

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

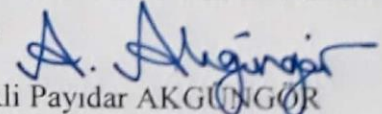
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
DOKTORA TEZİ**

**YÜKSEK KOMPASİTELİ ÇİMENTO BAĞLAYICILI SİSTEMLER İÇİN  
UÇUCU KÜL TANE BOYUT DAĞILIMLARININ OPTİMİZASYONU**

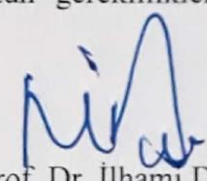
**ÖZER SEVİM**

**OCAK 2018**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Özer SEVİM** tarafından hazırlanan **YÜKSEK KOMPASİTELİ ÇİMENTO BAĞLAYICILI SİSTEMLER İÇİN UÇUCU KÜL TANE BOYUT DAĞILIMLARININ OPTİMİZYONU** adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

  
Prof. Dr. Ali Payıdar AKGÜNGÖR  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

  
Prof. Dr. İlhami DEMİR  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN

Üye (Danışman) : Prof. Dr. İlhami DEMİR

Üye : Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

Üye : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

...../...../2018

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### YÜKSEK KOMPASİTELİ ÇİMENTO BAĞLAYICILI SİSTEMLER İÇİN UÇUCU KÜL TANE BOYUT DAĞILIMLARININ OPTİMİZASYONU

SEVİM, Özer

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlhami DEMİR

Ocak 2018, 188 Sayfa

Bir cismin mukavemeti, içinde bulunduğu boşluklarla doğrudan ilişkilidir. Boşluk oranı fazla yani porozitesi yüksek ise malzemenin mukavemeti düşük olur. Betonda da aynı durum geçerlidir. Betonda porozitenin düşük yani kompasitenin yüksek olması, içinde bulunan agreganın kompasitesinin yüksek olmasıyla ilişkilidir. Granülometrik bileşim bazı durumlarda porozitenin yüksek olmasına, bazı durumlarda ise kompasitenin yüksek olmasına neden olmaktadır. Düşük kompasiteli bir agrega ile beton üretilecek ise fazla miktarda boşluğun doldurulması için bağlayıcı malzemenin artırılması gerekecektir. İyi bir beton üretimi için yeterli doluluk oranını sağlayacak agrega granülometrisi seçilmesi gerekmektedir. Agregalarda bu durum önemsenmektedir. Fakat uçucu kül gibi puzolanik malzemelerde toz malzeme gradasyonu göz ardı edilmektedir. Agregalarda olduğu gibi toz malzemelerde de iyi bir gradasyon olmadığı sürece boşluk oranları fazla olacak ve hidrasyon sonucu elde edilen ürünler boşlukların tamamını dolduramayacaktır.

Bu çalışmada vakumlu elek yardımıyla farklı biçimlerde uçucu kül tane boyut dağılımları Funk ve Dinger tarafından önerilen denklemde farklı q dağılım modülüne göre oluşturulmuş, oluşturulan uçucu kül tane boyut dağılımlarının 7, 28 ve 90 günlük uçucu kül ikameli çimento harcı basınç ve eğilme dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Optimum uçucu kül gradasyonunun etkisini görebilmek için uçucu kül ikameli çimento harçları, mikro-yapısal olarak Elektron Tarayıcı Mikroskop (SEM) ile

incelenmiştir. Optimum tane dağılımı belirlenen uçucu külün çimento harcında farklı ikame oranlarında hızlı klorür iyonu geçirimsiliği, su emme özellikleri ve kılcal geçirgenlik özelliklerine bakılarak durabilite özellikleri incelenmiştir.  $q=0.4$  dağılım modülünde en iyi mekanik ve durabilite sonuçları elde edilmiştir. SEM görüntülerinde  $q=0.4$  dağılım modülüne karşılık gelen çimento harçlarında C-S-H jellerinin çok yoğun olduğu görülmüştür. Optimum uçucu kül ikameli çimento harçları ve optimizasyonsuz uçucu kül ikameli çimento harçlarının su emme özellikleri ve kılcal su emme katsayıları incelendiğinde optimum uçucu kül ikameli harçların su emme yüzdelерinin ve kılcal su emme katsayılarının daha düşük olduğu görülmüştür. Hızlı klorür iyonu geçirimsilik sonuçları karşılaştırıldığında 90 günde optimize edilen uçucu kül ikameli harçların optimizasyonsuz uçucu kül ikameli harçlara göre hızlı klorür iyonu geçirimsiliği %39.1 oranlarına varan iyileşmeler göstermiştir. Deneysel sonuçlar ile doğrulanan yüksek kompakteyi sağlayan uçucu kül optimizasyonu betonda dayanım ve dayanıklılığa büyük katkı sağlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Çimento Harcı, Uçucu Kül, Parçacık Tane Dağılımı, Basınç ve Eğilme Dayanımı, Durabilite.

## **ABSTRACT**

### **OPTIMIZATION OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS OF FLY ASH FOR CEMENTITIOUS SYSTEMS WITH HIGH COMPACTNESS**

SEVİM, Özer

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlhami DEMİR

January 2018, 188 pages

The strength of an object is related to the number of pores in it. An object with a high ratio of pores (with high porosity) can be of low strength. This is also valid for concrete material. Low porosity and high compactness of concrete are in relation with the high degree of compactness of aggregate within the concrete. Depending on the granulometry, either porosity or compactness can be high. If concrete with low compactness of aggregates will be produced, an increase in the amount of binder is needed for filling the higher number of pores. A suitable aggregate granulometry fulfilling the compactness requirement needs to be selected for the production of high-quality concrete. A suitable granulometry is considered to be important for aggregates. However, considering pozzolanic materials such as fly ash, gradation of powdery materials is generally disregarded. Unless a suitable gradation similar to that of aggregates is also achieved for powdery materials, the ratio of pores will be high and hydration products will be insufficient to completely fill the pores in concrete.

In this study, with the help of vacuum sieve, different fly ash particle size distributions following the equation suggested by Funk and Dinger were formed in accordance with different  $q$  distribution modulus and the effects of these distributions on the 7-, 28- and 90-day compressive and flexural strengths of cement mortars with fly ash replacement were investigated. To monitor the influence of optimal fly ash gradation on the microstructural properties of cement mortars with fly ash replacement, Scanning

Electron Microscopy (SEM) was used. After deciding the optimal fly ash gradation, durability properties of cement mortars with different fly ash replacement ratios were evaluated by rapid chloride permeability, water absorption and capillary absorption. The best mechanical and durability properties were obtained for the fly ash distribution modulus ( $q$ ) of 0.4. In accordance with the SEM images, formation of C-S-H gels for the cement mortars with “ $q$ ” of 0.4 was found to be relatively dense. When the water absorption and capillary absorption properties of cement mortars with and without optimal fly ash were examined, it was found that water absorption percentages and capillary water absorption coefficients of mortars with optimal content of fly ash were lower. 90-day rapid chloride permeability results of cement mortars with optimal fly ash were able drop up to 39.1% compared to those without. It is believed that optimization of fly ash which provides high compactness as confirmed by the experimental results will greatly contribute to the strength and durability characteristics of concrete material.

**Keywords:** Cement Mortar, Fly Ash, Particle Size Distributions, Compressive and Flexural Strength, Durability.

## TEŞEKKÜR

Kırıkkale Üniversitesi'nde akademisyenlik yaptığım ilk andan itibaren değerli fikirlerini, bilgilerini, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. İlhami DEMİR'e yürekten teşekkür ederim. Hocamın işine olan aşkı, bitmek bilmeyen enerjisi, bana her zaman kendi oğlu gibi yaklaşması benim için başlı başına ilham kaynağı olmuştur. Buradan kendisine ömür boyu minnettar kalacağımı belirtmek isterim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 215M081 numaralı araştırma projesi kapsamında tamamlanan tez çalışmam sırasında mali desteğini esirgemeyen TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarım sırasında yardımcı olan Hasanoğlu Votorantim Çimento'ya teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarım süresince ilk andan itibaren değerli fikirlerini, yardımlarını, bilgilerini esirgemeyen işine olan ilgisi ve çok çalışmasıyla kendini hayran bırakan Sayın Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN'a, tezimin izlenmesi ve değerlendirilmesi süresince desteklerini esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e ve tez jürime katılarak değerli fikirlerini sunan Sayın Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN'a ve Sayın Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na teşekkür ederim. Ayrıca her konuda yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. İlker KALKAN'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Gürkan YILDIRIM'a, çalışma arkadaşlarıma ve Fen Bilimleri Enstitüsü çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak uzun doktora çalışmalarım sırasında beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim annem Miyase SEVİM'e, babam Mehmet SEVİM'e, annem Hale TEKİN'e, babam Nihat TEKİN'e, kardeşim Özlem ÖZKAN'a, abim Özgür SEVİM'e, eşim ve hayat arkadaşım Nihan Dila SEVİM'e ve hayatıma renk ve huzur katan oğlum Toprak SEVİM'e teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ÖZET</b> .....                                                                                 | i   |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                                                             | iv  |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....                                                                             | vi  |
| <b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....                                                                   | vii |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....                                                                    | ix  |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....                                                                      | xi  |
| <b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....                                                                      | xv  |
| <b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....                                                                   | xv  |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                                                             | 1   |
| <b>2. PUZOLANLAR</b> .....                                                                        | 5   |
| 2.1 Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması.....                                                 | 5   |
| 2.1.1. Doğal Puzolanlar.....                                                                      | 6   |
| 2.1.2. Yapay Puzolanlar .....                                                                     | 7   |
| 2.2. Uçucu Kül.....                                                                               | 7   |
| 2.3. Uçucu Kül Tane Dağılımı .....                                                                | 10  |
| <b>3. DENEYSEL PROGRAM</b> .....                                                                  | 15  |
| 3.1. Çalışma Sırasında Kullanılan Malzemeler .....                                                | 15  |
| 3.1.1. Portland Çimentosu (PÇ) .....                                                              | 15  |
| 3.1.2. CEN Referans Kumu .....                                                                    | 17  |
| 3.1.3. Uçucu Kül .....                                                                            | 17  |
| 3.2. Yöntem .....                                                                                 | 19  |
| <b>4. TANE DAĞILIMI OPTİMİZE EDİLMİŞ UÇUCU KÜL İKAMELİ<br/>ÇİMENTO HARÇLARININ TASARIMI</b> ..... | 29  |
| 4.1. Uçucu Kül Tane Dağılımlarının Elde Edilmesi .....                                            | 29  |
| 4.1.1. Giriş .....                                                                                | 29  |
| 4.1.2. Deneysel Çalışmalar .....                                                                  | 29  |
| 4.1.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma .....                                                        | 31  |
| 4.2. Optimum Uçucu Kül Tane Dağılımlarının Elde Edilmesi .....                                    | 34  |
| 4.2.1. Giriş .....                                                                                | 34  |

|                                                                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.2. Deneysel Çalışmalar .....                                                                                                                                      | 35         |
| 4.2.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma .....                                                                                                                            | 36         |
| 4.3. Farklı Tane Dağılım Modülüne Göre Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Mikro-Yapısal Özellikleri .....                                                          | 68         |
| 4.3.1. Giriş .....                                                                                                                                                    | 68         |
| 4.3.2. Deneysel Çalışmalar .....                                                                                                                                      | 69         |
| 4.3.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma .....                                                                                                                            | 69         |
| <b>5. OPTİMİZE EDİLMİŞ UÇUCU KÜL İKAMELİ ÇİMENTO HARÇLARININ SU EMME, HACİMSSEL YOĞUNLUK, KILCAL GEÇİRİMLİLİK VE HIZLI KLORÜR İYONU GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ.....</b> | <b>87</b>  |
| 5.1. Su Emme, Hacimsel Yoğunluk, Kılcal Su Emme Katsayısı ve Kılcal Geçirimsellik Özellikleri .....                                                                   | 87         |
| 5.1.1. Giriş .....                                                                                                                                                    | 87         |
| 5.1.2. Deneysel Çalışmalar .....                                                                                                                                      | 88         |
| 5.1.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma .....                                                                                                                            | 89         |
| 5.2. Hızlı Klorür İyonu Geçirimselliği .....                                                                                                                          | 135        |
| 5.2.1. Giriş .....                                                                                                                                                    | 135        |
| 5.2.2. Deneysel Çalışmalar .....                                                                                                                                      | 136        |
| 5.2.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma .....                                                                                                                            | 140        |
| <b>6. SONUÇLAR .....</b>                                                                                                                                              | <b>149</b> |
| 6.1. Uçucu Kül Tane Dağılımlarının Elde Edilmesi .....                                                                                                                | 149        |
| 6.2. Optimum Uçucu Kül Tane Dağılımlarının Elde Edilmesi .....                                                                                                        | 149        |
| 6.3. Farklı Tane Dağılım Modülüne Göre Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Mikro-Yapısal Özellikleri .....                                                          | 151        |
| 6.4. Optimize Edilmiş Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Su Emme, Hacimsel Kuru Yoğunluk ve Kılcal Geçirimsellik Özellikleri.....                                  | 152        |
| 6.5. Optimum Uçucu Kül İçeren Çimento Harçlarının Hızlı Klorür İyonu Geçirimselliği .....                                                                             | 164        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                                                                                | <b>168</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                                                                                  | <b>183</b> |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| ÇİZELGE                                                                                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2.1. Doğal puzolanların kimyasal analizi .....                                                                                   | 6     |
| 2.2. Yapay puzolanların kimyasal analizi .....                                                                                   | 7     |
| 2.3. Kömüre dayalı büyük ölçekli termik santraller .....                                                                         | 8     |
| 2.4. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....                                                                                    | 9     |
| 2.5. Uçucu kül kullanımının beton özelliklerine etkisi .....                                                                     | 10    |
| 3.1. CEM I 42.5 R Çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri .....                                                               | 15    |
| 3.2. Referans kumunun tane dağılımı .....                                                                                        | 17    |
| 3.3. Uçucu kül fiziksel ve kimyasal özellikleri.....                                                                             | 18    |
| 4.1. 0-25, 25-50, 50-63, 63-75 ve 75-90 µm aralıklarında uçucu kül kimyasal özellikleri.....                                     | 30    |
| 4.2. Farklı tane dağılım modülleri için uçucu kül kimyasal ve fiziksel özellikleri..                                             | 31    |
| 4.3. Farklı tane dağılım modülleri için tane dağılım yüzdeleri .....                                                             | 32    |
| 4.4. Çimento harcı karışım oranları .....                                                                                        | 35    |
| 4.5. Tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve standart sapmaları .....   | 37    |
| 4.6. Tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları ve standart sapmaları.....    | 38    |
| 4.7. Tane dağılımı yapılmış %20 UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve standart sapmaları ..... | 40    |
| 4.8. Tane dağılımı yapılmış %20 UK ikameli Çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları ve standart sapmaları.....  | 42    |
| 4.9. Farklı uçucu kül ikameli çimento harçlarının kodlanması.....                                                                | 45    |
| 4.10. Farklı uçucu kül ikameli çimento harçlarının yayılma deneyi sonuçları .....                                                | 46    |
| 4.11. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları .....                                                  | 47    |
| 4.12. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları.....                                                   | 49    |
| 4.13. 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları .....                                                 | 51    |
| 4.14. 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları.....                                                  | 53    |
| 4.15. 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları .....                                                 | 55    |
| 4.16. 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları.....                                                  | 58    |

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.17. Optimizasyonsuz ve optimizasyonlu UK ikameli çimento harçlarının farklı yaşlardaki basınç dayanımları ..... | 61  |
| 4.18. Optimizasyonsuz ve optimizasyonlu UK ikameli çimento harçlarının farklı yaşlardaki eğilme dayanımları ..... | 63  |
| 5.1. 7, 28 ve 90 günlük su emme yüzdeleri.....                                                                    | 90  |
| 5.2. 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası su emme yüzdeleri.....                                             | 95  |
| 5.3. 7, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluk değerleri .....                                                    | 101 |
| 5.4. 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri.....                                              | 106 |
| 5.5. 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri ....                                   | 111 |
| 5.6. 7, 28 ve 90 günlük görünür yoğunluk değerleri.....                                                           | 116 |
| 5.7. 7, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacmi değerleri.....                                                     | 119 |
| 5.8. 7, 28 ve 90 günlük 1 saat kılcal su emme katsayı değerleri.....                                              | 125 |
| 5.9. 7, 28 ve 90 günlük 2 saat kılcal su emme katsayı değerleri.....                                              | 130 |
| 5.10. Coulomb değerlerine göre hızlı klorür iyonu geçirimsliliği sınıfları.....                                   | 140 |
| 5.11. 7, 28 ve 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsliliği değerleri.....                                         | 141 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| ŞEKİL                                                                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2.1. Puzolanların Sınıflandırılması.....                                                                                | 6     |
| 3.1. CEM I 42.5 R Portland çimentosunun (a) dijital kamera ve (b) SEM görüntüsü .....                                   | 16    |
| 3.2. Vakumlu elek ile elde edilen çimento tanecik boyut dağılımı .....                                                  | 16    |
| 3.3. C-sınıfı uçucu kül taneciklerinin (a) dijital kamera ve (b) SEM görüntüsü.....                                     | 18    |
| 3.4. Mastersizer ve vakumlu elek ile elde edilen uçucu kül tanecik dağılımı.....                                        | 19    |
| 3.5. Vakumlu elek sistemi.....                                                                                          | 20    |
| 3.6. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deney düzeneği .....                                                             | 25    |
| 3.7. Kılcal geçirimsizlik deney düzeneği .....                                                                          | 28    |
| 4.1. Farklı dağılım modülleri için tane dağılım eğrileri .....                                                          | 33    |
| 4.2. Tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları yüzde değişimi ..... | 37    |
| 4.3. Tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları.....                 | 39    |
| 4.4. Tane dağılımı yapılmış %20 UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları .....              | 41    |
| 4.5. Tane dağılımı yapılmış %20 UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları.....               | 43    |
| 4.6. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları .....                                          | 48    |
| 4.7. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımlarının yüzde değişimi .....                        | 48    |
| 4.8. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları.....                                           | 50    |
| 4.9. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarının yüzde değişimi .....                        | 50    |
| 4.10. 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları .....                                        | 52    |
| 4.11. 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımlarının yüzde değişimi .....                      | 52    |
| 4.12. 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları.....                                         | 54    |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.13. 28 günlük optimum UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarının yüzde değişimi .....               | 54 |
| 4.14. 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları .....                          | 56 |
| 4.15. 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımlarının yüzde değişimi .....        | 56 |
| 4.16. 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları.....                           | 58 |
| 4.17. 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarının yüzde değişimi .....        | 59 |
| 4.18. Optimizasyonsuz ve optimizasyonlu UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı-yaş ilişkisi ..... | 62 |
| 4.19. Optimizasyonsuz ve optimizasyonlu UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımı-yaş ilişkisi ..... | 64 |
| 4.20. Dağılım modülü 0.1 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x .....                    | 71 |
| 4.21. Dağılım modülü 0.2 için SEM görüntüleri a) 800x b) 1600x c) 3200x d) 6000x .....                    | 73 |
| 4.22. Dağılım modülü 0.3 için SEM görüntüleri a) 1000x b) 2000x c) 4000x d) 8000x .....                   | 74 |
| 4.23. Dağılım modülü 0.4 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x .....                    | 76 |
| 4.24. Dağılım modülü 0.5 için SEM görüntüleri a) 4000x b) 8000x c) 15000x d)30000x .....                  | 77 |
| 4.25. Dağılım modülü 0.6 için SEM görüntüleri a) 2000x b) 4000x c) 8000x d) 15000x .....                  | 79 |
| 4.26. Dağılım modülü 0.7 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x .....                    | 80 |
| 4.27. Dağılım modülü 0.8 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x .....                    | 82 |
| 4.28. Dağılım modülü 0.9 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x .....                    | 83 |
| 4.29. Dağılım modülü 1.0 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x .....                    | 85 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. a) 50×50×50 mm boyutlarındaki prizmatik çimento harçlarının sürekli su kürüne maruz bırakılmaları b) Kalıptan çıkartıldıktan sonraki görüntüsü..... | 89  |
| 5.2. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük su emme yüzde değişimleri.                                                                           | 91  |
| 5.3. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük su emme yüzde değişimleri                                                                           | 92  |
| 5.4. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük su emme yüzde değişimleri                                                                           | 93  |
| 5.5. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük kaynama kür sonrası su emme yüzde değişimleri .....                                                  | 96  |
| 5.6. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük kaynama kür sonrası su emme yüzde değişimleri .....                                                 | 97  |
| 5.7. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük kaynama kür sonrası su emme yüzde değişimleri .....                                                 | 98  |
| 5.8. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk yüzde değişimleri.....                                                        | 102 |
| 5.9. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük hacimsel kuru yoğunluk yüzde değişimleri.....                                                       | 103 |
| 5.10. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük hacimsel kuru yoğunluk yüzde değişimleri.....                                                      | 104 |
| 5.11. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri .....                                               | 107 |
| 5.12. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri .....                                              | 108 |
| 5.13. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri .....                                              | 109 |
| 5.14. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri .....                                    | 112 |
| 5.15. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri.....                                    | 113 |
| 5.16. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri.....                                    | 114 |
| 5.17. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük görünür yoğunluk yüzde değişimleri.....                                                            | 117 |
| 5.18. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük geçirgen gözenek hacmi yüzde değişimleri.....                                                       | 120 |

|                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.19. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük geçirgen gözenek hacmi yüzde değişimleri.....                                                                                  | 121 |
| 5.20. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük geçirgen gözenek hacmi yüzde değişimleri.....                                                                                  | 122 |
| 5.21. Kılcal su emme katsayısı belirleme deney düzeneği.....                                                                                                                         | 124 |
| 5.22. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük 1 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri .....                                                                      | 126 |
| 5.23. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük 1 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri .....                                                                     | 127 |
| 5.24. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük 1 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri .....                                                                     | 128 |
| 5.25. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük 2 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri .....                                                                      | 131 |
| 5.26. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük 2 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri .....                                                                     | 132 |
| 5.27. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük 2 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri .....                                                                     | 133 |
| 5.28. Ø100×200 mm silindir çimento harçları orta kısımlarından olgunlaştırma sonrası 50 mm uzunluğunda kesilen hızlı klorür iyonu geçirimsizliği çimento harcı deney örnekleri ..... | 137 |
| 5.29. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği çimento harç örneklerinin 0.30 N NaOH çözeltisi ve %3 NaCl çözeltisi ile deney hücrelerinin hazırlanması.....                                | 138 |
| 5.30. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği numune kanalları ve bağlı olduğu veri kaydedici .....                                                                                        | 139 |
| 5.31. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği yüzde değişimleri .....                                                                       | 142 |
| 5.32. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği yüzde değişimleri .....                                                                      | 143 |
| 5.33. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği yüzde değişimleri .....                                                                      | 144 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER DİZİNİ

|             |                                                                     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|
| $A_s$       | Çimento harcının suya temas ettirilen yüzeyinin brüt alanı          |
| $C_{w,s}$   | Çimento harcının kapiler(kılcal) su emme katsayısı                  |
| $m_{dry,s}$ | Çimento harcının kurutma sonrası kütlesi                            |
| $m_{so,s}$  | Çimento harcının (t) süreyle suya temas ettirdikten sonraki kütlesi |
| $t_{so}$    | Çimento harcının suya temas ettirilme süresi                        |
| A           | Çimento harcının etüv kurusu ağırlığı                               |
| B           | Çimento harcının doymuş kuru yüzey ağırlığı                         |
| C           | Çimento harcının 5 saat kaynatılmış ağırlığı                        |
| D           | Uçucu kül tane dağılımı için elek çapı                              |
| D           | Çimento harcının su içindeki ağırlığı                               |
| $D_{maks}$  | Uçucu kül için maksimum tane çapı                                   |
| $D_{min}$   | Uçucu kül için minimum tane çapı                                    |
| $g_1$       | Hacimsel kuru yoğunluk                                              |
| $g_2$       | Görünür yoğunluk                                                    |
| $\emptyset$ | Çimento harcının çapı                                               |
| $P(D)$      | D boyutundaki elek çapından küçük toplam malzeme oranı              |
| q           | Dağılım Modülü                                                      |
| $\rho$      | Suyun özgül ağırlığı                                                |

### KISALTMALAR DİZİNİ

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| $Al_2O_3$ | Alüminyum Oksit      |
| C         | Coulomb              |
| $C_2S$    | Dikalsiyum Silikat   |
| $C_3A$    | Trikalsiyum Aluminat |
| $C_3S$    | Trikalsiyum Silikat  |

|                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| $C_4AF$                        | Tetrakalsiyum Aluminoferrit  |
| C-A-H                          | Kalsiyum Alüminyum Hidrat    |
| CaO                            | Kalsiyum Oksit               |
| CH                             | Sönmüş Kireç                 |
| CO <sub>2</sub>                | Karbondioksit                |
| CSH                            | Kalsiyum Silika Hidrat       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Demir Oksit                  |
| K <sub>2</sub> O               | Potasyum Oksit               |
| MgO                            | Magnezyum Oksit              |
| Na <sub>2</sub> O              | Sodyum Oksit                 |
| NaCl                           | Sodyum Klorür                |
| NaOH                           | Sodyum Hidroksit             |
| PÇ                             | Portland Çimentosu           |
| SEM                            | Taramalı Elektron Mikroskobu |
| SiO <sub>2</sub>               | Silisyum Oksit               |
| SO <sub>3</sub>                | Kükürt                       |
| UK                             | Uçucu Kül                    |
| V                              | Volt                         |

## 1. GİRİŞ

Beton kabaca agrega, su, çimento ve gerektiğinde mineral ve kimyasal katkılardan oluşan, yeterli işlenebilirliğe sahip, zamanla su ile tepkimeye girerek hidrasyon adı verilen olay ile dayanım kazanan kompozit bir yapı malzemesidir. Betonun üretimi için gerekli bileşenlerin kolay elde edilmesi, betonun çok yönlü kullanım kolaylığı, her yerde üretilebilir olması, dayanıklılığı, üretimi sırasında az enerji tüketilmesi, estetik oluşu ve en önemlisi ekonomik olarak çok uygun elde edilmesi betonu en çok tercih edilen yapı malzemesi haline getirmiştir. Dünyada sürekli artan nüfus ve artan sanayileşme nedeni ile beton malzemelerinin üretimi her geçen gün daha da artacaktır.

Beton üretiminde kullanılan en önemli malzeme çimentodur. Çimento kabaca, kil ile kalkerin belirli oranlarda karıştırılıp belirli boyutlara gelinceye kadar kırıldıktan sonra döner fırınlarda 1300 °C ila 1450 °C arasında pişirilerek ortaya çıkan klinkerin hızlı soğutulup içerisine %3-6 oranında alçı taşı ilave edilip öğütülerek elde edilen su ile sertleşen hidrolik bir bağlayıcıdır. Klinker üretiminde kullanılan hammaddeler, portland çimentosu üretiminde kullanılan hammaddelerin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Klinkerde yer alan oksitlerden kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ), hammadde karışımındaki kalkerden, silisyum oksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ise kilden elde edilmektedir. Hammaddelerin içerisinde bir miktar demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) bulunmaktadır. Bu dört oksit, çimentonun ana bileşenlerini oluşturan ana oksitleridir. Hammaddelerin karışımının döner fırında pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan ve klinkerin yapısını oluşturan ana bileşenler dikalsiyum silikat ( $\text{C}_2\text{S}$ ), trikalsiyum silikat ( $\text{C}_3\text{S}$ ), trikalsiyum aluminat ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ve tetrakalsiyum aluminoferrit ( $\text{C}_4\text{AF}$ )'dir. Çimento hamuru veya beton elde edebilmek için, çimento ve su bir araya getirilir getirilmez, her ana bileşen ile su ayrı ayrı tepkimeye girmekte ve her ana bileşenin tepkime hızı, tepkime sırasında açığa çıkan ısı ve tepkime sonrasında oluşan ürünlerin çimento hamurunun bağlayıcı özelliğine katkısı farklı olmaktadır. Çimento hamurunun kazanabileceği nihai dayanım,  $\text{C}_3\text{S}$  ve  $\text{C}_2\text{S}$  gibi kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidrasyonu sonucunda oluşmaktadır [1-3]. Beton inşaat endüstrisinde çok önemli bir popülariteye sahip olmasına rağmen, her anlamda kusursuz bir yapı malzemesi değildir. Çimento beton üretiminde maliyeti oluşturan en önemli malzeme olmasının

yanında üretimi sırasında doğaya yaydığı karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) oranı, insan tarafından salınan  $\text{CO}_2$  oranının yaklaşık %5'i seviyelerindedir. Bu nedenden dolayı çimento tasarrufu yaparak karbondioksit salınımını azaltmak ve aynı zamanda ekonomik olarak tasarruf sağlamak için çok sayıda araştırmalar yapılmaktadır. Bunlardan biriside çimento yerine ikame olarak puzolan kullanımıdır.

ASTM C 618'e göre kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri çok az olan ya da hiç olmayan, çimento gibi bağlayıcılarla bağlayıcılık özelliği kazanan silis ve alümin içerikli maddelere puzolan denilmektedir [4-8]. Puzolanların yapısında büyük oranda yer alan silis ve alüminyum oksitinin yanı sıra demir oksit, kalsiyum oksit ve magnezyum oksit gibi oksitler bulunmaktadır. Puzolanik malzemelerin çimento gibi bağlayıcı bir malzeme ile iyi bir bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için yüksek oranda silika içermeli ve inceliği çimento inceliğine yaklaşık veya yüksek olmalıdır [9]. Yan sanayi ürünü birçok endüstri atığı puzolan özelliği göstermektedir. Bunlar kalsinasyon işlemi ile elde edilen yapay puzolanlardır. Beton üretiminde kullanılabilecek yan sanayi ürünü puzolanik malzemeler konusunda çok sayıda araştırmalar yapılmış olup beton üretiminde dayanım ve durabilite gibi özellikleri artırmak için başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Bunlardan biriside termik santral atığı olan uçucu küllerdir [10-13]. Bu malzemeler çimentonun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireci (CH) bağlayarak azaltmakta aynı zamanda serbest kireç ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği sağlayan kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jellerine dönüştürmektedir. Serbest halde bulunan ve çözünmesiyle kalıcılık özelliğini azaltan serbest kireç ile tepkimeye girerek azaltmasından dolayı betonun dayanıklılığını (durabilite) artırmada önemli fayda sağlamaktadır. Çimento hamuru agrega ara yüzeyinde bulunan serbest kireç ile tepkimeye giren puzolanlar çimento hamuru agrega ara yüzeyini de iyileştirmektedirler.

Puzolanlar çimentoya farklı ikame oranlarında katılarak çevreye karbondioksit salınımını azaltmakta ve çimentodan tasarruf ile ekonomik kazanç sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca ikameli çimento ile üretilen betonların klinker hidrasyonu sonucu oluşan serbest kireç ile tepkimeye girerek sistemin dayanımını artırır ve ortamda serbest kireç miktarı azalması ile betonun dış etkilerle zararlı ürünler oluşturmalarını engellemektedirler. Örneğin uçucu küller betonda su ihtiyacını

azaltır, hidrasyon ısını düşürür, işlenebilirliği artırır ve 90 gün sonrası dayanımı artırabilir [14-15].

Beton üretiminde gradasyon çok önemlidir. Betonda göz ardı edilen diğer bir hususta yüksek doluluk etkisini sağlayacak uygun tane dağılımının agregalarda önemsenip, uçucu kül gibi puzolanik malzemelerde dikkat edilmemesidir. Örneğin incelik arttıkça çimentonun hidrasyon hızı ve dolayısıyla dayanım kazanma hızı da arttığından, çimento inceliğinin beton dayanımına etkisi önemlidir. Tipik olarak çimentonun tane boyutu 5-90  $\mu\text{m}$  civarındadır. Çimento tane boyutlarının çoğunluğu 30  $\mu\text{m}$  civarındadır. Tane miktarları belirleme yöntemlerinden biriside özgül yüzey alanıdır. Özgül yüzey alanı 1 g çimentoda bulunan taneciklerin yüzey alanlarının kapladığı toplam yüzey alanı olup  $\text{cm}^2/\text{g}$  olarak gösterilir. Türkiye’de üretilen çimentoların özgül yüzey alanı 2800 ile 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  civarındadır. Herhangi bir çimentonun özgül yüzey alanı değeri ne kadar az olursa, çimentodaki tanelerin o kadar kalın olduğu anlaşılır. Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar çimento tanelerinin yüzeyinden başlar ve çimento tanesinin hidrasyonu dıştan merkeze doğru gelişir. Hidrasyonun 90 günde %95 oranında tamamlandığı ve bu süre sonunda ancak 5.2  $\mu\text{m}$ ’luk kısmın hidrate olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle tane çapı 10  $\mu\text{m}$  olan bir parçacık tümüyle hidrate olabilir. Çap daha büyük ise orta kısım uzun süre tamamen hidratlanmaz, yani istenilen dayanımı sağlamaz [16]. Bu duruma bakılacak olunursa beton dayanımı üzerinde, inceliğin ve tane dağılımının çok önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.

Bir cismin mukavemeti, içinde bulunduğu boşluklarla doğrudan ilişkilidir. Boşluk oranı fazla yani porozitesi yüksek ise malzemenin mukavemeti düşük olur. Betonlarda da aynı durumdan bahsedebiliriz. Betonda porozitenin düşük yani kompasitenin yüksek olması, içinde bulunan agreganın kompasitesinin yüksek olması ile ilişkilidir. Agreganın kompasitesinin yüksek olması ise granülometrik bileşimin iyi yapılması ile ilişkilidir. Agreganın içindeki tanelerin değişik boyutlarda olması, sabit bir hacim içerisinde yer alan agreganın taneleri arasında daha az boşluk bulunmasına yani doluluk oranının artmasına neden olmaktadır. Granülometrik bileşim bazı durumlarda porozitenin yüksek olmasına, bazı durumlarda ise kompasitenin yüksek olmasına neden olmaktadır. Agreganın granülometrisinin iyi yapılması çimento dozajı üzerinde de

önemli bir etkiye sahiptir. Düşük kompasiteli bir agregaya ile beton üretilecek ise fazla miktarda boşlukların doldurulması için bağlayıcı malzemenin artırılması gerekecektir. İyi bir beton üretimi için yeterli doluluk oranını sağlayacak agreganın granülometrisi seçilmesi gerekmektedir. Agregalarda bu durum önemsizdir. Fakat çimento ve uçucu kül gibi malzemelerde toz malzeme gradasyonu göz ardı edilmektedir. Agregalarda olduğu gibi toz malzemelerde de iyi bir gradasyon olmadığı sürece boşluk oranları fazla olacak ve hidrasyon sonucu elde edilen ürünler boşlukların tamamını dolduramayacaktır. Agregalar için yapılan en iyi gradasyonu elde etme işlemi çimento ve uçucu kül gibi malzemeler içinde yapıldığı takdirde çok az reaksiyon sonucunda oluşacak kimyasal hidrasyon ürünleri bile kolaylıkla tanecikler arası boşlukları doldurup optimum dayanım sağlayabilir.

Bu çalışmanın amacı; uçucu kül vakumlu elek ile elenerek uygun tane boyut dağılımlarını oluşturmak, oluşturulan tane boyut dağılımlarını içeren uçucu kül ikameli çimento harçlarının dayanıma etkisini inceleyerek en uygun tane dağılımını bulmak ve optimum tasarımı veren dağılım modülü elde edildikten sonra farklı ikame oranları için dayanım ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği, su emme, yoğunluk ve kılcal geçirgenlik özelliklerini incelemektir.

Bu çalışma kapsamında vakumlu elek yardımıyla uçucu kül tane boyut dağılımları oluşturulmuş, oluşturulan uçucu kül tane boyut dağılımlarının 7, 28 ve 90 günlük uçucu kül ikameli çimento harcı basınç ve eğilme dayanımına etkisi incelenmiştir. Optimum uçucu kül gradasyonunun etkisini görebilmek için uçucu kül ikameli çimento harçları mikro-yapısal olarak Elektron Tarayıcı Mikroskop (SEM) ile incelenmiştir. Optimum tane dağılımı belirlenen uçucu külün farklı ikame oranlarında hızlı klor iyonu geçirimsizliği, su emme, yoğunluk ve kılcal geçirgenlik özelliklerine bakılarak durabilite özellikleri incelenmiştir.

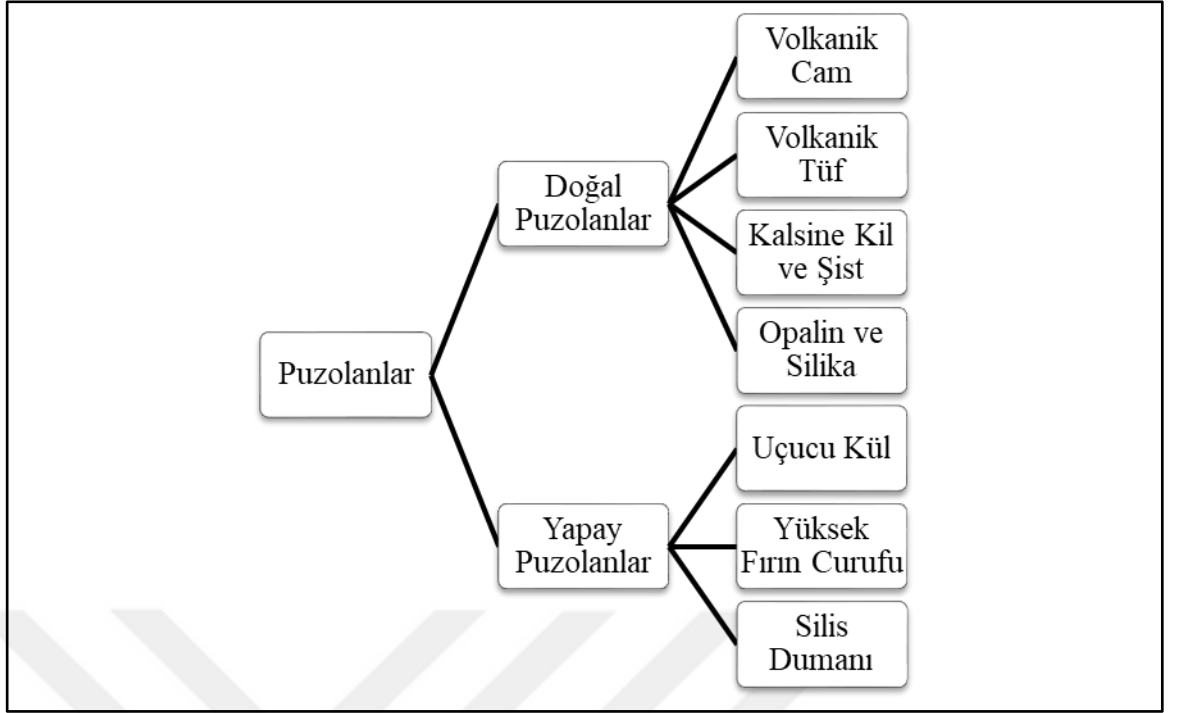
## 2. PUZOLANLAR

### 2.1 Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması

Kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri olmayan fakat çimento gibi başka bir bağlayıcı ile bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelere puzolan denilmektedir. Bu malzemelerin içinde puzolanlara bağlayıcılık özelliği kazandıran kalloidal halde silis ve alümin bulunmaktadır [4-17].

Puzolanlar beton teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte doğal ve yapay olarak betonun fiziksel, mekanik ve kalıcılık özelliklerini geliştiren ve çimento yerine ikame edilmesiyle çimento tasarrufundan dolayı ekonomik olarak katkı sağlayan mineral katkı malzemeleridir. Kullanımı her geçen gün artmaktadır. Mineral katkıları portland çimentosu ile benzer özellikler taşımasına rağmen tek başlarına bağlayıcılık özellikleri olmadıkları için ikincil bağlayıcı malzemeler olarak tanımlanmaktadırlar. Bu malzemeler hidrasyon ürünlerinin oluşumunda puzolanik aktiviteleri ile önemli bir rol oynayarak bağlayıcı hamurun yapısını değiştirerek betonun istenilen özelliklerinde iyileşme gösterirler [18-21].

Yapılan çalışmalar ve araştırmalar ile puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olmak üzere Şekil 2.1’de gösterildiği gibi 2 gruba ayrılmaktadır [22].



**Şekil 2.1.** Pozolanların Sınıflandırılması

### 2.1.1. Doğal Pozolanlar

Herhangi bir yapay işleme maruz kalmadan oluşan volkanik tüfler, volkanik küller, volkanik camlar, diatomlu topraklar doğal pozolanlara örnek olarak verilebilir [1]. Bazı doğal pozolanlara ait kimyasal özellikler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Doğal pozolanların kimyasal analizi [1]

| Doğal Pozolan   | SiO <sub>2</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | CaO (%) | MgO (%) | Alkali (%) |
|-----------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|---------|------------|
| Volkanik Cam    | 65.1                 | 14.5                               | 5.5                                | 3.0     | 1.1     | 6.5        |
| Volkanik Tüf    | 52.1                 | 18.3                               | 5.8                                | 4.9     | 1.2     | 6.6        |
| Diatomlu Toprak | 86.0                 | 2.3                                | 1.8                                | -       | 0.6     | 0.4        |
| Pişirilmiş Kil  | 42.2                 | 16.1                               | 7.0                                | 21.8    | 1.9     | 1.3        |

### 2.1.2. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar endüstride yan ürün olarak elde edilmektedir. Uçucu küller, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, taban külü yapay puzolanlara örnek olarak verilebilir. Bazı yapay puzolanlara ait kimyasal özellikler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Yapay puzolanların kimyasal analizi [1]

| Yapay Puzolan       | SiO <sub>2</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | CaO (%) | MgO (%) | Alkali (%) |
|---------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|---------|------------|
| Uçucu Kül           | 51.5                 | 23.9                               | 6.1                                | 10.5    | 2.4     | 3.1        |
| Yüksek Fırın Cürufu | 40.2                 | 11.0                               | 0.8                                | 34.5    | 9.4     | 3.6        |
| Silis Dumanı        | 93.7                 | 0.3                                | 0.6                                | 0.3     | 0.3     | 0.6        |

### 2.2. Uçucu Kül

Uçucu küller Şekil 2.1’de de görüleceği gibi yapay bir puzolandır. Kömürle çalışan termik santrallerde kömürün yanması sonucu meydana gelen atık kül taneciklerinin bacalardaki elektro filtreler yardımıyla tutulması ile elde edilen üründür. Uçucu küllerin önemli bir kısmı SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’den meydana gelmektedir [23-28]. TS EN 450’ye göre pulverize kömürün yakılması ile elde edilen, puzolanik özelliklere sahip ve önemli kısmı SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’den meydana gelen, reaktif SiO<sub>2</sub> içeriği en az %25 olan küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Uçucu kül linyit ve bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesiyle elde edilir [29].

Günümüzde Türkiye’de kömür ile çalışan 43 büyük ölçekli termik santral bulunmaktadır. Bu termik santraller ait bilgiler ve kurulum yılları Çizelge 2.3’de verilmiştir [30].

**Çizelge 2.3.** Kömüre dayalı büyük ölçekli termik santraller [30]

| Yıl  | Santral Ünitesi     | Kurulu güç (MW) | Yıl  | Santral Ünitesi              | Kurulu güç (MW) |
|------|---------------------|-----------------|------|------------------------------|-----------------|
| 1956 | Tunçbilek A1        | 65              | 1989 | Kangal 1                     | 150             |
| 1957 | Soma A1             | 22              | 1990 | Kangal 2                     | 150             |
| 1958 | Soma A2             | 22              | 1991 | Çatalağzı 2                  | 150             |
| 1973 | Seyitömer 1-2       | 300             | 1991 | Soma B5                      | 165             |
| 1977 | Seyitömer 3         | 150             | 1992 | Orhaneli 1                   | 210             |
| 1977 | Tunçbilek B1        | 150             | 1993 | Soma B6                      | 165             |
| 1978 | Tunçbilek B2        | 150             | 1993 | Kemerköy 1                   | 210             |
| 1981 | Soma B1             | 165             | 1994 | Kemerköy 2                   | 210             |
| 1982 | Soma B2             | 165             | 1995 | Kemerköy 3                   | 210             |
| 1982 | Yatağan 1           | 210             | 1997 | Çayırhan 3                   | 160             |
| 1983 | Yatağan 2           | 210             | 1998 | Çayırhan 4                   | 160             |
| 1984 | Afşin Elbistan A1-2 | 680             | 2000 | Kangal 3                     | 157             |
| 1984 | Yatağan 3           | 210             | 2005 | Afşin-Elbistan B1            | 360             |
| 1985 | Soma B3             | 165             | 2005 | Çan 1-2                      | 320             |
| 1986 | Soma B4             | 165             | 2006 | Afşin Elbistan B2-3-4        | 1080            |
| 1986 | Afşin Elbistan A3   | 340             | 2009 | Silopi Elektrik Asfaltit 1   | 135             |
| 1986 | Yeniköy 1           | 210             | 2015 | Silopi Elektrik Asfaltit 2-3 | 270             |
| 1987 | Afşin-Elbistan A4   | 335             | 2015 | Aksa enerji Göynük 1         | 135             |
| 1987 | Çayırhan 1-2        | 300             | 2016 | Enerji Tufanbeyli 1-2-3      | 450             |
| 1987 | Yeniköy 2           | 210             | 2016 | Aksa enerji Göynük 2         | 135             |
| 1989 | Seyitömer 4         | 150             | 2016 | Naksan-Adularya 1            | 145             |
| 1989 | Çatalağzı 1         | 150             |      |                              |                 |

90'lı yıllarda dünyada üretilen uçucu külün yaklaşık %25'i değerlendirilmekteydi. Almanya, Hollanda, Belçika gibi ülkelerde uçucu kül değerlendirme oranı %95'lerde iken ülkemizde bu oran %1 mertebelerindeydi [31-32]. 2012 itibari ile uçucu külün Türkiye'de kullanımı %10 oranına yükselmiş 2020 yılına kadar ise %30 oranına kadar yükselmesi beklenmektedir [33].

Uçucu kül fiziksel özellikleri termik santrallerde kullanılan kömürün türüne, özelliklerine, yanma özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uçucu kül tane boyutu arttıkça yanma miktarı azalmakta karbon miktarı artmaktadır. Uçucu kül

tane boyutu küçüldükçe yanma çok iyi olmakta karbon miktarı azalmaktadır. Uçucu kül ince tane boyutları gri renkte olup tane boyutu ve karbon miktarı artarsa rengi koyulaşmaktadır. Uçucu kül tane çapları 1-200  $\mu\text{m}$  arasında değişmekte olup yaklaşık %75'i 45  $\mu\text{m}$ 'dan küçüktür [34-38]. Uçucu külün yoğunluğu 2.2-2.7  $\text{g/cm}^3$  civarındadır. Özgül yüzey alanı öğütme işlemine bağlı olarak değişmekle birlikte çimento inceliğine yakındır. Uçucu kül fiziksel özellikleri Çizelge 2.4'de verilmiştir [27, 33].

**Çizelge 2.4.** Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

| Çap ( $\mu\text{m}$ ) | Şekil    | Renk | Yoğunluk( $\text{g/cm}^3$ ) | İncelik ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) |
|-----------------------|----------|------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1-200                 | Yuvarlak | Gri  | 2.2-2.7                     | 2000-3800                          |

ASTM C 618'e göre  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  toplam yüzde miktarı (S+A+F) 70'in üzerinde ise F sınıfı uçucu kül, S+A+F toplamı %50'nin üzerinde ve %70'in altında ise C sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır [4]. F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler ve bitümlü kömürden elde edilirler. Aynı zamanda F sınıfı uçucu küllerin CaO değeri %10'un altındadır ve düşük kireçli olarak da adlandırılır. C sınıfı uçucu küller ise linyit kömüründen elde edilir. C sınıfı uçucu küllerde CaO oranı %10'dan büyük olduğu için kireçli uçucu kül olarak adlandırılabilir. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğinin yanında bağlayıcılık özelliğine de sahiptir [30].

Uçucu külün inşaat sanayinde yaygın olarak kullanıldığı alanların başında çimento ve beton sanayisi gelmektedir. Uçucu küller çimentoda katkı malzemesi, ikame malzemesi ve hammadde olarak kullanılmaktadır [39-40]. Diğer bir taraftan çimento üretimi sırasında önemli miktarda enerji tüketimi yapılmakta ve doğaya karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) gazı salınmaktadır. Çimento üretiminde veya çimento yerine ikame ile uçucu kül kullanılması ile enerji tüketimi azalacak ve havadaki karbondioksit salınımı azalacaktır [39]. Beton sanayinde uçucu kül, betonun fiziksel ve kalıcılık özelliklerini değiştirmek için kullanılır. Geleneksel betonlarda uçucu kül kullanımının betonun özelliklerine etkisi Çizelge 2.5'de verilmiştir [41-56]. Kütle betonlarında ise

hidratasyon ısısını düşürmek için özellikle baraj inşaatlarında kullanılmaktadır. Kütle betonlarında hidratasyon ısısı çok yüksek olmaktadır. Bu nedenle uçucu kül çimento yerine ikame edilerek hidratasyon ısısı azaltılmakta oluşacak rötre çatlakları engellenmektedir. Uçucu kül çimento yerine ikame edilerek erken dayanımı yavaşlatmakta hidratasyon ısısını bu nedenle azaltmaktadır [57-64].

**Çizelge 2.5.** Uçucu kül kullanımının beton özelliklerine etkisi

| <b>Betonun Özelliği</b>                   | <b>Etkisi</b> |
|-------------------------------------------|---------------|
| Sertleşmiş beton erken dayanımını         | Azaltır       |
| Taze betonun priz süresini                | Uzatır        |
| Betonun 90 gün ve daha sonraki dayanımını | Artırır       |
| Taze beton hidratasyon ısısını            | Azaltır       |
| Taze betonda terlemesini                  | Azaltır       |

Uçucu küller çimento ve beton sanayisinin yansırı duvar, beton borular, yalıtım malzemesi harç gibi malzeme ve elemanların üretilmesinde de kullanılmaktadır [65-66]. Geoteknik uygulamalarda uçucu kül dolgu ve zemin stabilizasyonlarında kullanılmaktadır [67-69].

Yapılan literatür çalışmasına göre uçucu küller inşaat sektöründe çok büyük kullanım alanına sahiptir. Özellikle çimento ve beton sektöründe uçucu kül kullanımı çok fazla olup yapılan çalışmalar devam etmektedir.

### **2.3. Uçucu Kül Tane Dağılımı**

Uçucu külün çimento ve beton içerisindeki performansını etkileyen en önemli özelliği inceliğidir. Uçucu küllü betonların dayanım, aşınma direnci, donma çözülme direnci gibi özellikleri kullanılan uçucu külün inceliğinin bir fonksiyonu olduğu çalışmalarla gösterilmiştir [70-74]. Uçucu küllerin incelikleri termik santrallerin uçucu kül tutma

sistemlerine bağılıdır. Genellikle elektrostatik yöntemler ile tutulan uçucu küller, çimento ve beton üretiminde kullanım bakımından daha uygundur [75].

Uçucu külün inceliği, aktivite hızını ve betonun işlenebilirliğini etkiler. Ayrıca, betonun su ve hava sürükleyici katkı içeriğini de etkileyebilir [76]. Genellikle uçucu küller, küresel şekilleri nedeniyle betonun su ihtiyacını azaltır ve işlenebilirlik özelliğini geliştirirler. Ancak incelik arttıkça dayanım artacağından hava sürüklemek için gerekli katkı miktarını da artırır [77].

Literatürü incelediğimizde uçucu kül ve çimentonun tüm tane boyutlarını içeren yüksek kompasiteyi sağlayacak optimum tasarımlar yapılmadığı görülerek bu eksikliğin giderilmesi üzerinde çalışılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar daha ziyade tane boyut dağılımının belirli aralıklarda yani tek veya birkaç boyutta yapılarak inceliğin etkisi üzerinde yapılmıştır. Literatürde çimento tane dağılımı ve tane dağılımlarına karşılık gelen boyutlardaki çimento inceliğinin çimento hamuru dayanımına, otojen rötresine, çimento hamuru özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Genel olarak incelik hidrasyon ısını artırılmış, işlenebilirliği azaltmış, su ihtiyacını artırmıştır [78-83]. Literatürde Uçucu kül tane dağılımı ile ilgili çalışmalar uçucu kül inceliği ön plana çıkartılarak yapılmıştır. 1991 yılında Slanicka uçucu külün kimyasal ve mineralojik özelliklerinin yanında inceliğinin de beton dayanımında önemli etkiye sahip olduğunu savunmuştur. Yaptığı çalışmada uçucu külü ince agrega yerine ikame ederek inceliğin etkisini beton dayanımları üzerinde göstermiştir [84]. Monzo, Paya vd. (1994) yaptıkları çalışmada F sınıfı İspanyol uçucu külünü %30 ikame oranında çimento harcında kullanarak ürettikleri farklı inceliğe sahip uçucu kül ikameli çimento harçlarının basınç ve eğilme dayanımlarını incelemişlerdir. Çalışmada uçucu kül inceliğinin artması ile basınç dayanımının arttığını belirtmişlerdir [85]. Erdoğan ve Türker (1998) çalışmalarında uçucu küllerin farklı tane boyutlarında aynı özelliklere sahip olmayacağını vurgulayarak, uçucu kül tane dağılımının farklı boyutlardaki özelliklerini çimento harcı üzerinde incelemişlerdir. Çalışmada uçucu küller 125, 90, 63 ve 45 mikron boyutlarında 6 farklı grup oluşturacak şekilde %25 ikame oranında karışımlar hazırlanarak basınç dayanımları incelenmiştir. En iyi dayanım sonuçlarını referans ve 45 mikron altı uçucu kül ikamesi içeren harçlar verdiği belirtilmiştir [86]. Lee, Kim vd. (2003) çalışmalarında uçucu kül tane dağılımlarının çimento pastası

üzerinde akışkanlığını incelemişlerdir. %20 ikame uçucu kül kullanılarak farklı tane boyutlarda uçucu kül karışımları incelenmiş, parçacık tane boyut dağılımları genişledikçe yani daha fazla tane boyutu içerdikçe akışkanlığın arttığını göstermişlerdir [87]. Bentz, Dale vd. (2011a, 2011b) çalışmalarında uçucu kül ve çimento tane dağılımını, inceliğin etkisi ile incelemişlerdir. Çimento ve uçucu kül için 5 farklı özgül yüzey alanı kullanılarak farklı karışımlar hazırlanmıştır. Bu farklı karışımlar %20, %35, %50 ve %65 ikame oranlarında çimento harcı basınç dayanımları üzerinde incelenmiş en iyi sonuçlar %20 uçucu kül ikamesi içeren karışımlarda elde edilmiştir. %20 uçucu kül ikamesi içeren karışımların basınç dayanımı referans %100 portland çimentosu içeren karışımın basınç dayanımından yüksek çıkmıştır. %35 uçucu kül ikameli karışımın basınç dayanımları ise referans basınç dayanımına yakın çıkmıştır. Bu sonuçları değerlendirdiklerinde uçucu kül ve çimento inceliği ile uygun dağılım yapılarak %35 oranında çimento tasarrufu sağlanabileceğini göstermişlerdir [88, 89].

Bilindiği üzere bir cismin mukavemeti içinde bulunduğu boşluklarla doğrudan ilişkilidir. Boşluk oranı fazla yani kompasite düşük ise malzeme büyük bir mukavemete sahip olamaz. Betonlarda da aynı durum vardır. Beton kompasitesinin büyük olması ancak beton içerisinde bulunan agreganın kompasitesinin büyük olması ile ilişkilidir. Agreganın kompasitesi ise agreganın granülometri bileşimine bağlıdır. Agregada numunesindeki tanelerin değişik boyutlarda olması, sabit bir hacim içerisinde yer alan agregada taneleri arasında daha az boşluk bulunmasına yani doluluk oranının artmasına neden olmaktadır. Granülometri bileşimi bazı durumları kompasitenin büyük değerler almasına bazı durumlarda ise kompasitenin küçülmesine neden olmaktadır. Agregada kompasitesinin çimento miktarı veya çimento dozajı üzerinde de önemli bir etkisi bulunmaktadır. Düşük kompasiteli bir agregada ile beton üretilecek ise fazla miktarda boşlukların doldurulması için bağlayıcı miktarını artırmak gerekir. İyi bir beton üretiminde yeterli kompasiteyi sağlayacak agregada granülometrisinin seçilmesi gerekmektedir. Agregalarda bu durum önemsendiği halde uçucu kül gibi malzemelerde toz malzeme gradasyonu göz ardı edilmektedir. Agregalarda olduğu gibi toz malzemelerde de iyi bir gradasyon olmadığı sürece boşluk oranları fazla olacak ve hidrasyon sonucu elde edilen ürünler boşlukların tamamını dolduramayacaktır. Agregalar için yapılan en iyi gradasyonu elde etme işlemi uçucu

kül gibi malzemeler içinde yapıldığı takdirde çok az bir reaksiyon sonucunda oluşacak kimyasal ürünler bile kolaylıkla tanecikler arası boşlukları doldurup optimum dayanım elde edilebilir.

Yukardaki bilgilerde göz önüne alındığında, bu çalışmada en yüksek kompasiteyi elde edecek en uygun uçucu kül tane boyut dağılımını elde etmek için tasarımlar yapılmıştır. Tasarım için modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeli kullanılmıştır [90]. Bu modele göre malzemeler en uygun oranlarda birleştirilerek, boşluk oranı düşük ve yoğunluğu yüksek bir matris elde edilmiştir. Bu şekilde mekanik özellik performansları artırılmıştır.

Ekonomik bir beton tasarımı için günümüze kadar çeşitli tane boyut dağılımı kullanılmıştır. Tane boyut dağılımı seçilirken, büyük taneler arasındaki boşluklar doldurulacak şekilde seçilmesi gerekir. Bu konuyla ilgili ekonomik bir beton tasarımı için ilk olarak tane dağılımı konusunda çalışılmıştır [76]. Tanecik boyut dağılımı optimizasyonu esnasında beton agregalarının hangi oranda karıştırılacağı belirlenmesinde Fuller ve Thompson yöntemi ise uzun süredir kullanılmakta olan bir yöntemdir [77]. Çoğu Avrupa ülkelerinde beton tasarımı için iyi derecelendirilmiş ideal agrega granülometresi optimum düzeye getirilmiştir. Bu nedenle Fuller eğrisi halen ünlüdür ve çeşitli araştırmacılar beton karışımları tasarlarken hala aynı kavramı kullanmaktadır. Bu, son 100 yılda optimizasyon eğrisinin değişmediği anlamına gelmez. En önemli gelişme, 1980 yılında Funk ve Dinger tarafından asgari partikül boyutunun uygulanmasıdır. Dahası, birkaç araştırmacı, kendi kendini sıkıştıran beton veya yüksek performanslı beton için ideal eğriyi ayarlamak için denklemde üs için farklı değerler önermişlerdir [91]. Özellikle tane boyutu optimizasyonu, yüksek performanslı beton ve yüksek miktarda dolgu maddesi içeren diğer beton tiplerinin tasarımı için yeni süper akışkanlaştırıcı türlerinin tanıtılmasından bu yana yeni bir ilgi kazanmıştır. Ayrıca, daha çevresel beton üretimi için tane boyut optimizasyonu önemli bir kavramdır. Çünkü agregaların en yüksek tane boyutunun yoğunluğu en düşük boşluk miktarı oranına göre, çimento harcı ile doldurulur. Bu yöntem ile optimize edilmiş agrega ve çimento karışımı ile yeterli mukavemet elde edilebileceği belirtilmiştir [92]. Agrega gradasyonu üzerinde çalışan araştırmacıların çoğu, ideal bir agrega tane dağılım eğrisine göre dizayn etmelerini önermişlerdir. Geliştirilen ve

literatüre sunulan formüller yardımıyla elde edilen granülometri eğrileri ile agregada yüksek kompasite elde edilmiştir [77, 90]. Bu yöntemler agregada yapılmış fakat uçucu kül gibi malzemelerde yüksek kompasiteyi sağlamak için uygulanmamıştır.



### 3. DENEYSEL PROGRAM

#### 3.1. Çalışma Sırasında Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1. Portland Çimentosu (PÇ)

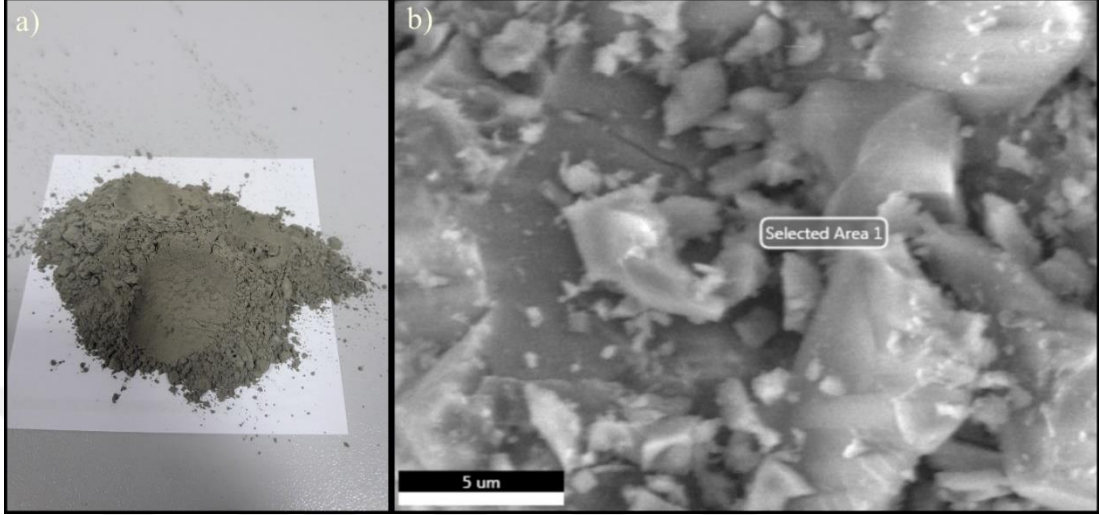
Yapılan bu çalışmada Baştaş Başkent Çimento Sanayi tarafından üretilen ve TS EN 197-1'e uygun ASTM Tip I çimentoya karşılık gelen CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır [93]. Çimentonun özgül ağırlığı 3.18 ve Blaine inceliği ise 3356 cm<sup>2</sup>/g'dır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** CEM I 42.5 R Çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri

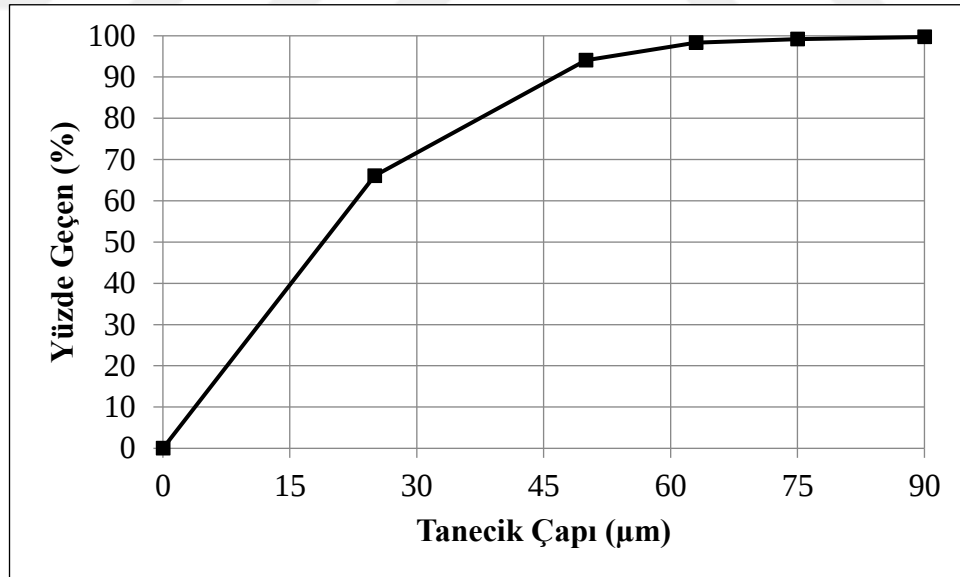
| Kimyasal Özellikler (%)              | CEM I 42.5 R |
|--------------------------------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>                     | 21.02        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 5.38         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 3.22         |
| CaO                                  | 62.12        |
| MgO                                  | 1.98         |
| Na <sub>2</sub> O                    | 0.39         |
| K <sub>2</sub> O                     | 0.81         |
| SO <sub>3</sub>                      | 3.11         |
| Fiziksel Özellikler                  |              |
| Özgül Ağırlık                        | 3.18         |
| Blaine inceliği (cm <sup>2</sup> /g) | 3356         |
| Kızdırma Kaybı (%)                   | 2.37         |

Şekil 3.1'de CEM I 42.5 R portland çimentosunun dijital kamera ve taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) altında elde edilen mikro-yapı

görüntüsü verilmiştir. Vakumlu elek yardımıyla elde edilen çimento tanecik boyut dağılım grafiği ise Şekil 3.2’de verilmiştir.



**Şekil 3.1.** CEM I 42.5 R Portland çimentosunun (a) dijital kamera ve (b) SEM görüntüsü



**Şekil 3.2.** Vakumlu elek ile elde edilen çimento tanecik boyut dağılımı

### 3.1.2. CEN Referans Kumu

Çalışmada kullanılan standart kum Limak Trakya Çimento fabrikasında üretilen TS EN 196-1 standartlarında belirtilen CEN referans kumudur [94]. Referans kumun tane dağılımı Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Referans kumunun tane dağılımı

| Kare göz açıklığı (mm) | Yığılımlı kalan (%) |
|------------------------|---------------------|
| 2.00                   | 0                   |
| 1.60                   | 7 ± 5               |
| 1.00                   | 33 ± 5              |
| 0.50                   | 67 ± 5              |
| 0.16                   | 87 ± 5              |
| 0.08                   | 99 ± 1              |

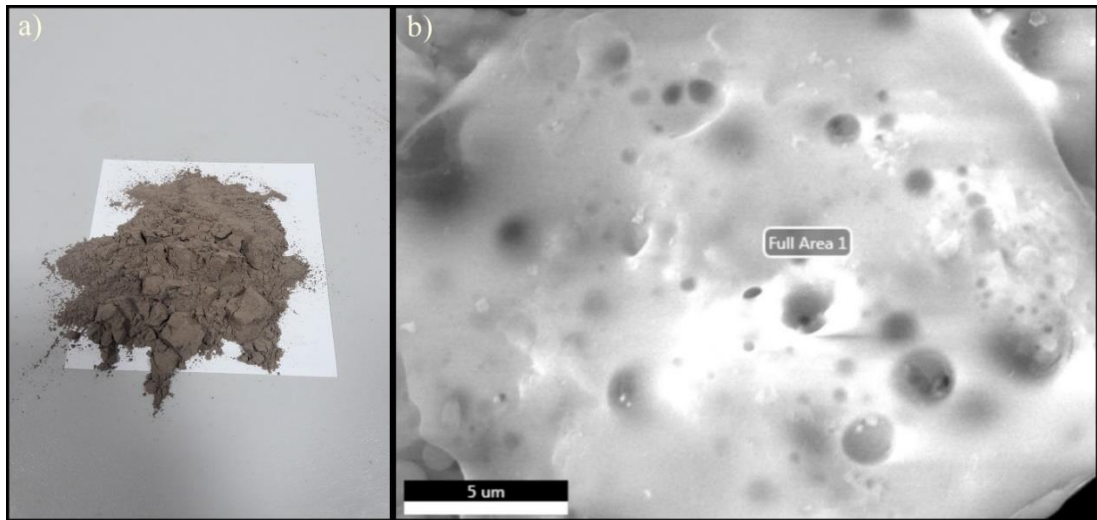
### 3.1.3. Uçucu Kül

Çalışmada Çayırhan termik santralinde üretilen  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70’den az ve CaO oranı %10’dan fazla olan C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.3’de sunulmuştur. Kullanılan uçucu kül fabrikadan çıktığı şekilde öğütülmeden direk kullanılmıştır.

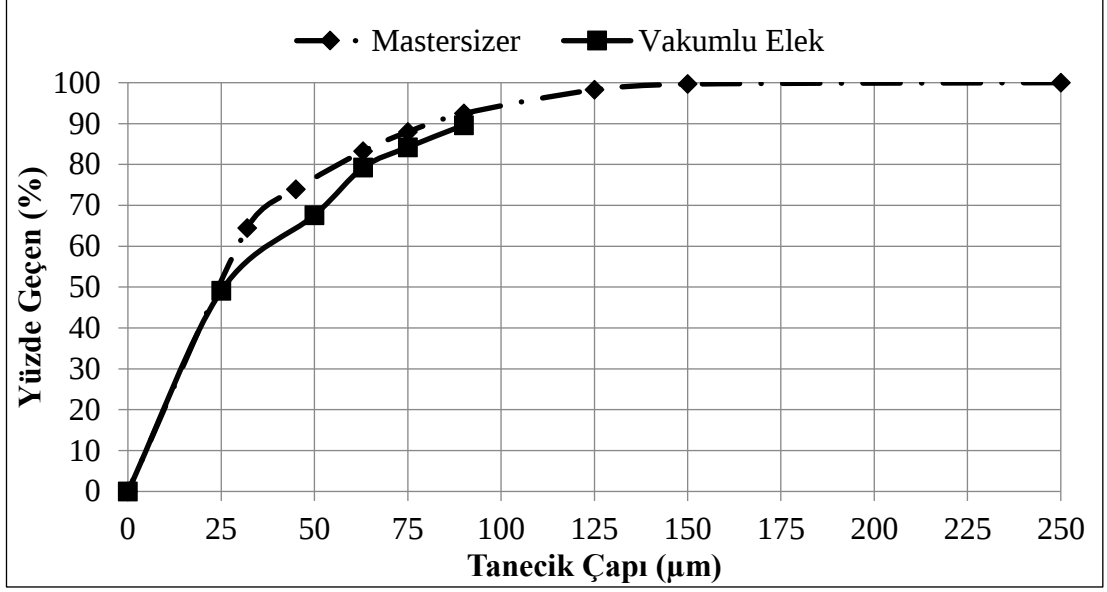
**Çizelge 3.3.** Uçucu kül fiziksel ve kimyasal özellikleri

| Kimyasal Özellik (%)                 | Uçucu Kül |
|--------------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>                     | 46.59     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 12.42     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 9.74      |
| CaO                                  | 14.50     |
| MgO                                  | 7.23      |
| SiO <sub>3</sub>                     | 5.52      |
| Na <sub>2</sub> O                    | 1.01      |
| K <sub>2</sub> O                     | 2.28      |
| Fiziksel Özellik                     |           |
| Blaine inceliği (cm <sup>2</sup> /g) | 2830      |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )        | 2.47      |

Şekil 3.3’de uçucu külün dijital kamera görüntüsü ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) altındaki mikro-yapısal görüntüsü verilmiştir. Fabrikadan çıktığı haldeki uçucu kül tane dağılımları mastersizer ve vakumlu elek ile elde edilmiştir. Elde edilen tanecik dağılımları Şekil 3.4’de verilmiştir.



**Şekil 3.3.** C-sınıfı uçucu kül taneciklerinin (a) dijital kamera ve (b) SEM görüntüsü



**Şekil 3.4.** Mastersizer ve vakumlu elek ile elde edilen uçucu kül tanecik dağılımı

Tane dağılımları incelendiğinde iki yöntem arasında yaklaşık %3-%5 arasında fark oluşmaktadır. Bu fark eleme sırasındaki kayıp malzeme miktarından kaynaklanmaktadır.

### 3.2. Yöntem

Yapılan çalışmalar 3 aşamada gerçekleştirilmiştir.

#### 1.Aşama: Tane Boyut Dağılımı Optimizasyonu

Uçucu küller 0-25, 25-50, 50-63, 63-75 ve 75-90 µm (mikron) aralıklarında Şekil 3.5’de gösterilen vakumlu elek ile elenerek tane boyut dağılımları belirlenmiştir. Eleme işlemi vakumlu elek yardımıyla her tanecik boyutu için ayrı ayrı elenerek yapılmıştır. Tane boyut dağılımlarının etkisi dikkate alınarak, modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeline göre tane boyut optimizasyonu tasarlanmıştır [90]. Burada daha yoğun ve homojen bir tane boyut dağılımı elde etmek için Funk ve Dinger tarafından önerilen Denklem 3.1’de verilen formüle göre optimum dağılımlar belirlenmiştir [91].

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (3.1)$$

Bu formülde verilen;

|            |                                                          |
|------------|----------------------------------------------------------|
| $P(D)$     | : D boyutundaki elek çapından küçük toplam malzeme oranı |
| $D$        | : Elek çapı                                              |
| $D_{\min}$ | : Uçucu kül için minimum tane çapı                       |
| $D_{\max}$ | : Uçucu kül için maksimum tane çapı                      |
| $q$        | : Dağılım Modülü                                         |



**Şekil 3.5.** Vakumlu elek sistemi

$q$  dağılım modülünün aldığı farklı değerler için elde edilen yüzdelere göre toplam karışım içerisindeki malzemelerin birbirine oranları belirlenmiştir. Bu sayede farklı amaçlar için farklı dağılım modülü kullanılarak, belirli amaca uygun beton tasarımı yapmak mümkündür. Denklem 3.1’de minimum tane boyutunu sıfır ve dağılım modülünü 0.5 olarak kabul edersek denklem agrega dağılımını ideal etmek için kullanılan Fuller ve Thompson modeline dönüşmektedir [77].

Dağılım modülünün sayısal değeri arttıkça karışım daha iri, sayısal değeri azaldıkça ise daha ince bir karışım elde edilir. Uçucu kül optimum tane dağılımını bulmak için

Denklem 3.1’de q dağılım modülü  $q=0$  ile  $q=1$  arasında 0.1 hassasiyetle artırılarak optimum tane dağılımı q dağılım modülünün farklı değerleri için belirlenmiştir.

Tane boyut dağılımı dizayn edilecek uçucu kül çimentoya %20 oranında ikame edilerek optimum tasarım belirlenmiştir. %20 ikame oranı uçucu külün etkinliğinin daha fazla anlaşılabilmesi için seçilmiştir. Optimum tasarımı veren q dağılımı elde edildikten sonra %5, %10, %15, %20 ve %30 ikame oranları için en iyi optimum tasarımı veren q dağılım modülüne göre tasarımlar yapılmıştır. Optimum tane boyut oranının belirlenmesinde çimento harçları TS EN 196-1’e göre eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur [94].

#### Tane Dağılım Optimizasyonu Yapılmış Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Hazırlanması

Çalışma sırasında tane dağılım optimizasyonu yapılmış ve yapılmamış uçucu kül ikameli çimento harçları TS EN 196-1’e uygun olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan harç bileşenlerinin oranları kütlece; bir kısım bağlayıcı (çimento + UK), üç kısım standart kum ve ½ kısım su (su/bağlayıcı oranı: 0.5) şeklindedir. Her bir karışım  $450\pm 2$  gram uçucu kül ikameli çimento,  $1350\pm 5$  gram standart kum ve  $225\pm 1$  gram sudan oluşturulmuştur. Laboratuvar sıcaklığında malzemeler  $\pm 1$  gram doğrulukla terazi ile tartılmıştır.

TS EN 196-1’e uygun karıştırıcı çalışır durumda iken;

- Karıştırma kabına su konulmuş ve çimento eklenmiştir.
- Karıştırıcı düşük hızda çalıştırılmaya başlatılarak 30 saniye sonra kum, 30 saniye içinde sürekli olarak ilave edilmiştir. Karıştırıcı yüksek hıza ayarlanarak karıştırmaya 30 saniye daha devam edilmiştir.
- Karıştırıcı, 1 dakika 30 saniye sonra durdurulmuştur. İlk 15 saniye lastik sıyrıcı ile kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harç sıyrılarak kabın ortasına toplanmıştır.
- Karıştırmaya yüksek hızda 60 saniye daha devam ettirilmiştir.

Böylece harç kalıplara doldurmaya hazır hale gelmiştir.

### Tane Dağılım Optimizasyonu Yapılmış Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Deney Kalıbına Doldurulması

Tane dağılım optimizasyonu yapılmış ve yapılmamış uçucu kül ikameli çimento harçları numuneleri TS EN 196-1'e uygun 40×40×160 mm'lik prizmatik kalıplar için hazırlanmıştır. Harçlar hazırlandıktan hemen sonra uygun bir kaşık ile karıştırma kabından doğrudan bir veya birkaç defada, her bir bölüm iki kısımda dolacak şekilde kalıplara doldurulmuştur. Harç tabakası, büyük yayıcı ile kenarlarından dik pozisyonda tutularak ve kalıp başlığıyla temas halinde olmak üzere, kalıbın her bölmesinde bir kez olmak üzere ileri geri hareket ettirilerek düzgün şekilde yayılmıştır.

Kalıp ve kalıp başlığı sarsma tablasına sıkıca tutturularak birinci tabaka 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır. İkinci tabaka harç kalıba doldurularak küçük bir yayıcı ile düzeltilmiş ve 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır. Kalıp dikkatli bir şekilde sarsma tablasından kaldırılmış ve kalıp başlığı çıkartılmıştır. Harcın fazlası hemen hemen dik tutulan bir metal masterla sıyrılmış, sağ ve sol yöne doğru enine testere hareketleri ile çekmek suretiyle yavaş yavaş hareket ettirilmiştir. Prizmaların yüzeyi, aynı master ile düz tutularak düzleştirilmiştir.

### Tane Dağılım Optimizasyonu Yapılmış Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Deneye Hazırlanması

Tane dağılımı optimizasyonu yapılmış ve yapılmamış uçucu kül ikameli harçlar hazırlandıktan sonra üzeri cam bir plâka ile kapatılmış, uygun şekilde işaretlenmiş kalıplar geciktirilmeden yatay olarak rutubet ortamında 24 saat bekletilmiştir. Her bir kalıp muhafaza edildiği yerden sökmek üzere 24 saat sonra kalıplar dikkatlice sökmüştür. Suda olgunlaştırılacak UK ikameli çimento harçları daha sonra etiketlenmek için, suya dayanıklı pastel boyalar ile uygun şekilde işaretlemeler yapılmıştır.

İşaretlenmiş prizmalar geciktirilmeden (20±1) C° 'de içilebilir su bulunan kür tankına uygun şekilde yatay olarak yerleştirilmiştir. UK ikameli çimento harçları, paslanmaz ızgaraların üzerine, su bütün yüzeyleri temas edecek şekilde ayrı ayrı yerleştirilmiştir.

### Tane Dağılım Optimizasyonu Yapılmış Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Eğilme Dayanımları

Tane dağılım optimizasyonu yapılmış ve yapılmamış uçucu kül ikameli çimento harçların eğilme dayanımları TS EN 196-1'e göre hazırlanmıştır. Eğilme dayanımı için 7, 28, 90 gün normal suda bekletilen çimento harçları kür havuzundan çıkarılarak eğilme presi ile TS EN 196-1'e uygun (50±10) N/s yükleme hızında eğilme deneyine tabi tutulmuştur. 40×40×160 mm boyutunda prizmatik çubuklar, her bir değer için üç adet kırılarak ve üç adet sonucun aritmetik ortalaması alınarak değerlendirme yapılmıştır [94].

### Tane Dağılım Optimizasyonu Yapılmış Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Basınç Dayanımları

Tane dağılım optimizasyonu yapılmış ve yapılmamış uçucu kül ikameli çimento harçların basınç dayanımları TS EN 196-1'e göre hazırlanmıştır [94]. Eğilme dayanımı sonucu altı adet 40×40×40 mm boyutundaki çimento harçları basınç presi ile basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Basınç dayanımı cihazı deney için uygun kapasitede ve TS EN 196-1'e uygun (2400±200) N/s yükleme hızında ayarlanmıştır. Eğilme deneyinden sonra elde edilecek yarım prizmalar cihazın plakaları arasına ±5 mm'den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek yerleştirilmiştir. Cihaz (2400±200) N/s hızda prizma kırılana kadar yükleme yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyinin sonucu, 3 prizmatik takımdan elde edilen 6 adet çimento harcı basınç deneyi sonucunun aritmetik ortalaması olarak ifade edilmiştir. 6 adet sonuç içerisinde biri ortalamadan ± %10'dan fazla farklılık gösterdiği durumda bu sonuç atılarak, geri kalan 5 sonucun ortalaması alınmıştır.

### 2.Aşama: Tane Dağılım Optimizasyonu Yapılmış Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Mikro-Yapısal İncelemesi

Bu aşamada tane dağılım optimizasyonu yapılmış ve yapılmamış %20 uçucu kül ikame oranına  $q=0$  ile  $q=1$  arasında 0.1 hassasiyetle farklı dağılım modüllerindeki çimento harçlarının 90 günlük mikro-yapı incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemeler ile

farklı tane dağılımına karşılık gelen çimento harçlarında C-S-H jel yoğunlukları araştırılmıştır. Farklı tane dağılımlara karşılık gelen çimento harçlarının mikro-yapı görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Mikro-yapı incelemeleri Hitit Üniversitesinde bulunan Quanta 450 FEG taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobunda görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılan ve numune üzerine odaklanan elektron demetinin, numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan elastik ve elastik olmayan çarpışmaların meydana getirdiği etkilerin uygun algılayıcılarda toplanarak sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilmiştir.

### 3.Aşama: Tane Dağılım Optimizasyonu Yapılmış Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Kalıcılık Özellikleri

Bu bölümde tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmeyen %5, %10, %15, %20 ve %30 uçucu kül ikameli TS EN 196-1'e göre hazırlanan çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük hızlı klor iyonu geçirimsizliği ASTM C 1202'ye göre, su emme özellikleri, hacimsel yoğunluk özellikleri ASTM C 642'ye göre, kılcal su emme katsayıları ise TS EN 772-11'e göre elde edilmiştir. [94-99]. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı deney sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

#### Hızlı Klor Geçirimsizliği Deneyi

Tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmeyen %5, %10, %15, %20 ve %30 uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği ASTM C 1202'e göre incelenmiştir [97]. Bu yöntem için UK ikameli çimento harçları TS EN 196-1'e uygun olarak hazırlanarak Ø100×200 mm silindirik harçlar oluşturulmuş, oluşturulan harçların orta kısımlarından 7, 28 ve 90 gün su küründe olgunlaştırma sonrası Ø100×50 mm diskler kesilerek deney örnekleri üretilmiştir. Deneyde kullanılacak çimento harç örneklerinin yan yüzeyleri yalıtkan bir malzemeye kaplanmıştır. Şekil 3.6'da verilen deney düzeneğinde silindirik çimento harcı iki kabın arasına konulmuştur. Çimento harcı bir yüzü 0.30 N sodyum hidroksit

(NaOH) çözeltisi, diğer yüzünde ise %3 sodyum klorür (NaCl) çözeltisiyle temas ettirilerek deney hücresine aktarılmıştır. Bu deney yöntemi betonun elektriksel geçirirmliliğine dayanmaktadır.  $60.0 \pm 0.1$  V değerinde gerilime maruz bırakılan çimento harcının içinden 6 saat sonunda geçen toplam akım değerinin ölçülmüştür. 6 saat sonra her bir çimento harcından geçen akım Coulomb cinsinden verilmiştir. ASTM C1202'ye göre hızlı klorür iyonu geçirirmliliği, hesaplanan Coulomb değerlerine göre Bölüm 5'de Çizelge 5.10'da verilen 'Yüksek'ten' İhmal edilebilir 'olmak üzere beş geçirirmlilik sınıfında değerlendirilmiştir.



**Şekil 3.6.** Hızlı klorür iyonu geçirirmliliği deney düzeneği

#### Su Emme ve Hacimsel Yoğunluk Özelliklerinin Belirlenmesi

Tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmeyen %5, %10, %15, %20 ve %30 uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük su emme özellikleri, hacimsel yoğunluk özellikleri ASTM C 642'ye göre elde edilmiştir [98].

Deneyler için  $50 \times 50 \times 50$  mm'lik kübik çimento harcı örnekleri kullanılmıştır. Su emme deneyinde çimento harçları istenilen yaşa kadar içme suyu içeren kür havuzunda olgunlaştırıldıktan sonra kür havuzundan çıkartılarak, yüzeyi havlu ile kurutulmuş doygun yüzey kuru şeklinde tartılmıştır (B). Daha sonra 24 saat etüvde  $110 \pm 5$  °C

bekletilen çimento harçları 20 °C-25 °C'ye gelince tartılmıştır (A). Çimento harçlarının su emme yüzdesi aşağıda verilen denklem 3.2'den bulunmuştur.

$$\text{Su emme Yüzdesi: } \left[ \frac{B-A}{A} \right] \times 100 \quad (3.2)$$

50×50×50 mm'lik çimento harçları 5 saat kaynatıldıktan sonra 20 °C-25 °C'ye gelince kadar bekletilerek tartılmıştır (C). Doygun kuru yüzey çimento harçları Arşimet terazisi ile su içinde tartılmıştır (D). Denklem 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8 kullanılarak sırasıyla kaynama ve kür sonrası su emme yüzdesi, hacimsel kuru yoğunluk, kür sonrası hacimsel yoğunluk, kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk, görünür yoğunluk ve geçirgen gözenek hacmi sonuçları elde edilmiştir. Suyun yoğunluğu ( $\rho$ ) ise 1 alınmıştır.

$$\text{Kaynama ve kür sonrası su emme yüzdesi: } \left[ \frac{C-A}{A} \right] \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{Hacimsel Kuru Yoğunluk: } \left[ \frac{A}{C-D} \right] \times \rho = g_1 \quad (3.4)$$

$$\text{Kür Sonrası Hacimsel Yoğunluk: } \left[ \frac{B}{C-D} \right] \times \rho \quad (3.5)$$

$$\text{Kaynama ve Kür Sonrası Hacimsel Yoğunluk: } \left[ \frac{C}{C-D} \right] \times \rho \quad (3.6)$$

$$\text{Görünür Yoğunluk: } \left[ \frac{A}{A-D} \right] \times \rho = g_2 \quad (3.7)$$

$$\text{Geçirgen Gözenek Hacmi: } \frac{g_2 - g_1}{g_2} \times 100 \quad (3.8)$$

#### Kılcal Geçirimsizlik Özelliklerinin Belirlenmesi

Tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmeyen %5, %10, %15, %20 ve %30 uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük kılcal su emme geçirimsizliği TS EN 772-11'e göre elde edilmiştir [99]. Deney örnekleri için 50×50×50

mm'lik prizmatik çimento harçları kullanılmıştır. Çimento harcının kurumuş kütlesini bulmak için etüvde  $105 \pm 5$  °C 24 saat bekletildikten sonra oda sıcaklığına gelince tartılmıştır ( $m_{dry,s}$ ). Çimento harcı suya temas ettiğinde kütlesini ( $m_{so,s}$ ) bulmak için Arşimet terazisi kullanılmıştır. Kapiler (kılcal) su emme katsayısı aşağıda Denklem 3.9'da verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$C_{w,s} = \left[ \frac{(m_{so,s} - m_{dry,s})}{A_s \times t_{so}} \right] \times 10^6 \quad [g/m^2 \times s]$$

(3.9)

Burada verilen;

$C_{w,s}$  : Çimento harç numunesi kapiler(kılcal) su emme katsayısı,

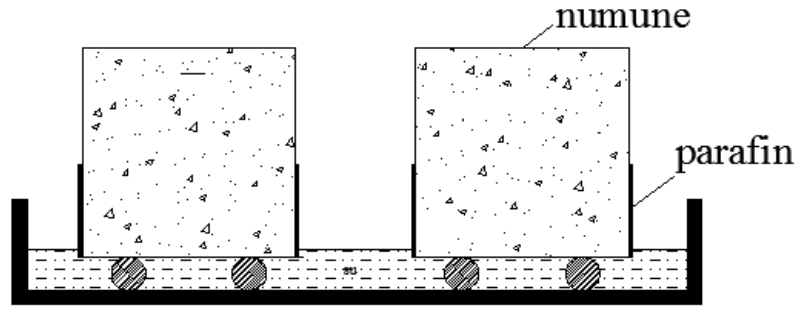
$m_{dry,s}$ : Çimento harç numunesinin kurutma sonrası kütlesi (g),

$m_{so,s}$  : Çimento harç numunesi t süreyle suya temas ettirdikten sonraki kütlesi (g),

$A_s$  : Çimento harç numunesinin suya temas ettirilen yüzeyinin brüt alanı (mm<sup>2</sup>),

$t_{so}$  : Çimento harç numunesinin suya temas ettirilme süresi (s).

Deneyde 7, 28 ve 90 gün normal su küründe bekletilen tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harç örnekleri 24 saat süreyle 105 C° de etüvde bekletilerek etüv kurusu yapılmıştır. Çimento harçlarının sadece alt taban kısmından su geçişine izin verilerek, yan kısımları ile teması kesmek için parafin malzemesi ile izole edilmiştir. Çimento harçlarının su transferini sağlamak için demir çubuklarla mesnetler oluşturulmuştur. Çimento harçları TS EN 772-11'de belirtildiği gibi 5 mm temas edecek şekilde mesnetlerin üzerine yerleştirilmiştir. Oluşturulan deney düzeneği Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kılcal geçirimsizlik deney düzeneği

## 4. TANE DAĞILIMI OPTİMİZE EDİLMİŞ UÇUCU KÜL İKAMELİ ÇİMENTO HARÇLARININ TASARIMI

### 4.1. Uçucu Kül Tane Dağılımlarının Elde Edilmesi

#### 4.1.1. Giriş

Uçucu kül tane dağılımını belirlemek için Bölüm 3.2’de yöntemde belirtilen Funk ve Dinger tarafından önerilen Denklem 3.1’deki formül kullanılmıştır [91]. Uçucu kül etkinliğini görebilmek için %20 oranında uçucu kül çimento yerine ikame edilerek farklı dağılım modüllerine göre tane dağılımları elde edilmiştir.

#### 4.1.2. Deneysel Çalışmalar

Tane dağılımları tasarımı için Çayırhan Termik Sanayinden öğütülme işlemi uygulanmadan fabrikadan çıktığı durumda tedarik edilen kimyasal ve fiziksel özellikleri 3. Bölüm Çizelge 3.3’de verilen C sınıfı uçucu kül vakumlu elek yardımıyla eleme işlemine tabii tutulmuştur. Eleme işlemi sırasında uçucu kül tane dağılımı ilk olarak 0-25, 25-50, 50-63, 63-75 ve 75-90  $\mu\text{m}$  olarak 5 farklı gruba ayrılmıştır. 5 farklı gruba ait Votorantim Çimento tarafından yapılan uçucu kül kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Daha sonraki aşamada ise Denklem 3.1’de verilen formülde  $q$  dağılım modülü  $q=0$  ile  $q=1$  arasında 0.1 hassasiyetle artırılarak optimum tane dağılımı,  $q$  dağılım modülünün farklı değerleri için belirlenmiştir.  $q$  dağılım modülünün aldığı farklı değerler için kullandığımız 25, 50, 63, 75 ve 90  $\mu\text{m}$ ’luk elek çaplarından geçen toplam malzeme yüzdeleri belirlenmiştir. Her tane dağılımına karşılık gelen Votorantim Çimento tarafından yapılan uçucu kül tane dağılımlarının kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** 0-25, 25-50, 50-63, 63-75 ve 75-90 µm aralıklarında uçucu kül kimyasal özellikleri

| <b>Kimyasal<br/>Özellik (%)</b> | <b>Referans*</b> | <b>0-25</b> | <b>25-50</b> | <b>50-63</b> | <b>63-75</b> | <b>75-90</b> |
|---------------------------------|------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>                | 46.59            | 43.87       | 46.71        | 47.64        | 49.90        | 50.53        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 12.42            | 11.82       | 12.62        | 12.96        | 13.40        | 13.45        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 9.74             | 9.89        | 9.88         | 9.88         | 9.72         | 9.77         |
| CaO                             | 14.50            | 15.22       | 14.97        | 14.61        | 14.29        | 13.71        |
| MgO                             | 7.23             | 7.84        | 7.47         | 6.71         | 6.41         | 6.31         |
| SO <sub>3</sub>                 | 5.52             | 7.47        | 5.12         | 4.82         | 2.96         | 2.74         |
| Na <sub>2</sub> O               | 1.01             | 0.87        | 0.98         | 1.17         | 1.24         | 1.28         |
| K <sub>2</sub> O                | 2.28             | 2.46        | 2.20         | 2.14         | 2.05         | 2.05         |

\* Fabrikadan gelen ham haldeki uçucu kül

**Çizelge 4.2.** Farklı tane dağılım modülleri için uçucu kül kimyasal ve fiziksel özellikleri

| <b>Kimyasal</b>                |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Özellik</b>                 | <b>0.1</b> | <b>0.2</b> | <b>0.3</b> | <b>0.4</b> | <b>0.5</b> | <b>0.6</b> | <b>0.7</b> | <b>0.8</b> | <b>0.9</b> | <b>1.0</b> |
| <b>(%)</b>                     |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| SiO <sub>2</sub>               | 44.12      | 44.70      | 45.12      | 45.36      | 45.47      | 45.54      | 45.62      | 45.74      | 45.82      | 45.92      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.95      | 12.04      | 12.16      | 12.24      | 12.35      | 12.42      | 12.47      | 12.55      | 12.59      | 12.64      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.06      | 9.96       | 9.94       | 9.94       | 9.91       | 9.85       | 9.81       | 9.74       | 9.69       | 9.61       |
| CaO                            | 14.87      | 15.07      | 15.10      | 15.16      | 15.24      | 15.28      | 15.41      | 15.56      | 15.68      | 15.75      |
| MgO                            | 7.82       | 7.70       | 7.65       | 7.59       | 7.36       | 7.21       | 7.18       | 7.11       | 7.05       | 6.92       |
| SO <sub>3</sub>                | 7.45       | 7.03       | 6.69       | 6.39       | 6.15       | 5.67       | 5.46       | 5.15       | 5.04       | 4.95       |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.89       | 0.92       | 0.92       | 0.93       | 0.94       | 0.97       | 0.99       | 1.02       | 1.05       | 1.09       |
| K <sub>2</sub> O               | 2.41       | 2.39       | 2.37       | 2.36       | 2.32       | 2.29       | 2.25       | 2.20       | 2.18       | 2.13       |
| <b>Fiziksel</b>                |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Özellik</b>                 |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Blaine                         |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| inceliği                       | 3100       | 3000       | 2850       | 2750       | 2650       | 2500       | 2350       | 2190       | 2120       | 2040       |
| (cm <sup>2</sup> /g)           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Yoğunluk                       |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| (g/cm <sup>3</sup> )           | 2.51       | 2.51       | 2.50       | 2.50       | 2.49       | 2.48       | 2.47       | 2.47       | 2.47       | 2.46       |

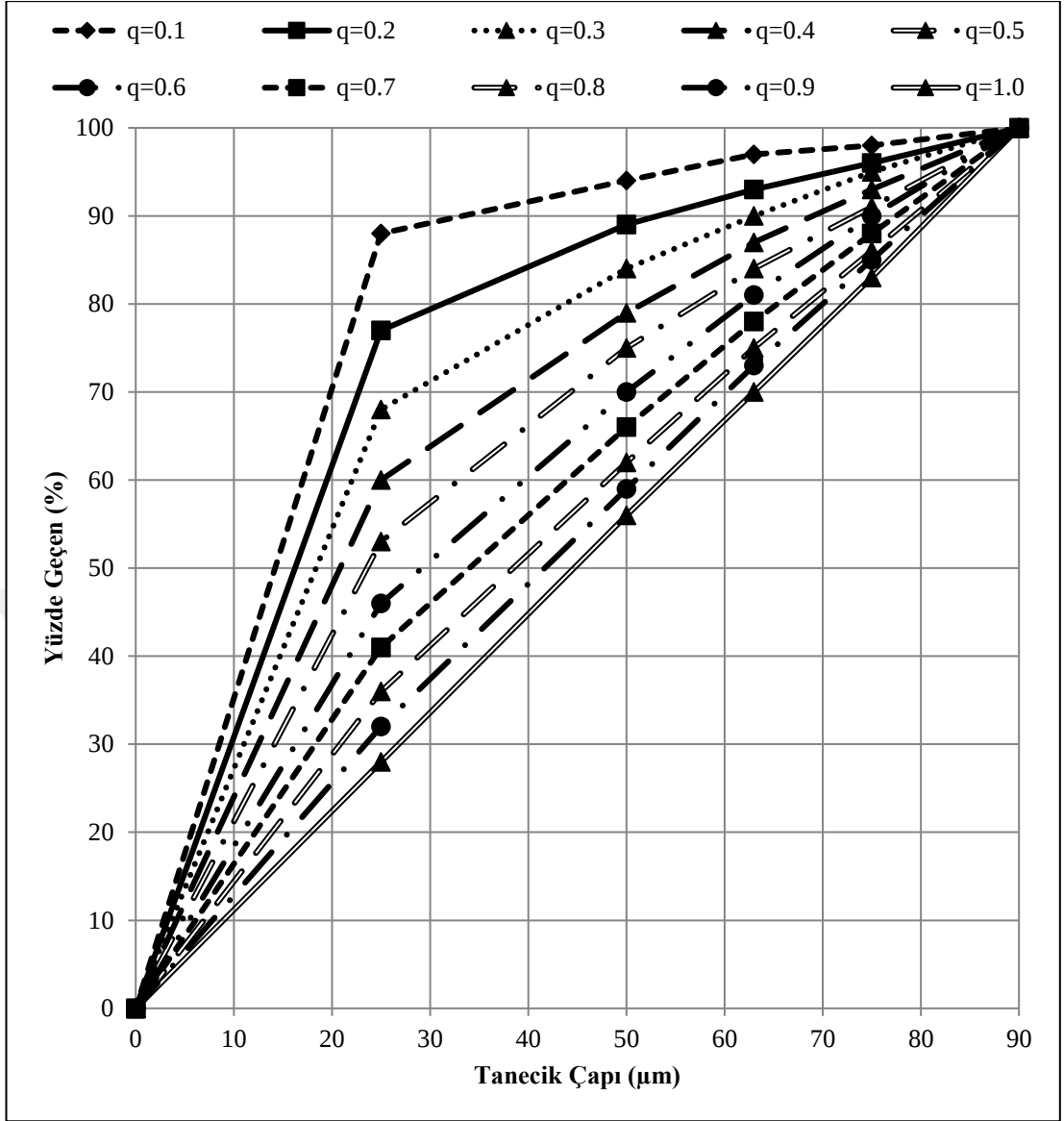
#### 4.1.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Denklem 3.1’de verilen formülde her bir dağılım modülü  $q=0$  ile  $q=1.0$  arasında 0.1 hassasiyetle artırılarak elde edilen geçen yüzdelere göre tane dağılım eğrileri oluşturulmuştur.

$q$  dağılım modülü  $q=0$  ile  $q=1.0$  arasında 0.1 hassasiyet ile artırılarak elde edilen dağılım yüzdeleri Çizelge 4.3 ve tane dağılım eğrileri ise Şekil 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Farklı tane dağılım modülleri için tane dağılım yüzdeleri

| <b>Elek</b>    | <b>0.1</b>   | <b>0.2</b>   | <b>0.3</b>   | <b>0.4</b>   | <b>0.5</b>   | <b>0.6</b>   | <b>0.7</b>   | <b>0.8</b>   | <b>0.9</b>   | <b>1.0</b>   |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Çapları</b> | <b>Geçen</b> | <b>Geçen</b> | <b>Geçen</b> | <b>Geçen</b> | <b>Geçen</b> | <b>Geçen</b> | <b>Geçen</b> | <b>Geçen</b> | <b>Geçen</b> | <b>Geçen</b> |
| <b>(µm)</b>    | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>   |
| <b>90</b>      | 100          | 100          | 100          | 100          | 100          | 100          | 100          | 100          | 100          | 100          |
| <b>75</b>      | 98           | 96           | 95           | 93           | 91           | 90           | 88           | 86           | 85           | 83           |
| <b>63</b>      | 97           | 93           | 90           | 87           | 84           | 81           | 78           | 75           | 73           | 70           |
| <b>50</b>      | 94           | 89           | 84           | 79           | 75           | 70           | 66           | 62           | 59           | 56           |
| <b>25</b>      | 88           | 77           | 68           | 60           | 53           | 46           | 41           | 36           | 32           | 28           |
| <b>0</b>       | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            |



**Şekil 4.1.** Farklı dağılım modülleri için tane dağılım eğrileri

Uçucu kül tane dağılımları  $q$  dağılım modülüne göre 0 ile 1 arasında 0.1 hassasiyet ile elde edilmiştir. Dağılım modülünün küçük değerlerinde uçucu kül inceliğinin çok fazla, dağılım modülünün büyük değerlerinde ise iriliğin fazla olduğu görülmektedir. En uygun tane dağılımı ise ne çok ince ne de çok iri olmalı, ideal bir şekilde boşlukları dolduracak incelikte ve bu sayede yüksek kompasiteye sahip olmalıdır. Elde edilen tane dağılımları arasında en uygun yani optimum tane dağılımı, bu dağılımlara karşılık gelen uçucu küller çimento harçlarına ikame edilerek mekanik özelliklerine göre kıyaslanarak elde edilmiştir.

## 4.2. Optimum Uçucu Kül Tane Dağılımlarının Elde Edilmesi

### 4.2.1. Giriş

Bir cismin mukavemeti, içinde bulunduğu boşluklarla doğrudan ilişkilidir. Boşluk oranı fazla yani porozitesi yüksek ise malzemenin mukavemeti düşük olur. Betonlarda da aynı durumdan bahsedebiliriz. Betonda porozitenin düşük yani kompasitenin yüksek olması, içinde bulunan agreganın kompasitesinin yüksek olmasıyla ilişkilidir. Agreganın kompasitesinin yüksek olması ise granülometrik bileşiminin iyi yapılmasıyla ilişkilidir. Agreganın içindeki tanelerin değişik boyutlarda olması, sabit bir hacim içerisinde yer alan agreganın taneleri arasında daha az boşluk bulunmasına yani doluluk oranının artmasına neden olmaktadır. Granülometrik bileşim bazı durumlarda porozitenin yüksek olmasına, bazı durumlarda ise kompasitenin yüksek olmasına neden olmaktadır. Agreganın granülometrisinin iyi yapılması çimento dozajı üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Düşük kompasiteli bir agreganın ile beton üretilen ise fazla miktarda boşlukların doldurulması için bağlayıcı malzemenin artırılması gerekecektir. İyi bir beton üretimi için yeterli doluluk oranını sağlayacak agreganın granülometrisi seçilmesi gerekmektedir. Agregalarda bu durum önemsenmektedir. Fakat uçucu kül gibi puzolanik malzemelerde toz malzeme gradasyonu göz ardı edilmektedir. İyi bir gradasyon olmadığı sürece boşluk oranları fazla olacak ve hidrasyon sonucu elde edilen ürünler boşlukların tamamını dolduramayacaktır. Agregalar için yapılan en iyi gradasyonu elde etme işlemi uçucu kül gibi malzemelerde yapıldığı takdirde çok az reaksiyon sonucunda oluşacak kimyasal hidrasyon ürünleri bile kolaylıkla tanecikler arası boşlukları doldurup optimum dayanımı sağlayabilir.

Yukardaki bilgiler göz önüne alındığında, bu bölümde en uygun uçucu kül tane boyut dağılımını elde etmek için tasarımlar yapılmıştır. Tasarım için modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeli kullanılmıştır [90]. Bu modele göre malzemeler en uygun oranlarda birleştirilerek, boşluk oranı düşük ve yoğunluğu yüksek bir matris elde edilmiştir.

#### 4.2.2. Deneysel Çalışmalar

Vakumlu elek ile elde edilen uçucu kül tane boyut dağılımlarının çimento harcı mekanik özelliklerine etkisini incelenmiştir. Oluşturulan uçucu kül tane boyut dağılımlarının 7, 28 ve 90 günlük çimento harcında basınç ve eğilme dayanımlarına etkisi incelenmiştir.

##### Malzemeler ve Karışım Oranları

Çalışma kapsamında uçucu kül ikameli çimento harcı üretiminde daha önceki bölümde özellikleri detaylı bir şekilde açıklanan CEM I 42.5 R Portland çimentosu, C sınıfı uçucu kül, standart kum ve içilebilir su kullanılmıştır.

Çimento harçları, çimento ağırlığınca %0 kontrol, %5, %10, %15 ve %20 oranında uçucu kül ile değiştirilerek üretilmiştir. Üretilen çimento harçları 24 saat boyunca rutubet ortamında bekletilmiş daha sonra istenilen yaşa kadar su küründe olgunlaştırılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen uçucu kül ikameli çimento harçlarında su/bağlayıcı malzeme oranı (S/BM) 0.50'dir. Çizelge 4.4'de karışımların malzeme oranları gösterilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Çimento harcı karışım oranları

| Bileşen (gram)     | %0 UK | %5 UK | %10 UK | %15 UK | %20 UK |
|--------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Toplam Su          | 225   | 225   | 225    | 225    | 225    |
| Portland Çimentosu | 450   | 427.5 | 405    | 382.5  | 360    |
| Uçucu Kül          | 0     | 22.5  | 45     | 67.5   | 90     |
| Standart Kum       | 1350  | 1350  | 1350   | 1350   | 1350   |

##### Harçların Hazırlanması ve Deneyler

Bu bölümde çalışma üç temel aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada optimum tane dağılımı yapılmamış uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 gün sonunda

basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sonuçları incelenmiştir. Üretilen çimento harçları olgunlaştırılması istenen yaşa kadar su küründe bekletilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımlarında kullanılmak üzere her bir karışım için 40×40×160 mm boyutlara sahip üçer adet prizmatik çimento harçları oluşturulmuştur. Bu prizmatik çimento harçlarının her biri eğilme dayanım deneyine tabii tutulmuş, sonucunda oluşan toplam altı parça çimento harcı ise basınç dayanım deneyine tabii tutulmuştur. Deney yöntemleri ve detayları bir önceki bölümde verildiğinden bu bölümde ilave bir açıklama yapılmamıştır.

Çalışmanın bu bölümünde ikinci aşamada, farklı dağılım modülüne sahip tane dağılımlarının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Uçucu kül etkinliğini daha iyi görebilmek için farklı q dağılım modülüne göre tane dağılımı yapılmış %20 uçucu kül ikame oranında çimento harcı mekanik özellikleri incelenmiştir. İncelenen mekanik dayanımlara göre en ideal sonucu veren dağılım modülü elde edilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde üçüncü aşamada, uçucu külün %5, %10, %15, %20 ve %30 ikame oranında tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. Optimum tane dağılımının dayanıma etkisi gösterilmiştir.

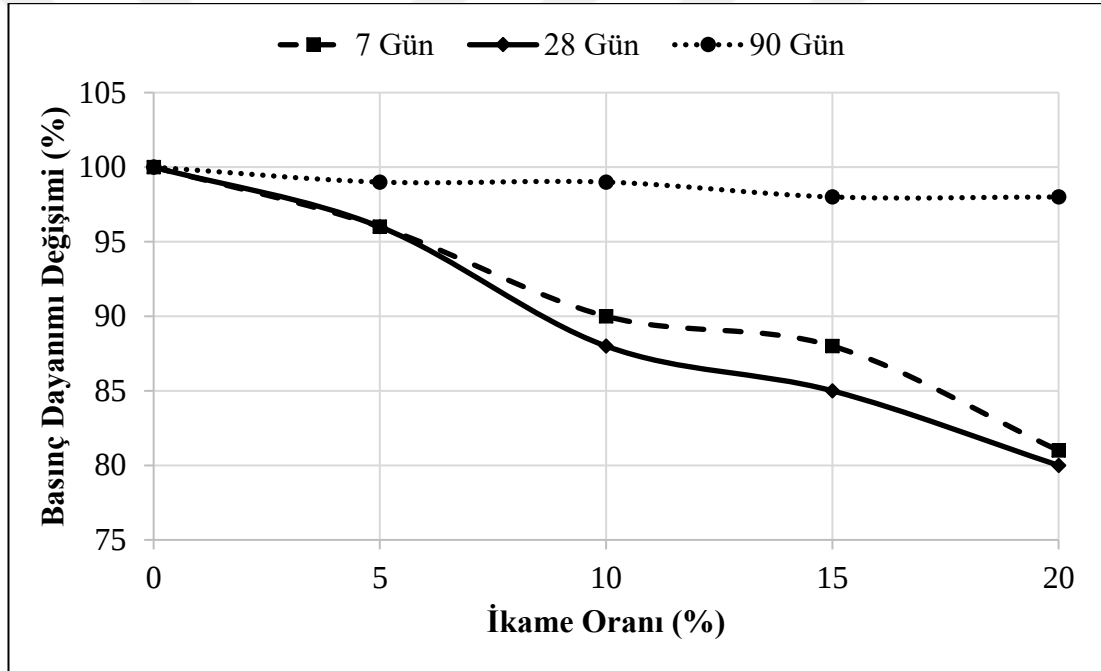
#### **4.2.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma**

##### **Tane Dağılımı Yapılmamış Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının 7, 28 ve 90 Günlük Basınç ve Eğilme Dayanımları**

7, 28 ve 90 gün sonunda tane dağılımı yapılmamış uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.5’de ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Çizelgede verilen her bir basınç dayanımı sonucu altı farklı çimento harcı basınç dayanımından elde edilen verilerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.5.** Tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve standart sapmaları

| İkame Oranı (%) | 7 Gün (MPa) | Standart Sapma | 28 Gün (MPa) | Standart Sapma | 90 Gün (MPa) | Standart Sapma |
|-----------------|-------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 0               | 36.17       | 0.64           | 47.99        | 1.06           | 54.08        | 1.27           |
| 5               | 34.66       | 0.86           | 46.10        | 0.85           | 53.62        | 0.95           |
| 10              | 32.61       | 0.84           | 42.23        | 1.04           | 53.50        | 1.32           |
| 15              | 31.89       | 1.01           | 40.64        | 1.08           | 53.32        | 1.23           |
| 20              | 29.41       | 0.86           | 38.58        | 0.84           | 52.90        | 0.57           |



**Şekil 4.2.** Tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları yüzde değişimi

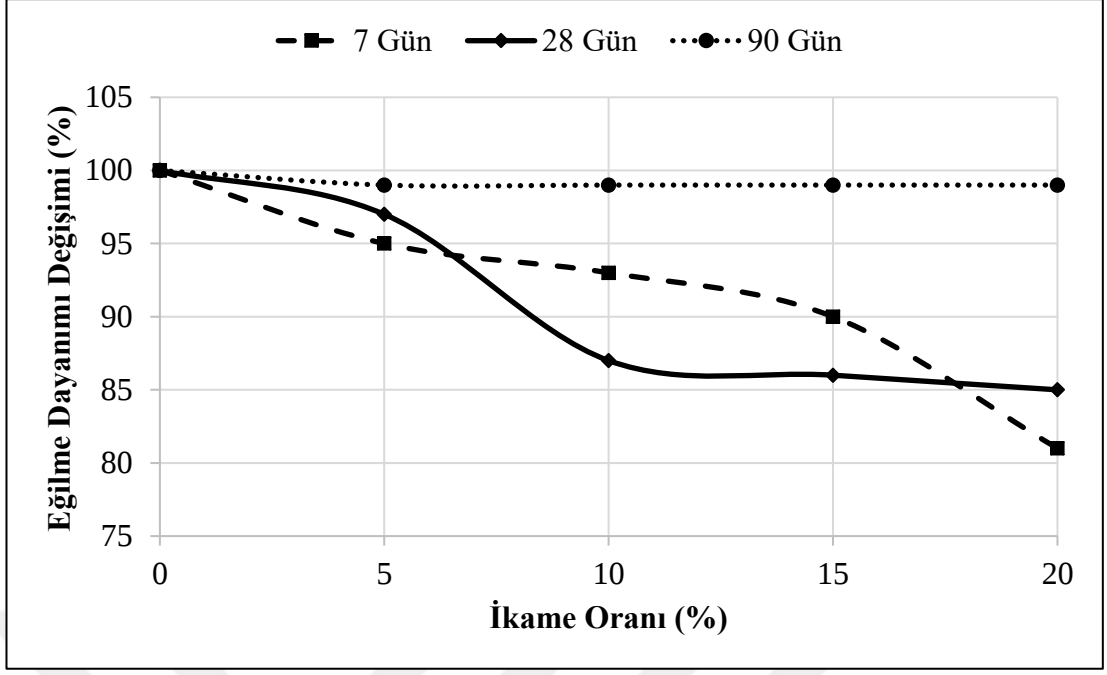
Çizelge 4.5’de ve Şekil 4.2’de görüldüğü gibi beklendiği üzere ikame oranı arttıkça basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Bu düşmenin nedeni çimento miktarının azalmasıdır. Ayrıca çimento yerine ikame edilen uçucu kül özgül yüzey alanı çimentoya göre daha düşük (daha iri) olduğu için geç hidratasyona girmektedir. Bu nedenle erken yaş dayanımları ikame oranı arttıkça düşmektedir. Şekil 4.2’de

görüldüğü gibi 7, 28 ve 90 günlük referans basınç dayanımı değerleri %100 kabul edildiğinde 7 günlük sonuçlar %20 ikame oranında %81, 28 günlük sonuçlar %20 ikame oranında %80 ve 90 günlük sonuçlar %20 ikame oranında %98 değerlerine inmiştir. Standart sapma değerlerine bakıldığında en büyük değer 1.32 elde edilmiştir. Bu sonuç, ortalaması alınan değerlerin ortama değerlere yakınlık gösterdiğini belirtmektedir.

7, 28 ve 90 gün sonunda tane dağılımı yapılmamış uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.6'da ve Şekil 4.3'de verilmiştir. Çizelgede verilen her bir basınç dayanımı sonucu üç farklı çimento harcı eğilme dayanım sonucundan elde edilen verilerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.6.** Tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları ve standart sapmaları

| <b>İkame Oranı (%)</b> | <b>7 Gün (MPa)</b> | <b>Standart Sapma</b> | <b>28 Gün (MPa)</b> | <b>Standart Sapma</b> | <b>90 Gün (MPa)</b> | <b>Standart Sapma</b> |
|------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 0                      | 6.40               | 0.82                  | 8.77                | 0.09                  | 10.39               | 0.59                  |
| 5                      | 6.10               | 0.68                  | 8.47                | 0.10                  | 10.34               | 0.92                  |
| 10                     | 5.96               | 0.36                  | 7.64                | 0.31                  | 10.28               | 0.89                  |
| 15                     | 5.77               | 0.22                  | 7.51                | 0.30                  | 10.26               | 1.08                  |
| 20                     | 5.17               | 0.11                  | 7.44                | 0.23                  | 10.24               | 0.19                  |



**Şekil 4.3.** Tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları

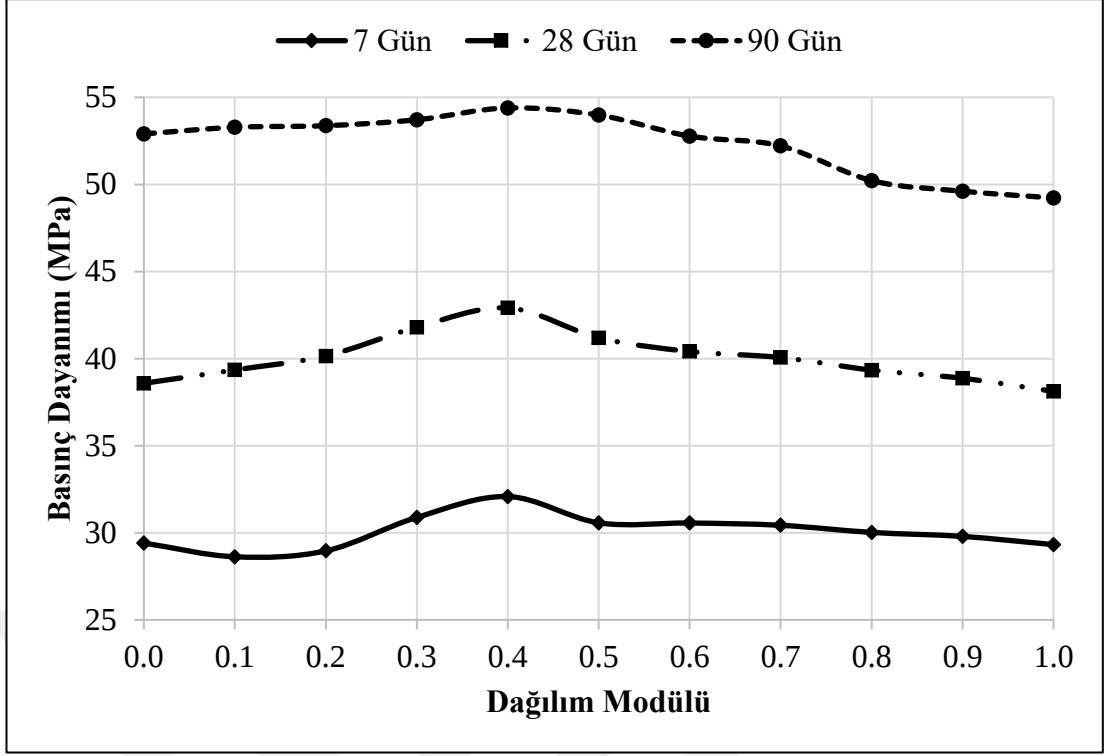
Çizelge 4.6’da ve Şekil 4.3’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça eğilme dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Hidratasyon ilk olarak ince taneler üzerinden başlamaktadır. Uçucu kül özgül yüzey alanı ise çimento özgül yüzey alanından daha küçüktür. Bu nedenle ikame edilen uçucu kül inceliği çimentoya göre daha iri olduğu için geç hidratasyona girmektedir. Bu nedenle erken yaş dayanımları ikame oranı arttıkça düşmektedir. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi 7, 28 ve 90 günlük referans eğilme dayanımı değerleri %100 kabul edildiğinde 7 günlük sonuçlar %20 ikame oranında %81, 28 günlük sonuçlar %20 ikame oranında %85 ve 90 günlük sonuçlar %20 ikame oranında %99 değerlerine inmiştir. Görüldüğü gibi 90 günlük sonuçlarda puzolanik etki ile ikame oranının artması ile eğilme dayanımı azalması %1 mertebelerinde kalmıştır. Standart sapma değerlerine bakıldığında en büyük değer 1.08 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, ortalamayı bulmak için kullanılan eğilme dayanımlarının elde edilen ortalama değere çok yakın olduğunu göstermektedir.

### Tane Dağılımlarının Mekanik Özelliklere Etkisi

Bu bölümde çalışmanın ikinci kısmında farklı q dağılım modüllerine göre tane dağılımlarının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. q dağılım modülünün farklı değerlerine göre uçucu kül etkinliğini daha iyi görebilmek için tane dağılımı yapılmış %20 uçucu kül ikameli çimento harcı mekanik özellikleri incelenmiştir. Tane dağılımları yapılmış %20 UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sonuçları Çizelge 4.7’de ve Şekil 4.4’de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Tane dağılımı yapılmış %20 UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve standart sapmaları

| <b>Dağılım Modülü</b> | <b>7 Gün (MPa)</b> | <b>Standart Sapma</b> | <b>28 Gün (MPa)</b> | <b>Standart Sapma</b> | <b>90 Gün (MPa)</b> | <b>Standart Sapma</b> |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 0.0                   | 29.41              | 0.86                  | 38.58               | 0.84                  | 52.90               | 0.57                  |
| 0.1                   | 28.62              | 0.72                  | 39.35               | 0.49                  | 53.28               | 1.22                  |
| 0.2                   | 28.96              | 0.68                  | 40.15               | 0.64                  | 53.37               | 0.86                  |
| 0.3                   | 30.88              | 0.81                  | 41.80               | 0.74                  | 53.71               | 1.04                  |
| 0.4                   | 32.08              | 1.04                  | 42.91               | 1.13                  | 54.39               | 1.03                  |
| 0.5                   | 30.57              | 0.59                  | 41.19               | 0.77                  | 53.98               | 0.58                  |
| 0.6                   | 30.56              | 0.86                  | 40.41               | 1.00                  | 52.77               | 1.02                  |
| 0.7                   | 30.43              | 0.74                  | 40.06               | 0.68                  | 52.21               | 0.68                  |
| 0.8                   | 30.02              | 0.86                  | 39.34               | 1.21                  | 50.22               | 0.71                  |
| 0.9                   | 29.79              | 0.91                  | 38.87               | 0.72                  | 49.61               | 0.22                  |
| 1.0                   | 29.32              | 1.12                  | 38.12               | 0.49                  | 49.22               | 0.82                  |



**Şekil 4.4.** Tane dağılımı yapılmış %20 UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

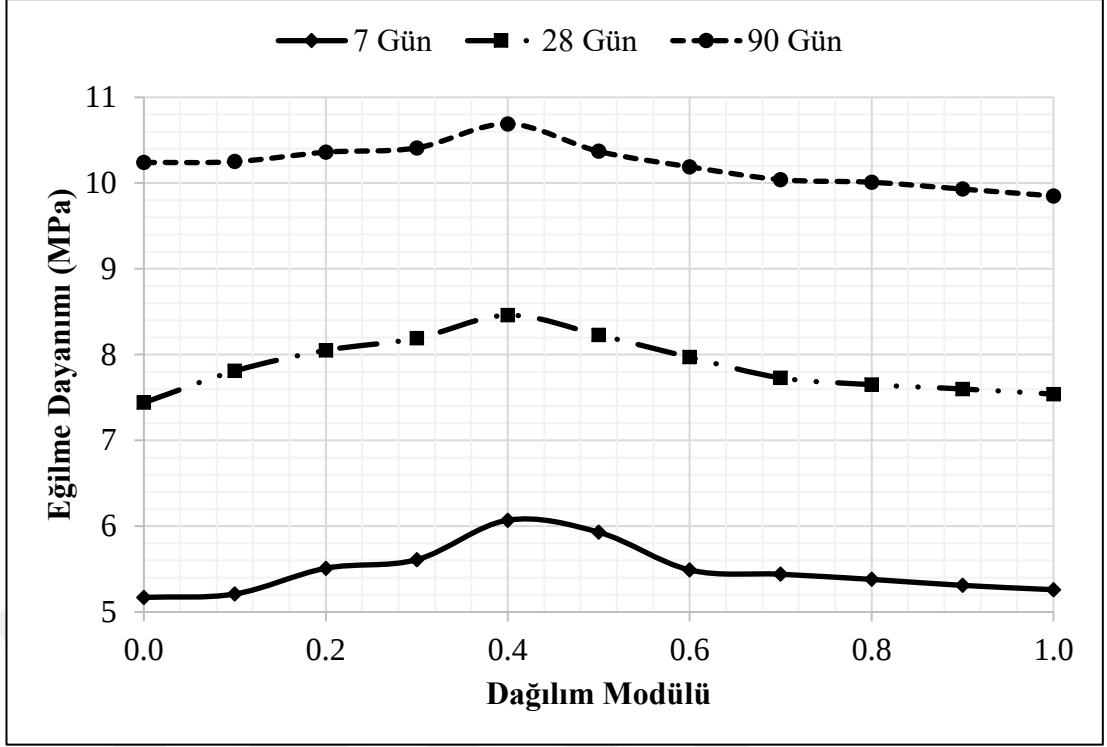
Çizelge 4.7 ve Şekil 4.4'e göre farklı dağılım modülleri için en iyi basınç dayanımlarını 0.4 dağılım modülünün verdiği belirlenmiştir. Dağılım modülü 0.1'den 0.4'e 0.1 hassasiyetle artırılırken basınç dayanımları yükselmiş, 0.4'den 1.0'a kadar olan dağılım modüllerinde basınç dayanımları kademeli olarak düşmüştür. Dağılım modülü 0.3, 0.4 ve 0.5 değerleri en iyi basınç dayanım değerlerini vermiştir.  $q=0.3$ ,  $q=0.4$  ve  $q=0.5$  dağılım modüllerinde çimento harçlarında filler etkisini çok iyi görebiliriz.  $q=0.4$  dağılım modülü ise kompasitenin en fazla artmasını sağlayarak basınç dayanımlarında kayda değer artışlar sağlamıştır. 7 günlük basınç dayanımları dikkate alındığında en yüksek basınç dayanımı  $q=0.4$  dağılım modülü için 32.08 MPa elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımları dikkate alındığında en yüksek basınç dayanımı  $q=0.4$  dağılım modülü için 42.91 MPa elde edilmiştir. 90 günlük basınç dayanımları dikkate alındığında en yüksek basınç dayanımı  $q=0.4$  dağılım modülü için 54.39 MPa elde edilmiştir. 7 günlük basınç deneyi sonuçlarına göre  $q=0.4$  dağılım modülü için basınç dayanımı referans basınç dayanımına göre %9.08 artmıştır. 28 günlük sonuçlar dikkate alındığında  $q=0.4$  dağılım modülü için basınç dayanımı

referans basınç dayanımına göre %11.22 artmıştır. 90 günlük basınç deneyi sonuçlarına göre  $q=0.4$  dağılım modülü için basınç dayanımı ise referans basınç dayanımına göre %2.82 artış göstermiştir. Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi tüm basınç dayanımları için elde edilen standart sapma değerleri arasında maksimum 1.22 değeri elde edilmiştir. Bu değer 6 örnek üzerinden alınan basınç dayanımlarının hepsinin ortalama dayanıma en fazla  $\pm 1.22$  MPa yakın olduğunu göstermiştir.

Tane dağılımları yapılmış %20 UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları sonuçları Çizelge 4.8’de ve Şekil 4.5’de verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** Tane dağılımı yapılmış %20 UK ikameli Çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları ve standart sapmaları

| <b>Dağılım<br/>Modülü</b> | <b>7 Gün<br/>(MPa)</b> | <b>Standart<br/>Sapma</b> | <b>28 Gün<br/>(MPa)</b> | <b>Standart<br/>Sapma</b> | <b>90 Gün<br/>(MPa)</b> | <b>Standart<br/>Sapma</b> |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0.0                       | 5.17                   | 0.11                      | 7.44                    | 0.23                      | 10.24                   | 0.19                      |
| 0.1                       | 5.21                   | 0.18                      | 7.81                    | 0.13                      | 10.25                   | 0.26                      |
| 0.2                       | 5.51                   | 0.10                      | 8.05                    | 0.17                      | 10.36                   | 0.22                      |
| 0.3                       | 5.61                   | 0.10                      | 8.19                    | 0.36                      | 10.41                   | 0.47                      |
| 0.4                       | 6.07                   | 0.36                      | 8.46                    | 0.49                      | 10.69                   | 0.19                      |
| 0.5                       | 5.93                   | 0.14                      | 8.23                    | 0.24                      | 10.37                   | 0.24                      |
| 0.6                       | 5.49                   | 0.08                      | 7.97                    | 0.32                      | 10.19                   | 0.15                      |
| 0.7                       | 5.44                   | 0.21                      | 7.73                    | 0.26                      | 10.04                   | 0.24                      |
| 0.8                       | 5.38                   | 0.47                      | 7.65                    | 0.42                      | 10.01                   | 0.18                      |
| 0.9                       | 5.31                   | 0.35                      | 7.60                    | 0.21                      | 9.93                    | 0.42                      |
| 1.0                       | 5.26                   | 0.29                      | 7.54                    | 0.39                      | 9.85                    | 0.28                      |



**Şekil 4.5.** Tane dağılımı yapılmış %20 UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.5'e göre farklı dağılım modülleri için en iyi eğilme dayanımlarını 0.4 dağılım modülünün verdiği belirlenmiştir. Dağılım modülü 0.1'den 0.4'e 0.1 hassasiyetle artırılırken eğilme dayanımları yükselmiş, 0.4'den 1.0'a kadar olan dağılım modüllerinde eğilme dayanımları azalmıştır. Dağılım modülü 0.3 ile 0.5 değerleri arasında en iyi eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir.  $q=0.3$ ,  $q=0.4$  ve  $q=0.5$  dağılım modüllerinde çimento harçlarında filler etkisini çok iyi görülmüştür.  $q=0.4$  dağılım modülü ise kompasitenin en fazla artmasını sağlayarak eğilme dayanımlarında kayda değer artışlar sağlamıştır. 7 günlük eğilme dayanımları dikkate alındığında en yüksek eğilme dayanımı  $q=0.4$  dağılım modülü için 6.07 MPa elde edilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımları dikkate alındığında en yüksek eğilme dayanımı  $q=0.4$  dağılım modülü için 8.46 MPa elde edilmiştir. 90 günlük eğilme dayanımları dikkate alındığında en yüksek eğilme dayanımı  $q=0.4$  dağılım modülü için 10.69 MPa elde edilmiştir. 7 günlük sonuçlara göre  $q=0.4$  dağılım modülü için eğilme dayanımı referans eğilme dayanımına göre %17.41 artmıştır. 28 günlük sonuçlar dikkate alındığında  $q=0.4$  dağılım modülü için eğilme dayanımı referans eğilme

dayanımına göre %13.71 artmıştır. 90 günlük sonuçlara göre  $q=0.4$  dağılım modülü için eğilme dayanımı referans eğilme dayanımına göre %4.40 artmıştır. Çizelge 4.8’de görüldüğü gibi tüm eğilme dayanımları için elde edilen standart sapma değerleri, ortalaması alınan eğilme dayanımlarının hepsinin ortalama eğilme dayanımına çok yakın olduğunu göstermiştir.

Uçucu kül için yapılan tane dağılım optimizasyonu çalışmasında filler etkisi ile yüksek kompasite sağlanarak  $q=0.3$ ,  $q=0.4$  ve  $q=0.5$  dağılım modüllerinde 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımlarında yüksek değerler elde edilmiştir.  $q=0.4$  dağılım modülü ise kompasitenin en fazla artmasını sağlayarak basınç ve eğilme dayanımlarında en yüksek değerleri vermiştir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’ye bakıldığında elde edilen yüksek kompasitenin incelikten ve kimyasal oksit değerlerinden kaynaklanmadığı, filler etkisinden kaynaklandığı görülmektedir. Elde edilen mekanik sonuçlara göre parçacık tane dağılımının filler etkisinde çok önemli bir yeri olduğu basınç ve eğilme dayanımlarındaki değişimlere bakılarak görülmektedir. Filler etkisi uçucu kül dağılımındaki boşluklarını minimize ederek yüksek doluluk sağlamaktadır. Bu da kompasitesi yüksek bir dağılım elde edilmesini sağlamaktadır. Agregalarda olduğu gibi uçucu küllerde de filler etkisi sağlandığında yüksek kompasite ile çok iyi dayanımların elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlara bakacak olursak en iyi dolgu etkisini elde etme işleminin uçucu kül üzerinde etkili olduğu görülmüştür.  $q=0.4$  dağılım modülü için en iyi kompasitenin ve filler etkisinin elde edilmesiyle referans dayanımlara göre yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Filler etkisi ile 28 günlük basınç dayanımı referans basınç dayanımına göre yaklaşık %11.22 ile önemli derecede artış sağladığı gözlemlenmiştir. Fakat 90 günlük basınç dayanımı incelendiğinde artış oranı %2.82 seviyelerine inmiştir. Yani minimum boşluklu çimento harcı, hidratasyon sürecinin ilk zamanlarda dolgu etkisi ile hidratasyon ürünleri ile hemen dolacaktır. Referans çimento harcında ise hidratasyon ürünlerinin boşlukları doldurma zamanı daha fazla zaman alacaktır. Bu nedenle 28 günlük basınç dayanımları yüksek çıkmıştır. Standart sapmalar incelendiğinde eğilme ve basınç dayanımları elde edilirken ortalaması alınan tüm sonuçların ortalama değerlere çok yakın olduğu görülmüştür.

## Tane Dağılımı Optimize Edilen ve Optimize Edilmeyen UK İkameli Karışımların Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde üçüncü aşamada, uçucu külün %5, %10, %15, %20 ve %30 ikame oranında tane dağılımı optimize edilmeyen UK ve tane dağılımı optimize edilen UK ( $q=0.4$ ) ikameli çimento harçları mekanik özellikleri ve yayılma deneyi sonuçları karşılaştırılmıştır. Optimum tane dağılımının dayanıma etkisi ve işlenebilirlik etkisi gösterilmiştir.

### Malzemelerin Kodlanması

Çalışmada tane dağılımı optimize edilmiş ( $q=0.4$ ) ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu külle oluşturulan numunelerin kodlanması Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.9.** Farklı uçucu kül ikameli çimento harçlarının kodlanması

| <b>İkame Oranı (%)</b> | <b>Numune Kodu</b> |
|------------------------|--------------------|
| İkamesiz               | UK0                |
| 5 Optimizasyonsuz      | UK5                |
| 5 Optimizasyonlu       | 0.4UK5             |
| 10 Optimizasyonsuz     | UK10               |
| 10 Optimizasyonlu      | 0.4UK10            |
| 15 Optimizasyonsuz     | UK15               |
| 15 Optimizasyonlu      | 0.4UK15            |
| 20 Optimizasyonsuz     | UK20               |
| 20 Optimizasyonlu      | 0.4UK20            |
| 30 Optimizasyonsuz     | UK30               |
| 30 Optimizasyonlu      | 0.4UK30            |

### Yayılma Deneyi

Bu çalışmada tane dağılımı optimize edilmiş ( $q=0.4$ ) ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikamesinin çimento harcı işlenebilirlik ve akıcılık etkisinin görülmesi için yayılma deneyi yapılmıştır. Bu deneyde TS EN 196-1'e göre hazırlanan harçlar sarsma tablası olarak adlandırılan tablanın üzerindeki kesik konik biçimindeki çelik kaba her defasında 25 er kez şişlenerek 2 kademedede yerleştirilmiştir. Daha sonra kesik koni yavaş bir şekilde yukarı doğru kaldırılarak çıkartılmıştır. Ardından harca, sarsma cihazının kolu çevrilerek TS EN 1015-3'e uygun olarak 15 saniyede 25 kez sarsma işlemi uygulanmıştır [94, 100]. Sarsma işlemi sonrasında yayılan harcın çapı her iki doğrultuda ölçülerek ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10'da verilmiştir.

**Çizelge 4.10.** Farklı uçucu kül ikameli çimento harçlarının yayılma deneyi sonuçları

| Numune Kodu | Ortalama Yayılma (mm) |
|-------------|-----------------------|
| UK0         | 185                   |
| UK5         | 180                   |
| 0.4UK5      | 175                   |
| UK10        | 175                   |
| 0.4UK10     | 170                   |
| UK15        | 170                   |
| 0.4UK15     | 165                   |
| UK20        | 160                   |
| 0.4UK20     | 155                   |
| UK30        | 150                   |
| 0.4UK30     | 145                   |

Çizelge 4.10'da görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranının artması ile birlikte ortalama yayılma çapları azalmıştır. Uçucu kül ikamesi içermeyen çimento harçlarında ortalama yayılma 185 mm iken %30 optimum uçucu kül (0.4UK30) ikamesi içeren çimento harcı ortalama yayılması 145 mm ölçülmüştür. Tane dağılımı optimize edilmiş ve

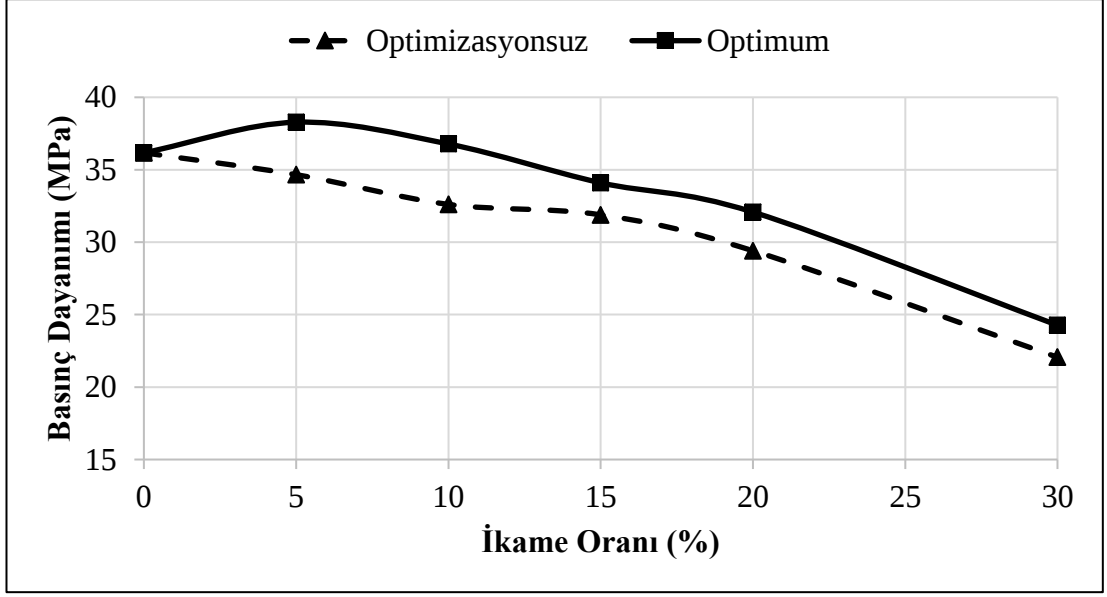
optimize edilmemiş uçucu kül ortalama yayımları karşılaştırdığımızda yayılma değerlerinde az miktarda ortalama %3 azalma görülmüştür.

#### 7 Günlük Sonuçların Karşılaştırılması

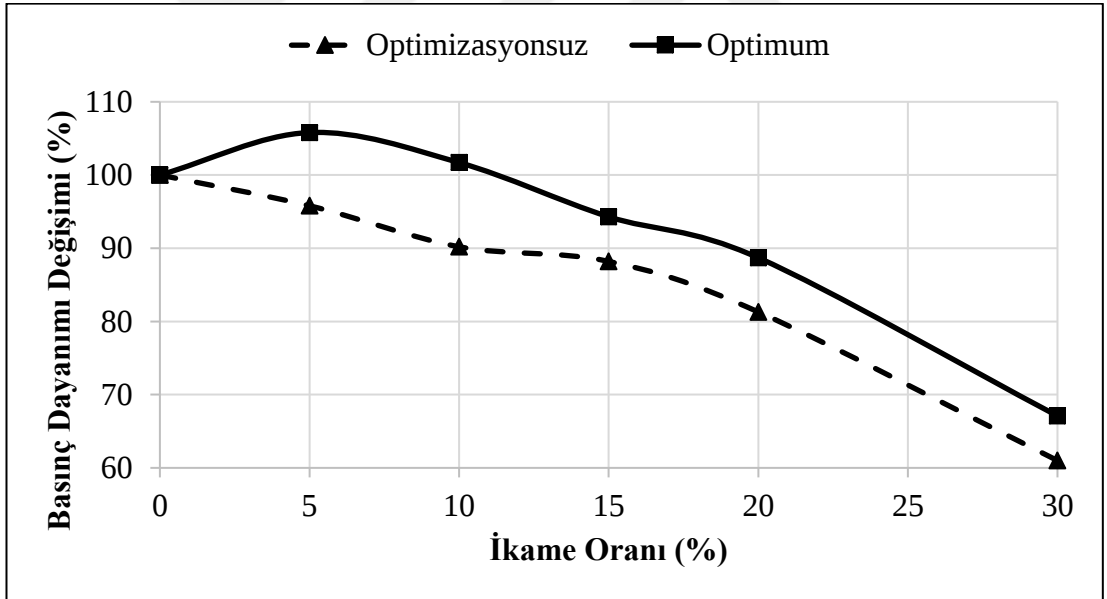
Çizelge 4.11, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de tane dağılımı optimize edilen ( $q=0.4$ ) ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarının 7 günlük basınç dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 4.11.** 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları

| <b>Numune Kodu</b> | <b>Dayanım (MPa)</b> | <b>Dayanım Değişimi (%)</b> | <b>Standart Sapma</b> |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| UK0                | 36.17                | 100.0                       | 0.64                  |
| UK5                | 34.66                | 95.8                        | 0.86                  |
| 0.4UK5             | 38.28                | 105.8                       | 1.05                  |
| UK10               | 32.61                | 90.2                        | 0.84                  |
| 0.4UK10            | 36.78                | 101.7                       | 0.54                  |
| UK15               | 31.89                | 88.2                        | 1.01                  |
| 0.4UK15            | 34.10                | 94.3                        | 0.43                  |
| UK20               | 29.41                | 81.3                        | 0.86                  |
| 0.4UK20            | 32.08                | 88.7                        | 1.04                  |
| UK30               | 22.06                | 61.0                        | 0.34                  |
| 0.4UK30            | 24.27                | 67.1                        | 0.41                  |



Şekil 4.6. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları



Şekil 4.7. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımlarının yüzde değişimi

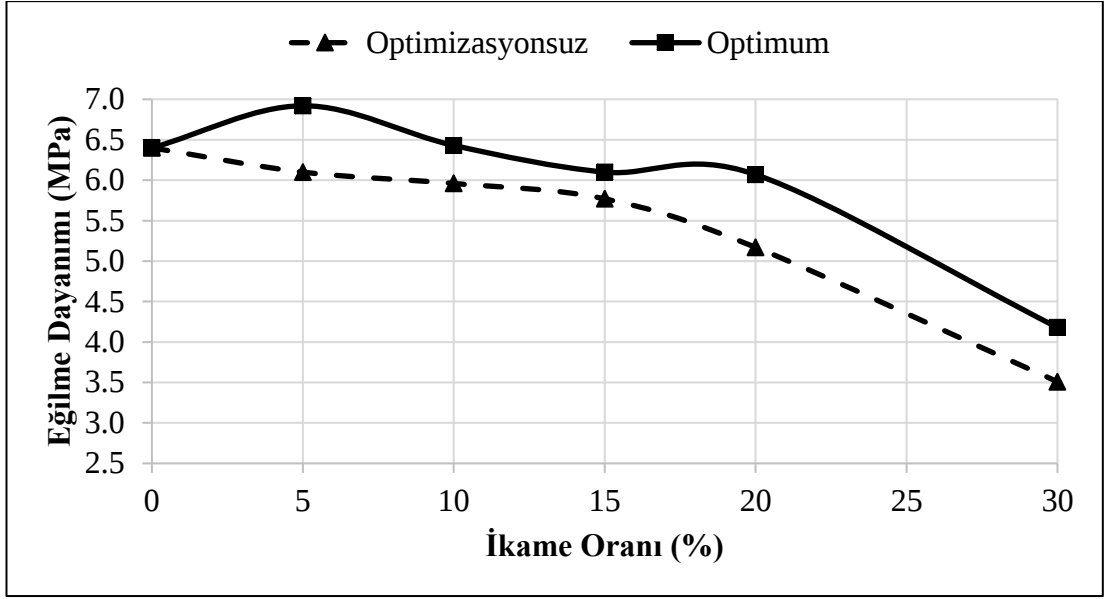
Çizelge 4.11, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi 7 günlük basınç dayanımlarında, optimum basınç dayanımları optimizasyonsuz basınç dayanımlarına göre %5 ikame oranında %10.4, %10 ikame oranında %12.8, %15 ikame oranında %6.9, %20 ikame

oranında %9.1 ve %30 ikame oranında ise %10.0 basınç dayanımlarında artış görülmüştür. 7 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 38.28 MPa olarak elde edilmiştir. 7 günlük basınç dayanımını en iyi artıran optimum ikame oranı %5 olarak görülmüştür. %5 ikame oranında ki basınç dayanımı katkısız çimento harçlarında ki basınç dayanımından %5.8 daha yüksek elde edilmiştir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi tüm ikame oranlarında optimum basınç dayanımları optimizasyonsuz dayanımlardan yüksek çıkmıştır. %5 optimum UK ikame oranında basınç dayanımı ikamesiz basınç dayanımından yüksek çıkmıştır. Standart sapma değerleri incelendiğinde en yüksek değer 1.04 çıkmıştır. Ortalamaları elde ettiğimiz değerlerin sapmasının çok az olduğu görülmüştür.

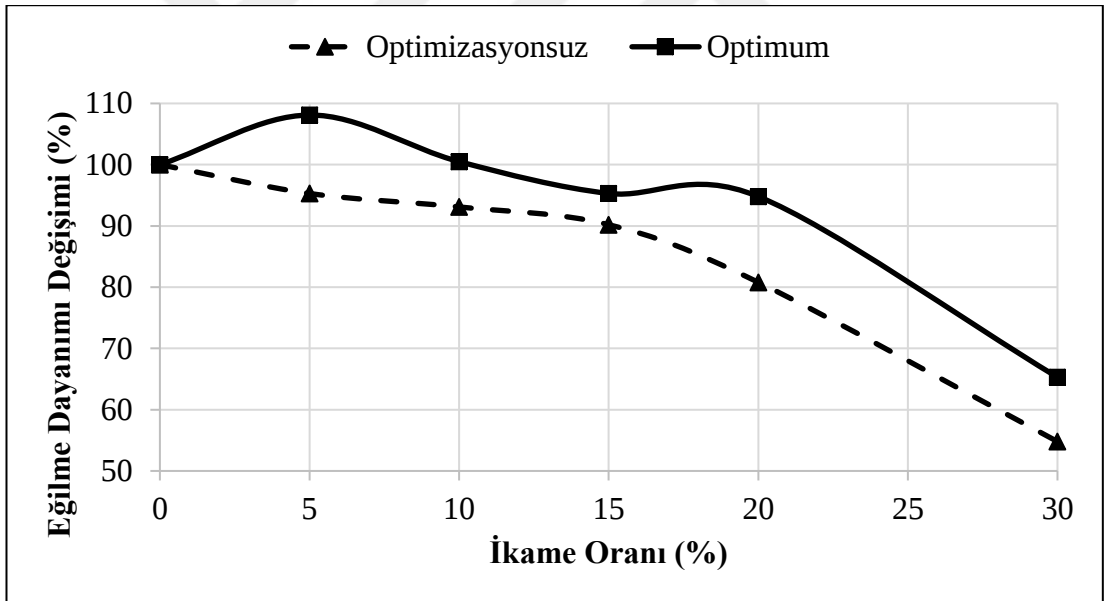
Çizelge 4.12, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da tane dağılımı optimize edilmiş UK ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarının 7 günlük eğilme dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 4.12.** 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları

| <b>Numune Kodu</b> | <b>Dayanım (MPa)</b> | <b>Dayanım Değişimi (%)</b> | <b>Standart Sapma</b> |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| UK0                | 6.40                 | 100.0                       | 0.82                  |
| UK5                | 6.10                 | 95.3                        | 0.68                  |
| 0.4UK5             | 6.92                 | 108.1                       | 0.69                  |
| UK10               | 5.96                 | 93.1                        | 0.36                  |
| 0.4UK10            | 6.43                 | 100.5                       | 0.17                  |
| UK15               | 5.77                 | 90.2                        | 0.22                  |
| 0.4UK15            | 6.10                 | 95.3                        | 0.17                  |
| UK20               | 5.17                 | 80.8                        | 0.11                  |
| 0.4UK20            | 6.07                 | 94.8                        | 0.36                  |
| UK30               | 3.51                 | 54.8                        | 0.14                  |
| 0.4UK30            | 4.18                 | 65.3                        | 0.18                  |



Şekil 4.8. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları



Şekil 4.9. 7 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarının yüzde değişimi

Çizelge 4.12, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görüldüğü gibi 7 günlük eğilme dayanımlarında, optimum eğilme dayanımları optimizasyonsuz eğilme dayanımlarına göre %5 ikame oranında %13.4, %10 ikame oranında %7.9, %15 ikame oranında

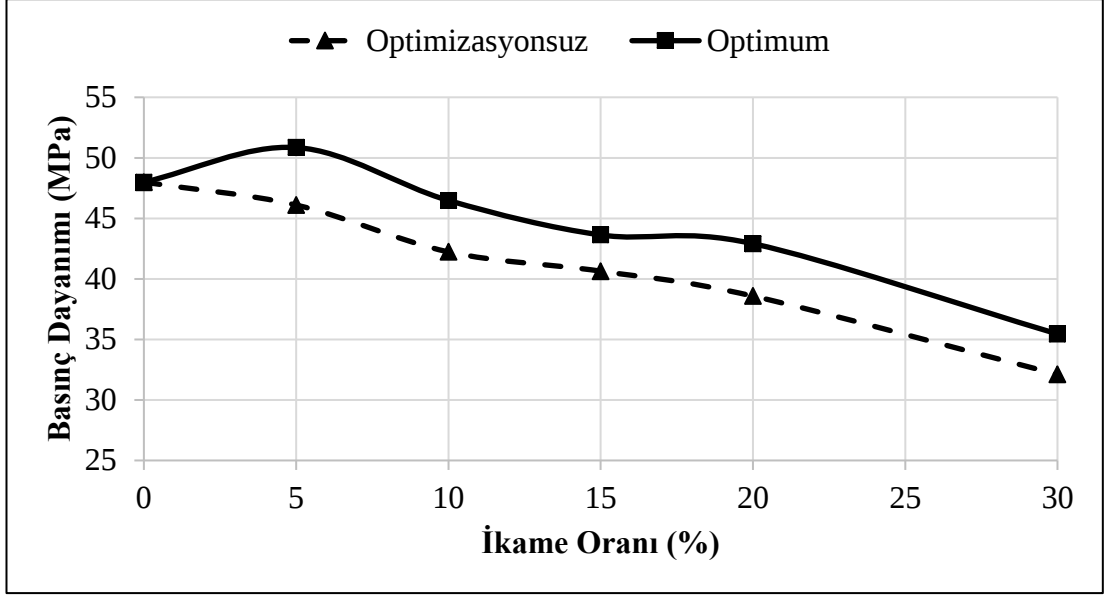
%5.7, %20 ikame oranında %17.4 ve %30 ikame oranında ise %19.1 eğilme dayanımlarında artış görülmüştür. 7 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 6.92 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki eğilme dayanımı katkısız çimento harçlarında ki eğilme dayanımından %8.1 daha fazla elde edilmiştir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi tüm ikame oranlarında optimum eğilme dayanımları optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır. %5 ve %10 optimum UK ikame oranında eğilme dayanımı ikamesiz eğilme dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Standart sapma değerleri incelendiğinde en yüksek değer 0.82 çıkmıştır. Ortalamaları elde ettiğimiz değerlerin sapmasının çok az olduğu görülmüştür.

#### 28 Günlük Sonuçların Karşılaştırılması

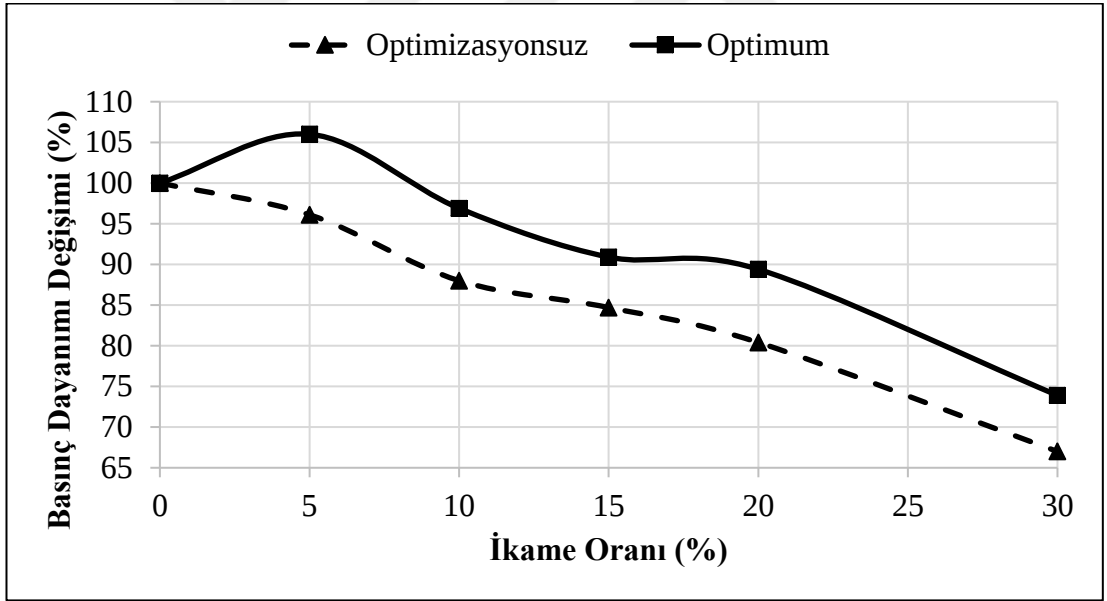
Çizelge 4.13 ve Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de tane dağılımı optimize edilmiş UK ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarının 28 günlük basınç dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 4.13.** 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları

| Numune Kodu | Dayanım (MPa) | Dayanım Değişimi (%) | Standart Sapma |
|-------------|---------------|----------------------|----------------|
| UK0         | 47.99         | 100.0                | 1.06           |
| UK5         | 46.10         | 96.1                 | 0.85           |
| 0.4UK5      | 50.85         | 106.0                | 0.83           |
| UK10        | 42.23         | 88.0                 | 1.04           |
| 0.4UK10     | 46.48         | 96.9                 | 0.75           |
| UK15        | 40.64         | 84.7                 | 1.08           |
| 0.4UK15     | 43.63         | 90.9                 | 1.08           |
| UK20        | 38.58         | 80.4                 | 0.84           |
| 0.4UK20     | 42.91         | 89.4                 | 1.13           |
| UK30        | 32.11         | 67.0                 | 0.14           |
| 0.4UK30     | 35.45         | 73.9                 | 0.49           |



Şekil 4.10. 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları



Şekil 4.11. 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımlarının yüzde değişimi

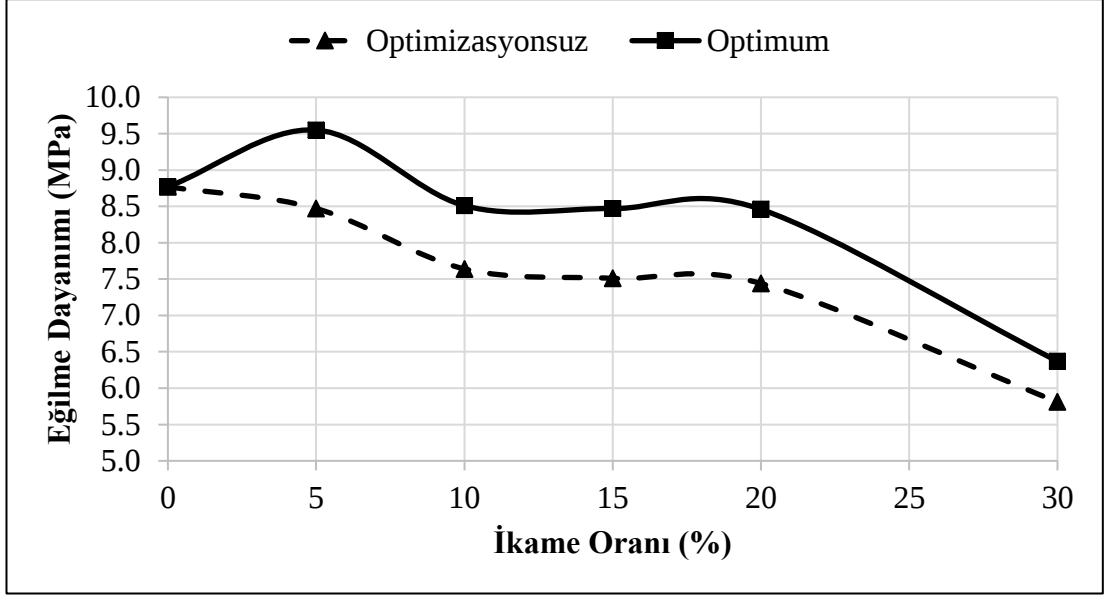
Çizelge 4.13, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de görüldüğü gibi 28 günlük basınç dayanımlarında, optimum basınç dayanımları optimizasyonsuz basınç dayanımlarına göre %5 ikame oranında %10.3, %10 ikame oranında %10.1, %15 ikame oranında

%7.4, %20 ikame oranında %11.2 ve %30 ikame oranında ise %10.4 basınç dayanımlarında artış görülmüştür. 28 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 50.85 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki basınç dayanımı katkısız çimento harçlarında ki basınç dayanımından %5.9 daha yüksek elde edilmiştir. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi tüm ikame oranlarında optimum basınç dayanımları optimizasyonsuz basınç dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır. %5 optimum UK ikame oranında basınç dayanımı ikamesiz basınç dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Standart sapma değerleri incelendiğinde en yüksek değer 1.13 çıkmıştır. Ortalamaları elde ettiğimiz değerlerin sapmasının çok az olduğu görülmüştür.

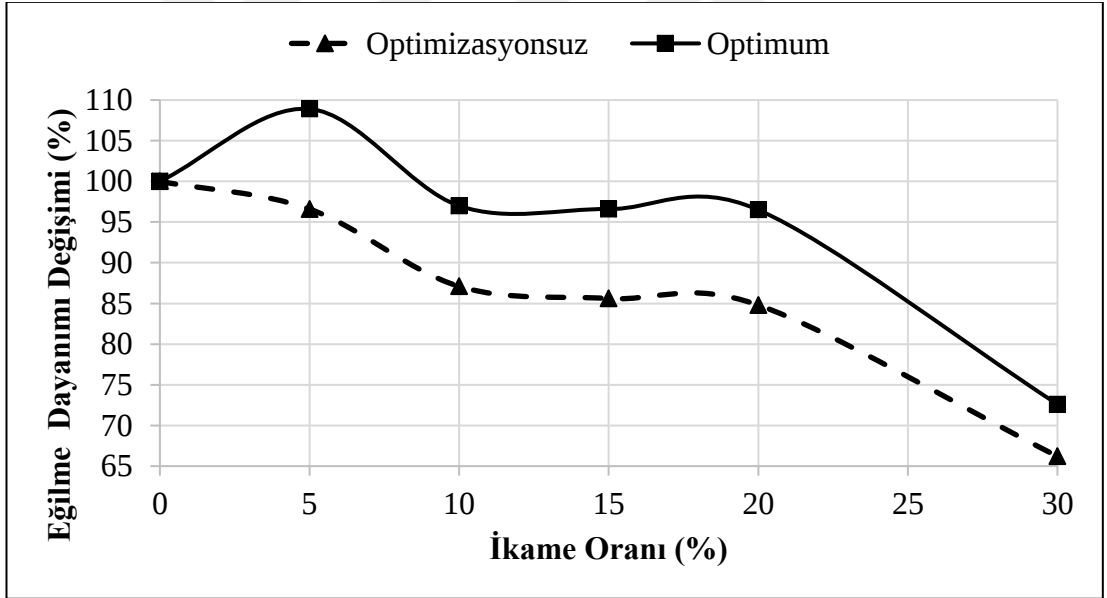
Çizelge 4.14, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de tane dağılımı optimize edilmiş UK ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarının 28 günlük eğilme dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 4.14.** 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları

| <b>Numune Kodu</b> | <b>Dayanım (MPa)</b> | <b>Dayanım Değişimi (%)</b> | <b>Standart Sapma</b> |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| UK0                | 8.77                 | 100.0                       | 0.09                  |
| UK5                | 8.47                 | 96.6                        | 0.10                  |
| 0.4UK5             | 9.55                 | 108.9                       | 0.56                  |
| UK10               | 7.64                 | 87.1                        | 0.31                  |
| 0.4UK10            | 8.51                 | 97.0                        | 0.34                  |
| UK15               | 7.51                 | 85.6                        | 0.30                  |
| 0.4UK15            | 8.47                 | 96.6                        | 0.33                  |
| UK20               | 7.44                 | 84.8                        | 0.23                  |
| 0.4UK20            | 8.46                 | 96.5                        | 0.49                  |
| UK30               | 5.81                 | 66.2                        | 0.05                  |
| 0.4UK30            | 6.37                 | 72.6                        | 0.05                  |



Şekil 4.12. 28 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları



Şekil 4.13. 28 günlük optimum UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarının yüzde değişimi

Çizelge 4.14, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de görüldüğü gibi 28 günlük eğilme dayanımlarında, optimum eğilme dayanımları optimizasyonsuz eğilme dayanımlarına göre %5 ikame oranında %12.7, %10 ikame oranında %11.4, %15 ikame oranında

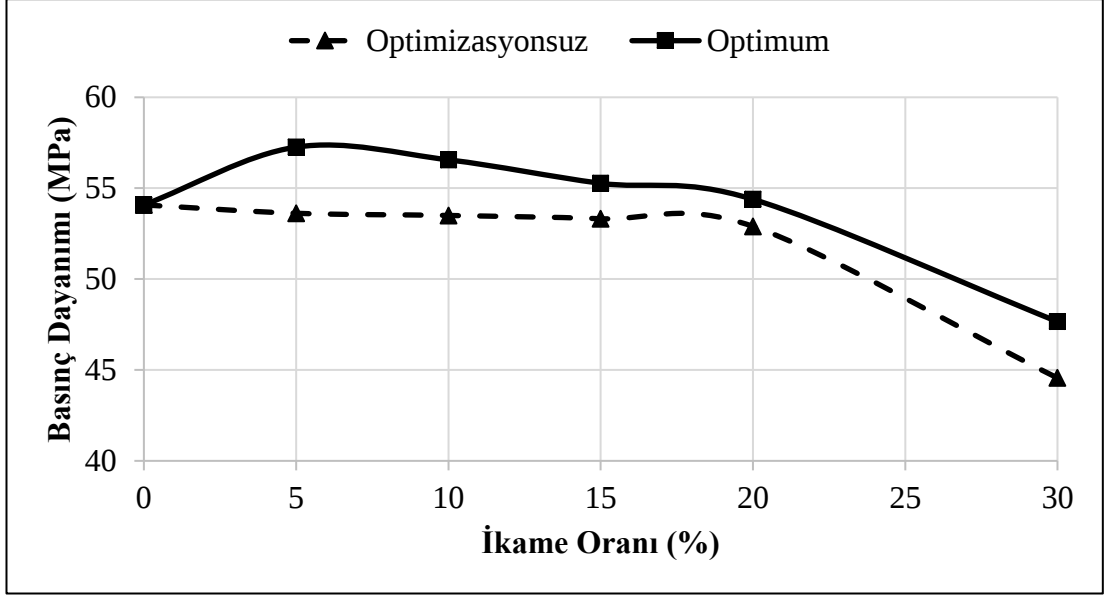
%12.8, %20 ikame oranında %13.7 ve %30 ikame oranında ise %9.6 eğilme dayanımlarında artış görülmüştür. 28 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 9.55 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki eğilme dayanımı katkısız çimento harçlarında ki eğilme dayanımından %8.9 daha fazla elde edilmiştir. Şekil 4.13’de görüldüğü gibi tüm ikame oranlarında optimum eğilme dayanımları optimizasyonsuz eğilme dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır. %5 optimum UK ikame oranında eğilme dayanımı ikamesiz eğilme dayanımından daha yüksek elde edilmiştir. Standart sapma değerleri incelendiğinde en yüksek değer 0.56 çıkmıştır. Bu değer ortalamaların bulunmasında çok ufak sapmanın olduğunu göstermektedir.

#### 90 Günlük Sonuçların Karşılaştırılması

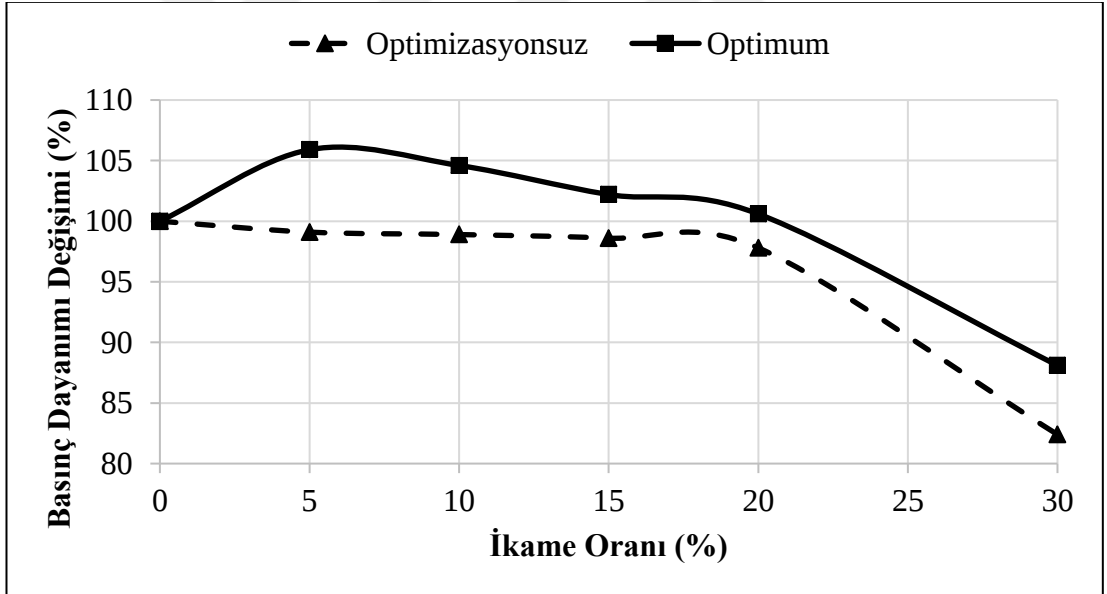
Çizelge 4.15, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de tane dağılımı optimize edilen UK ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük basınç dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 4.15.** 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları

| <b>Numune Kodu</b> | <b>Dayanım (MPa)</b> | <b>Dayanım Değişimi (%)</b> | <b>Standart Sapma</b> |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| UK0                | 54.08                | 100.0                       | 1.27                  |
| UK5                | 53.62                | 99.1                        | 0.95                  |
| 0.4UK5             | 57.26                | 105.9                       | 0.94                  |
| UK10               | 53.50                | 98.9                        | 1.32                  |
| 0.4UK10            | 56.56                | 104.6                       | 0.84                  |
| UK15               | 53.32                | 98.6                        | 1.23                  |
| 0.4UK15            | 55.27                | 102.2                       | 1.17                  |
| UK20               | 52.90                | 97.8                        | 0.57                  |
| 0.4UK20            | 54.39                | 100.6                       | 1.03                  |
| UK30               | 44.56                | 82.4                        | 0.58                  |
| 0.4UK30            | 47.66                | 88.1                        | 0.37                  |



Şekil 4.14. 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımları



Şekil 4.15. 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı basınç dayanımlarının yüzde değişimi

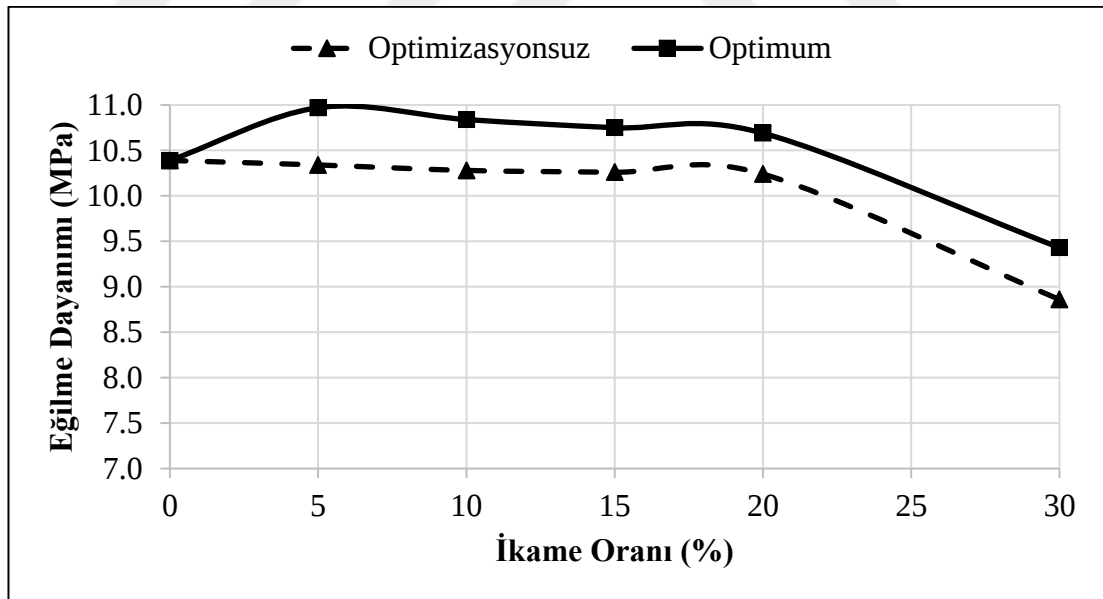
Çizelge 4.15, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de görüldüğü gibi 90 günlük basınç dayanımlarında, optimum basınç dayanımları optimizasyonsuz basınç dayanımlarına göre %5 ikame oranında %6.8, %10 ikame oranında %6.3, %15 ikame oranında %3.7,

%20 ikame oranında %2.8 ve %30 ikame oranında ise %6.9 basınç dayanımlarında artış görülmüştür. 90 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 57.26 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki basınç dayanımı katkısız çimento harçlarında ki basınç dayanımından %5.9, %10 ikame oranında ki basınç dayanımı katkısız çimento harcında ki basınç dayanımından %4.0, %15 ikame oranında ki basınç dayanımı katkısız çimento harcında ki basınç dayanımından %2.2, %20 ikame oranında ki basınç dayanımı katkısız çimento harcında ki basınç dayanımından ise %0.5 daha fazla elde edilmiştir. Şekil 4.15’de görüldüğü gibi tüm ikame oranlarında optimum basınç dayanımları optimizasyonsuz basınç dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır. %5, %10, %15 ve %20 optimum UK ikame oranında basınç dayanımları ikamesiz basınç dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Standart sapma değerleri incelendiğinde en yüksek değer 1.27 çıkmıştır. Bu değer ortalamaların bulunmasında az miktarda sapmanın olduğunu göstermektedir.

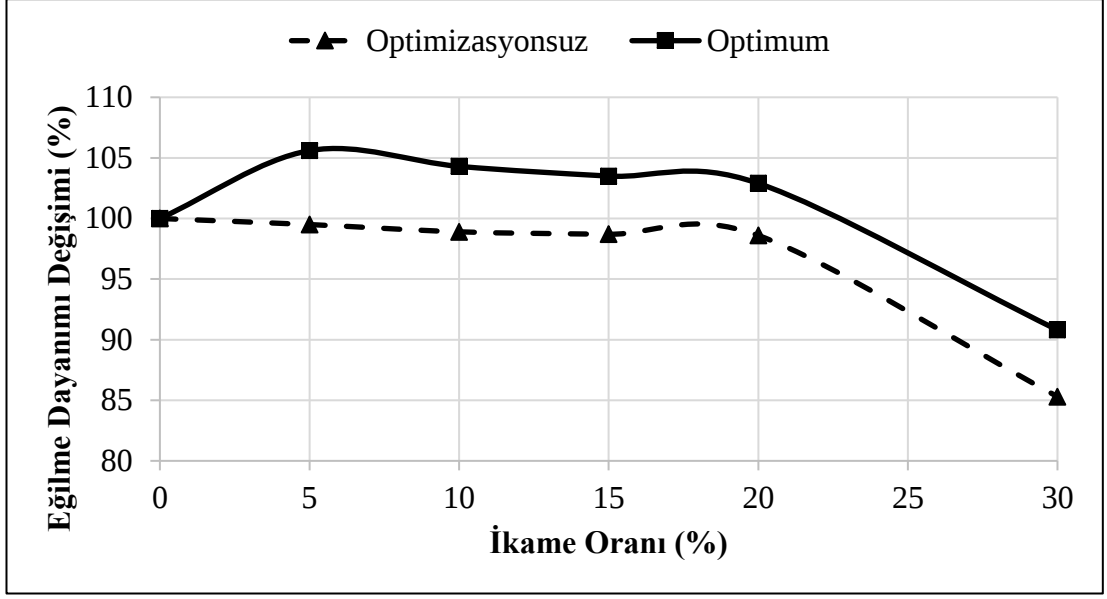
Çizelge 4.16, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de tane dağılımı optimize edilen UK ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük eğilme dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 4.16.** 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları

| Numune Kodu | Dayanım (MPa) | Dayanım Değişimi (%) | Standart Sapma |
|-------------|---------------|----------------------|----------------|
| UK0         | 10.39         | 100.0                | 0.59           |
| UK5         | 10.34         | 99.5                 | 0.92           |
| 0.4UK5      | 10.97         | 105.6                | 0.39           |
| UK10        | 10.28         | 98.9                 | 0.89           |
| 0.4UK10     | 10.84         | 104.3                | 0.07           |
| UK15        | 10.26         | 98.7                 | 1.08           |
| 0.4UK15     | 10.75         | 103.5                | 0.13           |
| UK20        | 10.24         | 98.6                 | 0.19           |
| 0.4UK20     | 10.69         | 102.9                | 0.19           |
| UK30        | 8.86          | 85.3                 | 0.17           |
| 0.4UK30     | 9.43          | 90.8                 | 0.16           |



**Şekil 4.16.** 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımları



**Şekil 4.17.** 90 günlük optimum uçucu kül ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarının yüzde değişimi

Çizelge 4.16, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de görüldüğü gibi 90 günlük eğilme dayanımlarında, optimum eğilme dayanımları optimizasyonsuz eğilme dayanımlarına göre %5 ikame oranında %6.1, %10 ikame oranında %5.4, %15 ikame oranında %4.8, %20 ikame oranında %4.4 ve %30 ikame oranında ise %6.4 eğilme dayanımlarında artış görülmüştür. 90 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 10.97 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki eğilme dayanımı katkısız çimento harçlarında ki eğilme dayanımından %5.6, %10 ikame oranında ki eğilme dayanımı katkısız çimento harçlarında ki eğilme dayanımından %4.3, %15 ikame oranında ki eğilme dayanımı katkısız çimento harçlarında ki eğilme dayanımından %3.5, %20 ikame oranında ki eğilme dayanımı katkısız çimento harçlarında ki eğilme dayanımından ise %2.9 daha fazla elde edilmiştir. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi tüm ikame oranlarında optimum eğilme dayanımları optimizasyonsuz eğilme dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır. %5, %10, %15 ve %20 optimum UK ikame oranında eğilme dayanımları ikamesiz eğilme dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Standart sapma değerleri incelendiğinde en yüksek değer 1.08 çıkmıştır. Bu değer ortalamaların bulunmasında az miktarda sapmanın olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak bu aşamada yüksek doluluk etkisinin elde edildiği  $q=0.4$  dağılım modülü 7, 28 ve 90 günde basınç ve eğilme dayanımlarını her ikame oranında optimizasyonsuz değerlere göre artırmıştır. 7, 28 ve 90 günlük %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum UK ikameli çimento harçlarının basınç ve eğilme dayanımları aynı yaştaki optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç ve eğilme dayanımlarından yüksek çıkmıştır. 90 günlük optimum basınç dayanımları 28 günlük optimum basınç dayanımlarına göre %5, %10, %15, %20 ve %30 ikame oranlarında sırasıyla %12.7, %12.6, %21.7, %26.7 ve %34.4 oranında artmıştır. 28 günlük optimum basınç dayanımları 7 günlük optimum basınç dayanımlarına göre %5, %10, %15, %20 ve %30 ikame oranlarında sırasıyla %32.7, %32.8, %26.4, %27.9, %33.8 ve %46.1 oranında artmıştır. Bu sonuçlar olgunlaştırma süresi arttıkça hidrasyon olayı ilerlediğinden dayanımın daha yüksek çıktığını göstermiştir. Ayrıca basınç ve eğilme dayanımlarını optimizasyonsuz ve optimum olarak karşılaştırdığımızda yüksek dolgu etkisinin dayanımı aynı ikame oranında artırdığı görülmektedir. Bu sonuçlar dolgu etkisinin istenilen dayanımı elde etmek için çimento dozajından tasarrufu sağlayacağını göstermektedir.

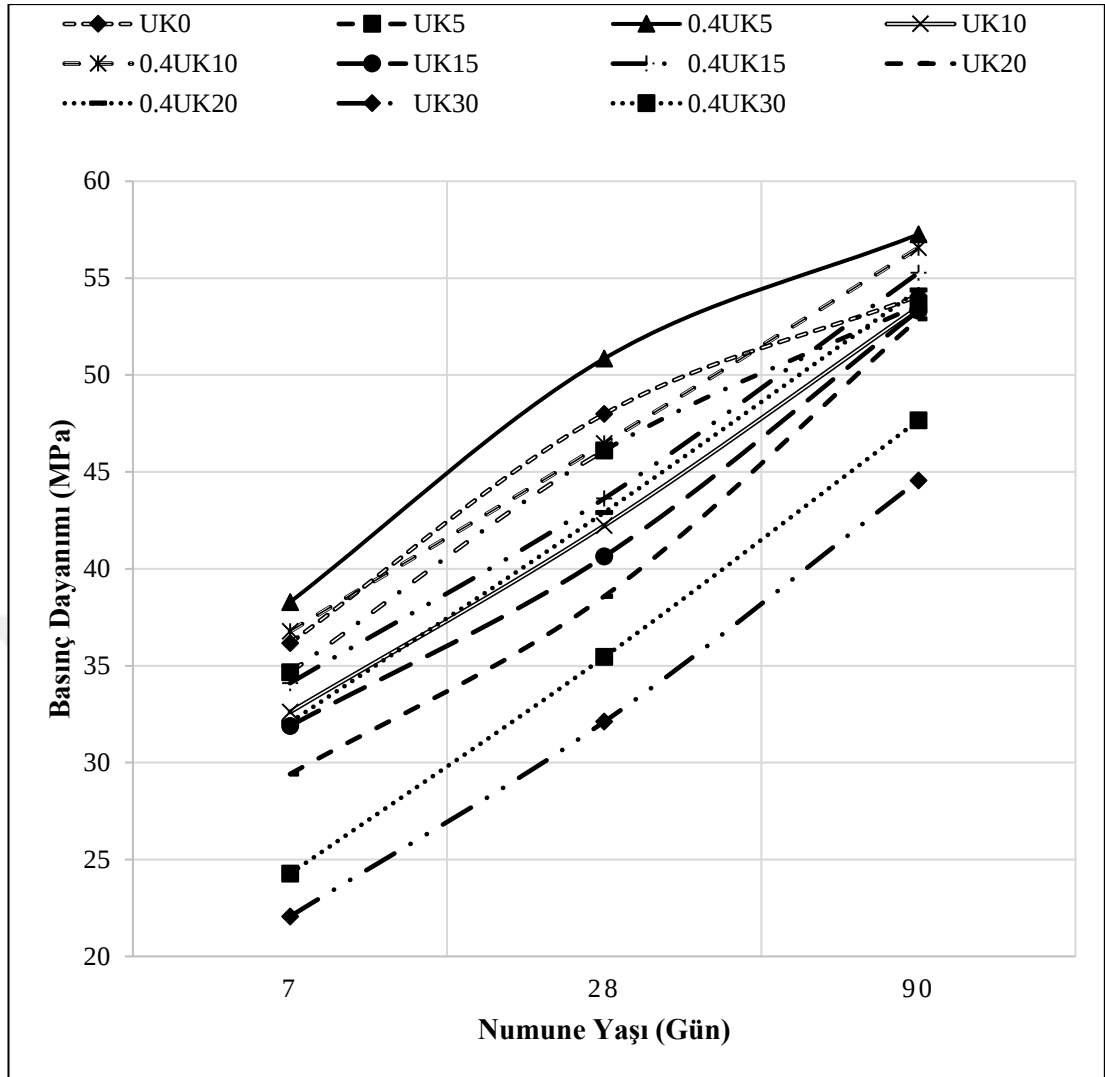
#### Optimize Edilen ve Optimize Edilmeyen UK İkameli Çimento Harcı Mekanik Özelliklerinin Kendi İçlerinde Karşılaştırılması

7, 28 ve 90 günlük optimum UK ikameli çimento harcı basınç ve eğilme dayanımı bazı ikame oranlarında daha düşük ikameli ve optimizasyonsuz çimento harcı eğilme ve basınç dayanımından fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar dolgu etkisinin çimento dozajında tasarruf sağlayacağını ve UK ikamesi ile çimento üretiminde açığa çıkan karbondioksit ( $CO_2$ ) salınımını da daha çok azaltacağını göstermektedir.

Çizelge 4.17 ve Şekil 4.18’de tane dağılımı optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ile optimizasyonu yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları karşılaştırılması bulunmaktadır.

**Çizelge 4.17.** Optimizasyonsuz ve optimizasyonlu UK ikameli çimento harçlarının farklı yaşlardaki basınç dayanımları

| Numune Kodu | 7 Gün (MPa) | 28 Gün (MPa) | 90 Gün (MPa) |
|-------------|-------------|--------------|--------------|
| UK0         | 36.17       | 47.99        | 54.08        |
| UK5         | 34.66       | 46.10        | 53.62        |
| 0.4UK5      | 38.28       | 50.85        | 57.26        |
| UK10        | 32.61       | 42.23        | 53.50        |
| 0.4UK10     | 36.78       | 46.48        | 56.56        |
| UK15        | 31.89       | 40.64        | 53.32        |
| 0.4UK15     | 34.10       | 43.63        | 55.27        |
| UK20        | 29.41       | 38.58        | 52.90        |
| 0.4UK20     | 32.08       | 42.91        | 54.39        |
| UK30        | 22.06       | 32.11        | 44.56        |
| 0.4UK30     | 24.27       | 35.45        | 47.66        |

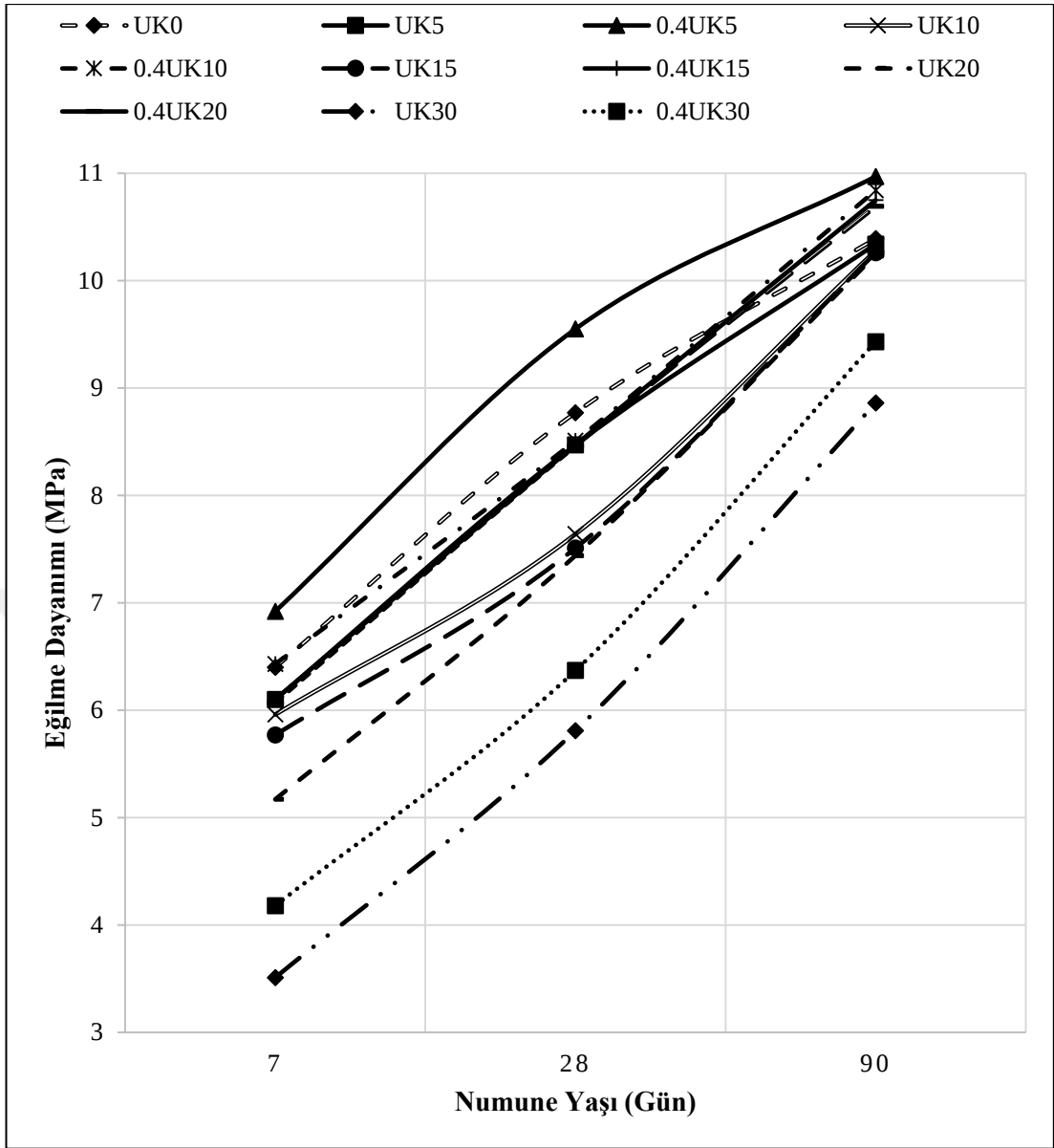


**Şekil 4.18.** Optimizasyonsuz ve optimizasyonlu UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı-yaş ilişkisi

Çizelge 4.18 ve Şekil 4.19’da tane dağılımı optimize edilen UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları ile optimizasyonu yapılmamış UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları karşılaştırılması bulunmaktadır.

**Çizelge 4.18.** Optimizasyonsuz ve optimizasyonlu UK ikameli çimento harçlarının farklı yaşlardaki eğilme dayanımları

| Numune Kodu | 7 Gün (MPa) | 28 Gün (MPa) | 90 Gün (MPa) |
|-------------|-------------|--------------|--------------|
| UK0         | 6.40        | 8.77         | 10.39        |
| UK5         | 6.10        | 8.47         | 10.34        |
| 0.4UK5      | 6.92        | 9.55         | 10.97        |
| UK10        | 5.96        | 7.64         | 10.28        |
| 0.4UK10     | 6.43        | 8.51         | 10.84        |
| UK15        | 5.77        | 7.51         | 10.26        |
| 0.4UK15     | 6.10        | 8.47         | 10.75        |
| UK20        | 5.17        | 7.44         | 10.24        |
| 0.4UK20     | 6.07        | 8.46         | 10.69        |
| UK30        | 3.51        | 5.81         | 8.86         |
| 0.4UK30     | 4.18        | 6.37         | 9.43         |



**Şekil 4.19.** Optimizasyonsuz ve optimizasyonlu UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımı-yaş ilişkisi

Çizelge 4.17, Çizelge 4.18, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’de görüldüğü gibi;

- %30 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımları sadece optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç dayanımından yüksek çıkmıştır.

- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, %15 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç dayanımından 7 gün için %0.6, 28 gün için %5.6 ve 90 gün için %2 yüksek çıkmıştır.
- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, %10 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç dayanımından 7 günde %1.0 daha düşük, 28 günde %1.6 ve 90 günde %1.7 yüksek çıkmıştır.
- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç dayanımından 7 gün için %8.0, 28 gün için %7.4 daha düşük ve 90 gün için %1.4 yüksek çıkmıştır.
- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, UK ikamesiz çimento harcı basınç dayanımından 7 gün için %12.7, 28 gün için %11.8 daha düşük ve 90 gün için %0.6 yüksek çıkmıştır.
- %15 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, %10 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç dayanımından 7 gün için %4.6, 28 gün için %3.3 ve 90 gün için %3.3 yüksek çıkmıştır.
- %15 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç dayanımından 7 gün için %1.6, 28 gün için %5.7 daha düşük ve 90 gün için %3.1 yüksek çıkmıştır.
- %15 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, UK ikamesiz çimento harcı basınç dayanımından 7 gün için %6.1, 28 gün için %10.0 daha düşük ve 90 gün için %2.2 yüksek çıkmıştır.
- %10 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç dayanımından 7 gün için %6.1, 28 gün için %0.8 ve 90 gün için %5.5 yüksek çıkmıştır.
- %10 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, UK ikamesiz çimento harcı basınç dayanımından 7 gün için %1.7 daha yüksek, 28 gün için %3.2 daha düşük ve 90 gün için %4.6 yüksek çıkmıştır.
- %5 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımı, UK ikamesiz çimento harcı basınç dayanımından 7 gün için %5.8, 28 gün için %6.0 ve 90 gün için %5.9 yüksek çıkmıştır.
- %30 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımları sadece optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımından yüksek çıkmıştır.

- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, %15 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımından 7 gün için %5.2, 28 gün için %12.6 ve 90 gün için %4.2 yüksek çıkmıştır.
- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, %10 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımından 7 gün için %1.8, 28 gün için %10.7 ve 90 gün için %4.0 yüksek çıkmıştır.
- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımından 7 gün için %0.5, 28 gün için %0.1 daha düşük ve 90 gün için %3.4 yüksek çıkmıştır.
- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, UK ikamesiz çimento harcı eğilme dayanımından 7 gün için %0.5, 28 gün için %3.7 daha düşük ve 90 gün için %2.9 yüksek çıkmıştır.
- %15 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, %10 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımından 7 gün için %2.3, 28 gün için %10.9 ve 90 gün için %4.6 yüksek çıkmıştır.
- %15 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımından 7 ve 28 gün için aynı ve 90 gün için ise %4.0 yüksek çıkmıştır.
- %15 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, UK ikamesiz çimento harcı eğilme dayanımlarından 7 gün için %4.9, 28 gün için %3.5 daha düşük, 90 gün için %3.5 yüksek çıkmıştır.
- %10 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımları 7 gün için %5.4 daha düşük, 28 gün için %0.5, 90 gün için %4.8 yüksek çıkmıştır.
- %10 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, UK ikamesiz çimento harcı eğilme dayanımları 7 gün için %0.4 daha yüksek, 28 gün için %3.1 daha düşük, 90 gün için %4.3 yüksek çıkmıştır.
- %5 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımı, UK ikamesiz çimento harcı eğilme dayanımları 7 gün için %8.1, 28 gün için %8.9 ve 90 gün için %5.6 yüksek çıkmıştır.

%20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımları, %15 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımlarından tüm günlerde

daha yüksek çıkmıştır. %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımları, %10 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımlarından 7 günlük basınç dayanımı hariç tüm günlerde daha yüksek çıkmıştır. Optimizasyonu yapılan %20 UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımları, %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımlarından 7 ve 28 günde daha az, 90 günde ise daha yüksek çıkmıştır. Optimizasyonu yapılan %20 UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımları, UK ikamesiz çimento harcı mekanik dayanımlarından 7 ve 28 günde daha az, 90 günde ise az daha yüksek çıkmıştır. Bu durum puzolanların özelliğinden kaynaklanmaktadır. Puzolanlar ile üretilen harçların ikamesiz harçlara göre dayanımı ilk günlerde düşük, ileri ki günlerde ise yüksek olmaktadır.

%15 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri %10 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik değerlerinden tüm günlerde yüksek çıkmıştır. 7 ve 28 günlük basınç dayanımı hariç tüm değerlerde %15 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik değerlerinden yüksek veya eşit çıkmıştır. 7 ve 28 günlük mekanik dayanımlar hariç 90 günlük değerlerde %15 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri UK ikamesiz çimento harcı mekanik değerlerinden yüksek çıkmıştır.

%10 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik değerlerinden tüm günlerde yüksek çıkmıştır. %10 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı hariç UK ikamesiz çimento harcı mekanik değerlerinden yüksek çıkmıştır. 7, 28 ve 90 günlük mekanik dayanımlar incelendiğinde %5 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri tüm günlerde UK ikamesiz çimento harcı mekanik özelliklerinden yüksek çıkmıştır.

Sonuç olarak optimizasyonu yapılan uçucu külün yüksek doluluk etkisi sağlayarak mekanik özellikleri iyi oranlarda iyileştirdiği görülmektedir. %20 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik özellikleri yüksek doluluk etkisi ile 90 günde ikamesiz mekanik dayanımlarından daha iyi değerler vermesi çok iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir. Burada dikkat edilecek husus %10 optimizasyonsuz UK kullanımına

karşılık iki katı %20 optimizasyonu yapılmış UK kullanımı sağlamak mümkün olduğu görülmektedir. Uçucu kül tane dağılım optimizasyonun yapılması ile aynı hedef dağılım için gerekli çimento miktarı azalacak, uçucu kül kullanımı artacaktır.

### **4.3. Farklı Tane Dağılım Modülüne Göre Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Mikro-Yapısal Özellikleri**

#### **4.3.1. Giriş**

İlerleyen teknoloji ile birlikte görüntü analizleri ve görüntü elde etme teknikleri daha da gelişmiştir. Günümüzde çimento esaslı malzemelerin mikro-yapısal incelenmesine olanak sağlayan teknoloji ile numune özellikleri belirlenmesine ve bu özelliklerin iyileştirilmesine olanak sağlamaktadır [101-104].

Çimento harcı özellikleri ve morfolojisini taramalı elektron mikroskobu kullanılarak inceleyen çalışmalar son yıllarda önem kazanmıştır. Yapılan bir çalışmada alümina silika içeren uçucu kül ile jeopolimer tuğla yapılacak bir çalışmada farklı içeriklere göre karışımlar hazırlanarak su emme özellikleri, basınç dayanımları ve SEM analizleri incelenerek en uygun uçucu kül içeren jeopolimer tuğla içeriğine karar verilmiştir [105]. Başka bir çalışmada, magnezyum potasyum fosfat çimentosu sistemlerinde iki farklı karışım ile uçucu kül inert ve reaktif olarak katılarak basınç dayanımı ve SEM analizi incelenmiş optimum tasarıma karar verilmiştir [106]. Farklı çimento harcı tasarımlarının mikro-yapı özelliklerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Jamil vd. (2016) puzolanik pirinç kabuğu külünün çimento harçlarına farklı kimyasal ve fiziksel katkılarını mikro-yapısını da dikkate alarak incelemişlerdir [107]. Kafi vd. (2016) çalışmalarında montmorillonit tozu ikameli çimento harcı ve sertleşmiş çimento hamurunun mekanik özelliklerini ve mikro-yapısal karakterizasyonunu incelemişlerdir [108]. Liv d. (2004) çalışmalarında nano  $Fe_2O_3$  ve nano  $SiO_2$  içeren çimento harçlarının mikro-yapısal özelliklerini, eğilme ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir [109]. Sharma vd. (2016) çalışmalarında çimento ağırlığınca farklı oranlarda ham karbon nano tüplerini çimento matrisine katarak mikro-yapısal, mekanik ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir [110]. Koohestani vd. (2016) çalışmalarında akçağaç talaşları ikameli çimento hamurunun mekanik ve

mikro-yapı özelliklerini incelemişlerdir [111]. Shoukry vd. (2016) çalışmalarında yüksek hacimce vermikülit harmanlanmış beyaz portland çimentosunun nano metakaolin etkisine fiziksel, mekaniksel ve mikro-yapı incelemeleri ile bakmışlardır [112].

#### **4.3.2. Deneysel Çalışmalar**

Numune morfolojileri Hitit Üniversitesinde bulunan Quanta 450 FEG taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılan ve numune üzerine odaklanan elektron demetinin, numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan elastik ve elastik olmayan çarpışmaların meydana getirdiği etkilerin uygun algılayıcılarda toplanarak sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilmiştir.

Uçucu külün etkinliğini daha iyi görebilmek için %20 uçucu kül ikame oranına sahip farklı dağılım modülündeki çimento harçlarının mikro-yapı incelemeleri 90 günlük çimento harçları üzerinde yapılmıştır.

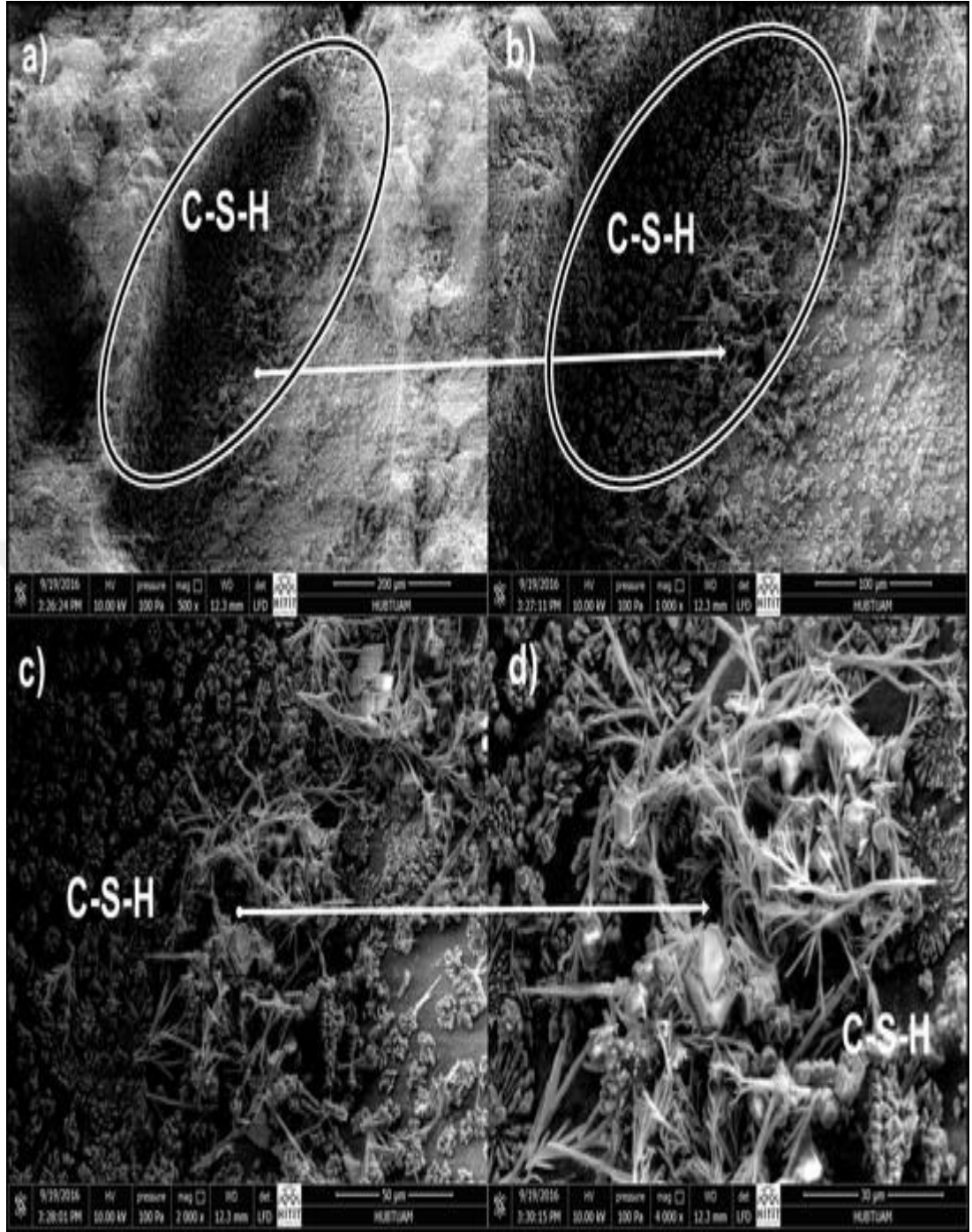
#### **4.3.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma**

Elektron tarayıcı mikroskop (SEM) ile yapılan mikro-yapı analizinde Kalsiyum Hidroksit (CH), Kalsiyum Silika Hidrat (C-S-H) jelleri yorumlanmıştır. Bu yorumlarda ne kadar küçük büyütmelerde C-S-H jelleri görülüyorsa o kadar C-S-H jellerinin yoğun olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde CH da yorumlanmıştır.

Aşağıda verilen Şekil 4.20 (a) 'da görüldüğü gibi C-S-H jelleri 500x büyütmede çok yoğun olmasa da görülebilmektedir. Şekil 4.20 (b)'de 1000x büyütmede C-S-H jelleri biraz daha belirgin şekilde görülmektedir. Şekil 4.20 (c) ve (d) 'de 2000x ve 4000x büyütmede görüldüğü gibi C-S-H jelleri süngerimsi yapısı çok net görülebilmektedir. 500x büyütmede çok yoğun olmayan C-S-H jellerinin yapısının nasıl olduğu 2000x ve 4000x büyütme ile daha net görülebilmektedir. Otsu C-S-H jel uzunluklarının yaklaşık

30 mikron olduğu gör÷lmektedir. Şekil 4.20’de CH jeli ise gör÷lememiştir. C-S-H jelleri hidrasyon sürecinde oluşan  $CS_3$  ve  $CS_2$  bileşenlerinin su ile yaptığı reaksiyonlarla meydana gelen ve betonun gözeneklerini doldurarak bağlayıcılık sağlayan hidrasyon ürünüdür. C-S-H jelleri ne kadar yoğun ise bağlayıcılık ve dayanımın o kadar yüksek olduğu anlaşılır.



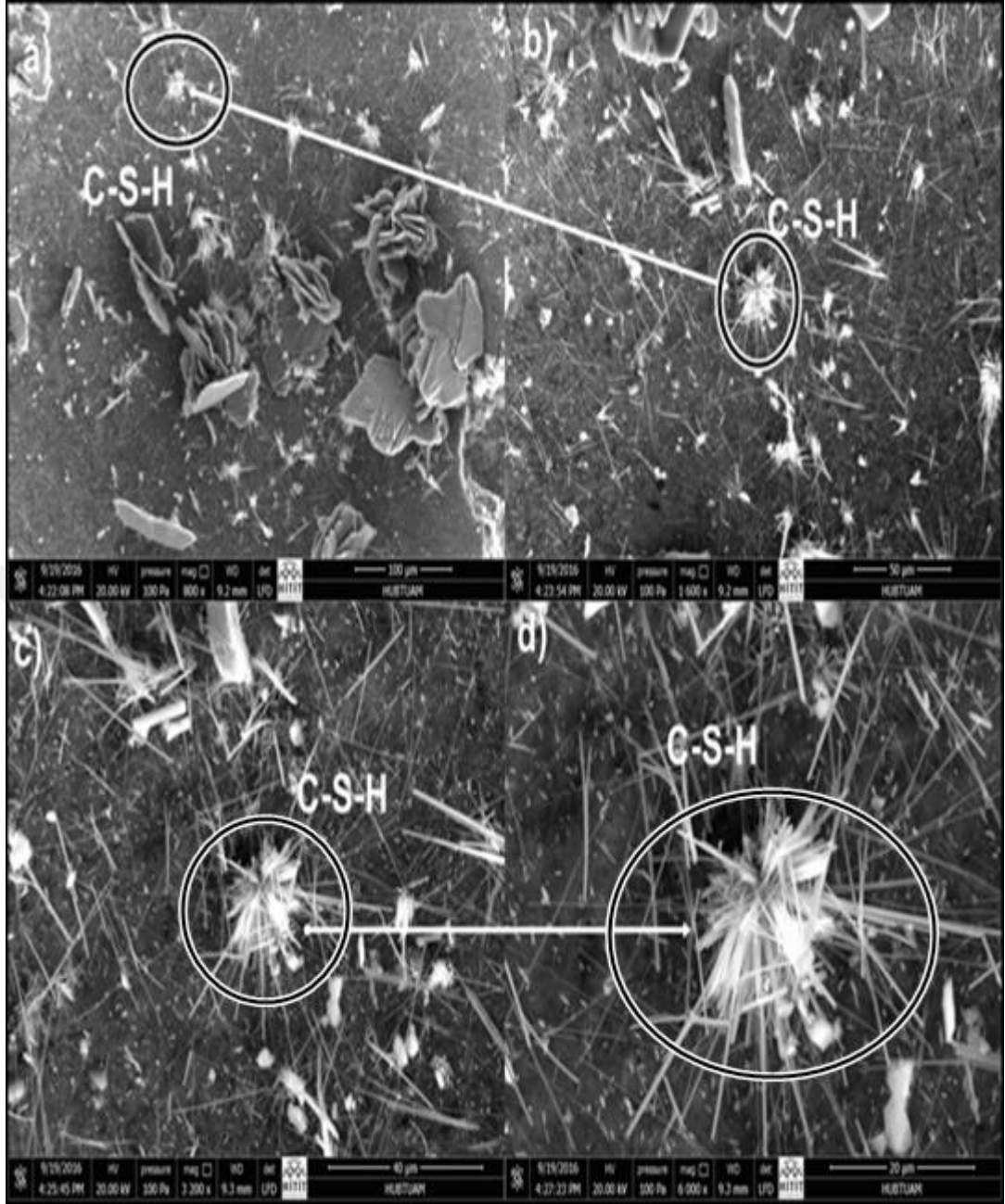


**Şekil 4.20.** Dağılım modülü 0.1 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x

Aşağıdaki Şekil 4.21 (a)'da C-S-H jelleri 800x büyütmede çok yoğun görülmektedir. Bu da dayanımın çok yüksek olmadığına göstergesidir. Şekil 4.21 (a)'da C-S-H jellerinin küçük kaktüs şeklinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.21 (b)'de

1600x büyütmede ise kaktüs şeklinde bulunan C-S-H jeli biraz daha belirgin şekilde görülmektedir. Şekil 4.21 (c) ve Şekil 4.21 (d)'de 3200x ve 6000x büyütmede yaklaşık 20 mikron çapındaki C-S-H jellerindeki otsu yapı daha net görülmektedir.  $q=0.2$  dağılım modülüne karşılık gelen SEM görüntüsündeki C-S-H yoğunluğunun  $q=0.1$  dağılım modülüne karşılık gelen SEM görüntüsündeki C-S-H jellerinden daha yoğun olduğu görülmektedir.

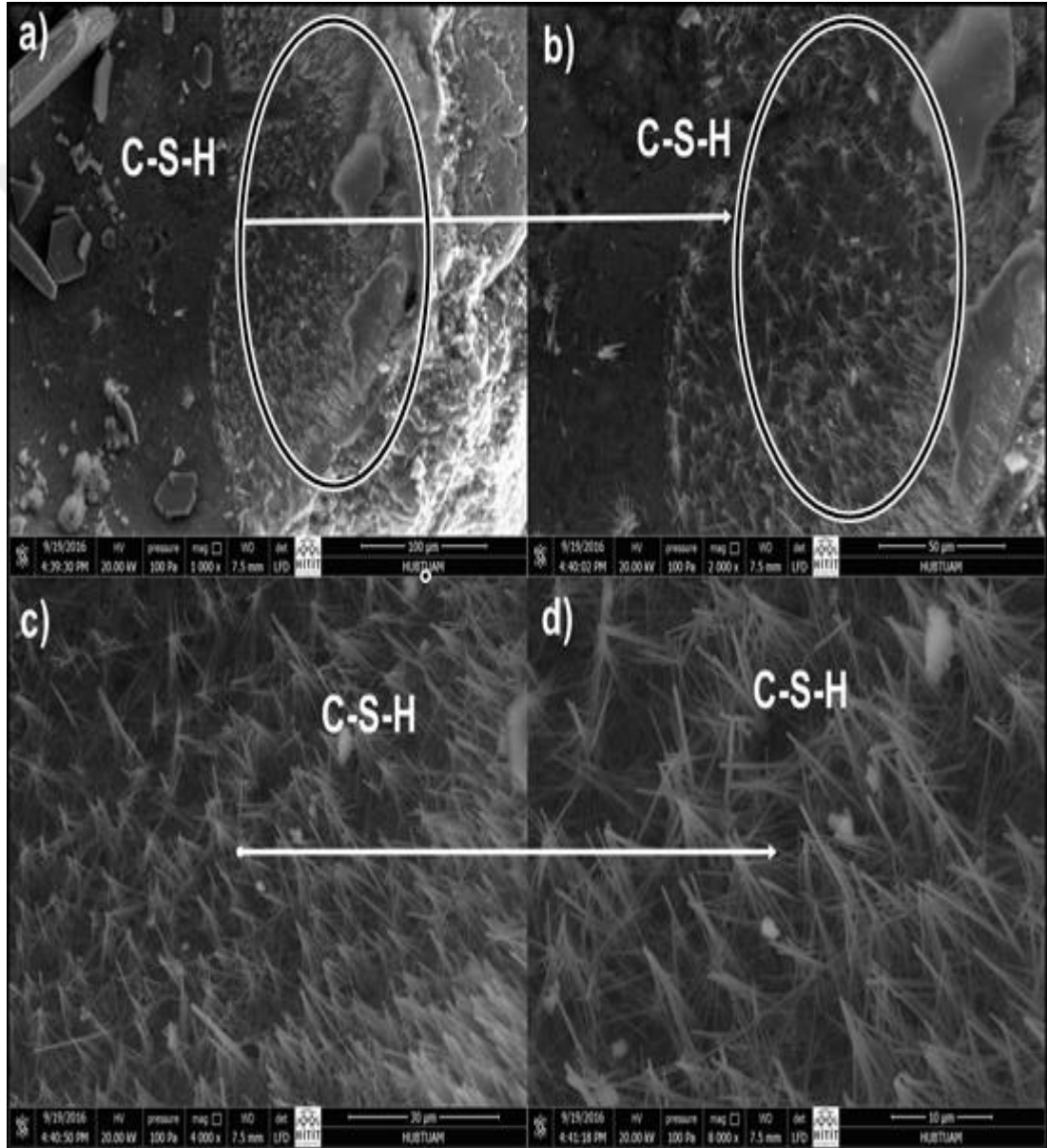




**Şekil 4.21.** Dağılım modülü 0.2 için SEM görüntüleri a) 800x b) 1600x c) 3200x d) 6000x

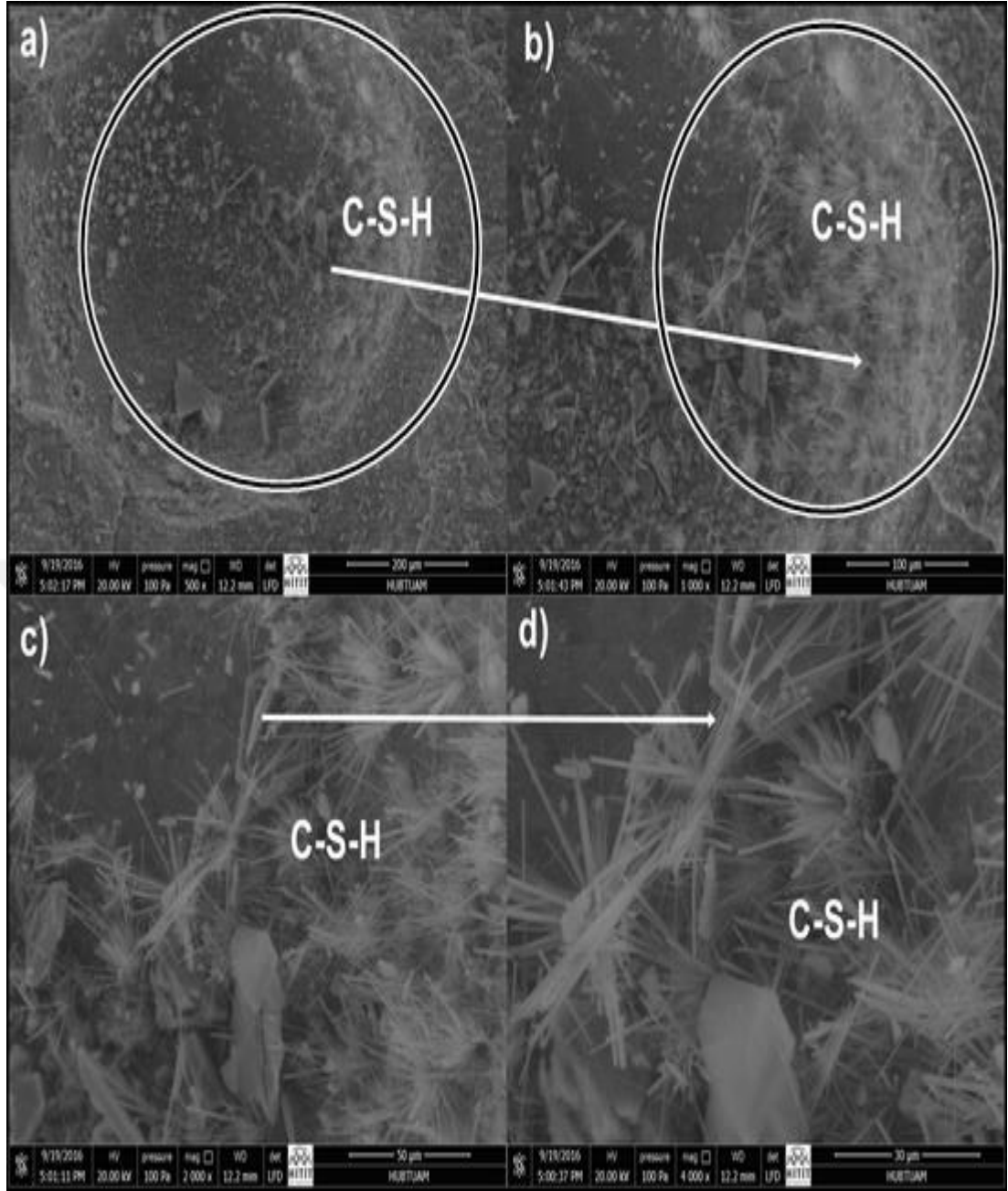
Şekil 4.22 (a)' da 1000x büyütmede C-S-H jelleri yoğun kaktüs şeklinde görülmektedir. Bu da dayanımın ve bağlayıcılığının yüksek olduğunu göstermektedir. Şekil 4.22 (b)'de 2000x büyütmede C-S-H jellerinin yoğunluğu ve kaktüs şeklindeki formu daha iyi görülmektedir. Şekil 4.22 (c) ve (d)'de 4000x ve 8000x büyütmede ise yaklaşık 10 mikron uzunluğundaki kaktüs iğneleri çok net olarak görülmektedir. Şekil

4.22 (a)' da C-S-H yoğunluğu  $q=0.1$  ve  $q=0.2$  dağılım modüllerinin sahip olduğu SEM görüntülerine göre daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu sonuç diğer iki dağılım modülünün sahip olduğu çimento harcı dayanımlarının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Jellerinin yoğun yapısı Şekil 4.22 (b)'de daha iyi görülmektedir. Bu durum bağ dayanımının da  $q=0.1$  ve  $q=0.2$ 'ye göre daha yüksek olduğunu açıklayabilir.



**Şekil 4.22.** Dağılım modülü 0.3 için SEM görüntüleri a) 1000x b) 2000x c) 4000x d) 8000x

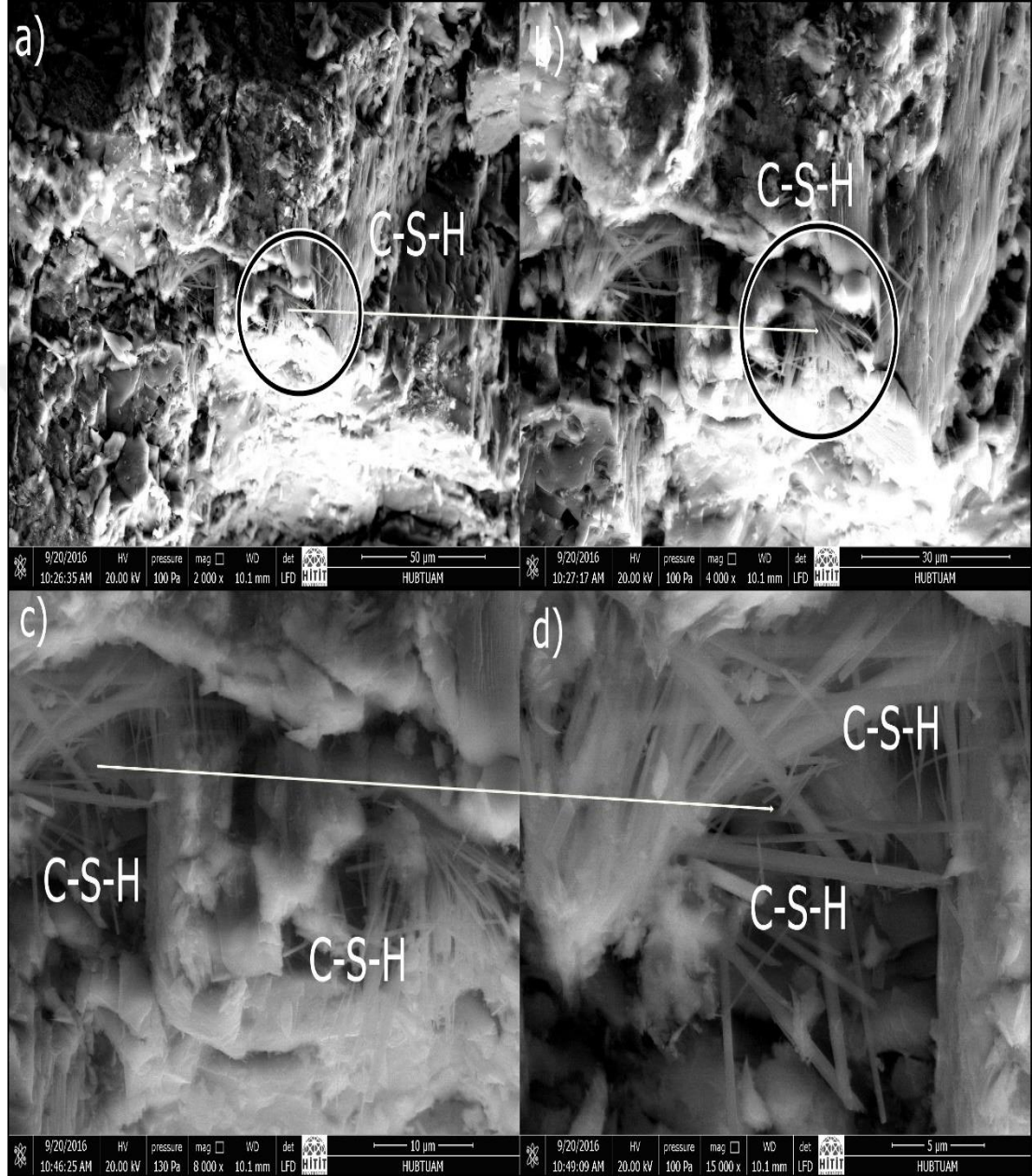
Aşağıdaki Şekil 4.23 (a)'da 500x büyütmede görüldüğü gibi  $q=0.4$  dağılım modülü için C-S-H jelleri çok rahatlıkla görülebilmektedir. Şekil 4.23 (b) 'de 1000x büyütmede ise C-S-H jellerinin yoğunluğu daha belirgin halde görülmektedir. Şekil 4.23 (d) 'de 4000x büyütmede C-S-H jellerinin uzunluğunun yaklaşık 30 mikron olduğu görülmektedir. Bu durumda C-S-H jellerinin çok yoğun olduğunu göstermektedir. C-S-H jellerinin yoğun olması bağ dayanımının da yüksek olduğunu göstermektedir. C-S-H bağlayıcılık özelliği kazandırdığı için  $q=0.4$  dağılım modülünün yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir.  $q=0.4$  dağılım modülüne karşılık gelen çimento harcı SEM görüntüsündeki C-S-H jel yoğunluğu,  $q=0.3$  dağılım modülüne karşılık gelen çimento harcı SEM görüntüsündeki C-S-H jelleri yoğunluğundan biraz daha fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuç  $q=0.4$  dağılım modülüne karşılık gelen basınç dayanımının  $q=0.3$  dağılım modülüne karşılık gelen basınç dayanımından biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir. Şekil 4.23 (c) ve Şekil 4.23 (d)'de 2000x ve 4000x büyütmede C-S-H jellerinin lifsi bir şekilde çok net görülmektedir.



**Şekil 4.23.** Dağılım modülü 0.4 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x

Aşağıdaki şekil 4.24 (a)'da C-S-H jellerinin 2000x görüntüde alındığı kısım görülmektedir. Bu kısımda C-S-H jellerinin yoğun olduğu görülmektedir. Şekil 4.24 (b)'de ise 4000x büyütmede C-S-H jelleri daha net görülmektedir. Şekil 4.24 (c) ve (d)'de C-S-H jelleri 8000x ve 15000x büyütmede iğnemi yapıları görülmektedir. C-S-H iğnelerinin uzunluğu yaklaşık 10-15 mikron olarak görülmektedir. Şekil 4.24 (a)'da

görüldüğü gibi C-S-H jellerinin yoğunluğu  $q=0.4$  dağılım modülüne karşılık gelen SEM görüntüsüne göre biraz azaldığı görülmüştür.

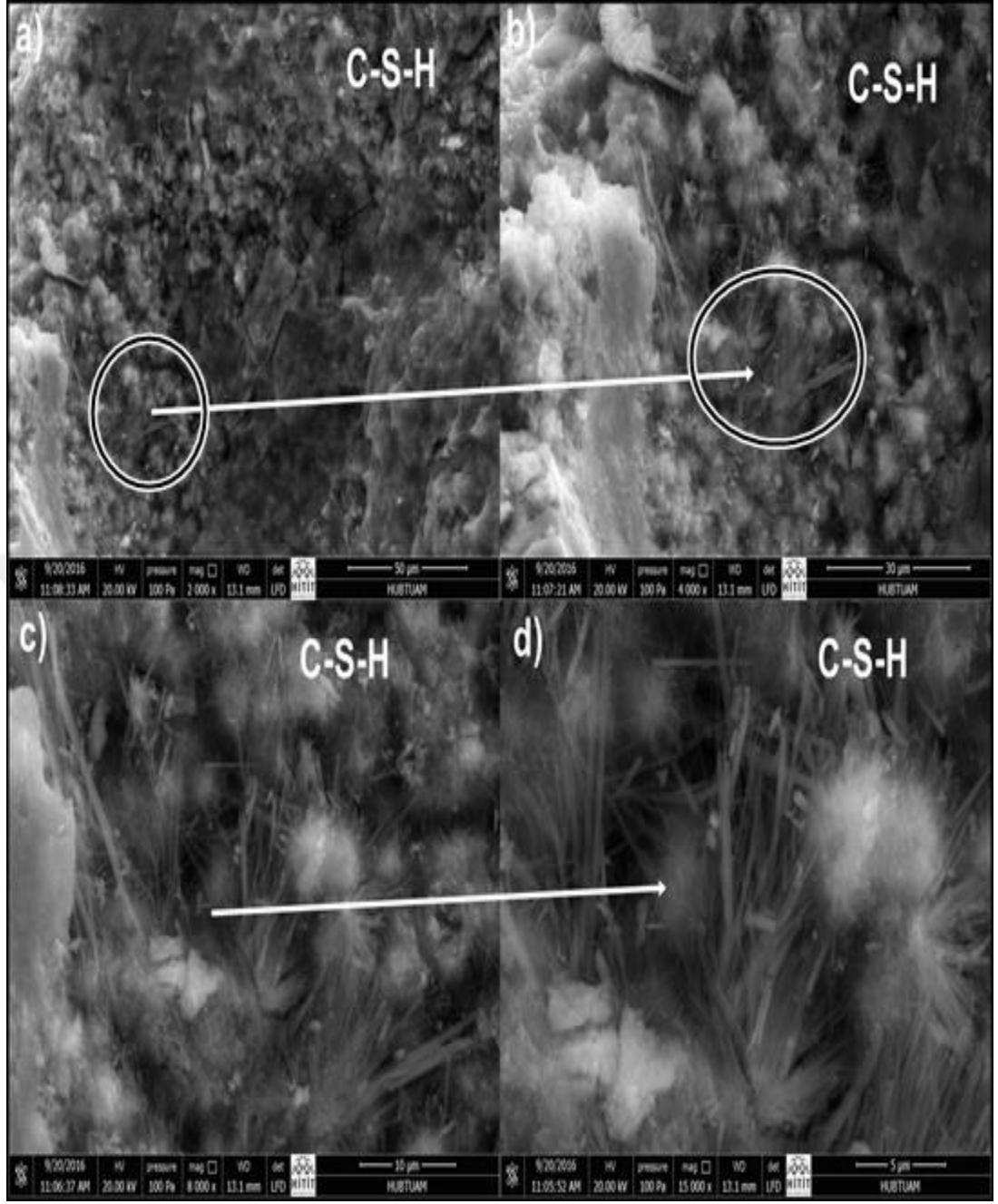


**Şekil 4.24.** Dağılım modülü 0.5 için SEM görüntüleri a) 4000x b) 8000x c) 15000x d)30000x

Aşağıdaki Şekil 4.25 (a)' da 2000x büyütmede C-S-H jellerinin yoğunluğunun  $q=0.5$  dağılım modülüne kıyasla az olduğu görülmektedir. Şekil 4.25 (b)'de 4000x büyütmede

C-S-H jelleri daha belirgin bir şekilde görülmüştür. Şekil 4.25 (c) ve (d)'de C-S-H jellerinin 8000x ve 15000x büyütmede iğnemi yapıları görülmektedir. Şekil 4.25 (a)'da görüldüğü gibi C-S-H yoğunluğunun 2000x büyütmede bile yoğun olmadığı görülmektedir. Bu sonuç  $q=0.6$  dağılım modülüne karşılık gelen çimento harcı basınç dayanımlarının  $q=0.5$  dağılım modülüne göre karşı gelen basınç dayanımlardan daha düşük olduğunu açıklayabilir.

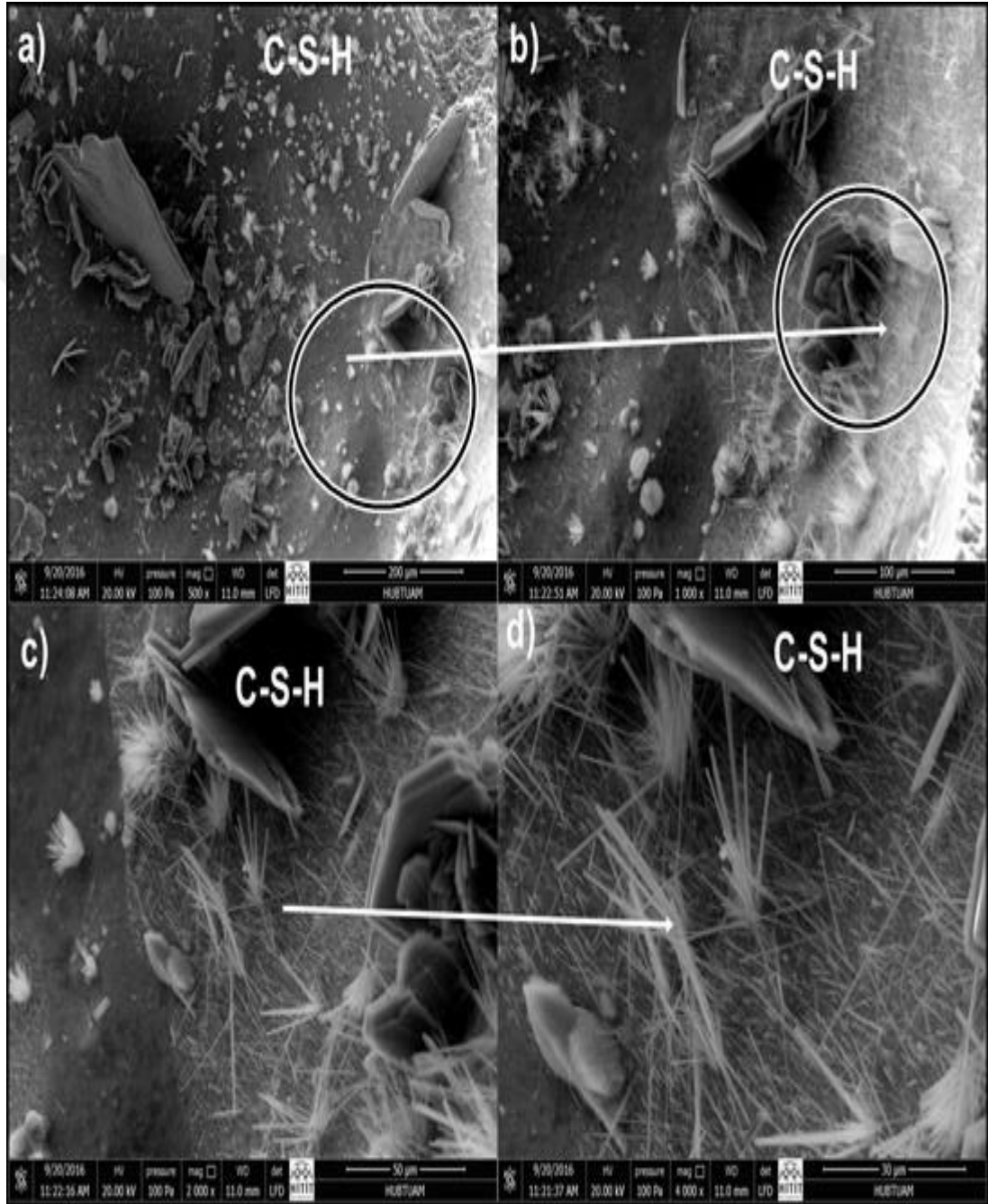




**Şekil 4.25.** Dağılım modülü 0.6 için SEM görüntüleri a) 2000x b) 4000x c) 8000x d) 15000x

Dağılım modülü 0.7 için yapılan SEM görüntüsünde C-S-H jelleri Şekil 4.26 (a)'da 500x büyütmede çok net görülmemiştir. Bu durum C-S-H jellerinin yoğun olmadığını göstermektedir. Şekil 4.26 (b)'de 1000x büyütmede C-S-H jelleri biraz daha belirgin halde görülmüştür. Şekil 4.26 (c) ve Şekil 4.26 (d)'de 2000x ve 4000x büyütmede C-S-H jellerinin çok yoğun olmayan yaklaşık 25 mikron uzunluğundaki otu yapısı çok net

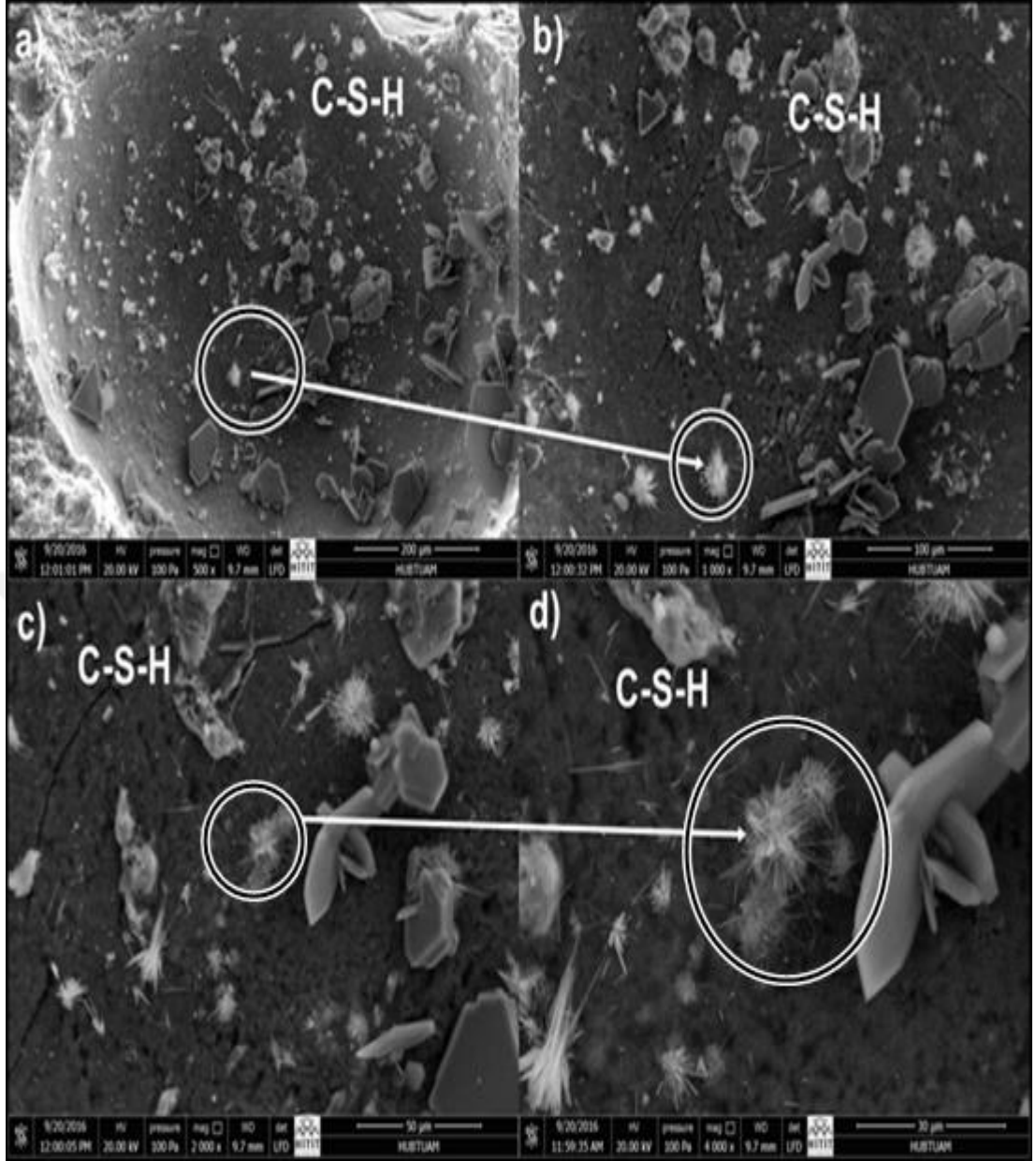
görülmüştür. Bu sonuçlar Şekil 4.25’da dikkate alınarak  $q=0.6$  dağılım modülü sonuçları ile karşılaştırıldığında  $q=0.7$  dağılım modülüne karşılık gelen C-S-H jel yoğunlukları az olduğundan  $q=0.7$  dağılım modülüne karşılık gelen basınç dayanımları  $q=0.6$  dağılım modülüne karşılık gelen basınç dayanımlarından daha düşük olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.26.** Dağılım modülü 0.7 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x

Şekil 4.27’de dağılım modülü 0.8 için yapılan SEM görüntüsünde C-S-H jelleri Şekil 4.27 (a)’da 500x büyütmede çok net görülmemiştir. Şekil 4.27 (b)’ de 1000x büyütmede kaktüs şeklindeki C-S-H jeli biraz daha belirgindir. Şekil 4.27 (c) ve Şekil 4.27 (d)’de 2000x ve 4000x büyütmede kaktüs şeklinde ve yoğun olmayan C-S-H jelleri biraz daha belirgin halde gözükmemektedir. Bu durum C-S-H jellerinin yoğun olmadığını göstermektedir. Bu sonuç  $q=0.8$  dağılım modülüne karşılık gelen basınç dayanımlarındaki azalmayı açıklayabilir.

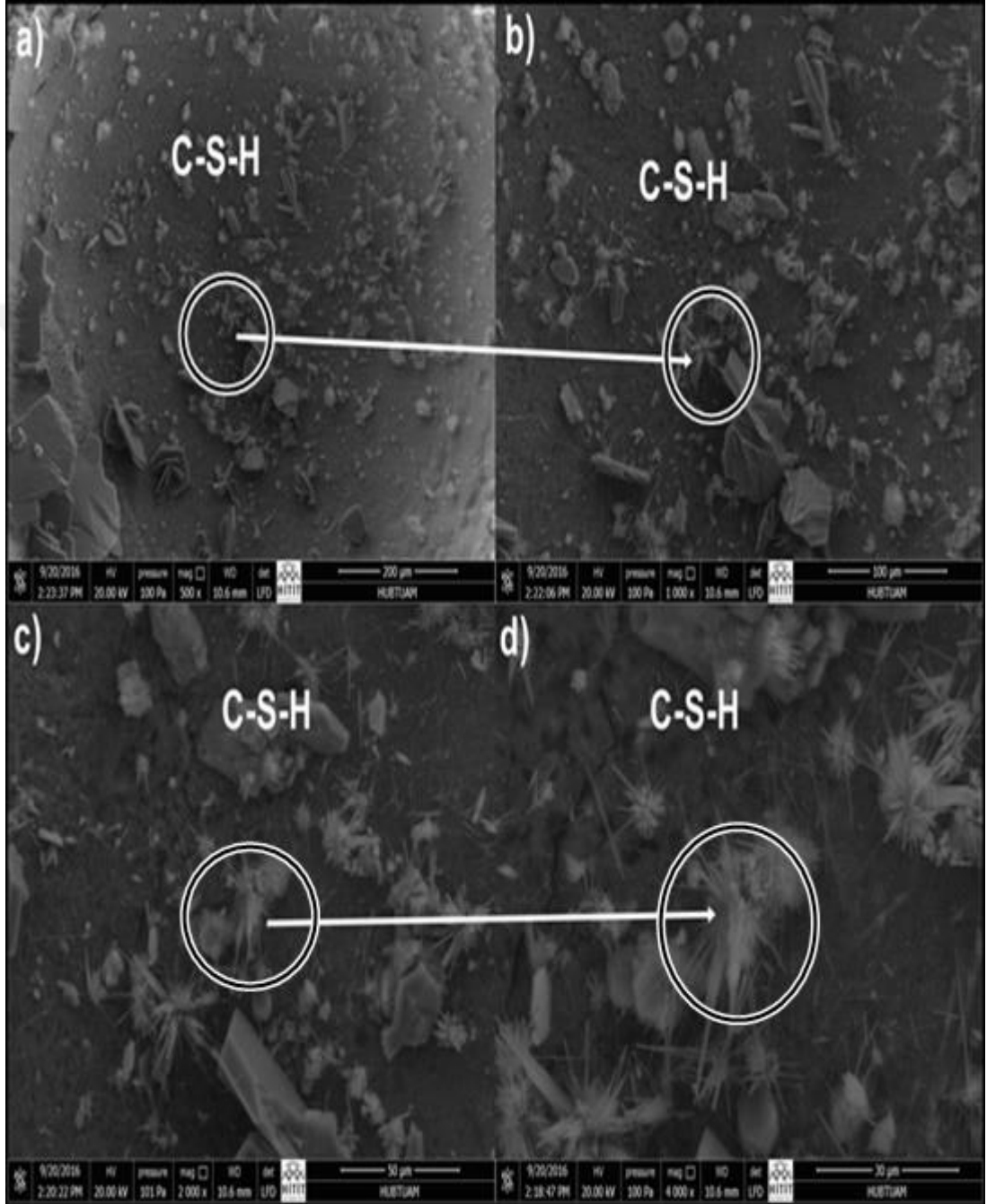




**Şekil 4.27.** Dağılım modülü 0.8 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x

Dağılım modülü 0.9 için yapılan SEM görüntüsünde C-S-H jelleri Şekil 4.28 (a)'da 500x büyütmede çok zor görülmektedir. Şekil 4.28 (b)'de 1000x büyütmede ise C-S-H jeli çok net olmamakla birlikte görülebilmektedir. Şekil 4.28 (c) ve Şekil 4.28 (d)'de 2000x ve 4000x büyütmede yoğun olmayan kaktüs şeklindeki C-S-H jelleri biraz daha net görülmüştür. Bu durum C-S-H jellerinin az olduğunu göstermektedir. Bu sonuç Şekil 4.27'de verilen  $q=0.8$  dağılım modülü ile karşılaştırıldığında C-S-H jel yoğunluğunun

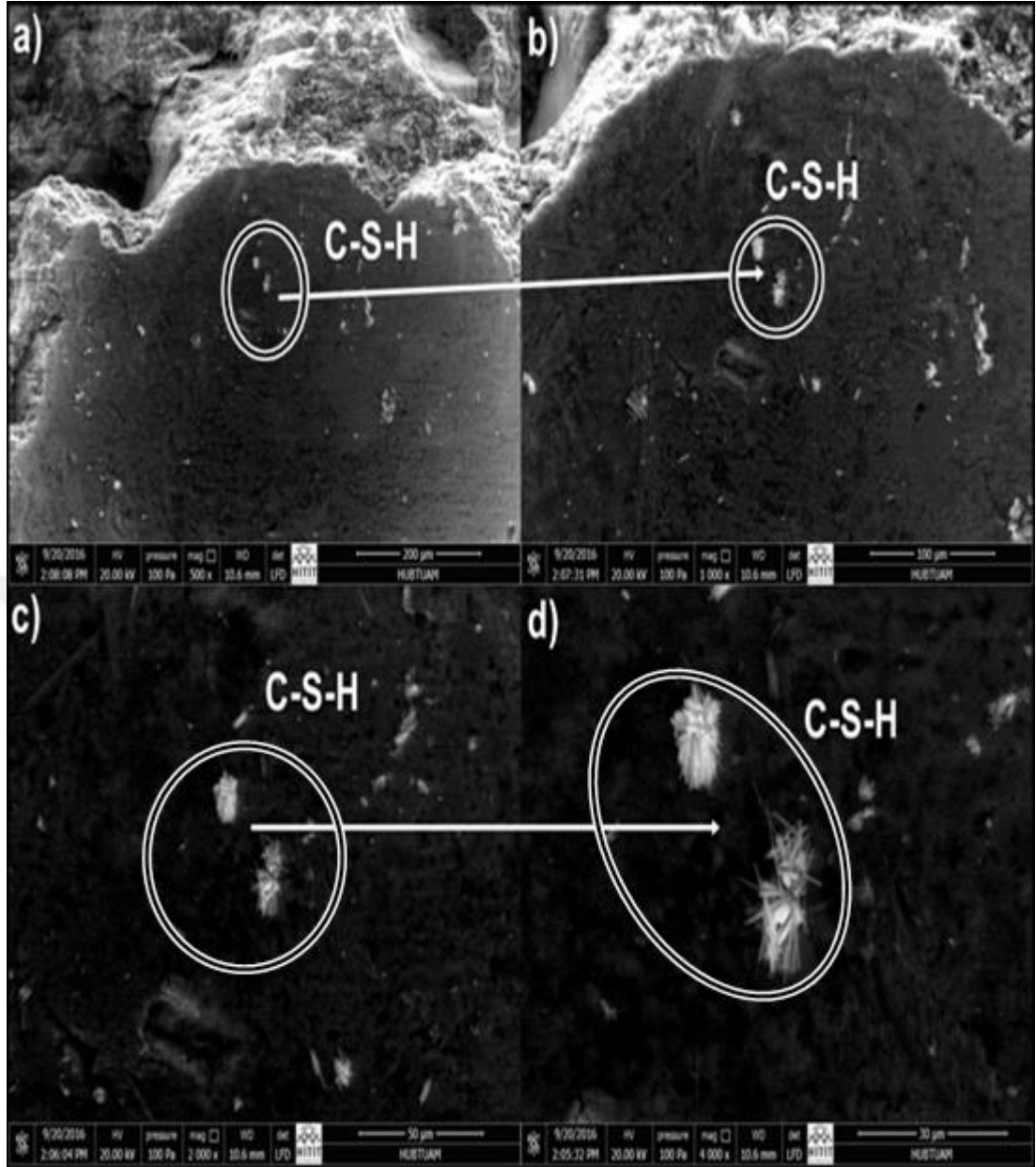
çok azaldığı görülmüştür.  $q=0.9$  dağılım modülüne karşılık gelen basınç dayanımların  $q=0.8$  dağılım modülüne karşılık gelen basınç dayanımlardan daha düşük olduğu bu durum ile açıklanabilir.



**Şekil 4.28.** Dağılım modülü 0.9 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x

Şekil 4.29.'da dağılım modülü 1.0 için yapılan SEM görüntüsünde C-S-H jelleri Şekil 4.29 (a)'da 500x büyütmede çok zor görülmektedir. Şekil 4.29 (b)'de 1000x büyütmede C-S-H jellerinin yapısı belirgin olmamakla birlikte görülmeye başlamıştır. Şekil 4.29 (c) ve Şekil 4.29 (d)'de 2000x ve 4000x büyütmede C-S-H jelleri kaktüs şeklinde ve çok belirgin olmayıp yoğun değildir. Bu durum C-S-H jellerinin çok az olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar Şekil 4.28'de verilen  $q=0.9$  dağılım modülü ile karşılaştırıldığında C-S-H jellerinin yoğunluğunun azaldığı görülmektedir.  $q=1.0$  dağılım modülüne karşılık gelen basınç dayanımların  $q=0.9$  dağılım modülüne karşılık gelen basınç dayanımlardan daha düşük olduğu C-S-H jellerindeki yoğunluğun azalması ile açıklanabilir.





**Şekil 4.29.** Dağılım modülü 1.0 için SEM görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x

Sonuç olarak bağ dayanımını artıran C-S-H jelleri yoğun olduğu görüntülenen dağılım modülü 0.3, 0.4 ve 0.5 olduğu belirlenmiştir. Dağılım modülü 0.1 ile 0.4 arasında C-S-H jeli giderek artarken, dağılım modülü 0.4 ile 1.0 arasında C-S-H jellerinin yoğunluğu giderek azalmıştır. Sonuçlar  $q=0.4$  dağılım modülünde yüksek kompasitenin elde edildiğini ve filler etkisinin sağlandığının göstergesidir.  $q=0.4$  dağılımına karşılık gelen çimento harçlarında en yüksek doluluk etkisi sağlanmıştır.

Farklı dağılım modüllerine ait çimento harçlarının SEM görüntülerine bakıldığında hiç birisinde zararlı bir oluşum gözlenmemiştir. CH jellerine tüm görüntülemelerde rastlanmamıştır. Bunun nedeni ise görüntü alınan çimento harçlarının 90 günlük olmasından kaynaklanmaktadır.



## **5. OPTİMİZE EDİLMİŞ UÇUCU KÜL İKAMELİ ÇİMENTO HARÇLARININ SU EMME, HACİMSEL YOĞUNLUK, KILCAL GEÇİRİMLİLİK VE HIZLI KLORÜR İYONU GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ**

### **5.1. Su Emme, Hacimsel Yoğunluk ve Kılcal Geçirimsizlik Özellikleri**

#### **5.1.1. Giriş**

Dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli özellik betonun boşluk yapısı ve oranıdır [113]. Sertleşmiş betonun su emme kabiliyeti yani geçirimsizliği betonun hizmet süresi boyunca karşılaşılabileceği yıpratıcı fiziksel ve kimyasal olaylara dayanıklılığını ve dayanımını etkilemektedir [114-117]. Suyun ve diğer akışkanların beton içerisinde ilerlemesi sahip olduğu boşluklar yoluyla olmakta ve zararlı maddeler bu şekilde betonun içerisine taşınmaktadır [118]. Su emmesi yüksek yani geçirimsizliği yüksek bir beton fiziksel ve kimyasal olaylara karşı dayanımı ve dayanıklılığı azalacaktır. Örneğin geçirimsizliği yüksek bir beton sülfat hücumu, asit hücumu gibi kimyasal olaylara daha kolay maruz kalabilecek ve kolay bir şekilde yıpranacaktır.

Su emme özellikleri gibi hacimsel kuru yoğunluk da çimento harcı basınç dayanımını, eğilme dayanımını ve elastisite modülünü etkilemektedir [119]. Hacimsel yoğunluk arttıkça mekanik özellikler de iyileşmektedir. Hacimsel yoğunluğun yüksek olması betonun kompazitesinin yüksek olduğunu göstermektedir. Kompazitesi yüksek olan bir betonun boşluk oranı yani porozitesi minimum seviyede kalacak ve dayanımı yüksek olacaktır.

Malzemelerin maruz kaldıkları kurutucu etkiye sahip rüzgâr ve güneşin varlığında temel taşınma mekanizması farklılık gösterebilmektedir. Beton yapıların kuru ve/veya kısmen kuru oldukları koşullar altında beton malzemesi içerisindeki temel taşınma mekanizmasının matris içerisindeki kılcal boşluklar tarafından oluşturulan kılcal emme kuvvetlerinden kaynaklanması ihtimali artmaktadır [120]. Bu nedenle kılcal su emme katsayılarının bilinmesi önem arz etmektedir.

### 5.1.2. Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmeyen %5, %10, %15, %20 ve %30 uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük su emme özellikleri, hacimsel yoğunluk özellikleri ASTM C 642'ye göre ve kılcal su emme katsayısı ise TS EN 772-11'e göre incelenmiştir [98, 99]. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harcı deney sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

#### Malzemeler

Çalışma kapsamında tane boyut dağılımı optimize edilen ve tane boyut dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harçları TS EN 196-1'e göre üretilmiştir [94]. 3. Bölümde özellikleri detaylı bir şekilde açıklanan CEM I 42.5 R Portland çimentosu, C sınıfı uçucu kül, standart kum ve şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Çimento harçları, çimento ağırlığınca %5, %10, %15, %20 ve %30 oranında tane dağılımı optimize edilmiş ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ile değiştirilerek üretilmiştir. Deneyler için 50×50×50 mm'lik prizmatik çimento harç örnekleri kullanılmıştır. Tüm çimento harçları 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılmış ve 7, 28 ve 90 güne kadar 23±2 °C sıcaklıkta sürekli olarak suda kür edilmiştir (Şekil 5.1 (a), (b)).



**Şekil 5.1.** a) 50×50×50 mm boyutlarındaki prizmatik çimento harçlarının sürekli su kürüne maruz bırakılmaları b) Kalıptan çıkartıldıktan sonraki görüntüsü

#### UK İkameli Çimento Harçlarının Hazırlanması ve Deneyler

Üretilen çimento harçları olgunlaştırılması istenen yaşa kadar içilebilir su içinde bekletilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere her bir karışım için Şekil 5.1’de verilen 50×50×50 mm boyutlara sahip 6 şar adet prizmatik çimento harçları oluşturulmuştur. Bu prizmatik çimento harçlarının her biri su emme deneylerine, yoğunluk deneylerine ve kılcal su emme katsayısı belirleme deneylerine tabii tutulmuştur. Sonuçlar 6 adet prizmatik çimento harçları deney sonucu ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Deney yöntemleri ve detayları 3. Bölümde verildiğinden bu bölümde ilave bir açıklama yapılmamıştır.

#### **5.1.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma**

##### Su Emme Özellikleri

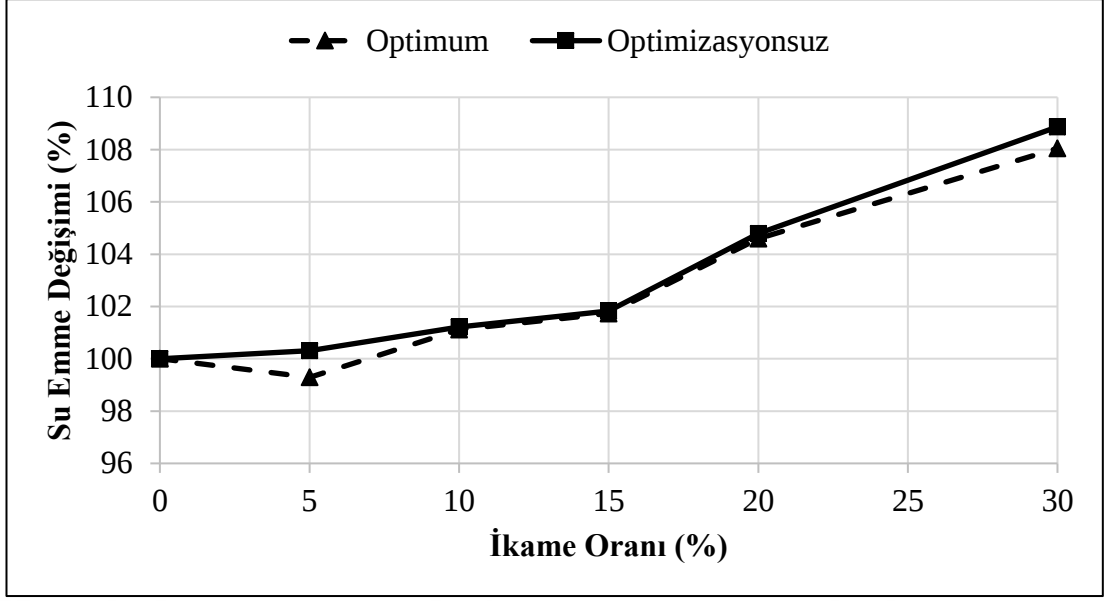
Normal su emme yüzdeleri Bölüm 3’de Denklem 3.2’de verilen formüle göre yapılmıştır. Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük su emme yüzdeleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu deneyin amacı %5, %10, %15, %20 ve %30 tane dağılımı optimize edilmiş ve optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harçlarının boşlukları

hakkında genel bir bilgi edinmemizdir. Dayanımı düşük olan çimento harcının boşlukları fazla olacağından su emme oranı da yüksek olacaktır.

**Çizelge 5.1.** 7, 28 ve 90 günlük su emme yüzdeleri

| <b>Numune Kodu</b> | <b>7 gün (%)</b> | <b>28 gün (%)</b> | <b>90 gün (%)</b> |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| UK0                | 9.81             | 9.27              | 9.05              |
| UK5                | 9.84             | 9.34              | 9.25              |
| 0.4UK5             | 9.74             | 9.17              | 8.83              |
| UK10               | 9.93             | 9.55              | 9.41              |
| 0.4UK10            | 9.92             | 9.25              | 9.17              |
| UK15               | 9.99             | 9.83              | 9.76              |
| 0.4UK15            | 9.98             | 9.52              | 9.34              |
| UK20               | 10.28            | 10.19             | 10.11             |
| 0.4UK20            | 10.26            | 10.06             | 9.99              |
| UK30               | 10.68            | 10.47             | 10.34             |
| 0.4UK30            | 10.60            | 10.32             | 10.16             |

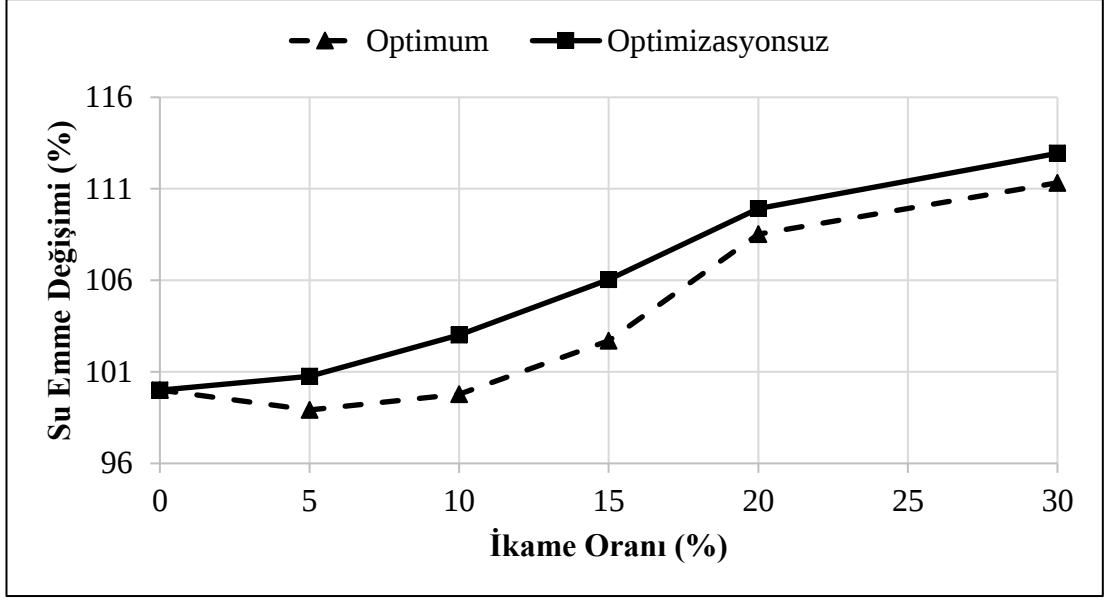
7 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harcı su emme yüzde değişimleri Şekil 5.2’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı su emme değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.2.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük su emme yüzde değişimleri

Çizelge 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça su emme yüzdeleri artmıştır. Tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında su emme yüzdesi %8.9 oranında artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında su emme yüzdesi %8.1 oranında artmıştır. Optimize edilen UK ile optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçlar %5 ikame oranında %1.0, %10 ikame oranında %0.1, %15 ikame oranında %0.1, %20 ikame oranında %0.2 ve %30 ikame oranında %0.8 su emme yüzdeleri düşük çıkmıştır. Bu sonuç 7 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının, optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarına göre daha az olduğunu göstermektedir. %5 optimum UK ikameli çimento harcı su emme yüzdesi ikamesiz çimento harcı su emme yüzdesinden daha düşük çıkmıştır.

28 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı su emme yüzde değişim sonuçları Şekil 5.3’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı su emme değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.

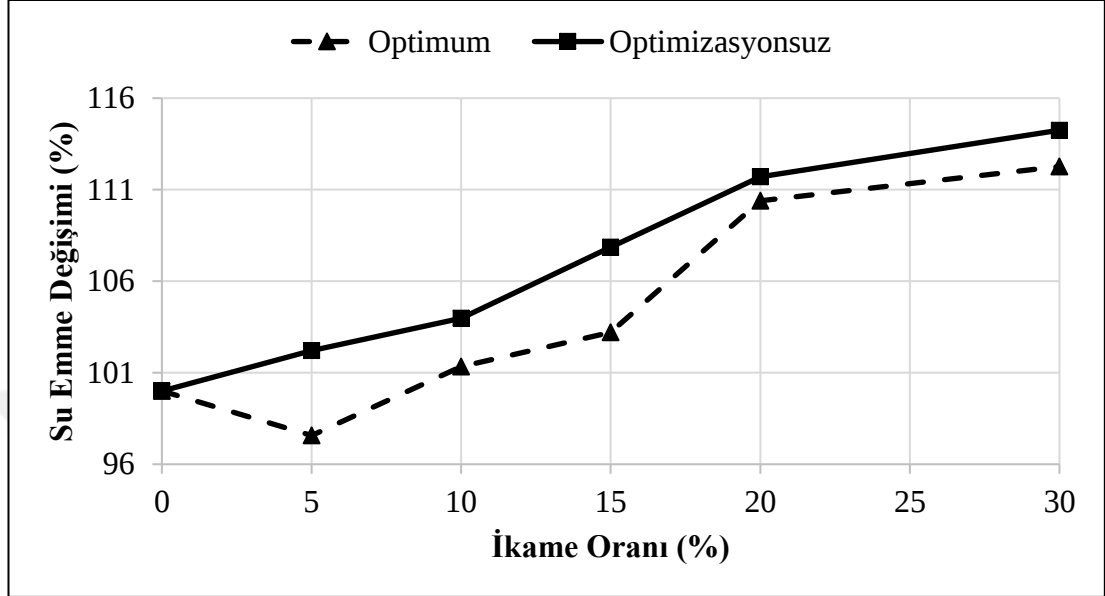


**Şekil 5.3.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük su emme yüzde değişimleri

Çizelge 5.1 ve Şekil 5.3’de uçucu kül ikame oranı arttıkça su emme yüzdelerinin arttığı görülmüştür. Tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30 olduğunda su emme yüzdesi %12.9 oranında artmıştır. Optimum uçucu kül ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30 olduğunda su emme yüzdesi %11.3 oranında arttığı görülmüştür. %5 optimum UK ikameli çimento harcı su emme yüzdesi ikamesiz çimento harcı su emme yüzdesinden daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde ikame oranının artması ile birlikte boşlukların ve geçirimsizliğin arttığı görülür. Optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarının kendi içlerinde aynı ikame oranında su emme yüzdeleri karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli çimento harçları %5 ikame oranında %2.5, %10 ikame oranında %3.2, %15 ikame oranında %3.3, %20 ikame oranında %1.3 ve %30 ikame oranında %1.4 su emme yüzdeleri daha düşük çıkmıştır. Bu sonuç 28 günlük optimum UK ikameli çimento harcı boşluklarının optimizasyonu yapılmayan UK ikameli çimento harçlarına göre daha az olduğunu göstermektedir.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı su

emme yüzde değişim sonuçları Şekil 5.4’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı su emme değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.4.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük su emme yüzde değişimleri

Çizelge 5.1 ve Şekil 5.4’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça su emme yüzdeleri artmıştır. Tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a çıkartıldığında su emme yüzdesi %14.3 oranında artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a çıkartıldığında su emme yüzdesi %12.3 oranında artmıştır. %5 optimum UK ikameli çimento harcı su emme yüzdesi ikamesiz çimento harcı su emme yüzdesinden daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçları inceleyecek olursak ikame oranının artması ile birlikte boşlukların arttığı görülmüştür. Optimize olan UK ile optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları su emme yüzdeleri kendi içlerinde aynı ikame oranında kıyaslandığında, optimum UK ikameli harçlar %5 ikame oranında %4.7, %10 ikame oranında %2.6, %15 ikame oranında %4.5, %20 ikame oranında %1.2 ve %30 ikame oranında %1.8 su emme yüzdeleri daha düşük çıkmıştır. Bu sonuç tane dağılımı yapılmış çimento harçlarının kompasitesinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak; uçucu kül ikame oranları arttıkça su emme yüzdeleri artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçları ve tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları su emme yüzdeleri incelendiğinde optimum UK ikameli su emme yüzdelерinin daha düşük olduğu görülmüştür. 90 günlük, 28 günlük ve 7 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde en yüksek su emme oranlarını 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harçları, en düşük su emme oranını ise 90 günlük %5 optimum çimento harçları vermiştir. 90 günlük sonuçlar su emme oranını diğer günlere göre daha çok azaltmıştır. %5 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %6, 90 günde ise %9.0 oranında azalmıştır. %10 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %6.8, 90 günde ise %7.6 oranında azalmıştır. %15 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %4.6, 90 günde %6.4 oranında azalmıştır. %20 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %1.9, 90 günde %2.6 oranında azalmıştır. %30 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında ise 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %2.6, 90 günde ise %4.2 oranında azalmıştır. %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %5, 90 günde ise %6 oranında azalmıştır. %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %3.8, 90 günde ise %5.2 oranında azalmıştır. %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %1.6, 90 günde ise %2.3 oranında azalmıştır. %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %1.9, 90 günde ise %2.6 oranında azalmıştır. %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %2.0, 90 günde ise %3.2 oranında azalmıştır. Bunun nedeni olgunlaştırma yaşı ilerlediğinde hidratasyon süreci ile meydana gelen ürünler boşlukları dolduracaktır. Su emme oranı arttıkça boşluk oranı ve geçirimsizlik artmakta ve mekanik özellikler azalmaktadır. Uçucu kül tane dağılımı optimize edilerek yapılan en yüksek kompakteyi sağlama işlemi su emme yüzdelерini azaltarak geçirimsizliği, boşlukları azaltmış ve dolayısı ile dayanımı artırmıştır.

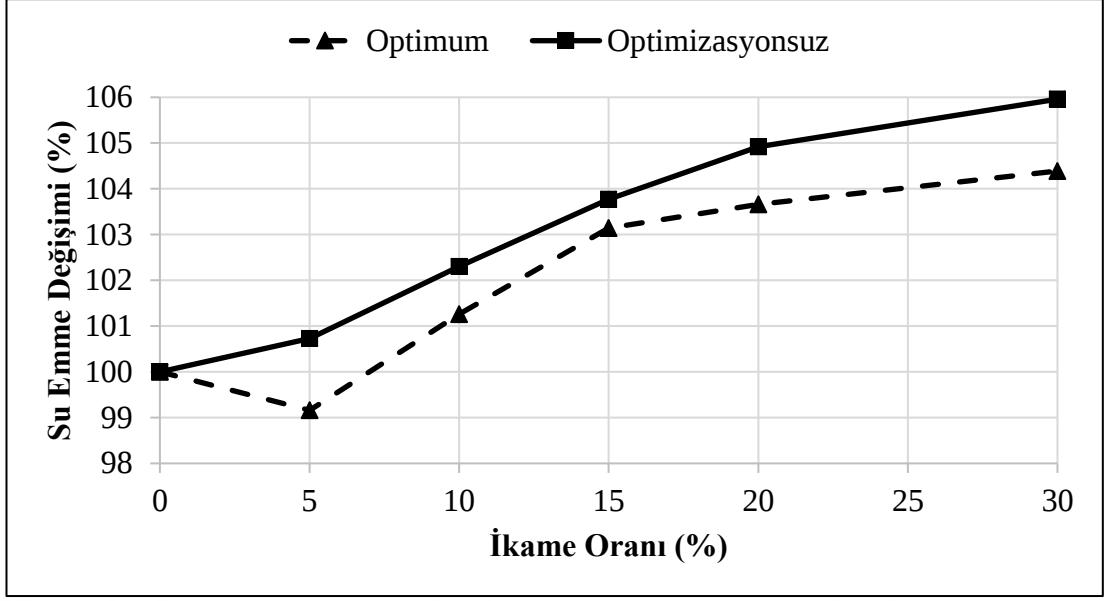
### Kaynama ve Kür Sonrası Su Emme Özellikleri

Kaynama ve kür sonrası su emme yüzdeleri 3. Bölüm Denklem 3.3’de verilen formüle göre yapılmıştır. Elde edilen 7, 28 ve 90 gün kür sonunda 5 saat süre ile kaynatma işlemine tabi tutulmuş numunelerin su emme yüzdeleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Bu deneyin yapılmasında ki amaç %5, %10, %15, %20 ve %30 tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harçlarının boşlukları hakkında genel bir bilgi edinmemizdir. Dayanımı düşük olan çimento harcının boşlukları fazla olacağından kaynama ve kür sonrası su emme oranı da yüksek olacaktır.

**Çizelge 5.2.** 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası su emme yüzdeleri

| Numune Kodu | 7 gün (%) | 28 gün (%) | 90 gün (%) |
|-------------|-----------|------------|------------|
| UK0         | 9.56      | 8.89       | 8.57       |
| UK5         | 9.63      | 9.03       | 8.76       |
| 0.4UK5      | 9.48      | 8.76       | 8.46       |
| UK10        | 9.78      | 9.14       | 8.86       |
| 0.4UK10     | 9.68      | 8.82       | 8.65       |
| UK15        | 9.92      | 9.48       | 9.28       |
| 0.4UK15     | 9.86      | 9.12       | 8.94       |
| UK20        | 10.03     | 9.87       | 9.75       |
| 0.4UK20     | 9.91      | 9.54       | 9.32       |
| UK30        | 10.13     | 10.06      | 9.96       |
| 0.4UK30     | 9.98      | 9.93       | 9.85       |

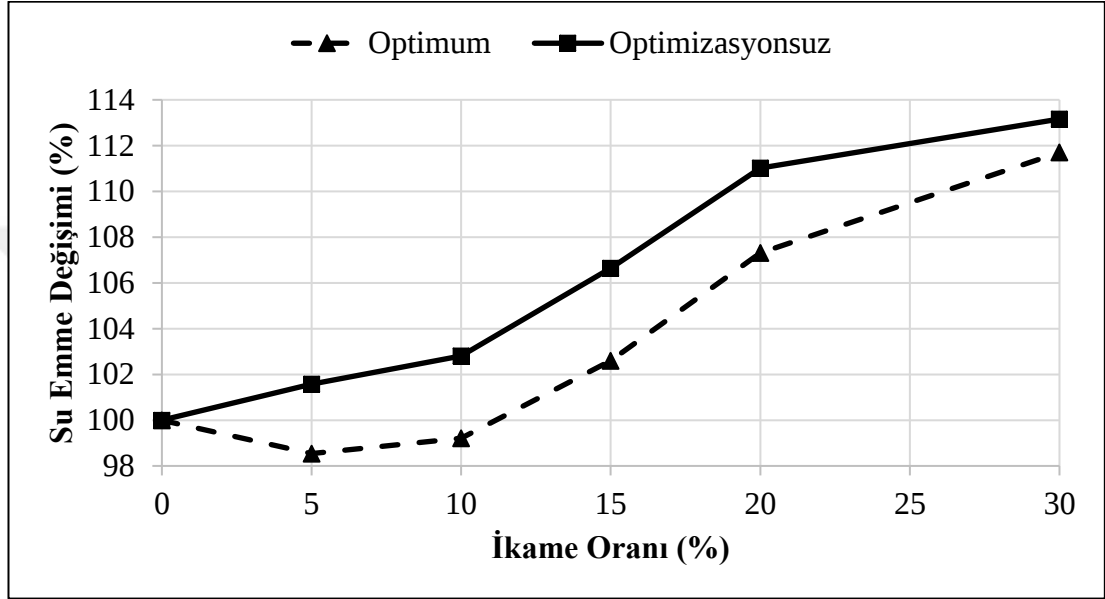
7 gün su içerisinde olgunlaştırılan ve daha sonra 5 saat kaynatılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harcı kaynama kür sonrası su emme yüzde değişim sonuçları Şekil 5.5’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kaynama kür sonrası su emme değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.5.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük kaynama kür sonrası su emme yüzde değişimleri

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.5’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri artmıştır. Tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında kaynama kür sonrası su emme yüzdesi %6.0 oranında artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında kaynama kür sonrası su emme yüzdesi %4.4 oranında artmıştır. %5 optimum UK ikameli çimento harcı kaynama kür sonrası su emme yüzdesi ikamesiz çimento harcı su emme yüzdesinden daha düşük çıkmıştır. Bu sonuç ikame oranı arttıkça boşlukların ve geçirimsizliğin arttığını göstermektedir. Optimize olan UK ile tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçlar %5 ikame oranında %1.6, %10 ikame oranında %1.0, %15 ikame oranında %0.6, %20 ikame oranında %1.2 ve %30 ikame oranında %1.5 kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri daha düşük çıkmıştır. Bu sonuç 7 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento harçlarına göre boşluklarının ve geçirimsizliğinin daha az olduğunu ve dolayısı ile dayanımlarının yüksek olduğunu göstermektedir.

28 gün su içerisinde olgunlaştırılan ve daha sonra 5 saat kaynatılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı kaynama kür sonrası su emme yüzde değişim sonuçları Şekil 5.6’da verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kaynama kür sonrası su emme değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.

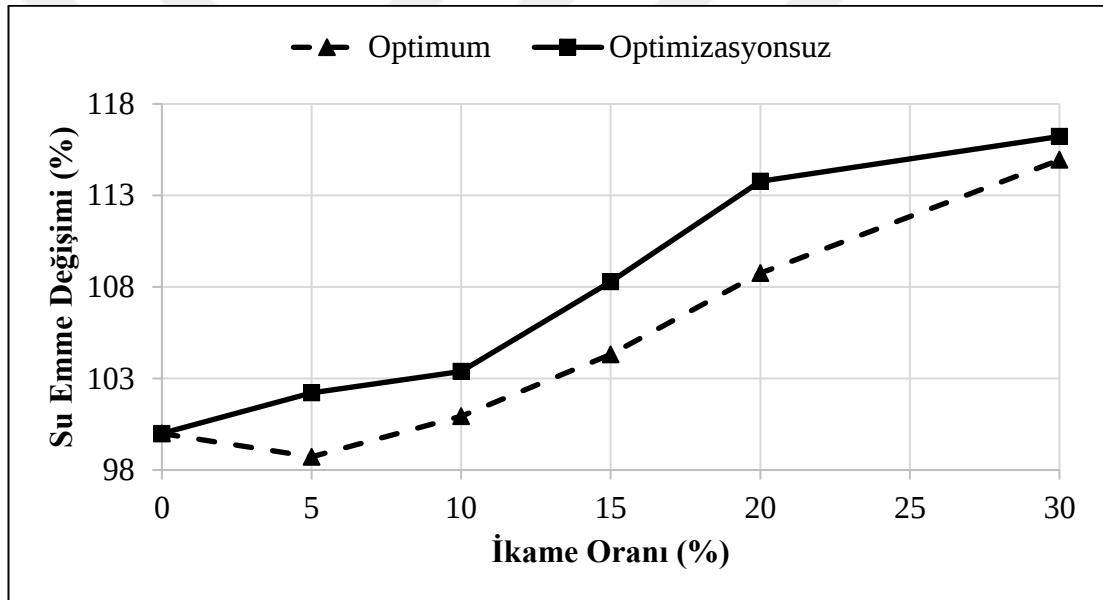


**Şekil 5.6.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük kaynama kür sonrası su emme yüzde değişimleri

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.6’da uçucu kül ikame oranı arttıkça kaynama kür sonrası su emme yüzdelerinin arttığı görülmüştür. Tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a yükseltildiğinde kaynama kür sonrası su emme yüzdesi %13.2 oranında yükselmiştir. Optimum UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a yükseltildiğinde kaynama kür sonrası su emme yüzdesi %11.7 oranında yükselmiştir. Bu sonuç ikame oranı arttıkça boşlukların ve geçirimsizliğin arttığını ve dolayısıyla dayanımın azaldığını göstermektedir. Optimize olan UK ile tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında kıyaslandığında, optimum UK ikameli harçlar %5 ikame oranında %3.1, %10 ikame oranında %3.6, %15 ikame oranında %3.9, %20 ikame oranında %3.5 ve %30 ikame oranında %1.3 kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri

daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar 28 günlük optimum UK ikame çimento harçlarının boşluklarının ve geçirimsizliğinin, tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarına göre daha az olduğunu ve dolayısıyla dayanımlarının yüksek olduğunu göstermektedir.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan ve daha sonra 5 saat kaynatılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı kaynama kür sonrası su emme yüzde değişim sonuçları Şekil 5.7’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kaynama kür sonrası su emme değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.7.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük kaynama kür sonrası su emme yüzde değişimleri

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.7’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri artmıştır. Tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a yükseltildiğinde kaynama kür sonrası su emme yüzdesi %16.2 oranında yükselmiştir. Optimum UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a yükseltildiğinde kaynama kür sonrası su emme yüzdesi %14.9 oranında yükselmiştir. Bu sonuç ikame oranı arttıkça boşlukların ve

geçirimsizliğin arttığı ve dolayısıyla dayanımın azaldığını göstermektedir. Optimize olan UK ile tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçlar %5 ikame oranında %3.5, %10 ikame oranında %2.4, %15 ikame oranında %3.8, %20 ikame oranında %4.6 ve %30 ikame oranında %1.1 kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar incelendiğinde 90 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının ve geçirimsizliğinin, tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarına göre daha az olduğunu ve dolayısı ile dayanımlarının yüksek olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak; uçucu kül ikame oranları arttıkça kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçları ve tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları kaynama ve kür sonrası su emme özellikleri incelendiğinde optimum UK ikameli kaynama kür sonrası su emme yüzdelerinin daha düşük olduğu görülmüştür. 90 günlük, 28 günlük ve 7 günlük su emme yüzdeleri kendi içlerinde karşılaştırıldığında ise 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında kaynama kür sonrası su emme oranının en düşük, 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harçlarında kaynama kür sonrası su emme oranının en yüksek olduğu görülmüştür. 90 günlük sonuçlar kaynama kür sonrası su emme oranını diğer günlere göre daha çok azaltmıştır. %5 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %7.6, 90 günde ise %10.8 oranında azalmıştır. %10 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %8.9, 90 günde ise %10.6 oranında azalmıştır. %15 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %7.5, 90 günde ise %9.1 oranında azalmıştır. %20 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %3.7, 90 günde ise %5.9 oranında azalmıştır. %30 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %1.0, 90 günde ise %1.3 oranında azalmıştır. %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %6.2, 90 günde ise %9 oranında

azalmıştır. %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %6.5, 90 günde ise %9.4 oranında azalmıştır. %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %4.4, 90 günde ise %6.5 oranında azalmıştır. %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %1.6, 90 günde ise %2.8 oranında azalmıştır. %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %0.7, 90 günde ise %1.7 oranında azalmıştır. Bunun nedeni ilerleyen yaşlarda hidrasyonun devam ederek boşlukların doldurulmasını sağlamasıdır. Uçucu kül tane dağılımı optimize edilerek yapılan en yüksek kompasiteyi sağlama işlemi kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri azaltarak geçirimsizliği, boşlukları azaltmış ve dolayısı ile dayanımı artırmıştır.

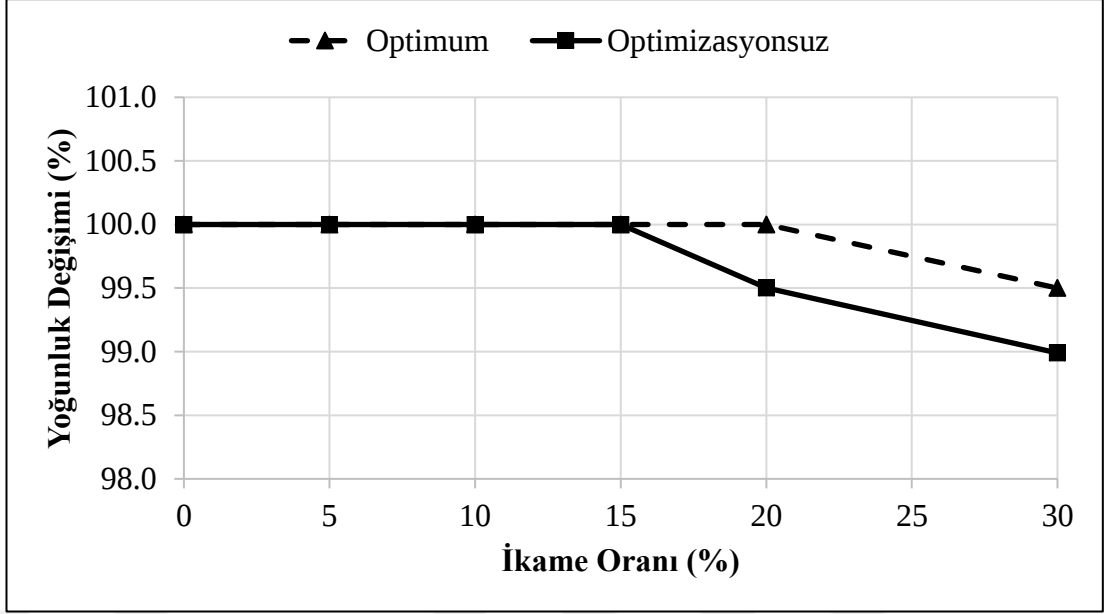
#### Hacimsel Kuru Yoğunluk Özellikleri

Bu bölümde çalışmanın amacı %5, %10, %15, %20 ve %30 optimizasyonsuz ve optimum uçucu kül ikameli çimento harçlarının hacimsel kuru yoğunlukları elde edilerek, boşluk oranı, kompasitesi ve dayanımı hakkında fikir elde etmektir. Hacimsel kuru yoğunluğu yüksek olan çimento harcının kompasitesi de yüksek olacağından dayanımı yüksek olacaktır. Hacimsel kuru yoğunluk özellikleri Bölüm 3'de Denklem 3.4'de verilen formüle göre yapılmıştır. Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluk değerleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.

**Çizelge 5.3.** 7, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluk değerleri

| Numune Kodu | 7 gün (g/cm <sup>3</sup> ) | 28 gün (g/cm <sup>3</sup> ) | 90 gün (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| UK0         | 1.99                       | 2.01                        | 2.01                        |
| UK5         | 1.99                       | 2.01                        | 2.01                        |
| 0.4UK5      | 1.99                       | 2.01                        | 2.02                        |
| UK10        | 1.99                       | 2.01                        | 2.01                        |
| 0.4UK10     | 1.99                       | 2.01                        | 2.01                        |
| UK15        | 1.99                       | 2.00                        | 2.01                        |
| 0.4UK15     | 1.99                       | 2.01                        | 2.01                        |
| UK20        | 1.98                       | 1.99                        | 2.00                        |
| 0.4UK20     | 1.99                       | 2.00                        | 2.01                        |
| UK30        | 1.97                       | 1.98                        | 1.99                        |
| 0.4UK30     | 1.98                       | 1.99                        | 2.00                        |

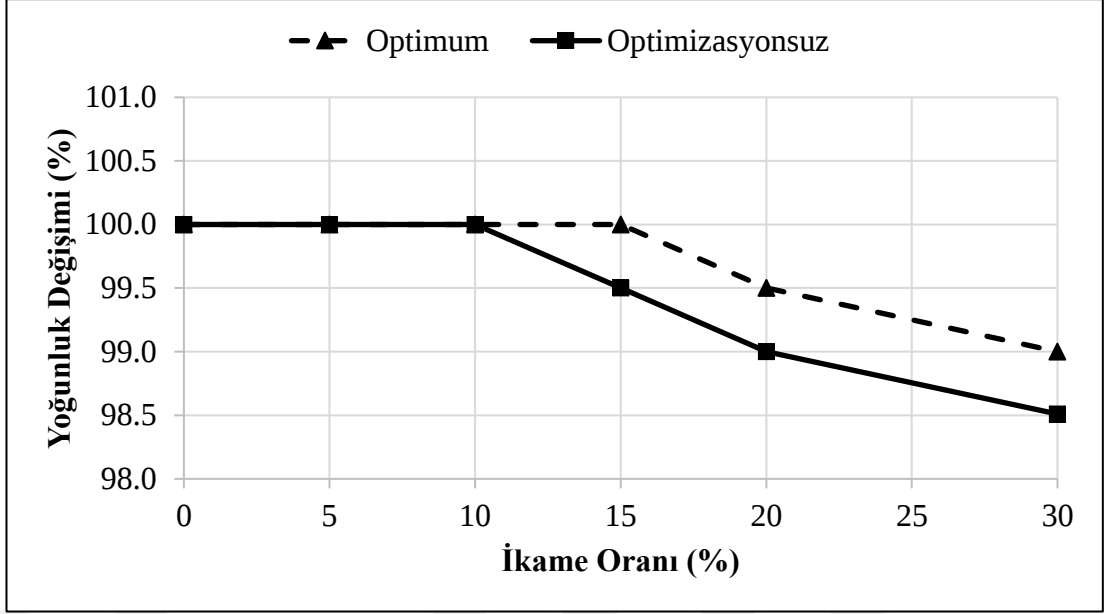
7 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı yapılmamış uçucu kül ikameli çimento harcı hacimsel kuru yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.8’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı hacimsel kuru yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.8.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.3 ve Şekil 5.8’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça hacimsel kuru yoğunluk değerleri %15 ikame oranına kadar sabit kalmış %30 ikame oranında ise azalmıştır. Bu sonuç ikame oranı arttıkça boşlukların arttığını göstermektedir. Optimize olan UK ile tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçlar optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre hacimsel kuru yoğunluk değerleri %15 ikame oranına kadar aynı %20 ve %30 ikame oranında ise daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç 7 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre daha az olduğunu göstermektedir. Tane dağılımı optimizasyonu harç örneklerinde kompasitenin yüksek olmasını sağlamıştır. %30 optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı, hacimsel kuru yoğunluk değerleri arasında en düşük değeri vermiştir.

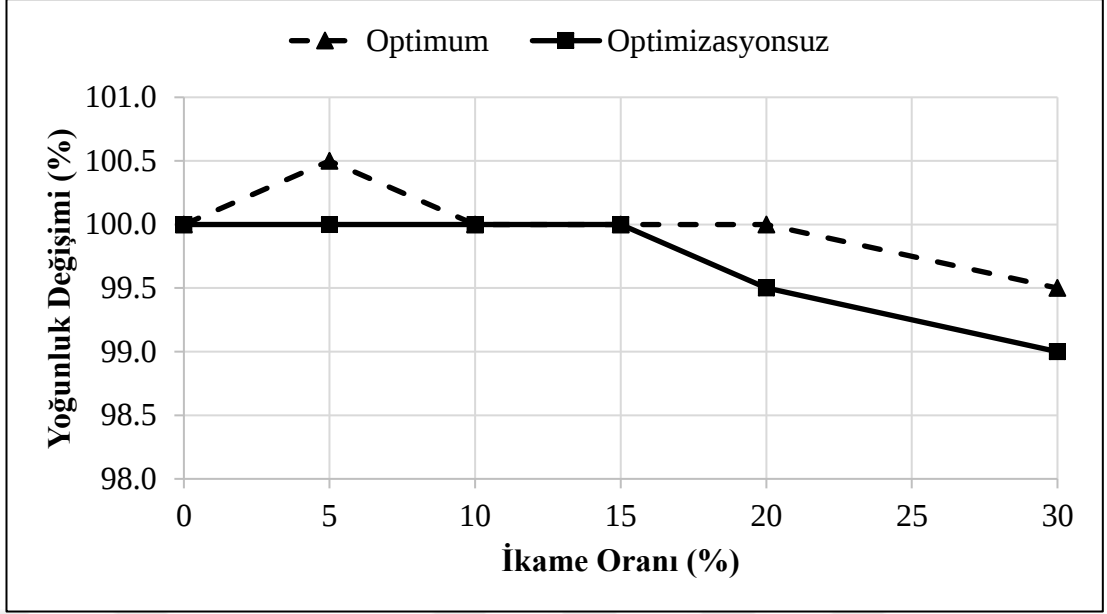
28 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı hacimsel kuru yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.9’da verilmiştir. İkamesiz çimento harcı hacimsel kuru yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.9.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük hacimsel kuru yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.3 ve Şekil 5.9’da görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça hacimsel kuru yoğunluk değerleri azalmıştır. Bu durum ikame oranının artmasıyla boşlukların arttığını göstermektedir. Optimize olan UK ile tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında kıyaslandığında optimum UK ikameli harçların hacimsel kuru yoğunluk değerleri %10 ikame oranına kadar optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre aynı, daha yüksek ikame oranlarında ise optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre hacimsel kuru yoğunluk değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bu da 28 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının daha az olduğunu ve yüksek doluluk etkisinin sağlandığını göstermektedir.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı hacimsel kuru yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.10’da verilmiştir. İkamesiz çimento harcı hacimsel kuru yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.10.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük hacimsel kuru yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.3 ve Şekil 5.10’da görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı yükseldikçe hacimsel kuru yoğunluk değerleri düşmüştür. Optimize olan UK ile tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçlar, tane dağılımı optimize edilmeyen harçlara göre hacimsel kuru yoğunluk değerleri aynı veya daha yüksek çıkmıştır. Bu da 90 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının optimizasyonu yapılmayan UK ikameli çimento harcına göre az olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar yüksek dolgu etkisinin kompasitenin yüksek olmasını sağladığının göstergesidir.

Sonuç olarak; optimum uçucu kül ikameli çimento harçları ve tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları hacimsel kuru yoğunluk değerleri kendi aralarında incelendiğinde optimum UK ikameli çimento harçlarının hacimsel kuru yoğunluk değerlerinin daha yüksek veya eşit olduğu görülmüştür. 7, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar kendi aralarında karşılaştırıldığında ise en yüksek hacimsel kuru yoğunluk değerini 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı verirken, en düşük hacimsel kuru yoğunluk değerini 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli

çimento harçları vermiştir. 90 günlük sonuçların hacimsel kuru yoğunluk değerleri diğer günlere göre daha yüksek çıkmıştır. %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $2.01 \text{ g/cm}^3$  ve  $2.02 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunlukları  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunlukları  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $2.00$  ve  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında ise 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.98 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $1.99$  ve  $2.00 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $2.00 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.98 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $1.99 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.00 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.97 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $1.98 \text{ g/cm}^3$ ,  $1.99 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. Bu durum olgunlaştırma süresinin devam etmesiyle hidrasyon ürünlerinin boşlukları doldurduğunu göstermektedir. Yapılan tane dağılımı optimizasyonu ile hacimsel kuru yoğunluk değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu sonuç yüksek kompasitenin sağlandığının göstergesidir.

#### Kür Sonrası Hacimsel Yoğunluk Özellikleri

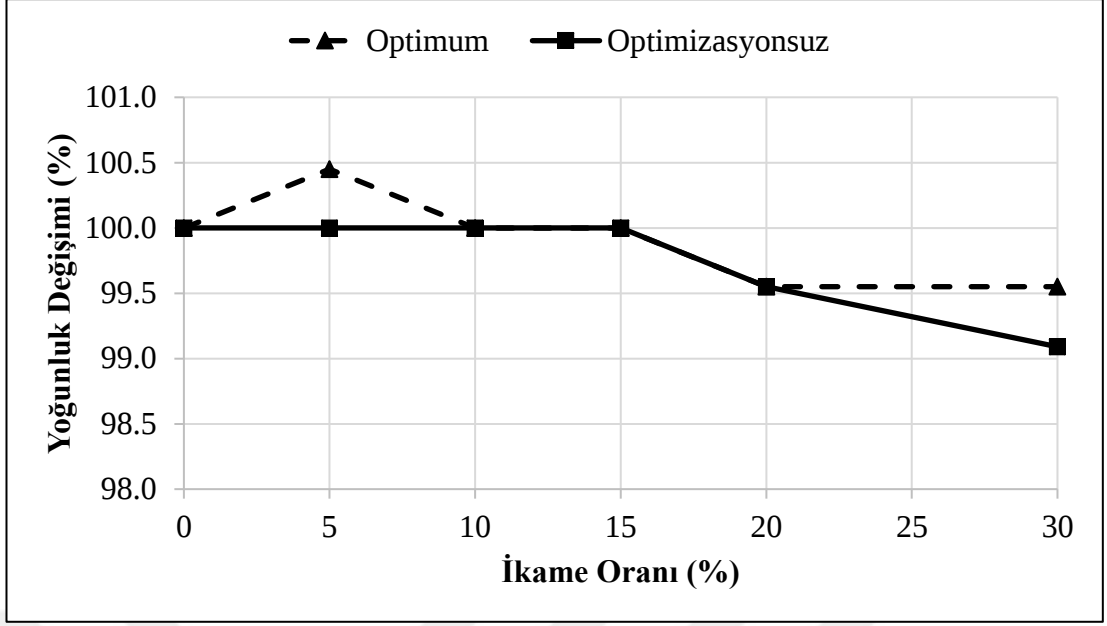
Bu deneyin amacı %5, %10, %15, %20 ve %30 tane dağılımı optimize edilmeyen ve optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harçlarının kür sonrası hacimsel

yoğunlukları elde edilerek kompasitesi, boşluk içeriği ve dayanımı hakkında genel bir bilgi edinmemizdir. Kür sonrası hacimsel yoğunluğu yüksek olan çimento harcının kompasitesi de yüksek olacağından boşluk oranı yani porozitesi düşük olacaktır. Kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri Bölüm 3’de Denklem 3.5’de verilen formüle göre yapılmıştır. Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.

**Çizelge 5.4.** 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri

| Numune Kodu | 7 gün (g/cm <sup>3</sup> ) | 28 gün (g/cm <sup>3</sup> ) | 90 gün (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| UK0         | 2.20                       | 2.20                        | 2.20                        |
| UK5         | 2.20                       | 2.20                        | 2.20                        |
| 0.4UK5      | 2.21                       | 2.21                        | 2.21                        |
| UK10        | 2.20                       | 2.20                        | 2.20                        |
| 0.4UK10     | 2.20                       | 2.21                        | 2.21                        |
| UK15        | 2.20                       | 2.20                        | 2.20                        |
| 0.4UK15     | 2.20                       | 2.21                        | 2.21                        |
| UK20        | 2.19                       | 2.19                        | 2.19                        |
| 0.4UK20     | 2.19                       | 2.21                        | 2.21                        |
| UK30        | 2.18                       | 2.19                        | 2.19                        |
| 0.4UK30     | 2.19                       | 2.20                        | 2.20                        |

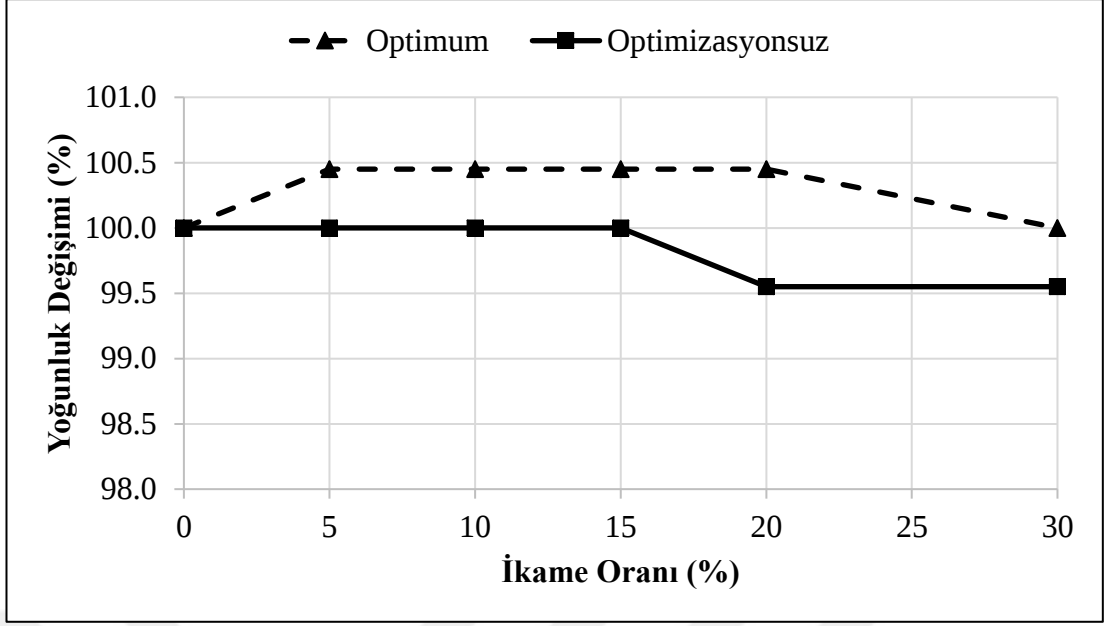
7 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.11’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kür sonrası hacimsel kuru yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.11.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.4 ve Şekil 5.11’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri azalmıştır. Optimize olan UK ile optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları aynı ikame oranında birbirleri ile karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçların kür sonrası hacimsel yoğunlukları, optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre eşit veya yüksek çıkmıştır. Bu sonuç 7 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının daha az olduğunu göstermektedir. %30 optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri arasında en düşük değeri vermiştir. Tane dağılımı optimize edilen %5 UK ikameli çimento harcı kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri en yüksek değer olarak  $2.21 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.

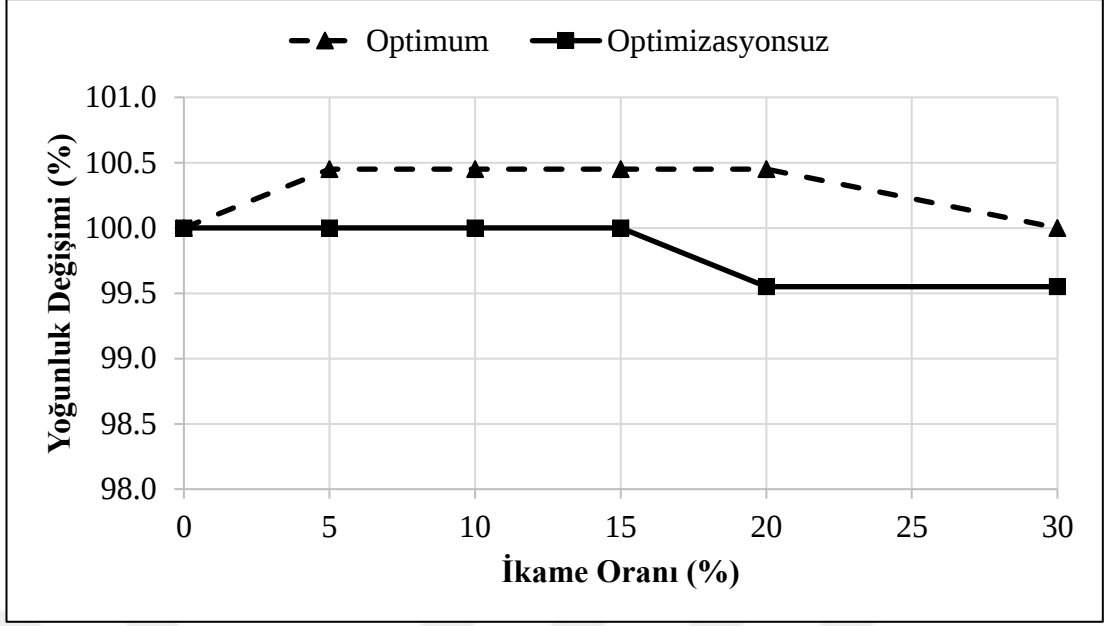
28 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.12’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kür sonrası hacimsel kuru yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.12.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.4 ve Şekil 5.12’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri kademeli olarak azalmıştır. Optimize olan UK ile tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarını aynı ikame oranında kendi içlerinde karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçların kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri referans harçlara göre yüksek çıkmıştır.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı yapılmamış uçucu kül ikameli çimento harcı kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.13’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kür sonrası hacimsel kuru yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.13.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.4 ve Şekil 5.13’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranının artması ile birlikte kür sonrası hacimsel yoğunluk değerlerinin de kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Optimize olan UK ile tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları aynı ikame oranında kendi içlerinde kıyaslandığında optimum UK ikameli harçların kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli harçlara göre yüksek çıkmıştır.

Sonuç olarak; optimum UK ikameli çimento harçları ve tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları kür sonrası hacimsel yoğunluk özellikleri birbirleri ile aynı ikame oranında karşılaştırıldığında optimum UK ikameli kür sonrası hacimsel yoğunluk değerlerinin optimizasyonsuz UK ikameli harçlara göre daha yüksek veya eşit olduğu görülmüştür. Bu da mekanik özelliklerin optimizasyonu yapılan UK ikameli çimento harçlarında daha fazla olduğunun kanıtıdır. 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri birbirleri ile karşılaştırıldığında en yüksek değeri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en düşük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerlerini 7 günlük %30 optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı vermiştir. 90 günlük sonuçların kür sonrası hacimsel kuru

yoğunluk değerleri diğer günlere göre aynı veya daha yüksek çıkmıştır. %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.21 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.20 \text{ g/cm}^3$  iken 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.21 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk  $2.20 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunlukları  $2.21 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk  $2.19 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunlukları  $2.21 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk  $2.19 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunlukları  $2.20 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.20 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.20 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.20 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.19 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.18 \text{ g/cm}^3$ , 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.19 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. Sonuçlar daha ileriki günlerde hidrasyonun devam etmesinden dolayı daha iyi sonuçlar vermiştir. İkame oranı arttıkça kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri azalmıştır. Dolayısı ile ikame oranı arttıkça boşluklar arttığı ve dayanımın azaldığı söylenebilir. Uçucu kül tane dağılımının yapılması ile birlikte yoğunluk değerleri artmış dolayısı ile kompasite yükselmiştir.

#### Kaynama ve Kür Sonrası Hacimsel Yoğunluk Özellikleri

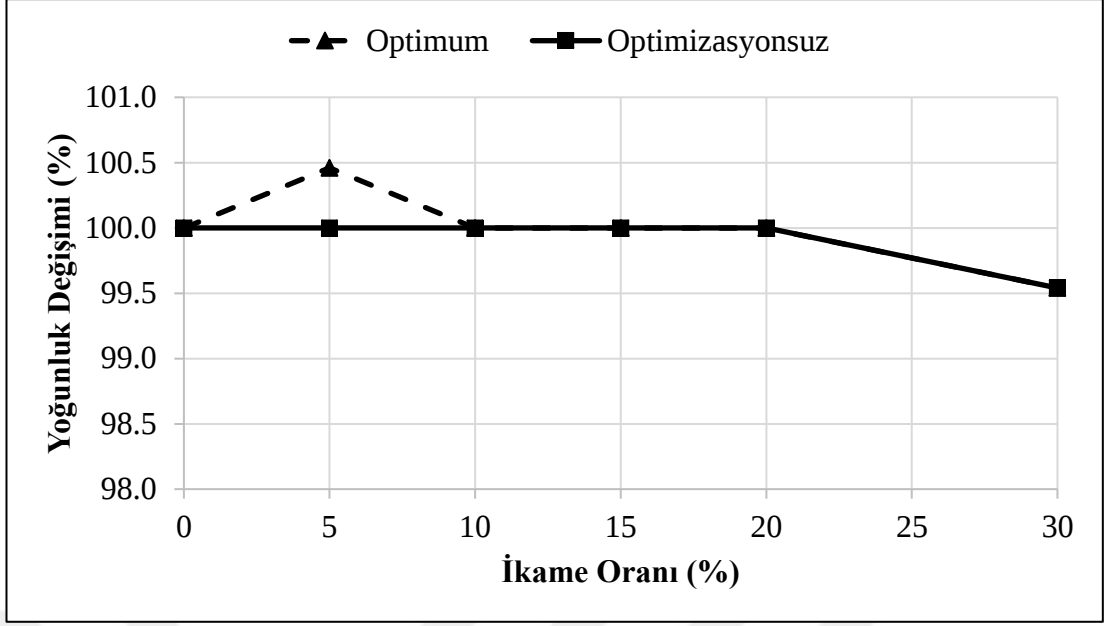
Bu deneyin amacı %5, %10, %15, %20 ve %30 tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harçlarının kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunlukları elde edilerek boşluk oranı, kompasitesi ve dayanımı hakkında genel bir bilgi elde etmektir. Kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluğu yüksek olan çimento harcının kompasitesi yüksek olacağından dayanımı yüksek olacaktır. Kaynama ve kür

sonrası hacimsel yoğunluk özellikleri bölüm 3’de Denklem 3.6’da verilen formüle göre yapılmıştır. Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

**Çizelge 5.5.** 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri

| <b>Numune Kodu</b> | <b>7 gün (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>28 gün (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>90 gün (g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|--------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| UK0                | 2.19                            | 2.20                             | 2.20                             |
| UK5                | 2.19                            | 2.20                             | 2.20                             |
| 0.4UK5             | 2.20                            | 2.21                             | 2.21                             |
| UK10               | 2.19                            | 2.19                             | 2.19                             |
| 0.4UK10            | 2.19                            | 2.20                             | 2.20                             |
| UK15               | 2.19                            | 2.19                             | 2.19                             |
| 0.4UK15            | 2.19                            | 2.20                             | 2.20                             |
| UK20               | 2.19                            | 2.20                             | 2.20                             |
| 0.4UK20            | 2.19                            | 2.20                             | 2.20                             |
| UK30               | 2.18                            | 2.18                             | 2.18                             |
| 0.4UK30            | 2.18                            | 2.18                             | 2.18                             |

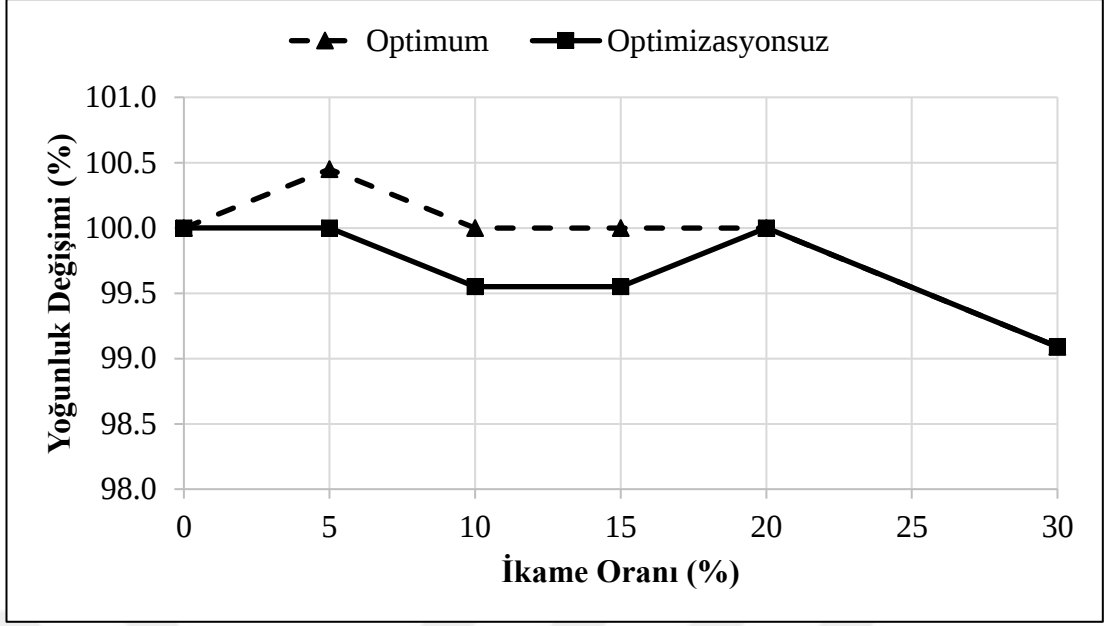
7 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.14’de verilmiştir. İkamesiz çimento kaynama ve kür sonrası hacimsel kuru yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.14.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.5 ve Şekil 5.14’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri kademeli olarak azalmıştır. Optimize olan UK ile tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçların kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunlukları optimize edilmemiş UK ikameli harçlara göre yüksek veya aynı çıkmıştır. Bu durum 7 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre boşluklarının daha az olduğunu göstermektedir. %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri arasında en düşük değeri vermiştir. Tane dağılımı optimize edilmiş %5 UK ikameli çimento harcı yoğunluk değeri  $2.20 \text{ g/cm}^3$  elde edilerek en yüksek değeri vermiştir.

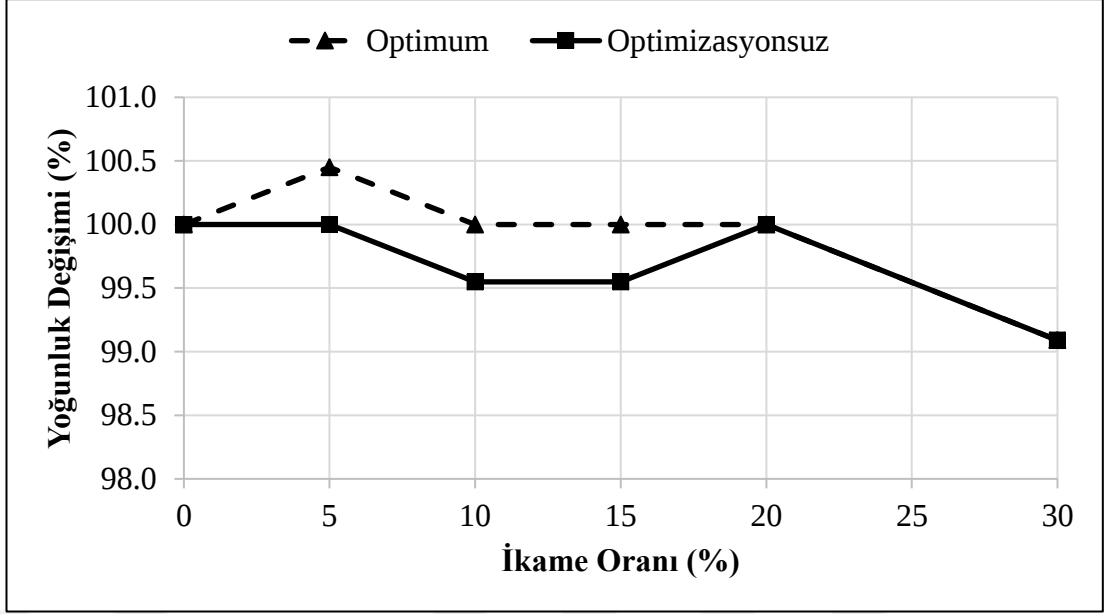
28 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.15’de verilmiştir. İkamesiz çimento kaynama ve kür sonrası hacimsel kuru yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.15.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.5 ve Şekil 5.15 incelendiğinde uçucu kül ikame oranının artmasıyla beraber kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri kademeli olarak azalmıştır. Tane dağılımı optimize olan UK ile optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçların kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunlukları optimize edilmemiş UK ikameli harçlara göre yüksek çıkmıştır. Bu da 28 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının optimize edilmemiş UK ikameli harçlara göre boşluklarının daha az olduğunu göstermektedir.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.16'da verilmiştir. İkamesiz çimento kaynama ve kür sonrası hacimsel kuru yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.16.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.5 ve Şekil 5.16’da gösterildiği gibi uçucu kül ikame oranının artması kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri kademeli olarak azalmıştır. Tane dağılımı optimize olan UK ile optimize olmayan UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranına göre karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçların kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri optimizasyonsuz UK ikameli harçlara göre yüksek çıkmıştır. Bu sonuç 90 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre daha az olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak; optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında optimum UK ikameli çimento harçlarında kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerlerinin optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. 7, 28 ve 90 günlük sonuçlar karşılaştırıldığında ise 90 ve 28 günlük sonuçlar 7 günlük sonuçlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bunun nedeni hidratasyonun daha uzun sürerek boşlukları doldurmasıdır. 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değeri 90 günlük %5 optimum UK

ikameli çimento harcı vermişken, en düşük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerlerini 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı vermiştir. %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri 2.20 iken 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.21 elde edilmiştir. %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri 2.19 iken 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.20 elde edilmiştir. %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk 2.19 g/cm<sup>3</sup> iken, 28 ve 90 günlük yoğunlukları 2.20 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir. %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluğu 2.19 g/cm<sup>3</sup>, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunlukları eşit 2.20 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir. %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunlukları eşit 2.18 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir. %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri 2.19 g/cm<sup>3</sup> iken 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.20 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir. %10 ve %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.19 g/cm<sup>3</sup> g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir. %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri 2.19 g/cm<sup>3</sup> iken 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.20 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir. %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.18 g/cm<sup>3</sup> g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir. Tane dağılımı optimize edilen UK ikameli çimento harçlarının yoğunluklarının yüksek çıkması kompasitenin artmasının göstergesi olarak açıklanabilir.

### Görünür Yoğunluk Özellikleri

Bu deneyin amacı %5, %10, %15, %20 ve %30 tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harçlarının görünür yoğunlukları elde edilerek boşluk oranı, kompasitesi, geçirimsizliği ve dayanımı hakkında genel bir bilgi edinmektir. Görünür yoğunluğu yüksek olan çimento harcının kompasitesi yüksek olduğundan dayanımı yüksek olacaktır. Görünür yoğunluk özellikleri Bölüm 3’de

Denklem 3.7’de verilen formüle göre yapılmıştır. Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük görünür yoğunluk değerleri Çizelge 5.6’da verilmiştir.

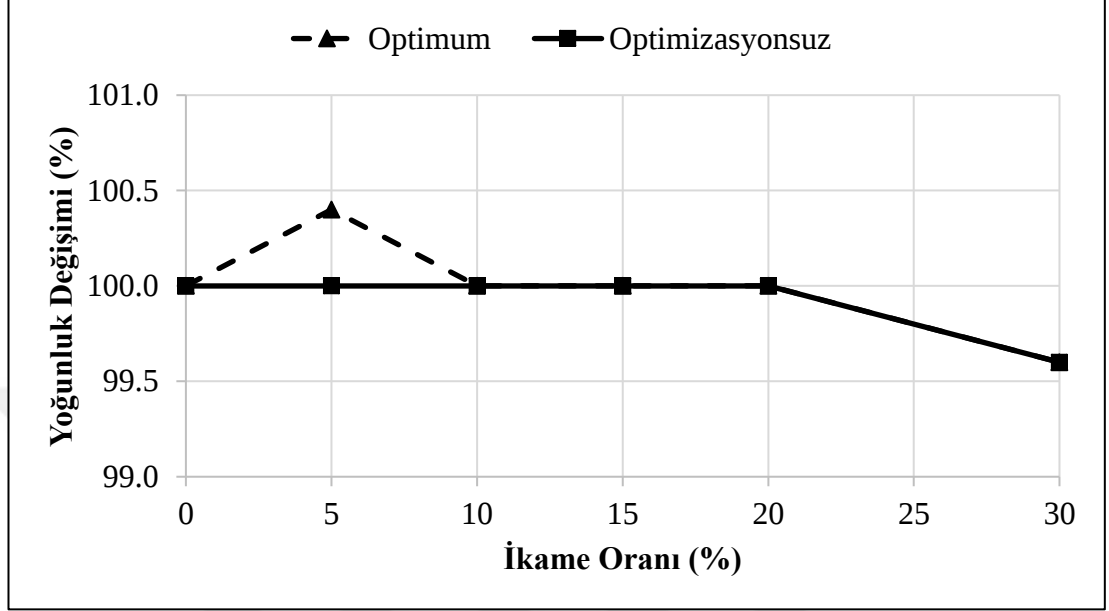
**Çizelge 5.6.** 7, 28 ve 90 günlük görünür yoğunluk değerleri

| Numune Kodu | 7 gün (g/cm <sup>3</sup> ) | 28 gün (g/cm <sup>3</sup> ) | 90 gün (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| UK0         | 2.46                       | 2.47                        | 2.47                        |
| UK5         | 2.46                       | 2.47                        | 2.47                        |
| 0.4UK5      | 2.46                       | 2.47                        | 2.48                        |
| UK10        | 2.46                       | 2.47                        | 2.47                        |
| 0.4UK10     | 2.46                       | 2.47                        | 2.47                        |
| UK15        | 2.46                       | 2.47                        | 2.47                        |
| 0.4UK15     | 2.46                       | 2.47                        | 2.47                        |
| UK20        | 2.46                       | 2.47                        | 2.47                        |
| 0.4UK20     | 2.46                       | 2.47                        | 2.47                        |
| UK30        | 2.46                       | 2.46                        | 2.46                        |
| 0.4UK30     | 2.46                       | 2.46                        | 2.46                        |

Çizelge 5.6’da görüldüğü gibi 7 gün için uçucu kül ikame oranı arttıkça görünür yoğunluk değerleri sabit kalmıştır. Optimize olan UK ile optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde karşılaştırıldığında tüm ikame oranlarında görünür yoğunluk değerleri eşit ve 2.46 g/cm<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. 28 gün için uçucu kül ikame oranı %20’ye kadar arttıkça görünür yoğunluk değerleri 2.47 g/cm<sup>3</sup> değerinde sabit kalmış, %30 ikame oranında ise 2.46 g/cm<sup>3</sup> değerine düşmüştür. Optimize olan UK ile optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçların görünür yoğunlukları optimizasyonsuz UK ikameli harçlara göre eşit elde edilmiştir.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı

görünür yoğunluk yüzde değişim sonuçları Şekil 5.17’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı görünür yoğunluk değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.17.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük görünür yoğunluk yüzde değişimleri

Çizelge 5.6 ve Şekil 5.17 incelendiğinde uçucu kül ikame oranı arttıkça görünür yoğunluk değerleri düşmüştür. Optimize olan UK ile optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçların görünür yoğunlukları optimizasyonsuz UK ikameli harçlara göre yüksek veya eşit çıkmıştır. Görünür yoğunluk değerleri arasında en düşük değer %30 ikame oranında  $2.46 \text{ g/cm}^3$  olarak elde edilmiştir. Görünür yoğunluklar arasında en yüksek değer %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında  $2.48 \text{ g/cm}^3$  olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak; optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları görünür yoğunluk özellikleri incelendiğinde, optimum UK ikameli çimento harcı görünür yoğunluk değerlerinin daha yüksek veya eşit olduğu görülmüştür. 90 gün, 28 gün ve 7 günlük görünür yoğunluk değerleri birbirleri ile

kıyaslandığında olgunlaştırma yaşı arttıkça hidrasyon artmış ve dolayısı ile görünür yoğunluk değerleri yükselmiştir. 90 günlük sonuçların görünür yoğunluk değerleri diğer günlere göre daha yüksek çıkmıştır. %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunluklar sırasıyla  $2.47$  ve  $2.48 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunluklar  $2.47 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunluklar  $2.47 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında ise 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunluklar  $2.47 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında ise 7, 28 ve 90 günlük yoğunluklar  $2.46 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %5, %10, %15 ve %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunlukları  $2.47 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük yoğunlukları  $2.46 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir. 7, 28 ve 90 günlük görünür yoğunluk değerleri arasında en yüksek değeri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en düşük görünür yoğunluk değerlerini ise 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı vermiştir.

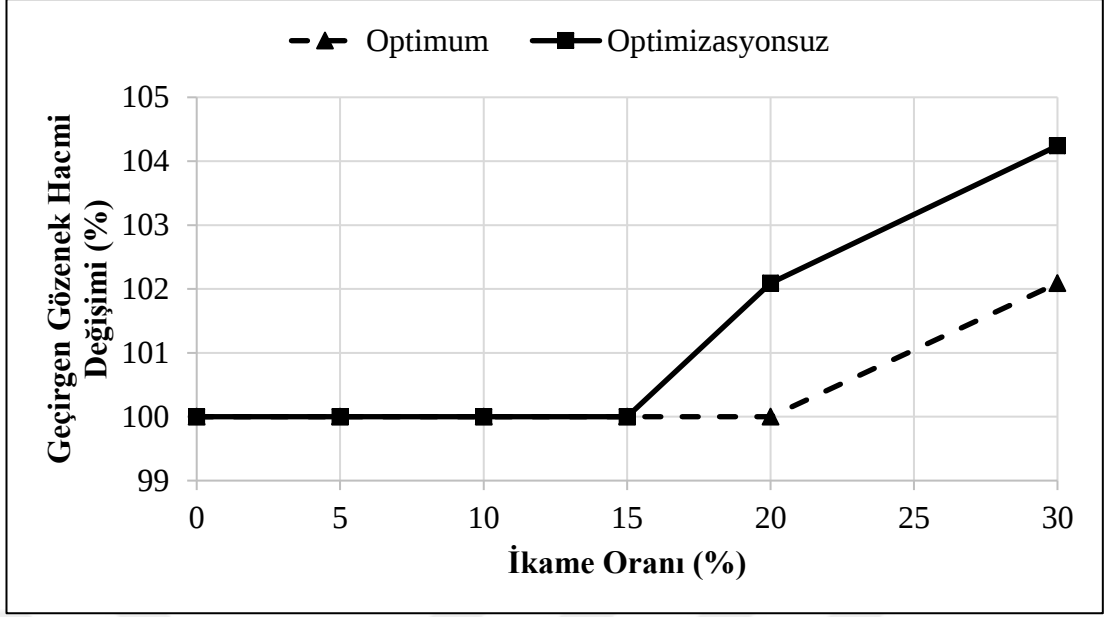
#### Geçirgen Gözenek Hacmi Özellikleri

Bu deneyin amacı %5, %10, %15, %20 ve %30 optimizasyonsuz ve optimum uçucu kül ikameli çimento harçlarının geçirgen gözenek hacimleri elde edilerek boşluk oranı, geçirimsizliği ve kompasitesi hakkında genel bir bilgi edinmektir. Boşluk oranı fazla olan çimento harcının geçirgen gözenek hacmi yüksek olacak ve kompasitesi ve dayanımı düşük olacaktır. Geçirgen gözenek hacmi Bölüm 3’de Denklem 3.8’de verilen formüle göre yapılmıştır. Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacmi değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

**Çizelge 5.7.** 7, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacmi değerleri

| <b>Numune Kodu</b> | <b>7 gün (%)</b> | <b>28 gün (%)</b> | <b>90 gün (%)</b> |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| UK0                | 19.11            | 18.62             | 18.62             |
| UK5                | 19.11            | 18.62             | 18.62             |
| 0.4UK5             | 19.11            | 18.62             | 18.55             |
| UK10               | 19.11            | 18.62             | 18.62             |
| 0.4UK10            | 19.11            | 18.62             | 18.62             |
| UK15               | 19.11            | 19.03             | 18.62             |
| 0.4UK15            | 19.11            | 18.62             | 18.62             |
| UK20               | 19.51            | 19.43             | 19.03             |
| 0.4UK20            | 19.11            | 19.03             | 18.62             |
| UK30               | 19.92            | 19.51             | 19.11             |
| 0.4UK30            | 19.51            | 19.11             | 18.70             |

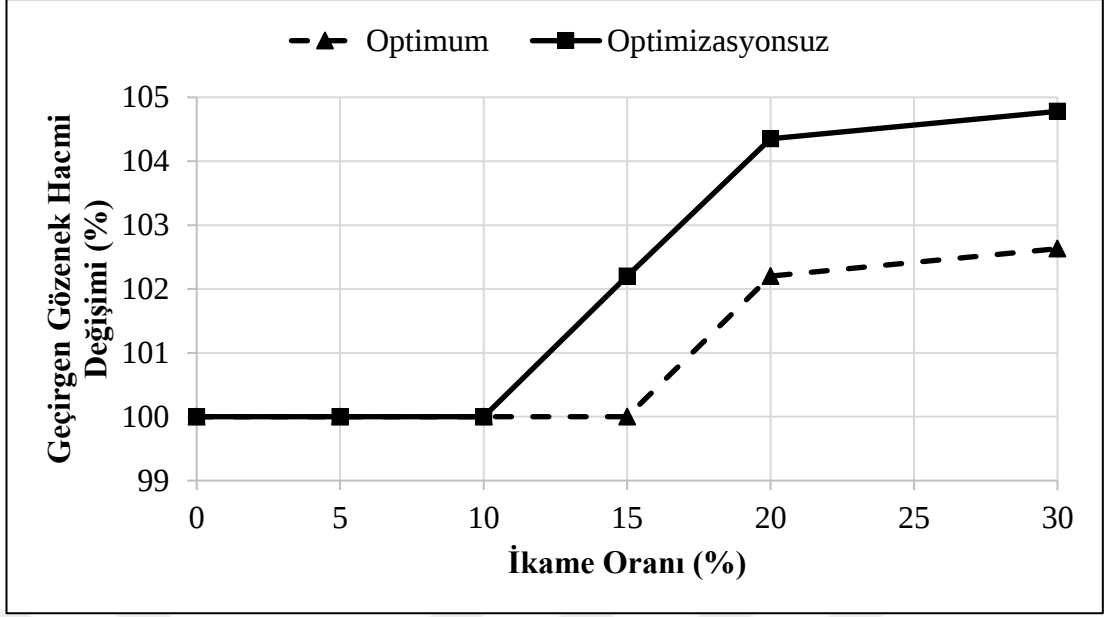
7 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı geçirgen gözenek hacmi yüzde değişim sonuçları Şekil 5.18’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı geçirgen gözenek hacmi değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.18.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük geçirgen gözenek hacmi yüzde değişimleri

Çizelge 5.7 ve Şekil 5.18’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranının artması ile geçirgen gözenek hacmi değerleri artmıştır. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında optimum UK ikameli çimento harçlarının geçirgen gözenek hacmi, optimize edilmemiş UK ikameli harçlara göre %15 ikame oranına kadar eşit %20 ve %30 ikame oranlarında ise daha düşük elde edilmiştir. Bu sonuç 7 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının, optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarına göre boşluklarının az olduğunu göstermiştir.

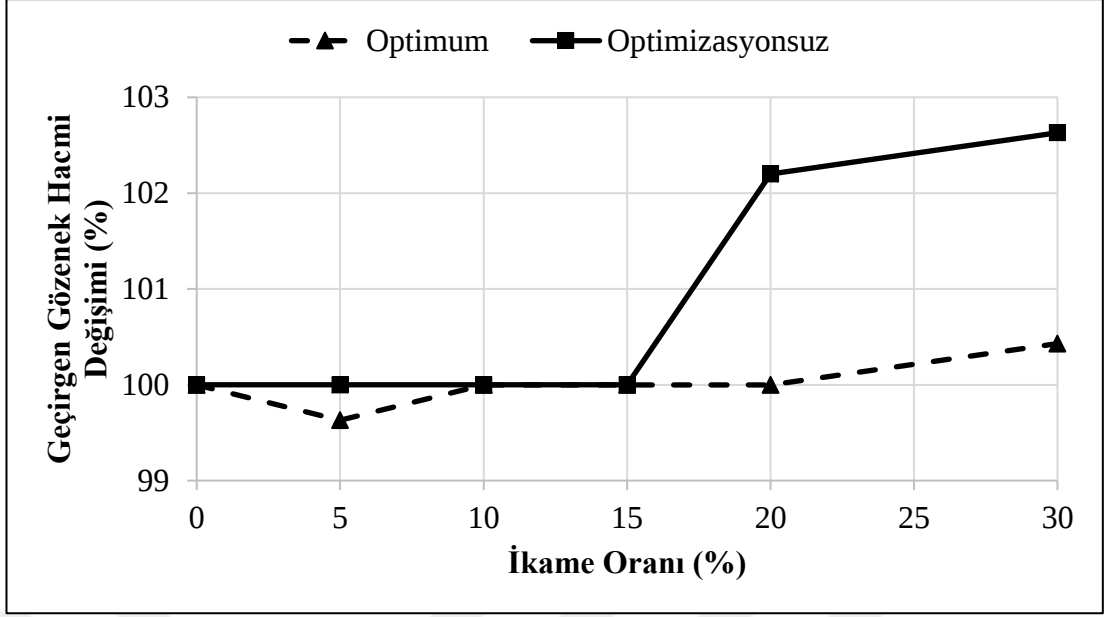
28 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harcı geçirgen gözenek hacmi yüzde değişim sonuçları Şekil 5.19’da verilmiştir. İkamesiz çimento harcı geçirgen gözenek hacmi değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.19.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük geçirgen gözenek hacmi yüzde değişimleri

Çizelge 5.7 ve Şekil 5.19’da gösterildiği gibi uçucu kül ikame oranı yükseldikçe geçirgen gözenek hacmi değerleri artmıştır. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranında kıyaslandığında optimum UK ikameli çimento harçlarının geçirgen gözenek hacmi, optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre %10 ikame oranına kadar aynı, daha yüksek ikame oranlarında ise daha düşük değerler elde edilmiştir.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harcı geçirgen gözenek hacmi yüzde değişim sonuçları Şekil 5.20’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı geçirgen gözenek hacmi değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.20.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük geçirgen gözenek hacmi yüzde değişimleri

Çizelge 5.7 ve Şekil 5.20’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça geçirgen gözenek hacmi değerleri artmıştır. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçların geçirgen gözenek hacmi, optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarına göre daha düşük veya eşit elde edilmiştir.

Sonuç olarak; geçirgen gözenek hacmi deney sonuçları incelendiğinde ikame oranları arttıkça geçirgen gözenek hacmi değerleri artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları geçirgen gözenek hacim değerleri incelendiğinde optimum UK ikameli harçların geçirgen gözenek değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Geçirgen gözenek hacmi değerleri arttıkça boşluk oranı artmakta ve mekanik dayanımlar azalmaktadır. 7, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacim değerleri karşılaştırıldığında, en düşük değeri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en yüksek değeri 7 günlük %30 optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı vermiştir. 90 günlük sonuçların geçirgen gözenek hacmi değerleri diğer günlere göre daha düşük çıkmıştır. %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90

günlük geçirgen gözenek hacimleri sırasıyla %18.62 ve %18.55 elde edilmiştir. %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri %18.62 elde edilmiştir. %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri %18.62 elde edilmiştir. %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırasıyla %19.03 ve %18.62 elde edilmiştir. %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.51 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırasıyla %19.11 ve %18.70 elde edilmiştir. %5 ve %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri %18.62 elde edilmiştir. %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırası ile %19.03, %18.62 elde edilmiştir. %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.51 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırası ile %19.43, %19.03 elde edilmiştir. %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.92 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırası ile %19.51, %19.11 elde edilmiştir. Bu sonuç olgunlaştırma süresinin artması ile hidrasyon sürecinin daha fazla devam etmesi ile boşlukların hidrasyon ürünleri tarafından doldurulmasından kaynaklanmaktadır. Uçucu kül tane dağılımının optimizasyonu ile geçirgen gözenek hacim değerleri azaltılarak kompazitenin ve dolayısı ile dayanımın artması sağlanmıştır.

#### Kılcal Su Emme Katsayıları

Bu deneyin amacı %5, %10, %15, %20 ve %30 tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harçlarının kılcal su emme katsayıları elde edilerek boşluk oranı, geçirimsizliği, kompazitesi ve dayanımı hakkında genel bir bilgi edinmektir. Kılcal su emme katsayıları yüksek olan çimento harcının geçirimsizliği, boşluk oranı da yüksek olacağından kompazitesi ve dayanıklılığı düşük olacaktır. Kılcal su emme katsayıları Bölüm 3’de Denklem 3.9’de verilen formüle göre TS EN 772-11’e göre 1 saat ve 2 saat süreler ile yapılmıştır [99]. Şekil 5.21’de kılcal

su emme katsayısı belirleme deney düzeneği gör÷lmektedir. Kılcal su emme için 50×50×50 mm prizmatik TS EN 196-1'e göre UK ikameli çimento harçları kullanılmış ve kenarlarından su almaması için parafin yardımıyla kenarları su geçirmez yapılmıştır [94].



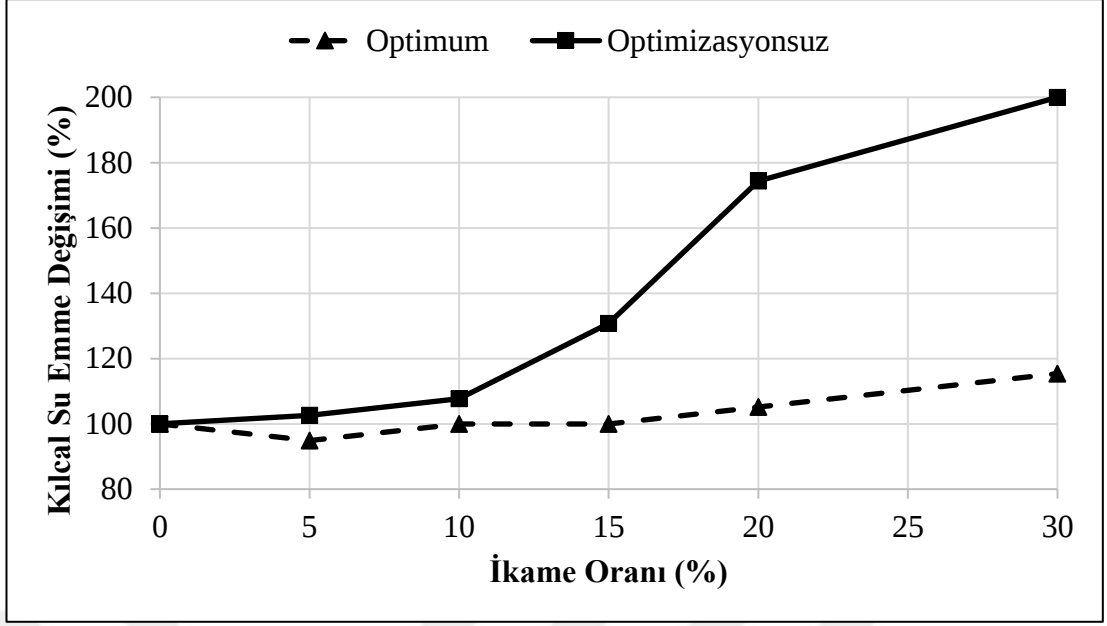
**Şekil 5.21.** Kılcal su emme katsayısı belirleme deney düzeneği

Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük 1 saat kılcal su emme katsayı değeri Çizelge 5.8'de verilmiştir.

**Çizelge 5.8.** 7, 28 ve 90 günlük 1 saat kılcal su emme katsayı değerleri

| Numune Kodu | 7 gün (g/(m <sup>2</sup> ×s)) | 28 gün (g/(m <sup>2</sup> ×s)) | 90 gün (g/(m <sup>2</sup> ×s)) |
|-------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| UK0         | 0.39                          | 0.28                           | 0.22                           |
| UK5         | 0.40                          | 0.30                           | 0.23                           |
| 0.4UK5      | 0.37                          | 0.26                           | 0.20                           |
| UK10        | 0.42                          | 0.31                           | 0.25                           |
| 0.4UK10     | 0.39                          | 0.28                           | 0.22                           |
| UK15        | 0.51                          | 0.35                           | 0.31                           |
| 0.4UK15     | 0.39                          | 0.33                           | 0.24                           |
| UK20        | 0.68                          | 0.38                           | 0.33                           |
| 0.4UK20     | 0.41                          | 0.36                           | 0.26                           |
| UK30        | 0.78                          | 0.42                           | 0.38                           |
| 0.4UK30     | 0.45                          | 0.38                           | 0.28                           |

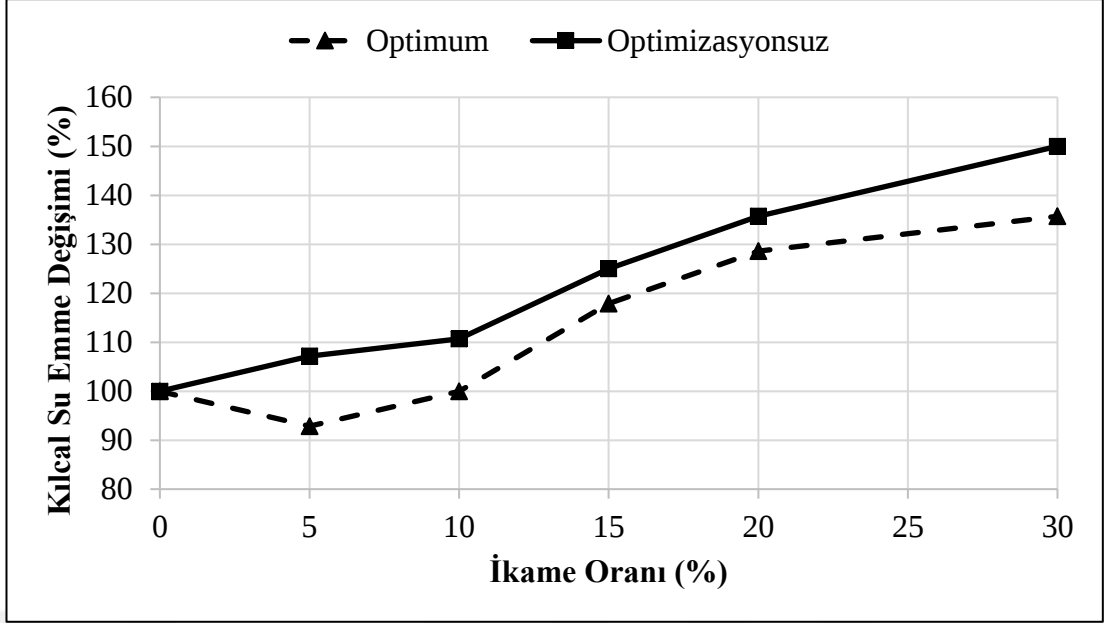
7 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harcı 1 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişim sonuçları Şekil 5.22’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kılcal su emme katsayı değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.22.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük 1 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri

Çizelge 5.8 ve Şekil 5.22’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça 1 saatlik kılcal su emme katsayı değerleri artmıştır. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçların optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre 1 saatlik kılcal su emme katsayıları daha düşük elde edilmiştir. Bu sonuç tane dağılımı optimize edilen UK ikameli çimento harçlarının geçirimsizliğinin düşük, kompansitesinin ise yüksek olduğunu göstermektedir.

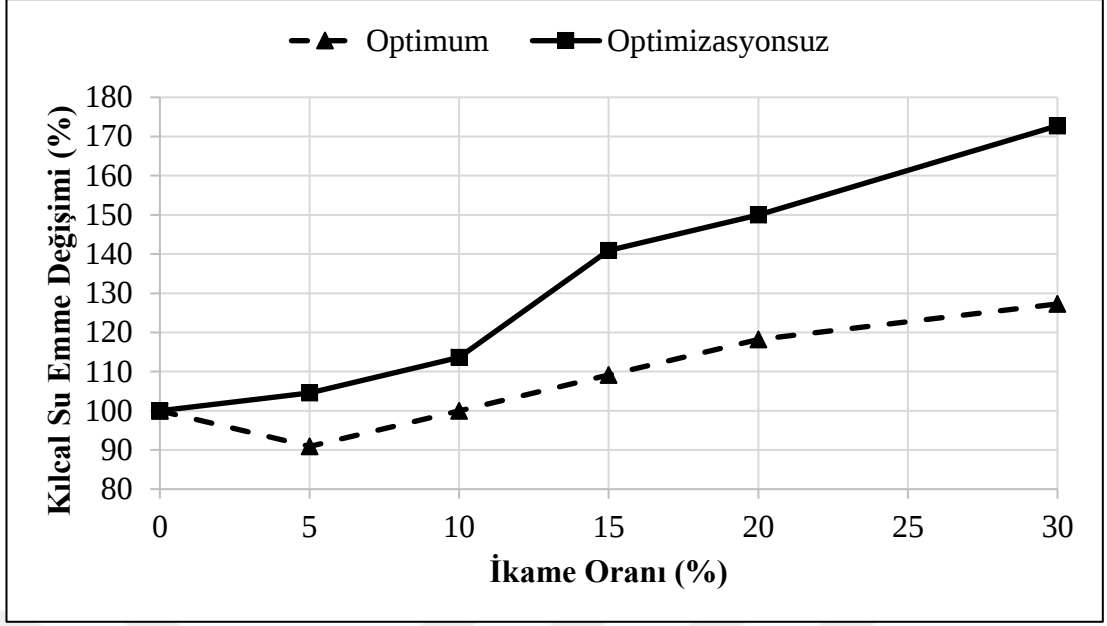
28 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı 1 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişim sonuçları Şekil 5.23’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kılcal su emme katsayı değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.23.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük 1 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri

Çizelge 5.8 ve Şekil 5.23’de uçucu kül ikame oranının artmasıyla 1 saatlik kılcal su emme katsayı değerlerinin arttığı görülmüştür. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçların optimize edilmeyen harçlara göre 1 saatlik kılcal su emme katsayıları daha düşük elde edilmiştir. Bu durum 28 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre boşluklarının az olduğunu ve kompasesinin yüksek olduğunu göstermektedir.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı 1 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişim sonuçları Şekil 5.24’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kılcal su emme katsayı değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.24.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük 1 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri

Çizelge 5.8 ve Şekil 5.24’de uçucu kül ikame oranı yükseldikçe 1 saatlik kılcal su emme katsayı değerleri yükselmiştir. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçların optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre 1 saatlik kılcal su emme katsayıları daha düşük elde edilmiştir. Bu sonuç 90 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre boşluklarının, geçirimsizliğinin az, dayanıklılığının ve kompasitesinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada sonuç olarak; 1 saatlik kılcal su emme katsayılarına bakıldığında uçucu kül ikame oranları arttıkça kılcal su emme katsayıları artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları 1 saatlik kılcal su emme katsayıları incelendiğinde, optimum UK ikameli kılcal su emme katsayılarının daha düşük olduğu görülmüştür. 7, 28 ve 90 günlük 1 saatlik kılcal su emme katsayıları incelendiğinde en düşük değerleri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en yüksek değeri ise 7 günlük %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları vermiştir. 90 günlük sonuçlar en iyi değerleri

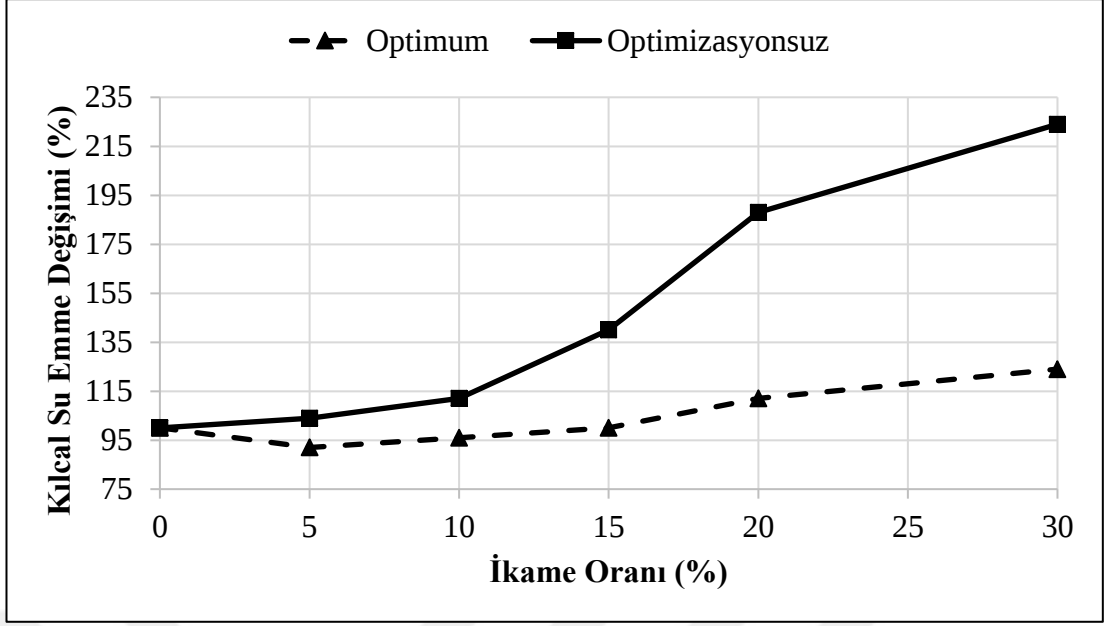
vermiştir. %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.37 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.26 m<sup>2</sup>s ve 0.37 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.39 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.28 m<sup>2</sup>s ve 0.22 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.39 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.33 m<sup>2</sup>s ve 0.24 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.41 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.36 m<sup>2</sup>s ve 0.26 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.45 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.38 m<sup>2</sup>s ve 0.25 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.40 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.30 m<sup>2</sup>s ve 0.23 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.42 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.31 m<sup>2</sup>s ve 0.25 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.51 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.35 m<sup>2</sup>s ve 0.31 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.68 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.38 m<sup>2</sup>s ve 0.33 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.78 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.42 m<sup>2</sup>s ve 0.38 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. Kılcal su emme katsayısı arttıkça boşluk oranı ve geçirimsizlik artmakta, kompasite ve dayanıklılık azalmaktadır. Bunun nedeni hidrasyon ürünlerinin artışıyla bu ürünler boşlukları doldurarak küçültmekte ve buna bağlı olarak kılcal su emme katsayılarında azalış olmaktadır.

Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük 2 saat kılcal su emme katsayı değerleri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

**Çizelge 5.9.** 7, 28 ve 90 günlük 2 saat kılcal su emme katsayı değerleri

| Numune Kodu | 7 gün (g/(m <sup>2</sup> ×s)) | 28 gün (g/(m <sup>2</sup> ×s)) | 90 gün (g/(m <sup>2</sup> ×s)) |
|-------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| UK0         | 0.25                          | 0.18                           | 0.18                           |
| UK5         | 0.26                          | 0.19                           | 0.18                           |
| 0.4UK5      | 0.23                          | 0.18                           | 0.17                           |
| UK10        | 0.28                          | 0.22                           | 0.21                           |
| 0.4UK10     | 0.24                          | 0.20                           | 0.18                           |
| UK15        | 0.35                          | 0.26                           | 0.25                           |
| 0.4UK15     | 0.25                          | 0.22                           | 0.18                           |
| UK20        | 0.47                          | 0.29                           | 0.27                           |
| 0.4UK20     | 0.28                          | 0.26                           | 0.19                           |
| UK30        | 0.56                          | 0.32                           | 0.30                           |
| 0.4UK30     | 0.31                          | 0.27                           | 0.21                           |

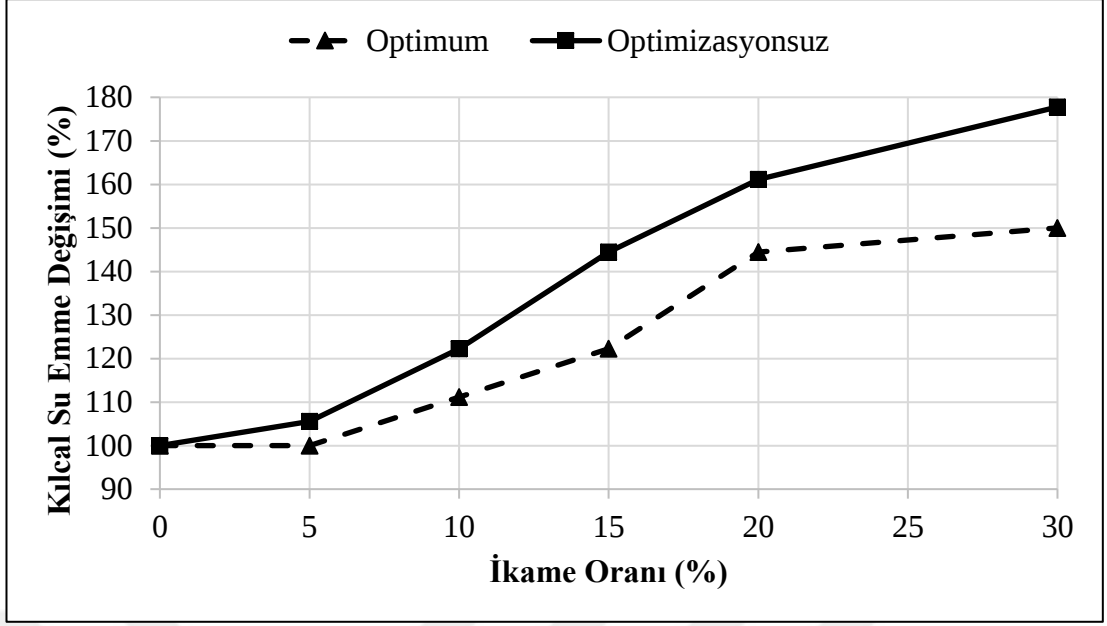
7 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı 2 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişim sonuçları Şekil 5.25’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kılcal su emme katsayı değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.25.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük 2 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri

Çizelge 5.9 ve Şekil 5.25’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranı arttıkça 2 saatlik kılcal su emme katsayı değerleri artmıştır. Optimize olan UK ile optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçlar optimize edilmemiş UK ikameli harçlara göre 2 saatlik kılcal su emme katsayıları daha düşük elde edilmiştir. Bu da 7 günlük tane dağılımı optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarının geçirimsizliğinin ve boşluklarının daha az olduğunu göstermektedir.

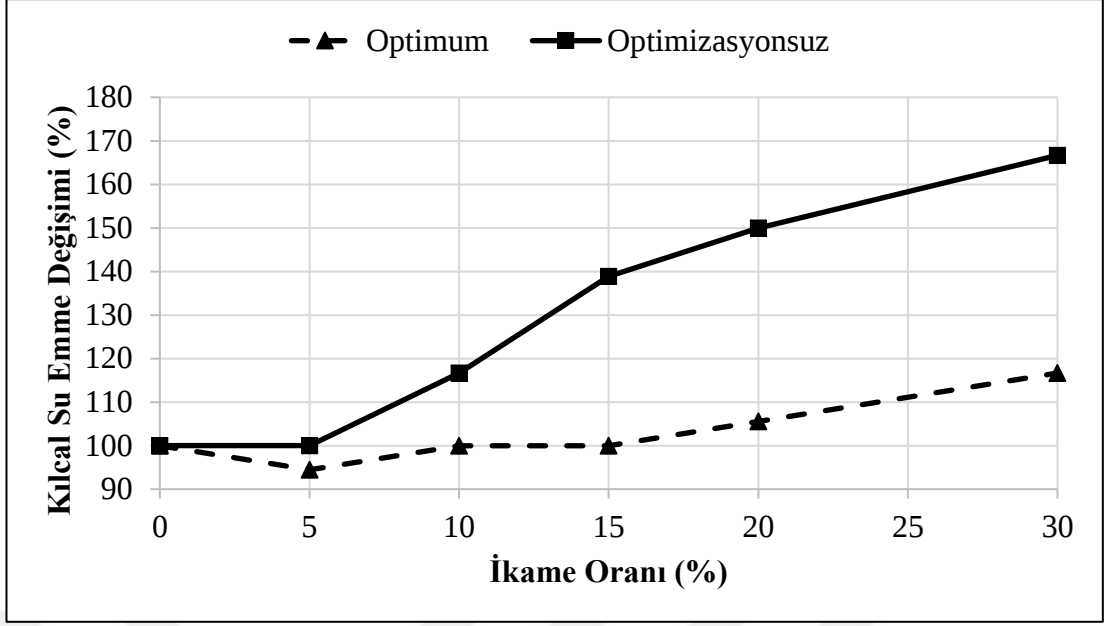
28 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı 2 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişim sonuçları Şekil 5.26’da verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kılcal su emme katsayı değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.26.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük 2 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri

Çizelge 5.9 ve Şekil 5.26’da uçucu kül ikame oranı arttıkça 2 saatlik kılcal su emme katsayı değerlerinin arttığı görülmüştür. Tane dağılımı optimize edilmiş ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçlar optimize edilmemiş UK ikameli harçlara göre 2 saatlik kılcal su emme katsayıları daha düşük elde edilmiştir. Bu sonuç 28 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının geçirimsizliğinin, boşluklarının daha az olduğunu ve kompasesinin ve dayanıklılığının daha yüksek olduğunu göstermektedir.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı 2 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişim sonuçları Şekil 5.27’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı kılcal su emme katsayı değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.27.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük 2 saatlik kılcal su emme katsayısı yüzde değişimleri

Çizelge 5.9 ve Şekil 5.27 incelendiğinde uçucu kül ikame oranı arttıkça 2 saatlik kılcal su emme katsayı değerlerinin arttığı görülmüştür. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçlar optimize edilmemiş UK ikameli harçlara göre 2 saatlik kılcal su emme katsayıları daha düşük elde edilmiştir.

Sonuç olarak; 2 saatlik kılcal su emme katsayılarına bakıldığında 7, 28 ve 90 gün için ikame oranları arttıkça kılcal su emme katsayıları artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları 2 saatlik kılcal su emme katsayıları incelendiğinde, optimum UK ikameli kılcal su emme katsayılarının daha düşük değerler verdiği görülmüştür. Tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harçları geçirimsizliği ve boşluk oranlarını azaltıp, kompasiteyi ve dayanıklılığı artırmıştır. 7, 28 ve 90 günlük 2 saatlik kılcal su emme katsayıları incelendiğinde en düşük değerleri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en yüksek değeri ise 7 günlük %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları vermiştir. 90 günlük sonuçlar en iyi değerleri vermiştir. %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde

0.23 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.18 m<sup>2</sup>s ve 0.17 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.24 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.20 m<sup>2</sup>s ve 0.18 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.25 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.22 m<sup>2</sup>s ve 0.18 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.28 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.26 m<sup>2</sup>s ve 0.19 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.31 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.27 m<sup>2</sup>s ve 0.21 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.26 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.19 m<sup>2</sup>s ve 0.18 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.28 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.22 m<sup>2</sup>s ve 0.21 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.36 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.26 m<sup>2</sup>s ve 0.25 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.47 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.29 m<sup>2</sup>s ve 0.27 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.56 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.32 m<sup>2</sup>s ve 0.30 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir. Bu durum hidrasyon sürecinin devamıyla boşlukların azalmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan en yüksek kompasiteyi elde etme işlemini 1 ve 2 saatlik kılcal su emme katsayı değerlerinin sağladığı görülmektedir. 1 saatlik ve 2 saatlik kılcal su emme katsayı değerleri birbirleri ile karşılaştırıldığında 2 saatlik kılcal su emme katsayı değerlerinin tüm günlerde ve tüm ikame oranlarında daha düşük çıktığı görülmüştür. Bu sonuçlar ilk zamanlarda kılcal su emmenin yüksek olduğunu göstermektedir.

Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları su emme özellikleri, hacimsel yoğunluk özellikleri ve kılcal su emme katsayı değerleri incelendiğinde optimum uçucu kül ikameli çimento harcı özellikleri optimize

edilmemiş UK ikameli çimento harcı özelliklerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Olgunlaştırma süresi arttıkça hidrasyon ürünleri boşlukları doldurduğundan su emme özellikleri düşük, hacimsel yoğunluklar yüksek ve kılcal su emme katsayıları ise düşük çıkmıştır. Su emme özellikleri, hacimsel yoğunluk özellikleri ve kılcal su emme katsayı değerleri literatürle karşılaştırıldığında Mercan (2007), Girginkardeşler (2008) ve İşsever (2013) tarafından yapılan çalışmalarla uyum sağlamaktadır [115-117]. Su emme özellikleri, hacimsel yoğunluk özellikleri ve kılcal su emme katsayı değerleri tane dağılımı optimize edilen UK ile iyileştirilerek yapılan en yüksek kompasiteyi elde etme yöntemin olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir.

## **5.2. Hızlı Klorür İyonu Geçirirliiği**

### **5.2.1. Giriş**

Beton kalıcılığını etkileyen en önemli parametrelerden biriside beton içerisine çeşitli yollarla sızan klor iyonlarıdır. Klor iyonları beton içerisine katkı maddeleri, buz eritici kimyasallar, denizden çıkarılan agregalar, deniz suyu gibi kaynaklardan betona tesir ederek korozyon esnasında donatı yüzeyinde oluşan pasif koruyucu tabakayı çözerek boşluklu bir yapıya dönüşmektedir [121-123].

Betonun klor geçirirliiğinin yüksek olması beton içerisine klor iyonlarının daha kolay girebilmesini ve böylece beton içerisindeki donatıya daha kolay ulaşabilmesini sağlar. Betonun dayanıklılığını koruyabilmesi ve betonarme donatının korozyona uğramasını önlemek için, klor geçirirliiği düşük betonlar üretilmektedir. Bunun için beton üretiminde bağlayıcı madde olarak bir miktar puzolanın (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) konulması olumlu sonuçlar verebilmektedir [123-126]. C<sub>3</sub>A çimento içerisinde artırılırsa betonda klor etkisiyle oluşabilecek korozyon başlangıcını engellemektedir [124]. Beton içerisinde kullanılan puzolanik malzemeler sayesinde C<sub>3</sub>A artırılarak klor iyonlarının bağlanması kolaylaştırılmaktadır [125]. Uçucu kül ikameli betonlarda hidrasyon sonucu ortaya çıkan Ca(OH)<sub>2</sub>, küldeki SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşikleri ile puzolanik tepkimeye girerek fazladan (C-A-H ve C-S-H) oluşturur; alkali ve klor ortamlarına karşı dayanıklılığı artırır [127]. Yapılan bir çalışmada yüksek oranda F tipi uçucu kül kullanılarak klor geçirirliiğinin büyük oranda azaltılmıştır

[128]. F tipi uçucu kül ile yapılan başka bir çalışmada farklı su/bağlayıcı oranına sahip betonlar 8 yıl süre ile deneye tabii tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre s/bağlayıcı oranı yüksek olan betonlar korozyona uğramıştır. Uçucu kül kullanımının ise klorür geçirimsizliğini azalttığını göstermişlerdir [129].

### 5.2.2. Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmeyen TS EN 196-1'e göre hazırlanan %5, %10, %15, %20 ve %30 uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği ASTM C 1202'e göre incelenmiştir [94, 97]. Optimize edilen ve optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

#### Malzemeler

Çalışma kapsamında uçucu kül ikameli çimento harcı üretiminde 3. Bölümde özellikleri detaylı bir şekilde açıklanan CEM I 42.5 R Portland çimentosu, C sınıfı uçucu kül, standart kum ve içilebilir su kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında tane boyut dağılımı optimize edilen uçucu kül ve tane boyut dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül içeren TS EN 196-1'e göre hazırlanan çimento harçları ASTM C1202 (2012)'ye uygun olarak üretilmiştir [94, 97]. Çimento harçları, çimento ağırlığınca %5, %10, %15, %20 ve %30 oranında tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen uçucu kül ile değiştirilerek üretilmiştir.

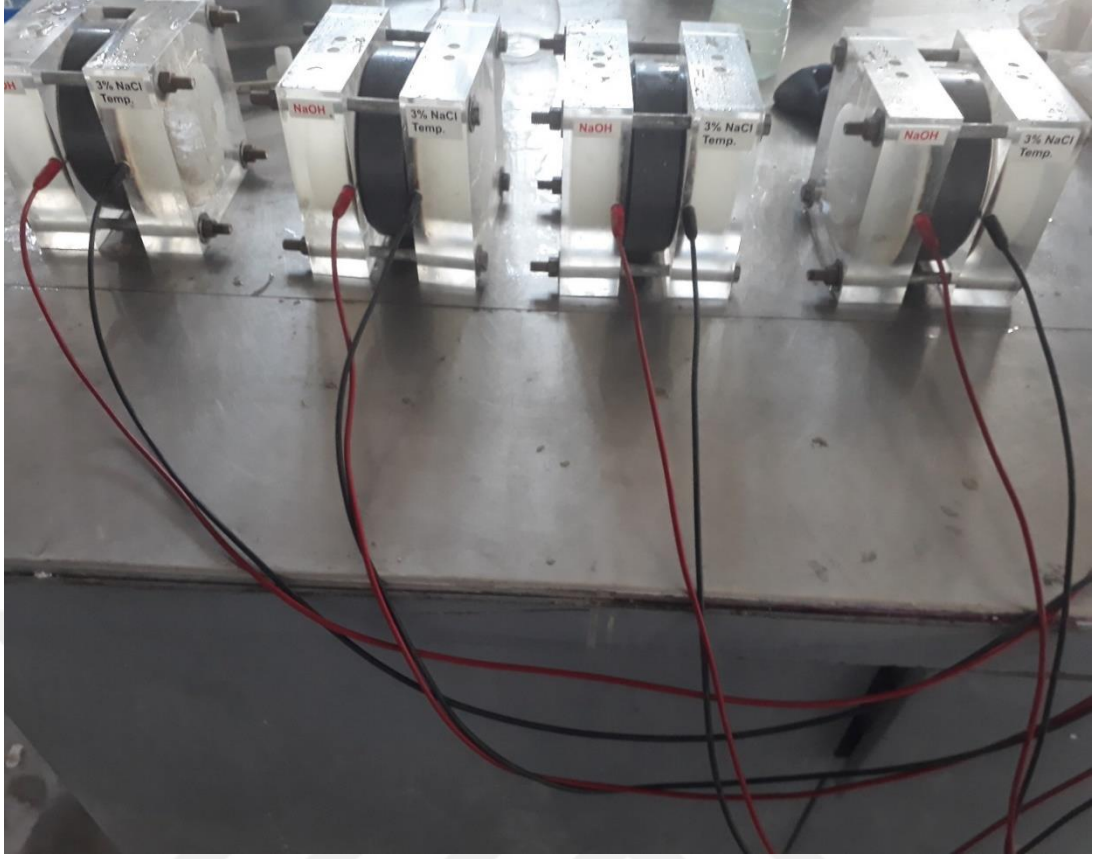
#### UK İkameli Çimento Harçlarının Hazırlanması ve Deneyler

Tüm çimento harçları 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılmış ve 7, 28 ve 90 güne kadar  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta sürekli olarak suda kür edilmiştir.  $\varnothing 100 \times 200$  mm silindir çimento harçlarının orta kısımlarından olgunlaştırma sonrası  $\varnothing 100 \times 50$  mm silindirik kesilerek çimento harcı deney örnekleri üretilmiştir (Şekil 5.28).



**Şekil 5.28.** Ø100×200 mm silindir çimento harçları orta kısımlarından olgunlaştırma sonrası 50 mm uzunluğunda kesilen hızlı klorür iyonu geçirimsizliği çimento harcı deney örnekleri

Ardından, Şekil 5.29’da gösterildiği gibi üretilen silindirik UK ikameli çimento harcı örnekleri, çimento harcının bir yüzünün 0.30 N NaOH çözeltisi diğer yüzünde ise %3 NaCl çözeltisiyle temas ettirilerek deney hücresine aktarılır.



**Şekil 5.29.** Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği çimento harç örneklerinin 0.30 N NaOH çözeltisi ve %3 NaCl çözeltisi ile deney hücrelerinin hazırlanması

UK ikameli çimento harcı yüzeylerine doğrudan  $60.0 \pm 0.1$  V gerilim uygulanır. Numune kanallarının bağlı olduğu bir veri kaydedici, 6 saatlik bir sürede çimento harcından geçen akımın kaydını tutar (Şekil 5.30).



**Şekil 5.30.** Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği numune kanalları ve bağlı olduğu veri kaydedici

6 saat sonra her bir çimento harcından geçen akım Coulomb cinsinden verilir. ASTM C1202 (2012), hızlı klorür iyonu geçirimsizliğini, hesaplanan Coulomb'lara dayanılarak, 'Yüksek'ten' 'İhmal edilebilir' olmak üzere beş sınıf içine sınıflandırır bu sınıflar Çizelge 5.10'da verilmiştir.

**Çizelge 5.10.** Coulomb değerlerine göre hızlı klorür iyonu geçirimsliliği sınıfları

| <b>Geçen Akım (Coulomb)</b> | <b>Klorür Geçirimsliliği</b> |
|-----------------------------|------------------------------|
| >4.000                      | Yüksek                       |
| 2.000-4.000                 | Orta                         |
| 1.000-2.000                 | Düşük                        |
| 100-1.000                   | Çok Düşük                    |
| <100                        | İhmal Edilebilir             |

Çalışmada üretilen çimento harçları olgunlaştırılması istenen yaşa kadar içilebilir su içinde bekletilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere her bir karışım için Şekil 5.28’de verilen 4 er adet Ø100×50 mm silindirik çimento harçlarından oluşturulmuştur. Bu silindirik çimento harçları hızlı klorür iyonu geçirimsliliği deneyine tabii tutulmuştur. Sonuçlar 4 adet silindirik çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimsliliği deney sonucu ortalamaları alınarak elde edilmiştir.

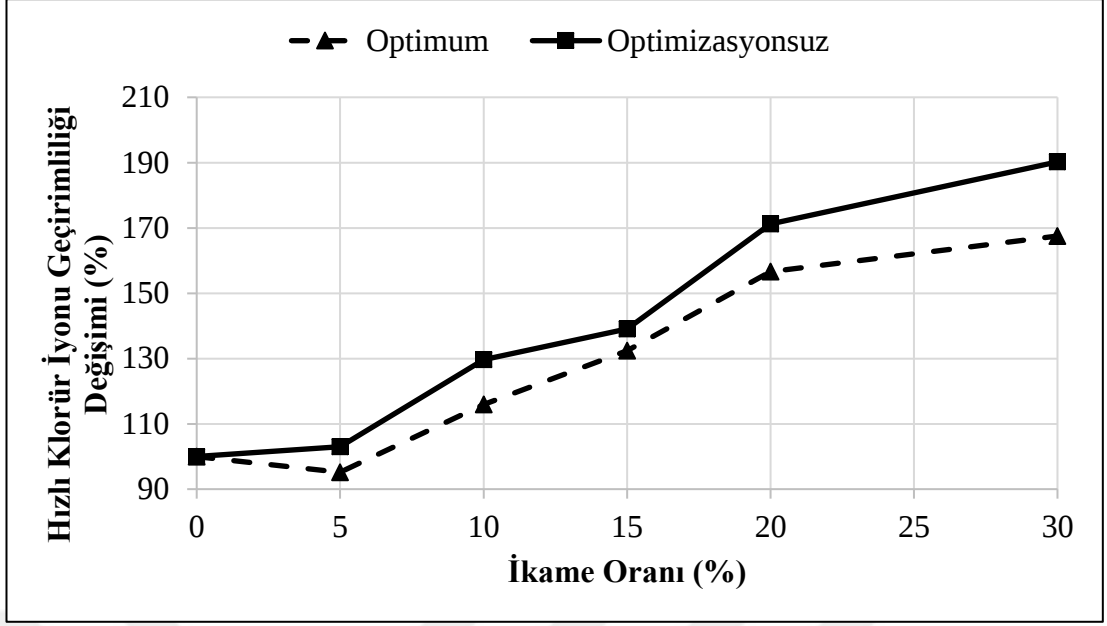
### **5.2.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma**

Elde edilen 7, 28 ve 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsliliği değerleri Çizelge 5.11’de verilmiştir.

**Çizelge 5.11.** 7, 28 ve 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği değerleri

| Numune Kodu | 7 gün (C) | 28 gün (C) | 90 gün (C) |
|-------------|-----------|------------|------------|
| UK0         | 4428      | 3125       | 2452       |
| UK5         | 4560      | 3236       | 2720       |
| 0.4UK5      | 4214      | 2987       | 2056       |
| UK10        | 5741      | 3579       | 2515       |
| 0.4UK10     | 5135      | 3109       | 1808       |
| UK15        | 6157      | 3784       | 2216       |
| 0.4UK15     | 5863      | 3314       | 1726       |
| UK20        | 7582      | 4158       | 1804       |
| 0.4UK20     | 6933      | 3446       | 1651       |
| UK30        | 8423      | 4824       | 1376       |
| 0.4UK30     | 7418      | 3628       | 1232       |

7 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimsizlik yüzde değişim sonuçları Şekil 5.31’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimsizlik değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.

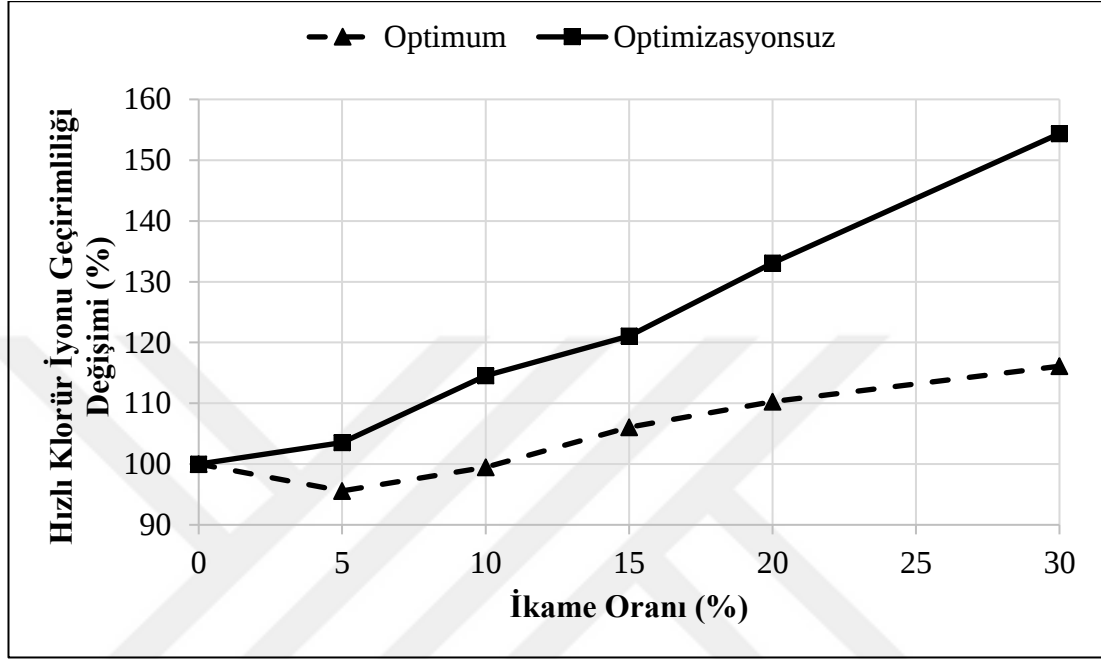


**Şekil 5.31.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği yüzde değişimleri

Çizelge 5.11 ve Şekil 5.31’de görüldüğü gibi uçucu kül ikame oranının artması ile hızlı klorür iyonu geçirimsizliği artmıştır. 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizlik değerlerinin hepsi 4000 Coulomb’un üzerinde olduğu için yüksek klorür geçirimsizliğine sahiptir. Tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında hızlı klorür iyonu geçirimsizliği %90.2 oranında artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında hızlı klorür iyonu geçirimsizliği %68.0 oranında artmıştır. Bu sonuç 7 günde ikame oranı arttıkça boşlukların arttığını göstermektedir. Optimize edilen UK ile optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli harçların hızlı klorür iyonu geçirimsizliği %5 ikame oranında %8.2, %10 ikame oranında %11.8, %15 ikame oranında %5.0, %20 ikame oranında %9.4 ve %30 ikame oranında %13.5 daha düşük çıkmıştır. Bu da 7 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının az olduğunu ve kompazitesinin yüksek olduğunu göstermektedir.

28 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül ikameli çimento harcı

hızlı klorür iyonu geçirimsizliği yüzde değişim sonuçları Şekil 5.32’de verilmiştir. İkamesiz çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimsizlik değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.

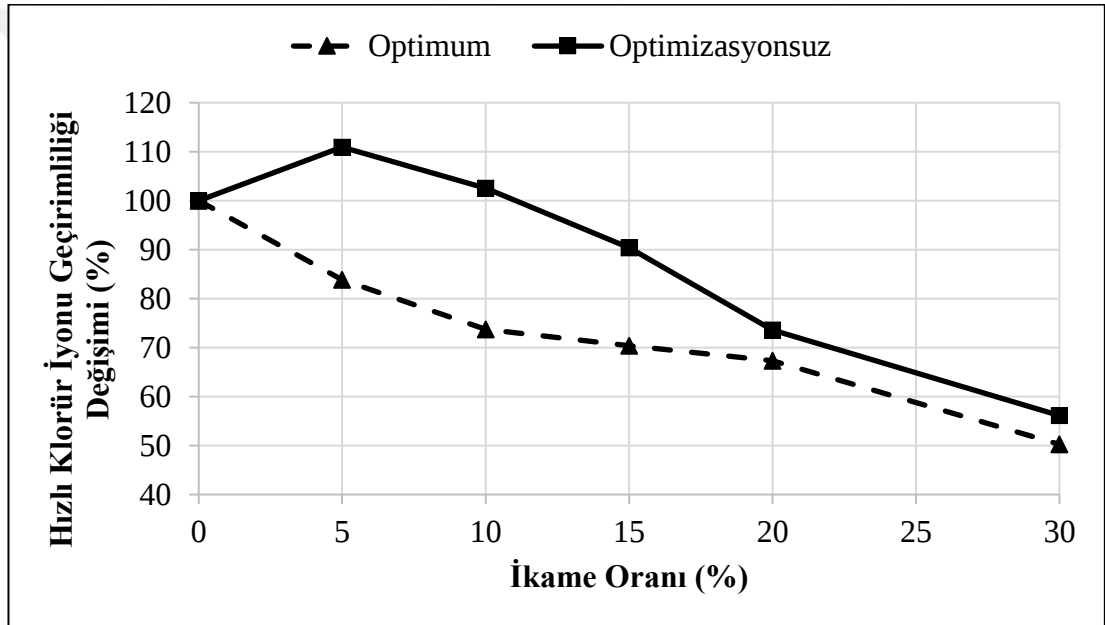


Şekil 5.32. Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği yüzde değişimleri

Çizelge 5.11 ve Şekil 5.32’de uçucu kül ikame oranının artmasıyla hızlı klorür iyonu geçirimsizliğinin arttığı görülmüştür. Tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında hızlı klorür iyonu geçirimsizliği %54.4 oranında artmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında hızlı klorür iyonu geçirimsizliği %16.1 oranında artmıştır. Optimize UK ile optimize olmayan UK ikameli çimento harçları kendi içlerinde aynı ikame oranlarında kıyaslandığında, optimum UK ikameli çimento harcının hızlı klorür iyonu geçirimsizliği %5 ikame oranında %8.3, %10 ikame oranında %15.1, %15 ikame oranında %14.2, %20 ikame oranında %20.7 ve %30 ikame oranında %33.0 daha düşük çıkmıştır. Bu durum 28 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının daha az olduğunu ve dolayısıyla kompaktliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli

çimento harcı klorür geçirimliliği değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında, optimum sonuçların tüm ikame oranlarında en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

90 gün su içerisinde olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ikameli çimento harcı ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimliliği yüzde değişim sonuçları Şekil 5.33’de verilmiştir. İkamersiz çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimlilik değeri %100 alınarak yüzde değişimleri hesaplanmıştır.



**Şekil 5.33.** Uçucu kül ikameli çimento harçlarının 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimliliği yüzde değişimleri

Çizelge 5.11 ve Şekil 5.33’e bakıldığında uçucu kül ikame oranı artması ile hızlı klorür iyonu geçirimliliği azalmıştır. Tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında hızlı klorür iyonu geçirimliliği %43.9 oranında azalmıştır. Optimum UK ikameli çimento harçlarında ikame oranı %30’a artırıldığında hızlı klorür geçirimliliği %49.8 oranında artmıştır. Bu sonuç 90 günde ikame oranı arttıkça puzolanik etkinin arttığını ve bu sayede dayanıklılığın arttığını

göstermektedir. Optimize olan UK ile optimize olmayan UK ikameli çimento harçlarını kendi içlerinde aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında, optimum UK ikameli çimento harçları %5 ikame oranında %32.3, %10 ikame oranında %39.1, %15 ikame oranında %28.4, %20 ikame oranında %9.3 ve %30 ikame oranında %11.7 hızlı klorür iyonu geçirimsiliği daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar 90 günlük optimum UK ikameli çimento harçlarının boşluklarının daha az olduğunu ve kompazitesinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum 90 günde ikame oranının artmasıyla beraber pozolanik etki arttığını ve dayanıklılığın iyileştiğini göstermektedir. Bu sonuçlar literatürde Yeau vd, Leng vd, Roy vd, Gifford vd, tarafından yapılan çalışmalarla uyum göstermektedir [124-126,129].

7 günlük ve 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği karşılaştırıldığında, 28 günlük sonuçların hızlı klorür iyonu geçirimsiliğini iyileştirdiği görülmektedir. Bu sonuç dayanımın artmasıyla birlikte 28 günde dayanıklılığın arttığını göstermektedir. 7 günlük sonuçların hepsi 4000 Coulomb değerinin üzerinde yüksek klorür geçirimsiliği verirken, 28 günlük sonuçlarda sadece tane dağılımı optimize edilmeyen %20 ve %30 UK ikameli harçların hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 4000 Coulomb değerinin üzerinde çıkmıştır. Diğer tüm sonuçlar ise orta klorür geçirimsiliğinde çıkmıştır. 28 günlük ile 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği karşılaştırıldığında, her ikame oranında 90 günlük sonuçların hızlı klorür iyonu geçirimsiliğini azalttığı görülmektedir. 7 ve 28 günün aksine ikame oranı arttıkça 90 günde hızlı klor iyonu geçirimsiliği azalmıştır. En iyi hızlı klorür iyonu geçirimsiliğini 90 günlük sonuçlar vermiştir. %5 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 4214 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 2987 ve 2056 Coulomb değerine inmiştir. %10 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 5135 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3109 ve 1808 Coulomb değerine inmiştir. %15 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 5863 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3314 ve 1726 Coulomb değerine inmiştir. %20 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 6933 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3446 ve 1651 Coulomb değerine inmiştir. %30 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 7418 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3628 ve 1232 Coulomb değerine inmiştir. %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği

sırası ile %29, %39, %43, %50, %51 oranında azalmıştır. %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği sırası ile %40, %65, %71, %76, %83 oranında azalmıştır. 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği sonuçları daha fazla azalmıştır. %5 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği 4560 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3236 ve 2720 Coulomb değerine inmiştir. %10 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği 5741 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3579 ve 2515 Coulomb değerine inmiştir. %15 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği 6157 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3784 ve 2216 Coulomb değerine inmiştir. %20 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği 7582 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 4158 ve 1804 Coulomb değerine inmiştir. %30 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği 8423 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 4824 ve 1376 Coulomb değerine inmiştir. %5, %10, %15, %20 ve %30 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği sırası ile %29, %38, %39, %45, %43 oranında azalmıştır. %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği sırası ile %40, %56, %64, %76, %83 oranında azalmıştır. 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği sonuçları daha fazla azalmıştır. Bunun nedeni ileriki yaşlarda puzolanik tepkilerin boşlukları azaltmasından kaynaklanmaktadır.

Genel olarak hızlı klorür iyonu geçirimsizliği sonuçlarına bakacak olursak;

- 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği değerlerinin hepsi 4000 Coulomb'un üzerinde olduğu için yüksek klorür geçirimsizliğine sahiptir.
- 7 ve 28 günlerde ikame oranı arttıkça hızlı klorür iyonu geçirimsizliği artmıştır.
- 7 günlük ile 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsizliği karşılaştırıldığında, 28 günlük sonuçların hızlı klorür iyonu geçirimsizliğini iyileştirdiği görülmektedir.
- 7 günlük sonuçların hepsi 4000 Coulomb değerinin üzerinde yüksek klorür iyonu geçirimsizliği verirken, 28 günlük sonuçlarda sadece %20 ve %30 tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarında hızlı klorür iyonu geçirimsizliği 4000 Coulomb değerinin üzerinde çıkmıştır. 90 günlük Coulomb değerleri incelendiğinde ise sonuçların hepsi ise orta ve düşük klorür geçirimsizliği vermiştir.

- 28 günlük tane dağılımı optimize edilmemiş ve optimize edilmiş UK ikameli çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimsiliği değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında optimum sonuçların tüm ikame oranlarında en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Bu sonuç yüksek kompasitenin ileriki yaşlarda daha iyi sonuçlar vereceğinin göstergesidir.
- 7 ve 28 günün aksine ikame oranı arttıkça 90 günde hızlı klorür iyonu geçirimsiliği azalmasının nedeni puzolanik etkinin artmasıdır.
- 28 günlük ile 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği karşılaştırıldığında, her ikame oranında 90 günlük sonuçların klor geçirimsiliğini azalttığı görülmüştür.
- En iyi hızlı klorür iyonu geçirimsiliğini 90 günlük sonuçlar vermiştir.
- %5 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 4214 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 2987 ve 2056 Coulomb değerine inmiştir.
- %10 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 5135 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3109 ve 1808 Coulomb değerine inmiştir.
- %15 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 5863 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3314 ve 1726 Coulomb değerine inmiştir.
- %20 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 6933 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3446 ve 1651 Coulomb değerine inmiştir.
- %30 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 7418 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3628 ve 1232 Coulomb değerine inmiştir.
- %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği sırası ile %29, %39, %43, %50, %51 oranında azalmıştır.
- %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği sırası ile %40, %65, %71, %76, %83 oranında azalmıştır.

- %5 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 4560 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3236 ve 2720 Coulomb değerine inmiştir.
- %10 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 5741 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3579 ve 2515 Coulomb değerine inmiştir.
- %15 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 6157 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3784 ve 2216 Coulomb değerine inmiştir.
- %20 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 7582 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 4158 ve 1804 Coulomb değerine inmiştir.
- %30 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 8423 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 4824 ve 1376 Coulomb değerine inmiştir.
- %5, %10, %15, %20 ve %30 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği sırası ile %29, %38, %39, %45, %43 oranında azalmıştır.
- %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği sırası ile %40, %56, %64, %76, %83 oranında azalmıştır.
- 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği sonuçları daha fazla azalmıştır. Bunun nedeni ileriki yaşlarda puzolanik tepkilerin boşlukları azaltmasından kaynaklanmaktadır.
- Tane dağılımı optimize edilerek çimento yerine UK ikamesi ile elde edilen çimento harçları hızlı klorür iyonu geçirimsiliği değerleri incelendiğinde, değerlerin tane dağılımı optimize edilmeyen sonuçlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuçlar boşluk oranının azaldığını ve yüksek kompasitenin sağlandığını göstermektedir.

## 6. SONUÇLAR

Doktora tez konusu kapsamında gerçekleştirilmiş ve detayları önceki bölümlerde verilen çalışma sonuçları her bölüm için aşağıda özetlenmiştir.

### 6.1. Uçucu Kül Tane Dağılımlarının Elde Edilmesi

Deney kapsamında yapılan bu bölümde 0-25, 25-50, 50-63, 63-75 ve 75-90  $\mu\text{m}$  olarak 5 farklı gruba ayrılan uçucu külün Denklem 3.1’de verilen formülde  $q$  dağılım modülü  $q=0$  ile  $q=1$  arasında 0.1 hassasiyetle artırılarak optimum tane dağılımı,  $q$  dağılım modülünün farklı değerleri için incelenerek belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Dağılım modülünün küçük değerlerinde uçucu kül inceliğinin çok fazla, dağılım modülünün büyük değerlerinde ise iriliğinin fazla olduğu görülmektedir.
- En uygun tane dağılımı ise ne çok ince ne de çok iri olmalı, ideal bir şekilde boşlukları dolduracak incelikte ve bu sayede yüksek kompaziteye sahip olmalıdır.

### 6.2. Optimum Uçucu Kül Tane Dağılımlarının Elde Edilmesi

Bu bölümde vakumlu elek ile elde edilen uçucu kül tane boyut dağılımlarının çimento harcının dayanımına etkisini incelenmiştir. Oluşturulan uçucu kül tane boyut dağılımlarının 7, 28 ve 90 günlük çimento harcı basınç ve eğilme dayanımına etkisi incelenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Farklı dağılım modülleri için en iyi eğilme ve basınç dayanımlarını 0.4 dağılım modülünün verdiği görülmüştür.
- Dağılım modülü 0.1’den 0.4’e 0.1 hassasiyetle artırılırken mekanik dayanımlar yükselmiş, 0.4’den 1.0’a kadar olan dağılım modüllerinde mekanik dayanımlar düşmüştür.

- Dağılım modülü 0.3, 0.4 ve 0.5 değerleri en iyi basınç dayanım değerlerini vermiştir
- $q=0.3$ ,  $q=0.4$  ve  $q=0.5$  dağılım modüllerinde çimento harçlarında filler etkisini çok iyi görülmüştür.
- $q=0.4$  dağılım modülü ise kompasitenin en fazla artmasını sağlayarak basınç ve eğilme dayanımlarında kayda değer artışlar sağlamıştır.
- $q=0.4$  dağılım modülü ise kompasitenin en fazla artmasını sağlayarak basınç ve eğilme dayanımlarında kayda değer artışlar sağlamıştır.
- 7, 28 ve 90 günlük %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum UK ikameli çimento harçlarının basınç ve eğilme dayanımları aynı yaştaki optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç ve eğilme dayanımlarından yüksek çıkmıştır.
- %30 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç dayanımları sadece optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı basınç dayanımından yüksek çıkmıştır.
- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı basınç ve eğilme dayanımları, optimizasyonu yapılmamış %15 UK ikameli çimento harcı basınç ve eğilme dayanımlarından tüm günlerde daha yüksek çıkmıştır.
- %20 optimizasyonu yapılmış UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımları, %10 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımlarından 7 günlük basınç dayanımı hariç tüm günlerde daha yüksek çıkmıştır.
- Optimizasyonu yapılan %20 UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımları, %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımlarından 7 ve 28 günde daha az, 90 günde ise daha yüksek çıkmıştır.
- Optimizasyonu yapılan %20 UK ikameli çimento harcı mekanik dayanımları, UK ikamesiz çimento harcı mekanik dayanımlarından 7 ve 28 günde daha az, 90 günde ise az daha yüksek çıkmıştır.
- %15 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri %10 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik değerlerinden tüm günlerde yüksek çıkmıştır.
- 7 ve 28 günlük basınç dayanımı hariç tüm değerlerde %15 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik değerlerinden yüksek veya eşit çıkmıştır.

- 7 ve 28 günlük mekanik dayanımlar hariç 90 günlük değerlerde %15 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri UK ikamesiz çimento harcı mekanik değerlerinden yüksek çıkmıştır.
- %10 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri %5 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı mekanik değerlerinden tüm günlerde yüksek çıkmıştır.
- %10 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı hariç UK ikamesiz çimento harcı mekanik değerlerinden yüksek çıkmıştır.
- 7, 28 ve 90 günlük mekanik dayanımlar incelendiğinde %5 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik değerleri tüm günlerde UK ikamesiz çimento harcı mekanik özelliklerinden yüksek çıkmıştır.

Sonuç olarak optimizasyonu yapılan uçucu külün yüksek doluluk etkisi sağlayarak mekanik özellikleri iyi oranlarda iyileştirdiği görülmektedir. %20 optimum UK ikameli çimento harcı mekanik özellikleri yüksek doluluk etkisi ile 90 günde ikamesiz mekanik dayanımlarından daha iyi değerler vermesi çok iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir. Burada dikkat edilecek husus %10 optimizasyonsuz UK karşılık iki katı %20 optimizasyonu yapılmış UK kullanımı sağlamak mümkün olduğu görülmektedir. Uçucu kül tane dağılım optimizasyonun yapılması ile aynı hedef dağılım için gerekli çimento miktarı azalacak, uçucu kül kullanımı artacaktır.

### **6.3. Farklı Tane Dağılım Modülüne Göre Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Mikro-Yapısal Özellikleri**

Bu bölümde uçucu külün etkinliğini daha iyi görebilmek için %20 uçucu kül ikame oranına sahip farklı dağılım modülündeki çimento harçlarının mikro-yapı incelemeleri 90 günlük sertleşmiş çimento harcı üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Bağ dayanımını artıran C-S-H jelleri yoğun olduğu görüntülenen dağılım modülü 0.3, 0.4 ve 0.5 olduğu belirlenmiştir.

- Dağılım modülü 0.1 ile 0.4 arasında C-S-H jeli giderek artarken, dağılım modülü 0.4 ile 1.0 arasında C-S-H jellerinin yoğunluğu giderek azalmıştır.
- Sonuçlar  $q=0.4$  dağılım modülünde yüksek kompaktifitenin elde edildiğini ve filler etkisinin sağlandığının göstergesidir.
- $q=0.4$  dağılımına karşılık gelen çimento harçlarında en yüksek doluluk etkisi sağlanmıştır.
- Farklı dağılım modüllerine ait çimento harçlarının SEM görüntülerine bakıldığında hiç birisinde zararlı bir oluşum gözlenmemiştir. CH jellerine tüm görüntülemelerde rastlanmamıştır. Bunun nedeni ise görüntü alınan çimento harçlarının 90 günlük olmasından kaynaklanmaktadır.

#### **6.4. Optimize Edilmiş Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Su Emme, Hacimsel Yoğunluk ve Kılcal Geçirimsizlik Özellikleri**

Bu bölümde tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül içeren çimento harçlarının %5, %10, %15, %20 ve %30 ikamesi ile 7, 28 ve 90 günlük su emme özellikleri, yoğunluk özellikleri ASTM C 642'ye göre ve kılcal geçirimsizlik katsayısı TS EN 772-11'e göre incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Uçucu kül ikame oranları arttıkça su emme yüzdeleri artmıştır.
- Optimum UK ikameli çimento harçları ve tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları su emme yüzdeleri incelendiğinde optimum UK ikameli su emme yüzdelerinin daha düşük olduğu görülmüştür.
- 90 günlük, 28 günlük ve 7 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde en yüksek su emme oranlarını 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harçları, en düşük su emme oranını ise 90 günlük %5 optimum çimento harçları vermiştir.
- %5 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %6, 90 günde ise %9 oranında azalmıştır.

- %10 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %6.8, 90 günde ise %7.6 oranında azalmıştır.
- %15 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %4.6, 90 günde %6.4 oranında azalmıştır.
- %20 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %1.9, 90 günde %2.6 oranında azalmıştır.
- %30 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında ise 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %2.6, 90 günde ise %4.2 oranında azalmıştır.
- %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %5, 90 günde ise %6 oranında azalmıştır.
- %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %3.8, 90 günde ise %5.2 oranında azalmıştır.
- %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %1.6, 90 günde ise %2.3 oranında azalmıştır.
- %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %1.9, 90 günde ise %2.6 oranında azalmıştır.
- %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre su emme yüzdeleri 28 günde %2.0, 90 günde ise %3.2 oranında azalmıştır.
- Su emme oranı arttıkça boşluk oranı ve geçirimsizlik artmakta ve mekanik özellikler azalmaktadır.
- Uçucu kül tane dağılımı optimize edilerek yapılan en yüksek kompasiteyi sağlama işlemi su emme yüzdelerini azaltarak geçirimsizliği, boşlukları azaltmış ve dolayısı ile dayanımı artırmıştır.

- Kaynama ve kür sonrası su emme deney sonuçları incelendiğine ikame oranları arttıkça kaynama ve kür sonrası su emme yüzdeleri artmıştır.
- Optimum UK ikameli çimento harçları ve tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları kaynama ve kür sonrası su emme özellikleri incelendiğinde optimum UK ikameli su emme yüzdelerinin daha düşük olduğu görülmüştür.
- 90 günlük, 28 günlük ve 7 günlük su emme yüzdeleri kendi içlerinde karşılaştırıldığında ise 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında kaynama kür sonrası su emme oranının en düşük, 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harçlarında kaynama kür sonrası su emme oranının en yüksek olduğu görülmüştür.
- %5 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %7.6, 90 günde ise %10.8 oranında azalmıştır.
- %10 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %8.9, 90 günde ise %10.6 oranında azalmıştır.
- %15 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %7.5, 90 günde ise %9.1 oranında azalmıştır.
- %20 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %3.7, 90 günde ise %5.9 oranında azalmıştır.
- %30 optimum UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %1.0, 90 günde ise %1.3 oranında azalmıştır.
- %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %6.2, 90 günde ise %9 oranında azalmıştır.
- %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %6.5, 90 günde ise %9.4 oranında azalmıştır.

- %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %4.4, 90 günde ise %6.5 oranında azalmıştır.
- %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %1.6, 90 günde ise %2.8 oranında azalmıştır.
- %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları karşılaştırıldığında 7 günlük sonuçlara göre kaynama kür sonrası su emme yüzdeleri 28 günde %0.7, 90 günde ise %1.7 oranında azalmıştır.
- Uçucu kül tane dağılımı optimize edilerek yapılan en yüksek kompasiteyi sağlama işlemi kaynama kür sonrası su emme yüzdelerini azaltarak geçirimsizliği, boşlukları azaltmış ve dolayısı ile dayanımı artırmıştır.
- Optimum uçucu kül ikameli çimento harçları ve tane dağılımı optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları hacimsel kuru yoğunluk değerleri kendi aralarında incelendiğinde optimum UK ikameli çimento harçlarının hacimsel kuru yoğunluk değerlerinin daha yüksek veya eşit olduğu görülmüştür.
- 7, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar kendi aralarında karşılaştırıldığında ise en yüksek hacimsel kuru yoğunluk değerini 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı verirken, en düşük hacimsel kuru yoğunluk değerini 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harçları vermiştir.
- %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $2.01 \text{ g/cm}^3$  ve  $2.02 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunlukları  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunlukları  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.

- %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $2.00$  ve  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında ise 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.98 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $1.99$  ve  $2.00 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.99 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $2.00 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.01 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.98 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $1.99 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.00 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük hacimsel kuru yoğunluk  $1.97 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük hacimsel kuru yoğunluklar sırasıyla  $1.98 \text{ g/cm}^3$ ,  $1.99 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- Yapılan tane dağılımı optimizasyonu ile hacimsel kuru yoğunluk değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu sonuç yüksek kompasitenin sağlandığının göstergesidir.
- Optimum UK ikameli çimento harçları ve tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları kür sonrası hacimsel yoğunluk özellikleri birbirleri ile aynı ikame oranında karşılaştırıldığında optimum UK ikameli kür sonrası hacimsel yoğunluk değerlerinin optimizasyonsuz UK ikameli harçlara göre daha yüksek veya eşit olduğu görülmüştür. Bu da mekanik özelliklerin optimizasyonu yapılan UK ikameli çimento harçlarında daha fazla olduğunun kanıtıdır.
- 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri birbirleri ile karşılaştırıldığında en yüksek değeri 90 günlük %5 optimum UK ikameli

çimento harcı vermişken, en düşük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerlerini 7 günlük %30 optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı vermiştir.

- %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.21 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.20 \text{ g/cm}^3$  iken 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.21 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk  $2.20 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunlukları  $2.21 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk  $2.19 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunlukları  $2.21 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk  $2.19 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunlukları  $2.20 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.20 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.20 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.20 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.19 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.18 \text{ g/cm}^3$ , 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri  $2.19 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- Sonuçlar daha ileriki günlerde hidrasyonun devam etmesinden dolayı daha iyi sonuçlar vermiştir.
- İkame oranı arttıkça kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri azalmıştır. Dolayısı ile ikame oranı arttıkça boşluklar arttığı ve dayanımın azaldığı

söylenbilir. Uçucu kül tane dağılımının yapılması ile birlikte yoğunluk değerleri artmış dolayısı ile kompasite yükselmiştir.

- Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında optimum UK ikameli harçlarda kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerlerinin optimize edilmeyen UK ikameli harçlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.
- 7, 28 ve 90 günlük sonuçlar karşılaştırıldığında ise 90 ve 28 günlük sonuçlar 7 günlük sonuçlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir.
- %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri 2.20 iken 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.21 elde edilmiştir.
- %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri 2.19 iken 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.20 elde edilmiştir.
- %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk 2.19 g/cm<sup>3</sup> iken, 28 ve 90 günlük yoğunlukları 2.20 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir.
- %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluğu 2.19 g/cm<sup>3</sup>, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunlukları eşit 2.20 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir.
- %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunlukları eşit 2.18 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir.
- %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri 2.19 g/cm<sup>3</sup> iken 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.20 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir.
- %10 ve %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.19 g/cm<sup>3</sup> g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir.
- %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değeri 2.19 g/cm<sup>3</sup> iken 28 ve 90 günlük kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri 2.20 g/cm<sup>3</sup> elde edilmiştir.

- %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri  $2.18 \text{ g/cm}^3$   $\text{g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- 7, 28 ve 90 günlük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değeri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en düşük kaynama ve kür sonrası hacimsel yoğunluk değerlerini 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı vermiştir.
- Tane dağılımı optimize edilen UK ikameli çimento harçlarının yoğunluklarının yüksek çıkması kompasitenin artmasının göstergesi olarak açıklanabilir.
- Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları görünür yoğunluk özellikleri incelendiğinde, optimum UK ikameli çimento harcı görünür yoğunluk değerlerinin daha yüksek veya eşit olduğu görülmüştür.
- 90 gün, 28 gün ve 7 günlük görünür yoğunluk değerleri birbirleri ile kıyaslandığında olgunlaştırma yaşı arttıkça hidrasyon artmış ve dolayısı ile görünür yoğunluk değerleri yükselmiştir.
- %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunluklar sırasıyla  $2.47$  ve  $2.48 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunluklar  $2.47 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunluklar  $2.47 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında ise 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunluklar  $2.47 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında ise 7, 28 ve 90 günlük yoğunluklar  $2.46 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %5, %10, %15 ve %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük yoğunluk  $2.46 \text{ g/cm}^3$  iken, 28 ve 90 günlük yoğunlukları  $2.47 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.
- %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7, 28 ve 90 günlük yoğunlukları  $2.46 \text{ g/cm}^3$  elde edilmiştir.

- 7, 28 ve 90 günlük görünür yoğunluk değerleri arasında en yüksek değeri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en düşük görünür yoğunluk değerlerini ise 7 günlük %30 optimizasyonsuz UK ikameli çimento harcı vermiştir.
- Geçirgen gözenek hacmi deney sonuçları incelendiğinde ikame oranları arttıkça geçirgen gözenek hacmi değerleri artmıştır.
- Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları geçirgen gözenek hacim değerleri incelendiğinde optimum UK ikameli harçların geçirgen gözenek değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Geçirgen gözenek hacmi değerleri arttıkça boşluk oranı artmakta ve mekanik dayanımlar azalmaktadır.
- 7, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacim değerleri karşılaştırıldığında, en düşük değeri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en yüksek değeri 7 günlük %30 optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı vermiştir.
- %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırasıyla %18.62 ve %18.55 elde edilmiştir.
- %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri %18.62 elde edilmiştir.
- %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri %18.62 elde edilmiştir.
- %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırasıyla %19.03 ve %18.62 elde edilmiştir.
- %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.51 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırasıyla %19.11 ve %18.70 elde edilmiştir.
- %5 ve %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri %18.62 elde edilmiştir.

- %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.11 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırası ile %19.03, %18.62 elde edilmiştir.
- %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.51 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırası ile %19.43, %19.03 elde edilmiştir.
- %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 7 günlük geçirgen gözenek hacmi %19.92 iken, 28 ve 90 günlük geçirgen gözenek hacimleri sırası ile %19.51, %19.11 elde edilmiştir.
- Uçucu kül tane dağılımının optimizasyonu ile geçirgen gözenek hacim değerleri azaltılarak kompasitenin ve dolayısı ile dayanımın artması sağlanmıştır.
- 1 saatlik kılcal su emme katsayılarına bakıldığında uçucu kül ikame oranları arttıkça kılcal su emme katsayıları artmıştır.
- Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçları 1 saatlik kılcal su emme katsayıları incelendiğinde, optimum UK ikameli kılcal su emme katsayılarının daha düşük olduğu görülmüştür.
- 7, 28 ve 90 günlük 1 saatlik kılcal su emme katsayıları incelendiğinde en düşük değerleri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en yüksek değeri ise 7 günlük %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları vermiştir.
- %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde  $0.37 \text{ m}^2\text{s}$  iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla  $0.26 \text{ m}^2\text{s}$  ve  $0.37 \text{ m}^2\text{s}$  elde edilmiştir.
- %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde  $0.39 \text{ m}^2\text{s}$  iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla  $0.28 \text{ m}^2\text{s}$  ve  $0.22 \text{ m}^2\text{s}$  elde edilmiştir.
- %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde  $0.39 \text{ m}^2\text{s}$  iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla  $0.33 \text{ m}^2\text{s}$  ve  $0.24 \text{ m}^2\text{s}$  elde edilmiştir.
- %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde  $0.41 \text{ m}^2\text{s}$  iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla  $0.36 \text{ m}^2\text{s}$  ve  $0.26 \text{ m}^2\text{s}$  elde edilmiştir.

- %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.45 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.38 m<sup>2</sup>s ve 0.25 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.40 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.30 m<sup>2</sup>s ve 0.23 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.42 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.31 m<sup>2</sup>s ve 0.25 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.51 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.35 m<sup>2</sup>s ve 0.31 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.68 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.38 m<sup>2</sup>s ve 0.33 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 1 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.78 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.42 m<sup>2</sup>s ve 0.38 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- Kılcal su emme katsayısı arttıkça boşluk oranı ve geçirimsizlik artmakta, kompozite ve dayanıklılık azalmaktadır. Bunun nedeni hidrasyon ürünlerinin artışıyla bu ürünler boşlukları doldurarak küçültmekte ve buna bağlı olarak kılcal su emme katsayılarında azalış olmaktadır.
- 2 saatlik kılcal su emme katsayılarına bakıldığında 7, 28 ve 90 gün için ikame oranları arttıkça kılcal su emme katsayıları artmıştır.
- Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları 2 saatlik kılcal su emme katsayıları incelendiğinde, optimum UK ikameli kılcal su emme katsayılarının daha düşük değerler verdiği görülmüştür.
- %5 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.23 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.18 m<sup>2</sup>s ve 0.17 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.

- %10 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.24 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.20 m<sup>2</sup>s ve 0.18 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %15 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.25 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.22 m<sup>2</sup>s ve 0.18 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %20 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.28 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.26 m<sup>2</sup>s ve 0.19 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %30 optimum UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.31 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.27 m<sup>2</sup>s ve 0.21 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %5 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.26 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.19 m<sup>2</sup>s ve 0.18 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %10 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.28 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.22 m<sup>2</sup>s ve 0.21 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %15 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.36 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.26 m<sup>2</sup>s ve 0.25 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %20 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.47 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.29 m<sup>2</sup>s ve 0.27 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında 2 saatlik kılcal su emme katsayısı 7 günde 0.56 m<sup>2</sup>s iken, 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayısı sırasıyla 0.32 m<sup>2</sup>s ve 0.30 m<sup>2</sup>s elde edilmiştir.
- 7, 28 ve 90 günlük 2 saatlik kılcal su emme katsayıları incelendiğinde en düşük değerleri 90 günlük %5 optimum UK ikameli çimento harcı vermişken, en yüksek değeri ise 7 günlük %30 optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları vermiştir. Bu durum hidrasyon sürecinin devamıyla boşlukların azalmasından kaynaklanmaktadır.

- Yapılan en yüksek kompasiteyi elde etme işlemini 1 ve 2 saatlik kılcal su emme katsayı değerlerinin sağladığı görülmektedir 1 saatlik ve 2 saatlik kılcal su emme katsayı değerleri karşılaştırıldığında 2 saatlik kılcal su emme katsayı değerlerinin tüm günlerde ve tüm ikame oranlarında daha düşük çıktığı görülmüştür. Bu sonuçlar ilk zamanlarda kılcal su emmenin yüksek olduğunu göstermektedir.
- Optimum UK ikameli çimento harçları ve optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçları su emme özellikleri, hacimsel yoğunluk özellikleri ve kılcal su emme katsayı değerleri incelendiğinde optimum uçucu kül ikameli çimento harcı özellikleri optimize edilmemiş UK ikameli çimento harcı özelliklerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Olgunlaştırma süresi arttıkça hidrasyon ürünleri boşlukları doldurduğundan su emme özellikleri düşük, hacimsel yoğunluklar yüksek ve kılcal su emme katsayıları ise düşük çıkmıştır.
- Su emme özellikleri, hacimsel yoğunluk özellikleri ve kılcal su emme katsayı değerleri literatürle karşılaştırıldığında Mercan (2007), Girginkardeşler (2008) ve İşsever (2013) tarafından yapılan çalışmalarla uyum sağlamaktadır [115-117].
- Su emme özellikleri, hacimsel yoğunluk özellikleri ve kılcal su emme katsayı değerleri tane dağılımı optimize edilen UK ile iyileştirilerek yapılan en yüksek kompasiteyi elde etme yöntemin olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir.

#### **6.5. Optimum Uçucu Kül İçeren Çimento Harçlarının Hızlı Klorür İyonu Geçirimsiliği**

Bu bölümde tane dağılımı optimize edilen uçucu kül ve tane dağılımı optimize edilmeyen uçucu kül içeren çimento harçlarının %5, %10, %15, %20 ve %30 ikamesi ile 7, 28 ve 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği ASTM C 1202'e göre incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 7 günlük hızlı klorür geçirimsiliği değerlerinin hepsi 4000 Coulomb'un üzerinde olduğu için yüksek klorür geçirimsiliğine sahiptir.

- 7 ve 28 günlerde ikame oranı arttıkça hızlı klorür iyonu geçirimsiliği artmıştır.
- 7 günlük ile 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği karşılaştırıldığında, 28 günlük sonuçların klor geçirimsiliğini iyileştirdiği görülmektedir.
- 7 günlük sonuçların hepsi 4000 Coulomb değerinin üzerinde yüksek klorür geçirimsiliği verirken, 28 günlük sonuçlarda sadece %20 ve %30 tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harçlarında hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 4000 Coulomb değerinin üzerinde çıkmıştır. 90 günlük Coulomb değerleri incelendiğinde ise sonuçların hepsi ise orta ve düşük klorür geçirgenliği vermiştir.
- 28 günlük tane dağılımı optimize edilmemiş ve optimize edilmiş UK ikameli çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimsiliği değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında optimum sonuçların tüm ikame oranlarında en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Bu sonuç yüksek kompasitenin ileriki yaşlarda daha iyi sonuçlar vereceğinin göstergesidir.
- 7 ve 28 günün aksine ikame oranı arttıkça 90 günde hızlı klorür iyonu geçirimsiliğinin azalmasının nedeni puzolanik etkinin artmasıdır.
- 28 günlük ile 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği karşılaştırıldığında, her ikame oranında 90 günlük sonuçların klor geçirimsiliğini azalttığı görülmüştür.
- En iyi hızlı klorür iyonu geçirimsiliğini 90 günlük sonuçlar vermiştir.
- %5 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 4214 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 2987 ve 2056 Coulomb değerine inmiştir.
- %10 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 5135 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3109 ve 1808 Coulomb değerine inmiştir.
- %15 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 5863 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3314 ve 1726 Coulomb değerine inmiştir.
- %20 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirimsiliği 6933 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3446 ve 1651 Coulomb değerine inmiştir.

- %30 optimum ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği 7418 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3628 ve 1232 Coulomb değerine inmiştir.
- %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği sırası ile %29, %39, %43, %50, %51 oranında azalmıştır.
- %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği sırası ile %40, %65, %71, %76, %83 oranında azalmıştır.
- %5 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği 4560 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3236 ve 2720 Coulomb değerine inmiştir.
- %10 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği 5741 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3579 ve 2515 Coulomb değerine inmiştir.
- %15 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği 6157 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 3784 ve 2216 Coulomb değerine inmiştir.
- %20 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği 7582 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 4158 ve 1804 Coulomb değerine inmiştir.
- %30 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği 8423 Coulomb iken, 28 ve 90 günde sırası ile 4824 ve 1376 Coulomb değerine inmiştir.
- %5, %10, %15, %20 ve %30 optimize edilmemiş ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 28 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği sırası ile %29, %38, %39, %45, %43 oranında azalmıştır.
- %5, %10, %15, %20 ve %30 optimum ikame oranında 7 günlük sonuçlara göre 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği sırası ile %40, %56, %64, %76, %83 oranında azalmıştır.
- 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirirmliliği sonuçları daha fazla azalmıştır. Bunun nedeni ileriki yaşlarda puzolanik tepkilerin boşlukları azaltmasından kaynaklanmaktadır.

- Tane dağılımı optimize edilerek çimento yerine UK ikamesi ile elde edilen çimento harçları hızlı klorür iyonu geçirimsizliği değerleri incelendiğinde, değerlerin tane dağılımı optimize edilmeyen sonuçlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuçlar boşluk oranının azaldığını ve yüksek kompasitenin sağlandığını göstermektedir.

Sonuç olarak optimizasyonu yapılan uçucu külün, yüksek doluluk etkisini sağlayarak mekanik özellikleri ve dayanıklılık özelliklerini iyi oranlarda iyileştirdiği görülmektedir. Uçucu kül tane dağılım optimizasyonun yapılması ile aynı hedef dağılım için gerekli çimento miktarı azalacak, uçucu kül kullanımı artacaktır. Bu sayede elde edilen beton maliyeti düşecek, atık malzeme kullanımı artacak ve doğaya salınan karbondioksit ( $CO_2$ ) salınımı çimentonun daha az kullanılmasıyla azalacaktır. Yüksek doluluk etkisi yani kompasiteyi sağlayan en iyi tane dağılımını bulma işlemi fazla miktarda çimento tasarrufu sağlayarak, hem çimento üretiminde meydana gelen çevreyi kirleten karbondioksit ( $CO_2$ ) salınımını azaltacak hem de çimento tasarrufu sağlayarak ekonomiden tasarruf sağlayarak ülke ekonomisine katkılar sağlayacaktır.

Elde edilen sonuçlar C sınıfı uçucu küle göre yapıldığı için ilerdeki çalışmalarda optimum uçucu kül tane boyut analizi F sınıfı ve C sınıfı uçucu kül için ayrı ayrı yapılarak mekanik ve durabilite özellikleri karşılaştırılabilir. Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi farklı puzolanların inceliklerini esas alarak hibrid bir optimum tane boyut dağılımı elde edilerek mekanik ve durabilite özellikleri incelenebilir. Yapılan çalışmada tek bir tipte ve tek bir dozajda çimento kullanıldığından dolayı ilerdeki çalışmalarda optimum tane dağılımına farklı tip ve dozajlardaki çimentonun etkisi incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Erdoğan, T.Y., Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim, Ankara, 2003.
- [2] British Geological Survey, Mineral profile: Cement raw materials. Office of the Deputy Prime Minister, Natural Environment Research Council, 2005.
- [3] Duda, W. H., Process engineering in the cement industry. Cement Data Book., 32-205, 3. Ed. 1988.
- [4] ASTM, C 618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Annual book of ASTM Standards, New York, 141-148, 1994.
- [5] ASTM, C 125, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. ASTM Standards, New York, 64-65, 1994.
- [6] Massazza, F., Pozzolanic Cements. Cement and Concrete Composites, 15, 185-214, 1993.
- [7] Swamy, R.N., Cement Replacement Materials. Surrey University Press, London, 1986.
- [8] L. Turanlı, Effects of Natural Pozzolan Addition to the Properties of Portland Pozzolan Cements and the Concretes Made with Those Cements. Ph.D. Thesis, in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 1995.
- [9] Aruntaş, H.Y., Tokyay, M., Katkılı Çimento Üretiminde Diatomitin Pozolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği. Çimento ve Beton Dünyası. 1(4), 33-41, Ankara, 1996.

- [10] Haque, M., Langan, B., Ward, M., High Fly Ash Concretes. ACI Materials Journal, 81, 54-60, 1984.
- [11] Malhotra, V., Durability of Concrete Incorporating High-Volume of Low-Calcium (ASTM class F) Fly Ash. Cement and Concrete Composites, 12, 271-277, 1990.
- [12] Bouzoubaa, N., Zhang, M. H., Malhotra, V. M., Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with High-Volume Fly Ash Blended Cements Using a Coarse Fly Ash. Cement and Concrete Research, 31(10), 1393-402, 2001.
- [13] Dogan, U. A., Ozkul, M.H., Ekincioglu, O., Utilization of waste materials in concrete production for sustainable development. Environmental Engineering and Management Journal, 8(4), 695-699, 2009.
- [14] Yeğınobalı, A., Çimento ‘Yeni bir çağın malzemesi. TÇMB/AR-GE, Ankara. 2004.
- [15] K. Çelik, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Curufu ve Traslı Çimentolarla Üretilen Aynı Mukavemet Sınıfındaki Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, 2005.
- [16] Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A., Öztürk, A, U., Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, ISBN: 978-975-441-361-8, İzmir, 2012.
- [17] Postacıoğlu, B., Bağlayıcı Maddeler Cilt-1. İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, 1986.
- [18] Malhotra V.M., Mehta P.K., Pozzolanitic and cementitious materials. Advances in concrete technology, Ottawa: Gordon and Breach Publishers, 1996.

- [19] Mehta P.K., Monteiro P.J.M., Concrete – microstructure properties and materials. 3rd ed. McGraw-Hill, 2006.
- [20] Baroghel-bouny V., New approach to concrete durability. Methodology and examples. Eng. Tech. Ed, 2005.
- [21] Gesoglu, M., Ozbay, E., Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems. Materials and Structures, 2007.
- [22] Mehta, P.K., Pozzolanic and Cementitious by-Products as Mineral Admixtures for Concrete: A Critical Review, The use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete. American Concrete Institute special publication, Detroit, 1983.
- [23] Kumar, B., Garg, R., Singh, U., Utilization of fly ash as filler in hdpe/fly ash polymer composites: A review. IJAER, 1679–1682, 2012.
- [24] Pritchard, G., Novel and Traditional Fillers for Plastics. Shawbury, UK, 1999.
- [25] Guleria, S.P., Dutta, R.K., Tension and compression behavior of fly ash-lime-gypsum composite mixed with treated tyre chips. ISRN Civil Engineering, doi:10.5402/2011/310742, 2011.
- [26] Neville, A.M., Properties of Concrete. Longman Scientific and Technical, New York, 1981.
- [27] Tokyay, M., Erdoğan, K., Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. TÇMB, Ankara, 1998.
- [28] Aruntaş, H. Y., Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1), 2006.

- [29] TS EN 450, Uçucu kül, betonda kullanılan tarifler, özellikler ve kalite kontrolü. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1998.
- [30] TMMOB Makina Mühendisleri Odası Oda Raporu, Türkiye’de Termik Termik Santraller. Ankara, 2017.
- [31] Tokyay, M., Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi). End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., 29-36, 18-19 Kasım, Ankara, 1993.
- [32] McCarthy, M.J., Dhir, R.K., Towards Maximising the Use of Fly Ash as a Binder. Fuel, 78(2), 121-132, 1999.
- [33] Uyanık S., Topeli, M., The Opportunities and Challenges of Fly Ash in Turkey, Report, 1 September 2014.
- [34] Lea, F.M., The Chemistry of Cement and Concrete. Chemical Publishing Co., New York, 1956.
- [35] Gani, M.S.J., Cement and Concrete. Chapman and Hall, London, 1997.
- [36] Li, S., Cooke, R. A., Wang, L., Ma, F., Bhattarai, R., Characterization of fly ash ceramic pellet for phosphorus removal. Journal of Environmental Management, 189, 67-74, 2017.
- [37] Bernal, S. A., Juenger, M. C., Ke, X., Matthes, W., Lothenbach, B., De Belie, N., Provis, J. L., Characterization of supplementary cementitious materials by thermal analysis. Materials and Structures, 50(1), 26, 2017.
- [38] Mármol, G., Savastano, H., Monzó, J. M., Borrachero, M. V., Soriano, L., Payá, J., Portland cement, gypsum and fly ash binder systems characterization for lignocellulosic fiber-cement. Construction and Building Materials, 124, 208-218. 2016.

- [39] Ferreira, C., Ribeiro, A., Ottosen, L., Possible Applications for Municipal Solid Waste Fly Ash. *Journal of Hazardous Materials*, 96(2-3), 201-216, 2003.
- [40] Öztekin, E., Cimilli, T., History and Use of Blended Cements in Turkey. *Cement, Concrete and Aggregates*, 9(1), 44-48, 1987.
- [41] Sevim, Ö., Filazi, A., Toprak, B., Kartal, S., Investigating of Mechanical Properties of Mortars Based on Fly Ash and Blast Furnace Slag Activated with Alkali. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(2), 91-94, 2017.
- [42] Sevim, Ö., Demir, İ., Particle Size Optimization of Fly Ash. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, 4(1), 97-98, 2017.
- [43] Nath, P., Sarker, P. K., Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature. *Materials and Structures*, 50(1), 32, 2017.
- [44] Nath, P., Sarker, P. K., Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 22-31, 2017.
- [45] Wang, W., Lu, C., Yuan, G., Zhang, Y., Effects of pore water saturation on the mechanical properties of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 54-63, 2017.
- [46] Nagalia, G., Park, Y., Abolmaali, A., Aswath, P., Compressive Strength and Microstructural Properties of Fly Ash–Based Geopolymer Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 2016.
- [47] Valencia Saavedra, W. G., Angulo, D. E., Mejía de Gutiérrez, R., Fly Ash Slag Geopolymer Concrete: Resistance to Sodium and Magnesium Sulfate Attack. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 2016.

- [48] Gluth, G. J., Rickard, W. D., Werner, S., Pirskawetz, S., Acoustic emission and microstructural changes in fly ash geopolymer concretes exposed to simulated fire. *Materials and Structures*, 49(12), 5243-5254, 2016.
- [49] Zhao, Q., He, X., Zhang, J., Jiang, J., Long-age wet curing effect on performance of carbonation resistance of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 577-587, 2016.
- [50] De la Varga, I., Castro, J., Bentz, D. P., Zunino, F., Weiss, J., Evaluating the hydration of high volume fly ash mixtures using chemically inert fillers. *Construction and Building Materials*, 161, 221-228, 2018.
- [51] Singh, N., Singh, S. P., Carbonation resistance and microstructural analysis of Low and High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete containing Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 127, 828-842, 2016.
- [52] Chousidis, N., Ioannou, I., Rakanta, E., Koutsodontis, C., Batis, G., Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes. *Construction and Building Materials*, 126, 86-97, 2016.
- [53] Shehab, H. K., Eisa, A. S., Wahba, A. M., Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. *Construction and Building Materials*, 126, 560-565, 2016.
- [54] Dąbrowski, M., Glinicki, M. A., Gibas, K., Jóźwiak-Niedźwiedzka, D., Effects of calcareous fly ash in blended cements on chloride ions migration and strength of air entrained concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 1044-1053, 2016.
- [55] Zhang, D., Cai, X., Shao, Y., Carbonation curing of precast fly ash concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(11), 2016.

- [56] Gong, J., Cao, J., Wang, Y. F., Effects of sulfate attack and dry-wet circulation on creep of fly-ash slag concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 12-20, 2016.
- [57] Manz, O.E., Coal Fly Ash: a Retrospective and Future Look. *Fuel*, 78(2), 133-136, 1999.
- [58] Bayazıt, Ö.L., Application of Fly Ash in Gökçekaya Dam and Economy. Europe Committee on Electric Power, Symposium on the Use of Ash, Paper A-2, 1970.
- [59] Özel, İ., Utilization of Fly Ash in the Production of Mass Concretes Used in the Construction of Porsuk Dam in Turkey. Europe Committee on Electric Power, Symposium on the Use of Ash, Paper A-5, 1970.
- [60] Shabab, M. E., Shahzada, K., Gencturk, B., Ashraf, M., Fahad, M., Synergistic effect of fly ash and bentonite as partial replacement of cement in mass concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(5), 1987-1995, 2016.
- [61] Zhang, G., Li, G., Effects of mineral admixtures and additional gypsum on the expansion performance of sulphaaluminate expansive agent at simulation of mass concrete environment. *Construction and Building Materials*, 113, 970-978, 2016.
- [62] Kim, S. J., Yang, K. H., Moon, G. D., Hydration characteristics of low-heat cement substituted by fly ash and limestone powder. *Materials*, 8(9), 5847-5861, 2015.
- [63] Zhao, Z. F., Mao, K. K., Ji, S. W., Zhang, Z. Y., Zhu, H. N., Wang, W. L., Adiabatic Temperature Rise Model of Ultra-High-Volume Fly Ash Conventional Dam Concrete and a FEM Simulation of the Temperature History Curve. In *CONCREEP 10*, 1410-1419, 2015.

- [64] Schindler, A. K., Keith, K. P., Behavior of high-volume fly ash concrete in mass concrete applications. In *Construction Materials and Structures: Proceedings of the First International Conference on Construction Materials and Structures*, 268, IOS Press, 2014.
- [65] Berry, E.E., Malhotra, V.M., Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review. *ACI Journal*, Proceedings, 77(2), 59-73, 1980.
- [66] Manz, O.E., Coal Fly Ash: a Retrospective and Future Look. *Fuel*, 78(2), 133-136, 1999.
- [67] Pandian, N.S., Sridharan, A., Srinivas, S., Angle of Internal Friction for Pond Ashes. *Journal of Testing and Evaluation*, 28(6), 443-454, 2000.
- [68] Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Sukmak, P., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., Shen, S. L., Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 877-891, 2016.
- [69] Goodarzi, A. R., Goodarzi, S., Akbari, H. R., Assessing Geo-Mechanical And Micro-Structural Performance Of Modified Expansive Clayey Soil By Silica Fume As Industrial Waste. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 39(C2), 333, 2015.
- [70] Lane, R.O., Best, J.F., Properties and Use of Fly Ash in Cement Concrete. *Concrete International*, 4(7), 81-92, 1982.
- [71] Shaikh, F. U., Effect of ultrafine fly ash on the properties of concretes containing construction and demolition wastes as coarse aggregates. *Structural Concrete*, 17(1), 116-122, 2016.
- [72] Shaikh, F. U., Supit, S. W., Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and building materials*, 82, 192-205, 2015.

- [73] Zhao, J., Wang, D., Wang, X., Liao, S., Lin, H., Ultrafine grinding of fly ash with grinding aids: Impact on particle characteristics of ultrafine fly ash and properties of blended cement containing ultrafine fly ash. *Construction and Building Materials*, 78, 250-259, 2015.
- [74] Ma, B. G., Cai, L. X., Jian, S. W., Su, L., Influence of Fly Ash Fineness on Autoclaved Energy Conservation Block's Performance and Hydration Products. In *Key Engineering Materials*. 599, 302-309, 2014.
- [75] Tokyay, M., Erdoğan, K., Uçucu küllerin karakterizasyonu. TÇMB/AR-GE/Y 93,8, Ankara, 1998.
- [76] Feret, R., Sur la compacité des mortiers hydrauliques. *Annales des Ponts et Chaussees*, 4, 5-16, 1892.
- [77] Fuller, W.B., Thompson, S.E., The laws of proportioning concrete. *ASCE J. Transport.*, 59, 67-143, 1907.
- [78] Sprung, S., Kuhlmann, K., Ellerbrock, H.G., Particle size distribution and properties of cement: II, Water demand of portland cement. ZKG, Zement-Kalk-Gips, Edition A 38.9, 1985.
- [79] Kuhlmann, K., Ellerbrock, H.G., Sprung, S. Particle size distribution and properties of cement. Part I: strength of Portland cement. ZKG International Cement-Lime-Gypsum, Edition B38.4, 1985.
- [80] Wang, A., Zhang, C., Zhang, N. Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement. *Cement and Concrete Research*, 27(5), 685-695, 1997.
- [81] Bentz, D.P., Garboczi, E.J., Haecker, C.J., Jensen, O.M. Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 29(10), 1663-1671, 1999.

- [82] Ai Qin, W., Chengzhi, Z., Ningsheng, Z. The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement. *Cement and Concrete Research*, 29(11), 1721-1726, 1999.
- [83] Bentz, D.P., Jensen, O.M., Hansen, K.K., Olesen, J.F., Stang, H., Haecker, C.J. Influence of Cement Particle- Size Distribution on Early Age Autogenous Strains and Stresses in Cement- Based Materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 84(1), 129-135, 2001.
- [84] Slanička, Š. The influence of fly ash fineness on the strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 21(2-3), 285-296, 1991.
- [85] Monzo, J., Paya, J., Peris-Mora, E. A preliminary study of fly ash granulometric influence on mortar strength. *Cement and Concrete Research*, 24(4), 791-796, 1994.
- [86] Erdoğan, K., Türker, P. Effects of fly ash particle size on strength of Portland cement fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, 28(9), 1217-1222, 1998.
- [87] Lee, S.H., Kim, H.J., Sakai, E., Daimon, M. Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 763-768, 2003.
- [88] Bentz, D.P., Hansen, A. S., Gynn, J.M. Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 824-831, 2011.
- [89] Bentz, D.P., Ferraris, C.F., Filliben, J.J. Optimization of particle sizes in high volume fly ash blended cements. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2011.

- [90] Andreasen, A.H.M., Andersen, J., Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten), Colloid and Polymer Science, 50 (3), 217- 228, 1930.
- [91] Funk, J.E., Dinger, D.R., Funk, J.E.J., Coal Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal Water Slurries at High Solids Content. Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO), New York, 1980.
- [92] Johansen, V., Andersen, P.J., Particle Packing and Concrete Properties. In: Skalny, J. and Mindess, S. (eds). Materials science of concrete 2, Westerville: American Ceramic Society, 1991.
- [93] EN, T. 197-1, Cement–Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Turkish Standard Institution, Ankara, 2012.
- [94] EN, T. 196-1, Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength. Turkish Standard Institution, Ankara, 2016.
- [95] EN, CSN. 196-1, Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength. Brussels, 2016.
- [96] EN, T. 196-3, Methods of testing cement-part 3: determination of setting time and soundness. Turkish Standards Institution, Ankara, 2017.
- [97] ASTM C1202-12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [98] ASTM, C. 642-13, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. American Society of Testing Materials, 2013.

- [99] EN, T. 772-11. Methods of test for masonry units- Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units. Turkish Standard Institution, Ankara, 2011.
- [100] EN, T. 1015-3. Methods of Test for Mortar for Masonry-Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table). Turkish Standard Institution, Ankara, 2000.
- [101] Chong, L., Shi, C., Yang, J., Jia, H., Effect of limestone powder on the water stability of magnesium phosphate cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 148, 590-598, 2017.
- [102] El-Hassan, H., El-Maaddawy, T., Al-Sallamin, A., Al-Saidy, A., Performance evaluation and microstructural characterization of GFRP bars in seawater-contaminated concrete. *Construction and Building Materials*, 147, 66-78, 2017.
- [103] Ma, Y., Ye, G., Hu, J., Micro-mechanical properties of alkali-activated fly ash evaluated by nanoindentation. *Construction and Building Materials*, 147, 407-416, 2017.
- [104] Al-Bahar, S., Chakkamalayath, J., Joseph, A., Abdulsalam, M., Al-Otaibi, S., Al-Aibani, A., Effect of Volcanic Ash Incorporation on the Mechanical Properties and Surface Morphology of Hydrated Cement Paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 2017.
- [105] Sirikingkaew, S., Supakata, N., Utilization Of Fly Ash And Concrete Residue in The Production of Geopolymer Bricks. *Journal of Green Building*, 12(1), 63-77, 2017.

- [106] Xu, B., Ma, H., Shao, H., Li, Z., Lothenbach, B., Influence of fly ash on compressive strength and micro-characteristics of magnesium potassium phosphate cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 99, 86-94, 2017.
- [107] Jamil, M., Khan, M. N. N., Karim, M. R., Kaish, A. B. M. A., Zain, M. F. M., Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 128, 185-198, 2016.
- [108] Kafi, M. A., Sadeghi-Nik, A., Bahari, A., Sadeghi-Nik, A., Mirshafiei, E., Microstructural characterization and mechanical properties of cementitious mortar containing montmorillonite nanoparticles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 2016.
- [109] Li, H., Xiao, H. G., Yuan, J., Ou, J., Microstructure of cement mortar with nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185-189, 2004.
- [110] Sharma, S., Kothiyal, N. C., Facile growth of carbon nanotubes coated with carbon nanoparticles: A potential low-cost hybrid nanoadditive for improved mechanical, electrical, microstructural and crystalline properties of cement mortar matrix. *Construction and Building Materials*, 123, 829-846, 2016.
- [111] Koohestani, B., Koubaa, A., Belem, T., Bussière, B., Bouzahzah, H., Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfill containing maple-wood filler. *Construction and Building Materials*, 121, 222-228, 2016.
- [112] Shoukry, H., Kotkata, M. F., Abo-EL-Enein, S. A., Morsy, M. S., Shebl, S. S., Enhanced physical, mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement composites modified with nano metakaolin. *Construction and Building Materials*, 112, 276-283, 2016.

- [113] Uyan, M., Pekmezci, B. Y., Yıldırım H., Akışkanlaştırıcı Katkı, Kür ve Koşullarının Betonun Geçirimsilik Özellikleri Üzerine Etkileri. SİKA Teknik Bülten, 10-14, 2003.
- [114] Huang, H., Gao, X., Wang, H., Ye, H., Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete. Construction and Building Materials, 149, 621-628, 2017.
- [115] N. Mercan, Uçucu Kül Katkısıyla Üretilen Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, 2007.
- [116] S. Ö. Girginkardeşler, Farklı Çimentoların Harcın Dayanım ve Dayanıklılığına Etkisi. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, 2008.
- [117] F. İşsever, Birden Fazla Mineral Katkı İçeren, Kendiliğinden Yerleşen Harcın Dayanım, Dayanıklılık ve Viskozite Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2013.
- [118] Young, J. F., A Review of the Pore Structure of Cement Paste and Concrete and Its Influence on Permeability, Special Publication, 108, 1-18. 1988.
- [119] Xu, Q., Wang, P., Physical properties of styrene-butadiene emulsion modified cement mortar used for repair of bridge surface. J. Build. Mater, 4(2), 143-147, 2001.
- [120] Martys, N. S. ve Ferraris, C. F., Capillary transport in mortars and concrete. Cement and Concrete Research, 27(5), 747-760, 1997.
- [121] Carino, N.J., Nondestructive Techniques to Investigate Corrosion Status in Concrete Structure. Journal of Performance of Constructed Facilities, 13, 96-106, 1999.

- [122] Baradan, B., Aydın, S., Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, 265-288, 2013.
- [123] Baradan, B., Yazıcı H., Ün, H., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık. Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, 95-99, İstanbul, 2010.
- [124] Yeau, K. Y., Kim, E. K., An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. Cement and Concrete Research, 35(7), 1391-1399, 2005.
- [125] Leng, F., Feng, N., Lu, X., An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. Cement and Concrete Research, 30(6), 989-992, 2000.
- [126] Roy, D. M., Jiang, W., Silsbee, M. R., Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties. Cement and Concrete Research, 30(12), 1879-1884, 2000.
- [127] Massazza, F., Puzolanlar. Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları. Seminer, TÇMB, 406, 1989.
- [128] Akman, M. S., Erdiñç, M., Uçucu küllü betonlarda klor geçirimliliği. Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanımı sempozyumu. Eskişehir, Türkiye, 1-19, 1997.
- [129] Gifford, P. M., Ward, M. A., Results of laboratory tests on lean mass concrete utilizing PFA to a high level of cement replacement. In Proceedings of International Symposium on the Use of PFA in Concrete, 14-16, 1982.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özer SEVİM

Doğum Tarihi : 20.04.1988

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu :

Lisans : Selçuk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği 2011

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği 2013

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

Aksaray Üniversitesi Araştırma Görevlisi 2011-2013

Kırıkkale Üniversitesi Araştırma Görevlisi 2013-Halen

Yayınları (SCI) :

Akgüngör, A., Sevim, Ö., Kalkan, İ., Demir, İ., Restrained Shrinkage Cracking of Self-Consolidating Concrete Roads. Science and Engineering of Composite Materials, <https://doi.org/10.1515/secm-2016-0301>.

Demir, İ., Sevim, Ö., Effect of Sulfate on Cement Mortars Containing  $\text{Li}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  and  $\text{LiBr}$ . Construction and Building Materials, 156, 46-55, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.148>, 2017.

Yayınları (Diğer) :

Akgüngör, A.P., Sevim, Ö., Demir, İ., Kalkan, İ., Kendiliğinden Yerleşen Betonda Priz Hızlandırıcı Kimyasal Katkının Dayanıma Olan Etkisi. The 1st International Turkic World Conference on Chemical Sciences and- Technologies, Saraybosna 27 Ekim-01 Kasım 2015.

Demir, İ., Filazi, A., Sevim, Ö., Güzelküçük, S., The Effect of Mechanical Strength of Red Mud. 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

Demir, İ., Filazi, A., Sevim, Ö., Kalkan, İ., Güzelküçük, S., Kartal, S., The Effect of Mechanical Strength of Blast Furnace Slag Fineness. 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

Demir, İ., Güzelküçük, S., Sevim, Ö., Filazi, A., Sengül, C.G., Examination of Microstructure of Fly Ash in Cement Mortar. International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS), 11 – 12 December 2017, Lisbon, Portugal.

Demir, İ., Kalkan, İ., Akgüngör, A.P., Sevim, Ö., Kendiliğinden Yerleşen Betonda Rötire Azaltıcı Kimyasal Katkının Dayanıma Olan Etkisi. The 1st International Turkic World Conference on Chemical Sciences and- Technologies, Saraybosna 27 Ekim-01 Kasım 2015.

Demir, İ., Sevim, Ö., Filazi, A., Concrete Quality In Existing Reinforced Concrete Structures In Ankara. ICESA 2015 | International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians, 16-19 May 2015, Antalya.

Demir, İ., Sevim, Ö., Toprak, B. Filazi, A., Comparison of the Mechanical Strength of Fly Ash and Blast Furnace Slag Fineness. I. International Scientific and Vocational Studies Congress, 5 – 8 Oct 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

- Demir, İ., Sevim, Ö., Filazi, A., Güzelküçük, S., The Effect of Mechanical Strength of Ground Fly Ash Fineness. 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.
- Demir, İ., Sevim, Ö., Filazi, A., Plastik Lif Katkısının Pomza Agregali Hafif Harçlara Etkisi. International Conference on New Advances in Civil Engineering Dubai, 24-28 March 2015.
- Demir, İ., Sevim, Ö., Filazi, A., Sunar, K., Şanver, N., Kesenel, E., Polimer Malzeme İle Hafif Plak Üretimi. Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu, Düzce 10-12 Eylül 2015.
- Demir, İ., Sevim, Ö., Kalkan, İ., Filazi, A., Güzelküçük, S., Kartal, S., The Effect of Mechanical Strength of Fly Ash Fineness. 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.
- Demir, İ., Sevim, Ö., Mechanical Effect of Alkali Silica Reaction on Lithium Nitrate Added Mortar. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, ISSN: 2394-2827, Volume-3, Issue-5, pp:114-115, 2016.
- Demir, İ., Sevim, Ö., Mechanical Effect of Alkali Silica Reaction on Lithium Nitrate Added Mortar. 66th International Academic Conference on Engineering, Technology and Innovations (IACETI), 01th-02th August 2016, Singapore.
- Er, S.B., Sıcacık, E.A., Çetin, S., Demir, İ., Sevim, Ö., The Effect of Fiber Type and Ratio to Mechanical Properties of Cement Mortar. 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.
- Fırat, F.K., Sevim, Ö., Sönmez, M., Investigation of Concrete Quality in Earthquake Regions after Devastating Earthquakes Occurred in Turkey. International Conference on Earthquake Engineering, 29- 31 May 2013, Skopje-Macedonia.

Gümüř, M., Demir, İ., Sevim, Ö., Ağır Agrega ile Üretilen Polipropilen Lifli Ağır Betona Yüksek Sıcaklık Etkisi. 2. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, 6-8 Nisan 2017, Kırıkkale, Turkey.

Kalkan, İ., Demir, İ., Akgüngör, A.P., Sevim, Ö., Kendiliğinden Yerleşen Betonda Hidratasyon Isısı Azaltıcı Kimyasal Katkının Dayanıma Olan Etkisi. The 1st International Turkic World Conference on Chemical Sciences and-Technologies, Saraybosna 27 Ekim-01 Kasım 2015.

Kalkan, İ., Demir, İ., Er, S.B., Sevim, Ö., Influence of Shrinkage Reducing Admixtures on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. 12th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE2016), 21th-23th September 2016, Istanbul.

Kalkan, İ., Kartal, S., Demir, İ., Sevim, Ö., Baş, S., Buckling Behavior of Slender Reinforced Concrete Beams with Different Forms of Initial Imperfections. 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

Kalkan, İ., Kartal, S., Demir, İ., Sevim, Ö., Baş, S., Estimation of the Critical Load of a Reinforced Concrete Beam From the Initial Elastic Portion of its Load-Deflection Curve. 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

Sevim, Ö., Concrete Quality In Existing Reinforced Concrete Structures In The First Seismic Zone In Turkey. International Journal of Engineering Research and Development, ISSN: 1308-5506, 6(2), pp: 1-6,2014.

Sevim, Ö., Demir, İ., Particle Size Optimization of Fly Ash. International Conference on Science, Technology, Engineering and Management (ICSTEM), 12 -13th December 2016, Rome, Italy.

- Sevim, Ö., Demir, İ., Particle Size Optimization of Fly Ash. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, ISSN: 2394-2827, Volume-4, Issue-1, 2017.
- Sevim, Ö., Filazi, A., Toprak, B., Kartal, S., Investigating of Mechanical Properties of Mortars Based on Fly Ash and Blast Furnace Slag Activated with Alkali. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, vol.4, no. 2, pp.091-094,2017.
- Sevim, Ö., Sönmez, M., Geliştirilmiş Yapay Arı Koloni Algoritması İle Kafes Ve Düzlemsel Çelik Yapıların Optimum Tasarımı. Ömer Halisdemir Mühendislik Bilimleri Dergisi, ISSN: 2147-012X, 3(2), pp:38-51, 2014.
- Sönmez, M., Sevim, Ö., Kılıç, M., Topology Optimization of Double-Curved Double-Layer Grids. 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, 23-25 May 2013, Tirane-Albania.
- Sevim, Ö., Sönmez, M., Optimum Design Of Space Steel Structures With Artificial Bee Colony Algorithm. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, ISSN: 2394-2827, Volume-2, Issue-5, pp 31-34, 2015.
- Sevim, Ö., Sönmez, M., Optimum Design of Space Steel Structures with Artificial Bee Colony Algorithm. ICENS| International Conferance on Engineering and Natural Science, ISBN: 978-93-85465-60-4, 2 August 2015, Barcelona.
- Sevim, Ö., Sönmez, M., Saydan M., Optimum Design Of Planar Steel Structures with Artificial Bee Colony Algorithm. International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians, 17-20 Mayıs 2014, Antalya.
- Sevim, Ö., Sönmez, M., Sezer, R., Yapay Arı Koloni Algoritması İle Uzay Çelik Yapıların Optimum Tasarımı. 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering And Science, 18-20 Haziran 2014, Karabük.

Sevim, Ö., Sönmez, M., Toprak, B., Optimum Design of Truss Structure Using Artificial Bee Colony Algorithm. International Journal of Soft Computing And Artificial Intelligence (IJSCAI), ISSN: 2321-4384, Volume-4, Issue-1, pp:17-20, 2016.

Sevim, Ö., Sönmez, M., Toprak, B., Optimum Design of Truss Structure Using Artificial Bee Colony Algorithm. 19th International Academic Conference on Engineering, Technology and Innovations (IACETI-2015), ISBN: 978-93-85832-84-0, December 26th 2015, Saint Petesburg, Russia.

Tekin, E., Demir, İ., Acer, H., Kantar, M., Hafizoğulları, A.H., Er, Ş.B., Sevim, Ö., Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Rötire Azaltıcı Katkının Taze Beton Özelliklerine ve Basınç Dayanımına Etkisi. 8. Uluslararası Kırma taş Sempozyumu, 13-14 Ekim 2016, Kütahya.

Toprak, B., Sevim, Ö., Kalkan İ., Gabion Walls And Their Use. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, ISSN: 2394-2827, Volume-3, Issue-4, pp:56-58, 2016.

Toprak, B., Sevim, Ö., Kalkan, İ., Gabion Walls And Their Use. 37th International Conference on Science, Technology, Engineering and Management (ICSTEM), 17th-18th June 2016, Helsinki, Finland.

Araştırma Alanları : Yapı Malzemeleri, Kendiliğinden Yerleşen Beton, Çimento Harcı Mikro-Yapı Analizi, Puzolanlar, Durabilite.