özellikli) | -     | -     | -     | -     | 3.2   | -     |
| Akışkanlaştırıcı                                    | 1.06  | 0.97  | 1.46  | 1.50  | -     | 1.12  |
| Çökme   | 250   | 215   | 255   | 235   | 205   | 195   |
| 28 Gün dayanımı                                     | 89    | 92    | 119   | 107   | 73    | 79    |
| 91 Gün Dayanımı                                     | 100   | 96    | 132   | 119   | 89    | 87    |

**Çizelge 2.2.** Yüksek dayanıma sahip beton karışım örnekleri (Alper, 2005)

| Karışım No.                            | 1    | 2     | 3     | 4    | 5     | 6     |
|--|------|-------|-------|------|-------|-------|
| Su-bağlayıcı oranı                     | 0.35 | 0.37  | 0.27  | 0.31 | 0.25  | 0.25  |
| Bileşenler                             |      |       |       |      |       |       |
| Su                                     | 195  | 165   | 135   | 145  | 130   | 134   |
| Çimento                                | 505  | 451   | 500   | 315  | 513   | 416   |
| Silis dumanı                           | -    | -     | 30    | 36   | 43    | 34    |
| Uçucu kül                              | 60   | -     | -     | -    | -     | -     |
| Yüksek fırın cürufu                    | -    | -     | -     | 137  | -     | -     |
| İri agrega                             | 1030 | 1030  | 1100  | 1130 | 1080  | 1100  |
| İnce agrega                            | 630  | 745   | 700   | 745  | 685   | 710   |
| Kimyasal katkılar (lt/m <sup>3</sup> ) |      |       |       |      |       |       |
| SA                                     | -    | 11.25 | 14.00 | 5.90 | 15.70 | 5.00  |
| Akışkanlaştırıcı                       | 0.98 | -     | -     | 0.90 | -     | -     |
| Priz geciktirici                       | -    | 4.50  | 1.80  | -    | -     | 0.45  |
| Hava katkısı                           | -    | -     | -     | -    | -     | 0.125 |
| Basınç dayanımı (MPa)                  |      |       |       |      |       |       |
| 28 günlük                              | 65   | 69    | 93    | 83   | 119   | 75    |
| 91 günlük                              | 79   | 87    | 107   | 93   | 145   | -     |

## 2.1.5 Silis dumanının beton özelliklerine etkisi

### 2.1.5.1 Silis dumanının betonun basınç dayanımına etkisi

SD mineral katkısının süper akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanıldığında, betonun  $f_c$  değerlerinin yüksek değerlere ulaşabileceği birçok çalışmada ortaya konmuştur. Bu yüksek  $f_c$  değerinin nedeni çimento matrisindeki ve ara yüzey bölgesindeki boşluk oranının azalması ve SD katkısının  $\text{Ca}(\text{HO})_2$  ile girdiği reaksiyon ile açıklanabilir. SD betonda katkı malzemesi olarak kullanıldığında, çimento malzemesinin hidratasyonu sırasında ortaya çıkan serbest kireci ( $\text{Ca}(\text{HO})_2$ ) bağlayarak CSH jellerini oluşturur. Bu bağlanma sayesinde çimento hamuru daha yoğun olur ve daha küçük mikro boşluk yapısına sahip olur. Aynı zamanda nano boyuttaki SD taneleri agrega ile çimento hamuru arasındaki ara yüzey bölgesini sıkılaştırarak daha yüksek  $f_c$  değerlerine sahip betonlar elde edilmesine olanak sağlar (Kurt, 2007; Yeğınobalı, 2002; Yüzer, 1998; Mazloom vd., 2004). Ayrıca agrega ile çimento hamuru ara yüzeyindeki boşlukları doldurmakla birlikte tanecik yapısı çok ince olduğu için çimento tanecikleri arasına girerek buradaki boşlukları da doldurarak ara yüzeyleri geliştirir (Toutanji vd., 2004). Beton karışımlarında SD kullanılması erken yaşlarda yüksek  $f_c$  değerleri elde edilmesini sağlar. Bu erken yaşlardaki yüksek  $f_c$  betonun bulunduğu ortamın sıcaklığıyla yani kür koşullarıyla da yakından ilişkilidir. SD katkısı kullanılarak üretilen beton, eğer 10 °C bir ortamda kür edilirse 7 günlük  $f_c$  değerlerinde belirgin bir artış ortaya çıkmamaktadır. Ancak kür ortamının sıcaklığı 20 °C civarında olursa ise, betonun  $f_c$  değerlerinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir (Kurt, 2007; Toutanji ve Bayasi, 1999). SD katkısının betonun erken yaşlardaki  $f_c$  değerini arttırması, özellikle prekast ve öngerilmeli beton yapımında büyük fayda sağlar (Kurt, 2007; Yeğınobalı, 2002). SD katkısının beton karışımlarında kullanılması çimento miktarının azalmasına olanak sağlanmasıyla birlikte uzun vadede betonun  $f_c$  değerini arttırarak yaklaşık 120-150 MPa değerine ulaşmasını sağlar (Kurt, 2007; Yüzer, 1998). SD katkısının betonun  $f_c$  değerine olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgin olarak ortaya çıkar. Betonun 28 günlük  $f_c$  değerini arttırmayı amaçlayan çalışmalarda, SD katkısının genellikle çimento yerine %10 ile %20 oranları arasında katıldığı belirtilmiştir. Gerekli işlenebilmeyi sağlamak için SD katkısının %5 oranından daha fazla kullanılması durumunda süper akışkanlaştırıcı katkılarla beraber kullanıldığı görülür (Yeğınobalı, 1993).

SD içeren betonun  $f_c$  değerini belirlemek amacıyla yapılan bir çalışmada kalınlığı yaklaşık olarak 30 mm olan SD katkılı beton kaplama malzemesi üretilmiştir. Daha sonra elde edilen bu numuneler kullanılarak  $f_c$  deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler neticesinde kontrol betonları ile SD katkılı betonların  $f_c$  değerleri kıyaslandığında erken yaşlardaki  $f_c$  değerleri arasında belirgin bir farkın olmadığı, ileriki yaşlarda ise kontrol betonuyla aradaki farkın giderek arttığı gözlenmiştir (İlter, 2007; Ozyıldırım, 1987; ACI committee 234, 1996). SD içeren betonun  $f_c$  değerini ortaya çıkarmak için yapılan başka bir çalışmada, su-çimento oranı 0.42 olarak belirlenmiştir. Çimento yerine %5 ile %30 arasındaki oranlarda SD kullanılan betonlarda ortaya çıkan  $f_c$  değerlerinin 55 ile 60.3 MPa arasında olduğu belirtilmiştir (İlter, 2007; Bhanja ve Sengupta, 2002).

Çimento yerine SD katkısının kullanılmasının beton  $f_c$  değerine olan etkisi, agrega ile hamur geçiş bölgelerinin silis tanecikleriyle kuvvetlendirilmesinden ve SD tanelerinin boşlukları doldurmasından kaynaklanır. Bu sayede agrega taneleri arasında daha az boşluklu ve kaliteli bir çimento hamuru oluşur. Malhotra (1993) ve Jahren (1983) SD içeriğinin betonun  $f_c$  değeri üzerine olumlu etkisinin uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi diğer puzolanik katkılara oranla daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Kakizaki vd. (1992) yaptıkları çalışmada, 0.25 su-bağlayıcı oranındaki betonların % 12 SD içeriğinin, 7, 28 ve 91 günde, sırasıyla 98 MPa, 113-122 MPa ve 127-138 MPa  $f_c$  değerini verdiğini belirtmişlerdir. Holland vd. (1986) yaptıkları bir çalışmada, kontrol betonu ile 28 gün sonunda 39.4 MPa  $f_c$  değeri elde ederken, çimentonun yerine ve çimentonun % 17.6 hacmi oranında SD katkısının kullanılmasıyla 28 gün sonunda 49.5 MPa  $f_c$  değeri elde etmişlerdir. Carette ve Malhotra (1992) betonun uzun süreli dayanım kazanması için yaptıkları araştırmada, 0.25 su-bağlayıcı oranındaki %10 SD içeren betonun 3.5 yıl sonra, 100 MPa civarında  $f_c$  değerine ulaştığını gözlemişlerdir (Alper, 2005; Ekinci, 1995). Khayat ve Aitcin (1992) normal kür koşullarında SD içeriğinin betonun  $f_c$  değerine olumlu etkisinin 3 ile 28 gün arasında olduğunu belirtmişlerdir. Ancak su-bağlayıcı oranını 0.40 değerine indirilmesiyle  $f_c$  değerlerinin yükseltilebileceğini gözlemişlerdir. Cong vd. (1992) beton karışımlarında kullanılan SD katkısının, matris ile agrega arayüzey geçiş bölgelerindeki boşlukları küçülterek daha yüksek dayanımlı beton elde edilmesine olanak sağladığını belirtmişlerdir. Laamanen vd. (1992) karışımlarda çimento yerine %8 oranında kullanılan SD katkısının erken yaşlarda yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların  $f_c$  değerlerini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Kondo vd. (1974) yüksek sıcaklık değerlerinde kür edilen SD içeren betonların 7 günlük  $f_c$  değerlerinin daha yüksek değerde olduğunu,

lakin 4 hafta sonunda 20 °C sıcaklıkta kür edilen betonlarda en yüksek  $f_c$  değerlerinin elde edildiğini belirtmişlerdir. Johnston (1992) çimento yerine %10 SD kullanılan betonlara, 65 °C'de hızlandırılmış kür uygulamıştır. Bu kür sonunda 16 saatte 28 MPa  $f_c$  değeri ve 28 günde 35 ile 42 MPa  $f_c$  değerlerini elde etmiştir. Skjeggerud vd. (1992) hava sürüklenmiş SD içeren betonlarda her %1 hava içeriği için  $f_c$  değerinin %5 azaldığını belirtmişlerdir. Sandvik ve Gjørve (1992) çimento dozajı 185 ile 482 kg/m<sup>3</sup> arasında, su-çimento oranı 0.45 ile 1 arasında, SD oranı %0 ile %20 arasında olan bir çalışma yapmışlardır. Betonlarda SD yer değiştirme oranının artmasıyla birlikte dayanım gelişiminin farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle de hala birçok kaynakta ve yönetmeliklerde kullanılan dayanım tahmin denklemlerinin SD içeren betonlar için yenilenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Baalbaki vd. (1992) portland çimentosu yerine SD, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılarını farklı karışım oranlarında kullanarak düşük su-bağlayıcı oranı ile betonlar üretmişlerdir. Bu betonlarda, bir günde sadece SD içeren betonların kontrol betonunun  $f_c$  değerini yakaladığını, 1 yıl sonra ise tüm mineral katkılı betonların kontrol betonuna kıyasla daha yüksek  $f_c$  değeri verdiğini gözlemişlerdir (Alper, 2005; Ekinci, 1995). Shizawa vd. (1992) ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve SD katkılarını çok ince öğütülmüş portland çimentosu ile birlikte kullanarak çok yüksek dayanımlı betonlar elde etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda, SD içeriğinin  $f_c$  üzerinde cüruftan daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Birçok çalışma, yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton üretiminde süper akışkanlaştırıcı ile birlikte çimento yerine ağırlıkça %15 SD kullanılması ile en verimli sonuçların elde edebileceğini belirtmiştir (Alper, 2005; Bentur ve Goldman, 1989; Yogendran, 1987; Yeğinobalı, 1993). SD içeriğinin Ca(OH)<sub>2</sub> miktarını azaltmasıyla ilgili önemli bir çalışma Kawamura vd. (1987) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, SD-çimento oranı %5, %10 ve %15 olan harç numuneleri üretilmiştir. Bu harç karışımlarında 3 ay sonunda Ca(OH)<sub>2</sub> miktarının, SD-çimento oranı %5, %10 ve %15 olan harçlarda, sırasıyla %7 ile %10 arasında, %4 ile %9 arasında ve %2 ile %5 arasında olduğunu belirtmişlerdir (Alper, 2005; Ekinci, 1995). Buradan SD-çimento oranı arttıkça Ca(OH)<sub>2</sub> oranının azaldığı söylenebilir.

#### **2.1.5.2 Silis dumanının betonun eğilme dayanımına etkisi**

SD içeriğinin  $f_c$  değerlerine benzer şekilde  $f_{fs}$  değerini de arttırdığı, ancak  $f_{fs}$  değerlerindeki artış oranına etkisinin  $f_c$  değerlerindeki artış oranına etkisinden daha az olduğu birçok çalışmada belirtilmektedir. Yapılmış olan deneysel çalışmalarda çimento

yerine SD kullanılması ile birlikte  $f_{fs}$  değerlerinde önemli artışların olduğu gözlenmiştir. Çimento yerine SD kullanılmasının etkisi genellikle  $f_c$  değerindeki değişmelere benzemektedir. Özellikle çimento yerine %10 ile %20 arasında SD kullanılması ile yüksek  $f_{fs}$  değerlerinin elde edildiği yapılmış deneysel çalışmalarda gözlenmiştir. Bhanja ve Sengupta (2005) çimento ile %5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında yer değiştirilerek kullandığı SD katkılı deneysel çalışmasında, 5 farklı su-bağlayıcı oranında beton numuneler üreterek SD içeriğinin  $f_{fs}$  değeri üzerine etkisini araştırmışlardır. Tüm karışımlarda ve su-bağlayıcı oranlarında  $f_{fs}$  değeri üzerine %15 ile %25 arasında SD kullanılmasının etkili olduğunu gözlemiştirler. Khayat ve Aitcin (1992) deneysel çalışmalarında, SD katkılı betonların  $f_{fs}$  değerlerinin  $f_c$  değerlerine oranlarının kontrol betonlarına benzer olduğunu belirtmişlerdir. SD katkı miktarının artması veya süper akışkanlaştırıcı kullanılmaması durumunda,  $f_{fs}$  değerinin  $f_c$  değerine oranı katkısız betonlarınkinden daha küçük olduğunu ifade etmişlerdir (Alper, 2005; Yeğinobalı, 1993).

### **2.1.5.3 Silis dumanının betonun yarmada çekme dayanımına etkisi**

SD mineral katkısı diğer puzolanlar gibi yeni CSH jellerinin oluşmasını sağlar. Ayrıca çok ince SD taneleri agrega-hamur ara yüzey bölgesini doldurarak kuvvetlendirir ve beton dayanımını artırır. Bazı çalışmalara göre SD katkısının beton dayanımına olan olumlu etkisi agrega hamur ara yüzeyini kuvvetlendirmesinden kaynaklanmaktadır. Bazı araştırmacılara göre ise en önemli faktörün daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşmasındandır (Yeğinobalı, 2007). Çimento malzemesi yerine SD kullanılması yarmada çekme dayanımı ( $f_{sts}$ ) değerlerini geliştirmektedir. Ancak SD içeriğinin dayanım gelişimi üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi için en etkili yer değiştirme oranının ve çimento pastasına katkısının araştırılması gerekir. Bhanja ve Sengupta (2005) deneysel çalışmalarında çimento yerine %0, 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında SD kullanarak ve 5 farklı su-bağlayıcı oranında betonlar üreterek SD içeriğinin  $f_{sts}$  değeri üzerine etkisini araştırmışlardır. Tüm karışımlarda ve su-bağlayıcı oranlarında  $f_{sts}$  değeri üzerine %10 ile %20 arasında SD kullanılmasının etkili olduğunu gözlemiştirler. Khayat ve Aitcin (1992) deneysel çalışmalarında, SD katkılı betonların  $f_{sts}$  değerlerinin  $f_c$  değerlerine oranlarının kontrol betonlarına benzer olduğunu belirtmişlerdir. SD katkı miktarının artması veya süper akışkanlaştırıcı kullanılmaması durumunda  $f_{sts}$  değerinin  $f_c$  değerine oranının katkısız betonlarınkinden daha küçük olduğunu ifade etmişlerdir (Alper, 2005; Yeğinobalı, 1993). Yapılmış olan deneysel çalışmalarda çimento yerine SD kullanılması

ile birlikte  $f_{sts}$  değerlerinde önemli artışların olduğu gözlenmiştir. Çimento yerine SD kullanılmasının  $f_{sts}$  değerlerine etkisi genellikle  $f_c$  değerindeki değişmelere benzemektedir. Yapılmış olan birçok deneysel çalışmada, özellikle çimento yerine %10 ile %20 arasında SD kullanılması ile yüksek  $f_{sts}$  değerlerinin elde edildiği gözlenmiştir.

### 2.1.6 Silis dumanı ile yapılmış çalışmalar

Poon vd. (2006) yapmış oldukları deneysel çalışmada, SD ve metakaolin içeren 2 grup halinde numuneler ile 12 farklı karışım elde etmişlerdir. Karışımları oluştururken su-bağlayıcı oranlarını göz önünde bulundurmuşlardır. Birinci grup karışımında su-bağlayıcı oranı 0.3 iken, ikinci grup karışımında 0.5 olarak belirlemişlerdir. Her grup da kontrol betonuna ek olarak çimento ile %5 ve 10 oranlarında SD'yi yer değiştirerek ve yine çimento ile %5, 10 ve 20 oranlarında metakaolini yer değiştirerek kullanmışlardır. Yapılan çalışma %10 doğal metakaolin katkısı bulduran betonların  $f_c$  değerlerinin, %10 SD katkısı içeren betonlara göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Elde edilen bu karışımların yine belli oranlarda çimento yerine SD ve metakaolin gibi puzolanik katkı maddesi olarak kullanılması durumunda  $f_c$  değerini olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

Wong ve Razak (2005) 3 farklı grup halinde yapmış oldukları araştırmada su-bağlayıcı oranlarını 0.27, 0.3 ve 0.33 olarak belirledikten sonra 21 farklı karışım elde etmişlerdir. Çimento yerine ağırlıkça %0, 5, 10 ve 20 oranlarında SD ve metakaolini bu 3 farklı grup içinde kullanmışlardır. Bu katkılara bağlı olarak  $f_c$  değerinin su-bağlayıcı oranının azalmasıyla arttığı görülmüştür. Yine bu çalışmalarında çimento yerine ağırlıkça %10 ve %15 oranında SD veya metakaolin kullanılan beton karışımlarının  $f_c$  değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüş buna istinaden yüksek performanslı beton elde edileceği belirtilmiştir.

Mazloom vd. (2004) SD içeriğinin yüksek dayanımlı beton karışımlarının mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi için çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada elde ettikleri beton numunelerinde çimento yerine ağırlıkça %0, 6, 10 ve 15 oranlarında SD kullanmışlardır. Bu çalışmada tüm karışımlar için su-bağlayıcı oranı sabit tutulmuş ve bu oran 0.35 olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada ortaya çıkan numuneler üzerinde şişme, büzülme,  $f_c$  ve  $E_c$  deneyleri yapılmıştır. Karışımlardaki SD oranı arttıkça  $f_c$  ve  $E_c$  değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiş, fakat bunun yanında betonun işlenebilirliği

azalmıştır. Yine çimento yerine SD kullanılan beton karışımlarının 90 gün sonunda  $f_c$  değerlerine ilişkin sonuçlarına bakıldığında çok fazla artış olmadığı görülmüştür.

Kadri vd. (2011) SD ve metakaolinin  $f_c$  değerine ve harçların hidratasyon ısısı üzerine etkisini belirlemek için bazı araştırmalar yapmışlardır. Yapmış oldukları bu çalışmalarda çimento yerine ağırlıkça %10 oranında iki farklı özelliğe sahip metakaolin ve yine %10 oranında SD kullanarak dört farklı karışım hazırlamışlardır. Elde ettikleri bu karışımlarda su çimento oranını 0.36 olarak sabit tutmuşlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışmada SD ve metakaolin içeren karışımların kontrol karışımlarına kıyasla hidratasyon ısısının zaman ilerledikçe artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Yine buna ek olarak  $f_c$  değerleri üzerine 1, 7, 28 ve 56 günlük deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu deney sonuçlarına bakıldığında SD ve metakaolin katkısı barındıran harçların kontrol harç karışımlarına göre zamana bağlı olarak bakıldığında  $f_c$  değerlerinde artış olduğunu görmüşlerdir.

Roy vd. (2001) çalışmalarında, betonun kimyasal özellikleri üzerine düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül, metakaolin ve SD'nin etkisini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada iki farklı su-çimento oranı belirlemişlerdir. Bu oranlar 0.36 ve 0.40 olarak belirlenmiş ve bunun üzerine çalışmalara başlamışlardır. Karışımlara olumsuz çevre koşulları etkisini vermek için nitrik asit, hidroklorik asit, asetik asit, sülfürik asit, magnezyum sülfat ve sodyum ve fosforik asitten oluşan karışımlar eklemişlerdir. Kullanmış oldukları puzolonik malzemelerin kimyasal dirençlerinin tespitine yönelik olarak  $f_c$  üzerine deneyler gerçekleştirmişler ve çalışmada metakaolin, SD ve uçucu kül kullanımının kimyasal dirence pozitif etki yaptığını gözlemlemişlerdir.

Tafraoui vd. (2009) SD ve metakaolinin betonların yüksek performansına etkisini araştırmışlardır. Oluşturdukları karışımlarda çimento yerine metakaolin ve SD kullanmışlardır. Bununla birlikte karışımlara kırılmış kuartz kumu ve çelik fiber eklemişlerdir. Elde ettikleri karışımları değişik ısılarda küre tabi tutarak  $f_{fs}$  ve  $f_c$  deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına bakıldığında en ideal  $f_{fs}$  ve  $f_c$  sonuçlarına 150 °C de küre tabi tuttıkları ve içerisinde fiber, metakaolin ve kuartz kumunun birlikte kullanıldığı karışımlarda erişmişlerdir. Söz konusu karışımda ve kürede  $f_c$  değeri 243 MPa olarak tespit edilirken,  $f_{fs}$  değeri ise 40 MPa olarak bulunmuştur. Deneysel çalışmaların akabinde yüksek performanslı beton eldesi için kuartz kumu, fiber ve metakaolinin birlikte kullanılabilceği tespit edilmiştir.

Almusallam vd. (2004) düşük kaliteli iri agregalı betonlarda bazı mekanik özelliklerden olan  $f_c$ ,  $E_c$  ve  $f_{sts}$  değerleri üzerine SD katkısının nasıl bir etkisi olacağına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmasında düşük agregalı beton eldesi için kalkerli kireç taşı, dolomit kireç taşı, kuartz kireç taşı ve çelik cürufu kullanmışlardır. Numuneler üzerinde su-bağlayıcı oranını 0.35 olarak belirledikten sonra çimento yerine ağırlıkça % 0, 10 ve 15 oranlarında SD kullanmışlardır. SD kullanılmadan elde edilen çelik cürufu ve iri agregalı düşük kalitedeki beton karışımlarında mekanik özelliklerin en yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tüm karışımlar temel alındığında ise yapısında bulundurduğu SD miktarı arttıkça mekanik özelliklerin artış gösterdiği, özellikle çelik cürufu barındıran karışımların, yapısında kireç taşı agregası bulunduran betonlara kıyasla daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Atiş vd. (2005) yapmış olduğu çalışmada ıslak ve kuru kür koşullarının SD içeren betonların  $f_c$  değerleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında % 0, 10, 15 ve 20 oranlarında SD çimento ile yer değiştirerek ve 4 farklı su-çimento oranı ile birlikte 3 farklı dozajda 48 farklı karışım elde etmişlerdir. Karışımların yapısında bulunan çimento miktarı arttıkça ve su-çimento oranı düştükçe, ıslak ya da kuru kür farketmeksizin  $f_c$  değerlerinde artış olduğunu görmüşlerdir. Elde etmiş oldukları sonuçlara istinaden en yüksek  $f_c$  değerine sahip grubun 450 çimento dozajına sahip ve 0.3 su-çimento oranı kullanılan, ıslak kür yapılan grupta olduğunu tespit etmişlerdir. Islak ve kuru kür koşulları ile  $f_c$  değerleri arasında bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bhanja ve Sengupta (2005), SD içeriğinin betonun çekme dayanımına etkisinin tespiti için çalışma yapmışlardır. Karışımlarda farklı su-çimento oranları ve çimento yerine SD kullanarak karışımlar hazırlamışlardır. Bu karışımlarda su-çimento oranları 0.26, 0.30, 0.34, 0.38 ve 0.42 olarak belirlenmiş ve çimento yerine ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında SD kullanmıştır. Elde edilen numuneler üzerinde  $f_{sts}$ ,  $f_c$  ve  $f_{fs}$  tespitine yönelik deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda su-çimento oranındaki azalmayla birlikte  $f_{sts}$ ,  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerlerinde artış meydana gelmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri % 15, 20 ve 25 SD içeren numunelerde, bununla birlikte en yüksek  $f_c$  değerleri ise % 15 ve 25 SD içeren numunelerde gözlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde söz konusu dayanımlar arasında matematiksel bir bağlantı olduğu görülmektedir.

Gesoğlu vd. (2013) yapmış olduğu deneysel çalışmada soğukta bağlanmış uçucu kül agregaları ile elde edilen beton karışımlarının bazı mekanik özellikleri zerine SD ve elik fiberin etkisini araştırmışlardır. Numunelerde iki farklı fiber (uzunluğu 30 ve 60 mm) ve yine 0.35 ve 0.55 olmak üzere iki farklı su-bağlayıcı oranı kullanarak iki seri beton elde etmişlerdir. Tespit etmeye çalıştıkları mekanik özellikler, eğilmede çekme dayanımı,  $f_c$  ve inşaat demirinin beton ile arasındaki bağ dayanımı değerleridir. Mekanik özelliklere su-bağlayıcı oranından ziyade karışımların içerisinde barındırdığı SD içeriğiyle birlikte farklı tip elik fiberin kullanılmasının ciddi etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Deney sonuçlarına bakılarak su-imento oranının 0.35 olduğu karışıma kıyasla 0.55 su-bağlayıcı oranında ve 60 mm fiberin birlikte kullanıldığı SD karışımı örneğinin daha yüksek eğilmede çekme, bağ dayanımı ve  $f_c$  değerleri verdiğini ifade etmişlerdir.

Köksal vd. (2008) elik fiber ve SD içeren yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerinin tespitine yönelik çalışma ortaya koymuşlardır. Karışımlarda hacimce %0.5 ve %1 oranında ve boyları 65 ve 80 olan iki farklı tip fiber kullanmışlardır. Karışımdaki SD içeriğini ise %0, 5, 10 ve 15 oranlarında kullanmışlardır. Elde ettikleri karışımların su-imento oranını ise 0.38 olarak belirlemişlerdir. Deneysel olarak elde ettikleri numuneler üzerinde çökme, taze birim ağırlık,  $f_{sts}$ ,  $f_{fs}$ ,  $f_c$  ve  $E_c$  deneylerini gerçekleştirmişlerdir. İçeriğinde %15 SD barındıran numunelerin en yüksek  $E_c$  ve dayanım değerlerine sahip olduğunu grmuşlerdir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında SD değerinin artışıyla  $E_c$  ve  $f_c$  değerlerinin de artış gösterdiği söylenebilir. Fakat SD içeriğinin artışının olumlu etkisine rağmen fiber içeriğinin artışı ise  $E_c$  değerinin düşmesine neden olmaktadır.

Yazıcı (2008) yapmış olduğu çalışmada SD içeriğinin ve yüksek hacimde C sınıfı uçucu kül içeriğinin, kendiliğinden yerleşen betonlar üzerine etkisini araştırmışlardır. Yapmış olduğu deneysel karışımlarda imento yerine ağırlıkça %10 SD ve yine ağırlıkça % 0, 30, 40, 50 ve 60 oranlarında uçucu kül kullanmıştır. Tüm karışımlar için su-imento oranını 0.28 olarak belirledikten sonra ürettikleri kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının taze beton deneylerinin yanı sıra klor geçirgenliği, donma-çözülme direnci ve  $f_{sts}$ ,  $f_c$  ve  $E_c$  deneylerini yapmıştır.  $f_{sts}$ ,  $f_c$  ve  $E_c$  değerlerinin sadece uçucu kül içeren numunelere kıyasla hem uçucu kül hem de SD içeren numunelerin birlikte kullanıldığı karışımlarda artış gösterdiği fakat klor geçirgenliğinin azaldığını gözlemiştir. Kontrol betonlarına

göre sadece uçucu kül muhtevası barındıran numuneler ve bunun SD ile birlikte kullanıldığı karışımlarda donma-çözülme direncine olan etkisi artmıştır.

Chen ve Liu (2008) mineral katkı olarak kullanılan SD, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun hafif agregalı yüksek dayanımlı betonların işlenebilirliği üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu katkıları kullanarak beş farklı grup altında numuneler elde etmişlerdir. Meydana gelen karışımlar üzerinde  $f_c$  ve işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda mineral katkılarla birlikte süper akışkanlaştırıcıların kullanıldığı numunelerde yüksek  $f_c$  ve işlenebilirlik değerleri ortaya çıkmıştır. Farklı mineral katkıların kullanılmasının beton üzerinde etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan mineral katkıların bireysel olarak tek tek ele alındığında en iyi işlenebilirliğin uçucu kül muhtevası içeren örneklerde olduğunu tespit etmiş, fakat uçucu kül muhtevasının artmasıyla birlikte erken yaşlardaki dayanımın düştüğü gözlemlenmiştir. Yine beton karışımında çimento yerine SD kullanılması durumunda erken yaşlarda bağlayıcılık ve dayanımın arttığı fakat bunun akabinde betonun işlenebilirliğinin de hızlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Erken yaşlarda işlenebilirliğe olumsuz etkisinden dolayı hafif agregalı yüksek dayanımlı betonlarda, çimento yerine tek başına SD kullanılmaması önerilmiştir. Son olarak yüksek fırın cürufu kullanılan örneklerde ise yüksek işlenebilirlik ve yüksek dayanım olduğu gözlenmiş, buna istinaden hafif agregalı yüksek dayanımlı beton için yüksek fırın cürufu ile uçucu kül veya silis dumanının birlikte kullanılması önerilmiştir.

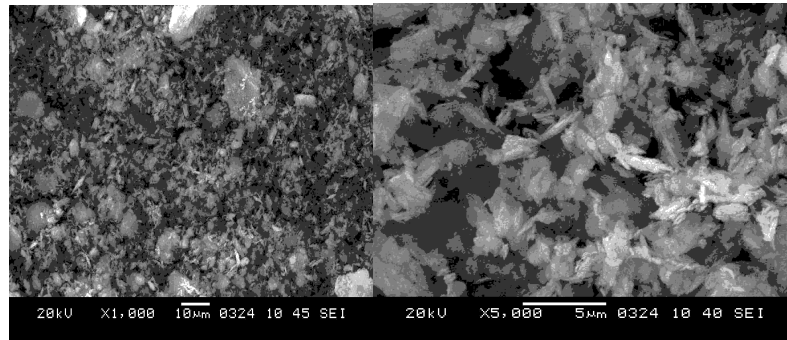
## **2.2 Metakaolin**

Reaktif alümino-silikat puzolan olan MK, yüksek sıcaklık aralıklarında arılaştırılmış kaolin veya kaolinit killerinin yakılarak ve sonrasında çok ince bir şekilde öğütülmesi sonucu elde edilir (Vu, 2002). Beyaz renkli, amorf yapıda bir alümina silikat olan MK arılaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle üretilir. Kil mineralleri çoğunlukla 100 ile 200 °C gibi sıcaklıklarda bünyelerinde barındırdıkları suyu yitirmeye başlar. Bu kil minerallerinden kaolinin MK mineraline dönüşmesi ise 500 ile 900 °C sıcaklık aralığında gerçekleşir. Kaolin kili söz konusu sıcaklıklarda bünyesindeki barındırdığı suyun yaklaşık %14'ünü kaybederek metakaolin mineraline dönüşmektedir. Maruz kaldığı bu başkalaşım neticesinde kristal yapıda bulunan kaolinin alumina ve silika tabakaları bozulmaya uğrayarak amorf ve kimyasal bir reaktif yapı kazanır. Söz konusu işlemler

neticesinde puzolanik belli bir düzene sahip olmayan amorf yapıdaki MK mineralinin meydana geldiği gözlemlenir. MK üretiminde önem arz eden diğer bir nokta ise, kaolin kilinin ihtiyaç duyulandan daha fazla yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmadan kalsine işleminin yapılmasıdır. Mineral katkıların belirli bir sıcaklık altında aktive edilmesine kalsinasyon adı verilmektedir (Sun vd., 2005). Puzolanik aktivitesi yüksek olan MK üretilmesi için doğadan alınan kaolinin hangi sıcaklıkta ne zamana kadar ısıtılması gerektiği üzerine birçok araştırma yapılmıştır ve birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. MK üretebilmesi için kaolin kilinin ısıtılacağı sıcaklık genel olarak 600 ile 900 °C arasında değişmektedir. Kaolin kilinin termal aktifliğine bakılarak söz konusu ısılarda yaklaşık bir kaç saat boyunca ısıtılması gerekir. Genellikle, araştırmacıların ortak paydada birleştiği sıcaklık ise 700 °C dir. Bu sıcaklıkta en iyi kalsinasyon imkânlarının elde edilebileceği rapor edilmiştir (Rashad, 2013). Singh ve Garg (2006) ortaya koydukları çalışmada kaolinin örneklerini çok ufak parçalara ayırmışlardır. Bu parçaları 2 saat süreyle 600 °C, 700 °C ve 800 °C’de ısıtmışlardır. Meydana gelen ürünleri çok küçük toz tanecikleri olacak şekilde öğütmüşler ve 500 ile 550 kg/m<sup>2</sup> arasında blaine inceliğinde MK minerali oluştuğunu gözlemişlerdir.

### 2.2.1 Metakaolinin yapısı

Metakaolin (MK) taneleri incelendiğinde çubuk şeklinde ve köşeli yapıda, oldukça küçük ve belirli bir şekle sahip olduğu ifade edilmektedir. Taramalı elektron mikroskobu ile MK’nin tanecik formunu araştırmak için Fotoğraf 2.1’de görüldüğü gibi fotoğraflar çekilmiştir. Yapısal olarak çok ince ve çubuksu olmasından dolayı MK minerali, betondaki boşluklu yapıyı ve harç kıvamını azaltıcı etkisinden dolayı tercih edilebilir (Tevrizci, 2010). Çizelge 2.3’de, MK’nin fiziksel durumları gösterilmiştir.



**Fotoğraf 2.1** MK’nin SEM fotoğrafı ile büyütülmüş hali (Tevrizci, 2010)

**Çizelge 2.3.** MK'nin bazı fiziksel yapıları (Siddique ve Klaus, 2009)

| Özellik                                   | Tanım          |
|---|----------------|
| Özgül Ağırlık                             | 2.6 (Ortalama) |
| Birim Hacim Ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> ) | 0.3-0.4        |
| Fiziksel Form                             | Toz            |
| Renk                                      | Kirli Beyaz    |
| Parlaklık                                 | 79-82          |

### 2.2.2 Metakaolinin kimyasal yapısı

MK'nin kimyasal olarak bileşenlerine ayırmak istersek temel olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub>'den oluşur. Bunların dışında yapısında az miktarlarda TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşenlerini de bulundurabilir. Çimento katkı maddesi olarak veyahut beton üretiminde kullanılmak istenen MK mineralinin çimento ve betona sağlayacağı faydaları, daha çok yapısında bulundurduğunu ifade ettiğimiz SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşikleri sağlar. Kullanım amacına göre farklılık gösteren MK mineralinin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>2SiO<sub>2</sub> ve amorf kristalli yapıdaki SiO<sub>2</sub> ve benzeri aktif bileşikleride barındırdığı görülmüştür. Bünyesinde barındırdığı suyu tamamen kaybeden kaolinit ve kaolin killerinin durumu tartışmaları da ortaya çıkarmıştır. MK mineralinin amorf alüminyum ve silika oksitlerinin karışımından ortaya çıktığı daha önceleri ifade edilmiş olsa da sonraları MK mineralinin yapı taşından olan kaolinitin bazı bünyesel özelliklerini ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. Günümüzde araştırmacıların birçoğu, MK mineralinin minimum kristalli ve amorf formdaki metakaolinitten meydana geldiği düşüncesinde hemfikirdirler (Seyhan, 1971).

### 2.2.3 Metakaolinin aktivitesi

Puzolanik aktivite, puzolanlarda bulunan alümino silikatlar ve Ca(OH)<sub>2</sub> ile suyun oluşturduğu reaksiyon ve bağlayıcılık kapasitesidir. Puzolanik aktivite, puzolan malzemelerin heterojen bir yapıya sahip olması ve bununla birlikte hidrasyonunun karmaşık özelliğinden dolayı tam olarak bilinmemektedir. Puzolanik aktiviteyi etkileyen başlıca önemli faktörleri ise şu şekilde belirtebiliriz:

- Puzolanların aktivitesi, "Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ SiO<sub>2</sub>" içeriği ve malzemede bulunan reaktif bileşen miktarının artışıyla bir artış göstermektedir.
- Puzolanik malzemenin amorf fazda olması kimyasal reaktivite içinde önem arz eder.

- Puzolanik taneciklerin ince yapıda olmasında önemli bir etken olarak karşımıza çıkar (Erdoğan, 2003).

Beton üretiminde ve puzolanik reaksiyonda MK mineralinin kullanılması durumunda betonu meydana getiren asıl bileşenlerin yapısında meydana gelen değişiklerin incelendiği birçok çalışma mevcuttur. Betonun hidratasyonu esnasında oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$  oluşumunu azaltarak puzolanik ürünlerin oluşmasına sebep olan MK minerali, harç ve beton üretiminde kullanılmaktadır. Puzolanik malzemelerin hidratasyonu, kristalli kalsiyum alümino silikat ve kalsiyum alümino hidrat ( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ,  $\text{C}_3\text{AS}_3\text{H}_{2x}$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) gibi ürünlerin meydana geldiği görülmektedir. Puzolanik reaksiyonlar sonucunda MK/CH oranı ve bununla birlikte reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak son oluşan bileşim farklılık göstermektedir. Betonda oluşması muhtemel gözeneklerin azalmasına neden olan bu puzolanik ürünler toplam boşluk oranı ve ortalama boşluk boyutunu azaltarak daha yoğun bir yapıya sahip beton elde edilmesini sağlar. Tüm bunlara bağlı olarak MK'nın betonun dayanım ve dayanıklılığında bir artışa neden olduğu söylenebilir (Vu, 2002).

MK üretiminde kullanılan kaolinin arılığına ve kalsinasyon şartlarına bağlı olarak MK malzemesinin reaktivitesi farklılık gösterir. Bu farklılık dolayısıyla betonun özelliklerini ve hidratasyonunu etkiler. Chapelle deneyi ile bir mineralin puzolanik reaktivitesi belirlenebilmektedir (Akçay vd., 2013). Bu konu üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmaya göre 1 g puzolan malzemesinin  $\text{Ca(OH)}_2$  kullanım miktarı, SD mineralinde 427 mg, UK mineralinde 875 mg ve MK mineralinde 1050 mg'dır (Asbridge vd., 1994). MK'nin çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %20 yer değiştirme miktarlarında kullanılması kıyaslandığında, puzolanik reaksiyon gerçekleştirilmesinin %5 yer değiştirme oranında diğerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun açıklanmasında betondaki yüksek CH konsantrasyonundan kaynaklandığını ifade etmek daha doğrudur (Siddique ve Klaus, 2009).

#### **2.2.4 Metakaolinin çimento ve betonda kullanılması**

MK günümüzde harç ve beton üretiminde çimento yerine ağırlıkça belirli miktarlarda etkin ve aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Çimento harcında MK katkısının puzolan amaçlı kullanımı ilk olarak 1960'lı yıllara kadar gitmektedir. MK katkısının betona

kazandırdığı etkili direnç ve dayanıklılık özellikleri göz önüne alındığında beton elde edilmesinde kullanımı 1990'lı yıllardan itibaren yaygınlık göstermiştir (Barness ve Bensted, 2001). 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı yapımında portland çimentosunun bir kısmı yerine MK katkısı kullanılarak elde edilen betonlar ilk örnekleri teşkil etmektedir. Beton dayanımını arttırması için Jupia Barajı inşaatında MK tercih edilmiştir. Bu tarih MK minerali için milat kabul edilmiştir. MK'nin bundan sonra çimento üretimi ve beton elde edilmesinde yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. MK katkısı günümüzde normal beton elde edilmesinde ve portland çimentosuna katkı olarak kullanılmasının yanısıra yüksek dayanıma sahip beton ve harçların üretilmesi içinde kullanılmaktadır. MK ile alakalı çalışmaların büyük çoğunluğu beton elde edilmesinde kullanılacak olan MK mineralinin en uygun optimal koşullar ve miktarının belirlenmesi üzerinedir. MK mineralinin portland çimentosu yerine belli oranlarda kullanılması ve betona değişik miktarlarda ilave edilmesi durumunda MK katkısının betonun özellikleri üzerine etkilerinin tespitine yönelik çalışmalar günümüzde de yapılmaktadır (Pera, 2001). MK beton imalatında birçok alanda kullanılmaktadır. Yaygın olarak yüksek dayanımlı ve performanslı beton üretimde kullanılmaktadır. Dahası prefabrik olarak üretilen ön üretim elemanlarında, hafif yapı elemanlarının üretiminde, fiberli betonarme betonu üretiminde, alçı işlerinde, tamir işlerinde, ferro çimento üretiminde ve havuz projelerinin yalıtımı için kullanılan sıva imalatında kullanılabilir (Siddique ve Klaus, 2009).

### **2.2.5 Metakaolinin beton özelliklerine etkisi**

MK katkılı çimento harçlarının kıvamlarının farklı olmasının başlıca nedenleri arasında MK'nin imalatı esnasında gerekli olan kaoline tatbik edilen yüksek sıcaklık derecesi ve ısıtma süresi gösterilebilir. Bu ısıl işlemlerin sonucu olarak MK katkısı kullanılan betonların da su ihtiyaçları farklılık göstermektedir. Yapılan çalışmalarda MK katkısının kullanılması durumunda çimentonun hidratasyon sıcaklığının önemli şekilde değiştiği belirtilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar neticesinde mineral katkı bulandırmayan harçların hidratasyon ısısının MK katkılı karışımlara göre kıyaslaması yapıldığında yüksek puzolanik aktivitelerinden dolayı, MK katkılı harçların daha yüksek hidratasyon ısısına sahip oldukları görülmüştür. Tüm bu gelişmeler ışığında MK katkılı betonların priz başlangıcı ve bitişinde gecikme olduğu görülmüştür.

Bir diğ er araştırma da MK içeren betonun çökme değeri üzerine yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre MK içeriğ i bulunan karışımların çökme değ erlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Fakat çimento yerine ağırlıkça %5 gibi düşük bir oranda MK katkısı kullanılmışsa betonun işlenebilirliğinin çok fazla değ iş iklik göstermediğ i tespit edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre MK miktarına göre %1 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanılması durumunda dahi, önem arz edecek şekilde kıvam kaybı meydana gelmiştir. Fakat kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarını %1.2 seviyelerine çıkardığımız zaman herhangi bir kıvam kaybından bahsetmek söz konusu olmamaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre uygun miktar ve durumlarda akışkanlaştırıcı kullanılması kıvam problemi yaşanmadan çimento yerine MK katkısının yüksek miktarlarda kullanımını sağlamaktadır (Qian ve Li, 2001). MK katkılı karışımların kontrol karışımlarına göre priz başlangıç ve bitiş süresinin uzadığı ve işlenebilirliğinin daha az seviyelerde olduğu yapılan deneysel çalışmalarda ortaya konulmuştur. Çizelge 2.4'te kontrol karışımları ve %5, %10 ve %15 miktarlarında MK katkısı çimento ile ağırlıkça yerdeğ iş tirilen karışımların çökme miktarları, priz başlangıç ve bitiş zamanlarının sonuçları gösterilmiştir (Brooks ve Johari, 2001). Bu çizelgede görüldüğü gibi %10 oranında MK mineralinin çimento ile yerdeğ iş tirildiğ i durumlarda priz başlangıç ve bitiş sürelerinin diğ er karışım ve kontrol betonlarına kıyasla daha geç olmaktadır.

**Çizelge 2.4.** MK içeren betonların priz süresi ve slump değ erleri (Brooks ve Johari, 2001)

| Beton Karışımları | Slump (mm) | Priz Başlangıcı (saat) | Priz Sonu (saat) |
|-------------------|------------|------------------------|------------------|
| Kontrol           | 100        | 5.00                   | 7.70             |
| %5 MK             | 30         | 6.42                   | 8.82             |
| %10 MK            | 20         | 6.98                   | 9.42             |
| %15 MK            | 5          | 6.45                   | 9.31             |

Bir başka çalışmadan elde edilen sonuçlara göre MK katkılı harçların priz başlama ve bitiş sürelerinin MK katkısı kullanılmayan harçlara göre daha geç olduğu tespit edilmiştir. Çimento hamurunda meydana gelecek su ihtiyacı da MK katkısının artışıyla birlikte önemli ölçüde artış göstermektedir. Deneye tabi tutulan örneklerde aynı kıvamı elde edebilmek için su-bağlayıcı miktarı, karışımda bulunan MK içeriğine bağı lı olarak yükseltilmiştir. Yapılan bir çalışmada farklı iki kaynaktan elde edilen MK katkısı kullanılmış olup bunlar MK ve MKC şeklinde adlandırılmıştır. MK katkısı bulunmayan

karişım ve buna ilaveten 10 ve %20 MK ve %20 MKC bulunduran örneklerin su-bağlayıcı miktarları ile priz başlangıç ve bitiş sürelerini gösteren sonuçlar Çizelge 2.5'te verilmiştir. MK katkısının olduğu karişımın mineral katkı bulunmayan harçlara oranla su ihtiyacının fazla olması MK katkısının çok ince yapısından kaynaklandığı düşünölmüştür (Batis vd., 2005).

**Çizelge 2.5.** MK içeren harçların priz alma süresi ve su ihtiyacı (Batis vd., 2005)

| Numune  | Su İhtiyacı | Priz Başlangıcı<br>(dakika) | Priz Sonu<br>(dakika) |
|---------|-------------|-----------------------------|-----------------------|
| Kontrol | %27.5       | 105                         | 140                   |
| %10 MK  | %32.5       | 155                         | 180                   |
| %20 MK  | %41.0       | 205                         | 230                   |
| %20 MKC | %37.5       | 140                         | 170                   |

Yapılan bir diğerkarişımada, su-bağlayıcı miktarı sabit tutulmak kaydıyla MK'nin harçların priz başlama ve bitiş süresine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada farklı iki kaynaktan elde edilen MK katkısının harçların priz başlama ve bitiş süresini etkilediğı, bu etkinin yüzey alanı büyük olan MK örneklerinden yüzey alanı küçük olan MK örneğine kıyasla daha kısa sürede olduğu tespit edilmiştir. Bu durumundan anlaşılacağı üzere tane boyutunun yüzey alanı büyük olan MK katkısı bulunan harçların priz başlama ve bitiş süresinin, tane boyutunun yüzey alanı küçük olan MK katkısı bulunan harçlara oranla daha kısa olduğu söylenebilir. Karişımda kullanılması öngörölen MK katkısının yüzey alanı artış gösterirse harçların daha erken priz alacağı düşünölebilir. MK barındırmayan kontrol örneğı ile aynı işlenebilirliğı sağlayan MK karişımları elde edebilmek için, tane yüzey alan boyutu büyük olan MK barındıran harçlarda kontrol harçlarına kıyasla 3 misli daha fazla su kullanılmıştır. Daha küçük yüzey alanına sahip MK katkısı bulunduran harçlar ise kontrol örneğıne göre aynı kıvamı sağlamak amacıyla iki kat su kullanılmasını gerektirmiştir. Bu durumdan da anlaşılacağı üzere, kullanılan MK'nin toplam yüzey alanının artması ile birlikte işlenebilirliğın azaldığı tespit edilmiştir (Justice ve Kurtis, 2007).

İleri ki yaşlarda MK pasta, harç ve betonun karakteristik özelliklerinden dayanım ve dayanıklılığını etkilemektedir. Kaynaklardan elde edilen verilere göre betonda MK içeriğinin betonun yoğunluk değerini arttırdığı, çevresel ve kimyasal etkilere karşı dayanım kazandırdığı,  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerlerini arttırdığı söylenebilir. Betonda meydana gelen

bu pozitif etkileri oluşturan mekanizmalar şu şekilde açıklanabilir. Kimyasal dayanım olarak puzolanik reaksiyonlar oluşturmasıyla, fiziksel dayanım olarak ise çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurmasıyla açıklanabilir (Vu, 2002).

Puzolanik özelliği yüksek olan MK katkısı çimento üretiminde ve beton elde edilmesinde kullanıldığı zaman sertleşmiş beton özelliklerini geliştirdiği yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre; özellikle MK katkısı bulduran çimento harcı ve betonun ileriki yaş dayanım sonuçlarına olumlu etkileri gözlemlenmiştir. Beton imalatında mineral katkı malzemesi olarak MK, çimento yerine kullanılması durumunda, kılcal yollarla betona suyun girmesini engellemektedir. Betonda MK katkısının kullanılması betonun gözenekli yapısıyla alakalı değişikliklere neden olmakla birlikte geçirgenliğinde azaltmaktadır. Tüm bu etkiler göz önüne alındığı zaman betonun suyun içerisinde ki hareketinden kaynaklı iyonların difüzyonu neticesinde beton matrisinde meydana gelecek zararlı bozulmaların kısmen önüne geçilmiş olur. Betonun maruz kalacağı sülfat saldırılarına karşıda içeriğinde MK kullanılması betona olumlu etki yapmaktadır. 10 ve %15 MK katkısı çimento yerine kullanılırsa, betonlar sülfatın olumsuz etkilerine karşı mükemmel dayanım göstermektedir. Bu dayanım sadece sülfat etkisiyle kısıtlı olmayıp MK katkısı buldurmeyen betonlara göre zararlı kimyasallara karşı daha fazla direnç göstermektedir. Alkali-silika reaksiyonlarının neden olduğu zararlı genleşmeler betonda ciddi sıkıntılara sebebiyet vermektedir. Beton karışımlarında yüksek reaktiflikte çimento yerine ağırlıkça %10 ve %15 oranında MK kullanılması durumunda bu genleşmeler kontrol altına alınabilmektedir (Siddique ve Klaus 2009).

Çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki geçiş yüzeyi, çimento hamurunda mevcut olan boşluklu yapıya oranla daha fazla boşluklu yapıya sahip olduğu ve çimento hamurunun su-bağlayıcı miktarıyla mukayese edildiğinde daha yüksek oranda su-bağlayıcı oranına sahip olduğu görülmektedir. Betonun zayıf noktalarından biri olarak da bu geçiş ara yüzeyi gösterilebilir. Beton imalatında çimentoya kıyasla tane boyutu yüzey alanı küçük olan MK katkısının kullanılması durumunda geçiş ara yüzeyinin boşluklu yapısı azalıp daha yoğun bir hale gelmesine sebep olmaktadır (Khatib, 2008).

Çimento hamuru ile agrega arasında mevcut olması muhtemel geçiş ara yüzeyinde ki yapı dayanım ve geçirimsizlik için önemlidir. Deneysel çalışmalarda MK katkısının belirli oranlarda çimento yerine kullanılmasıyla çimento hamurunun matrisinde ve geçiş ara

yüzeyinde iyileşmenin olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen verilere göre MK katkısının bulunmadığı kontrol örneği ile MK katkısına sahip örneklerin mikro sertliği araştırılmış 0.5 su-bağlayıcı oranında %13 olduğu, 0.6 su-bağlayıcı oranında %54'den daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. MK katkısının çimento hamurunda kullanılması daha homojen bir çimento hamuru olmasına olanak sağlamıştır (Asbridge vd., 2002).

Literatürde yer alan verilere göre betonda 20 nm ve bundan daha ufak boşlukların betonun dayanımı ve dayanıklılığı ile alakalı özelliklere çok fazla etki etmediği, boşluğun 20 nm den biraz büyük olduğu durumlarda beton dayanımı üzerinde olumsuz etkilere sebep olduğu, 160 nm den büyük boşlukların olduğunda ise beton dayanımının hızla azaldığı ve betonun geçirimliliğini arttırdığını deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Yapılan bir çalışmada beton elde edilmesinde çimento yerine hacimce bazı miktarlarda değişik yerlerden elde edilen farklı iki MK katkısı kullanılmıştır. Kullanılan MK katkısının biri MK- I diğeri ise MK-II olarak adlandırılmıştır. MK katkısı bulunmayan kontrol betonu ve MK katkısı kullanılarak elde edilen betonlarda bulunan boşluk miktarları Çizelge 2.6'da görülmektedir. Kontrol betonuna göre MK katkılı betonlarda, büyük boyutlu boşlukların az olması MK katkısı bulunan betonların daha iyi dayanım ve dayanıklılığa erişmesine olanak sağlamaktadır (Badogiannis ve Tsivilis, 2009).

**Çizelge 2.6.** Numunelerde bulunan gözenekler (Badogiannis ve Tsivilis, 2009)

| Numune    | Boşluk Hacmi (mm <sup>3</sup> /g) |       |        |
|-----------|-----------------------------------|-------|--------|
|           | <20nm                             | >20nm | >160nm |
| Kontrol   | 7.0                               | 44.8  | 7.0    |
| %10 MK-II | 8.5                               | 42.9  | 6.5    |
| %20 MK-II | 9.1                               | 43.2  | 4.1    |
| %10 MK-I  | 3.7                               | 27.5  | 2.6    |
| %20 MK-I  | 8.2                               | 37.8  | 3.9    |

Çimento hamurunda MK varlığı, toplam poroziteye etkisiyle birlikte aynı zamanda betondaki boşluk boyutu dağılımını da etkilemektedir. MK oranındaki artış çimento hamurundaki daha küçük boşluklarında artışına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı, beton karışımlarında MK katkısının oransal olarak artışı ile mikro boşlukların oranı artar ve daha büyük boşlukların miktarı azalır. İleri yaşlarda bu boşluk dağılımı düzenli bir hal

almaktadır. Bu düzenlenme derecesi yapısında bulundurduğu MK katkısının oranına göre değişkenlik göstermektedir (Frias ve Cabrera, 2000).

### 2.2.5.1 Metakaolinin betonun basınç dayanımına etkisi

Harç ve betonun özelliklerini etkileyen başlıca etkiler malzemenin ve ortaya çıkan hidratasyon ürünlerinin boşluklu yapısı, hidratasyon ürünlerinin türü, büyüklüğü ve dağılımıdır. Bazı deneysel çalışmalarla, MK katkılı betonların  $f_c$  değerlerinin değişimi üzerine tespitler yapılmıştır. Karışımlarda, uygun oranlarda MK katkısının kullanılması betonun  $f_c$  değerlerinde önemli bir artış sağlamaktadır. Yapılan bir çalışmada MK katkısı çimento yerine ağırlıkça %5 ve %10 oranında kullanıldığında kontrol betonuna kıyasla  $f_c$  değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Çimento yerine kullanılan farklı katkı maddelerinden SD ve MK üzerine yapılan bir çalışmada ise MK katkılı betonların aynı oranda SD barındıran betonlardan daha yüksek  $f_c$  değerlerinin olduğu tespit edilmiştir. Betonda kullanılan katkı maddelerinden MK'nin,  $f_c$  değerlerindeki olumlu etkisinin yaklaşık bir yıla kadar sürdüğü yine deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir (Caldarone vd., 1994).

MK katkısı kullanılarak elde edilen betonların, MK kullanılmadan üretilen betonlara kıyasla, daha yüksek  $f_c$  değerlerine sahip olmasını 3 temel nedene bağlamak mümkündür. Bunlardan birincisi MK katkısının puzolonik aktivitesidir. İkincisi MK katkısının betonda meydana gelecek hidratasyon reaksiyonlarının hızını arttırmasıdır. Üçüncüsü MK katkısının betondaki mevcut boşluklu yapıya olumlu etkisidir. Farklı karışım miktarları hazırlanarak elde edilen bir diğer çalışmada üretilen betonların yoğunluk ve  $f_c$  değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında % 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 MK'nin çimento ile yer değiştirilerek kullanıldığı betonlar, MK katkısı bulundurmayan kontrol betonuna göre  $f_c$  değerleri 7. günden itibaren artış göstermiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen veriler Çizelge 2.7'de gösterilmiştir. %15 MK katkısı kullanılarak elde edilen betonlarda puzolonik etkiyle beraber 1. günden itibaren başlayarak 90. güne kadar her yaşta  $f_c$  değerleri belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Yine bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre MK katkısı kullanılan betonların yoğunlukları MK katkısı kullanılmayan kontrol betonlarına kıyasla daha düşük çıkmıştır. MK katkısının kullanıldığı betonlarda yoğunluğun düşük çıkmasının sebebi olarak çimentonun yoğunluğunun MK katkısına göre daha fazla olması gösterilebilir. Bu çalışmaya göre

optimal düzey olarak MK'nin yer değiştirme seviyesinin % 10-20 civarında olduğu söylenebilir (Wild vd., 1996).

**Çizelge 2.7.** MK içeren betonların yoğunlukları ve basınç dayanımları (Wild vd., 1996)

| MK Oranı | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) | Basınç Dayanımı (MPa) |       |        |        |        |
|----------|-------------------------------|-----------------------|-------|--------|--------|--------|
|          |                               | 1 gün                 | 7 gün | 14 gün | 28 gün | 90 gn |
| %0       | 2490                          | 19.07                 | 50.23 | 57.10  | 62.60  | 72.43  |
| %5       | 2440                          | 21.50                 | 53.80 | 58.97  | 63.50  | 71.63  |
| %10      | 2460                          | 22.43                 | 62.30 | 69.23  | 71.00  | 80.07  |
| %15      | 2470                          | 20.23                 | 64.80 | 74.67  | 76.00  | 83.70  |
| %20      | 2480                          | 19.33                 | 66.47 | 75.73  | 82.47  | 85.13  |
| %25      | 2470                          | 15.73                 | 62.50 | 69.77  | 73.93  | 82.23  |
| %30      | 2480                          | 14.53                 | 60.53 | 72.33  | 76.73  | 81.80  |

Yapılan bir diğer çalışmada ise SD ve MK katkısı kullanarak yüksek performanslı betonlar elde edildiği görülmüştür. Çalışmanın detaylarında 2 farklı grup altında 12 farklı karışım elde edilmiştir. Bu gruplar oluşturulurken su-bağlayıcı miktarı belirleyici etken olarak tutulmuş ve birinci grupta bu miktar 0.3 iken ikinci grupta 0.5 olarak belirlenmiştir. Her bir grup için oluşturulan karışımlarda % 5, 10 ve 20 oranında SD ve MK katkısı imento yerine kullanılmış, bunlara ek olarak hiçbir mineral katkısı bulunmayan kontrol örnekleri üretilmiştir. Üretilen karışımların sonuçlarına bakıldığı zaman MK katkısının beton dayanımına etkisinin SD'nin beton dayanımına etkisine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yine bu çalışmada imento yerine ağırlıkça %10 oranında MK katkısı kullanılarak elde edilen betonun aynı oranda SD kullanılarak elde edilen betona kıyasla daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Betonlarda mineral katkı olarak SD veya MK katkısının kullanılması durumunda betonun  $f_c$  değerlerine özellikle ilerleyen yaşlarda olumlu etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. MK katkısının olduğu beton karışımlarında genel olarak her yaşta olmakla birlikte özellikle 3 günlük örneklerde kontrol betonlarına göre daha yüksek dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Fakat SD kullanılan beton örneklerinde 3. günde herhangi bir artış gözlemlenmemiştir. Bununla beraber SD katkısı kullanılarak elde edilen betonlar ile kontrol betonlarının 28. günden itibaren karşılaştırılması yapıldığında SD katkısı bulunan betonların  $f_c$  değeri daha yüksek çıkmıştır. SD ve MK katkısı bulunduran betonların  $f_c$  deney sonuçları izelge 2.8'de gösterilmiştir. İkinci serideki örneklerde su-bağlayıcı oranı daha yüksek olduğu bu seriye göre, su-bağlayıcı oranı daha düşük olan birinci serideki örneklerin  $f_c$  değerleri daha

yüksek çıkmıştır. Deneyin uygulanması sırasında her bir değer için üç küp örneği alınmış ve sonuçlar bu üç küp örneğin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmada dayanımı yüksek beton elde edilmesi için çimento yerine ağırlıkça % 10 MK katkısı ikamesinin iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Poon vd., 2006).

**Çizelge 2.8.** Betonun basınç dayanımına MK ve SD katkısının etkisi (Poon vd., 2006)

| Seriler | Su-çimento Oranı | Karışım (%) | Basınç Dayanımı (MPa) |         |        |        |
|---------|------------------|-------------|-----------------------|---------|--------|--------|
|         |                  |             | 3 gün                 | 7 gün   | 28 gün | 90 gün |
| 1       | 0.3              | Kontrol     | 68.50                 | 81.10   | 96.50  | 102.50 |
|         |                  | 5MK         | 73.00                 | 88.20   | 103.60 | 112.90 |
|         |                  | 10MK        | 85.90                 | 99.80   | 116.80 | 120.30 |
|         |                  | 20MK        | 70.80                 | 87.60   | 99.60  | 113.80 |
|         |                  | 5SD         | 67.00                 | 79.30   | 106.50 | 110.20 |
|         |                  | 10SD        | 63.20                 | 76.90   | 107.90 | 115.60 |
|         |                  | 2           | 0.5                   | Kontrol | 28.60  | 41.20  |
| 5MK     | 32.60            |             |                       | 45.90   | 57.10  | 66.50  |
| 10MK    | 40.40            |             |                       | 55.20   | 66.20  | 71.60  |
| 20MK    | 30.00            |             |                       | 43.20   | 58.40  | 69.10  |
| 5SD     | 27.40            |             |                       | 47.00   | 54.30  | 67.50  |
| 10SD    | 25.80            |             |                       | 47.40   | 58.40  | 69.10  |

### 2.2.5.2 Metakaolinin betonun eğilme dayanımına etkisi

Betonların  $f_{fs}$  değerleri üzerine MK katkısının etkisi incelendiğinde pozitif bir katkı sağladığı görülmüştür. MK katkısı kullanılan betonlarda MK çimento hamuru içerisinde dolgu etkisi yapması ve  $Ca(OH)_2$  ile reaksiyona girmesiyle daha fazla C-S-H jeli oluşturduğundan dolayı  $f_{fs}$  sonuçları üzerine pozitif katkı sağlamaktadır. Yapılmış olan bir deneysel çalışmada yüksek dayanımlı ve performanslı betonlara MK ve SD katkılarının etkisi araştırılmıştır. Beton karışımı hazırlanırken çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda MK ve SD kullanılmıştır. Buna ilaveten kırılmış quartz kumu ve çelik fiberde uygulamada karışıma konulmuştur. Elde edilen örnekler farklı sıcaklıklarda küre tabi tutularak  $f_{fs}$  deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre quartz kumu, fiber ve MK katkısının birlikte kullanılarak 150 °C de küre tabi tutulması sonucu üretilen beton en yüksek sonuçları vermiştir. Bu beton karışımında  $f_{fs}$  değeri yaklaşık olarak 40 MPa elde edilmiştir. SD içeren beton numunelerinin  $f_{fs}$  değerleri, MK içeren betonlarınkıyla hemen hemen aynı çıkmıştır. Betonda fiber varlığının betonun  $f_{fs}$  değerlerini arttırdığını göstermiştir. Bu sonuçlar ele alındığında yüksek dayanımlı ve performanslı beton üretimi

için MK mineralinin önemini ortaya koymuştur (Taфраoui vd., 2009). Betonların eğilme tokluğu üzerine çalışılan bir başka araştırmada yüksek reaktif özellikteki SD ve MK minerallerini ve fiber barındıran, yüksek dayanımlı ve performanslı betonların kontrol betonuna kıyasla %15 daha fazla olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yapısında puzolan barındırmayan kontrol betonlarının eğilme tokluğunun, puzolan barındıran betonlara %1 oranında fiber katkısı kullanılmasıyla elde edilen beton numunelerin eğilme etkisindeki kırılma tokluğu ile aynı olabileceği görülmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde çelik fiberin betonların kırılma davranışı üzerine etkisi araştırılmış ve bu sonuçlar neticesinde enerji yutma özelliği barındıran beton numunelerinin MK katkısı barındıran betonlar olduğu görülmüştür. Puzolanik katkılardan SD ve MK kıyaslanması yapıldığında yapısında SD bulunduran betonların MK katkısı bulunan betonlara kıyasla daha gevşek davrandığı ve zayıf enerji yutmaya sahip olduğu gözlemlenmiştir (Dubey ve Banthia, 1998).

Bir diğer çalışmada ağırlıkça farklı oranlarda MK katkısı kullanılan betonlar üzerine birkaç çeşit hızlandırılmış kür yöntemlerinin etkisi araştırılmış ve  $f_{fs}$  sonuçlarına yaptığı etki incelenmiştir. Bu çalışmada, %5, 10, 15 ve 20 miktarlarında MK katkısı, çimento ile yer değiştirilerek farklı karışımlar elde edilmiştir. Karışımların eldesinde bağlayıcı su oranı 0.5 olarak belirlenmiş ve aynı zamanda agrega-bağlayıcı oranı 3:1 olarak ifade edilmiştir. Çimento yerine ağırlıkça %15 oranında MK katkısının kullanıldığı harç karışımında  $f_{fs}$  değerleri en yüksek çıkmıştır. Buna ek olarak hızlandırılmış kür uygulamalarında ise çimentonun yerine %10 oranında MK katkısı kullanılan betonlarda maksimum  $f_{fs}$  değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Yapılmış olan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilere göre MK katkısının kullanılması ile elde edilen harçlarda, MK katkısının  $f_{fs}$  değerlerine olan etkisi erken yaşlarda da görülmüştür (Yazıcı vd., 2010).

### **2.2.5.3 Metakaolinin betonun yarmada çekme dayanımına etkisi**

Beton üretiminde MK katkısı kullanılması durumunda daha yoğun bir beton elde edilmesinin yanında, MK katkısının  $f_{sts}$  değerlerinde artışa olanak sağladığı birçok araştırmacı tarafından tespit edilmiştir. Bu konu üzerinde yapılmış olan çalışmalarda beton veya harçların içeriğinde bulunan MK katkısının artışı betonun  $f_{sts}$  değerlerini de sistematik bir şekilde arttırdığı yapılan gözlemlerle tespit edilmiştir. Bahse konu olan bu

çalışmada, % 5, 10 ve 15 oranında MK katkısı çimento ile yerdeğiştirilerek kullanılmış ve elde edilen  $f_{sts}$  sonuçları Çizelge 2.9’da gösterilmiştir (Qian ve Li, 2001).

**Çizelge 2.9.** MK katkılı beton numunelerinin  $f_{sts}$  değerleri (Qian ve Li, 2001)

|            | $f_{sts}$ (MPa) |
|------------|-----------------|
| Karışımlar | 28 gün          |
| Kontrol    | 3.35            |
| 5MK        | 3.58            |
| 10MK       | 3.88            |
| 15MK       | 4.29            |

Bu konu üzerine yapılmış olan bir diğer çalışmada ise MK katkısı bulunmayan kontrol betonlarının yanı sıra yine %8, 16 ve 24 miktarlarında MK çimento ile yerdeğiştirilerek beton karışımlarında kullanılmıştır. Betonun rijitliğinin MK katkısının etkisiyle arttığı gözlemlenmiştir. Diğer mekanik özellikler üzerinde analog etkinin önemli olduğu tespit edilmiştir. Yapısında MK katkısı bulunmayan betonların kırılma davranışları incelendiğinde, betonların enerji yutma kapasitesinin su-bağlayıcı miktarı arttıkça belirgin bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. MK katkısı bulunmayan kontrol betonlarının yük-deplasman eğrisinin tepe noktası MK katkısı bulunan betonlara oranla daha düşüktür. 0.42 su-bağlayıcı miktarına sahip beton karışımlarında, eklenen MK katkısının  $f_{fs}$  sonuçlarında ciddi bir artış oluşturduğu tespit edilmiştir. Özel olarak üzerinde durulan bir diğer konu ise bağlayıcı miktarının az olduğu karışımlarda MK katkısının eklenmesiyle  $f_c$  değerleri değişmemiş,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  sonuçlarında ise artış olduğu görülmüştür (Akçay vd., 2013).

## 2.2.6 Metakalon ile Yapılmış Çalışmalar

MK malzemesi üzerine yapılan çalışmalar literatürde genellikle iki ana grupta ele alınmıştır. İlk olarak kaolin kilinin MK mineraline dönüşümü ve kaolin kilinin yapısı ele alınmış, ikinci olarak ise çimento, harç beton özelliklerine etkisi ve MK mineralinin puzolanik aktivitesi üzerinde çalışılmıştır. Deneysel uygulamalarda MK barındırmayan kontrol betonu ile %5, 10 ve 20 miktarlarında MK ile çimentonun yerdeğiştirdiği karışımları Qian ve Li (2001) incelemiştir. Burada elde edilen yüksek performanslı betonlar üzerinde  $E_c$ ,  $f_{fs}$ ,  $f_c$  ve  $f_{sts}$  değerlerin tespitine yönelik çalışmalar yapılmıştır. MK’nin mineral katkı olarak kullanılması  $f_{sts}$  ve en yüksek düzeydeki deplasman değerleri

MK muhtevasının artmasıyla artış göstermiştir. Dahası  $f_c$  değerlerini MK katkısının bilhassa erken yaşlarda artırdığı ve sonraki yaşlarda  $f_c$  değerini yükseltici yönde tesir ettiği ifade edilmiştir. Çizelge 2.10’da belirtildiği üzere MK mineralinin betonlardaki  $E_c$  verilerine etkisinin az olduğu söylenebilir. Ayrıca,  $E_c$  değerlerinde çok küçük artışların olmasına rağmen,  $f_c$  değerlerinde ise büyük artışların olduğu bu çizelgeden görülmektedir. Bir diğer çıkarılan sonuç ise betonun  $f_c$  ve  $f_{fs}$  verileri üzerine en büyük tesir eden MK yer değiştirme miktarının %15 olduğudur. MK katkısının  $f_{fs}$  verileri üzerine tesiri Çizelge 2.11’de gösterilmeye çalışılmıştır. Bahsi geçen çizelgeye göre, çimento yerine ağırlıkça %5 MK kullanılırsa betonun  $f_{fs}$  verilerinin çok düşük miktarda arttığı söylenebilir.  $f_{fs}$  verilerindeki en büyük artışlar %32 ve %38 olmak üzere MK yer değiştirme miktarının %10 ve %15 olduğu durumda görülmüştür. MK içeriği ile birlikte betonun  $f_{sts} / f_c$  oranı ve  $f_{fs} / f_c$  oranı azalmıştır. Bunun neticesinde MK içeriğinin artmasıyla orantılı olarak betondaki gevreklik durumunun da orantılı olarak arttığı uzmanlar tarafından tespit edilmiştir.

**Çizelge 2.10.** MK katkılı betonlar basınç dayanım ve elastisite modülü (Qian ve Li, 2001)

|            | Basınç Dayanımı (MPa) |        |        | Statik Elastisite Modülü (GPa) |        |        |
|------------|-----------------------|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|
|            | 3 gün                 | 28 gün | 60 gün | 3 gün                          | 28 gün | 60 gün |
| Karışımlar |                       |        |        |                                |        |        |
| Kontrol    | 27.9                  | 37.8   | 58.0   | 24.1                           | 30.0   | 30.4   |
| MK5        | 36.3                  | 45.7   | 62.4   | 25.6                           | 31.5   | 33.1   |
| MK10       | 39.1                  | 63.8   | 66.5   | 26.0                           | 33.2   | 34.4   |
| MK15       | 42.2                  | 69.7   | 77.8   | 26.2                           | 26.2   | 26.2   |

**Çizelge 2.11.** MK katkılı betonların eğilme dayanımı (Qian ve Li, 2001)

|            | Eğilme Dayanımı (MPa) |        |
|------------|-----------------------|--------|
|            | 28 gün                | 80 gün |
| Karışımlar |                       |        |
| Kontrol    | 4.65                  | 5.70   |
| MK5        | 4.74                  | 5.81   |
| MK10       | 6.16                  | 6.46   |
| MK15       | 6.40                  | 7.06   |

Gleize vd. (2007) araştırmalarında su-bağlayıcı miktarı 0.3-0.5 olan çimento karışımında otojen rötresi üzerine çalışmalar yapmıştır. Çalışmada çimento ile %5, 10, 15 ve 20 oranında MK yer değiştirilerek kullanılmıştır. Yapılan bu araştırma MK içeriğinin otojen rötreyi sonraki yaşlarda bariz bir şekilde azalttığı tespit edilmiştir. MK içeriğinin su-bağlayıcı miktarı daha düşük olan çimento ve harç karışımlarına kıyasla, su-bağlayıcı oranı yüksek çimento ve harç karışımının otojen rötreyi düşürmede çok daha tesirli olduğu görülmüştür. MK katkısız numuneye kıyasla, çimento ile %20 oranında yer

değiştirilerek kullanılan MK katkılı, su-bağlayıcı miktarı 0.5 olan beton karışımlarında otojen rötrede %56 azalma tespit edilmiştir. Su-bağlayıcı miktarı 0.3 olan betonlarda ise %35 azalma tespit edilmiştir. Bunların yanında çimento ile %15 oranında yer değiştirilerek MK mineralinin kullanılması durumunda, kontrol betonuna kıyasla kuruma rötresinin azaldığı gözlenmiştir.

Khatib ve Clay (2004) tarafından yapılan araştırmada, harçlarda su emilimine MK mineralinin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada çimento ile ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20 oranlarında MK minerali yer değiştirilmiş ve MK barındırmayan numune karışımı ile kıyaslamıştır. Araştırmanın neticesinde, harçlarda kılcal olarak su emiliminin, gözeneklerin büyüklüğüne, hacmine ve bunun yanında süreksizlik gibi etmenlerde bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Çizelge 2.12'den anlaşılacağı üzere, çapı 0.04  $\mu\text{m}$ 'un altında olan boşluk yapısının MK içeriği ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada, 14. günden sonra numune karışımlarında, MK içeriğinin artmasıyla küçük gözeneklerin net bir şekilde arttığı görülmüştür. Deneysel araştırmada, karışımlardaki MK bileşenin artmasıyla büyük gözeneklerin azaldığı ve sürekli olmadığı ve kılcal yolla betonun su emmesinin sistematik bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Deneysel araştırmalar neticesinde Çizelge 2.13'de de ifade edildiği üzere MK içeren karışımlarda bulunan küçük gözenek miktarı yüzdesinin kontrol karışımlarına kıyasla yüksek olduğu tespit edilmiştir.

**Çizelge 2.12.** MK içeren karışımlardaki küçük gözenek miktarı

| Yaş (gün) | Küçük Gözenekler (%) |      |       |       |
|-----------|----------------------|------|-------|-------|
|           | Kontrol              | 5 MK | 10 MK | 15 MK |
| 3         | 22.2                 | 28.3 | 31.0  | 39.9  |
| 7         | 26.5                 | 32.1 | 41.0  | 50.4  |
| 14        | 30.3                 | 43.0 | 53.9  | 55.7  |
| 28        | 33.7                 | 43.5 | 48.7  | 54.9  |
| 90        | 37.3                 | 44.7 | 49.9  | 57.6  |

**Çizelge 2.13.** MK içeren karışımlarda gözenek hacmi

| Yaş (gün) | Gözenek Hacmi ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ) |       |        |        |
|-----------|--|-------|--------|--------|
|           | Kontrol                                  | %5 MK | %10 MK | %15 MK |
| 3         | 262.0                                    | 257.6 | 284.1  | 277.6  |
| 7         | 229.6                                    | 261.7 | 268.8  | 251.6  |
| 14        | 209.9                                    | 203.4 | 221.0  | 212.1  |
| 28        | 189.1                                    | 205.3 | 237.1  | 222.7  |
| 90        | 181.4                                    | 180.8 | 219.6  | 198.9  |

Siddique ve Kadri (2011) isimli araştırmacılar beton özelliklerine, dökümhane kumu ve MK'nın tesiri üzerine çalışmalar ve araştırmalar yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada bağlayıcı olarak 450 kg/m<sup>3</sup> çimento ve 0.45 su-bağlayıcı oranı ile beton dizayn edilmiştir. Bunlara ek olarak karışımlarda ince agrega yerine %0 ve %20 dökümhane kumu ve çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 MK kullanmıştır. 35, 56 ve 84 günlük periyotlarda MK barındıran beton numunelerinde zamanın etkisi ile yüzeysel su emme, kılcal geçirimsizlik ve  $f_c$  deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler neticesinde MK içeriği ile yüzeysel su emiliminin azaldığı tespit edilmiştir. Bunların neticesinde ise MK içeren numunelerin yüzeylerinin daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Bu deneyler neticesinde ulaşılan bir diğere sonuç ise betonun su emilim oranı ile  $f_c$  değerleri arasında ters orantı olduğu tespit edilmiştir. Araştırmalar sonucunda kontrol betonlarına göre, MK içeren beton numunelerinin daha az kılcal geçirimsizliğin olduğu ifade edilmiştir. Dahası %15 MK içeren beton numunelerin kılcal geçirimsizliğinde en iyi performans elde edilmiştir. Tüm bu araştırmalar neticesinde çimento yerine ağırlıkça %15 den daha fazla MK kullanılmasının beton numunelerin dayanım ve içyapı özelliklerine önemli bir katkısının olmadığı sonucuna varılmıştır.

Kim vd. (2007) yapmış oldukları araştırmada, SD ve MK içeren yüksek performanslı beton numunelerinin özellikleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Yapmış oldukları bu çalışmada, mineral katkısı barındırmayan beton numunesi ile % 5, 10, 15 ve 20 seviyelerinde SD ve MK barındıran beton numuneleri kullanılmıştır. Tüm karışımlarda aynı oranda UK kullanılmıştır. Sadece %20 SD ve %20 MK bulunduran karışımlarda kimyasal katkı kullanımı sağlamıştır. Tüm örneklerin farklı günlerdeki  $f_c$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda SD ve MK miktarlarının artması ve zamanın da etkisi ile değişiklikler gözlenmiştir. % 5, 10 ve 15 miktarlarında SD ve MK barındıran beton numunelerinin  $f_c$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Bunların aksine %20 SD ve MK barındıran beton numunelerinin  $f_c$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerinde azalma görülmüştür. MK katkısına nazaran SD katkısının birlikte daha çok etkili olduğu tespit edilmiştir. Zamanında etkisi ile MK ve SD içeriği ile karbonatlaşma derinliğinin de arttığı gözlenmiştir.

Boddy vd.(2001) araştırmalarında yüksek reaktiflikte MK barındıran betonların, negatif yüklü klor geçirgenlik direnci üzerine çalışmalar yapmıştır. Deneylerinde yüksek reaktiflikte MK barındırmayan beton numunesi ile % 8 ve 12 seviyelerinde MK

bulunduran beton numuneleri kullanmışlardır. Su-bağlayıcı miktarının karışımlarda 0.3 ve 0.4 olduğu belirtilmiştir. Yapmış olduğu tecrübeler neticesinde; yüksek reaktiflikte MK katkılı ve düşük su-bağlayıcı miktarındaki karışımların daha düşük negatif yüklü molekül olan klor geçirgenliği gösterdiğini belirtmiştir. 0.3 ve 0.4 arasındaki değerlerde su-bağlayıcı oranı içeren, değişik miktarlarda MK barındıran beton karışımlarının hızlı klor geçirgenliği testinin sonuçları Çizelge 2.14’de belirtilmiştir. Çizelge 2.14’de belirtilen coulomb sonuçları azaldıkça ve direnç sonuçları arttıkça beton numunelerinin klor geçirgenliğinin de azaldığı görülmüştür. Gözlemlenen diğer bir olay ise beton numunelerin direnç ve klor geçirgenliğinin reaktif MK katkısı ile beraber önemli ölçüde değişmiştir. Difüzyon katsayıları belirlenen geçirgenlik testleri ile reaktif MK içeriği ile azalmıştır. Sonuç olarak MK içerikli beton numunelerinin elde ediliminde kullanımın elverişli olduğu belirtilmiştir.

**Çizelge 2.14.** Hızlı klor geçirgenliği ve direnç değerleri (Boddy vd., 2001)

| Karışım | Su-Bağlayıcı Oranı | MK (%) | Direnç ( $\Omega$ cm) | Klor Geçirgenliği (Coulomb) |
|---------|--------------------|--------|-----------------------|-----------------------------|
| 1       | 0.4                | 0      | 9960                  | 2770                        |
| 2       | 0.4                | 8      | 34910                 | 560                         |
| 3       | 0.4                | 12     | 72260                 | 310                         |
| 4       | 0.3                | 0      | 11370                 | 2350                        |
| 5       | 0.3                | 8      | 51960                 | 400                         |
| 6       | 0.3                | 12     | 99360                 | 230                         |

Lee vd. (2005) yapmış oldukları deneylerde, çimentonun yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 düzeyinde MK kullanılan harçlar ile kontrol karışımlarından oluşan harçlara deniz suyunun ve renksiz, küçük iğneler biçiminde ve hidratlı olarak billurlaşan bir madde olan magnezyum sülfat çözeltilisinin tesirini araştırmışlardır. Magnezyum sülfat çözeltilisine karşı harç numunelerinin mukavemetleri;  $f_c$  sonuçlarındaki azalma ve genleşme ölçümleri ile belirlenmiştir. MK katkısı harç örneklerinin magnezyum sülfat çözeltilisine karşı dayanımının negatif yönde olduğu saptanmıştır. Literatüre girmiş bazı araştırmalarda, sülfat ataklarına uğramış harçlarda, MK içeriğinin dayanım özellikleri üzerinde pozitif bir etkisini olmadığı belirtilmiştir.

Düşük sıcaklıktaki kürün MK içeren betonların dayanımı üzerine tesirini tespit etmek için Khatib (2009) çalışmalar yapmıştır. Yapılmış olan bu çalışmalarda MK barındırmayan

beton numunesi ile % 5, 10, 15, 20 ve 30 düzeyinde MK barındıran karışımlar hazırlanmıştır. Bu çalışmaların tamamında su-bağlayıcı miktarı 0.5 olarak tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıktaki kür, MK içeren betonların ilk günlerdeki  $f_c$  değerlerini kötü etkilemiştir. Buna rağmen ileri yaştaki  $f_c$  değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Bunların yanında ileri yaşlarda en yüksek  $f_c$  değerlerini veren MK yer değiştirme miktarının % 5-10 aralığında olduğu ifade edilmiştir. Kürün ilk gününde özellikle yüksek miktarda MK içeren karışımların dayanımının daha az olduğu belirlenmesine rağmen, karışımlarda çimento yerine ağırlıkça % 20 ve daha düşük miktarlarda MK katkısının, bir haftalık sürecinden itibaren beton dayanımının artırdığı tespit edilmiştir. Elde edilen tecrübelerle dayanarak; numune betonuna göre MK içeren betonlar düşük sıcaklıkta daha hassas davranış gösterdiği söylenebilir. Yapılmış olan deneyler neticesinde MK içeren betonların düşük sıcaklıkta kürlenmesiyle hidrasyon ısısında azalma olduğundan dolayı MK içeren betonların  $f_c$  verilerinde önemli ölçüde azalma tespit edilmiştir. Elde edilen diğer bir bilgi ise düşük sıcaklıktaki kür uygulamasının; ağırlıkça %10 ve daha düşük miktarlarda MK'nın çimento yerine beton karışımlarında kullanılması rötrede artışa sebep olmasına rağmen, daha yüksek miktarlarda MK katkısı betonlarda rötrede düşüşe sebep olmuştur.

Khatib ve Hibbert (2005) yapmış oldukları diğer bir çalışmada ise betonların dayanımında MK ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu katkısının etkisi araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmanın tamamında kullanılan numuneler için su-bağlayıcı miktarı 0.5 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmalarda 3 farklı seri için bağlayıcı olarak karışımlarda belirli miktarlarda MK ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. İlk seride katkı bulundurmeyen beton numunesi ile birlikte bağlayıcı olarak % 40, 60 ve 80 miktarlarında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır, ikinci seride puzolanik katkı bulundurmeyen beton numunesi ile birlikte %10 miktarında öğütülmüş granüle fırın cürufu kullanılmıştır. Son grup olan üçüncü seride ise puzolanik katkı barındırmayan beton numunesi ile birlikte bağlayıcı olarak % 20 miktarında MK ile % 20, 40 ve 60 miktarlarında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Hazırlanan beton numunelerinde  $E_d$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneylerin neticesinde, MK içeren betonlarda kontrol numunesine nazaran bilhassa erken yaşlarda daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. MK miktarı %20'ye yükseltildiğinde ise  $f_c$  değerlerindeki artış azalmıştır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeriği, ilk 28 günlük periyotta beton numunelerinin dayanımını düşürürken, 28. günden sonraki

dönemlerde ise maksimum %60 miktarında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu katkılı örneklerin  $f_c$ ,  $E_d$  ve  $f_{fs}$  değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Granüle yüksek fırın cürufu içeren beton numunelerin erken yaşlardaki  $f_c$  sonuçlarının düşüşü granüle yüksek fırın cürufu + MK katkısı ile beraber sağlanmıştır. Bağlayıcı olarak % 10 ve 20 MK kullanılarak üretilen beton numunelerin  $E_d$  sonuçlarının kontrol betonuna nazaran yüksek olduğu ifade edilmiştir. Karışımdaki MK miktarı % 20'li seviyelere çıkarıldığında ise  $E_d$  değerlerindeki yükseliş miktarının azaldığı görülmektedir. MK ve granüle yüksek fırın cürufunu aynı anda barındıran betonların  $f_{fs}$  sonuçlarının örnek kontrol numunesine kıyasla iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bilhassa  $f_{fs}$  sonuçları için % 60 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve % 20 MK katkısının tesirli olduğu yapılan deneylerle saptanmıştır.

Khatib vd. (2009) çalışmalarında, UK ile MK barındıran harç numunelerinin özelliklerini araştırmıştır. Yapılan deneylerde mineral katkısız kontrol numunelerine ek olarak bağlayıcı olarak % 20, 40 ve 60 miktarlarında UK ve % 5 ve 10 miktarlarında MK barındıran karışımlar tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, UK içeren harç numunelerine MK katkısının eklenmesi ile harç numunelerinin kuruma rötresinin düştüğü saptanmıştır. Standart kür uygulanan harç numunelerinde ise yüksek miktarlardaki MK içeriğinin genleşmeye sebep olduğu görülmüştür. Yapılmış olan denemeler sonucunda; kontrol harcına göre bağlayıcı olarak % 5 ve 10 MK barındıran harçların  $f_c$  sonuçları iyi çıkmıştır. Ancak, harçlarda üçlü bir karışım tasarlanırsa (bağlayıcı olarak çimento, UK ve MK katkısı) UK katkısının puzolanik aktifliğinin olumsuz etkilendiği yapılan araştırmalarda uzmanlar tarafından belirlenmiştir.

Brooks ve Johari (2001) MK katkılı beton karışımlarının sünme ve otojen rötre performanslarını çalışmalarında araştırmıştır. Deneysel çalışmalarında, MK barındırmayan beton numunesine ek olarak % 5, 10 ve 15 miktarlarında MK barındıran karışımlar hazırlamışlardır. Çalışmalarda; erken yaşlarda MK katkısının fazla kullanılmasıyla otojen rötre değerinin düştüğü fakat sonraki yaşlarda artış gösterdiği belirlenmiştir. % 5 MK ile çimentonun ikame edilmesi ile erken yaşlarda beton numunesinin rötresinde artış olmasına rağmen % 10 ve 15 ikame düzeylerinde, MK katkısı ile beraber rötrenin azaldığı belirlenmiştir. Fakat MK katkısının yer değiştirme oranının yükselmesiyle beton numunelerdeki sünmenin önemli derecede azaldığı belirlenmiştir.

Batis vd. (2005) MK katkısının harçlarının korozyon direncine tesirini belirlemek için bir takım çalışmalar ve incelemeler yapmıştır. İki farklı tür MK bu çalışmada uygulanmıştır. Yazarlar az miktarda kaolinit içeren zayıf Yunan kaolininden üretilmiş MK ve ticari olarak satın aldıkları MK puzolanını kullanmışlardır. Yapılan bu çalışmada, MK barındırmayan kontrol harcı ile bağlayıcı olarak % 10 ve 20 miktarlarında Yunan kaolininden elde edilmiş MK'lı harç ve % 20 miktarında ticari olarak satın alınan MK'lı harç üretilmiştir. Bu bağlayıcılar ile üretilen harçlar, % 3.5 NaCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Bu çalışmaların neticesinde, karışımlarda % 10'na kadar MK kullanıldığı zaman numunelerin korozif davranışlarının geliştiği, % 10 miktarının üzerinde kullanıldığında ise her hangi bir pozitif yönde tesiri olmadığı tespit edilmiştir. Bu araştırmada, çimento yerine ağırlıkça % 10 miktarında MK içeriği, harçların gelişimi bakımından olumlu bir yaklaşım olarak ifade edilmiştir. Dayanım ve dayanıklılık performansı göz önüne alındığında maliyeti de düşük olmasından ve kullanımı da kolay olmasından dolayı, MK katkısı harçlarda diğer yapı malzemelerine göre yaygın bir şekilde tercih edilmiştir. Farklı deneyler neticesinde kırılğan bir yapıya sabip olan MK'lı harçların dayanımının arttığı görülmüştür. Kırılğan harçların çekme dayanımı daha düşük olmaktadır. Bu zayıflığı gidermek için çeşitli fiberler kullanılarak harç ve betonun zayıf olan çekme dayanımı artırılabilir. Fiberin kullanılma sebepleri, rötre çatlaklarını azaltmak, harç ve betonun darbe dayanımını güçlendirmek ve harç ve betona tokluk kazandırmaktır. Fiber içeren harç ve betonlar çeşitli avantajlarından dolayı geniş bir kullanım ağına sahiptir. Fiberli harçların avantajlarından birisi çeşitli yapıların tamiri için en uygun malzemelerden biri olmasıdır. Tüm bunlara rağmen fiber kullanılan harç ve betonların matrisi ile fiberlerin oluşturduğu bağ zayıftır. Matris ve fiber arasında meydana gelen bu durum boşlukların oluşmasına neden olmakla birlikte, özellikle hibrit fiber kullanılan harç ve betonlara kıyasla daha boşluklu yapı olma özelliği taşımaktadır. Fiber ile çimento hamuru arasındaki boşluklu yapıyı düşürmek için çelik fiber ile birlikte propilen fiberin birlikte kullanıldığı harç ve betonlarda UK, SD ve MK gibi puzolanik malzemelerin kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Rashiddadash vd. (2014) yapmış oldukları araştırmada, MK ve ÖP barındıran çelik fiber ile birlikte propilen fiberli betonların  $f_c$  ve  $f_s$  değerlerini araştırmıştır. Çizelge 2.15'de çelik fiber ile birlikte propilen fiberlerin beton numunelerin 7, 28, 90 ve 180 günlük periyotlar da  $f_c$  değerlerine etkisi verilmiştir. Ayrıca bağlayıcı malzeme olarak kullanılan MK ve ÖP katkısının bu özelliklere etkisi araştırılmıştır. Farklı puzolanik katkı

betonların mekanik özellikleri araştırıldığında, MK barındıran karışımlarda maksimum performans elde edilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde ilk günler hariç olmak üzere MK içeren fiberli betonların puzolan bulundurmeyen kontrol betonuna nazaran yüksek  $f_c$  değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Erken yaşlarda %15 MK içeren karışım dışında, MK içeren karışımların  $f_c$  sonuçlarının kontrol betonunun sonuçlarına kıyasla daha az olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle, mekanik özellikleri olumsuz etkileyen diğer bir hususun ÖP içeren fiberli betonlar olduğu belirlenmiştir. Kısa vadede ve uzun vadede, karışımlardaki  $f_c$  değerleri ÖP katkısı miktarı arttıkça azalmıştır. Beton karışımlarına puzolan ilave edilmesinin yük ile deplasman grafiğinde bir değişiklik yapmadığı, yük ile deplasman grafiğinin karışımlardaki fiber içeriğinin artması ile değiştiği belirlenmiştir. ÖP ve MK katkılarının artışıyla fiber içeren beton numunelerin işlenebilirliğinin azaldığı, beton numunelerinde kullanılan fiberin dağılımının, işlenebilirliği olumsuz etkilediği saptanmıştır.

**Çizelge 2.15.** MK ve ÖP’li numunelerin basınç dayanımı (Rashiddadash vd., 2014)

| Karışım        | Basınç Dayanımı (MPa) |        |        |         |
|----------------|-----------------------|--------|--------|---------|
|                | 7 gün                 | 28 gün | 90 gün | 180 gün |
| Kontrol        | 18.0                  | 29.0   | 41.0   | 44.0    |
| %10 ÖP         | 17.0                  | 29.5   | 34.5   | 37.6    |
| %15 ÖP         | 16.7                  | 26.5   | 32.5   | 37.0    |
| %10 MK         | 18.7                  | 32.5   | 38.0   | 44.5    |
| %15 MK         | 19.0                  | 36.0   | 44.5   | 46.5    |
| %7.5MK+%7.5 ÖP | 16.0                  | 27.5   | 34.0   | 39.4    |

Velosa vd. (2009) yaptıkları çalışmada, harç üretiminde kullanılan MK katkısının mineralojik ve kimyasal içeriğinin harç üzerine olan karakteristik etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada 3 farklı MK numunesi kullanılmıştır. Bu çalışmada, fabrikada imal edilen kaynakların ve imalat yöntemlerinin birbirinden değişik olmasından ötürü, MK katkısının kimyasal ve mineralojik yapısının farklı olduğu belirtilmiştir. Mineralojik olarak daha stabil kaolinit yapısını barındıran MK’nın; kimyasal olarak beyaz, kokusuz, katı ve suda çözünmez madde olan alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) miktarının daha yüksek olduğu yapılan deneyler sonucunda anlaşılmıştır. Deneyler neticesinde varılan bir diğer sonuç ise MK’nın yapısında bulunan  $K_2O$  ve  $Na_2O$  miktarlarının düşük olmasının, dayanım ve dayanıklılık değerlerini olumlu yönde etkilediğidir.

Potgieter-Vermaak ve Potgieter (2006) yaptıkları çalışmada, MK barındırmayan kontrol harcı ve bağlayıcı olarak % 10, 20 ve 30 miktarlarında MK barındıran harçlar üretmişlerdir. Yapılan deneylerde, MK katkısının dayanım gelişimine dair tesiri araştırılmıştır. İlk grupta 550 °C sıcaklıkta aktifleştirilmiş MK, ikinci grupta ise 650 °C sıcaklıkta aktifleştirilmiş MK, en son grupta değişik sıcaklık değerleri altında yaklaşık olarak 1 saat kalsine edilen MK katkısı harç karışımlarında kullanılmıştır. Hazırlanan bu harç karışımlarında 1, 2, 7, 14 ve 28 günlük periyotlarla olmak üzere  $f_c$  testleri gerçekleştirilmiştir.  $f_c$  sonuçlarının maksimum olanını son gruptaki örneklerde, minimum  $f_c$  sonuçlarını ise ilk gruptaki örneklerde gözlemişlerdir. Bütün bu gruplarda belirlenen maksimum  $f_c$  sonuçlarının % 30 MK bulunduran harçlarda olduğu tespit edilmiştir.

Parande vd. (2008) yapmış oldukları araştırma çalışmasında, % 5, 10, 15 ve 20 miktarlarında MK barındıran harç ve beton örneklerini, MK barındırmayan kontrol betonu ile birlikte elde etmişlerdir. Karışımlar da bağlayıcı-kum miktarını 1/3 ve suçimento miktarını 0.40 olarak belirlemişlerdir. Çalışmada karışımlara eklenen MK katkısının  $f_c$  değerlerini iyileştirdiği belirtilmiştir. Dahası, % 15 MK barındıran karışımlar diğer karışımlar ile kıyaslandıklarında, en uygun sonuçları vermiştir. Tüm bunlara ilaveten, karışımlarda, % 15 miktarından çok MK kullanılması durumunda  $f_c$  değerlerinin düştüğü belirtilmiştir. MK puzolanı kullanılmayan beton numunesi ve MK puzolanı içeren beton numunelerinin farklı günlerdeki  $f_c$  değerleri Çizelge 2.16'da sunulmuştur. Bunlara ek olarak beton imalatında %15 oranına kadar MK içeriğinin betonun içersinde bulunan donatının korozyonunu engellediği belirtilmiştir.

**Çizelge 2.16.** Betonda MK katkısının basınç dayanımına etkisi (Parande vd., 2008)

| Karışım | Basınç dayanımı (MPa) |       |        |        |
|---------|-----------------------|-------|--------|--------|
|         | 3 gün                 | 7 gün | 28 gün | 90 gün |
| Kontrol | 31.0                  | 41.6  | 54.0   | 65.0   |
| %5 MK   | 34.1                  | 48.1  | 59.1   | 68.0   |
| %10 MK  | 35.2                  | 53.7  | 63.4   | 72.0   |
| %15 MK  | 28.0                  | 59.0  | 70.0   | 80.0   |
| %20 MK  | 26.1                  | 43.2  | 57.0   | 67.0   |

Shekarchi vd. (2010) yapmış oldukları deneysel çalışmalarda, MK içermeyen beton numunesine kıyasla, karışımlarda % 5, 10 ve 15 MK kullanılmasının betonun dayanım ve dayanıklılığını olumlu etkilediğini ifade etmişlerdir. Yapılan çalışmada, elektriksel

direnç, suyun geçirimsizliği, su emme, gazın geçirimsizliği, klor geçirimsizliği, alkali silika tepkimesi oluşması gibi durumlar araştırılmıştır. MK oranı yükseldikçe suyun kılcal yollarla ilerlemesinin ve su emme kapasitesinin düştüğü belirlenmiştir. Bunların yanı sıra MK oranı yükseldikçe  $f_c$  değerlerinin ve elektriksel direncin arttığı görülmüştür. MK oranı arttıkça alkali silika reaksiyonunun düştüğü alkali silika reaksiyonu deneylerinde görülmüştür. Alkali silika reaksiyonu ilerlemesinin büyük oranda azaldığı durum, özellikle %15 MK kullanılan karışımlarda olduğu rapor edilmiştir.



## BÖLÜM III

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Beton karışımlarında kullanılan malzemeler hakkındaki bilgiler ve malzemelerin özellikleri aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır. Beton üretimi ve deneysel çalışmalar Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Laboratuvarında ve Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Analiz Biriminde gerçekleştirilmiştir. Beton üretiminde MK, SD ve MK+SD farklı oranlarda çimento ile yer değiştirilerek kullanılmış ve kontrol betonu ile birlikte 28 farklı karışımda fibersiz ve hibrit fiberli (çelik fiber+ polipropilen fiber) betonlar üretilmiştir. Karışımlarda % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında MK, % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında SD ve % 5, 10 ve 15 oranlarında MK+SD değişik oranlarda çimento yerine yer değiştirilerek kullanılmıştır.

#### 3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri

##### 3.1.1 Çimento

Beton üretimlerinde TS EN 197-1 (2012) standardına uygun ilk günlerdeki dayanımı yüksek CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun üretim yeri Niğde Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'dir. Beton üretiminde kullanılan Portland çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de görülmektedir. Beton üretiminde kullanılan çimentonun görüntüsü Fotoğraf 3.1'de verilmiştir.

##### 3.1.1 Silis Dumanı

Antalya Etibank Elektrometalurji fabrikasından temin edilen silis dumanı (SD) belirli oranlarda çimento ile yer değiştirilerek beton üretimlerinde kullanılmıştır. Beton üretimlerinde çimento ile yer değiştirilerek kullanılan SD'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de görülmektedir. Beton üretimlerinde çimento ile yer değiştirilerek kullanılan SD'nin özgül ağırlığı 2.25 olarak belirlenmiştir. SD'nin görünümü Fotoğraf 3.1'deki gibidir.

**Çizelge 3.1.** Çimento esaslı malzemelerin özellikleri

| Kimyasal bileşenler (%)                | PÇ      | MK     | SD     |
|--|---------|--------|--------|
| SiO <sub>2</sub>                       | 21.94   | 67.92  | 92.28  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 2.23    | 2.47   | 0.44   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 4.67    | 22.33  | 0.85   |
| CaO                                    | 63.25   | 1.14   | 0.93   |
| MgO                                    | 1.80    | 1.37   | 3.25   |
| SO <sub>3</sub>                        | 2.56    | 0.95   | 0.56   |
| Na <sub>2</sub> O                      | 0.62    | 1.56   | 0.62   |
| K <sub>2</sub> O                       | 0.55    | 0.79   | 0.24   |
| Kızdırma kaybı                         | 2.38    | 1.47   | 0.83   |
| <i>Fiziksel özellikler</i>             |         |        |        |
| Priz başlama-bitiş süresi (dakika)     | 120-220 |        |        |
| Özgül ağırlık                          | 3.12    | 2.48   | 2.25   |
| Özgül yüzey alanı (m <sup>2</sup> /kg) | 346     | 14.100 | 21.300 |
| <i>Mekanik Özellikler</i>              |         |        |        |
| Basınç dayanımı (MPa)                  |         |        |        |
| 3 gün                                  | 30.94   |        |        |
| 7 gün                                  | 45.23   |        |        |
| 28 gün                                 | 51.78   |        |        |

PÇ: Portland çimento, MK: Metakaolin, SD: Silis dumanı



MK= Metakaolin, PC=Portland Çimento, SF=Silis Dumanı,  
PF= Polipropilen fiber, STF=Çelik Fiber

**Fotoğraf 3.1.** Beton karışımlarında kullanılan mineral katkı ve hibrit fiberler

### 3.1.3 Metakaolin

BASF Türk Kimya Sanayi Limited Şirketinden temin edilen metakaolin (MK) belirli oranlarda çimento ile yer değiştirilerek beton üretimlerinde kullanılmıştır. Beton üretiminde çimentonun yerine ikame edilen MK'nın fiziksel ve kimyasal karakteristikleri Çizelge 3.1'de görülmektedir. Beton üretimlerinde çimento ile yer değiştirilerek kullanılan MK'nın özgül ağırlığı 2.48 olarak belirlenmiştir. MK'nın görüntüsü Fotoğraf 3.1'deki gibidir. Saf kaolin kilinin termal aktivasyonu sonucunda kalsine edilen MK'nın yüksek reaktif özelliğe sahip olduğu ifade edilmiştir. MK'nın ASTM C-1240'a göre dayanım aktivite indeksinin uygun olduğu ve ASTM C-618'e göre N sınıfı puzolan olduğu ifade edilmiştir.

### 3.1.4 Çelik Fiber

BASF Türk Kimya Sanayi Limited Şirketinden tedarik edilen düşük karbon içerikli çelik fiber yüksek dayanımlı beton üretimlerinde kullanılmaktadır. Beton ile çelik fiber arasında maksimum bağlanmayı oluşturmak için çelik fiberler mekanik olarak pilyelenmiştir. Beton üretiminde kullanılan çelik fiberler çatlakların oluşmasını kısıtlayarak, çatlakların genişlemesini ve yayılmasını engellemeye çalışır. Çelik fiberlerin en belirgin özelliği güçlendirilmiş betona kırılma aşamasında kopmadan önce sünek bir davranış sağlamasıdır. Beton üretiminde kullanılan çelik fiberin özellikleri Çizelge 3.2'deki ve görünümü de Fotoğraf 3.1'deki gibidir.

**Çizelge 3.2.** Hibrit fiberlerin özellikleri

|                               | ÇF    | PF     |
|-------------------------------|-------|--------|
| Uzunluk (mm)                  | 35    | 12     |
| Çap (mm)                      | 0.75  | 0.013  |
| En-boy oranı                  | 46.67 | 923.10 |
| Çekme dayanımı (MPa)          | 1100  | 400    |
| Fiber miktarı (kg başına)     | 8738  | -      |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 7.85  | 0.92   |

ÇF: Çelik fiber, PF: Polipropilen fiber

### 3.1.5 Polipropilen fiber

Deneysel çalışmada kullanılan elyaf fiber, Cam Elyaf Sanayii A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Beton karışımında kullanılan polipropilen (elyaf) fiber iyi demet bütünlüğüne,

hamurda kolay karışım ve homojen dağılım, kolay işlenebilirlik, yüksek mekanik özellik ve yüzey düzgünlüğü özelliklerine sahiptir. Polipropilen fiberin çekme mukavemeti yüksektir. Polipropilen fiberin ısıl direnci düşüktür, yanmaz ancak yüksek sıcaklıkta yumuşar. Beton üretiminde kullanılan polipropilen fiberin özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Dahası görünümü de Fotograf 3.1’deki gibidir.

### 3.1.6 Agregası

Yüksek dayanımlı beton üretimlerinde 0-5 mm tane boyutlarında doğal kum (DK), 0-5 mm tane boyutlarında kırılmış kalker I (KK-I) ve 5-12 mm tane boyutlarında kırılmış kalker II (KT-II) agrega olarak kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan doğal kum Nevşehir’in Gülşehir ilçesi belediyesine ait tesislerden temin edilmiştir. Karışımlarda kullanılan kırılmış kalker agregaları Niğde Başmakçı bölgesinden temin edilen kalker agregalarıdır. Tüm yüksek dayanımlı beton karışımlarında doğal kum agregası ve iki farklı kırılmış kalker agregası kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. TS EN 1097-6 (2007) standardına göre yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan agregaların özgül ağırlık değerleri belirlenmiş ve Çizelge 3.3’de verilmiştir. Yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan agregaların standartlarda belirtilen sınır değerleri ve toplam agregaların elekten geçen elek analizi değerleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan toplam agregaların elekten geçen elek analizi (deney agregası) eğrisi ve TS 802 (2009) standardında bildirilen elek analizi sınır sonuçları Şekil 3.1’de görüldüğü gibidir. Deney agregasının TS 802 (2009) standardında verilen sınır değerler arasında kalması için agrega karışım oranları ayarlanmıştır. Deney agregasının TS 802 (2009) standardında belirtilen sınır değerler arasında kalması ile özellikle A ve B eğrileri arasında kalmasıyla daha yoğun bir beton elde edilmiş olur.

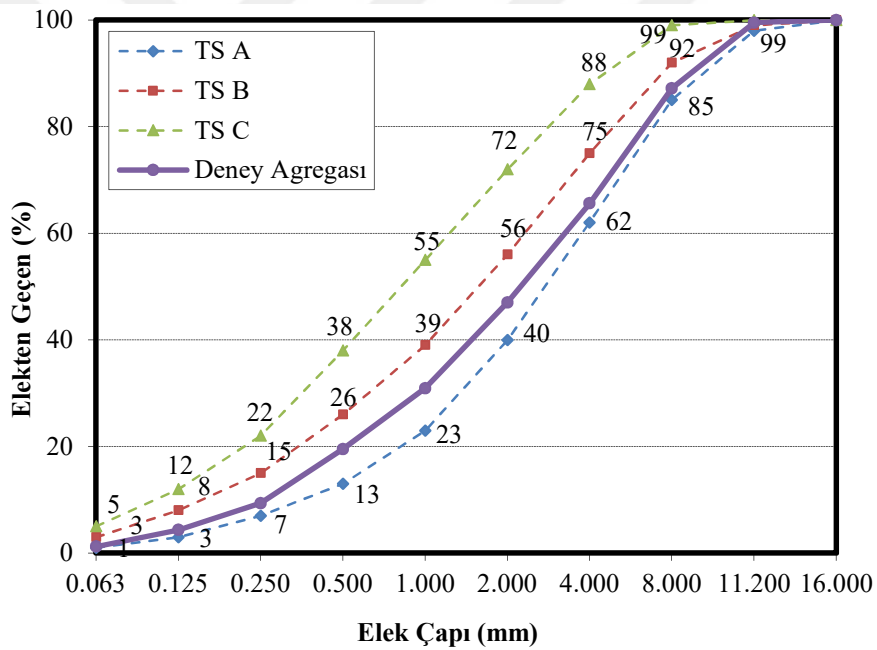
**Çizelge 3.3.** Agregaların fiziksel özellikleri

|                   | İnce agrega |      | Kalın agrega |
|-------------------|-------------|------|--------------|
|                   | DK          | KK-I | KK-II        |
| Tane boyutu (mm)  | 0-5         | 0-5  | 5-12         |
| Karışım oranı (%) | 35          | 20   | 45           |
| Özgül ağırlık     | 2.48        | 2.64 | 2.68         |

DK: Doğal kum, KK: Kırılmış kalker

**Çizelge 3.4.** Standart sınırlar ve toplam agregaların elek analizi

| Elek boyutu, mm | Elekten geçen (%) |          |          |              |
|-----------------|-------------------|----------|----------|--------------|
|                 | A sınırı          | B sınırı | C sınırı | Elek analizi |
| 16              | 100               | 100      | 100      | 100          |
| 11.2            | 98                | 99       | 100      | 99.51        |
| 8               | 85                | 92       | 99       | 87.22        |
| 4               | 62                | 75       | 88       | 65.63        |
| 2               | 40                | 56       | 72       | 47.05        |
| 1               | 23                | 39       | 55       | 30.97        |
| 0.5             | 13                | 26       | 38       | 19.56        |
| 0.25            | 7                 | 15       | 22       | 9.39         |
| 0.15            | 3                 | 8        | 12       | 4.39         |
| 0.063           | 1                 | 3        | 5        | 1.27         |



**Şekil 3.1.** Beton karışımlarında kullanılan agreganın elek analizi

### 3.1.7 Süper akışkanlaştırıcı

Yüksek dayanımlı beton üretmek için TS EN 934-2+A1 (2013) ve ASTM C 494-99a (2002)'e uygun, taze beton üretiminde kıvam ve işlenebilirliği sağlayan yüksek oranda su azaltma özelliği olan süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı; yüksek oranda su azaltıcı özelliği olan, polikarboksilik eter esaslı, erken ve ileriki günlerde yüksek dayanıma ihtiyaç duyulan

betonlar için üretilmiş bir süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesidir. Bu tür süper akışkanlaştırıcılar; kendiliğinden yerleşen ve vibratör gerektirmeyen beton elde edilmesinde, yüksek performanslı beton elde edilmesinde, hazır beton elde edilmesinde, donatı aralığı sık olan betonarme elemanlara kolayca yerleşen beton üretiminde, ön üretilmiş prefabrik ve prekast beton üretiminde yaygın olarak kullanılır. %50 bağıl nem koşullarında ve +20 °C sıcaklıkta üretilen süper akışkanlaştırıcının özellikleri Çizelge 3.5’de görülmektedir.

**Çizelge 3.5.** Süper akışkanlaştırıcının özellikleri

|                    |                                 |
|--------------------|---------------------------------|
| Malzemenin yapısı  | Polikarboksilik eter esaslı     |
| Renk               | Amber                           |
| Yoğunluk           | 1.082 – 1.142 kg/m <sup>3</sup> |
| Klor içeriği (%)   | < 0.1                           |
| Alkali içeriği (%) | < 3                             |

### 3.1.8 Karışım suyu

Yüksek dayanımlı beton üretimlerinde kullanılan su, Niğde Belediyesine ait şehir şebekesi içme suyudur. Literatürde beton üretiminde kullanılan suyun, içilebilir su olması gerektiği belirtilmiştir. Yüksek dayanımlı beton üretimi için kullanılan suyun üç farklı göreve sahip olduğu ifade edilmektedir. Bunlardan birincisi; su, çimento ile birleşerek hidrasyon olayını (çimento ve suyun kimyasal reaksiyonu) gerçekleştirir. İkincisi; beton üretiminde çimento ve agrega tanelerinin yüzey alanlarını ıslatarak taze betonun istenen kıvamda ve işlenebilirlikte olmasını sağlar. Üçüncüsü; üretilmiş, taşınmış, yerine yerleştirilmiş ve üzeri düzeltilmiş betonun üzerinin ıslak kalmasını sağlayarak, betondaki suyun buharlaşmamasını ve çimento ile kimyasal reaksiyonların oluşması için yeterli miktarda suyun ortamda bulunmasını sağlar.

### 3.2 Beton Karışım Oranları

Beton karışımında kullanılan tüm malzemelerin karışım miktarları TS 802 (2009) standardında belirtilen esaslara göre belirlenmiştir. 1 m<sup>3</sup> yüksek dayanımlı beton elde edilmesi için gerekli malzemelerin miktarları Çizelge 3.6’da verilmiştir. Beton elde edilmesi için gerekli olan malzemelerin ölçüleri ağırlıkça belirlenmiştir. Karışımlarda

yüksek miktarda su azaltıcı etkisi olan süper akışkanlaştırıcı kullanıldığı için su-bağlayıcı oranı 0.25 olarak alınmıştır. Ayrıca, çimento esaslı bağlayıcı miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  olarak alınmıştır. TS 802 (2009) standardına göre karışımlardaki hapsolmuş hava miktarı belirlenmiş ve karışımlarda kullanılacak agrega miktarının hacmi belirlenmiştir. Hacimleri belirlenen malzemelerin hacimleri özgül ağırlıklarına bölünerek ağırlıkça kullanılacak malzeme miktarları belirlenmiştir. Su-bağlayıcı oranının düşük seçilmesindeki amaç dayanımı ve dayanıklılığı yüksek beton üretebilmek içindir. Beton karışımlarında kullanılan su, çimentonun hidratasyonu ve betonun işlenebilirliği için kullanılmaktadır. Daha fazla su kullanılması beton içerisinde çok sayıda boşluk oluşmasına neden olmaktadır. Boşluk sayısının az olması betonun geçirimsizliğini, bağlayıcı matrisin dayanım ve dayanıklılığını arttırmaktadır. Böylece yüksek dayanımlı ve dayanıklı beton üretilmektedir.

Beton karışımlarında yukarıda da belirtildiği gibi Portland çimentosu, MK, SD, su, süper akışkanlaştırıcı, 0-5 mm arasında dane boyutlarına sahip doğal kum (DK), 0-5 mm arasında dane boyutlarına sahip kırılmış kalker (KK-I) ve 5-12 mm arasında dane boyutlarına sahip kırılmış kalker (KK-II) Çizelge 3.6'da belirtilen miktarlarda kullanılmıştır. Ayrıca, hibrit fiberli beton karışımlarında, bu malzemelere ek olarak çelik fiber ve polipropilen fiber birlikte karışımlara eklenerek hibrit fiberli karışımlar hazırlanmıştır.

Kontrol betonlarına ilaveten, ağırlıkça % 5, % 10, % 15 ve % 20 miktarlarında MK ve SD çimento yerine kullanılarak 8 farklı karışımda sadece MK ve SD içeren betonlar üretilmiştir. Bu betonlardan kontrol betonu K ile MK içerenler ise sırasıyla 5MK, 10MK, 15MK ve 20MK olarak, SD içerenler 5SD, 10SD, 15SD ve 20SD olarak isimlendirilmiştir. Bu karışımlara ek olarak ağırlıkça %5, 10 ve 15 MK ile birlikte %5 SD çimento yerine kullanılarak 3 farklı karışıma ve % 10 ve 15 SD ile birlikte %5 MK çimento yerine kullanılarak 2 farklı karışıma sahip beton karışımları üretilmiştir. Bu betonlardan farklı oranlarda MK ve sabit oranda SD içerenler sırasıyla 5MK5SD, 10MK5SD, 15MK5SD ve 20MK5SD olarak, farklı oranlarda SD ve sabit oranda MK içerenler 10SD5MK ve 15SD5MK olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca, yukarıda belirtilen her bir karışımın içerisine hibrit fiber (HF) eklenerekte hibrit fiberli karışımlara sahip beton karışımları üretilmiştir. Hibrit fiberli karışımların başına HF kısaltması eklenmiştir.

**Çizelge 3.6. Bir metreküp yüksek dayanımlı beton karışımı için malzeme miktarları**

| Karışımlar | s/b  | PÇ<br>kg/m <sup>3</sup> | MK<br>kg/m <sup>3</sup> | SD<br>kg/m <sup>3</sup> | Su<br>kg/m <sup>3</sup> | DK<br>kg/m <sup>3</sup> | KK-I<br>kg/m <sup>3</sup> | KK-II<br>kg/m <sup>3</sup> | ÇF<br>kg/m <sup>3</sup> | PF<br>kg/m <sup>3</sup> | SA<br>kg/m <sup>3</sup> |
|------------|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| K          | 0.25 | 500                     | 0                       | 0                       | 125                     | 601.23                  | 365.73                    | 832.23                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 5MK        | 0.25 | 475                     | 25                      | 0                       | 125                     | 599.60                  | 364.73                    | 829.97                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 10MK       | 0.25 | 450                     | 50                      | 0                       | 125                     | 597.96                  | 363.74                    | 827.71                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 15MK       | 0.25 | 425                     | 75                      | 0                       | 125                     | 596.33                  | 362.74                    | 825.45                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 20MK       | 0.25 | 400                     | 100                     | 0                       | 125                     | 594.69                  | 361.75                    | 823.18                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 5MK+5SD    | 0.25 | 450                     | 25                      | 25                      | 125                     | 597.21                  | 363.28                    | 826.66                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 10MK+5SD   | 0.25 | 425                     | 50                      | 25                      | 125                     | 595.57                  | 362.28                    | 824.40                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 15MK+5SD   | 0.25 | 400                     | 75                      | 25                      | 125                     | 593.94                  | 361.29                    | 822.14                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| HFK        | 0.25 | 500                     | 0                       | 0                       | 125                     | 580.40                  | 353.05                    | 803.40                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF5MK      | 0.25 | 475                     | 25                      | 0                       | 125                     | 578.76                  | 352.06                    | 801.14                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF10MK     | 0.25 | 450                     | 50                      | 0                       | 125                     | 577.13                  | 351.07                    | 798.87                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF15MK     | 0.25 | 425                     | 75                      | 0                       | 125                     | 575.50                  | 350.07                    | 796.61                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF20MK     | 0.25 | 400                     | 100                     | 0                       | 125                     | 573.86                  | 349.08                    | 794.35                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF5MK+5SD  | 0.25 | 450                     | 25                      | 25                      | 125                     | 576.38                  | 350.61                    | 797.83                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF10MK+5SD | 0.25 | 425                     | 50                      | 25                      | 125                     | 574.74                  | 349.61                    | 795.57                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF15MK+5SD | 0.25 | 400                     | 75                      | 25                      | 125                     | 573.11                  | 348.62                    | 793.30                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| 5SD        | 0.25 | 475                     | 25                      | 0                       | 125                     | 598.84                  | 364.27                    | 828.93                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 10SD       | 0.25 | 450                     | 50                      | 0                       | 125                     | 596.45                  | 362.82                    | 825.62                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 15SD       | 0.25 | 425                     | 75                      | 0                       | 125                     | 594.06                  | 361.37                    | 822.31                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 20SD       | 0.25 | 400                     | 100                     | 0                       | 125                     | 591.67                  | 359.91                    | 819.00                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 10SD+5MK   | 0.25 | 425                     | 50                      | 25                      | 125                     | 594.82                  | 361.82                    | 823.36                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| 15SD+5MK   | 0.25 | 400                     | 75                      | 25                      | 125                     | 592.43                  | 360.37                    | 820.05                     | 0                       | 0                       | 8.33                    |
| HF5SD      | 0.25 | 475                     | 25                      | 0                       | 125                     | 578.01                  | 351.60                    | 800.09                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF10SD     | 0.25 | 450                     | 50                      | 0                       | 125                     | 575.62                  | 350.15                    | 796.78                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF15SD     | 0.25 | 425                     | 75                      | 0                       | 125                     | 573.23                  | 348.69                    | 793.48                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF20SD     | 0.25 | 400                     | 100                     | 0                       | 125                     | 570.84                  | 347.24                    | 790.17                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF10SD+5MK | 0.25 | 425                     | 50                      | 25                      | 125                     | 573.99                  | 349.15                    | 794.52                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |
| HF15SD+5MK | 0.25 | 400                     | 75                      | 25                      | 125                     | 571.60                  | 347.70                    | 791.21                     | 52.5                    | 15.64                   | 10                      |

K: Kontrol betonu, MK: Metakaolin, SD: Silis dumanı, PÇ: Portland çimento, HF: hibrit fiber, DK: Doğal kum, KK: Kırılmış kalker, ÇF: Çelik Fiber, PF: Polipropilen fiber, SA: Süper akışkanlaştırıcı

### 3.3 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları

Beton elde edilmesi için malzemelerin karıştırılması, eğilebilen ve yatayda döner tekneli 30 dm<sup>3</sup> kapasiteli karıştırıcıda gerçekleştirilmiştir. Seri beton üretimlerine başlamadan önce her bir beton karışımından deneme betonları üretilmiş ve uygun işlenebilirliğin sağlanması için gerekli olan süper akışkanlaştırıcı miktarları belirlenmiştir. Bu deneme üretimlerinden sonra, söz konusu her bir karışım için 30 dm<sup>3</sup> taze beton üretimi için hazırlanan malzemeler ilk önce yaklaşık olarak 120 saniye kuru bir şekilde karıştırılmış ve sonra karışımlara eklenmesi gereken su miktarının yarısı yavaş yavaş karışıma

eklenerek 2 dakika daha karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, süper akışkanlaştırıcının tamamı ve suyun geri kalan kısmı da yavaş yavaş eklenerek, gerekli kıvam ve işlenebilirlik sağlanana kadar mikserde karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde hazırlanmış olan her bir taze beton karışımı daha önceden yağlanmış olan beton kalıpların içerisine yerleştirilmiştir. Elde edilen betonlardan  $f_c$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerinin belirlenebilmesi için farklı boyutlarda kalıplar kullanılmıştır.

10x10x10 cm küp numuneler  $f_c$  değerlerinin, 15x15x15 cm küp numuneler  $f_{sts}$  değerlerinin ve 10x10x40 cm prizmatik numuneler  $f_{fs}$  değerlerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Daha önceden yağlanmış olan kalıplara betonun çok daha iyi yerleşebilmesini sağlamak amacıyla sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Bu işlem 3 farklı aşamada titreşim masası üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen betonlar 24 saat süre sonrasında kalıplardan zarar görmeden çıkartılarak standart küre tabi tutularak deneylerin gerçekleştirileceği güne kadar kür havuzunda beklemeye alınmıştır. Taze betonların üretimi Fotoğraf 3.2’de, taze betonların kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırılması Fotoğraf 3.3’de, kalıplara yerleştirilmiş taze ve sertleşmiş betonlar Fotoğraf 3.4’de ve isimlendirilmiş ve kür uygulanan beton örnekleri Fotoğraf 3.5’de görülmektedir.



**Fotoğraf 3.2.** Taze beton üretimi görünümü



**Fotoğraf 3.3.** Taze betonun kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırılması



**Fotoğraf 3.4.** Kalıplara yerleştirilmiş taze ve sertleşmiş beton



**Fotoğraf 3.5.** İsimlendirilmiş ve kür uygulanan beton örnekleri

### **3.4 Taze Beton Deneyleri**

#### **3.4.1 Çökme (Slump)**

Yapmış olduğumuz deneysel çalışmada elde edilen taze beton numuneleri üzerinde TS EN 12350-2 (2010)'na göre çökme deneyi gerçekleştirilmiştir. Çökme deneyinin gerçekleşmesi için Abrams hunisi diye adlandırılan yüksekliği 30 cm, alt çapı 20 cm ve üst çapı 10 cm olan kesik huni kullanılmıştır. Bu deneyin gerçekleşmesi esnasında taze beton huniye doldurulmadan önce huninin iç yüzeyinin kuru kalmaması için ıslak bir bez yardımıyla nemlendirilmiştir. Deney için uygun hale gelen huni su emilimi olmayacak bir zemine oturtularak üç eşit yüksekliğe sahip tabakalar halinde taze betonla doldurulmuştur. Parça parça tabakalar halinde huniye doldurulan taze beton her bir tabaka için uzunluğu 60 cm ve çapı 16 mm olan özel deney çubuğu aracılığıyla 25 kez şişlenmiştir. Bu işlemlerin ardından tamamen doldurulan huninin üst kısmı bir mala yardımıyla tesfiye edilerek etrafa dökülen harçlar temizlenmiştir. Huni etrafında bulunan kulplar sayesinde bekleme yapılmadan, yavaş bir şekilde ve sarsılmadan yukarıya doğru kaldırılmıştır. İçi boşalan huni ters çevrilerek betonun yanına ve şişleme çubuğu ise betonun üzerinden geçecek şekilde huninin üst kısmına konulmuştur. Kendi ağırlığı ile taze betonun bir miktar çöktüğü gözlemlenmiştir. Bu noktada önemli olan bir diğer husus numunede devrilme olmamasıdır. Huni çıkarıldıktan sonra taze betonda meydana gelen çökme miktarı elde etmiş olduğumuz karışımın çökme değerini ifade etmektedir. İşlemler bu şekilde devam ederek deneysel çalışmamızda üretilen her bir beton için çökme değerleri belirlenmiş olup kullanmış olduğumuz süper akışkanlaştırıcı miktarları ile bu seviyenin 10 cm ile 16 cm arasında kalması sağlanmıştır. Çökme değerlerinin bu aralıkta kalmasında en önemli rolü süper akışkanlaştırıcı katkıları sağlamıştır.

#### **3.4.2 Taze birim ağırlık**

Malzemenin içerisindeki boşluklu yapısında dâhil olduğu ağırlığının, malzemenin hacmine bölünmesiyle birim ağırlık elde edilir. Birim ağırlığın taze beton için hesaplanması ise belirli bir şekle sahip kalıp içerisinde sıkıştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra birim hacmine karşılık gelen ağırlığı olarak ifade edebiliriz. TS EN 12350-6 (2010) ve ASTM C138 (1994) standartları göz önüne alınarak taze betona ait birim ağırlıklar belirlenebilir. Elde edilen veriler betonun birim hacim ağırlığı olarak ifade edilir ve  $t/m^3$

veya  $\text{kg/m}^3$  olarak gösterilir. Üretimi gerçekleşen betonların Denklem 3.1 yardımıyla taze birim ağırlıkları hesaplanabilmektedir.

$$\Delta = \frac{P}{V_h} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de ifade edildiği üzere P; taze beton ağırlığını (kg),  $V_h$ ; taze beton hacmini ( $\text{m}^3$ ) ve  $\Delta$ ’de taze beton birim ağırlığını ( $\text{kg/m}^3$ ) göstermektedir.

15x15x15 cm boyutlarındaki plastik küp numuneler kullanılarak üretilmiş olduğumuz betonların taze birim ağırlıkları belirlenmiştir. Üretimini gerçekleştirdiğimiz betonlar kalıplara üç aşamada yerleştirilerek sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi yapılırken her bir aşama için titreşim masasından yararlanılır. Söz konusu kalıplar taze beton ile doldurulduktan ve yüzeylerinde kalan fazlalıklar mala yardımıyla düzeltildikten sonra kalıbın dışına taşmış olan fazla beton parçaları temizlenir. Uygun hale gelen numunelerin tartma işlemi yapılır. Taze betonun birim ağırlığını hesaplamada kullanılan plastik kalıpların boş ağırlığının daha önceden bilinmesi gereklidir. Tartma işlemi gerçekleştirildikten sonra tartıda okunan ağırlıktan numunenin bulunduğu kalıbın boş ağırlığı çıkartılarak betonun net ağırlığı hesaplanmış olur. Sonrasında hesaplanan betonun net ağırlığı, 15x15x15 cm ebatlarındaki küp numunenin hacmine bölünmesi suretiyle taze beton birim hacim ağırlık hesaplanır.

### 3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş yüksek dayanımlı beton özelliklerinden birim ağırlık,  $U_{pv}$  ve  $f_c$  deneyleri için 10x10x10 cm küp numuneler,  $f_{sts}$  deneyleri için 15x15x15 cm küp numuneler ve  $f_{fs}$  deneyleri için 10x10x40 cm prizma numuneler kullanılmıştır.

#### 3.5.1 Sertleşmiş birim ağırlık

Daha önceden  $f_c$  değerinin tespiti için üretilmiş olduğumuz 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler sertleşmiş birim ağırlık değerinin belirlenmesinde de kullanılmıştır. Kür havuzunda bekletmiş olduğumuz numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra suya doygun kuru yüzey halinde tartılarak sertleşmiş birim ağırlık değeri tespit edilmiştir. İlk olarak her bir numunenin ayrı ayrı ağırlıkları tartılarak belirlenir. Sonrasında ise her bir

karışımı ifade eden 3 farklı numunenin ortalama ağırlık değerleri hesaplanır. Numunelerin ağırlıklar toplamının numune sayısına bölünmesiyle elde edilen bu değer numune hacmine bölünmek suretiyle sertleşmiş birim ağırlık değeri hesaplanmış olur. Sertleşmiş birim ağırlık deneyine ilişkin görseller Fotoğraf 3.6’da gösterilmiştir.



**Fotoğraf 3.6.** Sertleşmiş beton birim ağırlık deneyi

### 3.5.2 Ultrases geçiş hızı

Ultrases geçiş hızı ( $U_{pv}$ ) deneyi ile betonun dayanım sonuçları tam olarak tespit edilememesine rağmen betonun içerisinden göndermiş olduğumuz sesüstü dalganın geçiş süresi, betonun yapısındaki boşluk ve yoğunluk ile ilgili bilgiler vermektedir. Elde edilen betonun boşluksuz ve yoğun bir yapıya sahip olması durumunda betona göndermiş olduğumuz sesüstü dalganın geçiş süresi daha kısa olmaktadır. Bu sürenin kısa olması betonun çok daha kaliteli, dayanım ve dayanıklılık gibi özelliklerinin de daha iyi olduğunu gösterir. Yapmış olduğumuz çalışmada ultrases geçiş süresi ölçümlerini dijital ultrases geçiş süresi ölçme aleti yardımıyla ölçeriz. Ultrases geçiş süresi ölçümü yapılmadan önce ölçüm yapılacak olan numunenin yüzeylerinin temiz olması gerekir. Okumaların sağlıklı olması için kullanmış olduğumuz test cihazının deneyi gerçekleştirecek başlıkların ultrases jeli ile jellenmiş ve aletin sahip olduğu alıcı ve verici uçları her bir numunenin karşılıklı yüzeylerine denk gelecek şekilde tutularak söz konusu her numune için en az iki okuma yapılır. Akabinde her bir karışım için 3 ayrı numune üzerinden okunan değerlerin ortalaması hesaplanarak ultrases geçiş süreleri bulunur. Bu ölçümler ASTM C 597 (1994) standardında belirlenen usul ve esaslara göre yapılır.  $U_{pv}$  deneyinin yapılışı ile ilgili görsel Fotoğraf 3.7’de verilmiştir.

Basınç dayanımının tespiti için üretilen 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler ultrases geçiş süresinin belirlenmesinde de kullanılmıştır.  $f_c$  deneyleri ile ilgili işlem yapılmadan önce su küründen çıkartılan suya doymun kuru yüzeye sahip numuneler üzerinde ultrases geçiş süresi hesaplanır. Mikrosaniye ( $\mu s$ ) olarak ifade edilen geçiş süresi, belirli ses dalgalarının gönderilmiş olduğu bir uçtan diğer uca geçmesi için süregelen zamanın milyonda biri olarak alınır. Denklem 3.2’de gösterildiği üzere  $U_{pv}$ , sesüstü dalgaların numune boyutundan geçiş süresine bağlı olarak hesaplanır. Ultrases geçiş cihazı ile yapmış olduğumuz ölçümlerin zaman bazında kısa olması elde ettiğimiz betonun daha yoğun, kaliteli ve yapısında daha az boşluk barındırdığı anlamına gelmektedir.

$$U_{pv} = \frac{S}{t} \times 10 \quad (3.2)$$

Bu bağlantıda görüleceği üzere S; betonun dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzey arasındaki mesafeyi (cm), t; ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zamanı ( $\mu s$ ) ve  $U_{pv}$  ise ultrases geçiş hızını (km/s) göstermektedir.



**Fotoğraf 3.7.** Beton üzerinde  $U_{pv}$  deneyinin yapılışı

### 3.5.3 Basınç dayanımı

$f_c$  değerlerinin belirlenmesi aşamasında yapmış olduğumuz deneysel çalışmalarda TS EN 12390-3 (2010) standardında yer alan kurallar gözönüne alınmıştır. Daha önceden hazırlanmış olan 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinden  $f_c$  değerleri

belirlenmiştir. Basınç deneyini gerçekleştirmeden önce önemli bir diğer husus ise deneye tabi tutulacak numunun deney günü birkaç saat önceden kür havuzundan çıkarılıp suya doygun kuru yüzey haline getirilmesinin sağlanmasıdır. Daha önceden belirtildiği üzere her bir numune için ultrases geçiş süresi ölçümü ve sertleşmiş birim ağırlık değeri tespit edildikten sonra laboratuvarında bulunan 3000 kN yükleme özelliğine sahip pres kullanılarak kırma işlemi gerçekleştirilip istenilen günlerdeki  $f_c$  değerleri bulunmuştur.  $f_c$  deneyinin yapılışı ile ilgili görsel Fotoğraf 3.8’de verilmiştir.



**Fotoğraf 3.8.** Beton üzerinde  $f_c$  deneyinin yapılışı



**Fotoğraf 3.9.**  $f_c$  deneyi sonucunda kırılmış numune örnekleri

### 3.5.4 Yarmada çekme dayanımı

Yarmada çekme dayanımı ( $f_{sts}$ ) testleri TS EN 12390-6 (2010) standardında belirlenmiş olan usul ve esaslara uygun olarak 15x15x15 cm boyutlu küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmadan önce kür havuzunda bekleyen numuneler test zamanı kür havuzundan alınarak suya doygun kuru yüzey hale gelmesi sağlanmıştır. Deney için uygun hale gelen numunelerin alt ve üst yüzeylerine çıtalar yerleştirildikten sonra numuneler  $f_{sts}$  deneyine tabi tutulmak üzere bu deney için özel yapılmış aparata yerleştirilmiştir. Daha sonra 3000 kN yükleme özelliğine sahip pres altında deneye tabi tutulmuştur. Bu yük altında kırılmaya maruz bırakılan küp numuneler orta bölgelerinden yarılarak iki farklı parçaya ayrılmıştır. Küp numunelerin  $f_{sts}$  değerleri numunenin uzunluğu boyunca dar bir alana yerleştirilmiş çıtaların numuneye basınç yükü uygulaması sonucu tespit edilmiş olur. Yükleme sırasında meydana gelen yükleme doğrultusuna dik doğrultuda oluşan çekme kuvvetleri çekme gerilmelerine sebep olur ve bu gerilmeler sonucunda numunenin kırılması gerçekleşir. Denklem 3.3’de belirtildiği üzere küp numunelere ait  $f_{sts}$  sonuçları kırılma yüküne göre hesaplanır.

$$f_{sts} = \frac{2N}{\pi a^2} \quad (3.3)$$

Burada, N; kırılmaya sebep olan yükü (N), a; küpün uzunluğunu (mm) ve  $f_{sts}$  ise yarmada çekme dayanımını (MPa) ifade eder. Yarmada çekme deneyinin yapılışını gösteren görsel Fotoğraf 3.10’da gösterilmektedir.



**Fotoğraf 3.10.** Beton üzerinde  $f_{sts}$  deneyinin yapılışı ve kırılmış numuneler

### 3.5.5 Eğilme dayanımı

$f_{fs}$  değerinin tespiti için yapılacak deneysel çalışmada 10x10x40 cm boyutlarında prizma numuneler kullanılmıştır. TS EN 12390-5 (2010) standardında yer alan usüllere uygun olarak  $f_{fs}$  deneyi gerçekleştirilmiştir. Elimizde bulunan betonlarda  $f_{fs}$  testleri, tek noktadan yükleme testine uygun olarak yapılmıştır. Farklı gruplar altında gerçekleşen bu deneylerde her bir serinin  $f_{fs}$  sonuçları kırılmaya maruz bırakılan 3 farklı betonun ortalama yükü alınarak hesaplanmıştır. Eğilme dayanımı deneyinin yapılışının görseli ile ilgili resimler Fotoğraf 3.11’de gösterilmiştir. Denklem 3.4’de yer alan bilgiler kullanılarak betonların  $f_{fs}$  sonuçları kırılma yüküne göre hesaplanır.

$$f_{fs} = \frac{3NL}{2bd^2} \quad (3.4)$$

Denklemden ifade edilen, N; kırılma yükünü (N), L; numune uzunluğunu (mm), b; numune enini (mm) ve d; numune yüksekliğini ve  $f_{fs}$  ise eğilme dayanımını (MPa) gösterir.



**Fotoğraf 3.11.** Beton üzerinde  $f_{fs}$  deneyinin yapılışı

$f_{fs}$  değerinin belirlenmesi için yapılan deneylerde eğilme yükü uyguladığımız kiriş numunelerinde çekme ve basınç gerilmeleri meydana gelmektedir. Deneye tabi tutulan bu kiriş numunelerinin alt bölgelerinde çekme gerilmeleri, üst bölgesinde ise basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Tarafsız eksenenden aşağıya gidildikçe çekme gerilmeleri değerlerinin büyüdüğü görülmektedir. Eğilme yüküne maruz kalan kiriş numunelerinde kırılma, çekme gerilmelerinden dolayı numunenin tarafsız ekseninin aşağısında oluşur. Bu da  $f_{fs}$  değerlerinin belirlenmesi için gereklidir. Betonun sahip olduğu düşük çekme dayanımının bu çekme gerilmeleri altında çabuk kırılmasına sebep olduğu söylenebilir. Deneyler sonucunda bu şekilde belirlenen  $f_{fs}$  değerleri betonun dolaylı çekme dayanımı değerlerini ifade etmektedir.

### **3.5.6 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık deneyi**

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli K, 5MK, 10MK, 15MK, 20MK, 5MK5SD, 10MK5SD ve 15MK5SD kodlu karışımlardan elde edilen ve 56 gün boyunca  $23\pm 3$  °C de kür havuzunda kür uygulanan  $10\times 10\times 10$  cm,  $15\times 15\times 15$  cm ve  $10\times 10\times 40$  cm boyutlu numuneler  $300$  °C,  $400$  °C ve  $500$  °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  deneyleri için kullanılmıştır. Ayrıca, hibrit fibersiz ve hibrit fiberli 5SD, 10SD, 15SD, 20SD, 10SD5MK ve 15SD5MK kodlu karışımlardan elde edilen ve 56 gün boyunca  $23\pm 3$  °C de kür havuzunda kür uygulanan  $10\times 10\times 10$  cm,  $15\times 15\times 15$  cm ve  $10\times 10\times 40$  cm boyutlu numuneler  $300$  °C,  $400$  °C ve  $500$  °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  deneyleri için kullanılmıştır. Ayrıca bu sıcaklıklara maruz bırakılan hibrit fibersiz K, 10MK, 10MK5SD, 15SD ve 10SD5MK kodlu  $10\times 10\times 10$  cm küp numunelerin birer tanesi mikroyapı analizleri için kullanılmıştır. Bu numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra  $105$  °C sıcaklıktaki etüvde, içerisinde bulunan suyun buharlaşması için 24 saat boyunca bekletilmiştir. Daha sonra gruplandırılan numuneler, gruplar halinde yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilerek  $5$  °C/dakika ısıtma artış oranı ile hedeflenen sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Fırın bu hedeflenen sıcaklığa ulaştıktan sonra, numuneler hedeflenen sıcaklıkta 1 saat boyunca bekletilmiştir. Daha sonra yüksek sıcaklık fırını kapatılmış ve üzerinde bulunan havalandırma deliği açılarak numunelerin yavaş bir şekilde soğuması beklenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan MK ve MK+SD serisi betonlardan örnekler Fotoğraf 3.12’de ve yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan SD ve SD+MK serisi betonlardan örnekler Fotoğraf 3.13’de görülmektedir.



**Fotoğraf 3.12.** Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan MK ve MK+SD serisi betonlar



**Fotoğraf 3.13.** Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan SD ve SD+MK serisi betonlar

### 3.5.7 Donma-çözülme etkisine dayanıklılık deneyi

Fibersiz ve hibrit fiberli her bir karışımdan elde edilen ve 28 gün boyunca  $23\pm 3$  °C de kür havuzunda kür uygulanan  $10\times 10\times 10$  cm boyutlu numuneler donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Numuneler,  $-18\pm 3$  °C'ye ayarlı derin dondurucuda 12 saat boyunca donma etkisine maruz bırakılırken, daha sonra derin dondurucudan çıkarılarak 12 saat boyunca su içerisinde çözülmeye maruz bırakılmıştır. Donma-çözülme döngüsü TSE CEN/TS 12390-9 (2012) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi 300 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakıldıktan sonra her bir karışım için üç numune üzerinde  $U_{pv}$  ve  $f_c$  deneyleri gerçekleştirilmiştir. Donma-çözülme döngüsüne maruz kalan numuneler mikroyapı analizleri için de kullanılmıştır.

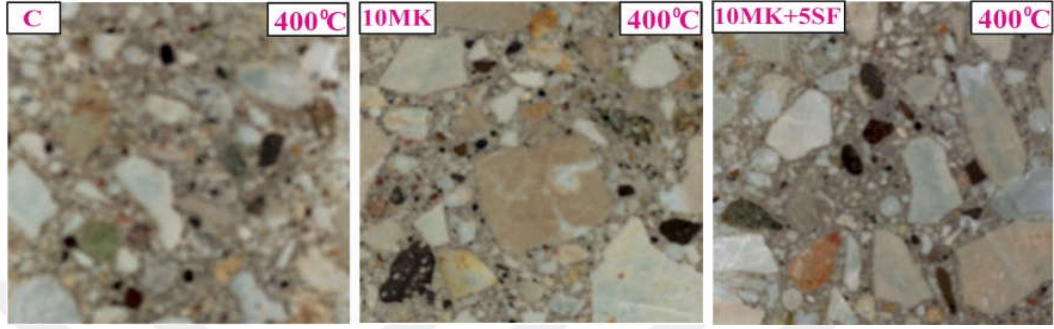
### 3.6 Sertleşmiş Beton Özellikleri Arasındaki İlişkiler

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli yüksek dayanımlı beton özelliklerinden  $U_{pv}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki,  $f_c$  değerleri ile  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri arasındaki ilişki,  $f_{sts}$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasındaki ilişki regresyon denklemleri ile araştırılmıştır. Ayrıca hibrit fibersiz  $U_{pv}$  değerleri ile hibrit fiberli  $U_{pv}$  değerleri arasındaki ilişki, hibrit fibersiz  $f_c$  değerleri ile hibrit fiberli  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki, hibrit fibersiz  $f_{sts}$  değerleri ile hibrit fiberli  $f_{sts}$  değerleri arasındaki ilişki ve hibrit fibersiz  $f_{fs}$  değerleri ile hibrit fiberli  $f_{fs}$  değerleri arasındaki ilişki regresyon denklemleri ile araştırılmıştır.

### 3.7 Mikroyapı Analizleri

Hibrit fibersiz K, 10MK, 10MK5SD, 15SD ve 10SD5MK kodlu karışımlardan alınan 10x10x10 cm boyutlu numuneler ortam sıcaklığına, 300 °C, 400 °C ve 500 °C yüksek sıcaklıklara ve donma-çözülme döngüsüne maruz bırakıldıktan sonra mikroyapı analizleri için kullanılmıştır. Mikroyapı analizlerinde taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope) (SEM) analizi, enerji dağılım spektroskopisi (energy dispersive spectroscopy) (EDS) nokta analizi ve polarize ışık mikroskobu (polarized light microscope) (PLM) analizi gerçekleştirilmiştir. 400 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler SEM ve EDS nokta analizlerinde kullanılmazken, PLM analizinde kullanılmıştır. Bu analizler, yukarıda belirtilen koşullara maruz bırakılan K, 10MK, 10MK5SD, 15SD ve 10SD5MK kodlu karışımlardan alınan numunelerin matriks, arayüz bölgesi ve agregalarında meydana gelen değişiklikleri, oksidasyonu ve çatlakları incelemek için yapılmıştır. SEM ve EDS spot analizleri bu numunelerden kırılan küçük parçacıklar üzerinde Zeiss EVO 40XVP ve Element EDAX-Ametek marka cihazlar ile yapılmıştır. SEM ve EDS spot analizleri yapılmadan önce alınan örnek numunelerden daha net ve kaliteli görüntü elde edebilmek için örneklerin üzerleri altın ile kaplanmıştır. PLM analizleri Nikon ECLIPSE E400 Pol tipi cihazla gerçekleştirilmiştir. Yukarıda belirtilen 10x10x10 cm numuneler önce taş kesme makinası ile dört eşit parçaya kesilmiş ve her numuneden bir parça PLM analizi için seçilmiştir. Bu seçilen parçaların üzerinde bulunan toz parçacıkları hava kompresörü yardımıyla temizlenerek reçineye gömülmüş ve reçine sertleşene kadar laboratuvar ortamında tutulmuştur. Daha sonra, reçinesi sertleştirilmiş kısımlardan taş kesme makinası ile 5x5x0.5 cm'lik parçalar kesilmiş ve bu parçalar cama epoksi ile yapıştırılmıştır. Yapıştırılan kısımlar ayrıca ince kesit makinesi

ile inceltiilmiş ve 5x5x0.03 cm'lik bir ince bölüm elde edilinceye kadar hassas bir elmas ile yüzey aşındırılmıştır. PLM analizi, bu şekilde elde edilen örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. PLM analizi için Fotoğraf 3.14'de K, MK ve MK+SD serisi betonlardan ve Fotoğraf 3.15'de K, SD ve SD+MK serisi betonlardan hazırlanan ince kesit örnekleri görülmektedir.



C=K: Kontrol betonu, MK: Metakaolin, SF=SD=Silis dumanı

**Fotoğraf 3.14.** MK ve MK+SD serisi betonların PLM analizi için ince kesit örnekleri



C=K: Kontrol betonu, MK: Metakaolin, SF=SD=Silis dumanı

**Fotoğraf 3.15.** SD ve SD+MK serisi betonların PLM analizi için ince kesit örnekleri

## BÖLÜM IV

### DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 4.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

##### 4.1.1 Çökme (Slump)

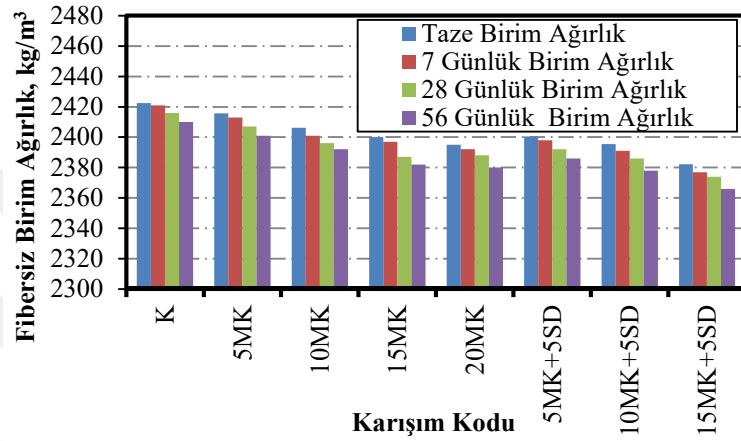
Hibrit fibersiz ve hibrid fiberli olarak üretilen her bir beton karışımının çökme değeri yeterli kıvam ve işlenebilirlik için ölçülmüştür. Karışımlarda kullanılan su azaltıcı özelliği olan süper akışkanlaştırıcı miktarı ile taze betonların çökme değerlerinin 10 cm ile 16 cm arasında olması sağlanmıştır. Karışımlarda çimento ile yer değiştirilerek kullanılan MK ve SD içeriği arttıkça çökme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ancak süper akışkanlaştırıcı katkının etkisi ile bu azalma ters yönde etkilenmiştir. Dahası, hibrit fibersiz karışımlara göre hibrit fiberli karışımların çökme değerini istenen sınırlar içerisinde olabilmesi için hibrit fiberli karışımlarda süper akışkanlaştırıcı miktarı artırılmıştır. Çimento içerikli malzemelerden MK ve SD'nin özgül ağırlığı çimentonun özgül ağırlığına göre daha düşüktür. Bundan dolayı, karışımlarda kullanılan MK ve SD içeriğinin artması ile bağlayıcı malzemenin toplam hacmi de artmıştır. Bunun sonucu olarak bağlayıcı hamurun artmasıyla ve süper akışkanlaştırıcı ile birlikte işlenebilmesi daha kolay olan bir beton üretilmiştir.

##### 4.1.2 Taze birim ağırlık

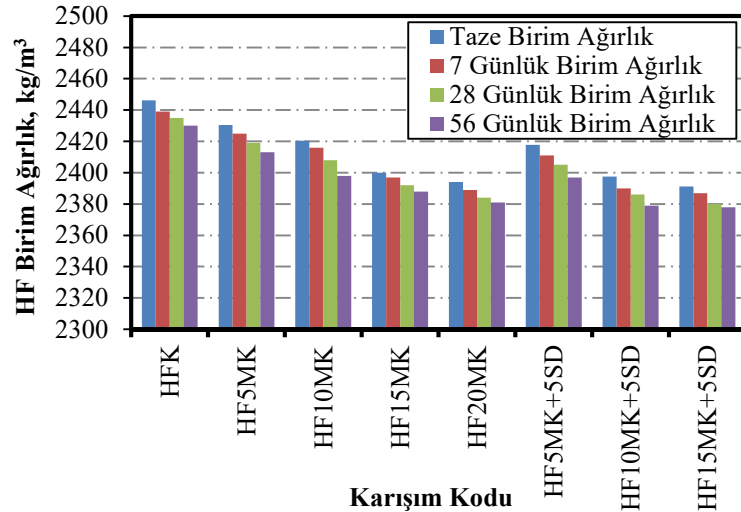
TS EN 12350-6 (2010) ve ASTM C 138 (1994) standartlarına göre hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren beton karışımlarının taze birim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Belirlenen hibrit fibersiz ve hibrit fiberli taze birim ağırlık değerleri çimento yerine kullanılan MK ve SD içeriğinin ağırlığına göre iki farklı grupta değerlendirilmiştir.

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5MK, 10MK, 15MK, 20MK ve 5MK5SD, 10MK5SD ve 15MK5SD) betonların taze birim ağırlık değerleri Şekil 4.1 ve 4.2'de

verilmiştir. Burada, hibrit fibersiz betonların birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak  $2420 \text{ kg/m}^3$  ile  $2380 \text{ kg/m}^3$  arasında değişirken, hibrit fiberli betonların birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak  $2450 \text{ kg/m}^3$  ile  $2390 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmiştir. Hibrit fibersiz betonlara göre hibrit fiberli betonların ağırlıklarındaki artışın nedeni karışımlarda kullanılan çelik fiberden meydana gelmektedir. Karışımlarda çimento yerine kullanılan MK miktarının artmasıyla da birim ağırlık değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni de çimentonun özgül ağırlığına göre MK'nın özgül ağırlığının daha düşük olmasıdır.



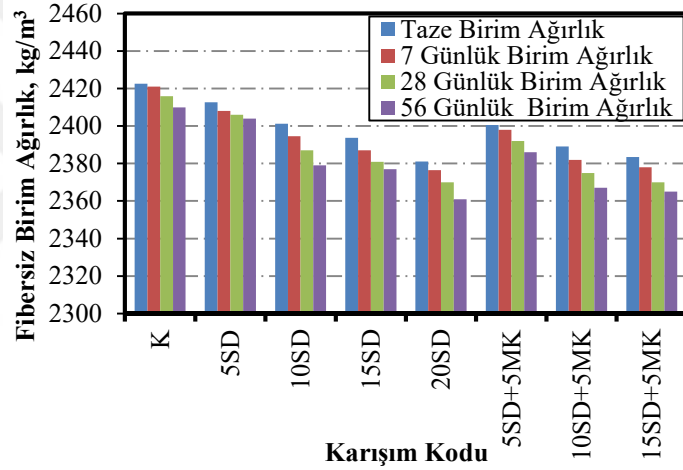
Şekil 4.1. Fibersiz MK ve MK+SD betonların birim ağırlıkları



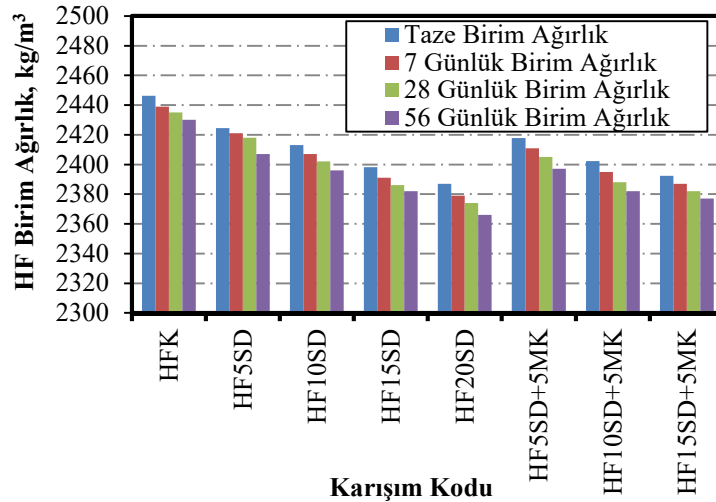
Şekil 4.2. Hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların birim ağırlıkları

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5SD, 10SD, 15SD, 20SD ve 5SD5MK, 10SD5MK ve 15SD5MK) betonların taze birim ağırlık değerleri Şekil 4.3 ve 4.4'de

verilmiştir. Burada, yukarıda belirtilen MK ağırlıklı karışımlarda olduğu gibi hibrit fibersiz betonların birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak  $2420 \text{ kg/m}^3$  ile  $2380 \text{ kg/m}^3$  arasında değişirken, hibrit fiberli betonların birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak  $2450 \text{ kg/m}^3$  ile  $2390 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmiştir. Hibrit fibersiz betonlara göre hibrit fiberli betonların ağırlıklarındaki artışın nedeni karışımlarda kullanılan çelik fiberden meydana gelmektedir. Karışımlarda çimento yerine kullanılan SD miktarının artmasıyla da birim ağırlık değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni de çimentonun özgül ağırlığına göre SD'nin özgül ağırlığının daha düşük olmasıdır. Çimento yerine ağırlıkça MK kullanılan karışımlara göre SD kullanılan karışımların birim ağırlık değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni de MK malzemesine göre SD malzemesinin özgül ağırlığının daha düşük olmasıdır.



Şekil 4.3. Fibersiz SD ve SD+MK betonların birim ağırlıkları



Şekil 4.4. Hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların birim ağırlıkları

## 4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

### 4.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren beton karışımlarının 7, 28 ve 56 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri  $U_{pv}$  ve  $f_c$  deneyleri için üretilen 10x10x10 cm küp numunelerin ağırlıklarının tartılmasıyla belirlenmiştir. Belirlenen hibrit fibersiz ve hibrit fiberli 7, 28 ve 56 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri çimento yerine kullanılan MK ve SD içeriğinin ağırlığına göre iki farklı grupta değerlendirilmiştir.

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5MK, 10MK, 15MK, 20MK ve 5MK5SD, 10MK5SD ve 15MK5SD) betonların 7, 28 ve 56 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri Şekil 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. Burada, hibrit fibersiz betonların sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 7 günlük numuneler için 2420 kg/m<sup>3</sup> ile 2380 kg/m<sup>3</sup>, 28 günlük numuneler için 2415 kg/m<sup>3</sup> ile 2375 kg/m<sup>3</sup> ve 56 günlük numuneler için 2410 kg/m<sup>3</sup> ile 2365 kg/m<sup>3</sup> arasında değişirken, hibrit fiberli betonların birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 7 günlük numuneler için 2440 kg/m<sup>3</sup> ile 2388 kg/m<sup>3</sup>, 28 günlük numuneler için 2435 kg/m<sup>3</sup> ile 2380 kg/m<sup>3</sup> ve 56 günlük numuneler için 2430 kg/m<sup>3</sup> ile 2378 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmiştir. Betonların maruz kaldığı kür günleri arttıkça sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedenlerinden biri olarak beton içerisinde bulunan bağlanmamış kirecin çözülerek suya karışması gösterilebilir. Hibrit fibersiz betonlara göre hibrit fiberli betonların ağırlıklarındaki artışın nedeni ise karışımlarda kullanılan çelik fiberden meydana gelmektedir. Karışımlarda çimento yerine kullanılan MK miktarının artmasıyla da sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni de çimetonun özgül ağırlığına göre MK'nın özgül ağırlığının daha düşük olmasının sonucudur.

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5SD, 10SD, 15SD, 20SD ve 5SD5MK, 10SD5MK ve 15SD5MK) betonların 7, 28 ve 56 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri Şekil 4.3 ve 4.4'de verilmiştir. Burada, yukarıda belirtilen MK ağırlıklı karışımlarda olduğu gibi hibrit fibersiz betonların sertleşmiş birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 7

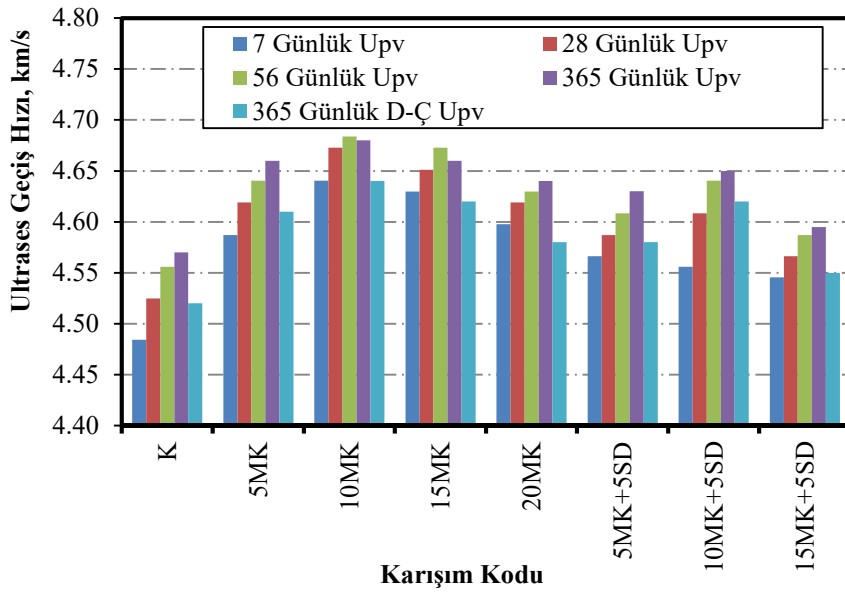
günlük numuneler için 2420 kg/m<sup>3</sup> ile 2378 kg/m<sup>3</sup>, 28 günlük numuneler için 2416 kg/m<sup>3</sup> ile 2370 kg/m<sup>3</sup> ve 56 günlük numuneler için 2410 kg/m<sup>3</sup> ile 2365 kg/m<sup>3</sup> arasında değişirken, hibrit fiberli betonların birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak 7 günlük numuneler için 2439 kg/m<sup>3</sup> ile 2387 kg/m<sup>3</sup>, 28 günlük numuneler için 2435 kg/m<sup>3</sup> ile 2382 kg/m<sup>3</sup> ve 56 günlük numuneler için 2430 kg/m<sup>3</sup> ile 2377 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmiştir. Hibrit fibersiz betonlara göre hibrit fiberli betonların ağırlıklarındaki artışın nedeni karışımlarda kullanılan çelik fiberden meydana gelmektedir. Karışımlarda çimento yerine kullanılan SD miktarının artmasıyla da birim ağırlık değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak da çimetonun özgül ağırlığına göre SD'nın özgül ağırlığının daha düşük olması gösterilebilir. Çimento yerine ağırlıkça MK kullanılan karışımlara göre SD kullanılan karışımların birim ağırlık değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni de MK malzemesine göre SD malzemesinin özgül ağırlığının daha düşük olması gösterilebilir.

#### 4.2.2 Ultrases geçiş hızı

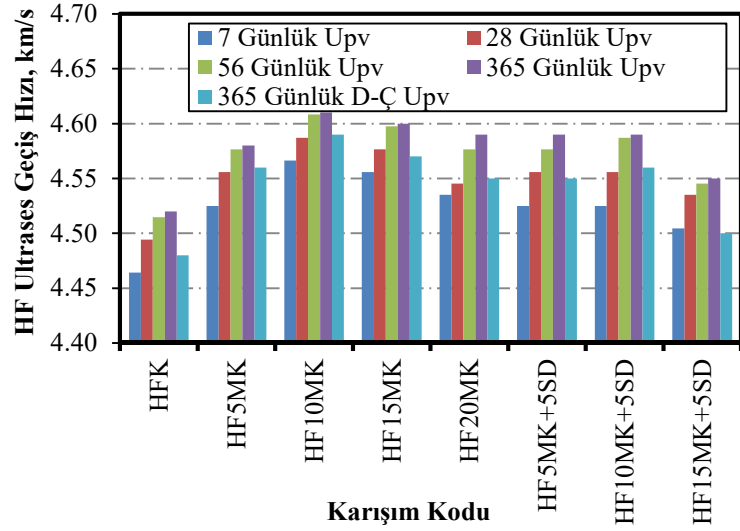
Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren beton karışımlarının 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri  $f_c$  deneyleri için üretilen 10x10x10 cm küp numuneler üzerinde ölçümler yapılarak belirlenmiştir. Belirlenen hibrit fibersiz ve hibrit fiberli 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri çimento yerine kullanılan MK ve SD içeriğinin ağırlığına göre iki farklı grupta değerlendirilmiştir.

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5MK, 10MK, 15MK, 20MK ve 5MK5SD, 10MK5SD ve 15MK5SD) betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri Şekil 4.5 ve 4.6'da, normalize edilmiş  $U_{pv}$  değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ayrıca bu betonların 300 donma-çözülme döngüsü sonucunda elde edilen 365 günlük  $U_{pv}$  değerleride bu şekiller ve çizelgede verilmiştir. Dahası hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece MK ve MK+SD içeren betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri Şekil 4.7 ve 4.8'de üç boyutlu olarak verilmiştir. Bu şekillerden hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $U_{pv}$  değerlerinin kür günlerinin artmasıyla arttığı açıkça görülmektedir. Ancak bu artış hızı ilerleyen kür günlerinde ilk günlerdeki artış oranına göre daha düşük olmaktadır. Ayrıca çimento yerine kullanılan MK ve MK+SD miktarları kontrol betonuna göre  $U_{pv}$  değerlerini arttırmıştır. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece MK içeren betonlarda en

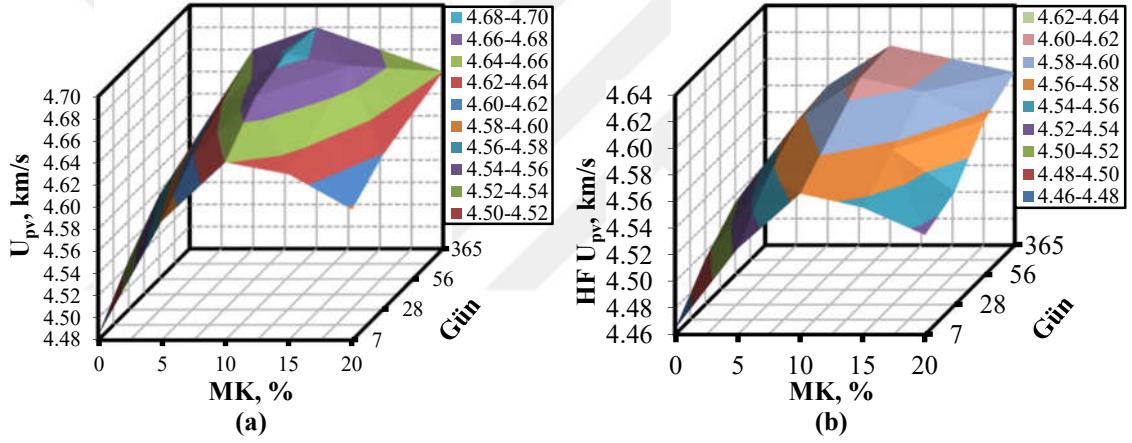
yüksek  $U_{pv}$  değerleri 10MK kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK+SD içeren betonlarda en yüksek  $U_{pv}$  değerleri 10MK5SD kodlu numunelerde gözlenmiştir. Karışımlarda kullanılan hibrit fiber içeriği  $U_{pv}$  değerleri üzerinde olumsuz etki göstermiştir. Hibrit fibersiz betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri 4.59 km/s ile 4.68 km/s arasında değişirken, hibrit fiberli betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri 4.56 km/s ile 4.61 km/s arasında değişmiştir. Beton karışımlarında hibrit fiber kullanılması betonun  $U_{pv}$  değerlerini olumsuz etkilediğini Nik ve Omran (2013), çalışmasında gözlemiştir. Bu çalışmada, beton karışımlarında polipropilen fiber kullanılmasının  $U_{pv}$  değerlerini azalttığı çelik fiber kullanılmasının ise  $U_{pv}$  değerlerini çok az miktarda arttırdığı ifade edilmiştir. Bunun sonucu olarakta MK içeren beton karışımlarında hibrit fiber kullanılmasının betonun  $U_{pv}$  değerlerini olumsuz etkileyeceği söylenebilir. 300 donma-çözülme döngüsüne maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK içeren betonların 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri, normal kür uygulanan 365 günlük  $U_{pv}$  değerlerinden daha düşük elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak donma-çözülme döngüsünün hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK içeren betonların  $U_{pv}$  değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Ancak bu olumsuz etkinin yüksek dayanıma sahip MK katkılı betonlar üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı ve 300 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan MK içeren betonların  $U_{pv}$  değerlerinin 28 günlük  $U_{pv}$  değerlerine yakın olduğu görülmüştür.



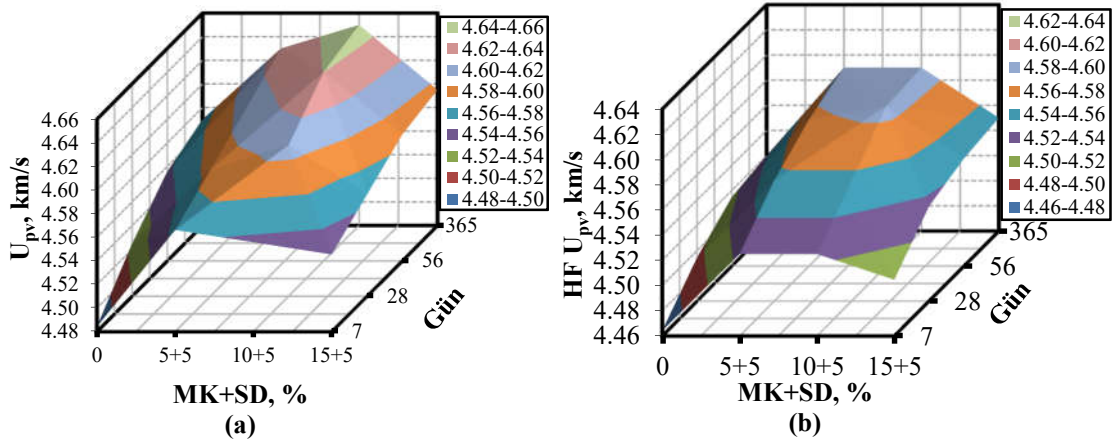
Şekil 4.5. Fibersiz MK ve MK+SD betonların  $U_{pv}$  değerleri



Şekil 4.6. Hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $U_{pv}$  değerleri



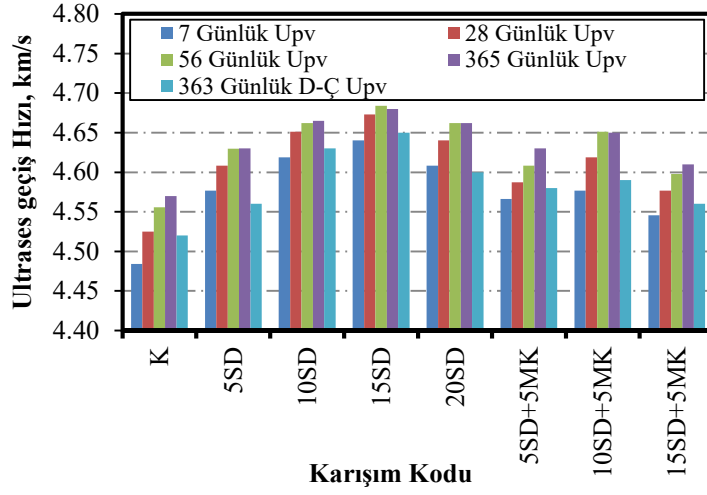
Şekil 4.7. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK betonların  $U_{pv}$  değerlerinin üç boyutlu değişimi



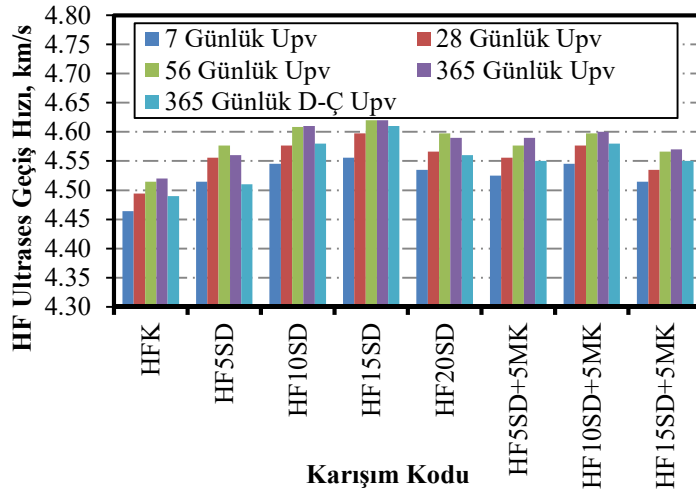
Şekil 4.8. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK+SD betonların  $U_{pv}$  değerlerinin üç boyutlu değişimi

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5SD, 10SD, 15SD, 20SD ve 5SD5MK, 10SD5MK ve 15SD5MK) betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri Şekil 4.9 ve 4.10'da, normalize edilmiş  $U_{pv}$  değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Ayrıca bu betonların 300 donma-çözülme döngüsü sonucunda elde edilen 365 günlük  $U_{pv}$  değerleride bu şekiller ve çizelgede verilmiştir. Dahası hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece SD ve SD+MK içeren betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri Şekil 4.11 ve 4.12'de üç boyutlu olarak verilmiştir. Bu şekillerden hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $U_{pv}$  değerlerinin kür günlerinin artmasıyla arttığı açıkça görülmektedir. Ancak bu artış hızı ilerleyen kür günlerinde ilk günlerdeki artış oranına göre daha düşük olmaktadır. Ayrıca çimento yerine kullanılan SD ve SD+MK miktarları kontrol betonuna göre  $U_{pv}$  değerlerini arttırmıştır. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece SD içeren betonlarda en yüksek  $U_{pv}$  değerleri 15SD kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz SD+MK içeren betonlarda en yüksek  $U_{pv}$  değerleri 10SD5MK kodlu numunelerde gözlenmiştir. SD içeren karışımlarda kullanılan hibrit fiber içeriği  $U_{pv}$  değerleri üzerinde olumsuz etki göstermiştir. Hibrit fibersiz betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri 4.58 km/s ile 4.68 km/s arasında değişirken, hibrit fiberli betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri 4.56 km/s ile 4.62 km/s arasında değişmiştir. Bunun sonucu olarakta SD içeren beton karışımlarında hibrit fiber kullanılmasının betonun  $U_{pv}$  değerlerini olumsuz etkileyeceği söylenebilir.

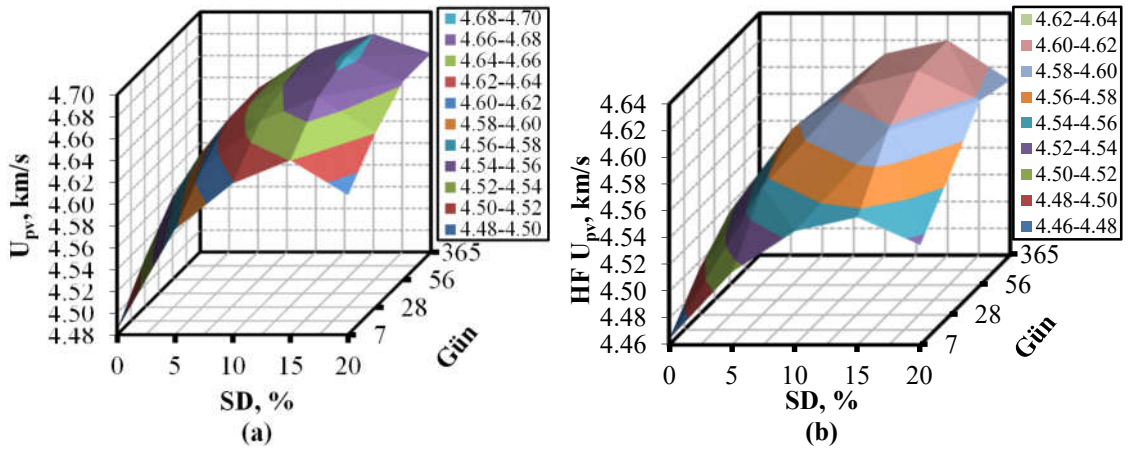
300 donma-çözülme döngüsüne maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz SD içeren betonların 365 günlük  $U_{pv}$  değerleri, normal kür uygulanan 365 günlük  $U_{pv}$  değerlerinden daha düşük elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak donma-çözülme döngüsünün hibrit fiberli ve hibrit fibersiz SD içeren betonların  $U_{pv}$  değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Ancak bu olumsuz etkinin yüksek dayanıma sahip SD içeren betonlar üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı ve 300 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan SD katkılı betonların  $U_{pv}$  değerlerinin 28 günlük  $U_{pv}$  değerlerine yakın olduğu görülmüştür. Sadece MK ve MK ağırlığına göre üretilen betonların  $U_{pv}$  değerleri ile sadece SD ve SD ağırlığına göre üretilen betonların  $U_{pv}$  değerleri benzerlik göstermektedir.



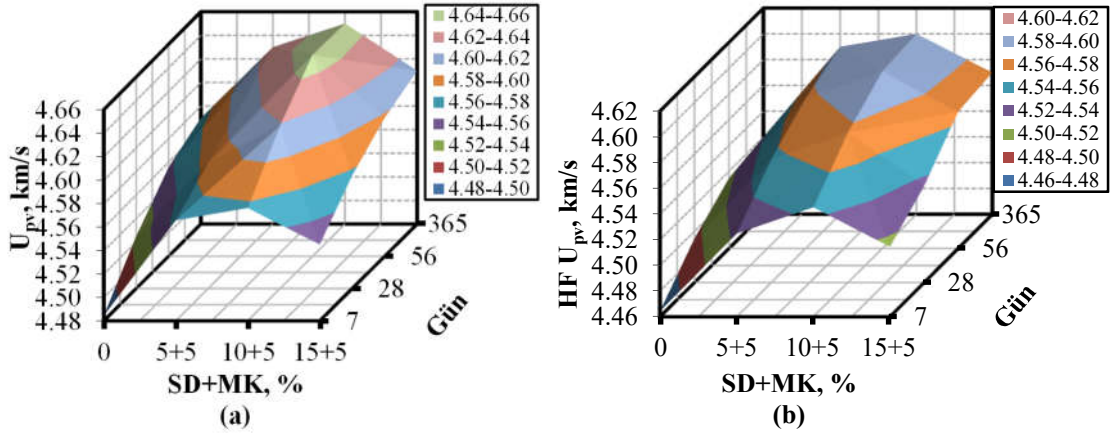
Şekil 4.9. Fibersiz SD ve SD+MK betonların  $U_{pv}$  değerleri



Şekil 4.10. Hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $U_{pv}$  değerleri



Şekil 4.11. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD betonların  $U_{pv}$  değerlerinin üç boyutlu değişimi



**Şekil 4.12.** (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD+MK betonların  $U_{pv}$  değerlerinin üç boyutlu değişimi

Betonların  $U_{pv}$  değerlerinin belirlenmesi yaklaşık olarak betonun kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Çizelge 4.1’de verilen sınırlara göre betonun hangi kalitede olduğu belirlenebilir. Çizelge 4.1’de verilen  $U_{pv}$  sınır değerlerine göre, hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren betonların çoğunluğunun mükemmel kalitede olduğu birkaç tanesinin de iyi kalitede olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.1.**  $U_{pv}$  değerlerine göre belirlenen beton kalitesi (Erdoğan, 2003)

| $U_{pv}$<br>(km/sn) | Beton Kalitesi |
|---------------------|----------------|
| > 4.5               | Mükemmel       |
| 4.5-3.5             | İyi            |
| 3.5-3.0             | Şüpheli        |
| 3.0-2.0             | Zayıf          |
| < 2                 | Çok Zayıf      |

#### 4.2.3 Basınç dayanımı

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren beton karışımlarının 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri 10x10x10 cm küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Belirlenen hibrit fibersiz ve hibrit fiberli 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri çimento yerine kullanılan MK ve SD içeriğinin ağırlığına göre iki farklı grupta değerlendirilmiştir.

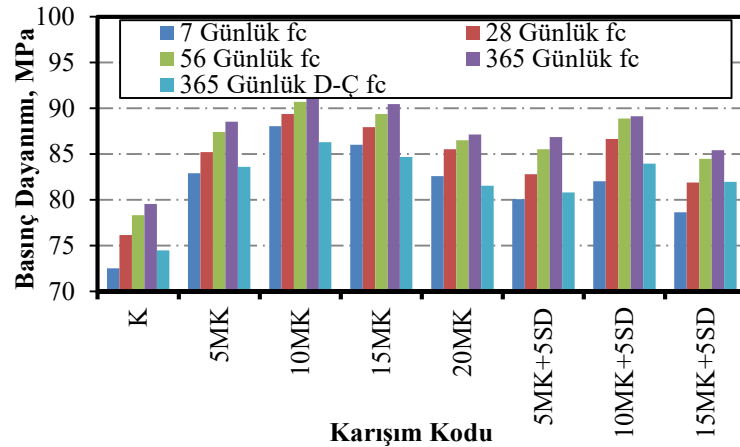
Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5MK, 10MK, 15MK, 20MK ve 5MK5SD, 10MK5SD ve 15MK5SD) betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri Şekil 4.13 ve 4.14'de, normalize edilmiş  $f_c$  değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ayrıca bu betonların 300 donma-çözülme döngüsü sonucunda elde edilen 365 günlük  $f_c$  değerleride bu şekiller ve çizelgede verilmiştir. Dahası hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece MK ve MK+SD içeren betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri Şekil 4.15 ve 4.16'da üç boyutlu olarak verilmiştir. Bu şekillerden hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $f_c$  değerlerinin kür günlerinin artmasıyla arttığı açıkça görülmektedir. Ancak bu artış hızı ilerleyen kür günlerinde ilk günlerdeki artış oranına göre daha düşük olmaktadır. Ayrıca çimento yerine kullanılan MK ve MK+SD miktarları kontrol betonuna göre  $f_c$  değerlerini arttırmıştır. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece MK içeren betonlarda en yüksek  $f_c$  değerleri 10MK kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK+SD içeren betonlarda en yüksek  $f_c$  değerleri 10MK5SD kodlu numunelerde gözlenmiştir. Bu sonuçlar beton karışımlarında çimento yerine MK ve MK+SD kullanılmasının yüksek reaktivite ve mikro dolgu etkisi nedeniyle  $f_c$  değerlerini geliştirdiğini gösterir. MK içeren betonların  $f_c$  değerleri ile ilgili benzer sonuçları Mermerdas vd. (2012), Khatib ve Hibbert (2005), Güneyisi vd. (2012), Poon vd. (2006), Tafraoui vd. (2009) ve Rashiddadash vd. (2014) çalışmalarında rapor etmişlerdir. Karışımlarda kullanılan hibrit fiber içeriği  $f_c$  değerleri üzerinde  $U_{pv}$  değerlerinin aksine olumlu etki göstermiştir. Hibrit fibersiz betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri kontrol betonlarında 72.53 MPa ile 79.55 MPa arasında ve MK içeren betonlarda 82.60 MPa ile 91 MPa, MK+SD içeren betonlarda 78.63 MPa ile 89.13 MPa arasında değişirken, hibrit fiberli betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri kontrol betonlarında 75.26 MPa ile 82.49 MPa arasında ve MK içeren betonlarda 83.38 MPa ile 91.74 MPa, MK+SD içeren betonlarda 80.39 MPa ile 91.09 MPa arasında değişmiştir. Çelik fiberle güçlendirilmiş betonlarda çelik fiberin miktarı, cinsi, büyüklüğü, geometrisi, dağılımı, konsantrasyonu, uzunluğu ve yönü betonların  $f_c$  değerlerini hem olumlu hem de olumsuz yönde etkileyebilir (Benaicha vd., 2015). Genel olarak beton karışımlarında çelik fiber kullanılması betonun  $f_c$  değerlerini arttırırken polipropilen fiber kullanımı bu değerleri azaltmaktadır. Nik ve Omran (2013), çalışmasında çelik fiberle güçlendirilmiş betonların  $f_c$  değerlerini pozitif yönde etkilediğini, polipropilen fiberle güçlendirilmiş betonun  $f_c$  değerlerini negatif yönde etkilediğini belirtmiştir. Burada polipropilen fiberin olumsuz etkisine göre çelik fiberin olumlu etkisinin oranının daha fazla olduğunu ifade etmiştir. Bunun sonucu olarakta MK

içeren beton karışımlarında hibrit fiber kullanılması betonun  $f_c$  değerlerini olumlu etkilediği sonucuna varılabilir. 300 donma-çözülme döngüsüne maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK içeren betonların 365 günlük  $f_c$  değerleri, normal kür uygulanan 365 günlük  $f_c$  değerlerinden daha düşük elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak donma-çözülme döngüsünün hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK içeren betonların  $f_c$  değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Ancak bu olumsuz etkinin yüksek dayanıma sahip MK katkılı betonlar üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı ve 300 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan MK içeren betonların  $f_c$  değerlerinin 28 günlük  $f_c$  değerlerine yakın olduğu görülmüştür.

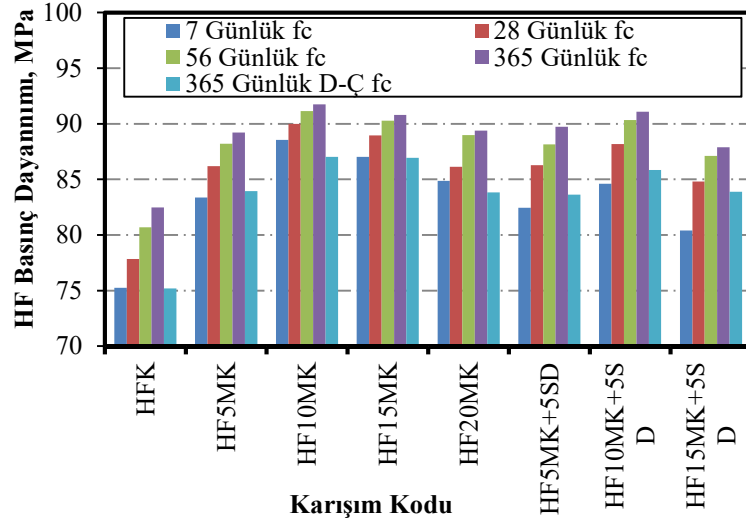
**Çizelge 4.2.** MK ve MK+SD içeren betonların normalize edilmiş mekanik özellikleri

| Karışımlar | $U_{pv}$ (km/s) |      |      |      |      | $f_c$ (MPa) |      |      |      |      | $f_{sts}$ (MPa) |      | $f_{fs}$ (MPa) |      |
|------------|-----------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|-----------------|------|----------------|------|
|            | 7               | 28   | 56   | 365  |      | 7           | 28   | 56   | 365  |      | 56              | 56   | 56             | 56   |
|            | gün             | gün  | gün  | gün  | F-T  | gün         | gün  | gün  | gün  | F-T  | gün             | gün  | gün            | gün  |
| K          | 1.00            | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00        | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00            | 1.00 | 1.00           | 1.00 |
| 5MK        | 1.02            | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.14        | 1.12 | 1.12 | 1.11 | 1.12 | 1.11            | 1.11 | 1.12           | 1.12 |
| 10MK       | 1.03            | 1.03 | 1.03 | 1.02 | 1.03 | 1.21        | 1.17 | 1.16 | 1.14 | 1.16 | 1.18            | 1.18 | 1.27           | 1.27 |
| 15MK       | 1.03            | 1.03 | 1.03 | 1.02 | 1.02 | 1.19        | 1.16 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.16            | 1.16 | 1.20           | 1.20 |
| 20MK       | 1.03            | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.01 | 1.14        | 1.12 | 1.10 | 1.10 | 1.09 | 1.12            | 1.12 | 1.16           | 1.16 |
| HFK        | 1.00            | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00        | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00            | 1.00 | 1.00           | 1.00 |
| HF5MK      | 1.01            | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.02 | 1.11        | 1.11 | 1.09 | 1.08 | 1.12 | 1.10            | 1.10 | 1.12           | 1.12 |
| HF10MK     | 1.02            | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.18        | 1.16 | 1.13 | 1.11 | 1.16 | 1.15            | 1.15 | 1.21           | 1.21 |
| HF15MK     | 1.02            | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.16        | 1.14 | 1.12 | 1.10 | 1.16 | 1.11            | 1.11 | 1.15           | 1.15 |
| HF20MK     | 1.02            | 1.01 | 1.01 | 1.02 | 1.01 | 1.13        | 1.11 | 1.10 | 1.08 | 1.12 | 1.09            | 1.09 | 1.14           | 1.14 |
| 5MK+5SD    | 1.02            | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.10        | 1.09 | 1.09 | 1.09 | 1.08 | 1.09            | 1.09 | 1.12           | 1.12 |
| 10MK+5SD   | 1.02            | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.13        | 1.14 | 1.14 | 1.12 | 1.13 | 1.17            | 1.17 | 1.21           | 1.21 |
| 15MK+5SD   | 1.01            | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.08        | 1.08 | 1.08 | 1.07 | 1.10 | 1.08            | 1.08 | 1.07           | 1.07 |
| HF5MK+5SD  | 1.01            | 1.01 | 1.01 | 1.02 | 1.01 | 1.10        | 1.11 | 1.09 | 1.09 | 1.11 | 1.10            | 1.10 | 1.15           | 1.15 |
| HF10MK+5SD | 1.01            | 1.01 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.12        | 1.13 | 1.12 | 1.10 | 1.14 | 1.12            | 1.12 | 1.16           | 1.16 |
| HF15MK+5SD | 1.01            | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.00 | 1.07        | 1.09 | 1.08 | 1.07 | 1.12 | 1.07            | 1.07 | 1.10           | 1.10 |

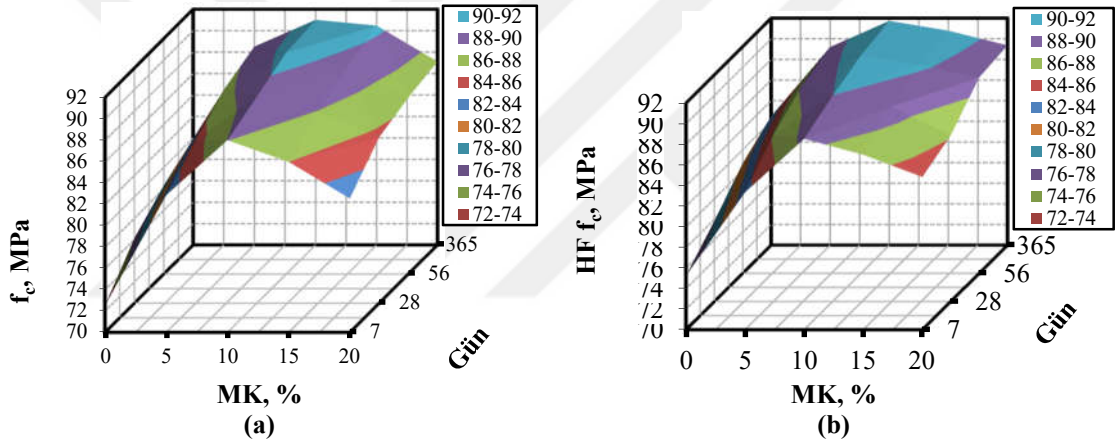
$U_{pv}$ =Ultras ses geçiş hızı,  $f_c$ = Basınç dayanımı,  $f_{sts}$ = Yarmada çekme dayanımı,  $f_{fs}$ = Eğilme dayanımı



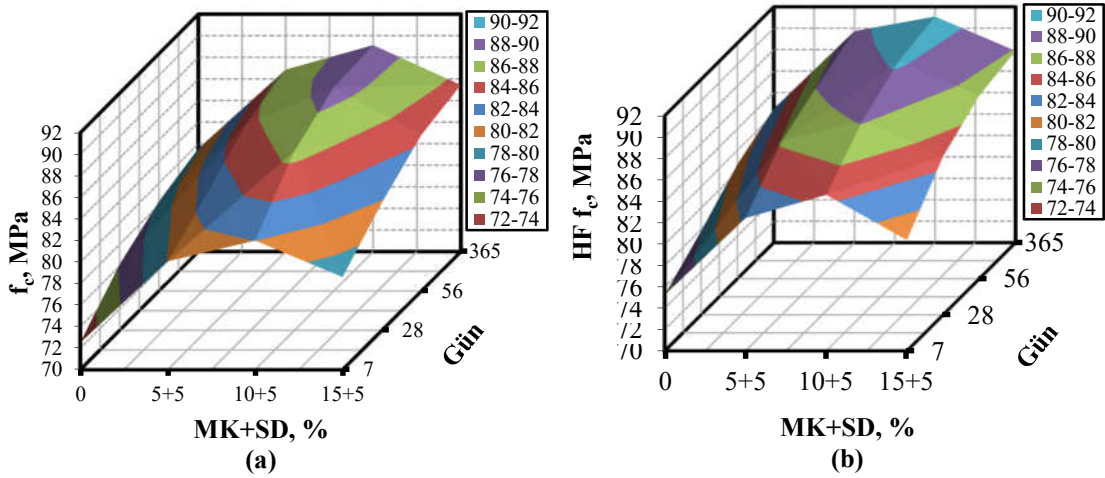
**Şekil 4.13.** Fibersiz MK ve MK+SD betonların  $f_c$  değerleri



Şekil 4.14. Hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $f_c$  değerleri



Şekil 4.15. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK betonların  $f_c$  değerlerinin üç boyutlu değişimi



Şekil 4.16. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK+SD betonların  $f_c$  değerlerinin üç boyutlu değişimi

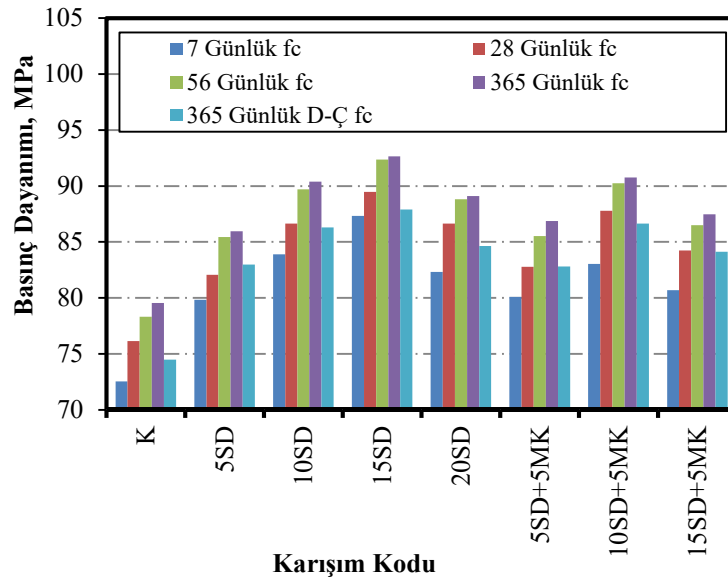
Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5SD, 10SD, 15SD, 20SD ve 5SD5MK, 10SD5MK ve 15SD5MK) betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri Şekil 4.17 ve 4.18'de, normalize edilmiş  $f_c$  değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Ayrıca bu betonların 300 donma-çözülme döngüsü sonucunda elde edilen 365 günlük  $f_c$  değerleride bu şekiller ve çizelgede verilmiştir. Dahası hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece SD ve SD+MK içeren betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri Şekil 4.19 ve 4.20'de üç boyutlu olarak verilmiştir. Bu şekillerden hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $f_c$  değerlerinin kür günlerinin artmasıyla arttığı açıkça görülmektedir. Ancak bu artış hızı ilerleyen kür günlerinde ilk günlerdeki artış oranına göre daha düşük olmaktadır. Ayrıca çimento yerine kullanılan SD ve SD+MK miktarları kontrol betonuna göre  $f_c$  değerlerini arttırmıştır. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece SD içeren betonlarda en yüksek  $f_c$  değerleri 15SD kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz SD+MK içeren betonlarda en yüksek  $f_c$  değerleri 10SD5MK kodlu numunelerde gözlenmiştir. Bu sonuçlar beton karışımlarında çimento yerine SD ve SD+MK kullanılmasının yüksek reaktivite ve mikro dolgu etkisi nedeniyle betonun  $f_c$  değerlerini geliştirdiğini gösterir. SD ve SD+MK malzemelerinin puzolanik aktivite ve dolgu etkisi nedeniyle basınç dayanımındaki artış Poon vd. (2006), Sarıdemir vd. (2016) ve Köksal vd. (2008) tarafından ifade edilmiştir. Karışımlarda kullanılan hibrit fiber içeriği  $f_c$  değerleri üzerinde  $U_{pv}$  değerlerinin aksine olumlu etki göstermiştir. Hibrit fibersiz betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri kontrol betonlarında 72.53 MPa ile 79.55 MPa arasında ve SD içeren betonlarda 79.84 MPa ile 92.64 MPa, SD+MK içeren betonlarda 80.09 MPa ile 90.76 MPa arasında değişirken, hibrit fiberli betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük  $f_c$  değerleri kontrol betonlarında 75.26 MPa ile 82.49 MPa, SD+MK içeren betonlarda 80.92 MPa ile 92.54 MPa arasında ve SD içeren betonlarda 80.80 MPa ile 92.94 MPa arasında değişmiştir. Bunun sonucu olarakta SD içeren beton karışımlarında hibrit fiber kullanılmasının betonun  $f_c$  değerlerini olumlu etkilediği sonucuna varılabilir. 300 donma-çözülme döngüsüne maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz SD içeren betonların 365 günlük  $f_c$  değerleri, normal kür uygulanan 365 günlük  $f_c$  değerlerinden daha düşük elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak donma-çözülme döngüsünün hibrit fiberli ve hibrit fibersiz SD içeren betonların  $f_c$  değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Ancak bu olumsuz etkinin yüksek dayanıma sahip SD katkılı betonlar üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı ve 300 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan SD içeren betonların  $f_c$  değerlerinin 28 günlük  $f_c$  değerlerine yakın olduğu görülmüştür. Sadece MK ve MK

ağırlığına göre üretilen betonların  $f_c$  değerleri ile sadece SD ve SD ağırlığına göre üretilen betonların  $f_c$  değerleri benzerlik göstermektedir. Bazı karışımlarda MK ve MK ağırlığına göre üretilen numunelerin  $f_c$  değerlerinin, SD ve SD ağırlığına göre üretilen numunelerin  $f_c$  değerlerinden yüksek olduğu bazı karışımlarda da tam tersi olduğu görülmektedir.

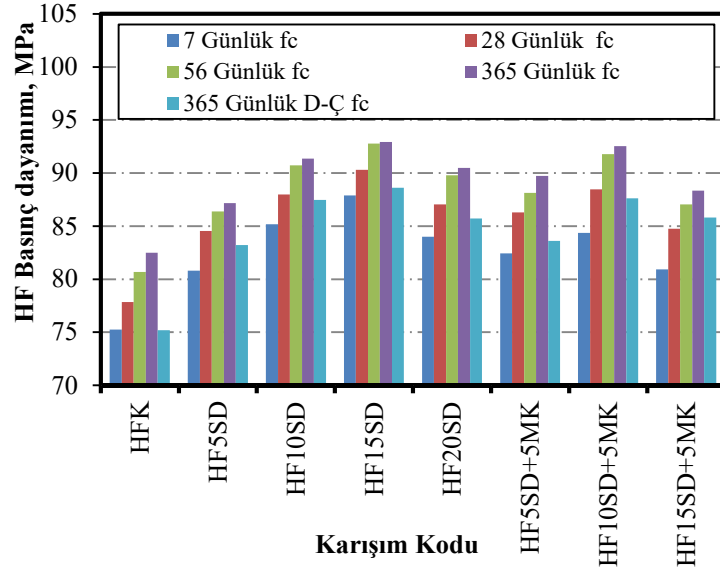
**Çizelge 4.3.** SD ve SD+MK içeren betonların normalize edilmiş mekanik özellikleri

| Karışımlar | $U_{pv}$ (km/s) |        |        |         |      | $f_c$ (MPa) |        |        |         |      | $f_{fs}$ (MPa) | $f_{sts}$ (MPa) |
|------------|-----------------|--------|--------|---------|------|-------------|--------|--------|---------|------|----------------|-----------------|
|            | 7 gün           | 28 gün | 56 gün | 365 gün | F-T  | 7 gün       | 28 gün | 56 gün | 365 gün | F-T  | 56 gün         | 56 gün          |
| K          | 1.00            | 1.00   | 1.00   | 1.00    | 1.00 | 1.00        | 1.00   | 1.00   | 1.00    | 1.00 | 1.00           | 1.00            |
| 5SD        | 1.02            | 1.02   | 1.02   | 1.01    | 1.01 | 1.10        | 1.08   | 1.09   | 1.08    | 1.11 | 1.13           | 1.06            |
| 10SD       | 1.03            | 1.03   | 1.02   | 1.02    | 1.02 | 1.16        | 1.14   | 1.15   | 1.14    | 1.16 | 1.18           | 1.11            |
| 15SD       | 1.03            | 1.03   | 1.03   | 1.02    | 1.03 | 1.20        | 1.17   | 1.18   | 1.16    | 1.18 | 1.30           | 1.20            |
| 20SD       | 1.03            | 1.03   | 1.02   | 1.02    | 1.02 | 1.14        | 1.14   | 1.13   | 1.12    | 1.14 | 1.25           | 1.13            |
| 5SF+5MK    | 1.02            | 1.01   | 1.01   | 1.01    | 1.01 | 1.10        | 1.09   | 1.09   | 1.09    | 1.11 | 1.12           | 1.09            |
| 10SF+5MK   | 1.02            | 1.02   | 1.02   | 1.02    | 1.02 | 1.14        | 1.15   | 1.15   | 1.14    | 1.16 | 1.19           | 1.14            |
| 15SF+5MK   | 1.01            | 1.01   | 1.01   | 1.01    | 1.01 | 1.11        | 1.11   | 1.10   | 1.10    | 1.13 | 1.13           | 1.12            |
| HFK        | 1.00            | 1.00   | 1.00   | 1.00    | 1.00 | 1.00        | 1.00   | 1.00   | 1.00    | 1.00 | 1.00           | 1.00            |
| HF5SD      | 1.01            | 1.01   | 1.01   | 1.01    | 1.00 | 1.07        | 1.09   | 1.07   | 1.06    | 1.11 | 1.13           | 1.06            |
| HF10SD     | 1.02            | 1.02   | 1.02   | 1.02    | 1.02 | 1.13        | 1.13   | 1.12   | 1.11    | 1.16 | 1.17           | 1.10            |
| HF15SD     | 1.02            | 1.02   | 1.02   | 1.02    | 1.03 | 1.17        | 1.16   | 1.15   | 1.13    | 1.18 | 1.23           | 1.16            |
| HF20SD     | 1.02            | 1.02   | 1.02   | 1.02    | 1.02 | 1.12        | 1.12   | 1.11   | 1.10    | 1.14 | 1.19           | 1.12            |
| HF5SD+5MK  | 1.01            | 1.01   | 1.01   | 1.02    | 1.01 | 1.10        | 1.11   | 1.09   | 1.09    | 1.11 | 1.15           | 1.10            |
| HF10SD+5MK | 1.02            | 1.02   | 1.02   | 1.02    | 1.02 | 1.12        | 1.14   | 1.14   | 1.12    | 1.17 | 1.19           | 1.13            |
| HF15SD+5MK | 1.01            | 1.01   | 1.01   | 1.01    | 1.01 | 1.08        | 1.09   | 1.08   | 1.07    | 1.14 | 1.13           | 1.08            |

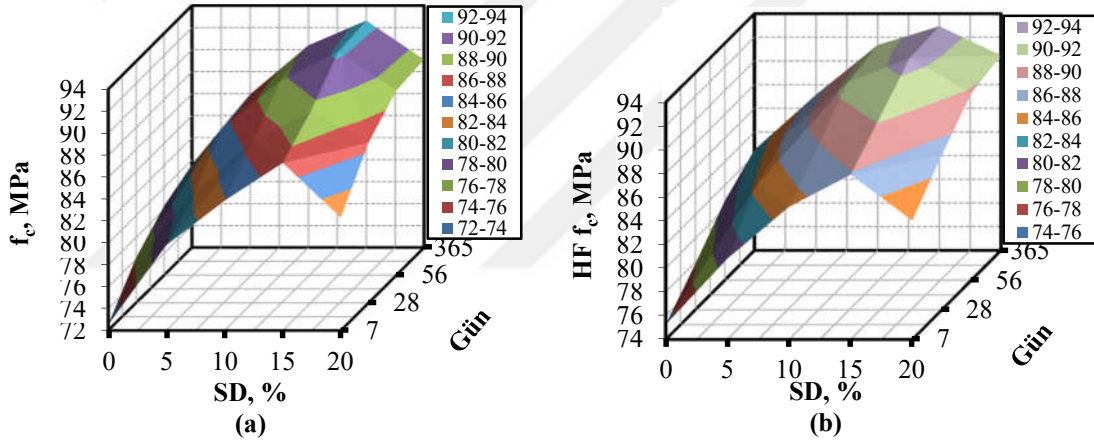
$U_{pv}$ =Ultras ses geçiş hızı,  $f_c$ = Basınç dayanımı,  $f_{st}$ = Yarmada çekme dayanımı,  $f_{fs}$ = Eğilme dayanımı



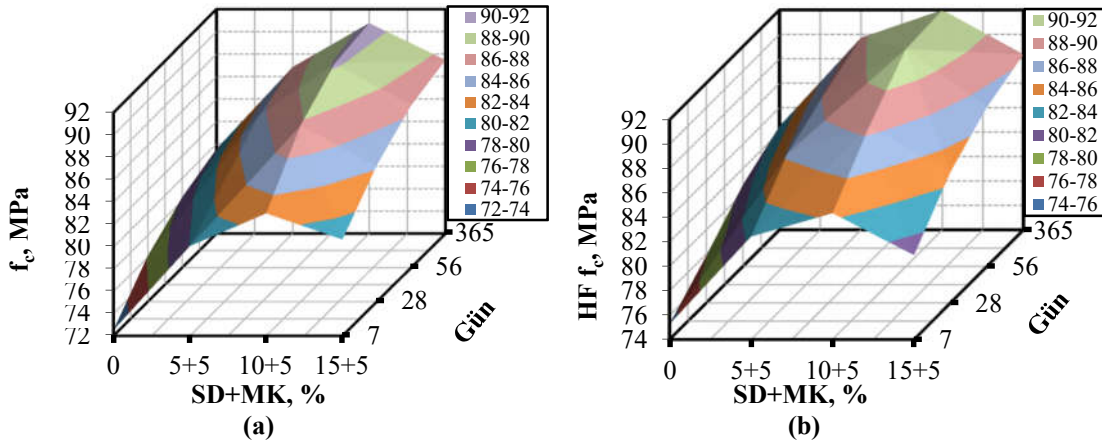
**Şekil 4.17.** Fibersiz SD ve SD+MK betonların  $f_c$  değerleri



Şekil 4.18. Hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $f_c$  değerleri



Şekil 4.19. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD betonların  $f_c$  değerlerinin üç boyutlu değişimi

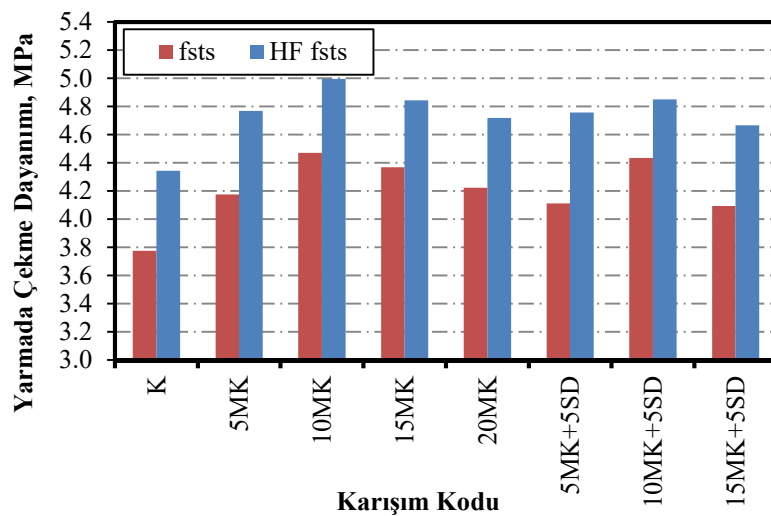


Şekil 4.20. (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD+MK betonların  $f_c$  değerlerinin üç boyutlu değişimi

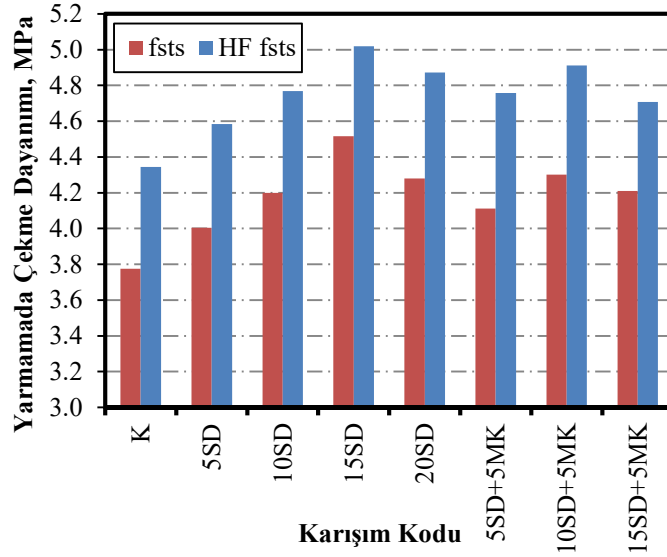
#### 4.2.4 Yarmada çekme dayanımı

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren beton karışımlarının 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri 15x15x15 cm küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Belirlenen hibrit fibersiz ve hibrit fiberli 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri çimento yerine kullanılan MK ve SD içeriğinin ağırlığına göre iki farklı grupta değerlendirilmiştir.

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5MK, 10MK, 15MK, 20MK ve 5MK5SD, 10MK5SD ve 15MK5SD) betonların 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri Şekil 4.21’de, normalize edilmiş  $f_{sts}$  değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çimento yerine kullanılan MK ve MK+SD miktarları kontrol betonuna göre  $f_{sts}$  değerlerini arttırmıştır. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece MK içeren betonlarda en yüksek  $f_{sts}$  değerleri 10MK kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK+SD içeren betonlarda en yüksek  $f_{sts}$  değerleri 10MK5SD kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fibersiz betonların 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri kontrol betonlarında 3.77 MPa, MK içeren betonlarda 4.17 MPa ile 4.47 MPa, MK+SD içeren betonlarda 4.09 MPa ile 4.44 MPa arasında değişirken, hibrit fiberli betonların 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri kontrol betonlarında 4.34 MPa, MK içeren betonlarda 4.72 MPa ile 5 MPa, MK+SD içeren betonlarda 4.67 MPa ile 4.85 MPa arasında değişmiştir. Yukarıdaki sonuçlardan beton karışımlarında çelik fiber kullanılmasının betonun çatlama sonrası davranışını olumlu yönde etkilediği söylenebilir.



Şekil 4.21. Fibersiz ve hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $f_{sts}$  değerleri



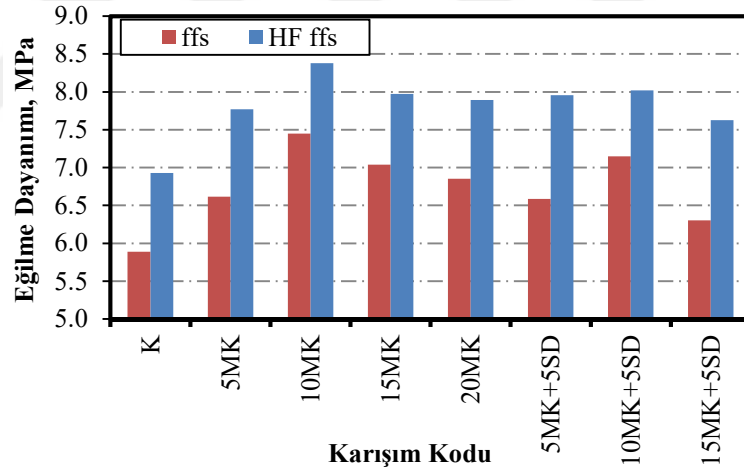
**Şekil 4.22.** Fibersiz ve hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $f_{sts}$  değerleri

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5SD, 10SD, 15SD, 20SD ve 5SD5MK, 10SD5MK ve 15SD5MK) betonların 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri Şekil 4.22’de, normalize edilmiş  $f_{sts}$  değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. Çimento yerine kullanılan SD ve SD+MK miktarları kontrol betonuna göre  $f_{sts}$  değerlerini arttırmıştır. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece SD içeren betonlarda en yüksek  $f_{sts}$  değerleri 15SD kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz SD+MK içeren betonlarda en yüksek  $f_{sts}$  değerleri 10SD5MK kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fibersiz betonların 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri kontrol betonlarında 3.77 MPa, SD içeren betonlarda 4 MPa ile 4.52 MPa, SD+MK içeren betonlarda 4.11 MPa ile 4.30 MPa arasında değişirken, hibrit fiberli betonların 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri kontrol betonlarında 3.77 MPa, SD içeren betonlarda 4 MPa ile 4.52 MPa, SD+MK içeren betonlarda 4.71 MPa ile 4.91 MPa arasında değişmiştir.

#### 4.2.5 Eğilme dayanımı

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren beton karışımlarının 56 günlük  $f_b$  değerleri 10x10x40 cm prizmatik numuneler üzerinde belirlenmiştir. Belirlenen hibrit fibersiz ve hibrit fiberli 56 günlük  $f_b$  değerleri çimento yerine kullanılan MK ve SD içeriğinin ağırlığına göre iki farklı grupta değerlendirilmiştir.

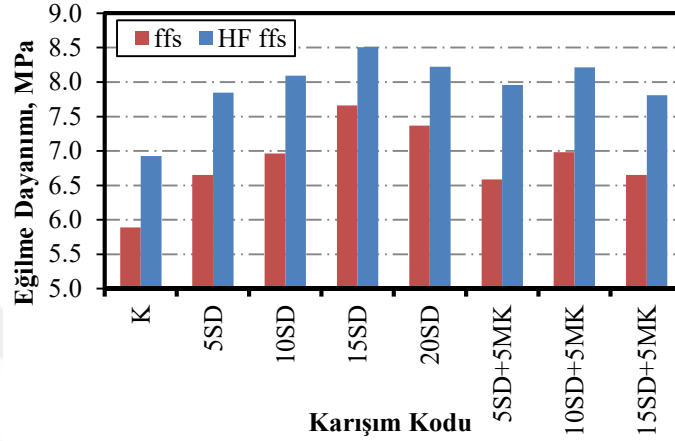
Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5MK, 10MK, 15MK, 20MK ve 5MK5SD, 10MK5SD ve 15MK5SD) betonların 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri Şekil 4.23’de, normalize edilmiş  $f_{sts}$  değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çimento yerine kullanılan MK ve MK+SD miktarları kontrol betonuna göre  $f_{fs}$  değerlerini arttırmıştır. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece MK içeren betonlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri 10MK kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK+SD içeren betonlarda ise en yüksek  $f_{fs}$  değerleri 10MK5SD kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fibersiz betonların 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri kontrol betonlarında 5.89 MPa, MK içeren betonlarda 6.62 MPa ile 7.45 MPa, MK+SD içeren betonlarda 6.30 MPa ile 7.15 MPa arasında değişirken, hibrit fiberli betonların 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri kontrol betonlarında 6.93 MPa, MK içeren betonlarda 7.77 MPa ile 8.38 MPa, MK+SD içeren betonlarda 7.63 MPa ile 8.02 MPa arasında değişmiştir. Yukarıdaki sonuçlardan beton karışımlarında kullanılan çelik fiber ilavesinin betonun çatlama sonrası davranışını olumlu yönde etkilediği söylenebilir.



**Şekil 4.23.** Fibersiz ve hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $f_{fs}$  değerleri

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5SD, 10SD, 15SD, 20SD ve 5SD5MK, 10SD5MK ve 15SD5MK) betonların 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri Şekil 4.24’de, normalize edilmiş  $f_{sts}$  değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. Çimento yerine kullanılan SD ve SD+MK miktarları kontrol betonuna göre  $f_{fs}$  değerlerini arttırmıştır. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece SD içeren betonlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri 15SD kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fiberli ve hibrit fibersiz SD+MK içeren betonlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri 10SD5MK kodlu numunelerde gözlenmiştir. Hibrit fibersiz betonların 56

günlük  $f_{fs}$  değerleri kontrol betonlarında 5.89 MPa, SD içeren betonlarda 6.65 MPa ile 7.66 MPa, SD+MK içeren betonlarda 6.59 MPa ile 6.98 MPa arasında değişirken, hibrit fiberli betonların 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri kontrol betonlarında 6.93 MPa, SD içeren betonlarda 7.85 MPa ile 8.51 MPa, SD+MK içeren betonlarda 7.81 MPa ile 8.21 MPa arasında değişmiştir.

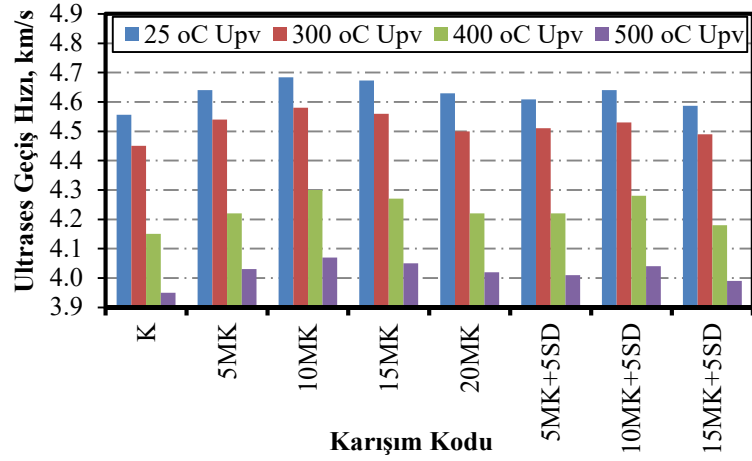


Şekil 4.24. Fibersiz ve hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $f_{fs}$  değerleri

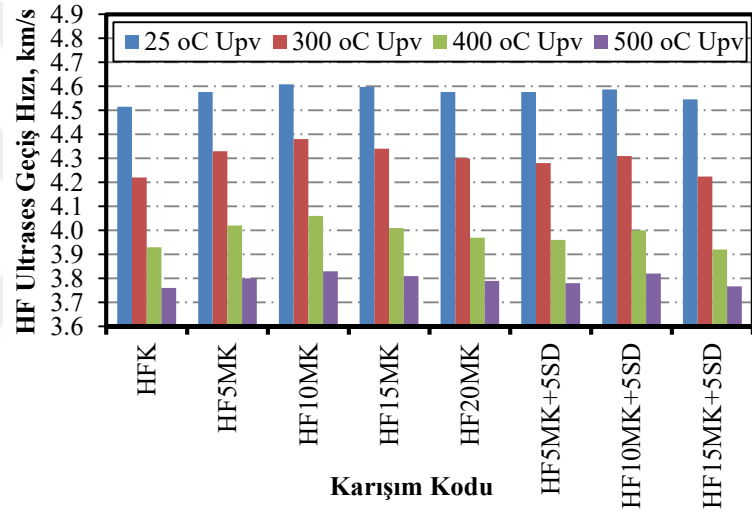
#### 4.2.6 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık

300 °C, 400 °C ve 500 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren beton karışımlarının 56 günlük  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri 10x10x10 cm küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Bu yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri çimento yerine kullanılan MK ve SD içeriğinin ağırlığına göre iki farklı grupta değerlendirilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5MK, 10MK, 15MK, 20MK ve 5MK5SD, 10MK5SD ve 15MK5SD) betonların  $U_{pv}$  Şekil 4.25 ve 4.26'da ve  $f_c$  değerleri Şekil 4.27 ve 4.28'de, normalize edilmiş  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece MK ve MK+SD içeren betonların  $U_{pv}$  Şekil 4.29'da ve  $f_c$  değerleri Şekil 4.30'da üç boyutlu olarak verilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonların maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, MK ve MK+SD içeren betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri kademeli olarak azalmıştır. Dahası kontrol betonlarının  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri ile karşılaştırıldığında çimento yerine kullanılan MK ve MK+SD içeriğinin  $U_{pv}$

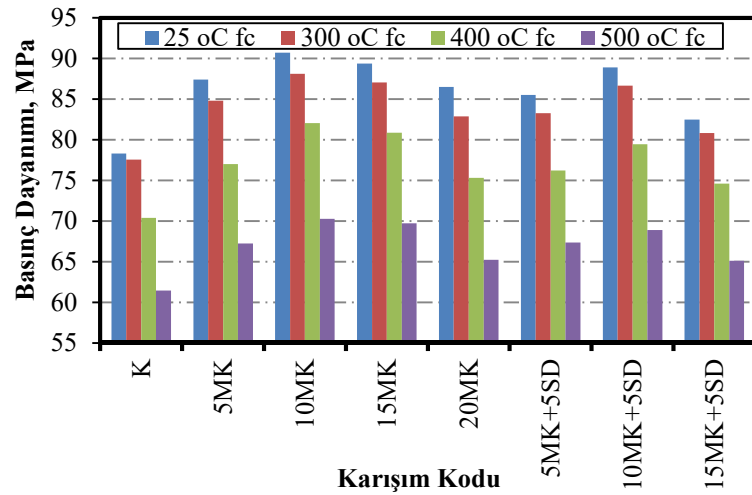
ve  $f_c$  değerlerindeki bu azalma üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemiştir. Hibrit fibersiz betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki azalma ile karşılaştırıldığında karışımlarda kullanılan hibrit fiber içeriğinin  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki azalma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu azalmanın nedeni hibrit fiberli karışımlarda kullanılan polipropilen fiberin yüksek sıcaklık etkisiyle kaybolması ve boşluk bırakması olarak gösterilebilir. 56 günlük yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerine göre, 300 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan MK ve MK+SD içeren hibrit fibersiz betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki ortalama kayıp % 2.33 ve % 2.60, hibrit fiberli betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki ortalama kayıp % 6.01 ve % 9.2 olmuştur. Bu sıcaklıkta fibersiz betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri çok az düşerken, hibrit fiberli betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri daha fazla düşmüştür. Ayrıca bu sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonlarda kılcal çatlaklar ve renk değişimleri gözlenmemiştir. 400 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan MK ve MK+SD içeren hibrit fibersiz betonlarda  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki ortalama kayıp sırasıyla % 8.59 ve % 10.63 iken, hibrit fiberli betonlarda  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki ortalama kayıp sırasıyla % 12.89 ve % 17.17 olmuştur. Bu sıcaklığa maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonlarda çok küçük kılcal çatlaklar ve renk değişimleri gözlenmiştir. 500 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan MK ve MK+SD içeren hibrit fibersiz betonlarda  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki ortalama kayıp sırasıyla % 13.12 ve % 22.32 iken, hibrit fiberli betonlarda  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki ortalama kayıp sırasıyla %17.02 ve %28.31 olmuştur. Bu sıcaklığa maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonlarda Fotoğraf 3.12’de görüldüğü gibi özellikle hibrit fiberli betonların bazılarında yüksek sıcaklıktan dolayı parçalanma ve parçalanmayan numunelerde daha çok çatlak ve daha çok renk değişimi ve ekstra gözenekler gözlenmiştir. Bu sıcaklığa maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerinde diğer sıcaklıklara göre daha fazla düşüş gözlenmiştir. Bu sıcaklıkta  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerinin daha fazla düşüş göstermesinin nedeni  $Ca(OH)_2$  bileşeninin bu sıcaklıkta bozulmasından kaynaklanmaktadır. Bu sıcaklığa maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz beton numunelerinin yüksek sıcaklık fırınının içerisinde parçalanmasının nedenlerinden bazıları  $Ca(OH)_2$  bileşeninin su ve kireç olarak bozulması, agregaların genişlemesi, iç boşluk basıncı ve sıkışmış su basıncıdır Kou vd. (2014); Horszczaruk vd. (2017) ve Behnood vd. (2009). Dahası gerilme enerjisinin termal enerji olarak birikmesi yüksek sıcaklıklarda yüksek seviyelerdedir. Bu enerjide patlamalara neden olabilir.



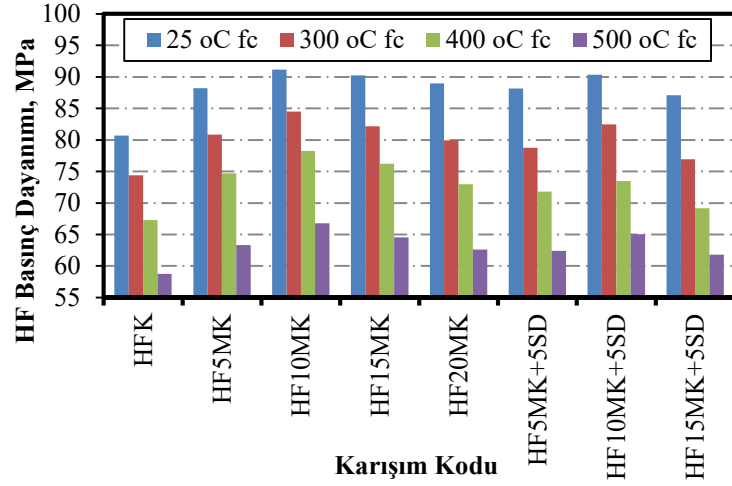
Şekil 4.25. Sıcaklık etkisi altında fibersiz MK ve MK+SD betonların  $U_{pv}$  değerleri



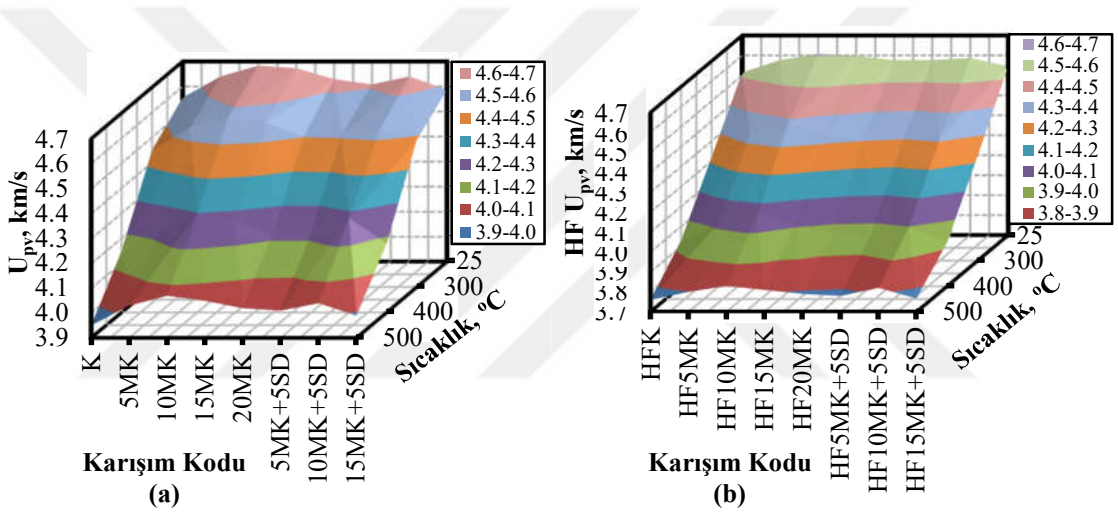
Şekil 4.26. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $U_{pv}$  değerleri



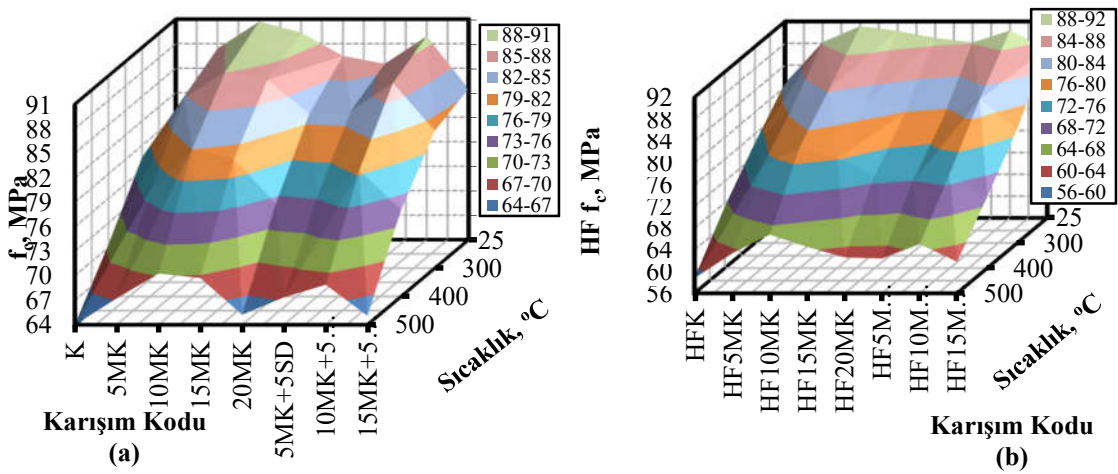
Şekil 4.27. Sıcaklık etkisi altında fibersiz MK ve MK+SD serisi betonların  $f_c$  değerleri



Şekil 4.28. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $f_c$  değerleri

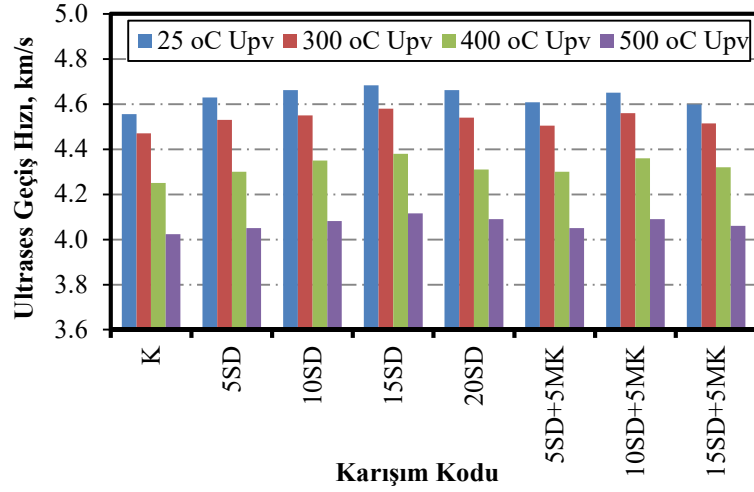


Şekil 4.29. Yüksek ısıda (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $U_{pv}$  değerlerinin üç boyutlu değişimi

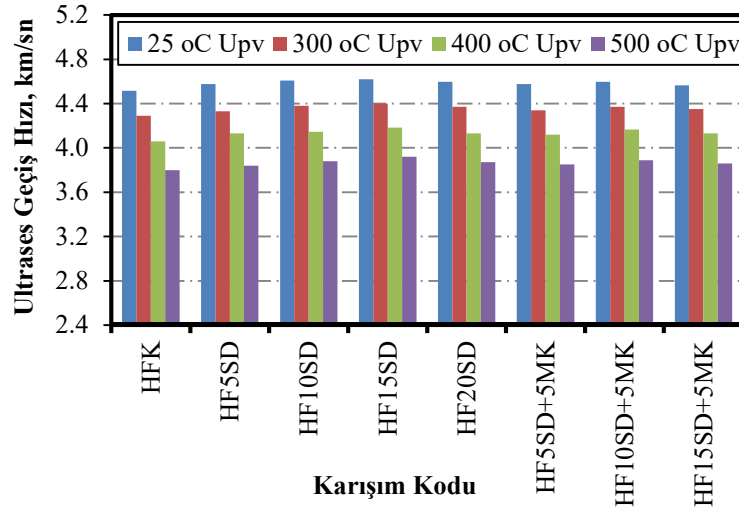


Şekil 4.30. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $f_c$  değerlerinin üç boyutlu değişimi

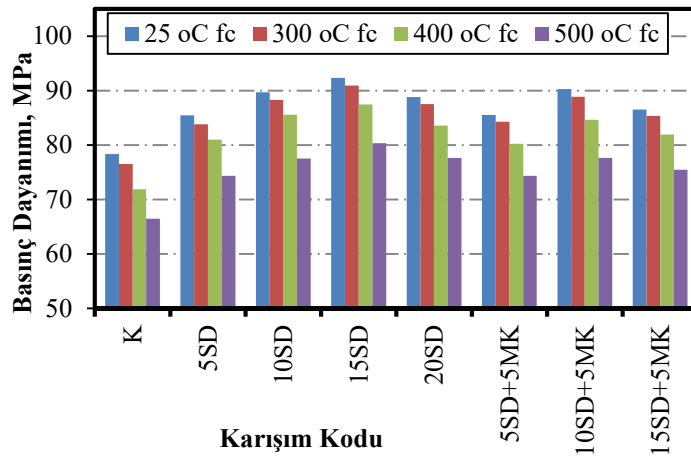
Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5SD, 10SD, 15SD, 20SD ve 5SD5MK, 10SD5MK ve 15SD5MK) betonların  $U_{pv}$  Şekil 4.31 ve 4.32’de ve  $f_c$  değerleri Şekil 4.33 ve 4.34’de, normalize edilmiş  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz sadece SD ve SD+MK içeren betonların  $U_{pv}$  Şekil 4.35’de ve  $f_c$  değerleri Şekil 4.36’da üç boyutlu olarak verilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonların maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, SD ve SD+MK içeren betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri kademeli olarak azalmıştır. Dahası kontrol betonlarının  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri ile karşılaştırıldığında çimento yerine kullanılan SD ve SD+MK içeriğinin  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki bu azalma üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemiştir. Hibrit fibersiz betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki azalma ile karşılaştırıldığında karışımlarda kullanılan hibrit fiber içeriğinin  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki azalma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu azalmanın nedeni hibrit fiberli karışımlarda kullanılan polipropilen fiberin yüksek sıcaklık etkisiyle kaybolması ve boşluk bırakması olarak gösterilebilir. 300 °C, 400 °C ve 500 °C yüksek sıcaklıklara maruz kalan hibrit fibersiz kontrol betonlarının  $f_c$  değerleri ortalama olarak sırasıyla %2.26, 8.22 ve 15.16, SD dumanı içeren betonların  $f_c$  değerleri ortalama sırasıyla %1.64, 5.27 ve 13.03 ve SD+MK içeren betonların  $f_c$  değerleri ortalama olarak sırasıyla %1.46, 5.90 ve 13.27 azalmıştır. Benzer şekilde 300 °C, 400 °C ve 500 °C yüksek sıcaklıklara maruz kalan hibrit fiberli kontrol betonlarının  $f_c$  değerleri ortalama olarak sırasıyla %6.06, 10.39 ve 18.50, SD dumanı içeren betonların  $f_c$  değerleri ortalama sırasıyla %3.36, 7.20 ve 14.30 ve SD+MK içeren betonların  $f_c$  değerleri ortalama olarak sırasıyla %3.73, 8.27 ve 14.84 azalmıştır. 300 °C sıcaklıkta fibersiz betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri çok az düşerken, hibrit fiberli betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri daha fazla düştüğü görülmüştür. Ayrıca bu sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonlarda kılcal çatlaklar ve renk değişimleri gözlenmemiştir. 500 °C sıcaklığa maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonlarda Fotoğraf 3.13’de görüldüğü gibi özellikle hibrit fiberli betonların bazılarında yüksek sıcaklıktan dolayı parçalanma ve parçalanmayan numunelerde daha çok çatlak ve daha çok renk değişimi ve ekstra gözenekler gözlenmiştir. Bu sıcaklığa maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerinde diğer sıcaklıklara göre daha fazla düşüş gözlenmiştir. Bu sıcaklıkta  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerinin daha fazla düşüş göstermesinin ve numunelerdeki parçalanmanın nedeni yukarıda MK ve MK+SD içeren karışımlarda bahsedilen sebeplerle benzerlik göstermektedir.



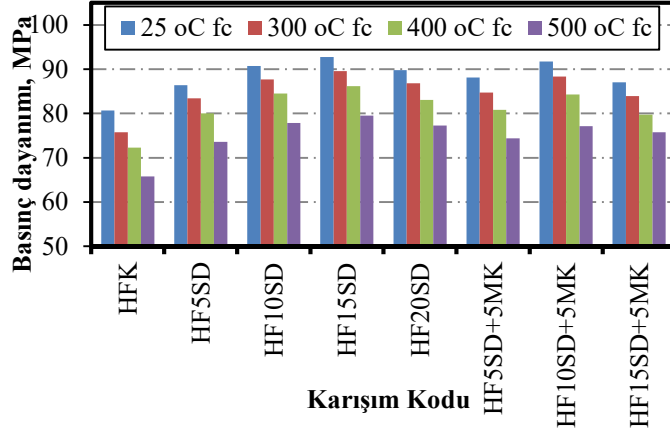
Şekil 4.31. Sıcaklık etkisi altında fibersiz SD ve SD+MK betonların  $U_{pv}$  değerleri



Şekil 4.32. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $U_{pv}$  değerleri



Şekil 4.33. Sıcaklık etkisi altında fibersiz SD ve SD+MK betonların  $f_c$  değerleri

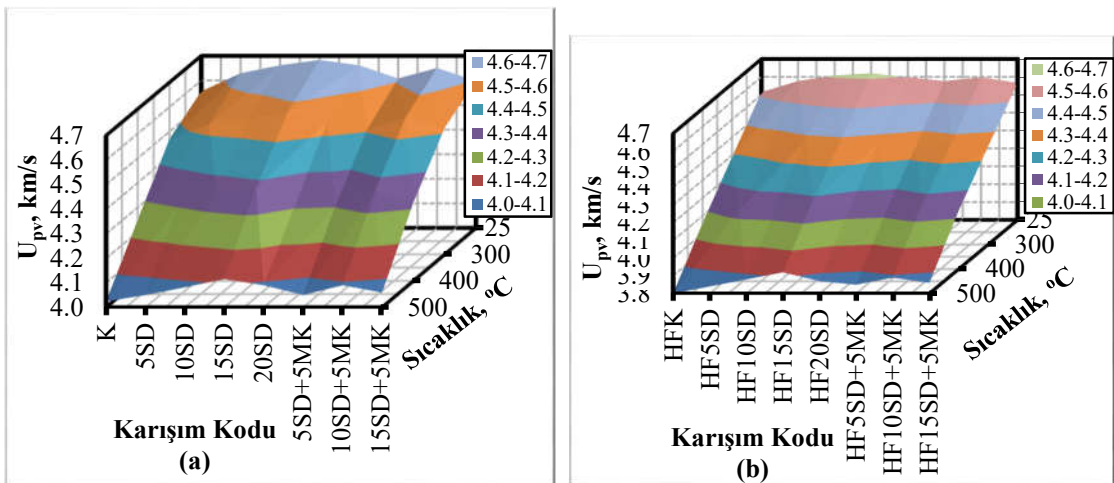


Şekil 4.34. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $f_c$  değerleri

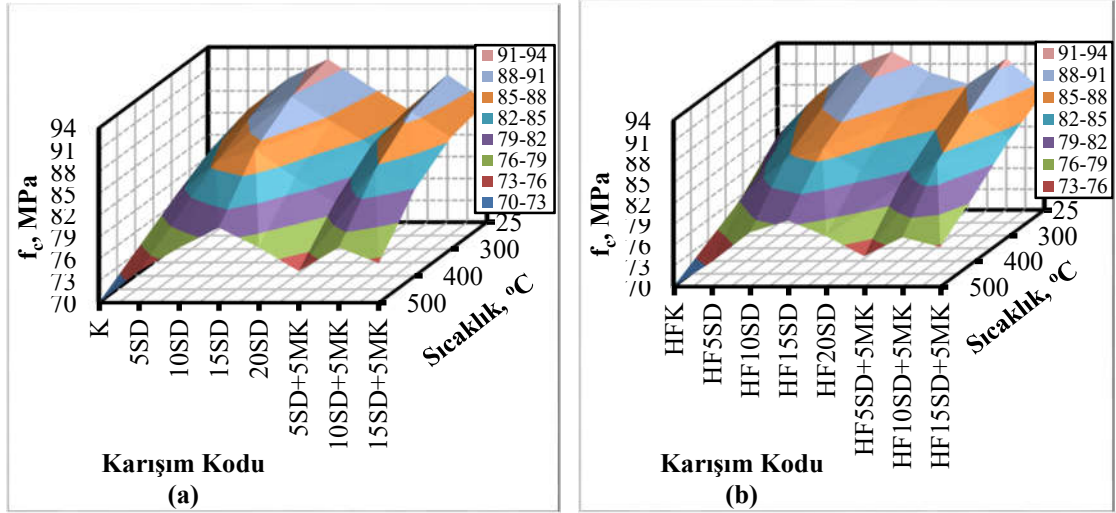
Çizelge 4.4. MK ve MK+SD içeren betonların normalize edilmiş  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri

| Karışımlar | $U_{pv}$ (km/s) |        |        |        | $f_c$ (MPa) |        |        |        |
|------------|-----------------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|
|            | 25 °C           | 300 °C | 400 °C | 500 °C | 25 °C       | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
| K          | 1.00            | 0.98   | 0.91   | 0.87   | 1.00        | 0.99   | 0.90   | 0.78   |
| 5MK        | 1.00            | 0.98   | 0.91   | 0.87   | 1.00        | 0.97   | 0.88   | 0.77   |
| 10MK       | 1.00            | 0.98   | 0.92   | 0.87   | 1.00        | 0.97   | 0.90   | 0.77   |
| 15MK       | 1.00            | 0.98   | 0.91   | 0.87   | 1.00        | 0.97   | 0.90   | 0.78   |
| 20MK       | 1.00            | 0.97   | 0.91   | 0.87   | 1.00        | 0.96   | 0.87   | 0.75   |
| HFK        | 1.00            | 0.93   | 0.87   | 0.83   | 1.00        | 0.92   | 0.83   | 0.73   |
| HF5MK      | 1.00            | 0.95   | 0.88   | 0.83   | 1.00        | 0.92   | 0.85   | 0.72   |
| HF10MK     | 1.00            | 0.95   | 0.88   | 0.83   | 1.00        | 0.93   | 0.86   | 0.73   |
| HF15MK     | 1.00            | 0.94   | 0.87   | 0.83   | 1.00        | 0.91   | 0.84   | 0.72   |
| HF20MK     | 1.00            | 0.94   | 0.87   | 0.83   | 1.00        | 0.90   | 0.82   | 0.70   |
| 5MK+5SD    | 1.00            | 0.98   | 0.92   | 0.87   | 1.00        | 0.97   | 0.89   | 0.79   |
| 10MK+5SD   | 1.00            | 0.98   | 0.92   | 0.87   | 1.00        | 0.97   | 0.89   | 0.78   |
| 15MK+5SD   | 1.00            | 0.98   | 0.91   | 0.87   | 1.00        | 0.98   | 0.90   | 0.79   |
| HF5MK+5SD  | 1.00            | 0.94   | 0.87   | 0.83   | 1.00        | 0.89   | 0.81   | 0.71   |
| HF10MK+5SD | 1.00            | 0.94   | 0.87   | 0.83   | 1.00        | 0.91   | 0.81   | 0.72   |
| HF15MK+5SD | 1.00            | 0.93   | 0.86   | 0.83   | 1.00        | 0.88   | 0.79   | 0.71   |

$U_{pv}$ =Ultras ses geçiş hızı,  $f_c$ = Basınç dayanımı



Şekil 4.35. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $U_{pv}$  değerlerinin üç boyutlu değişimi



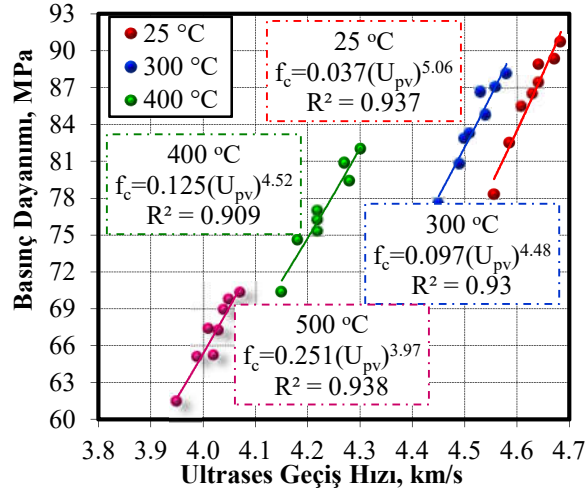
Şekil 4.36. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan (a) fibersiz ve (b) hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $f_c$  değerlerinin üç boyutlu değişimi

Çizelge 4.5. SD ve SD+MK içeren betonların normalize edilmiş  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri

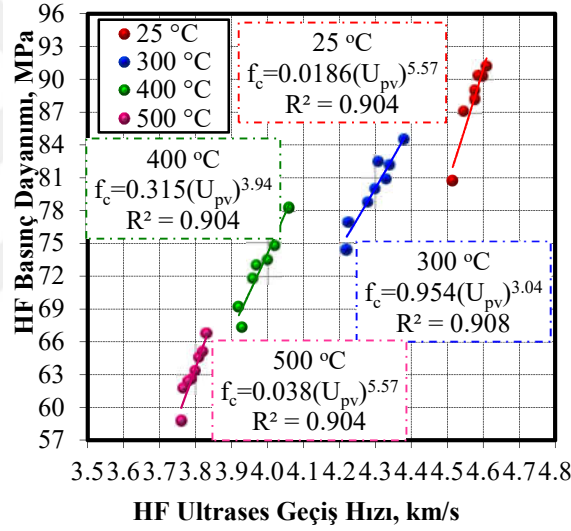
| Karışımlar | $U_{pv}$ (km/s) |        |        |        | $f_c$ (MPa) |        |        |        |
|------------|-----------------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|
|            | 25 °C           | 300 °C | 400 °C | 500 °C | 25 °C       | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
| K          | 1.00            | 0.98   | 0.93   | 0.88   | 1.00        | 0.98   | 0.92   | 0.85   |
| 5SD        | 1.00            | 0.98   | 0.93   | 0.87   | 1.00        | 0.98   | 0.95   | 0.87   |
| 10SD       | 1.00            | 0.98   | 0.93   | 0.88   | 1.00        | 0.98   | 0.95   | 0.86   |
| 15SD       | 1.00            | 0.98   | 0.94   | 0.88   | 1.00        | 0.98   | 0.95   | 0.87   |
| 20SD       | 1.00            | 0.97   | 0.92   | 0.88   | 1.00        | 0.99   | 0.94   | 0.87   |
| 5SF+5MK    | 1.00            | 0.98   | 0.93   | 0.88   | 1.00        | 0.99   | 0.94   | 0.87   |
| 10SF+5MK   | 1.00            | 0.98   | 0.94   | 0.88   | 1.00        | 0.98   | 0.94   | 0.86   |
| 15SF+5MK   | 1.00            | 0.98   | 0.94   | 0.88   | 1.00        | 0.99   | 0.95   | 0.87   |
| HFK        | 1.00            | 0.95   | 0.90   | 0.84   | 1.00        | 0.94   | 0.90   | 0.81   |
| HF5SD      | 1.00            | 0.95   | 0.90   | 0.84   | 1.00        | 0.97   | 0.93   | 0.85   |
| HF10SD     | 1.00            | 0.95   | 0.90   | 0.84   | 1.00        | 0.97   | 0.93   | 0.86   |
| HF15SD     | 1.00            | 0.95   | 0.91   | 0.85   | 1.00        | 0.97   | 0.93   | 0.86   |
| HF20SD     | 1.00            | 0.95   | 0.90   | 0.84   | 1.00        | 0.97   | 0.93   | 0.86   |
| HF5SD+5MK  | 1.00            | 0.95   | 0.90   | 0.84   | 1.00        | 0.96   | 0.92   | 0.84   |
| HF10SD+5MK | 1.00            | 0.95   | 0.91   | 0.85   | 1.00        | 0.96   | 0.92   | 0.84   |
| HF15SD+5MK | 1.00            | 0.95   | 0.90   | 0.85   | 1.00        | 0.96   | 0.92   | 0.87   |

$U_{pv}$ =Ultras ses geçiş hızı,  $f_c$ = Basınç dayanımı

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli MK ve MK+SD içeren betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.37 ve 4.38’de verilmiştir.  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişkiler beton numunelerin maruz kaldığı sıcaklık değeri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu ilişkilerden  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasından yüksek bir korelasyonun olduğu gözlenmiştir. Bu durumda şekiller üzerinde verilen  $R^2$  değerleri göstermektedir.

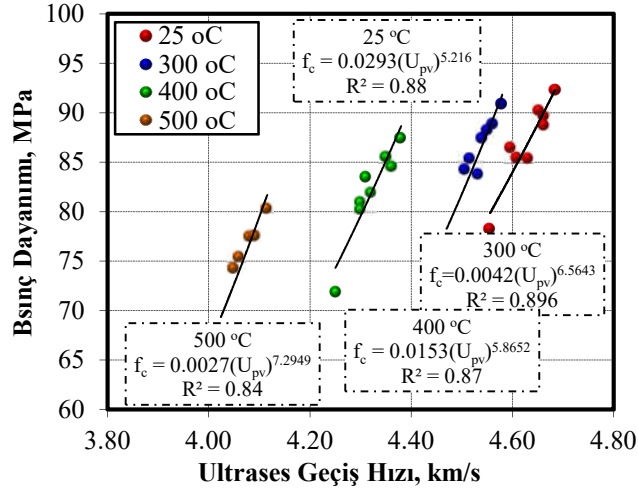


Şekil 4.37. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan fibersiz MK ve MK+SD betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki

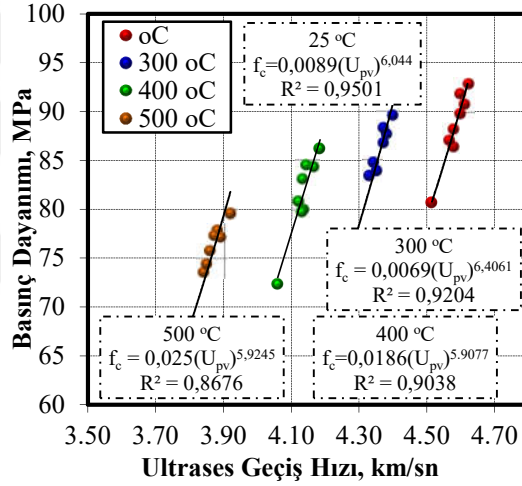


Şekil 4.38. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli SD ve SD+MK içeren betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.39 ve 4.40'da verilmiştir.  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişkiler beton numunelerin maruz kaldığı sıcaklık değeri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu ilişkilerden  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasında yüksek bir korelasyonun olduğu gözlenmiştir. Bu durumda şekiller üzerinde verilen  $R^2$  değerleri göstermektedir.



**Şekil 4.39.** Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan fibersiz SD ve SD+MK betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki

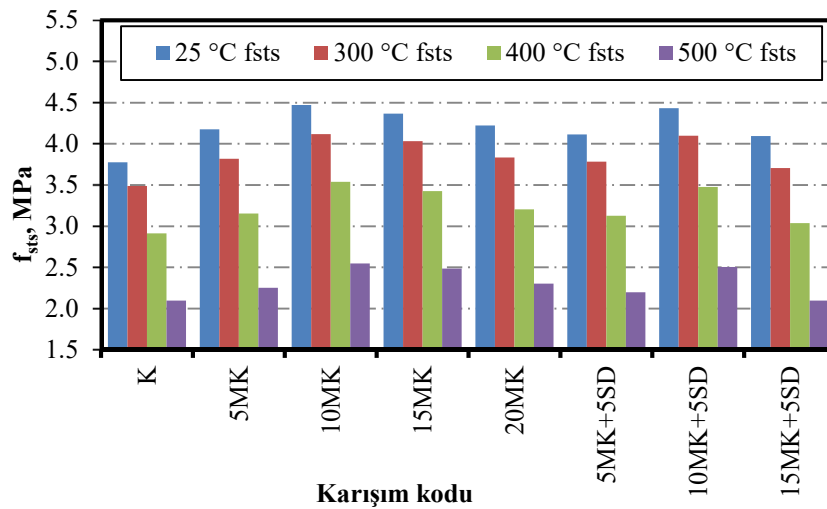


**Şekil 4.40.** Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki

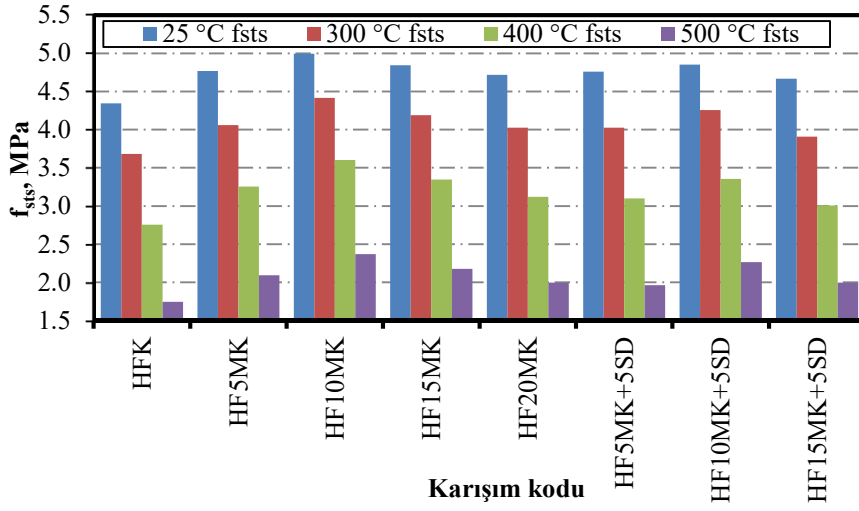
300 °C, 400 °C ve 500 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren beton karışımlarının 56 günlük  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri 15x15x15 cm küp ve 10x10x40 cm prizma numuneler üzerinde belirlenmiştir. Bu yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri çimento yerine kullanılan MK ve SD içeriğinin ağırlığına göre iki farklı grupta değerlendirilmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5MK, 10MK,

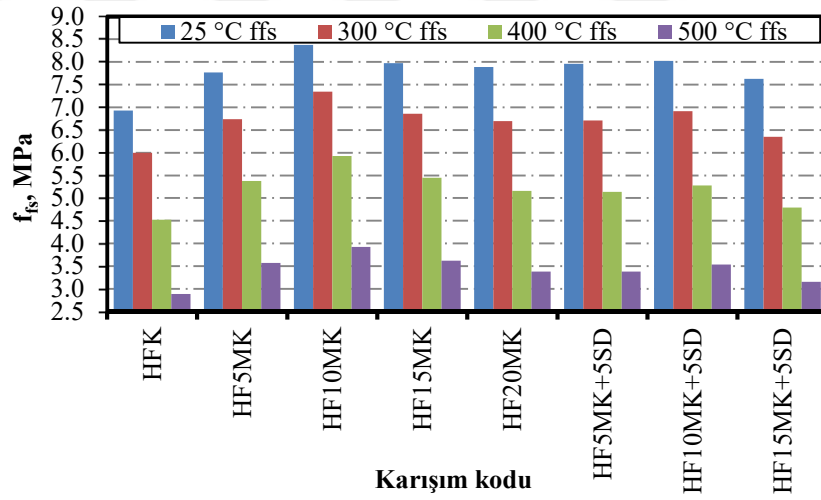
15MK, 20MK ve 5MK5SD, 10MK5SD ve 15MK5SD) betonların  $f_{sts}$  değerleri Şekil 4.41 ve 4.42’de ve  $f_{fs}$  değerleri Şekil 4.43 ve 4.44’de, normalize edilmiş  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonların maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, MK ve MK+SD içeren betonların  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri kademeli olarak azalmıştır. Dahası kontrol betonlarının  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri ile karşılaştırıldığında çimento yerine kullanılan MK ve MK+SD içeriğinin  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki bu azalma üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemiştir. Hibrit fibersiz betonların  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki azalma ile karşılaştırıldığında karışımlarda kullanılan hibrit fiber içeriğinin  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki azalma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu azalmanın nedeni hibrit fiberli karışımlarda kullanılan polipropilen fiberin yüksek sıcaklık etkisiyle kaybolması ve boşluk bırakması olarak gösterilebilir. 56 günlük yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonların  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerine göre, 300 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan MK ve MK+SD içeren hibrit fibersiz betonların  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki ortalama kayıp % 8.25 ve % 6.93, hibrit fiberli betonların  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki ortalama kayıp % 14.20 ve % 14.27 olmuştur. 400 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan MK ve MK+SD içeren hibrit fibersiz betonlarda  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki ortalama kayıp sırasıyla % 23.15 ve % 19.08 iken, hibrit fiberli betonlarda  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki ortalama kayıp sırasıyla % 32.75 ve % 33.49 olmuştur. 500 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan MK ve MK+SD içeren hibrit fibersiz betonlarda  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki ortalama kayıp sırasıyla % 45.13 ve % 41.48 iken, hibrit fiberli betonlarda  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki ortalama kayıp sırasıyla %56.30 ve %56.17 olmuştur.



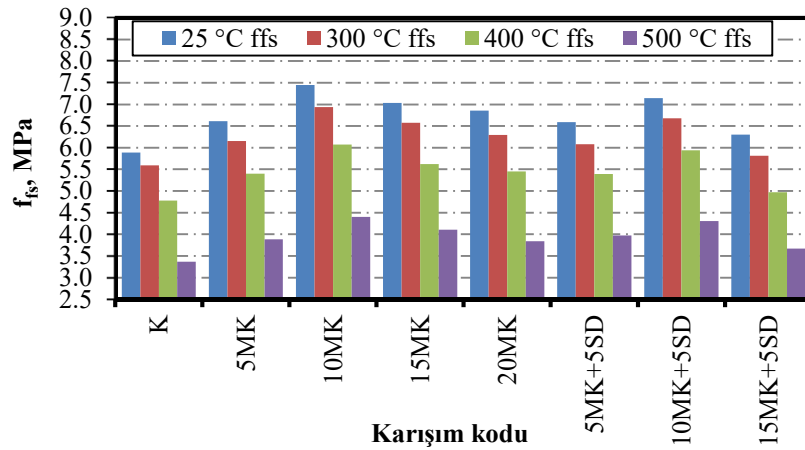
Şekil 4.41. Sıcaklık etkisi altında fibersiz MK ve MK+SD betonların  $f_{sts}$  değerleri



Şekil 4.42. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $f_{sts}$  değerleri



Şekil 4.43. Sıcaklık etkisi altında fibersiz MK ve MK+SD betonların  $f_{fs}$  değerleri



Şekil 4.44. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli MK ve MK+SD betonların  $f_{fs}$  değerleri

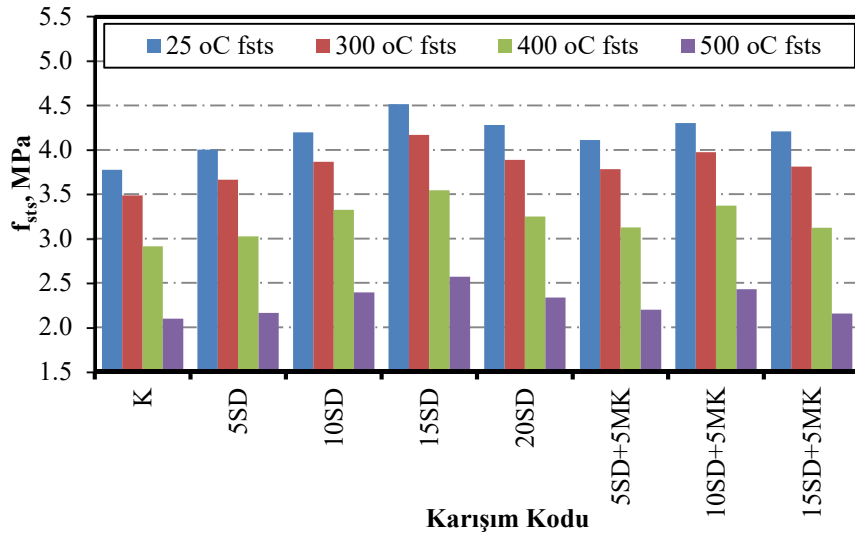
**Çizelge 4.6.** MK ve MK+SD içeren betonların normalize edilmiş  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri

| Karışımlar | $f_{sts}$ (MPa) |        |        |        | $f_{fs}$ (MPa) |        |        |        |
|------------|-----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
|            | 25 °C           | 300 °C | 400 °C | 500 °C | 25 °C          | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
| K          | 1.00            | 0.92   | 0.77   | 0.55   | 1.00           | 0.95   | 0.81   | 0.57   |
| 5MK        | 1.00            | 0.92   | 0.76   | 0.54   | 1.00           | 0.93   | 0.82   | 0.59   |
| 10MK       | 1.00            | 0.92   | 0.79   | 0.57   | 1.00           | 0.93   | 0.81   | 0.59   |
| 15MK       | 1.00            | 0.92   | 0.78   | 0.57   | 1.00           | 0.93   | 0.80   | 0.58   |
| 20MK       | 1.00            | 0.91   | 0.76   | 0.55   | 1.00           | 0.92   | 0.80   | 0.56   |
| HFK        | 1.00            | 0.85   | 0.63   | 0.40   | 1.00           | 0.87   | 0.65   | 0.42   |
| HF5MK      | 1.00            | 0.85   | 0.68   | 0.44   | 1.00           | 0.87   | 0.69   | 0.46   |
| HF10MK     | 1.00            | 0.88   | 0.72   | 0.47   | 1.00           | 0.88   | 0.71   | 0.47   |
| HF15MK     | 1.00            | 0.87   | 0.69   | 0.45   | 1.00           | 0.86   | 0.68   | 0.45   |
| HF20MK     | 1.00            | 0.85   | 0.66   | 0.42   | 1.00           | 0.85   | 0.65   | 0.43   |
| 5MK+5SD    | 1.00            | 0.92   | 0.76   | 0.53   | 1.00           | 0.92   | 0.82   | 0.60   |
| 10MK+5SD   | 1.00            | 0.92   | 0.78   | 0.56   | 1.00           | 0.93   | 0.83   | 0.60   |
| 15MK+5SD   | 1.00            | 0.91   | 0.74   | 0.51   | 1.00           | 0.92   | 0.79   | 0.58   |
| HF5MK+5SD  | 1.00            | 0.85   | 0.65   | 0.41   | 1.00           | 0.84   | 0.65   | 0.42   |
| HF10MK+5SD | 1.00            | 0.88   | 0.69   | 0.47   | 1.00           | 0.86   | 0.66   | 0.44   |
| HF15MK+5SD | 1.00            | 0.84   | 0.64   | 0.43   | 1.00           | 0.83   | 0.63   | 0.41   |

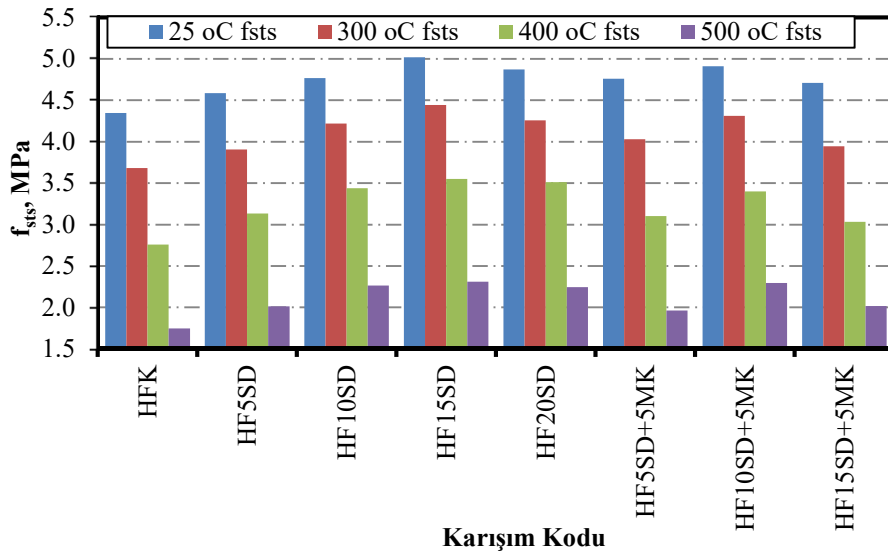
$f_{sts}$ = Yarmada çekme dayanımı,  $f_{fs}$ = Eğilme dayanımı

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen ve çimento yerine kullanılan SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen (5SD, 10SD, 15SD, 20SD ve 5SD5MK, 10SD5MK ve 15SD5MK) betonların  $f_{sts}$  değerleri Şekil 4.45 ve 4.46'da ve  $f_{fs}$  değerleri Şekil 4.47 ve 4.48'de, normalize edilmiş  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonların maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, SD ve SD+MK içeren betonların  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri kademeli olarak azalmıştır. Dahası kontrol betonlarının  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri ile karşılaştırıldığında çimento yerine kullanılan SD ve SD+MK içeriğinin  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki bu azalma üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemiştir. Hibrit fibersiz betonların  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki azalma ile karşılaştırıldığında karışımlarda kullanılan hibrit fiber içeriğinin  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerlerindeki azalma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu azalmanın nedeni hibrit fiberli karışımlarda kullanılan polipropilen fiberin yüksek sıcaklık etkisiyle kaybolması ve boşluk bırakması olarak gösterilebilir. 56 günlük yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan hibrit fibersiz betonların  $f_{sts}$  değerlerine göre, 300 °C, 400 °C ve 500 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fibersiz betonların  $f_{sts}$  değerleri ortalama olarak sırasıyla %8.25, 23.15 ve 43.13 azalırken, hibrit fiberli betonların  $f_{sts}$  değerleri ortalama olarak sırasıyla %13.70, 31.81 ve 55.70 azalmıştır. Benzer şekilde, 56 günlük yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan hibrit fibersiz

betonların  $f_{ts}$  değerlerine göre, 300 °C, 400 °C ve 500 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan hibrit fibersiz betonların  $f_{ts}$  değerleri ortalama olarak sırasıyla %6.93, 19.08 ve 41.48 azalırken, hibrit fiberli betonların  $f_{ts}$  değerleri ortalama olarak sırasıyla %14.27, 33.49 ve 56.17 azalmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinden dolayı polipropilen fiberin kaybolması,  $Ca(OH)_2$  ve C-S-H jelinin bozulması ve çatlak ve gözenek sayılarındaki artış yukarıda bahsedilen mekanik özelliklerin azalmasına neden olduğu Behnood ve Ghandehari (2009), Yermak vd. (2017) ve Bilodeau vd. (2004) tarafından yapılan çalışmalarda belirtilmiştir.



Şekil 4.45. Sıcaklık etkisi altında fibersiz SD ve SD+MK betonların  $f_{sts}$  değerleri

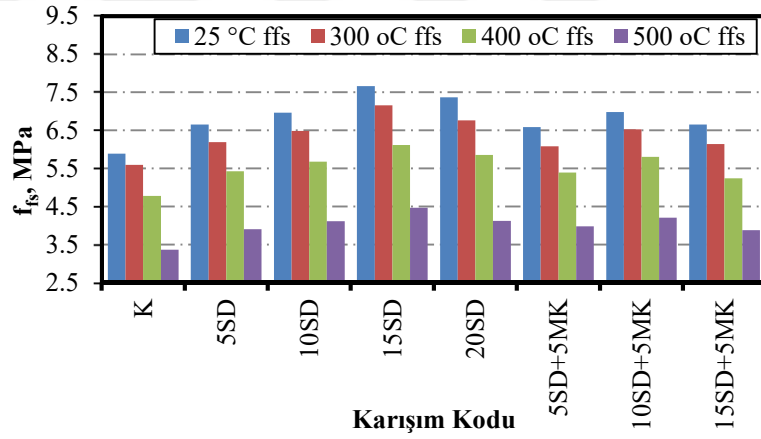


Şekil 4.46. Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $f_{sts}$  değerleri

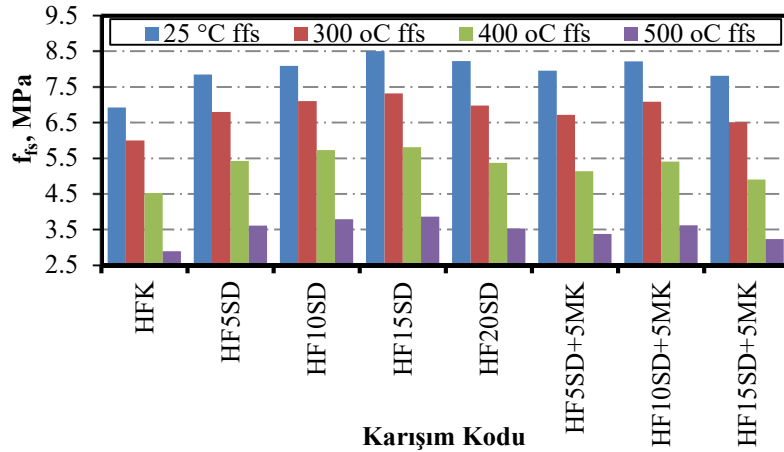
**Çizelge 4.7.** SD ve SD+MK içeren betonların normalize edilmiş  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri

| Karışımlar | $f_{sts}$ (MPa) |        |        |        | $f_{fs}$ (MPa) |        |        |        |
|------------|-----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
|            | 25 °C           | 300 °C | 400 °C | 500 °C | 25 °C          | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
| K          | 1.00            | 0.92   | 0.77   | 0.55   | 1.00           | 0.95   | 0.81   | 0.57   |
| 5SD        | 1.00            | 0.92   | 0.76   | 0.54   | 1.00           | 0.93   | 0.82   | 0.59   |
| 10SD       | 1.00            | 0.92   | 0.79   | 0.57   | 1.00           | 0.93   | 0.81   | 0.59   |
| 15SD       | 1.00            | 0.92   | 0.78   | 0.57   | 1.00           | 0.93   | 0.80   | 0.58   |
| 20SD       | 1.00            | 0.91   | 0.76   | 0.55   | 1.00           | 0.92   | 0.80   | 0.56   |
| 5SF+5MK    | 1.00            | 0.92   | 0.76   | 0.53   | 1.00           | 0.92   | 0.82   | 0.60   |
| 10SF+5MK   | 1.00            | 0.92   | 0.78   | 0.56   | 1.00           | 0.93   | 0.83   | 0.60   |
| 15SF+5MK   | 1.00            | 0.91   | 0.74   | 0.51   | 1.00           | 0.92   | 0.79   | 0.58   |
| HFK        | 1.00            | 0.85   | 0.63   | 0.40   | 1.00           | 0.87   | 0.65   | 0.42   |
| HF5SD      | 1.00            | 0.85   | 0.68   | 0.44   | 1.00           | 0.87   | 0.69   | 0.46   |
| HF10SD     | 1.00            | 0.88   | 0.72   | 0.47   | 1.00           | 0.88   | 0.71   | 0.47   |
| HF15SD     | 1.00            | 0.89   | 0.71   | 0.46   | 1.00           | 0.86   | 0.68   | 0.45   |
| HF20SD     | 1.00            | 0.87   | 0.72   | 0.46   | 1.00           | 0.85   | 0.65   | 0.43   |
| HF5SD+5MK  | 1.00            | 0.85   | 0.65   | 0.41   | 1.00           | 0.84   | 0.65   | 0.42   |
| HF10SD+5MK | 1.00            | 0.88   | 0.69   | 0.47   | 1.00           | 0.86   | 0.66   | 0.44   |
| HF15SD+5MK | 1.00            | 0.84   | 0.64   | 0.43   | 1.00           | 0.83   | 0.63   | 0.41   |

$f_{sts}$ = Yarmada çekme dayanımı,  $f_{fs}$ = Eğilme dayanımı



**Şekil 4.47.** Sıcaklık etkisi altında fibersiz SD ve SD+MK betonların  $f_{fs}$  değerleri



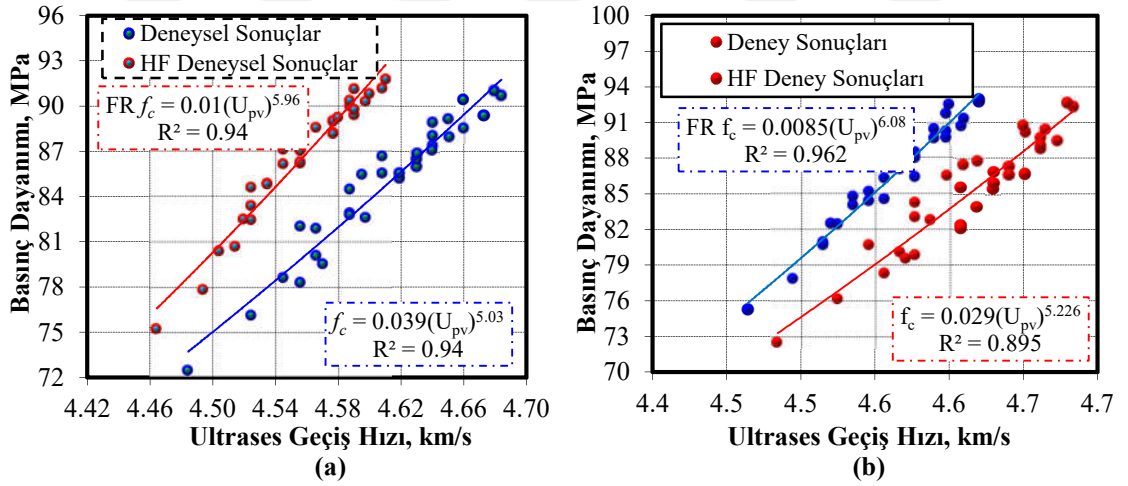
**Şekil 4.48.** Sıcaklık etkisi altında hibrit fiberli SD ve SD+MK betonların  $f_{fs}$  değerleri

### 4.3 Sertleşmiş Beton Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Değerlendirilmesi

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri arasındaki ilişkiler başlıklar altında incelenmiştir.

#### 4.3.1 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren betonların 7, 28, 56 ve 365 günlük 10x10x10 cm küp numunelerin  $f_c$  değerleri ile bu numuneler üzerinde ölçümler sonucu hesaplanan  $U_{pv}$  değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.49'daki gibi elde edilmiştir. Şekil 4.49a'da MK ve MK+SD serisi hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $U_{pv}$  ve  $f_{fs}$  değerleri arasındaki ilişki ve Şekil 4.49b'de ise SD ve SD+MK serisi hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $U_{pv}$  ve  $f_{fs}$  değerleri arasındaki ilişki görülmektedir. Her iki seri betonlar için de hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $f_c$  ile  $U_{pv}$  değerleri arasında yüksek bir korelasyon ilişkisi gözlenmiştir. Bu yüksek korelasyon ilişkisini de şekiller üzerinde verilen  $R^2$  değerleri göstermektedir.

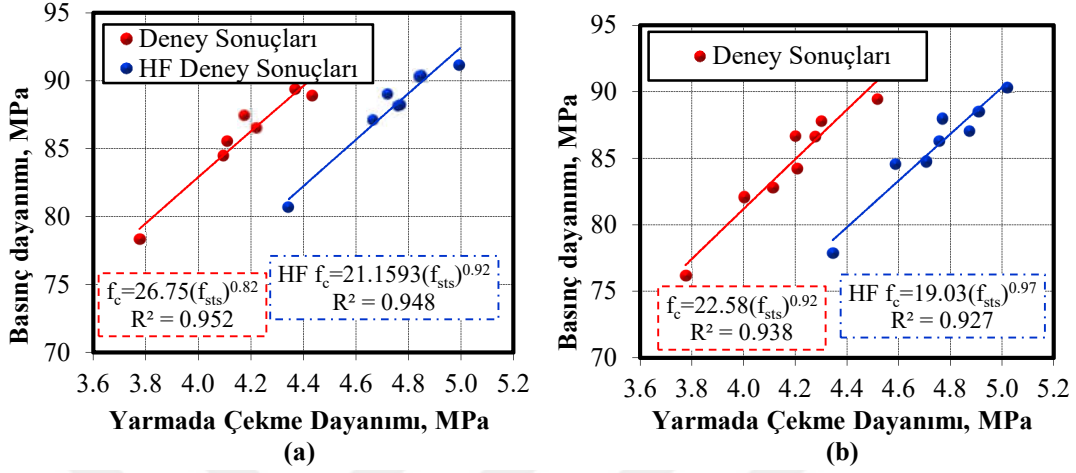


Şekil 4.49. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların  $U_{pv}$  ve  $f_{fs}$  değerleri arasındaki ilişki

#### 4.3.2 Basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren betonların 56 günlük 10x10x10 cm küp  $f_c$  değerleri ile 15x15x15 cm küp  $f_{sts}$  değerleri Şekil 4.50'de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.50a'de MK ve MK+SD serisi ve

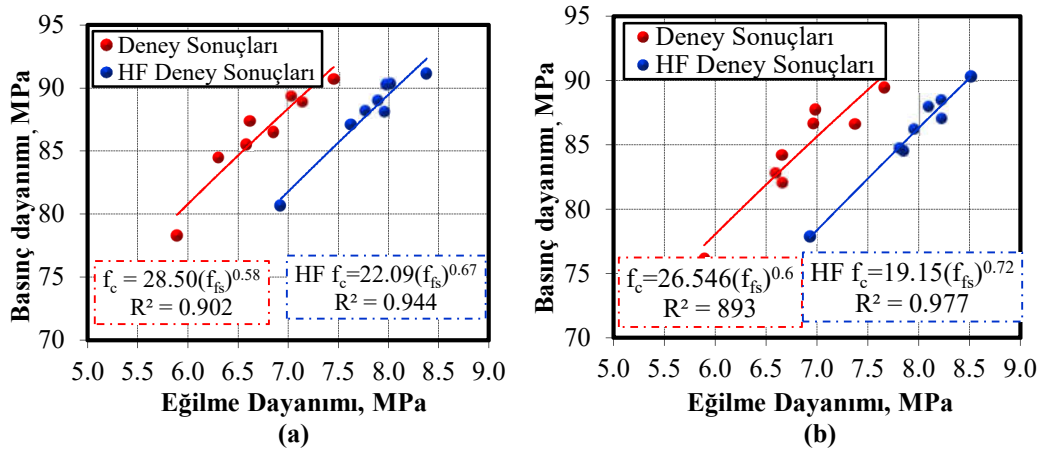
Şekil 4.50b’de SD ve SD+MK serisi hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $f_c$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri arasında yüksek bir korelasyon ilişkisi gözlenmiştir. Bu yüksek korelasyon ilişkisini de şekiller üzerinde verilen  $R^2$  değerleri doğrulamaktadır.



Şekil 4.50. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların  $f_{sts}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki

#### 4.3.3 Basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki

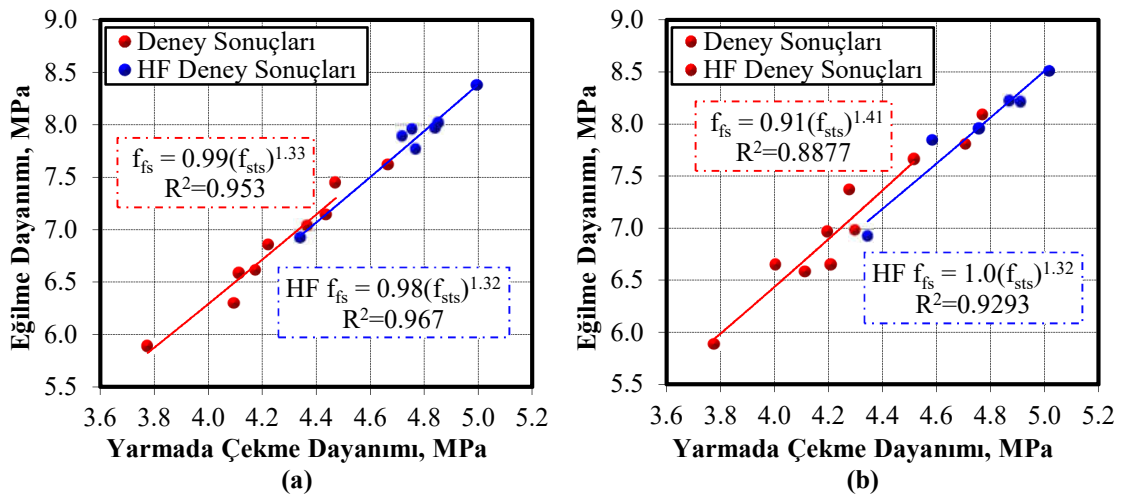
Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren betonların 56 günlük 10x10x10 cm küp  $f_c$  değerleri ile 10x10x40 cm prizma  $f_{fs}$  değerleri Şekil 4.51’de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.51a’da MK ve MK+SD serisi ve Şekil 4.51b’de SD ve SD+MK serisi hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasında yüksek bir korelasyon ilişkisi gözlenmiştir. Bu yüksek korelasyon ilişkisini de şekiller üzerinde verilen  $R^2$  değerleri doğrulamaktadır.



Şekil 4.51. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki

#### 4.3.4 Eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

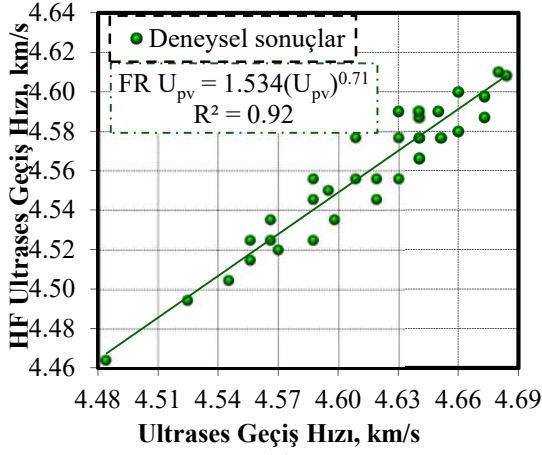
Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren betonların 56 günlük 15x15x15 cm küp  $f_{sts}$  değerleri ile 10x10x40 cm prizma  $f_{fs}$  değerleri Şekil 4.52'da görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.52a'da MK ve MK+SD serisi ve Şekil 4.52b'de SD ve SD+MK serisi hibrit fibersiz ve hibrit fiberli betonların  $f_{sts}$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasında yüksek bir korelasyon ilişkisi gözlenmiştir. Bu yüksek korelasyon ilişkisini de şekiller üzerinde verilen  $R^2$  değerleri doğrulamaktadır.



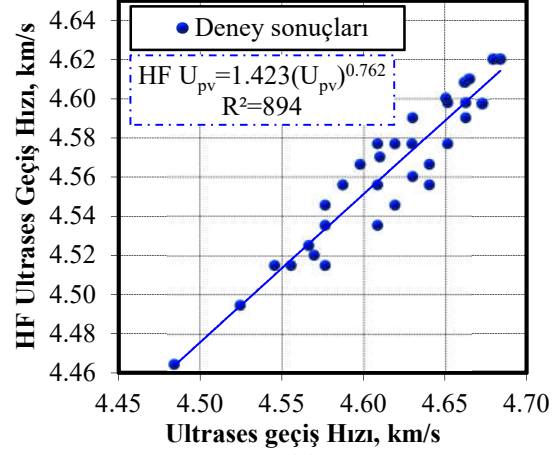
Şekil 4.52. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların  $f_{sts}$  ve  $f_{fs}$  değerleri arasındaki ilişki

#### 4.3.5 Fibersiz özellikler ile hibrit fiberli özellikler arasındaki ilişkiler

Hibrit fibersiz MK, MK+SD ve SD, SD+MK serisi betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri ile hibrit fiberli MK, MK+SD ve SD, SD+MK serisi betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri sırasıyla Şekil 4.53, 4.54, 4.55 ve 4.56'da ilişkilendirilmiştir. Hibrit fibersiz MK, MK+SD ve SD, SD+MK serisi betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri ile hibrit fiberli MK, MK+SD ve SD, SD+MK serisi betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri arasında yüksek korelasyon ilişkisi olduğu bu şekillerde görülmektedir. Bu yüksek korelasyon ilişkisini de şekiller üzerinde verilen  $R^2$  değerleri doğrulamaktadır.

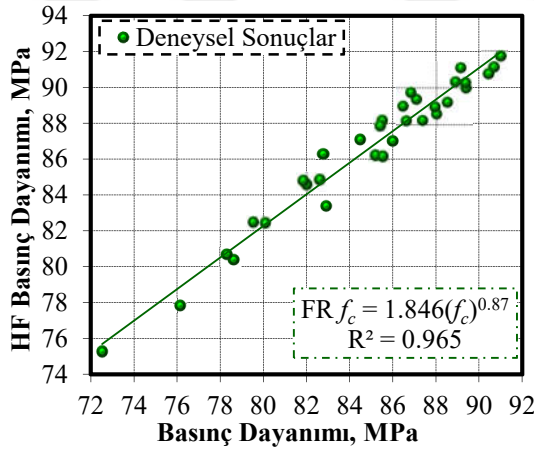


(a)

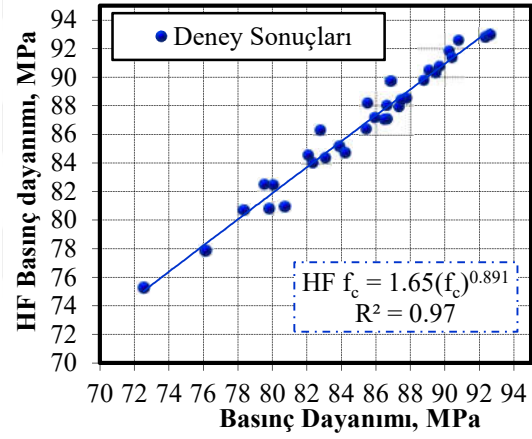


(b)

Şekil 4.53. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların fibersiz  $U_{pv}$  ve hibrit fiberli  $U_{pv}$  değerleri arasındaki ilişki

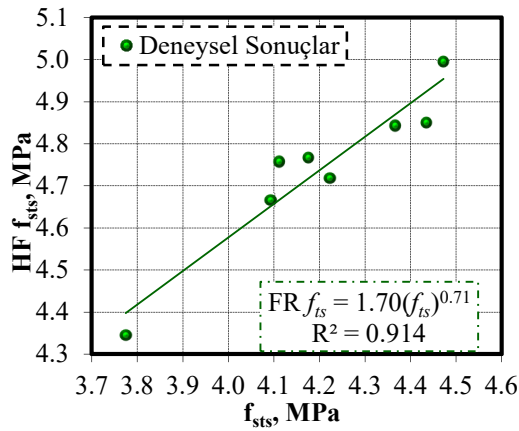


(a)

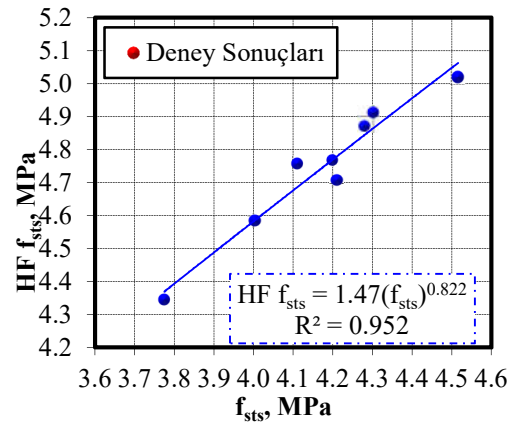


(b)

Şekil 4.54. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların fibersiz  $f_c$  ve hibrit fiberli  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki

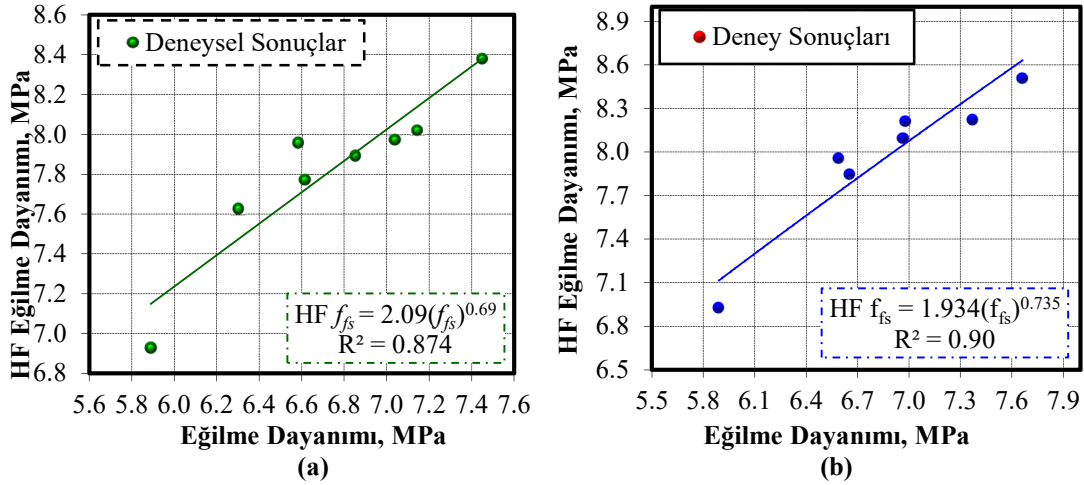


(a)



(b)

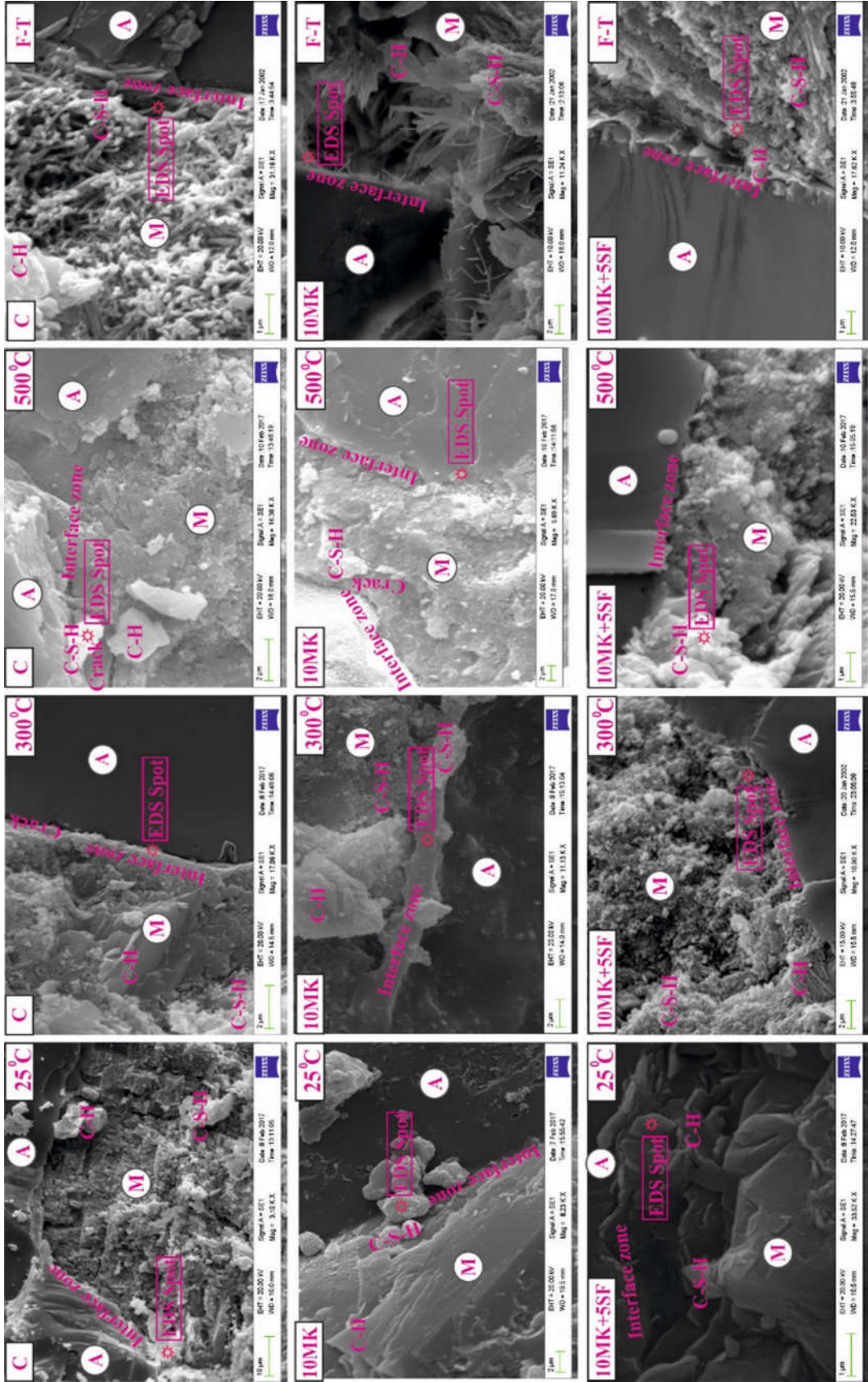
Şekil 4.55. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların fibersiz  $f_{sts}$  ve hibrit fiberli  $f_{sts}$  değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.56. (a) MK ve MK+SD ve (b) SD ve SD+MK serisi betonların fibersiz  $f_{fs}$  ve hibrit fiberli  $f_{fs}$  değerleri arasındaki ilişki

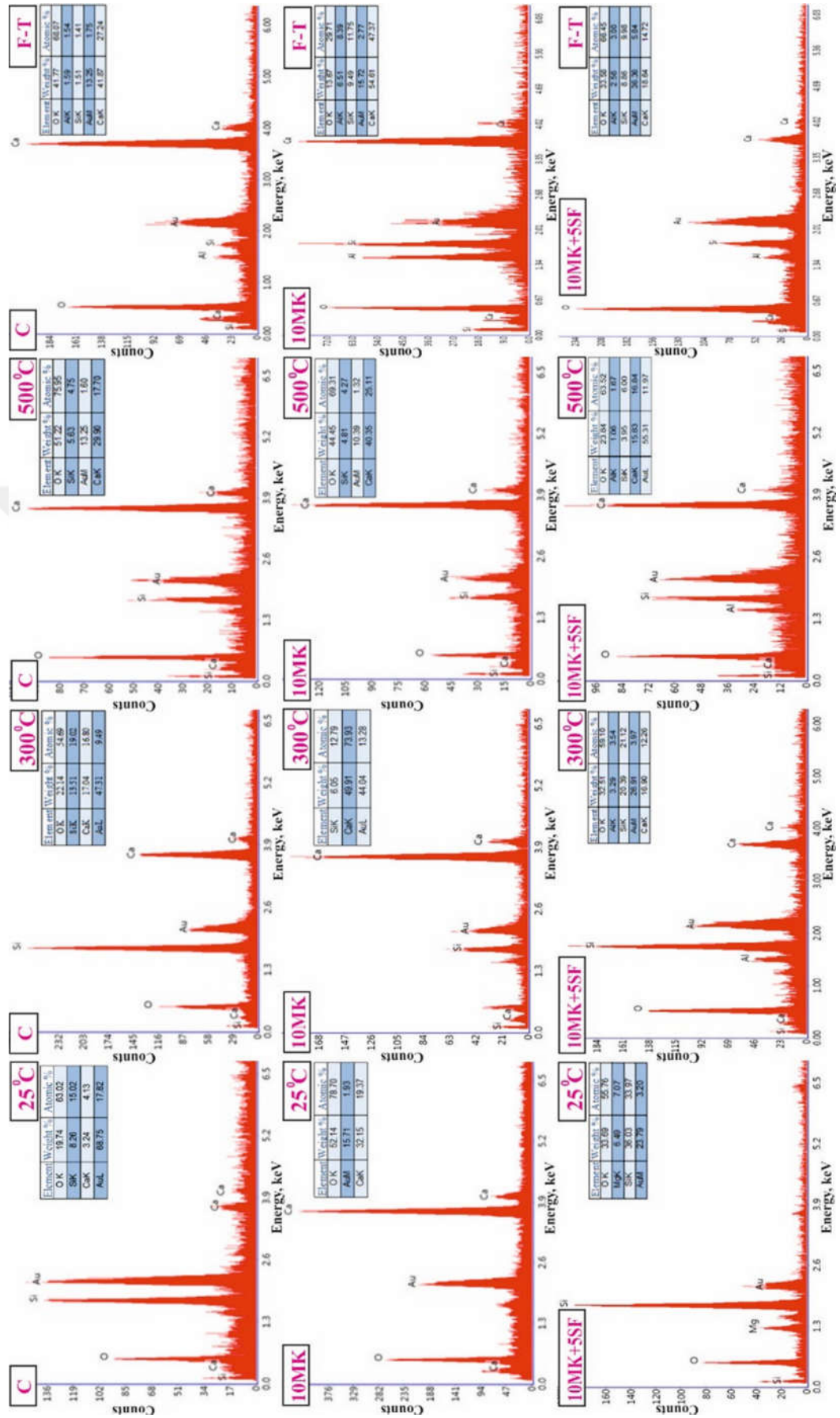
#### 4.4 Mikroyapı Analizleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen beton karışımlarında, SEM analizleri ve EDS nokta analizleri, ortam sıcaklığına 25 °C, (300 °C ve 500 °C) yüksek sıcaklıklara ve donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan hibrit fibersiz K, 10MK ve 10MK5SD kodlu betonlardan kırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf 4.1'deki SEM analizlerinde görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça ve donma-çözünme döngüsüne maruz kalan K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu örneklerin arayüzey bölgesinde ve matrisinde değişim, gözenek ve çatlaklar artmıştır. Dahası ortam sıcaklığında K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu örneklerin iç yapı,  $Ca(OH)_2$  ve C-S-H jelleri kompakt ve blok bir yapıda iken, 500 °C sıcaklığa ve donma-çözünme döngüsüne maruz kalan örneklerde bozulmalar görülmüştür. Ayrıca sıcaklık arttıkça bu beton örneklerinin matrislerinde renk değişimlerinde görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda çatlak, gözenek ve değişikliklerin artması,  $Ca(OH)_2$  ve C-S-H jellerinin bozulmasıyla mekanik özelliklerin azaldığı Sarıdemir vd. (2016), Kou vd. (2014), Horszczaruk vd. (2017) tarafından ifade edilmiştir. Fotoğraf 4.2'de verilen EDS nokta analizleri, Fotoğraf 4.1 üzerinde verilen noktalarda SEM analizleri ile birlikte yapılmıştır. Fotoğrafta görüldüğü üzere K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu beton örneklerinin matrislerinin kimyasal bileşenlerinde temel olarak O, Si, Ca, Al ve Au elementlerinin olduğu görülmüştür. Burada Au elementi SEM analizi için kullanılan küçük parçaların kaplanmasından ortaya çıkarken O, Si, Ca ve Al elementleri  $Ca(OH)_2$  ve C-S-H jellerinin yapısından ortaya çıkmaktadır.



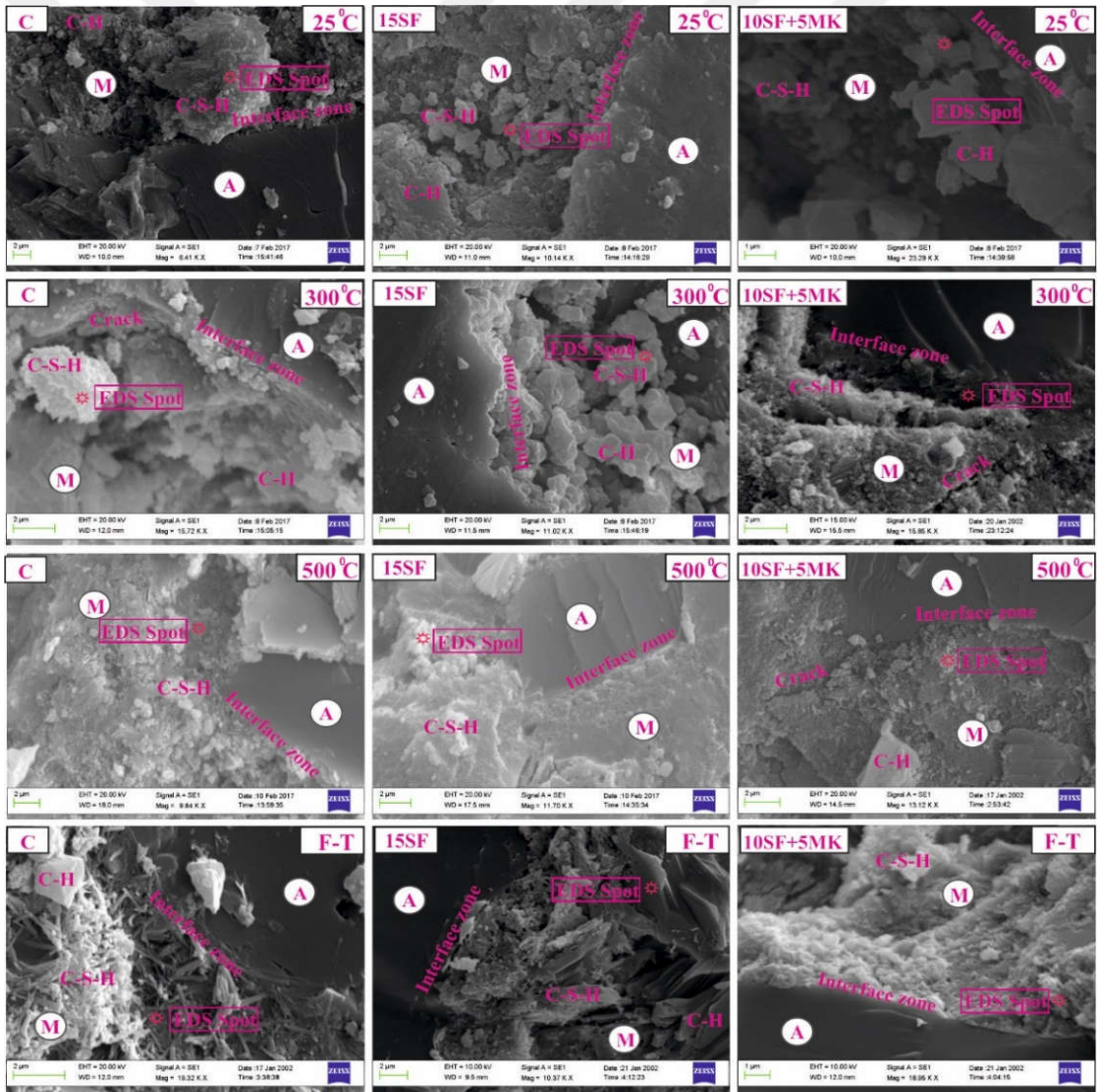
C: Kontrol betonu, SD: Silis dumanı, MK: Metakaolin, M: Matris, A: Agregası, C-H: Kalsiyum hidroksit, C-S-H: Kalsiyum silika hidroksit, EDS: Enerji dağılım spektroskopisi

**Fotoğraf 4.1. K,** 10MK ve 10MK+5SD kodlu betonların SEM analizi



Fotoğraf 4.2. K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu betonların EDS nokta analizi

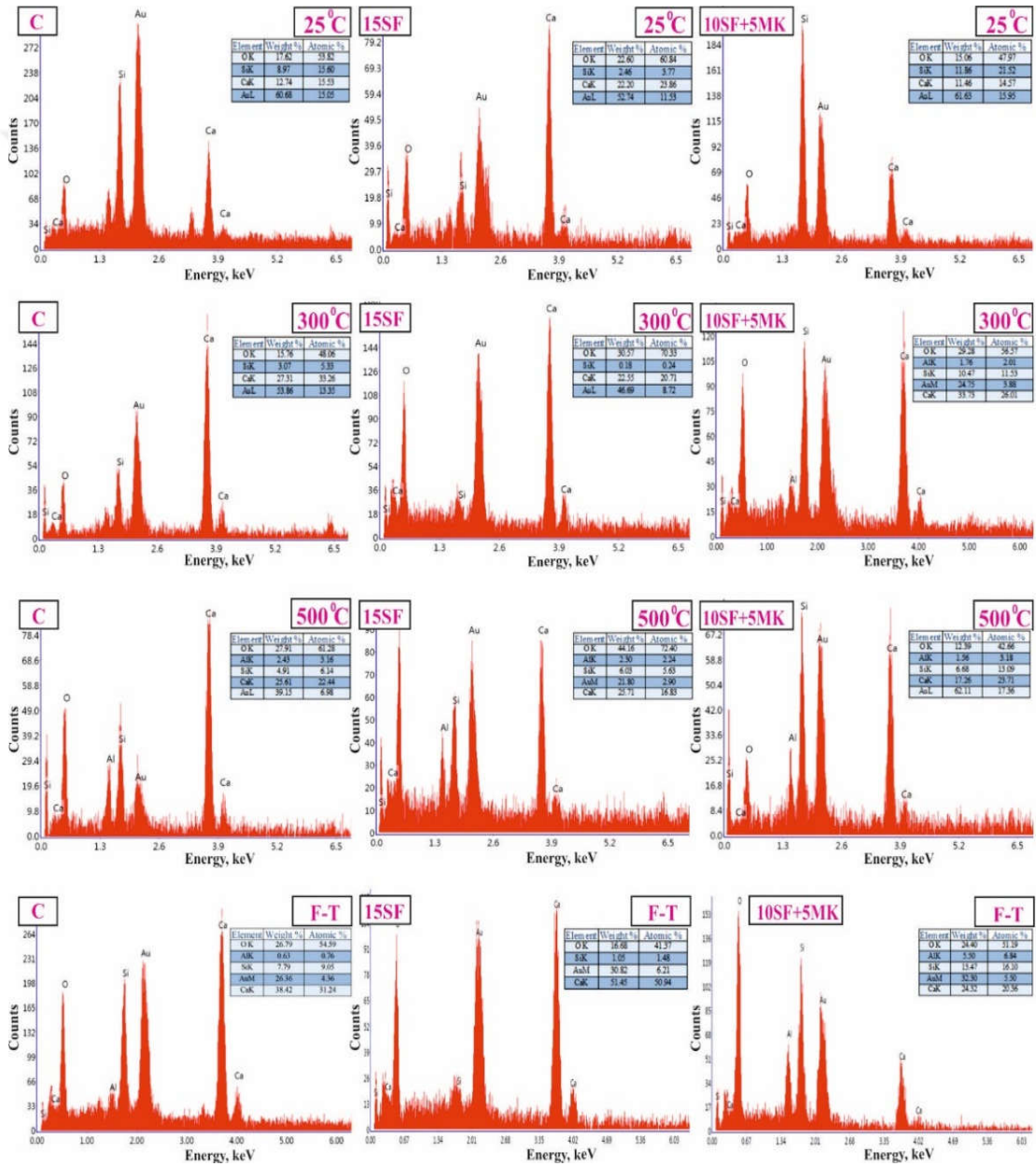
SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen beton karışımlarında, SEM analizleri ve EDS nokta analizleri, ortam sıcaklığına (25 °C), 300 °C ve 500 °C yüksek sıcaklıklara ve donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan hibrit fibersiz K, 15SD ve 10SD5MK kodlu betonlardan kırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf 4.3'deki SEM analizlerinde görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça ve donma-çözülme döngüsüne maruz kalan K, 15SD ve 10SD5MK kodlu örneklerin arayüzey bölgesinde ve matrisinde oluşan değişim, gözenek, çatlaklar ve renk değişimi artmıştır. Dahası ortam sıcaklığında K, 15SD ve 10SD5MK kodlu örneklerin içyapı, Ca(OH)<sub>2</sub> ve C-S-H jelleri kompakt ve blok bir yapıda iken, 500 °C sıcaklığa ve donma-çözülme döngüsüne maruz kalan örneklerde bozulmalar görülmüştür.



C: Kontrol betonu, SD: Silis dumanı, MK: Metakaolin, M: Matris, A: Agregat, C-H: Kalsiyum hidroksit, C-S-H: Kalsiyum silika hidroksit, EDS: Enerji dağılım spektroskopisi

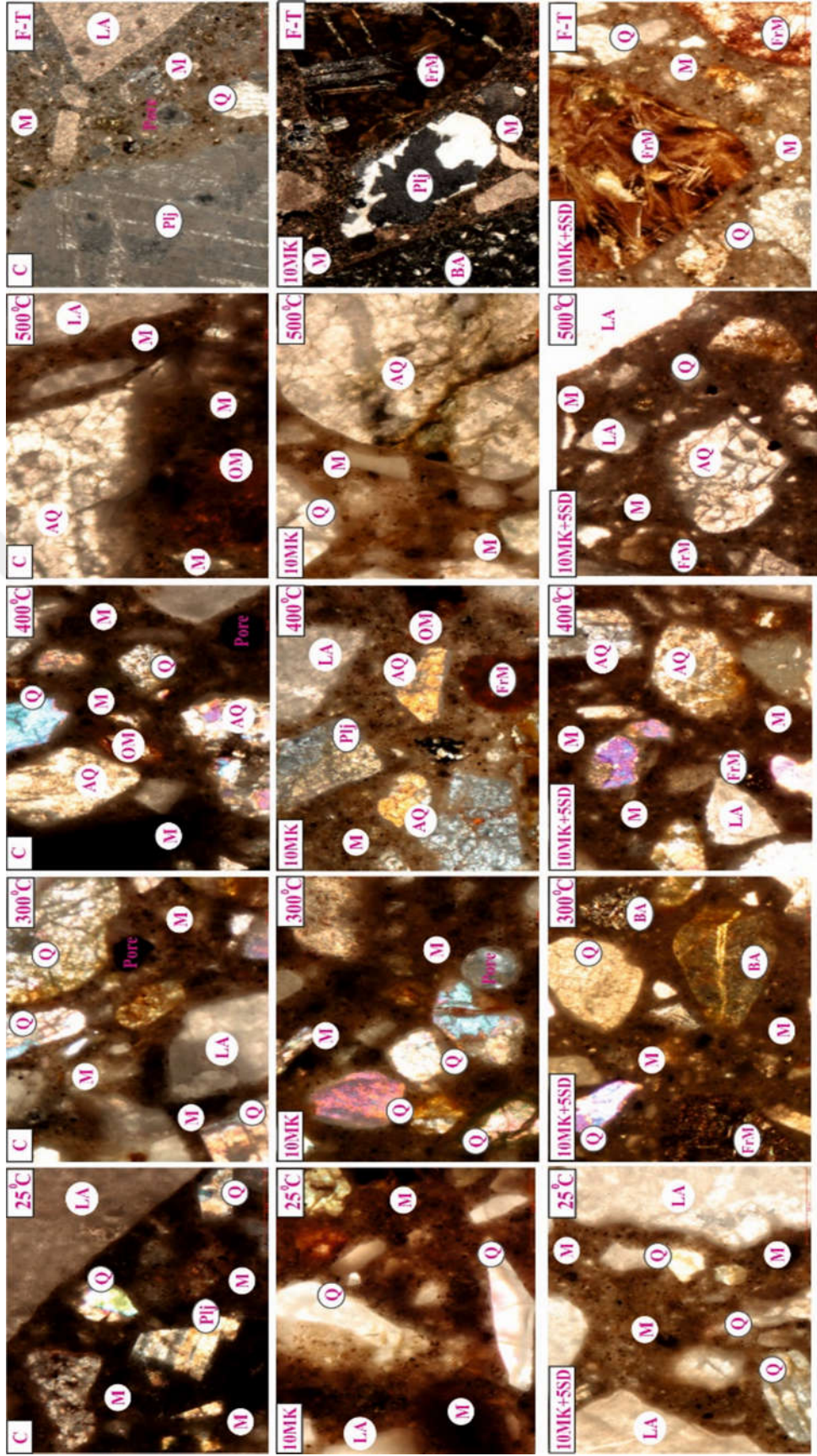
**Fotoğraf 4.3.** K, 15SD ve 10SD+5MK kodlu betonların SEM analizi

Fotoğraf 4.4’de verilen EDS nokta analizleri, Fotoğraf 4.3 üzerinde verilen noktalarda SEM analizleri ile birlikte yapılmıştır. Fotoğrafta görüldüğü üzere K, 15SD ve 10SD5MK kodlu beton örneklerinin matrislerinin kimyasal bileşenlerinde temel olarak O, Si, Ca, Al ve Au elementlerinin olduğu görülmüştür. Burada Au elementi SEM analizi için kullanılan küçük parçaların kaplanmasından ortaya çıkarken O, Si, Ca ve Al elementleri  $\text{Ca(OH)}_2$ , kalsiyum sülfö-alüminat hidrat ve C-S-H jellerinin yapısından ortaya çıkmaktadır.



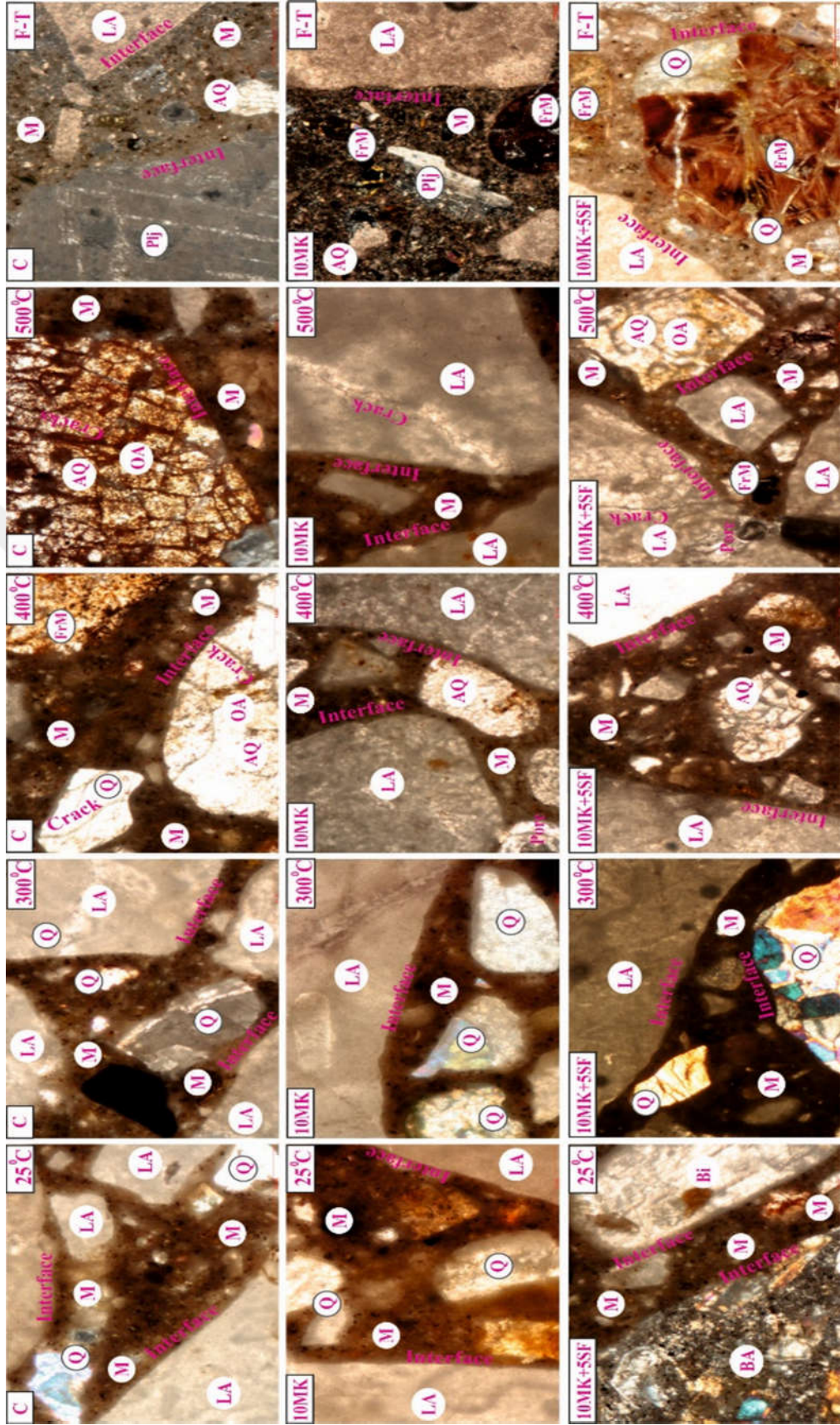
Fotoğraf 4.4. K, 15SD ve 10SD+5MK kodlu betonların EDS nokta analizi

MK mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen beton karışımlarında, PLM analizleri ortam sıcaklığına (25 °C), 300 °C, 400 °C ve 500 °C yüksek sıcaklıklara ve donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan hibrit fibersiz K, 10MK ve 10MK5SD kodlu betonlardan elde edilen Fotoğraf 4.5 ve Fotoğraf 4.6'daki ince kesitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu olumsuz etkilerden dolayı matrisde meydana gelen değişim, gözenek ve çatlak oluşumu Fotoğraf 4.5'de incelenmiştir. Benzer şekilde bu olumsuz etkilerden dolayı arayüzey ve agregada meydana gelen değişim, gözenek ve çatlak oluşumu Fotoğraf 4.6'da incelenmiştir. Ortam sıcaklığına maruz kalan numunelerin matris, arayüzey ve agregalarında çatlak, gözenek ve bozulma görülmezken, 300 °C yüksek sıcaklık ve donma-çözünme döngüsüne maruz kalan numunelerin matris, arayüzey ve agregalarında çok az miktarda çatlak, gözenek ve bozulma görülmüştür. Özellikle bu olumsuz etkilerden dolayı agregalarda görülen bozulma ve çatlamanın nedeni agreganın minerolojik yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. 400 °C ve 500°C yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin matris, arayüzey ve agregalarında mikro çatlaklar, mikro gözenekler, renk değişimi ve bozulmaların olduğu görülmüştür. Bu bozulmalar 400 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelere göre 500 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde daha fazladır. Arayüzey bölgesindeki mikro çatlak, mikro gözenek ve bozulmanın artması matris ve agreganın arasındaki bağ dayanımını olumsuz etkilemektedir. Arayüzey bölgesindeki bu bağ dayanımının azalması betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu durum Sarıdemir vd. (2016) ve Akçaözoğlu (2013) tarafından da belirtilmiştir. Arayüzey bölgesinde agreganın duvar etkisinden dolayı daha fazla gözenek daha az C-S-H jeli ve daha çok ve büyük  $\text{Ca(OH)}_2$  oluşmaktadır. Bu durumda arayüzey bölgesinin zayıflamasına neden olmaktadır. Agregalarda oluşan mikro çatlak, oksitlenme ve bozulmanın nedenlerinden birisi de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mineralidir. Bu mineralin yaklaşık olarak 300°C yüksek sıcaklık altında oksitlenmeye neden olduğu Sarıdemir vd. (2016) ve Ingham (2009) tarafından belirtilmiştir. Fotoğraf 4.5 ve Fotoğraf 4.6'da görüldüğü gibi agregaların bazılarının yapısında ferromagnezyum, plajiyoklaz, biotit ve feldispat minerallerinin olduğu görülmektedir.



M: Matris, Q: Kuartz, LA: Kalker agregası, BA: Bazalt agregası, Bi: Biotit, FrM: Ferromagnezyum, Plj: Plajiyoklaz, OM: Okstilenmiş matris, OA: Okstilenmiş agregası, AQ: Değişmiş kuartz

**Fotoğraf 4.5.** K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu betonların matrislerinin PLM analizi



M: Matris, Q: Kuartz, LA: Kalker agregası, BA: Bazalt agregası, Bi: Biotit, FrM: Ferromagnezyum, Plj: Plajiyoklaz, OM: Okstilenmiş matris, OA: Okstilenmiş agregası, AQ: Değişmiş kuartz

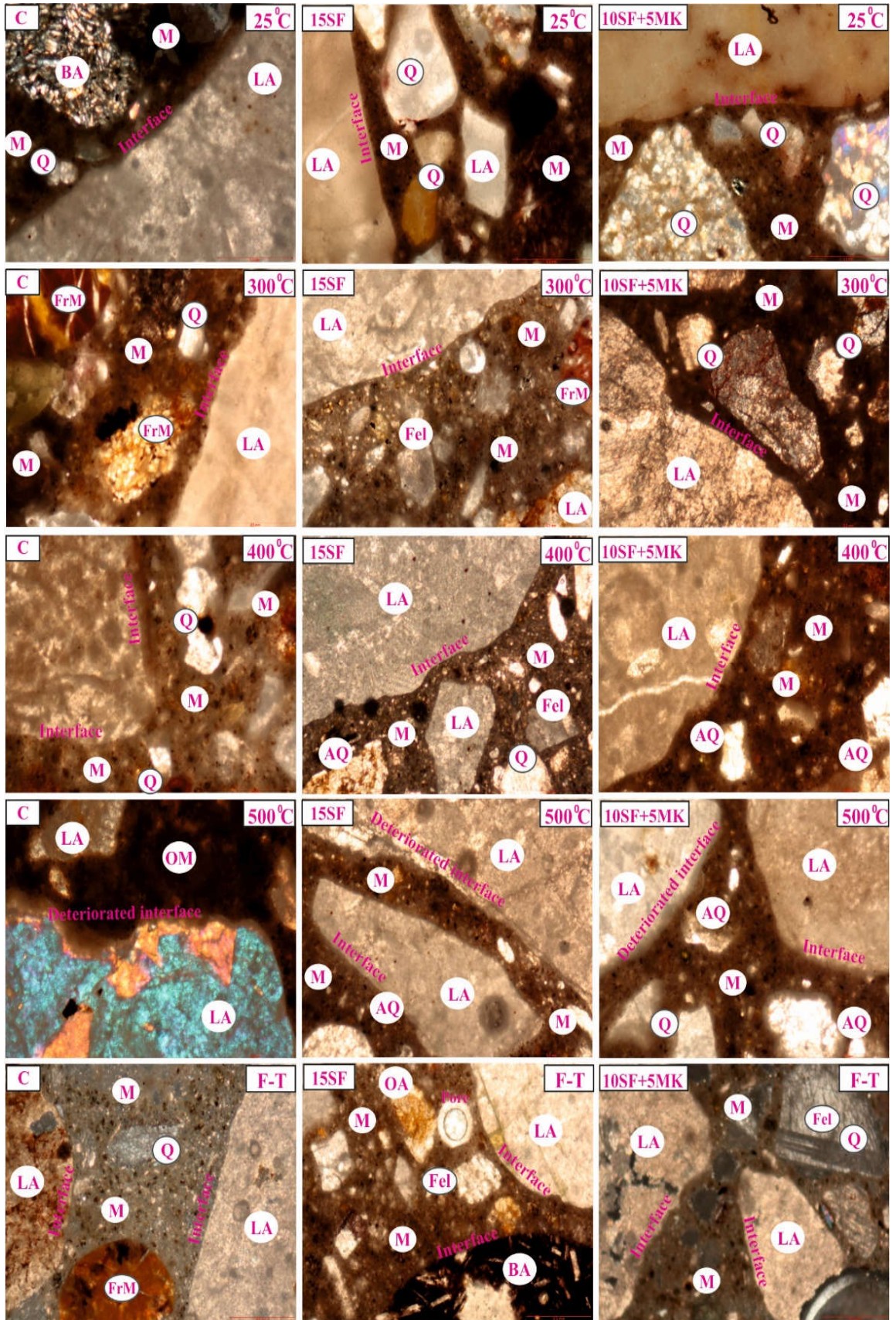
**Fotoğraf 4.6.** K, 10MK ve 10MK+5SD kodlu betonların ara yüzeyinin PLM analizi

SD mineral katkısının ağırlığına göre isimlendirilen beton karışımlarında, PLM analizleri ortam sıcaklığına (25 °C), 300 °C, 400 °C ve 500 °C yüksek sıcaklıklara ve donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan hibrit fibersiz K, 15SD ve 10SD5MK kodlu betonlardan elde edilen Fotoğraf 4.7 ve Fotoğraf 4.8'deki ince kesitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu olumsuz etkilerden dolayı matrisde meydana gelen değişim, oksitlenme, gözenek ve çatlak oluşumu Fotoğraf 4.7'de incelenmiştir. Benzer şekilde bu olumsuz etkilerden dolayı arayüzey ve agregada meydana gelen değişim, oksitlenme, gözenek ve çatlak oluşumu Fotoğraf 4.8'de incelenmiştir. Ortam sıcaklığına maruz kalan numunelerin matris, arayüzey ve agregalarında çatlak, oksitlenme, gözenek ve bozulma görülmezken, 300 °C yüksek sıcaklık ve donma-çözünme döngüsüne maruz kalan numunelerin matris, arayüzey ve agregalarında çok az miktarda çatlak, oksitlenme, gözenek ve bozulma görülmüştür. Özellikle bu olumsuz etkilerden dolayı agregalarda görülen bozulma ve çatlamların nedeni agreganın minerolojik yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu bozulma ve çatlakların görüldüğü agregalar genellikle doğal dere kumu agregalarıdır. 400 °C ve 500°C yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin matris, arayüzey ve agregalarında mikro çatlaklar, mikro gözenekler, renk değişimi ve bozulmaların olduğu görülmüştür. Bu bozulmalar 400 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelere göre 500 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde daha fazladır. Arayüzey bölgesindeki mikro çatlak, mikro gözenek ve bozulmanın artması matris ve agregaya parçalarının arasındaki bağ dayanımını olumsuz etkilemektedir. Arayüzey bölgesindeki bu bağ dayanımının azalması betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu durum Sarıdemir vd. (2016), Akca ve Zihnioglu (2013), Akçaözoğlu vd. (2014) ve Akçaözoğlu (2013) tarafından belirtilmiştir. Arayüzey bölgesinde agreganın duvar etkisinden dolayı daha fazla gözenek daha az C-S-H jeli ve daha çok ve büyük  $\text{Ca(OH)}_2$  oluşmaktadır. Bu durumda arayüzey bölgesinin zayıflamasına neden olmaktadır. Agregalarda oluşan mikro çatlak, oksitlenme ve bozulmanın nedenlerinden birisi de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mineralidir. Bu mineralin yaklaşık olarak 300°C yüksek sıcaklık altında oksitlenmeye neden olduğu Sarıdemir vd. (2016) ve Ingham (2009) tarafından belirtilmiştir. Fotoğraf 4.7 ve Fotoğraf 4.8'de görüldüğü gibi agregaların bazılarının yapısında ferromagnezyum, plajiyoklaz, biotit ve feldispat minerallerinin olduğu görülmektedir.



M: Matris, Q: Kuartz, LA: Kalker agregası, BA: Bazalt agregası, Bi: Biotit, FrM: Ferromagnezyum, Pij: Plajiyoklaz, OM: Okstilenmiş matris, OA: Oksitlenmiş agregası, AQ: Değişmiş kuartz

**Fotoğraf 4.7.** K, 15SD ve 10SD+5MK kodlu betonların matrislerinin PLM analizi



M: Matris, Q: Kuartz, LA: Kalker agregası, BA: Bazalt agregası, Bi: Biotit, FrM: Ferromagnezyum, Plj: Plajiyoklaz, OM: Okstilenmiş matris, OA: Oksitlenmiş agregası, AQ: Değişmiş kuartz

**Fotoğraf 4.8.** K, 15SD ve 10SD+5MK kodlu betonların ara yüzeyinin PLM analizi

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen K, MK, SD ve MK ile birlikte SD içeren betonların mekanik ve mikroyapı özellikleri ve bu özellikler üzerine yüksek sıcaklık ve donma-çözünme döngüsünün etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışma ve analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Hibrit fibersiz ve hibrit fiberli olarak üretilen MK, SD ve MK+SD içeren betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri, aynı kür günlerine sahip hibrit fibersiz ve hibrit fiberli kontrol betonlarının  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir.
- En yüksek  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri hibrit fiberli ve hibrit fibersiz betonlarda, MK ve MK+SD serisi için 10MK ve 10MK5SD kodlu betonlarda görülürken, SD ve SD+MK serisi için 15SD ve 10SD5MK kodlu betonlarda görülmüştür.
- MK, SD ve MK+SD içeren beton karışımlarında hibrit fiber kullanılması, hibrit fibersiz betonlara göre  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerlerini arttırmıştır.
- Betonların maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK, SD ve MK+SD içeren betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri azalmıştır. Bu azalma üzerinde çimento ile yer değiştirilen MK, SD ve MK+SD içeriklerinin önemli bir katkısı olmamıştır. Ancak beton karışımlarında hibrit fiber kullanılması betonun bu özelliklerinin azalması yönünde etki etmiştir.
- Donma-çözünme döngüsüne maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK, SD ve MK+SD içeren betonların  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerleri azalmıştır. Donma-çözünme döngüsünden dolayı,  $U_{pv}$  ve  $f_c$  değerlerindeki en büyük azalma hibrit fiberli kontrol betonlarında görülmüştür.
- Ortam ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan hibrit fiberli ve hibrit fibersiz MK, SD ve MK+SD içeren betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri arasında güçlü korelasyonlar gözlenmiştir.

- Hibrit fibersiz K, MK, SD ve MK+SD betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri ile hibrit fiberli K, MK, SD ve MK+SD betonların  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_{sts}$  değerleri arasında yüksek korelasyonlar görülmüştür.
- Betonların maruz kaldığı sıcaklık arttığa,  $Ca(OH)_2$  ve C-S-H jellerinde bozulma, çatlak, gözenek ve değişikliklerin arttığı SEM analizleri ile gözlenmiştir.
- Betonların maruz kaldığı sıcaklık arttığa, agrega, arayüzey ve matrisde bozulma, çatlak, gözenek, oksitlenme ve değişikliklerin arttığı PLM analizleri ile gözlenmiştir. Betonların maruz kaldığı yüksek sıcaklık arttığa ve donma-çözünme döngüsünde, matrislerde renk değişiminin arttığı PLM analizleri ile gözlenmiştir.
- Betonların maruz kaldığı sıcaklık arttığa, PLM analizleri ile bazı doğal kum agregasının yapısında değişim, oksitlenme ve çatlakların arttığı gözlenirken kırılmış kalker agregasının yapısında çatlaklar, oksitlenme ve değişiklikler gözlenmemiştir.

## KAYNAKLAR

Abdul Awal, A.S.M. and Shehu, I.A., “Performance evaluation of concrete containing high volume palm oil fuel ash exposed to elevated temperature”, *Construction and Building Materials* 76, 214–220, 2015.

ACI Committee 234, Guide for the use of silica fume in concrete, ACI 234R-96, *American Concrete Institute*, Farmington Hill, Michigan, 1996.

Aitcin, P.C., High strength concrete, *Spon Press*, London, UK 1998.

Akçay, B., Peker, Ö., Şengül, C. ve Taşdemir, M.A., “Metakaolin içeren betonun kırılma davranışı”, *Hazır Beton Kongresi Beton 2013*, İstanbul, 424-435, 2013.

Akman, M. S., “Betonun dayanıklılık özelliği ve önemi”, *I. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 53-66, 1989.

Akman, S., “Traslı çimento nedir ne değildir”, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayını*, Ankara, s. 55, 1994.

Aksoğan O., Binici H. ve Görür, E.B., “Yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza katkı betonların deniz yapılarında kullanılmasının beton durabilitesi açısından avantajları”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 20(2), 59-65, 2005.

Al-Akhras, N.M., “Durability of metakaolin concrete to sulfate attack”, *Cement and Concrete Research* 36, 1727–1734, 2006.

Alfes, C., “Modulus of elasticity and drying shrinkage of high strength concrete containing silica fume”, *ACI Special Publication*, 132(2), 1651-1671, 1992.

Almusallam A. A., Beshr H., Maslehuddin M. and Al-Amoudi O. S. B., “Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 891-900, 2004.

Alonso, C., Fernandez, L., “Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments”, *Journal of Materials Science*, 39, 3015–24, 2004.

Alper, D., “Silis dumanı içeren betonların hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini,” Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 92, 2005.

Anonim, “Madencilik özel ihtisas komisyonu endüstriyel alt maddeler alt komisyonu seramik-refrakter-cam hammaddeleri çalışma grubu raporu Cilt 1”, *T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı DPT-2418, ÖİK-477*, Ankara, 1995.

Asbridge, A.H., Page, C.L. and Page, M.M., “Effects of metakaolin, water/binder ratio and interfacial transition zones on the microhardness of cement mortars”, *Cement and Concrete Research*, 32, 1365–1369, 2002.

Asbridge, A.H., Walters, G.V. and Jones, T.R., “Ternary blended concretes OPC/GGBFS/metakaolin”, *Concrete Across Borders*, 941-947, 1994.

ASTM C 1240, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. *American Society for Testing and Materials Standard*, USA, 2005.

ASTM C 138, Standard test method for unit weight, yield and air content of concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.

ASTM C 311 / C 311 M-13, Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 2013.

ASTM C 469, Static modulus of elasticity and poisson’s ratio of concrete in compression, *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.

ASTM C 494-99a, Standard specification for chemical admixtures for concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 2002.

ASTM C 597, Standard test method for pulse velocity through concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.

ASTM C618-12a. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *ASTM International*, USA, 2012.

Atahan, H.N. and Dikme, D., “Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack”, *Construction and Building Materials*, 25(8) (2011) 3450-7.

Atış C. D., Özcan F., Kılıç A., Karahan O., Bilim C. and Severcan M. H., “Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete”, *Building and Environment*, 40(12), 1678-1683, 2005.

Atış, C.D. and Karahan, O. “Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete”, *Construction and Building Materials*, 23, 392-9, 2009.

Aydın, S. and Baradan B., “Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars”, *Cement and Concrete Research*, 37(6), 988-995, 2007.

Aydın, S. and Baradan, B., “Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars”, *Cement and Concrete Research*, 37, 988–995, 2007.

Aydın, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H. and Baradan, B., “Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete”, *Building and Environment*, 42(2), 717-21, 2007.

Baalbaki, M. Sarker, S. L., Aitcin, P. C. and Isabelle, H., “Properties and microstructure of high performance concretes containing silica fume, slag and fly ash”. *ACI Special Publication*, 132(2), 921-942, 1992.

Badogiannis, E. and Tsivilis, S., “Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 31, 128–133, 2009.

Barnes, P. and Bensted, J., “Structure and Performance of Cements”, *Spon Press*, New York, 2001.

Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsivilis, S. and Badogiannis, E., “The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars”, *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 125-130, 2005.

Bayasi, Z. and Zhou, J., “Properties of silica fume concrete and mortar”, *ACI Materials Journal*, 90(4), 349-356, 1993.

Bentur, A. and Goldman, A., “Curing effects, strength and physical properties of high strength silica fume concretes”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(1), 46-58, 1989.

Berke, N. S., Dallaire, M. P. and Hicks, M. C., “Plastic, mechanical, corrosion and chemical resistance properties of silica fume (microsilica) concretes”, *ACI Special Publication*, 132(2), 1125-1149, 1992.

Bhanja, S. and Sengupta, B., “Influence of silica fume on the tensile strength of concrete”, *Cement and Concrete Research*, 35(4), 743-749, 2005.

Bhanja, S. and Sengupta, B., “Investigations on the compressive strength of silica fume concrete using statistical methods”, *Cement and Concrete Research*, 32(9), 1391-1394, 2002.

Binici H., Aksogan O., Görür E. B., Kaplan H. and Bodur M. N., “Hydro-abrasive erosion of concrete incorporating ground blast-furnace slag and ground basaltic pumice”, *Construction and Building Materials*, 23(2), 804-811, 2009.

Binici, H., “Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties”, *Construction and Building Materials*, 21, 1191-1197, 2007.

Binici, H., Görür, E. B. ve Durgun, M.Y., “Yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza katkıli betonların mekanik aşınması ve su geçirirnililiği”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 6(1), 2010.

Binici, H., Temiz, H. ve Çağatay. İ. H., “Erzurum tımar ve dazlak pomzalarının katkıli çimento ve hafif agregalı beton üretiminde kullanımı”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 2007.

Biolzi, L., Luzio, G.D. and Labuz, J.F., “Mechanical properties of photocatalytic white concrete subjected to high temperatures”, *Cement and Concrete Composites*, 39, 73–81, 2013.

Boddy, A., Hooton, R.D. and Gruber, K.A., “Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin”, *Cement and Concrete Research* 31, 759-765, 2001.

Brooks, J.J. and Johari, M.M.A., “Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 495–502, 2001.

Burge, T. A., “High strength lightweight concrete with condensed silica fume”. *ACI Special Publication*, 79(1), 731-745, 1983.

Caldarone, M.A., Gruber, K. A. and Burg, R. G., “High reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture”, *ACI Concrete International*, 16(11), 37-40, 1994.

Carette G. G. and Malhotra, V. M., “Long-term strength development of silica fume concrete”. *ACI Special Publication*, 132(2), 1017-1044, 1992.

Çelikten S. “Çelik fiber içeren yüksek dayanımlı beton özellikleri üzerine metakaolin ve öğütülmüş pomzanın etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 105, 2014.

Chan, Y.N., Luo, X. and Sun, W., “Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C”, *Cement and Concrete Research*, 30, 247–251, 2000

Chen B. and Liu J., “Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high strength and workability”, *Construction and Building Materials*, 22(6), 1108-1113, 2008.

Çiflikli, M., “Fesleğen yayla Niğde kaolin yatağının minerolojik-petroğrafik incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 1998.

Cong, X., Gong, S., Darwin, D. and McCable, S., “Role of silica fume in compressive strength of cement paste, mortar and concrete”, *ACI Materials Journal*, 89(4), 375-387, 1992.

Demirel B. and Keleştemur O., “Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume”, *Fire Safety Journal*, 45(6-8), 385-391, 2010.

Dinçer, R. ve Çağatay, İ. H., “Pomza ile yapılan hafif betonların mekanik özellikleri”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 19(2), 247-260, 2004.

Dodson, V. H., Concrete admixtures, *Van Nostrand Reinhold*, New York, s. 211, 1990.

Dolgun, O., Kendiliğinden yerleşen betonlarda öğütülmüş pomza kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 88, 20-24, 2010.

Dubey, A. and Banthia, N., “Influence of high-reactivity metakaolin and silica fume on the flexural toughness of high-performance steel fiber-reinforced concrete”, *ACI Materials Journal* 95(3), 284-292, 1998.

Düğenci, O., Haktanir, T. and Altun, F., “Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, 75, 82–88, 2015.

Duman, R., Silis dumanının betonun performansın ve klor geçirimsizliğine etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, s. 70, 2010.

Efe, T., Edremit travertenleri ve Van Gölü kuzeyinde yüzeyleyen pomzaların çimento sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van, s. 41-42, 2011.

Ekici, B. B. ve Demirel, B., “Öğütülmüş pomzanın beton basınç dayanımına etkisinin yapay sinir ağı ile belirlenmesi”, *E Journal of New World Sciences Academy*, 9-11, 2007.

Ekinci, C. E., Antalya etibank elektrometalurji işletmesi silis dumanlarının çimento ve betonda katkı maddesi olarak değerlendirilmesi, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı*, Elazığ, s.205, 1995.

Erdoğan, T. Y., Beton. *ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş.*, Ankara, s. 741, 2003.

Ergün, A., Kürklü, G., Başpınar, M.S. and Mansour, M.Y., “The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures”, *Fire Safety Journal*, 55, 160–167, 2013.

Erkoyun, H., “Pomzanın Türkiye’deki yeri ve önemi”, *Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi*, Isparta, s.1-7, 2005.

Ersoy A., Atıcı U. ve Yünsel T. Y., “Pomzanın çimento sanayinde katkı maddesi olarak kullanımı”, *Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi*, Isparta, Türkiye, s. 105-111, 2005.

Fanella, D.A. and Naaman, A., “Stress–strain properties of fiber reinforced mortar in compression”, *ACI Journal*, 82(4), 475-83, 1985.

Frias, M. and Cabrera, J., “Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, 30, 561-569, 2000.

Ganesan, K., Rajagopal, K. and Thangavelu, K., “Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, 22, 1675-83, 2007.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Alzebaree, R. and Mermerdas, K., “Effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of the concretes produced with cold bonded fly ash aggregates”, *Construction and Building Materials*, 40, 982-990, 2013.

Ghrici, M., Kenai, S. and Said-Mansour, M. “Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements”, *Cement and Concrete Composites*, 29,542-49, 2007.

Giner, V.T., Baeza, F.J., Ivorra, S., Zornoza E. and Galao, Ó., “Effect of steel and carbon fiber additions on the dynamic properties of concrete containing silica fume”, *Materials and Design*, 34, 332-9, 2012.

Giner, V.T., Baeza, F.J., Ivorra, S., Zornoza, Kannan, E. V. and Ganesan, K., “Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin”, *Construction and Building Materials*, 51, 225-34, 2014.

Gleize, P.J.P., Cyr, M. and Escadeillas, G., “Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes”, *Cement and Concrete Composites* 29, 80–87, 2007.

Green, S. M. F. Brooke, N. J. McSaveney, L. G. and Ingham, J. M. “Mixture design development and performance verification of structural lightweight pumice aggregate concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 23( 8), 1211–1219, 2011.

Grim, R.E., Applied clay minerology, *Mc-Graw Hill Book Co*, London, 1962

Gündüz, L. and Uğur, İ., “The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures”, *Cement and Concrete Research* 35(9), 1859-1864, 2005.

Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, İ. ve Çankıran, O., Pomza Teknolojisi, Cilt-1., *Süleyman Demirel Üniversitesi Yayını*, Isparta, s. 285, 1998.

Güneşli, U., Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 71, 2008.

Güneyisi, E., Gesoğlu, M. and Özturan, T., “Properties of rubberized concretes containing silica fume”, *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2309-2317, 2004.

Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S. and Mermerdaş, K., “Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes”, *Construction and Building Materials*, 34, 120-30, 2012.

Güvercin, T., Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun bağlayıcı olarak çimento üzerindeki etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, s. 71, 2002.

Hager, I., “Behaviour of cement concrete at high temperature”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, 61 (1), 1–10, 2013.

Han, S. H., Kim, J. K. and Park, Y. D., “Prediction of compressive strength of fly ash concrete by new apparent activation energy function”, *Cement and Concrete Research* 33(7), 965-971, 2003.

Haneefa, K.M., Santhanam, M. and Parida, F.C., “Review of concrete performance at elevated temperature and hot sodium exposure applications in nuclear industry”, *Nuclear Engineering and Design*, 258, 76–88, 2013.

Helland, S., Hoff, A. and Einstabland, T., High-strength concrete, (Hyfast betong), ***Presented at Norsk Betongdage***, Trondheim, 1983.

Henry, M., Darma, I.S., Sugiyama, T., “Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT”, ***Construction and Building Materials***, 67, 37–46, 2014.

Holland T. C., Krysa, A., Luther M. D. and Liu T. C. “Use of silica- fume concrete to repair abrasion-erosion damage in the kinzua dam stilling basin”, ***ACI Special Publication***, 91(2), 841-863, 1986.

Holschemacher, K., Mueller, T. and Ribakov, Y., “Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete”, ***Material and Design***, 31, 2604-15, 2010.

Horszczaruk, E., Sikora, P., Cendrowski, K. and Mijowska, E., “The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates”, ***Construction and Building Materials***, 137, 420-31, 2017.

Hoşgün, H.L., Kaolendeki alüminyumun hidroklorik asit ve sodyum hidroksit çözeltilerinde çözünme kinetiğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, ***Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Eskişehir, s. 3-4, 1996.

Hossain K.M.A., “Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete”, ***Cement and Concrete Research***, 34(2), 283-291, 2004.

Hossain, K. M. A., “Blended cement using volcanic ash and pumice”, ***Cement and Concrete Research*** 33(10), 1601-1605, 2003.

Hossain, K. M. A., “Macro and microstructural investigations on strength and durability of pumice concrete at high temperature”, ***Journal of Materials in Civil Engineering*** 18(4), 527-536, 2006.

Hossain, K.M.A., “High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: Performance at high temperatures”, ***Cement and Concrete Composites***, 28, 535-45, 2006.

Hossain, K.M.A., “Pumice based blended cement concretes exposed to marine environment: effects of mix composition and curing conditions”, ***Cement and Concrete Composites*** 30(2), 97-105, 2008.

- İlter, E., CEM I 42.5 çimentolu yüksek dozajlı betonlarda silis dumanının etkinliği, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 83, 2007.
- Jahren, P., “Use of silica fume in concrete”. *ACI Special Publication*, 79(1), 625-642, 1983.
- Jeyaprabha, B., Elangovan, G. and Prakash, P., “Effects of elevated temperature and water quenching on strength and microstructure of mortars with river sand substitutes”, *Construction and Building Materials*, 114, 688–698, 2016.
- Johnston, C. D., “Durability of high early strength silica fume concretes subjected to accelerated and normal curing”. *ACI Special Publication*, 132 (2), 1167-1187, 1992.
- Justice, J. M. and Kurtis, K. E., “Influence of metakaolin surface area on properties of cement-based materials”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(9), 762–771, 2007.
- Kadiroğlu, İ., “Kendiliğinden yerleşen normal dayanımlı hafif beton üzerine deneysel bir çalışma”, *Batı Çim Batı Anadolu Çimento Sanayi A.Ş.*, İzmir, 7-11, 2005.
- Kadri E.-H., Kenai S., Ezziane K., Siddique R. and Schutter G. D., “Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar”, *Applied Clay Science*, 53(4), 704-708, 2011.
- Kakali, G., Perraki, T., Tsivilis, S. and Badogiannis, E., “Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity”, *Applied Clay Science*, 20, 73-80, 2001.
- Kakizaki, M., Edahiro, H., Tochigi, T. and Niki, T., “Effect of mixing method on mechanical properties and pore structure of ultra high-strength concrete”, *ACI Special Publication*, 132(2), 997-1015, 1992.
- Kawamura, M., Takemoto, K. and Kasaba, S., “Effectiveness of various silica fumes in preventing alkali-silica expansion”, *ACI Special Publication*, 100(2), 1809-1820, 1987.
- Keleştemur, O. and Demirel, B., “Corrosion behavior of reinforcing steel embedded in concrete produced with finely ground pumice and silica fume”, *Construction and Building Materials* 24(10), 1898-1905, 2010.

Khatib, J. M. and Clay, R. M., “Absorption characteristics of metakaolin concrete”, *Cement and Concrete Research* 34(1), 19-29, 2004.

Khatib, J. M. and Hibbert, J. J., “Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin”, *Construction and Building Materials* 19, 460–472, 2005.

Khatib, J. M., “Metakaolin concrete at a low water to binder ratio”, *Construction and Building Materials* 22, 1691–1700, 2008.

Khatib, J. M., “Low temperature curing of metakaolin concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(8), 362-367, 2009.

Khatib, J. M., Kayalı, O. and Siddique, R., “Dimensional change and strength of mortars containing fly ash and metakaolin”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(9), 523-528, 2009.

Khatib, J. M., Kayalı, O. and Siddique, R., “Dimensional change and strength of mortars containing fly ash and metakaolin”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(9) 523-8, 2009.

Khatib, J.M. and Hibbert, J.J., “Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin”, *Construction and Building Materials*, 19(6), 460-72, 2005.

Khayat K.H and Aitcin P.C., “Silica fume in concrete: an overview”, Proceedings, CANMET/ACI 4th International Conference on Fly ash, Silica fume, Slag and Natural pozzolans in Concrete, Istanbul, ed. V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., *ACI Special Publication*, 132(2), 835-872, 1992.

Kılıç, A. Atış, C. D., Teymen, A., Karahan, O. and Arı, K., “The effects of scoria and pumice aggregates on the strengths and unit weights of lightweight concrete”, *Scientific Research and Essay* 4(10), 961-965, 2009.

Kim, H.S., Lee, S.H. and Moon, H.Y., “Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin”, *Construction and Building Materials* 21(6), 1229-1237, 2007.

Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ. and Şahin, Y., “Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes”, *Construction and Building Materials*, 22(8), 1874–1880, 2008.

Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ. and Şahin, Y., “Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes”, *Construction and Building Materials*, 22, 1874-80, 2008.

Kondo, R., Satake. M. and Ushiyama. H., “Diffusion of various ions in hardened portland cement”. *Review of the 28th General Meeting, The Cement Association of Japan*, Tokyo, 41-43, 1974.

Kou, S.C., Poon, C.S. and Etxeberria, M., “Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures”, *Cement and Concrete Composites*, 53, 73–82, 2014.

Kurt, E. B., Silis dumanının betonun durabilite özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 115, 2007.

Laamanen, P. H., Johansen, K., Kylvteit, B. P. and Sellevold, E. J., “Heat curing of concrete with and without condensed silica fume-effect of early temperature history on compressive strength”, *ACI Special Publication*, 132(2), 1045-1059, 1992.

Lee, S. T, Moon, H. Y., Hooton, R. D. and Kim, J. P., “Effect of solution concentrations and replacement levels of metakaolin on the resistance of mortars exposed to magnesium sulfate solutions”, *Cement and Concrete Research* 35, 1314-1323, 2005.

Li, L., Jia, P., Dong, J., Shi, L., Zhang, G. and Wang, Q. “Effects of cement dosage and cooling regimes on the compressive strength of concrete after post-fire-curing from 800 °C”, *Construction and Building Materials*, 142, 208–220, 2017.

Loland, K. E., “Strength and Deformation Properties of Hardened Concrete”, *Presented at Seminar Bruk Av Silika; Betong, Norske Sivilingeniørers Forening*, Oslo, Norway, 1983.

Luther, M. and Hansen, W., “Comparison of creep and shrinkage of high strength silica fume concretes with fly ash concretes of similar strength”, CANMET/ACI 3rd Int. Conf.

On the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, (Ed. V.M. Malhotra), *ACI Special Publication*, 114(1), 573-591, 1989.

Malayoğlu, U. ve Akar, A., “Killerin sınıflandırılmasında ve kullanım alanlarının saptanmasında aranan kriterlerin irdelenmesi”, *1. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 125-142, 1995.

Malhotra, V. M. and Carette, G. G., “Silica fume, a pozzolan of new interest for use in some concretes”, *Concrete Construction*, s.443-446, 1982.

Malhotra, V. M. and Carette, G. G., “Silica fume in concrete”, *CANMET/ACI International Workshop on Silica fume in concrete*, Washington, D.C., U.S.A, 1991.

Malhotra, V. M., “Fly ash, slag, silica fume and rice-husk ash in concrete: a review”. *Concrete International*,15(4), 23-28, 1993.

Malhotra, V. M., “Mineral admixtures”, *Concrete Construction Engineering Handbook, Nawy Edward G. CRC Pres*, New York, s.27-36, 1997.

Mardani-Aghabaglou, A., Andic-Cakir, O. and Ramyar, K., “Freeze–thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method”, *Cement and Concrete Composite*, 37, 259-66, 2013.

Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G.İ. and Ramyar, K., “Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point”, *Construction and Building Materials*, 70, 17-25, 2014.

Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A. and Brooks, J. J., “Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347-357, 2004.

Mehta, P.K., Advancements in concrete technology, *Construction Institution*, 96(4), 69-76, 1999.

Mermerdaş, K., Gesoğlu, M., Güneyisi, E. and Özturan, T., “Strength development of concretes incorporated with metakaolin and different types of calcined kaolins”, *Construction and Building Materials*, 37, 766-74, 2012.

Mohammadi, Y., Singh, S.P. and Kaushik, S.K., “Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state”, *Construction and Building Materials*, 22(5), 956-65, 2008.

Nadeem, A., Memonb, S.A. and Lo, T.Y., “Qualitative and quantitative analysis and identification of flaws in the microstructure of fly ash and metakaolin blended high performance concrete after exposure to elevated temperatures”, *Construction and Building Materials*, 38, 731–741, 2013.

Neville, A.M., Properties of Concrete, 4th and Final ed. England, *Addison Wesley Longman*, 1996.

Öz, E., Nevşehir dolaylarında yüzeyleyen asidik pomzanın hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 8-9, 2007.

Özcan, F., Silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri ve hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s.5-6, 2005.

Özkul, H., Taşdemir, M. A., Tokyay, M. ve Uyan, M., Her yönüyle beton, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, İstanbul, 2004.

Ozyıldırım, Ç., “Laboratory investigation of concrete containing silica fume for use in overlays”, *ACI Materials Journal*, 84(1), 3-7, 1987.

Parande, A. K., Babu, B. R., Karthik, M. A., Deepak Kumaar, K. K. and Palaniswamy, N., “Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar”, *Construction and Building Materials* 22, 127-134, 2008.

Pera, J., “Metakaolin and calcined clays”, *Cement and Concrete Composites* 23, 441-520, 2001.

Poon C. S., Kou S. C. and Lam L., “Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete”, *Construction and Building Materials*, 20(10), 858-865, 2006.

Potgieter-Vermaak, S.S. and Potgieter, J.H. “Metakaolin as an extender in South African cement”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 18 (4), 619–623, 2006.

Prasad, M.S., Reid, K.J. and Murray H.H., “Kaolin: processing, properties and applications”, *Applied Clay Science* 6(2), 87–119, 1991.

Qian, X. and Li, Z., “The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin”, *Cement and Concrete Research* 31, 1607–1611, 2001.

Rashad, A.M., “Metakaolin as cementitious material: history, scours, production and composition –a comprehensive overview”, *Construction and Building Materials* 41, 303-318, 2013.

Rashiddadash, P., Ramezaniapour, A.A. and Mahdikhani, M., “Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice”, *Construction and Building Materials*, 51, 313–320, 2014.

Roy, D. M., Ajunan, P. and Silsbee, M. R., “Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete”, *Cement and Concrete Research* 31, 1809–1813, 2001.

Sandvick, M. and Gjorv, O. V., “Prediction of strength development for silica fume concrete”, *ACI Special Publication*, 132(2), 987-996, 1992.

Sarıdemir, M., “Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete”, *Construction and Building Materials* 49, 484–489, 2013.

Sarıdemir, M., Severcan, M. H. and Çelikten S. “Mechanical properties of SFRHSC with metakaolin and ground pumice: Experimental and predictive study”, *Steel and Composite Structures*, 23(5), 543-555, 2017.

Sarıdemir, M., Severcan, M. H., Ciflikli, M., Çelikten, S., Ozcan F. and Atis C. D., “The influence of elevated temperature on strength and microstructure of high strength concrete containing ground pumice and metakaolin”, *Construction and Building Materials*, 124, 244–257, 2016.

Saridemir, M., Severcan, M.H., Ciflikli, M., Celikten, S., Ozcan, F., Atis, C.D., “The influence of elevated temperature on strength and microstructure of high strength concrete containing ground pumice and metakaolin”, *Construction and Building Materials*, 124, 244-57, 2016.

Sellevold, E. J., Bager, D. H., Jensen, E. K. and Knudsen, T., “Silica fume cement paste - hydration and pore structure”, in: O.E. Gjorv, K.E. Loland (Eds.), *Condensed Silica Fume in Concrete*, University of Trondheim, Norway, s. 19-50, 1982.

Şengün, N., Pomzanın hafif harç yapımında endüstriyel hammadde olarak kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, s.9-14, 2004.

Seyhan, İ., “Volkanik kaolin oluşumu ve andezit problemleri”, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* 76, 124-134, 1971.

Shafaatian, S.M.H., Akhavan, A., Maraghechi, H. and Rajabipour F., “How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)?”, *Cement and Concrete Composites*, 37, 143-53, 2013.

Shannag, M. J., “High Strength concrete containing natural pozzolan and silica fume”, *Cement and Concrete Composites*, 22(6), 399-406, 2000.

Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A. and Mobasher B., “Transport properties in metakaolin blended concrete”, *Construction and Building Materials* 24, 2217-2223, 2010.

Shia, X., Yanga, Z., Liua, Y. and Cross, D., “Strength and corrosion properties of Portland cement mortar and concrete with mineral admixtures”, *Construction and Building Materials*, 25(8), 3245-56, 2011.

Shizawa, M., Joe, Y., Takesue, S. and Urakawa, Y., “Study on hydration properties of slag and silica fume blended cement for ultra-high strength concrete”, *9th International Congress on the Chemistry of Cement*, 4, s. 658-664, 1992.

Shvarzman, A., Kovler, K., Grader, G.S. and Shter, G.E., “The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite”, *Cement and Concrete Research*, 31, 405-16, 2003.

Siddique, R. and Kadri, E-H., “Effect of metakaolin and foundry sand on the near surface characteristics of cofncrete”, *Construction and Building Materials* 25, 3257–3266, 2011.

Siddique, R. and Klaus, J., “Influenceofmetakaolinonthe propertiesofmortarand concrete: areview”, *Applied Clay Science* 43, 392-400, 2009.

Singh, M. and Garg M., “Reactive pozzolana from Indian clays-their use in cement mortars”, *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1903–1907, 2006.

Skjeggerud, K. Retelius, A. Virtanen, J. and Laaksonen, J., “Durability of silica fume concrete: Effect of curing conditions”, *4th Canmet/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Istanbul, Turkey, 1992, Supplementary Papers, s. 513-534, 1992.

Soğancı A.S., Nevşehir bölgesinde bulunan pomzaların taşıma gücü ve oturma yönünden geoteknik özelliklerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s.36-37, 2011.

Sun, S.H., Ma, J.T., Pang, X.M., Sun, Y.T. and Wang, S.L., “Sulfur reduction additive prepared from acid-modified kaolin”, *Bulletin of the Catalysis Society of India* 4, 72-78, 2005.

Tafraoui A., Escadeillas G., Lebaili S. and Vidal T., “Metakaolin in the formulation of UHPC”, *Construction and Building Materials*, 23(2), 669–674, 2009.

Tevrizci, M. M., Metakaolin katkılı harçların bazı durabilite özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, s.8-9, 2010.

Toutanji, H. and Bayasi, Z., “Effect of curing procedures on properties of silica fume concrete”, *Cement and Concrete Research*, 29(4), 497-501, 1999.

Toutanji, H., Delatte, N., Aggoun, S., Duval, R. and Danson, A., “Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete”, *Cement and Concrete Research*, 34(2), 311-319, 2004.

Tozan, G., Kaolendeki alüminyumun hidroklorik asit çözeltilerinde çözünme kinetiğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1995

TS 3502, Betonda statik elastisite modülü ve poisson oranı tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1981.

TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS EN 1097-6/A, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler -bölüm 6: tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2007.

TS EN 12350-2, Beton-taze beton deneyleri-Bölüm 2: çökme (slump) deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12350-6, Beton-taze beton deneyleri-Bölüm 6: yoğunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12390-3, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12390-5, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12390-6, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12390-9, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 9: Donma çözülme direnci-Yüzeysel kabuk atma (yüzeysel yıpranma), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.

TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: genel çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.

TS EN 934-2+A1, Kimyasal katkıları-Beton, harç ve şerbet için-Bölüm 2: beton kimyasal katkıları-tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2013.

Tuncer, G., “Türkiye seramik hammaddelerine genel bir bakış”, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 16-17, 1997.

Türkel, S. ve Kadiroğlu, B., “Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 13(3), 353-359, 2007.

Uyan, M., Pekmezci, B. Y. ve Yıldırım H., “Akışkanlaştırıcı katkı, kür ve koşullarının betonun geçirimsizlik özellikleri üzerine etkileri”, *SİKA Teknik Bülten 1*, 10-14, 2003.

Velosa, A. L., Rocha, F. and Veiga, R., “Influence of chemical and mineralogical composition of Metakaolin on mortar characteristics”, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 6 (153),121–126, 2009.

Vu, D.D., Strength properties of metakaolin-blended paste, mortar and concrete, *Delft University Press*, Netherlands, 2002.

Vuk, T., Gabrovšek, R. and Kaučič, V., “The influence of mineral admixtures on sulfate resistance of limestone cement pastes aged in cold MgSO<sub>4</sub> solution”, *Cement and Concrete Research*, 32(6), 943-8, 2002.

Wild, S., Khatib, J.M. and Jones, A., “Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in süper plasticised metakaolin concrete”, *Cement and Concrete Research*, 26 (10), 1537–1544, 1996.

Wong H. S. and Razak H. A., “Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance”, *Cement and Concrete Research*, 35(4), 696-702, 2005.

Wu, Y. and Wu, B., “Residual compressive strength and freeze–thaw resistance of ordinary concrete after high temperature”, *Construction and Building Materials*, 54, 596–604, 2014

Yapa, N., Alunitli kaolenlerin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul,1993.

Yazıcı, H., “The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, 22(4), 456–462, 2008.

Yazıcı, Ş., Anuk, D. ve Arel, H.Ş., “Metakaolin kullanımının harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi”, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(2), 13-24, 2010.

Yazıcı, S., Inan, G., Tabak, V., “Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC”, *Construction and Building Materials*, 21, 1250-3, 2007.

Yazıcıoğlu, S. ve Bozkurt, N., “Pomza taşı ile elde edilen taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin araştırılması”, *Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi*, 153-157, Isparta, 2005.

Yazıcıoğlu, S. ve Demirel, B., “Puzolanik katkı maddesi olarak kullanılan Elazığ yöresi pomzasının ilerleyen kür yaşlarında betonun basınç dayanımına etkisi”, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18 (3), 367-374, 2006.

Yazıcıoğlu, S., Arıcı, E. ve Gönen, T., “Pomza taşının kullanım alanları ve ekonomiye etkisi”, *Fırat Üniversitesi DAUM Dergisi 1*, 118-123, 2003.

Yeğinobalı, A. ve Erdoğdu, K., “Çimento ve betonda mineral katkıları”, *Nuh Dünyası*, Şubat-Haziran, s. 40-45, 2001.

Yeğinobalı, A., “Silis dumanının betonda katkı maddesi olarak değerlendirilmesi”, *Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 18-19 Kasım, Ankara, s. 149-167, 1993.

Yeğınobalı, A., “Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, s. 64, 2002.

Yeğınobalı, A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge*, Ankara, 2007.

Yıldırım, A. N., “Pomza ve uçucu kül kullanılarak imal edilen hafif betonların agresif su ortamlarında mekanik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s. 118, 2007.

Yıldız, K. and Uğur, L. O., “The effect of mineral admixture type on the modulus of elasticity of high strength concrete”, *Scientific Research and Essay*, 4(8), 791-798, 2009.

Yıldız, K., Pomza ve zeolit katkılı yüksek dayanımlı betonların asit ve tuz etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2009.

Yogendran, V. F., “Silica fume in high strength concrete”. *ACI Materials Journal*, 84(2), 124-129, 1987.

Yüksel, İ., Bilir, T. and Özkan, Ö., “Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate”, *Building and Environment*, 42, 2651-2659, 2007.

Zhang, P., Li, Q.-f., “Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume”, *Composites: Part B*, 45, 1587-94, 2013.

## ÖZ GEÇMİŞ

Faruk SOYSAT 24.12.1988 tarihinde Sungurlu-ÇORUM'da doğdu. İlk orta ve lise eğitimini Sungurlu'da tamamladı. 2008 yılında başladığı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında Çorum Belediyesi İmar İşleri Müdürlüğü'nde mühendis olarak göreve başladı. 2018 yılında zorunlu askerlik görevi için 6 ay görevine ara verdikten sonra Çorum Belediyesi Yapı Kontrol Müdürlüğü'nde mühendis olarak görevine devam etmektedir. 2013 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'ndaki Yüksek Lisans eğitimine başladı.

## TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 2 (iki) adet uluslararası makale üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Sarıdemir M., Çiflikli M., Soysat F., “Mechanical and microstructural properties of HFRHSCs containing metakaolin subjected to elevated temperatures and freezing-thawing cycles”. *Construction and Building Materials*, 174, 507–519, 2018.

Çiflikli M., Sarıdemir M., Soysat F., “Adverse effects of high temperatures and freeze-thaw cycles on properties of HFRHSCs containing silica fume and metakaolin”. *Construction and Building Materials*, 158, 11–23, 2018.

