

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

TANE BOYUTU OPTİMİZE EDİLMİŞ EN YÜKSEK
DOLGU FAKTÖRÜNE GÖRE F VE C SINIFI UÇUCU
KÜLLERİN ÇİMENTO HARÇLARINA ETKİSİ

AHMET FİLAZİ

ŞUBAT 2020

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında AHMET FİLAZİ tarafından hazırlanan TANE BOYUTU OPTİMİZE EDİLMİŞ EN YÜKSEK DOLGU FAKTÖRÜNE GÖRE F VE C SINIFI UÇUCU KÜLLERİN ÇİMENTO HARÇLARINA ETKİSİ adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Orhan DOĞAN
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. Mustafa ŞAHMARAN	_____
Üye (Danışman)	: Prof. Dr. İlhami DEMİR	_____
Üye	: Prof. Dr. Hasbi YAPRAK	_____
Üye	: Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK	_____
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi H. Süleyman GÖKÇE	_____

...../...../2020

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

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK İLKELERE UYGUNLUK BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgileri akademik yazım kurallarına uygun biçimde raporlaştırdığımı ve bunları etik ilkelere (atıfta bulunulan tüm yapıtlara kaynaklarda yer verilmesi, tezde kullanılan bilgi ve belgelere resmi yollarla ulaşılması ve bunların aslı bozulmadan kullanılması vb.) uygun olarak elde ettiğimi ve sunduğumu bildiririm.

Ahmet FİLAZİ



ÖZET

TANE BOYUTU OPTİMİZE EDİLMİŞ EN YÜKSEK DOLGU FAKTÖRÜNE GÖRE F VE C SINIFI UÇUCU KÜLLERİN ÇİMENTO HARÇLARINA ETKİSİ

FİLAZİ, Ahmet

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlhami DEMİR

Şubat 2020, 191 Sayfa

Günümüzde yapı malzemelerinin teknik özelliklerinin gelişmesiyle, betonun çevresel etkilerini azaltma çabaları hız kazanmıştır. Doğal kaynakların miktarı azaldıkça çevre kirliliği sorununu gidermek ve enerji maliyetini azaltmak için endüstriyel atık kullanımı günden güne artmaktadır. Betonun çimentoya bağlı çevresel etkilerini azaltmak için kullanılabilecek ekonomik metotlardan biri, çimento içerisine puzolanik malzemelerin ikamesidir. Bu noktada çimento bazlı etkiyi azaltmak için beton agregalarında uygulanan gradasyon sistemine benzer bir şekilde uçucu kül gibi filler malzemelerin en yüksek dolgu faktörünün elde edilebilmesi için uçucu kül gradasyonu önemli bir konudur. Beton karışımında kullanılacak agreganın granülometrisinin ayarlanması, üretilecek beton karışımındaki boşluk oranını ve çimento oranını minimize edecektir. Agregalarda bu durum önemszenmesine rağmen, çimento ve uçucu kül gibi filler malzemelerde gradasyon göz ardı edilmektedir. Bu tez çalışmasında, tane dağılımı optimize edilmiş en yüksek dolgu faktörüne göre F ve C sınıfı uçucu küllerin çimento harçlarına etkisi incelenmiştir.

İyi bir gradasyon, yüksek kompasite oluşturacak ve uçucu kül ikameli çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan ürünlerin çimento harcı içerisindeki boşluklarını minimize edecektir. Bu tez kapsamında literatürdeki katkılı çimento karışımları dikkate alınarak, bu karışımlar içerisindeki granüler malzemeler tane boyutu dağılımlarına bağlı olarak, Fuller-Thompson bağıntısı ile optimize edilerek daha sıkı bir yapı oluşturuldu. Vakumlu elek ile elenen uçucu küllerin uygun tane boyut

dağılımı oluşturuldu ve oluşturulan bu tane boyut dağılımı çimento yerine ikame edilerek en yüksek dolgu faktörü belirlendi. Sonraki aşamada ise tane dağılımı optimize edilmiş uçucu küllerin, çimento içerisine ikame edilmesi ile çimento harçlarının mekanik dayanımları ve durabilite etkisi incelendi.

Bu çalışmada, Fuller-Thompson bağıntısında önerilen denkleme göre uçucu külün etkinliğini daha iyi anlayabilmek için %20 ikame oranında F ve C sınıfı için tane dağılımları optimize edilmiştir. Fuller-Thompson bağıntısına göre tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük çimento harcı basınç ve eğilme dayanım değerleri sonucunda, tane dağılımı katsayısı $n=0.4$ olarak elde edilmiştir. Tane boyut dağılımı yapılan uçucu kül ikameli çimento harçlarında sülfata karşı dayanıklılık, hızlı klor iyonu geçirimsizliği, donma-çözülme, ultrases geçiş hızı, civalı porozimetre (MIP) özelliklerine bakılmıştır. $n=0.4$ tane dağılım katsayısı ile uçucu küllere tane dağılımı optimizasyonu yaparak yüksek hacimli uçucu kül kullanımı artırılmıştır.

Tane dağılımı optimize edilmeyen, 90 günlük uçucu küllerin basınç dayanımları incelendiğinde F sınıfı uçucu kül ikamesinin %5, %10 oranlarında referans numuneyi yakaladığını, C sınıfı uçucu küllerin ise %15 ikamede referans numuneyi geçtiğini görmekteyiz. Tane dağılımı optimizasyonunun sayesinde optimizasyonu yapılmayan uçucu küllere göre, optimizasyon işlemi yapılarak %10 uçucu kül ikame yerine, F sınıfı uçucu küllerde %30 kadar, C sınıfı uçucu küllerde ise %20 ikameye kadar uçucu kül kullanarak basınç dayanımlarının aynı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Sonuç olarak, tane dağılımı optimize edilen uçucu küller, daha yüksek hacim oluşturarak boşlukları minimize etmiştir. Bu sayede eğilme ve basınç dayanımlarının yanı sıra, durabilite özelliklerini geliştirdiği açıkça görülmektedir. Bir atık olan uçucu kül kullanımının optimizasyon ile birlikte daha fazla kullanılacağı sonucu ortaya çıkmıştır. Bunun en önemli faydası çimento kullanımı azalacak ve ekonomik bir beton elde edilmiş olacaktır. Ayrıca, çevreyi kirleten karbondioksit (CO_2) miktarındaki artış, çimentonun daha az kullanılmasıyla azalacaktır. En önemlisi doğal kaynakların korunması ve ülke ekonomisine büyük oranlarda katkılar sağlaması olacaktır.

Anahtar Kelimeler: C ve F sınıfı Uçucu Kül, Tane Dağılımı, Eğilme ve Basınç Dayanımı, Donma-Çözülme, Klor Geçirgenliği, Sülfat Etkisi.



ABSTRACT

Nowadays, with the improvement of the technical properties of construction materials, efforts to reduce the environmental effects of concrete have accelerated. As the amount of natural resources is decreasing, industrial waste use is increasing day by day with the aim of reducing the environmental pollution problem and energy costs. An economic method of reducing the environmental impact of concrete related to cement is the substitution of pozzolans with the cement. At this point, in order to reduce the Portland cement related negative effect, gradation of filler materials such as fly ash to achieve highest packing factor, similar to the gradation system applied to concrete aggregates, becomes an important issue. Adjusting the gradation of the aggregates that will be used in the concrete mixture minimizes the amount of pores and required cement content in the concrete mixture. Although this issue is considered to be important for aggregates, it is ignored for filler materials such as cement and fly ash. In this study the effect of class c and f ashes on cement mortars according to the maximum fill factor optimized for particle size is analyzed.

A good gradation will supply high compactness and minimize the void cement ratios of products obtained as a result of the hydration of fly ash substituted cement. Within the scope of this project, considering the blended cement mixtures available in the literature, granular materials in these mixtures have been optimized by Fuller-Thompson correlation and a more compact structure has been formed depending on grain size distributions. Fly ash was sieved through a vacuum sieve and appropriate grain size distribution was obtained and this grain size distribution was substituted with the cement and the highest compaction factor was determined. In the next stage, fly ash with optimized grain size distributions was substituted with cement mortars and their mechanical durability was analyzed.

In this study, to better understand the efficiency of fly ash in accordance with the Fuller-Thompson correlation, grain size distributions of Class F and C fly ash were optimized for 20% cement replacement ratio. The effect of optimized fly ash cement-bonded composites on compressive and flexural strengths of 7, 28 and 90 days cement mortar was investigated and the optimum particle distribution modulus was obtained as $n = 0.4$. In the cement mortars with a grain size distribution, the

properties of resistance to sulfate, rapid chlorine ion permeability, freeze-thaw, ultrasound transition rate, mercury porosimeter (MIP) were investigated. The use of high volume fly ash was increased by optimizing grain distribution of fly ash with a distribution ratio of $n = 0.4$.

When we analyze the compressive strength of 90-day fly ashes, whose grain distribution is not optimized, we can see that the F class fly ash substitution has passed the reference sample at the rate of 5%, 10%, while the class C fly ash substitution has passed the reference sample at the rate of 15%. Compared to fly ash without optimization thanks to grain distribution optimization, it was observed that compressive strengths have given the same results by using up to 30% in F class fly ash and 20% in C class fly ash instead of 10% fly ash by optimization.

As a result; Fly ashes with optimized grain distribution minimized voids by creating a higher volume. In this way, it is clearly seen that it improves durability as well as flexural and compressive strengths. It was concluded that the use of fly ash, which is a waste, will be used more with optimization. The most important benefit of this is that the use of cement will decrease and an economic concrete will be obtained. In addition, the increase in the amount of carbon dioxide (CO₂) polluting the environment will decrease with less use of cement. Most importantly, it will contribute greatly to the protection of natural resources and to the national economy.

Keywords: Class C and F Fly Ash, Particle Size Distribution, Compressive and Flexural Strength, Freezing-Thawing, Chlorine Permeability, Sulfate Effect.

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimin son aşaması olan bu çalışmanın hazırlanmasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, değerli düşünceleri ile beni doğruya yönlendiren danışmanım Prof. Dr. İlhami Demir'e gönülden teşekkürlerimi arz ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 117M325 numaralı TÜBİTAK 1001 araştırma projesi kapsamında tamamlanan tez çalışmam sırasında mali desteğini esirgemeyen TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora tez çalışmalarım süresince ilk andan itibaren değerli fikirlerini, yardımlarını, bilgilerini esirgemeyen, örnek aldığım Sayın Prof. Dr. Mustafa Şahmaran ve Sayın Doç. Dr. Osman Şimşek'e, tezimin izlenmesi ve değerlendirilmesi süresince desteklerini esirgemeyen ve tez jürime katılan, Sayın Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi H. Süleyman GÖKÇE teşekkür ederim. Ayrıca her konuda yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Doktora çalışmamın başından sonuna kadar beni gönülden destekleyen değerli eşime ve öğrenimim boyunca büyük fedakârlıklarda bulunan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ETİK İLKELERE UYGUNLUK BİLDİRİMİ	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
SİMGELER DİZİNİ	xviii
KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. UÇUCU KÜLLERİN BETONDA KULLANIMI	5
2.1. Puzolanlar.....	5
2.2. Uçucu Kül	6
2.3. Literatür Değerlendirilmesi	8
2.3.1. Puzolanların Kullanımı	9
2.3.2. Tane Boyut Dağılım Optimizasyon Yöntemleri.....	10
2.3. Uçucu Külün Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkileri	13
2.4. Değerlendirme.....	19
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	21
3.1. UK İkameli Çimentolu Harçlarının Özellikleri.....	21
3.2. Kullanılan malzemelerin Özellikleri	21
3.3. F ve C Sınıfı Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Deneyleri	29
3.3.1. UK İkameli Çimento Harçlarının Üretimi	29

3.3.2. UK İkameli Çimento Harçlarının Eğilme Dayanımları	31
3.4. UK İkameli Çimento Harçlarının Basınç Dayanımları.....	31
3.5. Donma- Çözölmeye Karşı Dayanıklılık;.....	32
3.6. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	33
3.7. Sülfata Karşı Dayanıklılık Deneyleri	34
3.7.1 Eğilme ve Basınç Dayanımı	34
3.8. Harç Çubuklarının Boyca Uzama Deneyi.....	34
3.9. Optimize Edilmiş Çimento Harçlarının Cıvalı Porozimetre (MIP)	34
3.10. Optimize Edilmiş Çimento Harçlarının Klor Geçirgenliği,	35
3.10.1. Malzemeler ve Karışım Oranları	35
3.10.2. UK İkameli Çimento Harçlarının Hazırlanması ve Deneyler.....	35
3.11. İstatistiksel Anlamlılık ve Kalite Kontrol Derecesi	37
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	38
4.1. F ve C Sınıfı UK Tane Boyut Dağılımının Optimizasyonun Elde Edilmesi	38
4.2. Tane dağılım optimizasyonu yapılmış, F ve C Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının Üretimi	44
4.2.1. Tane Boyut Dağılımı Optimize Edilmiş ve Edilmemiş F Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının Dayanımlarının Belirlenmesi.....	45
4.2.2. Optimize Edilmiş C Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının Eğilme ve Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi.....	57
4.3. Durabilite Deneyleri.....	73
4.3.1. Donma- Çözölmeye Karşı Dayanıklılık;	73
4.3.2. Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Dayanıklılık Deneyleri.....	97
4.3.2.1. Optimize Edilmiş ve Edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Eğilme Dayanıklılık Deneyleri.....	97
4.3.2.2. Optimize Edilmiş ve Edilememiş F ve C Sınıfı UK ikameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Basınç Dayanıklılık Deneyleri.....	111
4.3.2.3. Optimize Edilmiş Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Harç Çubuklarının Boyca Uzama Deneyi	124

4.4. Çimento Harçlarının Civalıporozimetre (MIP) Deney Sonuçları	133
4.5. Optimize Edilmiş Çimento Harçlarının Klor Geçirgenliği, 28 ve 90 Günlük Çimento Harçlarının Numuneleri Hazırlanacak Deney Sonuçları;	135
4.6. Elektron Tarayıcı Mikroskop (SEM) ile Mikro Yapı İncelemesi	143
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	149
6. KAYNAKLAR	170
7. ÖZGEÇMİŞ.....	186



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Doğal puzolanların kimyasal bileşimi	6
Çizelge 2.2. Yapay puzolanların kimyasal bileşimi.....	6
Çizelge 3.1. CEM I 42.5 R çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri	22
Çizelge 3.2. Boyutlarına göre F sınıfı UK'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	23
Çizelge 3.3. C sınıfı UK fiziksel ve kimyasal özellikleri	24
Çizelge 3.4. F sınıfı UK'ün n tane dağılım katsayılarına göre kimyasal analizi	24
Çizelge 3.5. C sınıfı UK' ün n tane dağılım katsayılarına göre kimyasal analizi.....	25
Çizelge 3.6. CEN referans kumunun tane büyüklüğü dağılımı	28
Çizelge 3.7. Ultrases geçiş hızlarının pratik değerlendirilmesi	34
Çizelge 3.8 ACI tarafından belirlenen kalite dereceleri.....	37
Çizelge 4.1. UK'ün tane dağılım katsayısına (n) göre kümülatif yüzdeleri (%)	38
Çizelge 4.2. Tane boyut dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçların eğilme ve basınç değerleri.....	40
Çizelge 4.3 Tane boyut dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçların Eğilme ve Basınç Değerlerinin İstatistiksel Parametreleri.....	41
Çizelge 4.4. Tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçların eğilme ve basınç dayanım değerleri.....	42
Çizelge 4.5. Tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçların Eğilme ve Basınç Değerlerinin İstatistiksel Parametreleri.....	43
Çizelge 4.6. F Sınıfı UK' ün 7 Günlük Eğilme Dayanımları ve İstatistiksel Parametreleri	45
Çizelge 4.7. F sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının 28 Günlük Eğilme Dayanımları ve İstatistiksel Parametreleri	47
Çizelge 4.8. F Sınıfı Uçucu Külün 90 Günlük Ortalama Eğilme Dayanımları ve İstatistiksel Parametreleri	49
Çizelge 4.9. F Sınıfı Uçucu Külün 7 Günlük Ortalama Basınç Dayanımları ve Standart Sapma Değerleri.....	51
Çizelge 4.10. F Sınıfı Uçucu Külün 28 Günlük Ortalama Basınç Dayanımları ve Standart Sapma Değeri.....	53
Çizelge 4.11. F Sınıfı Uçucu Külün 90 Günlük Ortalama Basınç Dayanımları ve Standart Sapma Değeri.....	55

Çizelge 4.12. C sınıfı UK'ün 7 günlük ortalama eğilme dayanımları ve İstatiksel Parametreleri	57
Çizelge 4.13. C sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama eğilme dayanımları ve İstatiksel Parametreleri	58
Çizelge 4.14. C sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama eğilme dayanımları ve İstatiksel Parametreleri	60
Çizelge 4.15. C sınıfı uçucu külün 7 günlük ortalama basınç dayanımları ve İstatiksel Parametreleri	62
Çizelge 4.16. C sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama basınç dayanımları ve Standart Sapma Değerleri.....	63
Çizelge 4.17. C sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama basınç dayanımları ve Standart Sapma Değerleri.....	65
Çizelge 4.18. F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımı karşılaştırılması	67
Çizelge 4.19. F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı karşılaştırılması	70
Çizelge 4.20. Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında D-Ç deneyleri	74
Çizelge 4.21. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçların D-Ç deneyleri....	79
Çizelge 4.22. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçları D-Ç deneyleri	85
Çizelge 4.23. Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçların D-Ç deneyleri ...	89
Çizelge 4.24. NS ve SS de olgunlaştırılan F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımları.....	98
Çizelge 4.25. NS ve SS de olgunlaştırılan C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımları.....	103
Çizelge 4.26. SS de olgunlaştırılan F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımlarının karşılaştırılması	106
Çizelge 4.27. SS de olgunlaştırılan F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımlarının Varyasyon Katsayısı (%)	109
Çizelge 4.28. NS ve SS de olgunlaştırılan F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımları	111
Çizelge 4.29. NS ve SS de olgunlaştırılan C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımları	116

Çizelge 4.30. NS ve SS da olgunlaştırılan F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	120
Çizelge 4.31. SS de olgunlaştırılan F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının Standart Sapması.....	122
Çizelge 4.32. NS ve SS'da olgunlaştırılan optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%).....	124
Çizelge 4.33. NS ve SS'da olgunlaştırılan optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%).....	126
Çizelge 4.34. NS ve SS'da olgunlaştırılan optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%).....	128
Çizelge 4.35. NS ve SS'da olgunlaştırılan optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%).....	130
Çizelge 4.36. F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının klor geçirimsizliği deney sonuçları (C).....	136

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Puzolanlar	5
Şekil 2.2. Fuller-Thompson ve Andreasen ve Andersen modeli ile Funk ve Dinger tarafından yapılan araştırmalar sonucu, q dağılım katsayısının en ideal gradasyon optimizasyonu	11
Şekil 3.1. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen CEM I 42.5 R çimentosunun tane dağılımı	22
Şekil 3.2. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen F sınıfı UK' ün tane dağılımı	26
Şekil 3.3. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen F sınıfı uçucu külün (n= 0,4) tane dağılımı	26
Şekil 3.4. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen C sınıfı uçucu külün tane dağılımı ..	27
Şekil 3.5. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen C sınıfı uçucu külün n=0.4 tane dağılımı	27
Şekil 3.6. Vakumlu Elek Sistemi	28
Şekil 3.7. a) TS EN 196-1'e otomatik mikser b) TS EN 196-1'e kalıp (40×40×160 mm)	30
Şekil 3.8. TS EN 196-1'e uygun şok cihazı.....	30
Şekil 3.9. Kür tankı	31
Şekil 3.10. TS 196-1'e uygun Çimento Presi	32
Şekil 3.11. Donma -Çözülme kabini.....	33
Şekil 3.12. Ø100×50 mm silindir deney numuneleri.....	36
Şekil 3.13. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deney hücrelerinin hazırlanması	36
Şekil 4.1. UK'ün tane dağılım katsayısına (n) göre, oluşturulan farklı tane dağılım eğrileri	39
Şekil 4.2. F sınıfı UK ikamali çimento harçlarının 7 günlük eğilme dayanımlarının grafiği	46
Şekil 4.3. F sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği	48
Şekil 4.4. F sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği	50
Şekil 4.5. F sınıfı uçucu külün 7 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği	52
Şekil 4.6. F sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği	54
Şekil 4.7. F sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği	56
Şekil 4.8. C sınıfı UK'ün 7 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği	58
Şekil 4.9. C sınıfı UK'ün 28 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği	59

Şekil 4.10. C sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği.....	61
Şekil 4.11. C sınıfı uçucu külün 7 günlük ortalama basınç dayanımları	63
Şekil 4.12. C sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği.....	64
Şekil 4.13. C sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği.....	66
Şekil 4.14. Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi	75
Şekil 4.15. Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi basınç kaybı değeri	76
Şekil 4.16. 90 günlük optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı	77
Şekil 4.17. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi	80
Şekil 4.19. 90 günlük optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı	82
Şekil 4.20. 300 Döngü Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı 90 günlük Donma-Çözülme deneyi basınç kaybı yüzde değişimi	83
Şekil 4.22. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi	87
Şekil 4.23. 90 günlük optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı	88
Şekil 4.24. Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi	90
Şekil 4.25. Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçların 90 günlük D-Ç deneyi basınç değişimi	91
Şekil 4.26. Optimize edilmiş 90 günlük C sınıfı UK ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı	92
Şekil 4.27. 300 Döngü Optimize edilmiş ve edilmemiş C sınıfı 90 günlük D-Ç deneyi basınç kaybı yüzde değişimi	94
Şekil 4. 28. Optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç sonrası ağırlık kaybı karşılaştırma grafiği	96
Şekil 4. 29. Optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç sonrası su emme yüzdesi karşılaştırma grafiği	97

Şekil 4.30. NS ve SS' da olgunlaştırılan optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%).....	125
Şekil 4.31. NS ve SS'da olgunlaştırılan optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%).....	127
Şekil 4.32. NS ve SS'da olgunlaştırılan optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%).....	129
Şekil 4.34. F sınıfı civalı porozimetre boşluk dağılımı kümülatif gözenek alanı arasındaki ilişki.....	134
Şekil 4.35. C sınıfı civalı porozimetre boşluk dağılımı kümülatif gözenek alanı arasındaki ilişki.....	134
Şekil 4.36. Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi	137
Şekil 4.37. Optimize edilmiş ve edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi	138
Şekil 4.38. Optimize edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi	140
Şekil 4.39. Optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi	141
Şekil 4.40. 28 gün normal su küründe bekletilen örneklerin sem görüntüsü.....	143
Şekil 4.41. 28 günlük normal su küründe %5 ikameli F sınıfı UK sem görüntüsü	144
Şekil 4.42. 28 günlük normal su küründe %5 ikameli C sınıfı UK sem görüntüsü.....	144
Şekil 4.43. 28 günlük normal su küründe %20 F sınıfı ikameli UK sem görüntüsü	145
Şekil 4.44. 28 günlük normal su küründe %20 ikameli UK örneklerin sem görüntüsü .	145
Şekil 4.45. 360 gün normal su küründe bekletilen % 5 sınıfı UK sem görüntüsü.....	146
Şekil 4.46. 360 gün normal su küründe bekletilen C sınıfı UK sem görüntüsü	146
Şekil 4.47. 28 gün sodyum sülfat çözeltisi küründe %5 UK bekletilen örneklerin sem görüntüsü.....	147
Şekil 4.48. 28 gün sodyum sülfat çözeltisi küründe %20 bekletilen sem görüntüsü.....	147
Şekil 4.49. 360 gün sodyum sülfat çözeltisi küründe bekletilen bem görüntüsü.....	148

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER DİZİNİ

D	Uçucu kül tane dağılımı için elek çapı
Dmaks	Uçucu kül için maksimum tane çapı
Dmin	Uçucu kül için minimum tane çapı
Ø	Çimento harcının çapı
P(D)	D boyutundaki elek çapından küçük toplam malzeme oranı
n	Dağılım Katsayısı
µm	Mikrometre
µs	Mikrosaniye

KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
C	Coulomb
Ca	Kalsiyum
CaCO ₃	Kalsiyum Karbonat
Ca(SO ₄)	Kalsiyum Sülfat
Ca(OH) ₂	Kalsiyum Hidroksit
C ₂ S	Dikalsiyum Silikat
C ₃ A	Trikalsiyum Aluminat
C ₃ S	Trikalsiyum Silikat
C ₄ AF	Tetrakalsiyum Aluminoferrit
C-A-H	Kalsiyum Aluminohidrat
CaO	Kalsiyum Oksit
CH	Sönmüş Kireç
CO ₂	Karbondioksit
CSH	Kalsiyum Silika Hidrat
D-Ç	Donma-Çözülme
Fe	Demir
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
K ₂ O	Potasyum Oksit

MIP	Civalıporozimetre
MPA	Megapaksal
MgO	Magnezyum Oksit
Na ₂ O	Sodyum Oksit
Na ₂ O+K ₂ O	Alkali Oksitler
Na ₂ SO ₄	Sodyum Sülfat
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
NS	Normal Su
SS	Sodyum Sülfat Çözelti Kürü
PÇ	Portland Çimentosu
S	Kükürt
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum Oksit
SO ₃	Kükürt
TiO ₂	Titanyumdioksit
TUAM	Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
UK	Uçucu Kül
V	Volt

1. GİRİŞ

Beton, karmaşık bir mikro yapıya sahip olan ve nanometreden milimetreye kadar çok çeşitli ölçek uzunlukları gösteren kompozit bir malzemedir [1]. Agregalar betondaki en büyük malzemelerdir ve partikül büyüklüğü milimetre cinsindendir. Mikrometre ölçeğinde, çimento hamuru, çimento tanelerinin ve hidrasyon ürünlerinin hidratlanmamış artıklarının bir birleşimidir (C-S-H, Ca(OH)_2 ve kılcal gözenek). Hidratlı çimento hamuru, 50-10.000 nm arası çaplara sahip büyük kılcal gözenekler, 10–50 nm çaplarına sahip orta kılcal gözenekler ve 10 nm'den daha küçük çapa sahip jel gözenekleri içerir [2].

Puzolanik malzemelerin, portland çimentosunun betona kısmi ikame olarak dahil edilmesinin, betonun mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Puzolanik maddeler, hidrasyon reaksiyonu sırasında Ca(OH)_2 ile reaksiyona girer ve C-S-H jelleri oluştururlar. Bu, kristal hidrasyon ürünlerinin gözeneklerinin boyutunu azaltabilir, betonun mikro yapısını daha düzgün hale getirebilir ve betonun geçirimsizliğini ve dayanıklılığını artırabilir. Bu gelişmeler, somut bir yapının hizmet ömründe bir artışa yol açabilir.

UK, betonda çimento değişimi olarak kullanıldığında dayanıklılığı artırır. Ayrıca puzolanik ve dolgu etkisiyle beton dayanımına katkıda bulunur. Son zamanlarda, uçucu kül beton endüstrisinde giderek daha fazla kullanılmaktadır [3,4].

UK'ün özellikleri, santrallerde kullanılan kömürün türüne ve özelliklerine ve ayrıca yanma özelliklerine bağlı olarak değişir. Daha büyük partikül boyutları, kömürün daha az yandığını ve kül içindeki daha yüksek karbon seviyelerini gösterir. Küçük parçacık boyutları ise yanmanın çok verimli olduğunu ve üretilen karbon miktarının azaldığını gösteriyor. İnce taneli UK, parçacık boyutu arttıkça koyulaşan ve karbon miktarı arttıkça gri bir renge sahiptir. UK partikül çapı 200 μm seviyelerine kadar ulaşabilir ve partiküllerin yaklaşık %75'i 45 μm 'den küçüktür [5-8].

UK'ün yoğunluğu 2.2-2.7 g/cm^3 aralığında olup, çimentonun yoğunluğuna yakındır [9]. UK sınıflandırması için mevcut ASTM C618 standardı, C sınıfı UK'ler için alt sınır olarak toplam SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 içeriğinin %50'sini ve F sınıfı UK'ler için alt sınır olarak toplam SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 içeriğinin % 70'ini belirtir [10].

UK tipik olarak, bir miktar Portland çimentosunun yerine betonda ilave bir çimentolu malzeme olarak kullanılır. UK, harmanlanmış Portland çimentosu üretiminde de kullanılır. Ayrıca, UK betonun özelliklerini değiştirmek için beton katkı maddesi olarak kullanılır [11-15]. UK'ün inceliği Portland çimentosu ve betondaki performansını etkileyen en önemli özelliktir. Önceki çalışmalar, UK ile ikame edilmiş betonların, mekanik ve durabilite gibi özelliklerin, kullanılan UK'ün incelik ve parçacık boyut dağılımı ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir [16-18].

Günümüzde literatür çalışmaları, uçucu külün incelik ve parçacık boyutu dağılımının çimento bazlı malzemeler üzerindeki etkilerini tek veya çok yönlü olarak ele almaktadır. Çimento tane dağılımı ve bunun sonucunda elde edilen inceliğin çimento harcı, otojen büzülme ve diğer özelliklerdeki etkileri üzerine etkileri çalışmalarda ele alınmıştır. [19-21]. Genel olarak, artan incelik seviyeleri, hidrasyon sırasında ısı salınımını artırır, işlenebilirliği azaltır ve su emme kapasitesini artırır. Slanička, UK'lerin inceliği ve derecesinin beton dayanım üzerindeki önemini vurgulamış ve yaptığı çalışmada, agregalar UK ile değiştirilmiş ve incelik ve dereceleme beton dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir [22]. Monzo vd. çalışmalarında F sınıfı uçucu külün değişen incelik ve dereceleme seviyelerinin UK harmanlanmış çimento harçlarının %30'luk bir değişim seviyesindeki basınç dayanımını incelemiş, UK'lerin incelik ve derecesinin artırılmasının da arttığı sonucuna varmışlardır [23]. Erdoğan ve Türker çalışmalarında farklı tane boyut dağılımı yapılan uçucu külün harmanlanmasının, farklı tane boyut dağılımı ile UK kullanımının farklı çimento özellikleriyle sonuçlandığını savunarak farklı tane boyut dağılım özelliklerini analiz etmişlerdir. 125, 90, 63 ve 45 µm partikül boyutlarına sahip altı farklı UK grubu kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımını %25 değiştirme seviyesinde araştırdılar. Referans numunelerinden ve 45 µm veya daha küçük partikül ebatlarına sahip numunelerden optimum dayanım sonuçları elde edildiğini gözlemlemişlerdir [24]. Lee ve diğ. UK ikamesinin çimento harçlarının viskozitesi üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Yazarlar, farklı partikül boyutlarını kullanarak %20 oranında bir UK değiştirme seviyesini göz önüne almış ve tane boyut artışların, yani daha büyük parçacıkların artan içeriğinin de viskoziteyi arttırdığını bulmuşlardır [25]. Bentz ve diğ. inceliğin etkisi ile ilgili UK ve çimento tane boyut dağılımını analiz etmişlerdir. Araştırmacılar, çimento ve UK için 5 farklı incelikte numuneler hazırlamıştır. Bu örnekler daha sonra %20, %35, %50 ve %65 ikame

oranlarında sıkıştırma kuvvetleri bakımından analiz edip ve en iyi sonuçlar %20 UK ikamesi içeren numuneden elde edildiği belirtmişlerdir. %20 oranında UK yerine sahip olan numunelerin basınç dayanımları %100 Portland çimentosu içeren Referanslardan daha yüksektir. Öte yandan, UK değişimi %35 olan örneklerin basınç dayanımı ise Referans örneğine yakın olarak bulunmuştur [26,27]. Sevim ve Demir 2019a ve 2019b çalışmalarında C sınıfı UK içeren çimentolu bağlayıcılarda tane boyut dağılım analizini Dinger ve Funk tarafından önerilen ve minimum tane çapını da dikkate alan formüle göre tasarlamışlardır. Yaptıkları çalışmalarda $q=0.4$ dağılım katsayısının fiziksel, mekanik ve durabilite açısından %10'luk UK ikamesi ile iyi sonuçlar elde edildiği belirtmişlerdir [28,29].

Tane boyut dağılım seçimi, farklı parçacıklar arasındaki boşlukları doldurma yeteneğine odaklanmalıdır. Bu, daha ekonomik beton karışımı tasarımları elde etmek için de önemlidir. Parçacık dağılımı ilk olarak Feret tarafından 1892'de ekonomik beton tasarımı için analiz edildi [30]. Fuller ve Thompson, 1907'de, agregaların betondaki değişim oranını tanımlarken uzun süredir tane boyut dağılım optimizasyonu için kullanılan bir teori haline getirdiler [31]. Birçok Avrupa ülkesinde, iyi dereceli ideal agrega granülometrisi, beton tasarımı için optimize edilmiştir; Bu nedenle, Fuller'in eğrisi hala kullanılmaktadır ve birçok araştırmacı, beton karışımlarını tasarlarırken bu kavramı kullanmaktadır. Örneğin, Zhao ve diğ. yüksek hacimli çelik cürufu, yüksek fırın cürufu ve çimento karışımı içeren harçları, 0.4 olarak dağıtım katsayısı olarak tasarlanan harçları deneysel olarak incelemişlerdir [32]. Corominas ve diğ. Fuller'ın dağıtım eğrisine göre farklı agrega türleri kullanarak farklı beton karışımları hazırlamış ve karışımların mekanik özelliklerini ve boşluk yapılarını incelemişlerdir [33]. Son zamanlarda, Ye ve ark., Fuller'ın partikül dağılımına yakın bir dağılım kullanarak UK, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı tozu içeren çimento macunları ile paketlemenin etkilerini incelediler [34]. Kovářík ve diğ. metakaolin / seramik grog içeren ve 0.45'lik Fuller dağılım katsayısına sahip agregalarla tasarlanan jeopolimer kompozitlerin termomekanik özelliklerini araştırdı [35].

Kapsamlı bir literatür taraması yaptıktan sonra, farklı dağılım modüllerini kullanan ve UK gibi toz halindeki malzeme derecelendirmelerinde yüksek kompasite elde etmeyi amaçlayan optimal tasarımlar üzerine bir araştırma eksikliği görülmüştür. Bu çalışma, mevcut literatürdeki bu boşluğu kapatmaya yardımcı olmak için tasarlanmıştır.

Yukarıdaki bilgiler ışığında, UK'ün tane boyut dağılımı vakumlu elek kullanılarak, eleme yolu ile karışıma girecek UK'lerin tane boyutları ve miktarları hazırlanmıştır. UK, çimento içerisine %20 ikame edilerek harç hazırlanmış, hazırlanan harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımlarına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tane dağılım katsayısı (n) belirlenmiştir. Ayrıca UK tane boyutu dağılımının çimento harçlarında sülfata karşı dayanıklılık, hızlı klor iyonu geçirimsiliği, donma-çözülme, ultrases geçiş hızı, civalı porozimetre (MIP) özelliklerine bakılarak durabilite özelliklerini incelenmiştir.



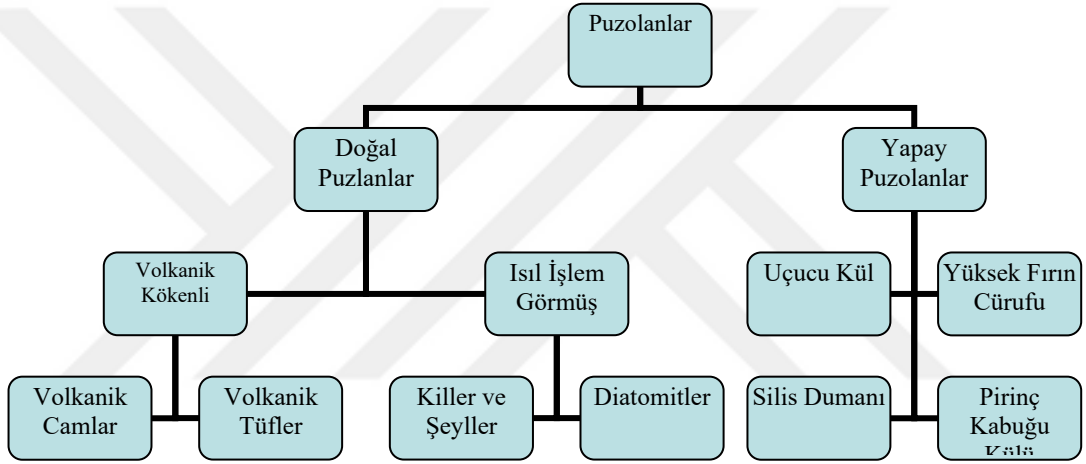
2. UÇUCU KÜLLERİN BETONDA KULLANIMI

2.1. Puzolanlar

Puzolanlar, “Tek bir malzeme olarak kullanıldıklarında bağlayıcılık özelliği olmayan, çimento veya kireç gibi bağlayıcılarla beraber kullanıldıklarında, hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özelliği kazanan malzemeler” olarak tanımlanmaktadır [36-41].

Çimento yerine ağırlıkça ikame edilen puzolanik malzemeler betonun mekanik ve durabilite gibi özelliklerini geliştirmesi, ekonomik olarak da katkı sağlayan mineral katkı malzemeleridir. [42-43].

Doğal ve yapay olmak üzere Şekil 2.1’de gösterilmektedir [44].



Şekil 2.1. Puzolanlar

Doğal Puzolanlar

TS EN 197-1 e göre puzolanlar volkanik ve tortul kayalardan oluşmuşlardır [45]. Beton teknolojisinde en çok kullanılanlar Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Doğal puzolanların kimyasal bileşimi

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

Yapay puzolanlar

Endüstride birer atık olan, beton ve çimento sektöründe kullanılan bazı yapay puzolanik malzemelerin kimyasal bileşimi Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Yapay puzolanların kimyasal bileşimi

Yapay Puzolan (%)	UK	YFC	SD
SiO ₂	51.5	40.2	93.7
Al ₂ O ₃	23.9	11.0	0.3
Fe ₂ O ₃	6.1	0.8	0.6
CaO	10.5	34.5	0.3
MgO	2.4	9.4	0.3
Alkali	3.1	3.6	0.6

2.2. Uçucu Kül

Kömür ile çalışan termik santrellerin bacalarındaki, elektro filtreler yardımıyla tutulan ve bir atık olan uçucu küllerin önemli bir kısmı Silis ve Alimünlerden meydana gelmektedir [47-48]. TS EN 450’ye, puzolanik özelliklere sahip uçucu küller kimyasal bileşimi bakımından SiO₂ ve Al₂O₃’den oluşurlar, reaktif SiO₂ bileşiminin en az %25 küresel ve ince toz küresel tanelerden oluşur [49]. Günümüzde Türkiye’de kömür ile çalışan 43 büyük ölçekli termik santral bulunmaktadır [50].

Dünyada uçucu kül üretiminin 1990’lı yıllarında başında yaklaşık %25’i değerlendirilebilmekteydi. UK değerlendirme oranları Avrupa’da %95 değerlerinde iken UK değerlendirme oranı ülkemizde %1 seviyelerindeydi. Ülkemizde UK kullanımı 2012

yılı itibariyle % 10 seviyelerine yükselmiştir. 2020 yılına kadar ise bu oranın %30 seviyelerine yükseltilmesi hedeflenmektedir [51].

Yanma özellikleri, termik santrallerde kullanılan kömür türü ve özellikleri uçucu külün fiziksel özelliklerine etki etmektedir. Tane boyutu artan uçucu külün karbon miktarı artmakta, yanma miktarı ise azalmaktadır. Tane boyutu küçüldükçe uçucu külün yanması daha iyi olmaktadır. Buna bağlı olarak da karbon miktarı azalmaktadır. Uçucu külün karbon miktarı arttığında gri renkte olan tane boyutlarının renginde koyulaşmalar olmaktadır. %75'i 45µm' den küçük olan UK tane boyutları genel olarak 1-200 µm arasında değişmektedir. Özgül yüzey alanı çimento inceliğine yakın olan uçucu külün öğütme işlemlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Yoğunluk ise UK için 2.2-2.7 g/cm³' dır [52-55].

Uçucu küllerin, kimyasal yapısına göre, ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları esas alınarak sınıflandırılır [56-57] .Uçucu külün dört ana bileşeni vardır. Bunlar; (SiO₂), (Al₂O₃), (Fe₂O₃) ve (CaO)'tir. ASTM C 618 standardına göre UK'ler F ve C sınıfı UK olmak üzere 2'ye ayrılırlar:

a) F sınıfı UK, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ > %70'den olan UK'dir. CaO <%10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da bilinirler.

b) C sınıfı UK ise, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ > %50'den olan küllerdir. CaO >%10'dan fazla olduğundan dolayı, yüksek kireçli UK olarak da bilinmektedirler [58].

UK, beton veya çimentoya ikamesinde, betonun mekanik, dayanım ve dayanıklılık gibi özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Betonlarda UK ikamesinin, betonun özelliklerine etkisi bakıldığı zaman, taze betonun su ihtiyacını, sertleşmiş betonun erken dayanımını, Hidratasyon ısını ve betonda terlemeyi azaltacak, priz süresi, işlenebilirliği ve 90 günden sonraki dayanımında artış gösterecektir [59-70]. Kütle betonlarında hidratasyon ısı çok yüksek olmasından dolayı, çimento yerine UK ikamesi ile hidratasyon ısı düşürerek rötre çatlakları engellenmektedir [71-75].

Uçucu Küllerin Fiziksel Özelliği

UK'lerin, boyut dağılımları, özgül ağırlığı, parçacık şekli büyüklüğü ve dağılımı, bileşimi, inceliği ve pozolonik aktivitesi gibi fiziksel özellikleri; betonun mekanik ve durabilite özelliklerini etkilemektedir. [76-80].

Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Özelliği

UK oluşturan ana bileşenler, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, kimyasal bileşenlerinin yüzdeleri kömürün cinsine göre farklılık gösterir. MgO , SO_3 , alkali oksitler de bulunmaktadır. UK'lerin farklı yerlerden temini kimyasal ve mineralojik açıdan farklılık gösterir [81-83].

UK'lerin içerisinde bulunan, MgO miktarı en fazla ve sodyumoksit ve potasyum oksit olarak bilinen toplam allkaliler ise, %5'in altında bulunmaktadır. SO_3 ise genellikle %2-2.5 arasında bir değerdedir. TS EN 450-2 standardı Kükürt (SO_3) < %3, kızdırma kaybı ise < %5 olarak sınırlandırılmıştır [84].

2.3. Literatür Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında yapılan literatür çalışmaları neticesinde “Tane Boyut Dağılımı Optimize Edilmiş En Yüksek Dolgu Faktörüne Göre F ve C Sınıfı Uçucu Küllerin, Çimento Harçlarına Etkisi”, tez çalışması aşağıdaki dört ana başlık üzerinde yoğunlaşmıştır.

- a) Pozolanların Kullanımı
- b) Tane Boyut Optimizasyon Yöntemleri
- c) Uçucu küllerin Taze ve Sertleşmiş Beton Üzerinde Etkileri
- d) Uçucu Külün Durabilite Özelliklerine Etkileri
- e) Değerlendirme

Yapılan tez çalışmasının amacı; Fuller-Thompson bağıntısı kullanarak F ve C sınıfı Uçucu külün tane dağılımının optimize edilmesi ve optimize edilmiş uçucu külün mekanik ve durabilite özellikleri tez çalışmasında belirlenmesi üzerinedir. Bu noktada hedeflenen araştırmaya alt yapı oluşturması için literatürde öne çıkan bilimsel çalışmalar yukarıdaki belirtilen ana başlıklar altında irdelenmiştir.

2.3.1. Pozolanların Kullanımı

Betonun karbon ayak izinin azaltılabilmesi, öncelikle beton üretiminde uçucu kül, vb. mineral katkıların, çimento veya betona ikame yöntemidir [85]. Ülkemiz enerji ihtiyacının yaklaşık olarak %28'ini bitümlü ve linyit kömürlerini yakarak karşılamakta, bu işlemler sonucu UK endüstriyel atık olarak ortaya çıkmakta, bunun yalnızca %1 ila 4'lük kısmı değerlendirilebilmektedir [86,87].

Ülkemiz hazır beton üretiminde de 2009 yılından beri Avrupa birincisidir [88]. Bu yoğun üretim ve tüketim çimento ve beton üretiminden kaynaklanan çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Beton, CO₂ salınımını azaltmada ciddi bir potansiyele sahiptir. Betonun tüketimini azaltmak nüfus artışı ve insanoğlunun ihtiyaçlarına bakıldığında azaltmak pek mümkün gözükmemektedir. Kısa dönemde ise sürdürülebilir bir endüstriyel gelişme için çevreyle ilgili endüstri üzerinde durulmalıdır. Ekolojik endüstrinin uygulanmasının yollarından biri de herhangi bir endüstrinin ihtiyacı olan ham madde yerine başka bir endüstrinin ortaya çıkardığı atık malzemelerin değerlendirilmesinden geçmektedir. Böylece her ikisinden de kaynaklanan olumsuz çevresel etkiler azaltılmış olacaktır [89].

Portland çimentosu, piyasada beton bileşenlerini en önemli ve en pahalı malzeme olması rağmen, katkılı çimento üretimi uzun süre devam etmesinin nedenlerin biri de, pozolan ikamesi ile çimento içindeki klinker miktarındaki azalma ile çimento üretimindeki yakıt miktarı ile enerji tüketimi ve CO₂ salınımının azaltılabileceği belirtilmişlerdir [90].

Endüstriyel atık niteliğindeki UK ve YFC gibi mineral pozolanik malzemeler kullanılarak, beton sektörünün çevresel etkilerinin, ürün maliyetlerinin azaltılmasını, ayrıca betonun dayanım ve dayanıklılığının artırılarak servis ömrünün uzatılmasına önemli bir katkı sağlayacaktır [91].

Termik santral atıklarından biri olan uçucu küller, günümüzde çimentolu kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan mineral katkılardan biri olup, toprak, hava, yüzeysel ve yeraltı sularının kirlenmesinde de önemli derecede paya sahiptir [92].

Uçucu külün çimentoların basınç dayanımına etkisini araştırmak için, %20, %40, %60 ve %80 oranında F ve C sınıfı UK çimento yerine ikame edilerek üretilen betonların, 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanım deneyine tabii tutmuşlardır. İkame oranları dikkate alınarak

değerlendirme yapıldığında; beton numunelerin maksimum basınç dayanımı değerleri; F sınıfı uçucu külde %20, C sınıfı uçucu külde %30 ikame oranlarında elde edilmiştir. C sınıfı uçucu külde en yüksek dayanım %40 ikame oranında elde edilirken; F sınıfı uçucu külde en yüksek dayanım %20 ikame oranında sağlanmıştır [93].

Çimentonun inceliği ASTM C618'e göre 45 mikronluk elek üzerinde kalan çimento miktarının yüzde değeri olarak tanımlanmakta ve değerin %34'den fazla olmaması istenmektedir. Çimento inceliği başta puzolanik aktivite olmak üzere, su gereksinimi, hidratasyon ısısı, mekanik dayanım gibi, çimentoda önemli bir etkiye sahiptir. Elektro filtrelerde tutulan uçucu küllerin inceliği, siklonlarda tutulanlara göre daha fazladır. Blaine değerindeki artışa bağlı olarak daha fazla uçucu külün puzolanik reaksiyona girmesi mekanik dayanımı artırır [94].

İnceliği (Blaine) 2220 ile 6040 cm²/g arasında 5 farklı Blaine değerine sahip uçucu külleri %30 oranında çimento yerine ikame ederek harç numunelerin basınç dayanımlarını incelemiştir. 2220 cm²/g Blaine değerine sahip harç numunelerin basınç dayanımları 33.5 MPa, 6040 cm²/g Blaine değerindeki harçların dayanımı ise 50.7 MPa olarak belirlenmiştir. Çimento inceliğindeki artış harç numunelerin basınç dayanımları üzerinde oldukça etkili olmuş, basınç dayanımlarını arttırmıştır [95].

2.3.2. Tane Boyut Dağılım Optimizasyon Yöntemleri

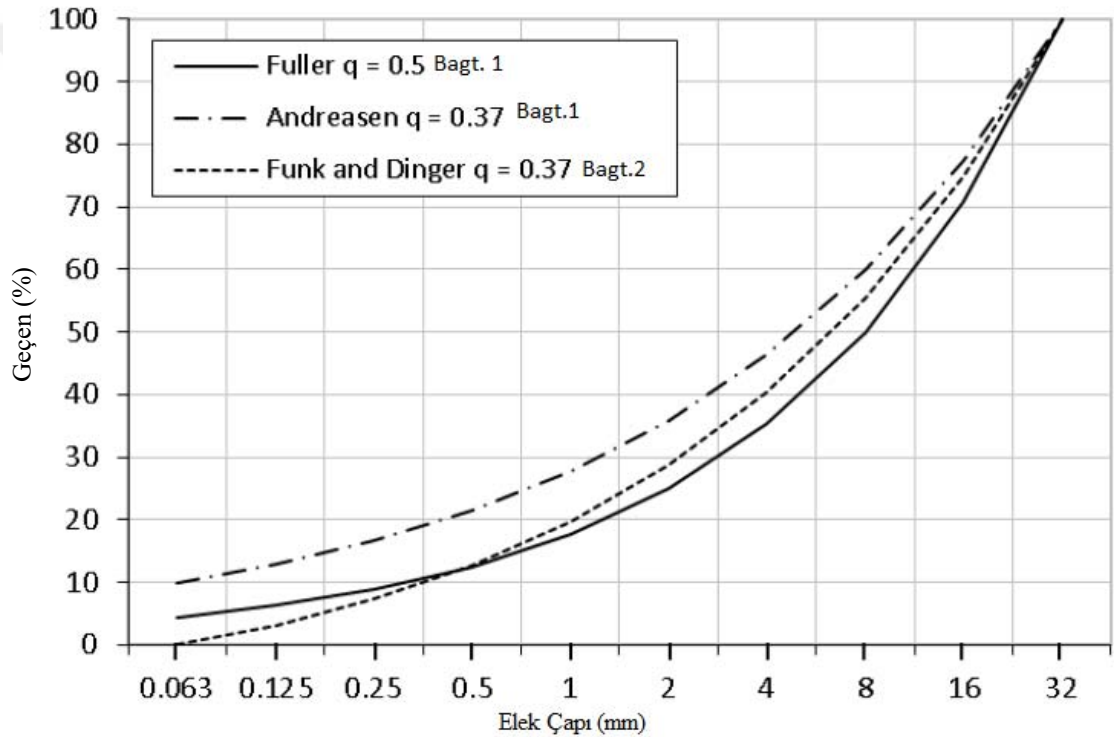
Daha ergonomik beton tasarlamak için tane boyut dağılım yapılması, betonu oluşturan bileşenlerin, boşlukları doldurulacak şekilde seçilmesi gerekir. Bunun için birçok yöntem kullanılmış olup, boşluksuz bir beton elde edebilmek ve daha ekonomik olması açısından beton tasarlamak için ilk öncelik olarak tane dağılımı konusunda çalışılmıştır [96].

Beton tasarımında, karışım oranları içerisinde ilk öncelikle optimum agrega granülometresi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmaların en bilineni, Fuller eğrisi olup, halen bazı araştırmacılar beton tasarımında Fuller eğrisini kullanmaktadır. Ayrıca, 1980 yılında Funk ve Dinger tarafından tane boyut dağılım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Funk ve Dinger'in kullandığı formüllere göre, bazı araştırmacılar özel beton tasarımında daha formülde kullanılan üç için farklı değerler önermişlerdir [97].

Tane boyut optimizasyonu yapılarak, kompasitesi yüksek ve yüksek dayanımlı beton üretiminde, özel beton tasarımı kullanılmıştır. Bu durumda optimize edilen beton bileşenlerinin, mekanik dayanımları daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir [98].

Beton tasarımında kullanılan $P=100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^q$ Bagt.1 ve $P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q}$ Bagt.2

bağıntıları q (dağılım katsayısı) Fuller-Thompson ve Andreasen ve Andersen modeli ile Funk ve Dinger tarafından yapılan araştırmalar sonucu en ideal gradasyonu optimizasyon Şekil 2.2’de verilmiştir. Agregra gradasyonu ile sıkıştırılabilirliği etkileri iyi derecelenmiş bir gradasyona sahip karışımlar için bütün amaçların (en büyük birim ağırlık, yeterli stabilite, geçirimsizlik, vb.) elde edilebileceğini vurgulamışlardır.



Şekil 2.2. Fuller-Thompson ve Andreasen ve Andersen modeli ile Funk ve Dinger tarafından yapılan araştırmalar sonucu, q dağılım katsayısının en ideal gradasyon optimizasyonu

Agregra gradasyonu üzerinde çalışan araştırmacılardan Fuller-Thompson ve Andreasen ve Andersen modeli ile Funk ve Dinger ideal bir agregra tane dağılım eğrisine göre tasarımların en ideal sonucu vereceğini ifade etmişlerdir [99,100].

Beton üretiminde çimento gradasyonu da önemlidir. Hidratasyon ısını artmasının sebeplerinde biri çimentonun inceliğidir. İnceliğin artması ile hidratasyonun hızlanması

ile betonun dayanım kazanma hızı da artmaktadır. Tipik olarak çimentonun maksimum tane boyutu 50 mikron civarında olup, %10-15'i 5 mikronun altında ve %3'ü 1 mikrondan daha küçüktür. 28 günlük dayanımlar çapı 3-30 mikron arasındaki parçacıkların oranından etkilenirken, çapı 3 mikrondan daha küçük parçacıkların oranı, 1 günlük dayanımları da büyük oranda etkiler. 60 mikrondan daha büyük taneler ise, dayanıma az katkıda bulunur. Buna bakılarak UK inceliğinin de beton üretiminin dayanımına olumlu etkisi olacağı belirtilmiştir [101].

UK tanelerinin çapları 1-150 mikron arasında olup, UK'lerin inceliği, çimento ve kireçten daha incedir [102].

Çimento yerine uçucu külü ikame edilen çimento hamuru uçucu külün granülometrisi ile değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucunda UK tanelerinin çapının artmasıyla işlenebilirlik azaldığı görülmüştür. UK boşluk dağılımı işlenebilirlik için önemli bir fonksiyon olduğu belirtilmiştir [103].

Kömür yakılarak elde edilen UK tanelerinin %70'i 70 mikron çapından küçüktür. Bu oran yaklaşık olarak çimentonun tane dağılımına benzerdir. Genel olarak uçucu külün tanelerinin %70'i 45 mikronluk elekten geçebilir ve 3 mikron çapından da küçük olabilirler. Yanmamış kömür taneleri genellikle 100 mikron çapından büyüktür. F sınıfı uçucu külün blaine inceliği 300-400 m²/kg'dır [104].

Tane boyut dağılımı, beton agregalarının hangi oranlarda karıştırılacağıının belirlenmesinde uzun süredir kullanılan yöntemdir. Ancak bağlayıcı veya filler malzemelerin karışım miktarlarının belirlenmesinde kullanımı oldukça yenidir.

Mueller vd. [105] yaptıkları, kendinden yerleşen betonlarda hem agregalarda hem de filler malzemelerde tane dağılımı performans çalışmasında, Modifiye edilmiş Andreasen & Andersen Model ile $q=0.27$ dağılım katsayısı değeri ile düşük filler malzeme ile üretilmesi hedeflenen kendiliğinden yerleşen betonda tane dağılımı için uygun olduğunu yaptıkları çalışmalarda belirtmişlerdir.

Wang vd., [106] yaptıkları çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonlarda Modifiye edilmiş bir Brouwers partikülü karışım tasarım algoritması önerilmişler ve dağılım

katsayısının $q=0.23-0.29$ arasındaki değerlerinin uygun olduğu belirtilerek bağlayıcı miktarının %20 azaltarak sonuçlarının iyi olduğunu ifade etmişlerdir.

Yu vd., [107-108] Ultra-Yüksek Performanslı Betonun (UHPC) geliştirilmesine yönelik olarak verimli çimento ve mineral katkıların kullanımı incelenmişlerdir. Modifiye edilmiş Andreasen & Andersen Modelini kullanarak Yüksek performanslı çimentolu kompozitler için ise $q=0.23$ dağılım katsayısı bularak UK gibi puzolanların hidrasyonu reaksiyonlarını ve mekanik dayanımların arttığını yaptıkları çalışmalarda belirtmişlerdir.

Sevim and Demir [109,110] Yüksek kompasiteli çimentolu sistemlerde UK tane boyut dağılımı ile yaptıkları çalışmada, Funk ve Dinger öngördüğü fomulazyona göre $q=0.4$ dağılım katsayısında, en iyi mekanik dayanımı elde ettiklerini, uçucu külün %10 optimize edilmemiş yerine %20 optimize UK kullanmanın mümkün olabileceğini çimento harçlarında geçirimsizlik gibi fiziksel özelliklerinde iyileşmeler olduğunu belirtmişlerdir.

Bentz vd. [111-112] Sürdürülebilir beton için çimento ve UK için tane boyut optimizasyonu ve yüksek hacimli UK ikameli çimento tanelerinin optimizasyonu çalışmasında, UK ikameli çimentoların özelliklerini değerlendirmeye odaklanmışlardır. UK'ün hacimsel oranlarının; çimento ile çimento ve UK'ün ayrı ayrı tane boyut dağılımı, priz sürelerini, ısı salınımı, mukavemet ve otojen defarmasyon gibi çeşitli performans etkileri üzerinde inceleme yapmışlardır. Üç bağımsız değişkenin her birini dört farklı seviyede incelemişler ve gerekli karışım sayısını 64'den 16'ya düşürmek için kesirli bir faktöriyel deneysel tasarımı kullanmışlardır. En idel karşılaştırmayı sağlamak için sabit hacimde çimento hacmi hazırlamışlardır. Çalışmanın temel amacının, UK ikameli çimento harçlarının, %100 portland çimento harçlarının eşleşip eşleşmeyeceğini değerlendirmişlerdir. Sonuçta çimento ve uçucu külün tane dağılımlarının uygun seçilerek, hacimsel olarak, yer değiştirmenin %20 UK ikameli çimento harçlarında performans hedefine kolayca sağladığı, çimento içeriğinde %35 UK ikamesinin ise hedef dayanımlara yaklaştığını belirtmişlerdir.

2.3. Uçucu Külün Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkileri

Crow ve Dunstan, “Farklı sınıflı UK İkameli Beton Özellikleri” ile ilgili çalışmışlardır. Bu çalışmaya göre, $CaO < \%10$ 'dan düşük UK içeren betonun UK ikamesiz betonuna göre daha az hidrasyon ısıyı açığa çıkardığını fakat CaO miktarı $> \%10$ dan UK içeren

betonun referans alınan betondaki hidartasyon ısısına yakın ısı açığa çıktığı belirtmişlerdir [113].

Dhir, R. K. ve Jones, M. R, betonda UK, kullanımının klorür geçirimliliği üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu araştırma sonucuna göre, UK kullanılarak üretilen betonların klorüre karşı dayanıklılıklarının sadece portland çimentosu kullanılarak üretilen betonlara göre 2 ile 4 kat arttığı ifade edilmektedir. Bunun da çimento ile %30 ikame oranının optimum seviye olduğu ifade edilmiştir. İşlenmiş veya ultra ince uçucu külün ise klorür geçirimliliğini azaltmada çok daha fazla etkili olduğunu ifade etmişlerdir [114].

Chalee, W., vd., UK ikameli betonunun uzun ömürlü, tasarım analizi için deniz ortamında yaptıkları çalışmada, UK kullanılarak üretilen betonların uzun süreler boyunca (7 yıl) yüksek nem, sıcaklık ve deniz koşulları gibi zorlu koşullardaki özelliklerini incelemiştir. Artan UK ikame oranının klorür geçirimlilik katsayısını ve donatı korozyonunu oldukça azalttığını gözlemlemiştir. %25-50 oranında UK ikameli, 0.6 su/bağlayıcı oranında ve 5 cm pas payı ile betona gömülü donatılarda 7 yıl sonunda bu zorlu koşullarda donatıda pasın oluşmadığı tespit edilmiştir. S/B oranı 0.45 iken çok daha iyi sonuçlar ortaya çıktığını belirtmişlerdir [115].

Wang D.vd., UK (FA) ve silis dumanı (SF) içeren betonun donma-çözülme ve sülfat saldırısına karşı durabilitesi bu makalede incelenmiştir. Portland çimentosunun (PÇ'nin kısmi olarak değiştirilmesi) FA (ağırlıkça% 10, % 15 ve% 25) ve SF (yani ağırlıkça% 5, % 8 ve% 11) içeren w/b 0.38 ve 0.33 olan betonlar, donma-çözülme döngülerini de % 5 ve % 10 sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmıştır. Betonların bozulmaya dirençli basınç dayanımı katsayısı, göreceli dinamik elastik modülü (RDEM) ve mikroyapısı dâhil olmak üzere performans, sodyum sülfat çözeltisinde belirli donma-çözülme döngülerine tabi tutulduktan sonra değerlendirme yapmışlardır. %5 sodyum sülfat çözeltisine maruz kaldığında, hem FA hem de SF'nin betonun sülfat saldırısına karşı direncini artırabildiği ve SF'nin FA'dan daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Betondaki bozulma donma-çözülme ve sülfat atağı arasındaki etkileşime bağlanmıştır. Katkısız betona gelince, donma-çözülme ve sülfat saldırısına karşı direnci 125 donma-çözülme döngüsüne kadar arttığını ve daha sonra azaldığı belirtmişlerdir. Ağırlıkça % 25 FA ve % 5-8 SF ikame seviyesi, betonun donma-çözülme ve sülfat saldırısına karşı direncinde önemli gelişmeler sağladığını belirtmişlerdir. %10 sodyum sülfat çözeltileri, betonun

donma çözölme direncinin %5 sodyum sülfat çözeltilerine kıyasla optimize çimento yerine % 25 FA ile iyileştirirken, %5 ve %10 sodyum sülfat çözeltisi, betonun donma-çözölme direncinde karşı iyileşmeler olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, ağırlık olarak %25 UK ve %5-8 silis dumanı ikame edilmesi betonun donma-çözölme ve sülfat saldırısına karşı direncini artırdığı ifade etmişlerdir [116].

Lane and Best, betonda kullanılan, UK ikameli çimentolu bağlayıcıların kullanımı ve özellikleri ile ilgili çalışmada, en önemli özelliğinin uçucu külün inceliği olduğunu ve mekanik ve durabilite gibi özelliklerin incelenmesinde, kullanılan uçucu külün inceliğine bağlı olduğu yaptıkları araştırmada ifade etmişlerdir [117].

Yuan and Cook'un yaptığı; C sınıfı UK ikameli betonda yaptıkları çalışmada, w/c oranını 0.45 olarak sabit tutmuşlardır. %20, %30 ve %50 C sınıfı UK ikame oranlarında, 28 günden sonra, referans numuneyi yakaladığı ve hatta bazı ikame oranlarında dayanımı geçtiğini tespit etmişlerdir [118].

Şengül vd. yaptıkları, yüksek oranda UK içeren normal ve yüksek dayanımlı betonların klor geçirimsizliği çalışmasında, uçucu külleri öncelikle öğütme işlemine tabii tutmuşlardır. Öğütölmüş %30 UK ikameli betonların basınç dayanımının ikamesiz betona göre daha yüksek çıktığını gözlemlemişlerdir [119].

Mangat ve Khatib, portland çimentosunu farklı ikamelerle, UK, silis dumanı veya öğütölmüş granöl yüksek fırın cürufu içeren betonun sülfat direnci üzerine bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada %22 ve %32 UK ikameli betonlarda sülfata karşı dayanıklılık testine tabii tutmuşlardır. Örnekler, 14 gün normal kürlenmiş ve ardından sülfat çözeltisi küründen önce farklı sıcaklıklar (20 ve 45°C) ve nem (%25, 55 ve yaklaşık yüzde 100) altında bekletilmiştir. Sonuçlar, ağırlıkça %22 ve %32 oranında uçucu külün çimento ile değiştirilmesinin maksimum sülfat direncini ürettiğini; başlangıçta nemli hava ile sertleşen numunelere kıyasla, hava bakımlı numunelerin sülfat direnci daha üstün olduğunu belirtmişlerdir. %5 ile 15 silika dumanının dâhil edilmesi sülfat direncinde büyük bir iyileşme ile sonuçlandığını, çimentonun öğütölmüş yüksek fırın cürufu ile %80 oranında değiştirilmesi betonun sülfat direncini artırırken, %40 oranında değiştirme ise tam tersi bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir [120].

Tikalsky ve Carrasquillo yaptıkları, UK ikameli betonlarda sülfat direnci üzerindeki çalışmalarda, beton numunelerinin 18 ay boyunca sürekli olarak %10'luk bir sodyum sülfat çözeltisinde bekletmişlerdir. Tip II portland çimentosunun yerine, 18 ay boyunca C sınıfı ve F sınıfı UK kullanılmıştır. UK ikameli betonun, sülfat direnci üzerindeki çalışmasının yanında, çökme, hava içeriği, çimento tipi ve nemli kürlenme üzerine araştırma da yapmışlardır. Bu araştırma sonuçlarına göre, UK ikameli beton numunelerinin, sülfat direnci üzerindeki fiziksel etkileri üzerinde baskın olduğunu, C sınıfı uçucu küllerin sülfata karşı dayanıklılığını azaltırken, F sınıfı uçucu küllerin sülfata karşı direncinin arttırdığını ifade etmişlerdir [121].

Fidjestol, UK ikameli betonların organik asitlere karşı dayanıklılığı ile ilgili yaptığı çalışmada, UK ikameli betonların, asitlere karşı dayanıklılığı arttırdığını gözlemlemişlerdir [122].

Saha A. K. yaptığı F sınıfı UK ikameli betonlarda durabilite özelliklerine etkisi çalışmasında, F sınıfı UK ikamesiyle 28 günden sonraki basınç dayanımı normal betonun basınç dayanımından daha düşük ve F sınıfı UK miktarının artmasıyla basınç dayanım değerinin daha da düştüğünü ifade etmişlerdir. 180 gün sonra %30-%40 ikamelerin zamanla basınç dayanımının arttığını bununla puzolanik reaksiyon ile etkili olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu küllü betonların daha düşük su emiciliği sahip olduğunu ve 28 ve 180 günlük sertleşmiş betonun daha düşük klorür geçirgenliği sergilediği bu olayında alkali bağlanma F sınıfı UK'lerin beton içerisindeki boşlukları doldurduğunu belirtilmiştir [123].

Moghaddam, F. vd., UK inceliğinin ikame edilmiş çimento macunlarının hidrasyon ısı, mikroyapı, akış ve basınç dayanımı üzerine etkisi üzerine yaptıkları çalışmada, UK'ün inceliğini arttırmakla birlikte kalsiyum hidroksit tüketimi 28 günde artmıştır. İnce dereceli UK içeren UK ikameli çimento hamurları, her iki çimento değiştirme seviyesindeki (%20 ve %40) daha kalın dereceli uçucu külden daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Sistemde daha fazla CH tüketerek ve daha fazla ikincil CSH jeli üreterek daha ince dereceli UK için gözlenen hızlı puzolanik reaksiyon, daha kalın dereceli UK içeren karışıma kıyasla mikro-yapıyı daha yoğun hale getirmekte ve böylece XRD ve SEM sonuçlarının destekleyerek basınç dayanımını arttırdığı belirtilmiştir [124].

Beton içerisindeki donatıların paslanması durumunda, donatının hacmi genişleyecek ve donatılara paralel bir şekilde betonarme yapıda çatlaklar meydana gelecektir. Beton çatladıktan sonra, dış etkilere maruz kalacaktır. Yapı elemanları hızlı bir şekilde ömrünü dolduracaktır [125].

Çil, İ., araştırma yaptığı, betonarme donatısında elektriksel yöntemlerle korozyon ölçümü ile ilgili çalışmada, çimentolu sistemlerde, sülfat iyonları beton içerisine nüfuz ederse, betonun zamanla bozulmasına sebep olur. Beton içerisinde sülfat saldırısı, alüminli ve kalsiyumlu tepkimeye girerek, etrenjit ve alçı taşı oluşturacaktır. Sülfat saldırısına maruz bir betonda, genleşme meydana gelerek, beton içerisindeki çatlak, agrega-çimento arayüzünün etkileyerek beton mukavemetinin azalmasına, betonda beyaz lekelenmeler ve dökülmeler olacaktır [126].

Aköz, F., vd.'lerin, sodyum sülfat çözeltisinin, silis dumanı olan ve olmayan harçların sülfat direnci üzerindeki etkileri çalışmada, beton dayanımı etkilenmesi önlemek ve genleşmenin zamana bağlı olarak değişmesini önlemek amacı ile, alçıtaşından oluşturacağı SO_3 miktarı çimentonun ağırlığının %3 ile sınırlandırılmıştır [127].

Neville, A.M yaptığı, betona sülfat saldırısının karışık yapısı çalışmada, C_3A ve alçı taşının birleşmesiyle oluşan etrenjit yapısı oluşur, bu etrenjit yapısında 32 molekül suyu bulunması sebebi ile beton içerisinde geniş bir hacim kaplar ve bu hacim artışı betonda çatlakların oluşmasına sebep olacaktır. Ayrıca uzun süre sülfat etkisinde kalacak bir betonun sülfat oluşumunu engellemek için C_3A bileşen oranının %5'in altında olması sülfata karşı daha dayanıklı olacaktır [128].

C_3A Bileşeni %5'in altında çimentolar dışında, puzolanik ikameli çimentolarda ile de sülfat tesirine karşı yüksek mukavemetli, beton eldir. Normal çimentolar ile puzolanik ikameli çimentolar karşılaştırıldığı zaman, puzolanik ikameli çimento hamurunun kimyasal saldırılara karşı daha dayanıklı olduğu, geçirimsizliği düşük bir beton elde edilmesi, puzolanik malzemelerin ileri yaşlarda düşük klinker içeriğiyle tepkimeye girmesiyle ilişkilidir [129,130].

Betonda UK, silis dumanı, metakaolin kullanımının klorür geçirimsizliği üzerine etkisini araştırmışlardır. UK kullanılarak üretilen betonların klorüre karşı dayanıklılıklarının sadece portland çimentosu kullanılarak üretilen betonlara göre 2 ila 4 kat arttığı ifade

edilmektedir. Bunun da çimento ile %30 ikame oranının optimum seviye olduğu ifade edilmiştir. İşlenmiş veya ultra ince uçucu külün ise klorür geçirimsizliğini azaltmada çok daha fazla etkili olduğunu söylenmiştir [131].

Uçucu kül kullanılarak üretilen betonların uzun süreler boyunca (7 yıl) yüksek nem, sıcaklık ve deniz koşulları gibi zorlu koşullardaki özelliklerini incelemiştir. Artan UK ikame oranının klorür geçirimsizlik katsayısını ve donatı korozyonunu oldukça azalttığını gözlemlemiştir. %25-50 oranında UK ikameli, 0.6 su/bağlayıcı oranında ve 5 cm pas payı ile betona gömülü donatılarda 7 yıl sonunda bu zorlu koşullarda donatıda pasın oluşmadığı tespit edilmiştir. S/B oranı 0.45 iken çok daha olumlu sonuçların elde edildiği ifade edilmektedir [132].

UK inceliğinin klorür geçirimsizliği üzerine etkisini incelemiştir. Bunun için orijinal boyutta, %45 ve %10 incelikte uçucu küller çalışma kapsamında kullanılmıştır. ASTM C 1202 hızlı klorür geçirimsizliği deneyi ve NaCl emdirme deney yöntemleri kullanılarak klorür geçirimsizlikleri 28 gün standart kür sonrası araştırılmıştır. Sonuç olarak, yapılan çalışmada Coulomb cinsinden klorür geçirimsizliği sonuçlarının UK kullanımı ve uçucu külün inceliğinin artmasıyla oldukça azaldığı ifade edilmektedir [133].

Betonun iç bünyesinde oluşabilecek kılcalıklar gözle görülemeyecek kadar küçük boşluklardır. Bu boşlukları doldurabilmek ancak ince taneli malzemeler kullanılarak, bu kılcal boşluklar doldurulabilir. Kılcal boşlukların doldurulması ile betonu dışından gelen her türlü fiziksel ve kimyasal olaylara karşı koruyacak ve geçirimsiz daha az beton elde edilmiş olacaktır. Bu sayede betonun dayanımında zamanla azalma olmayıp, beton servis ömrünü artıracaktır [134].

Beton ve diğer çimento esaslı malzemelerin üretiminde kullanılabilecek atık malzemelerin araştırılması konusunda günümüze kadar dikkate değer oranlarda çalışmalar yapılmıştır ve bunlar içerisinde termik santral atığı olan uçucu küllerin kullanımı yaygındır. Çimento içerisine UK ikamesi ile hidrasyon sonucu ortaya çıkacak olan, serbest kireci hem azaltmakta hem de tepkimeye girerek kalsiyum silikat hidrate (C-S-H) jellerine dönüştürmekte ve betonun dayanıklılığını (durabilitesini) artırmada da fayda sağlamaktadırlar [135].

UK ikameli çimento ve beton üretiminde; UK'nın en önemli özelliğinde biride UK'nın inceliği olduğunu ve UK ikameli betonların dayanım ve durabilite gibi bazı özellikleri kullanılan UK'nın inceliğine bağlı olduğu yapılan araştırmalarla ortaya çıkartılmıştır [136].

Atık PET hafif agrega (WPLA) içeren çimentolu kompozitin ısı iletkenliği, basınç dayanımı ve ultrasonik dalga hızı yapılan bir çalışmada, çimento kompozitlerin ultrases geçiş hızı üretilen numunelerin boşluk yapısına, dolayısıyla yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır [137].

Beton yapıların Ultrasonik test çalışmasında ve sürekli yüksek sıcaklıklarda betonun termal özellikleri yapılan çalışmada, betonun kompasitesi azalması ve beton yoğunluğu düştükçe, ultrases geçiş hızının azalacağını ifade etmişlerdir [138-139].

Neville ve Brooks ile Jones ve Gatfield betonda ultrasonik test ölçümlerinde yapılan çalışmalarda, betonun kalitesinin, ultrases geçiş hızının 4.1 - 4.7 km/sn değerlerinde olması gerektiğini ifade etmişlerdir [140-141].

2.4. Değerlendirme

Beton gibi kompozit malzemelerin mukavemeti bileşenlerinin oluşturduğu boşluklarla doğrudan ilişkilidir. Genel olarak malzemelerde boşluk oranın fazla ise su emmesi fazla olur. Bu durum da basınç dayanımı düşürür.

Beton içinde bulunan agregaların kompasitesi büyük olduğu takdirde beton kompasitesi de büyük olacaktır. Beton kompasitesi ile betonda kullanılan agregaların kompasitesi arasında doğru orantılı bir ilişki söz konusudur. Agreganın granülometrisinin bileşimi de agreganın kompasitesini oluşturur. Farklı boyutlarda tanelerin agreganın içerisinde bulunmasıyla oluşan agreganın granülometrisi sayesinde beton gibi sabit bir hacimde bulunan agreganın tanelerinin aralarında daha az boşluk oluşmakta böylelikle beton doluluk oranı artmaktadır. Çimento dozajı üzerinde agreganın kompasitesinin de önemli bir etkisi bulunmaktadır. Agreganın kompasitesi düşük olursa beton içerisindeki boşluk miktarı da fazla olacağından oluşan bu boşlukları çimento hamuru dolduracaktır. Bu durum çimento miktarının artmasına sebep olması nedeniyle maliyeti ve durabiliteyi olumsuz yönde etkileyecektir. Agreganın granülometrisinin doğru seçilmesi kaliteli beton üretimi ve

çimento dozajının optimum seçilebilmesi için anahtar rol oynamaktadır. Puzolan malzeme için de agrega gradasyonunda olduğu gibi benzer bir durum söz konusudur. Agrega gradasyonu göz ardı edildiğinde nasıl ki beton kompasitesi olumsuz etkileniyorsa puzolan gradasyonu da dikkate alınmaz ise beton kompasitesi bu durumdan olumsuz etkilenecektir. Betonda hidratasyon ürünleri boşlukları tamamen dolduramayacağından üretilen betonun boşluk oranı fazla olacaktır. Puzolanların gradasyonu iyi yapıldığı takdirde kimyasal ürünler taneler arası boşlukları daha iyi dolduracaktır. Üretilen betonun boşluk miktarı az olacağından beton durabilitesi ve beton basınç dayanımı olumlu yönde etkilenecektir.

Bu bilgiler ışığında bu çalışmada betonda en yüksek hacimli UK ikame elde edebilmek için tane boyut dağılımı tasarımları yapılmıştır. Bu tasarımda Fuller-Thompson modeli seçilmiştir. Bu modele göre optimum oranda seçilen malzemeler sayesinde yoğunluğu yüksek ve boşluk oranı düşük bir matris elde edilmiştir. Bu sayede betonun mekanik performansı artırılmıştır.

Beton tasarımının ekonomik hale getirilebilmesi için geçmişten bugüne farklı tane boyutları kullanılarak beton üretimi yapılmıştır. Büyük taneler arasındaki boşlukları doldurmak ve beton doluluk oranını yukarılara çıkartmak için tane boyut dağılımı belirlenir. Betonda kullanılacak agregaların karışım oranlarını belirlemek için Fuller-Thompson yöntemi kullanılmaktadır. Avrupa ülkelerinin bir çoğunda beton tasarımı için agrega granülometreleri üzerinde uzun yıllar çalışmalar yapılmış ve betonda kullanılacak optimum granülometri belirlenmiştir. Bu sebeple beton ve malzeme üzerine çalışan araştırmacılar halen Fuller eğrisini kullanmaktadırlar. Yirminci yüzyılda yaşanan en önemli gelişme Funk ve Dinger' in geliştirdiği asgari partikül boyutu işleminin yapılmasıdır. Günümüzde ise süper akışkanlaştırıcı katkıların bulunması ve kullanımıyla yüksek miktarda dolgu içeren beton tipleri ve tane dağılımı optimizasyonuna yeni bir boyut kazandırmıştır. Atık malzemelerin de beton içerisine ikame edilmesi yoluyla çevresel olumsuz etkilerin azaltılması fikri tane boyutu optimizasyonunda yeni çalışmaların ve araştırmaların kaynak fikrini oluşturmuştur. Araştırmalar sonucunda oluşturulan formüller yardımıyla betonda kullanılan agregalar için yüksek doluluk oranları belirlenmiştir fakat beton içerisinde UK v.b. malzemeler için en yüksek hacmi sağlayacak çalışmalar henüz yeterli düzeyde değildir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, UK'ün tane boyut dağılımı vakumlu elek kullanılarak, eleme yolu ile karışıma girecek UK'lerin tane boyutları ve miktarları hazırlanmıştır. UK, çimento içerisine %20 ikame edilerek harç hazırlanmış, hazırlanan harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımlarına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tane dağılım katsayısı (n) belirlenmiştir. Ayrıca UK tane boyutu dağılımının çimento harçlarında sülfata karşı dayanıklılık, hızlı klor iyonu geçirimsizliği, donma-çözülme, ultrases geçiş hızı, civalı porozimetre (MIP) özelliklerine bakılarak durabilite özelliklerini irdelenmiştir.

3.1. UK İkameli Çimentolu Harçlarının Özellikleri

Bu bölümde; elek boyutları 0-20, 20-38, 38-45, 45-53, 53-63 mikron aralıklarında F ve C sınıfı uçucu küllerin, vakumlu elek ile tane boyutları optimize edilerek, UK'ün optimizasyonu normal beton tasarımında kullanılan Fuller-Thompson $P=100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n$ bağıntısı kullanılarak tane dağılım katsayısı (optimizasyon) bulunmuştur.

Tane katsayısı n'nin aldığı değerler içinde malzemelerin yüzde oranları belirlenmiştir. n'nin aldığı değerlere göre tane dağılımı optimizasyonu yapılmış çimento harçları üretilmiştir. UK'lerin her biri için, dağılım katsayısı $n=0.3$ ile $n=0.6$ arasında 0.05 hassasiyetle artırılarak optimum tane dağılımı n dağılım katsayısına göre belirlenmiştir. En uygun iki değer arasında hassasiyet 0.02'ye indirilerek optimum tane dağılımı belirlenmiştir.

Dağılım katsayısının sayısal değeri arttıkça karışım daha iri, azaldıkça daha ince bir karışıma dönüşmektedir. Tane dağılımı için tane çapı 0-63 mikron alınmıştır.

Belirlenen optimum tane boyut dağılımına göre %0-%60 aralığında %5 artırılarak, UK çimento yerine ikame edilmiş olup, TS EN 196-1 'e göre F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir.

3.2. Kullanılan malzemelerin Özellikleri

Çalışmanın ilk aşamasında, Fuller-Thompson metoduyla üretilecek çimento harcı karışımlarında kullanılması planlanan malzemeler temin edilmiştir.

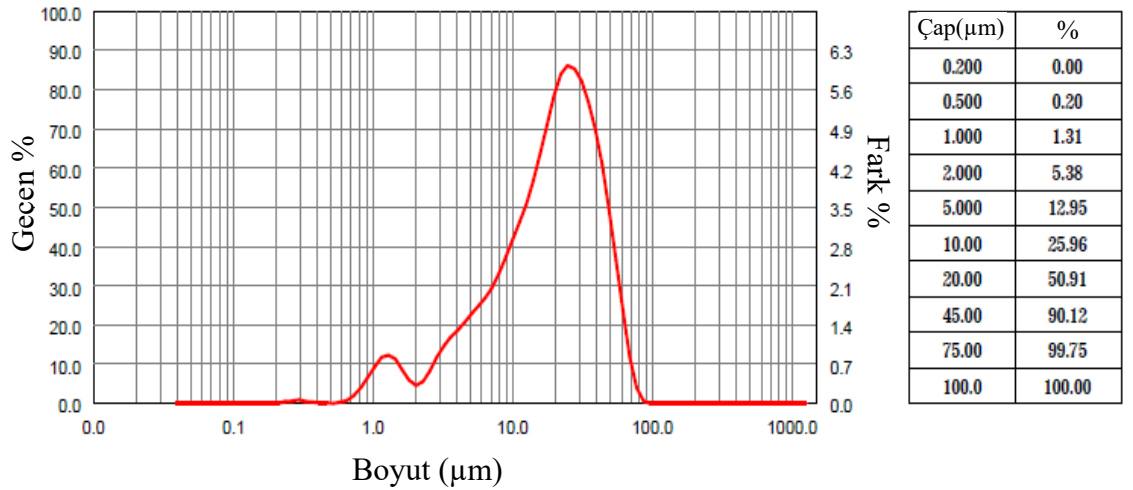
Portland çimentosu

Yapılan bu çalışmada TS EN 197-1'e uygun, CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de fiziksel ve kimyasal bileşenlerinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I 42.5 R çimentosu fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)		Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	21.13	Yoğunluk (g/cm ³)	3.14
Al ₂ O ₃	5.27	Blaine inceliği (cm ² /g)	3366
Fe ₂ O ₃	3.23	Kızdırma Kaybı (%)	2.47
CaO	61.98		
MgO	1.96		
Na ₂ O	0.37		
K ₂ O	0.83		
SO ₃	3.11		
Na ₂ O + 0.658 × K ₂ O	0.916		

Çimentonun özgül ağırlıkları çimento tiplerine göre değişmektedir. Genellikle normal çimentoların özgül ağırlıkları 3.10-3.15 arasında değişmektedir. Katkılı çimentolarda ise 2.90 civarlarında değişmektedir.



Şekil 3.1. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen CEM I 42.5 R çimentosunun tane dağılımı

F sınıfı ve C sınıfı uçucu küller

F sınıfı ve C sınıfı UK'ler ASTM C618 – 15 “Coal Fly Ash and Rawor Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete” belirtilen standarda göre temin edildi. Kullanılan uçucu küllerin tane boyut analizine göre fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Boyutlarına göre F sınıfı UK’ün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Oksitler (%)	Reference*	0-20 µm	20-38 µm	38-45 µm	45-53 µm	53-63 µm
SiO ₂	60.74	59.66	60.12	59.69	60.09	61.25
Al ₂ O ₃	20.47	22.23	21.50	21.44	20.78	19.81
Fe ₂ O ₃	10.05	10.16	9.76	9.64	9.96	10.06
CaO	1.33	1.32	1.34	1.55	1.62	1.89
MgO	2.09	2.18	2.15	2.13	2.11	2.08
SO ₃	0.16	0.16	0.18	0.17	0.22	0.30
Na ₂ O	0.48	0.54	0.54	0.53	0.53	0.49
K ₂ O	2.47	2.72	2.64	2.59	2.51	2.36
Fiziksel Özellikler						
Blaine inceliği (cm ² /g)	2240	2760	2580	2460	2190	2115
Kızdırma Kaybı (%)	1.53	2.28	1.84	1.73	1.58	1.46

Çizelge 3.2 ‘ye göre, bütün elek boyutları SiO₂+ Al₂O₃+ Al₂O₃ > %70 büyük olduğu görülmektedir. CaO yüzdesinin F sınıfı UK’ün tane boyutunu büyümesi veya küçülmesi çok fazla bir şekilde kimyasal özelliklerini etkilemediği göstermektedir. Sadece boyut büyüdükçe CaO miktarı kısmen artmıştır.

Çizelge 3.3. C sınıfı UK fiziksel ve kimyasal özellikleri

Oksitler (%)	Reference*	0-20 μm	20-38 μm	38-45 μm	45-53 μm	53-63 μm
SiO ₂	23.60	23.05	26.02	24.31	24.73	23.11
Al ₂ O ₃	12.29	14.51	11.75	17.34	10.97	10.08
Fe ₂ O ₃	5.27	5.22	5.98	5.94	5.01	5.03
CaO	30.80	32.56	36.01	38.91	38.02	41.02
MgO	2.85	2.45	2.05	2.13	2.23	2.86
SO ₃	15.92	15.64	17.31	17.34	18.32	11.49
Na ₂ O	0.17	0.23	0.21	0.28	0.23	0.19
K ₂ O	0.68	0.78	0.82	0.94	0.92	0.86
Fiziksel Özellikler						
Blaine inceliği (cm ² /g)	3550	3935	3610	3510	3295	3180
Kızdırma Kaybı (%)	3.74	3.93	3.69	3.72	3.69	3.58

Çizelge 3.3'e göre, bütün elek boyutları SiO₂+ Al₂O₃+ Al₂O₃ > %50 küçük olduğu görülmektedir. CaO yüzdesi F sınıfı UK' ün tane boyutlarının büyümesi veya küçülmesi çok fazla bir şekilde kimyasal özelliklerini etkilemediği göstermektedir. Sadece boyut büyüdükçe CaO miktarı kısmen artmıştır.

Çizelge 3.4. F sınıfı UK'ün n tane dağılım katsayılarına göre kimyasal analizi

Oksitler (%)	Tane Katsayısı (n)										
	0.3	0.35	0.37	0.39	0.4	0.41	0.43	0.45	0.5	0.55	0.6
SiO ₂	60.5	60.4	60.35	60.28	60.28	60.24	60.23	60.2	60.1	60.55	62.35
Al ₂ O ₃	20.61	20.72	20.77	20.85	20.85	20.89	20.9	20.93	21.04	21.43	22.06
Fe ₂ O ₃	9.95	9.93	9.92	9.92	9.92	9.91	9.91	9.9	9.89	9.95	10.26
CaO	1.75	1.74	1.73	1.71	1.71	1.71	1.71	1.7	1.68	1.69	1.72
MgO	2.11	2.11	2.11	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.15	2.21
SO ₃	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.2	0.2
Na ₂ O	0.51	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.54	0.55
K ₂ O	2.48	2.5	2.51	2.52	2.52	2.52	2.53	2.53	2.55	2.6	2.68

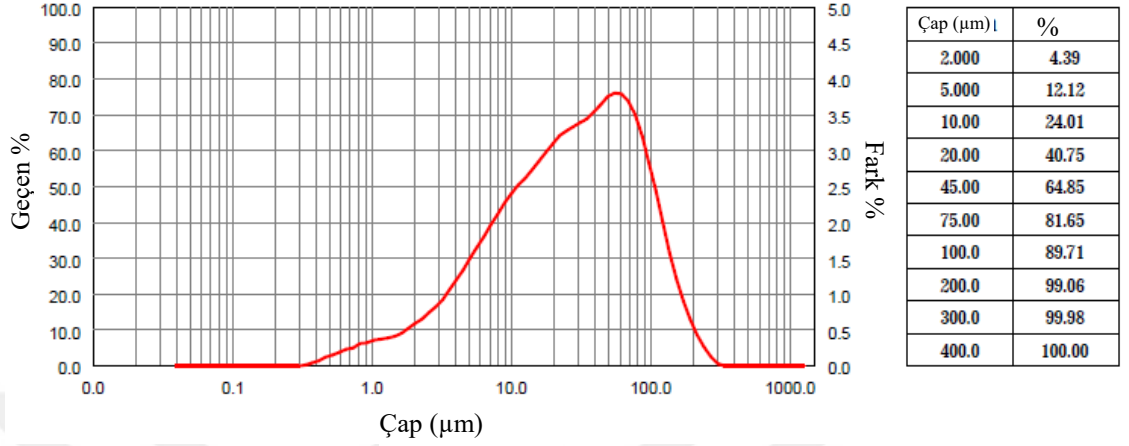
Çizelge 3.4’de karışıma giren F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının n tane dağılım katsayılarına göre oksit yüzdeleri verilmiştir. Buna göre, n tane dağılım katsayılarının 0.3-0.6 arasında tüm oksit yüzdeleri birbirlerine yakın değer almıştır. Karışıma giren CaO miktarı %10’dan düşük olduğu dolayısıyla düşük kireçli olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.5. C sınıfı UK’ ün n tane dağılım katsayılarına göre kimyasal analizi

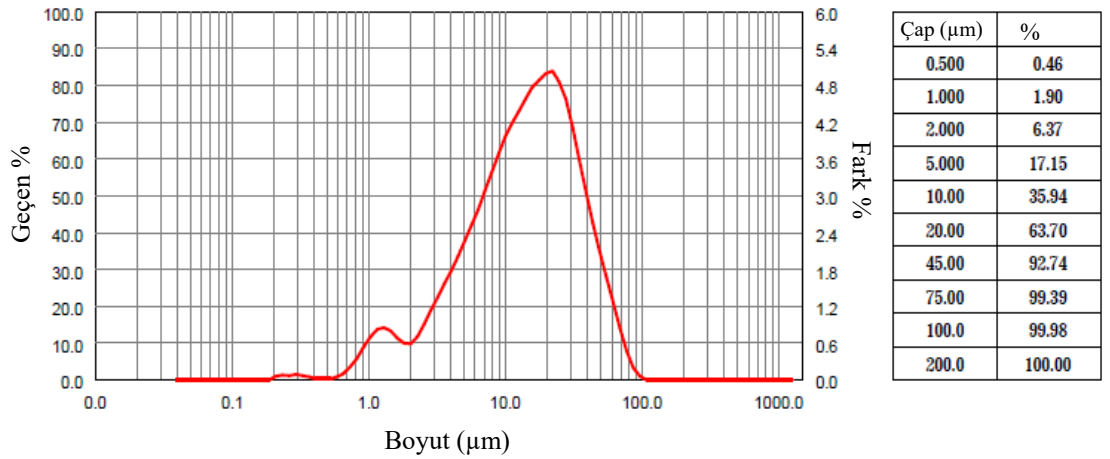
Oksitler (%)	Tane Katsayısı (n)										
	0.3	0.35	0.37	0.39	0.4	0.41	0.43	0.45	0.5	0.55	0.6
SiO₂	24.04	24.15	24.23	24.3	24.3	24.34	24.36	24.4	24.52	24.93	25.67
Al₂O₃	11.74	11.98	12.09	12.24	12.24	12.4	12.41	12.43	12.67	13.31	13.56
Fe₂O₃	5.26	5.28	5.3	5.32	5.32	5.34	5.34	5.35	5.38	5.5	5.65
CaO	38.93	38.63	38.5	38.29	38.29	38.21	38.18	38.1	37.81	37.82	38.86
MgO	2.47	2.42	2.39	2.36	2.36	2.34	2.33	2.32	2.27	2.21	2.28
SO₃	15.39	15.57	15.82	16.12	16.12	16.3	16.37	16.5	16.99	17.82	18.35
Na₂O	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.25
K₂O	0.88	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.91	0.93

Çizelge 3.5’de karışıma giren C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının n tane dağılım katsayılarına göre oksit yüzdeleri verilmiştir. Buna göre, n tane dağılım katsayılarının 0.3-0.6 arasında tüm oksit yüzdeleri birbirlerine yakın değer almıştır. Tüm tane katsayılarında CaO >%10 olduğu ve yüksek kireçli UK olarak tespit edilmiştir.

Termik santralden alınan ilk hali ve optimize edilen F ve C sınıfı UK tane dağılımları Lazer tane boyut dağılımı elde edilmiştir. Elde edilen tane dağılımları sırasıyla Şekil 3.2, 3.3, 3.4 ve Şekil 3.5’de verilmiştir.

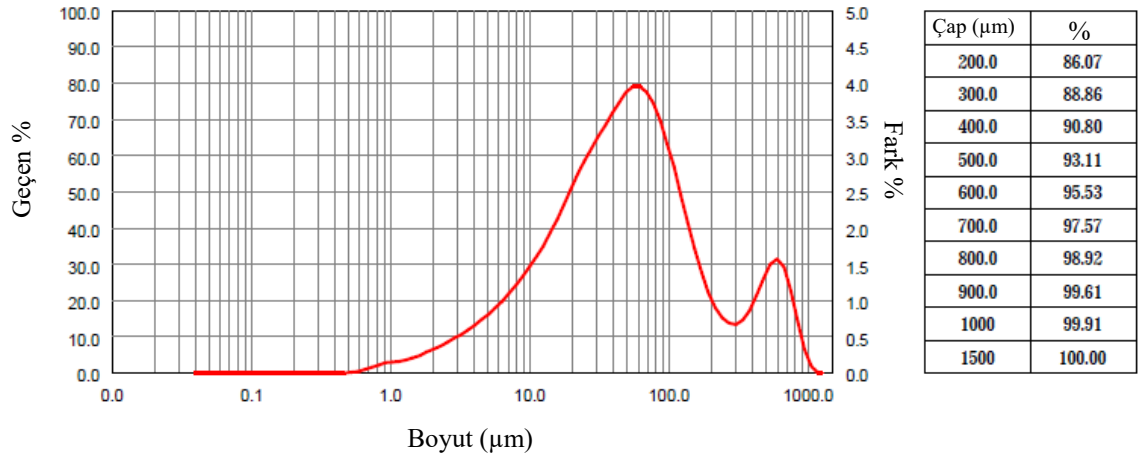


Şekil 3.2. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen F sınıfı UK'ün tane dağılımı

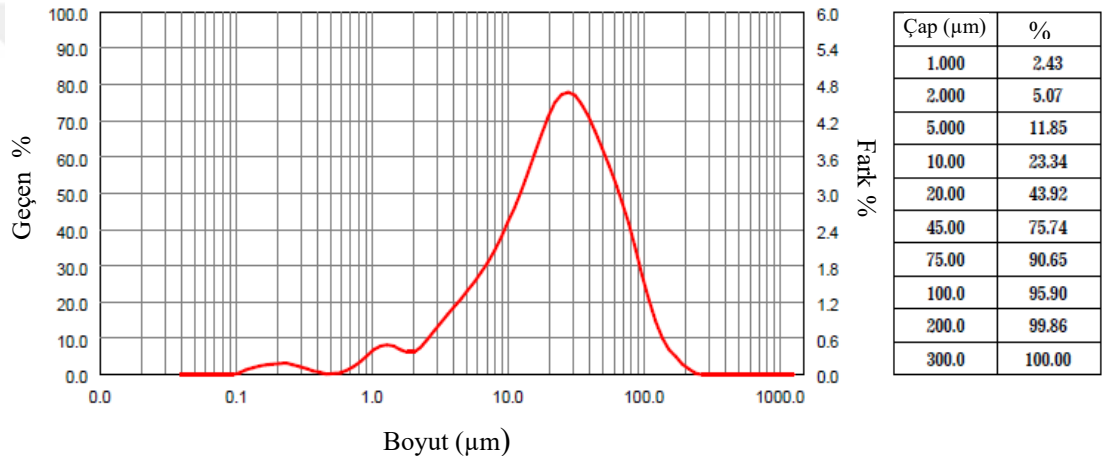


Şekil 3.3. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen F sınıfı uçucu külün (n= 0,4) tane dağılımı

Şekil 3.3’ de görüldüğü optimize edilen F sınıfı uçucu küllerin 45 µm altında %92.74 geçenken, 20 µm altında %63.70 geçmiştir. Mastesizer sonuçlarına bakıldığında çalışmada yapılan vakumlu elek yardımıyla yapılan aralıklarla uyumlu olduğu gözükmemektedir.



Şekil 3.4. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen C sınıfı uçucu külün tane dağılımı



Şekil 3.5. Lazer tane boyut dağılımı ile elde edilen C sınıfı uçucu külün n=0.4 tane dağılımı

Şekil 3.5’de görüldüğü optimize edilen C sınıfı uçucu küllerin 45 μm altında %75.74 geçerken, 20 μm altında %43.92’si geçmiştir. Mastesizer sonuçlarına bakıldığında çalışmada yapılan vakumlu elek yardımıyla yapılan aralıklarla uyumlu olduğu gözükmektedir.

Standart Kum

Bu çalışma için TS EN 196-1’e uygun Trakya bölgesinden temin edilen Standart kum kullanılmıştır [142]. Standart kumun tane dağılımı Çizelge 3.6’ de verilmiştir.

Çizelge 3.6. CEN referans kumunun tane büyüklüğü dağılımı

Elek Çapı (mm)	Kümülatif Elekte Kalan (%)
2.00	0
1.60	7 ± 5
1.00	33 ± 5
0.50	67 ± 5
0.16	87 ± 5
0.08	± 1

Tane Boyut Dağılım Optimizasyonu

F ve C sınıfı Uçucu küller; 0-20, 20-38, 38-45, 45-53, 53-63µm (mikron) aralıklarında Şekil 3,6'da gösterilen vakumlu elek sistemi ile elenerek tane boyut dağılımları belirlenmiştir. Her tane boyutu için vakumlu elek sistemi ile eleme işlemi ayrı ayrı elenerek yapılmıştır. Fuller-Thompson $P=100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n$ bağıntısına göre tane boyut dağılımlarının etkisi dikkate alınarak, tane boyut dağılım optimizasyonu tasarlanmıştır.



Şekil 3.6. Vakumlu Elek Sistemi

$$P=100.\left(\frac{d}{D}\right)^n$$

Bu formülde verilen;

P	: Elekten geçen yüzde
d	: Minimum tane çapı (UK)
D	: Maksimum tane çapı (UK)
n	: Dağılım Katsayısı

3.3. F ve C Sınıfı Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Deneyleri

F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının optimum tane boyut oranının belirlenmiş olup, F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının optimum tasarımı veren $n=0.4$ tane dağılım katsayısı elde edildikten sonra %5 - %60 ikame oranları için %5 artırılarak tasarımlar yapılmıştır.

Fakat C sınıfı ikmalî çimento harcı dökümü sırasında %30 ikame oranından sonra kalıba yerleştirme problemi yaşanmıştır. C sınıfı uçucu külün ikame oranı artıkça çimento harçları plastik halden daha katı bir hale geçmeye başlamıştır. Bu durum çimento harcının kalıba yerleştirme ve sıkıştırma işlemini zorlaştırmıştır. Bu nedenle C sınıfı UK ikamesi %30 kadar yapılmıştır.

Çimento harçları TS EN 196-1' e uygun olarak eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuş, böylelikle optimum tane boyutu oranı belirlenmiştir.

3.3.1. UK İkameli Çimento Harçlarının Üretimi

Çimento harçlarının üretiminde ağırlıkça üç birim standart kum, bir birim çimento, yarım (0.5) birim su kullanılarak karışım hazırlanmıştır. Standart kum 1350 ± 5 gram, 450 ± 2 gram çimento ve 225 ± 1 gram su TS EN 196-1'de belirtilmiş değerlerdir. UK ikamesi 450 gr çimento ağırlığı ağırlık yüzdesine göre hesaplanıp azaltılarak yapılmıştır. Örneğin % 10 UK ikamesi olduğunda 45 gr UK, 405 gr çimento (%90 oranında) karışımında kullanılmıştır. Laboratuvar koşullarında ±1 gram hassasiyetli tartı kullanılarak tartım işlemleri yapılmıştır. Numune üretiminde karışım için kullanılan Şekil 3.7.a'da karıştırıcı harç karıştırılırken, kendi eksenî etrafında dönme hızı dakikada 140-285 arasında iken, yörüngesel dönem hızı dakikada 62-125 arasında hızlarda çalışmaktadır. Kalıp Şekil 3.7.

b’de gösterildiği gibi üç adet prizma biçimli numunenin aynı anda hazırlanabilmesi için en kesiti 40 mm x 40 mm ve uzunluğu 160 mm olan üç yatay bölümden oluşmaktadır.



Şekil 3.7. a) TS EN 196-1’e otomatik mikser b) TS EN 196-1’e kalıp (40×40×160 mm)

Şekil 3.8’de verilen şoklama tablasında toplam iki aşamada sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur. İlk aşama için kalıp şoklama tablasına sabitlenmiş birinci tabaka harç kalıba yerleştirilmiş ve 60 şoklama ile sıkıştırma yapılmıştır. İkinci harç tabakası kalıba yerleştirildikten sonra harç yüzeyi düzeltilerek ikinci 60 şoklama işlemi ile harç sıkıştırılmıştır. Kalıptan dışarıya taşan harcın fazlası metal bir master yardımıyla alınmış; sağa sola doğru enine hareketler ile kalıp üst yüzeyi düzleştirilmiştir.



Şekil 3.8. TS EN 196-1’e uygun şok cihazı

UK ikameli çimento harçlarının üretiminde, harçlar şok cihazı ile sıkıştırıldıktan sonra, kalıbın üst yüzeyi cam ile örtülmüştür. Numuneler bir gün boyunca laboratuvar ortamında uygun sıcaklık ve nem ortamında bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler uygun şartlarda Şekil 3.9’da görüldüğü gibi kür ortamına tabii tutulmuştur.



Şekil 3.9. Kür tankı

3.3.2. UK İkameli Çimento Harçlarının Eğilme Dayanımları

Tane boyut dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş UK ikameli çimento harçların, 40×40×160 mm boyutlarındaki çimento harç numunelerinin Şekil 3.10’da verilen eğilme presi ile TS EN 196-1’e göre, (50 ± 10) N/s yükleme hızında testler yapılmıştır. 3 adet çimento harcı numunelerinin aritmetik ortalaması alınarak basınç deneyi sonucu tespit edilmiştir.

3.4. UK İkameli Çimento Harçlarının Basınç Dayanımları

Tane boyut dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş UK ikameli çimento harçların, 40×40×40 mm boyutlarındaki çimento harç numunelerinin Şekil 3.10’da verilen basınç presi ile TS EN 196-1’e göre, (2400 ± 200) N/s yükleme hızında testler yapılmıştır. 6 adet çimento harcı numunelerinin aritmetik ortalaması alınarak basınç deneyi sonucu tespit edilmiştir.



Şekil 3.10. TS 196-1'e uygun Çimento Presi

3.5. Donma- Çözölmeye Karşı Dayanıklılık;

ASTM C666 [143] “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing” da belirtilen, “betonun donma-çözölmeye karşı dayanıklılığını” belirlemek için kullanılan yöntemle göre donma-çözölmeye deneyi yapılmaya başlanmıştır. Standartta belirlenen donma-çözölmeye deneyi iki türlü hızlı dondurma deneyi kullanılmaktadır. Birincisinde donma ve çözölmeye su içinde, diğesinde ise donma havada, çözölmeye su içinde gerçekleştirilmektedir. Su içinde donma suyun dışarı kaçmasını engellediğinden daha şiddetli etki oluşmaktadır. Bu yüzden donma ve çözölmeye su içinde olan deney yöntemi kullanılmıştır. Yöntemde donma-çözölmeye 300 devire kadar devam edilebilmektedir. Burada betonun ağırlık kaybı esas alınmıştır. Fakat ağırlık kaybının ölçümü, çoğunlukla yüzeydeki hasarı belirlediğinden, iç bünyedeki göçmeleri tespit için ultrasonik test cihazı kullanılmıştır.

Bu çalışmada; 40x40x160 boyutlarındaki numunelerin tane boyut dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş çimento harçları donma-çözölmeye iklimlendirme dolabında deneylere tabii tutulmuştur. Testlere başlamadan numuneler tamamen kuru, tamamen suya doymuş ve suyun içindeki ağırlıkları ölçölmüştür. Çimento harçların donma-çözölmeye direncinin tayini, ASTM C666, 2008 Prosedür A'ya uyacak şekilde test

edilmiştir. Deney numuneleri, 2 saatten az ve 5 saatten fazla sürmeyecek şekilde her döngünün (4°C den -18°C) kademeli bir sıcaklık düşüşü ve (-18°C den 4°C ye kadar) kademeli bir sıcaklık artışı olacak biçimde, donma-çözülme döngüleri oluşacak şekilde testler yapılmıştır. Çözülme için, en az %25'i döngüde sağlanmıştır. Şekil 3.11'de Donma-Çözülme iklimlendirme test cihazı görülmektedir. Her çimento harcı numunelerin etrafında 1-3mm arasında suyla çevirili olmasını sağlanmıştır.



Şekil 3.11. Donma -Çözülme kabini

3.6. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultra ses geçiş hızı için $40 \times 40 \times 160$ mm boyutundaki tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş UK ikameli çimento harçları 90 gün normal suda olgunlaştırdıktan sonra D-Ç etkisi öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızı testine tabii tutmuştur. Ultrasonik test cihazı, deney numunelerinin içerisine gönderilen ses dalgalarının numunelerin bir yüzeyinden diğerine geçme süresini ölçmekte ve dalga hızını hesaplamaktadır. Ses dalga hızının beton içerisindeki geçiş hızı sayesinde harçların basınç dayanımı ve harçların diğer özellikleri arasında bağlantı kurabilmek mümkündür. ASTM C597 [144] standardına uygun $0.1 \mu\text{s}$ duyarlılıkta ultrases cihazından 55 KHz'lik ses dalgaları gönderilerek çimento harcından geçen ses dalgalarının geçiş sürelerini belirlenmiştir. Bu sayede çimento harcından geçen ses dalgalarının geçiş süresi (t , μs) okunarak, ses geçiş hızı (V_s , km/s) hesaplanmıştır.

Çizelge 3.7. Ultrases geçiş hızlarının pratik değerlendirilmesi

Hız (km/s)	≥4.5	3.5-4.5	3.0-3.5	2.0-3.0	≤2.0
Beton kalitesi	Çok İyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok Zayıf

3.7. Sülfata Karşı Dayanıklılık Deneyleri

ASTM C1012 [145] “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution” standardına göre optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçları 50.000 mg/lt sodyum sülfat çözeltisinde bekletilerek harç çubukların boy değişimleri tespit edilmeye başlanmıştır. Standarda göre hazırlanan harç karışımlarının, 20 MPa basınç dayanım değerine ulaştıktan sonra sülfat çözeltisine konulmaları gerekmektedir. Bu amaçla 40x40x160 mm numuneler kullanılarak eğilme ve basınç dayanımlarına bakılarak, daha sonra 25x25x225 mm boyutlu harç çubuğu örnekleri 50.000 mg/lt sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmeye başlatılarak boy değişimleri ölçülmüştür.

3.7.1 Eğilme ve Basınç Dayanımı

7, 28, 90, 180 ve 360 gün normal su ve 50.000 mg/lt sodyum sülfat çözeltisinde bekletildikten çimento harçları, eğilme ve basınç dayanım testine tabii tutulmuştur. 40*40*160 mm boyutundaki çimento harçlarına önce eğilme testine, ikiye ayrılan numunelere basınç deneyi uygulanmıştır.

3.8. Harç Çubuklarının Boyca Uzama Deneyi

7, 28, 90, 180 ve 360 günlük boy ölçümleri, 25*25*285 cm boyutundaki yapılmış ve boy uzamaları ASTM C 1012 standardına göre test edilmiştir.

3.9. Optimize Edilmiş Çimento Harçlarının Cıvalı Porozimetre (MIP)

Cıvalı porozimetre deneyinde, deney için hazırlanan numune kapalı bir kap içerisinde yerleştikten sonra hazneye cıva doldurulmuş ve bu cıvanın giderek artan basınç ile numuneye nüfuz ettirilmesi sağlanmıştır. Deney sistemine ait bir yazılım ile numune içerisindeki boşluk dağılımları numuneye nüfuz eden cıva hacmine bağlı olarak (ml/gr) tespit edilmiştir. Boşluk dağılımı tayini için Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji

Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM) bulunan, AutoPore IV 9500 V1.09 cıvalı porozimetre cihazı ile yapılmıştır.

3.10. Optimize Edilmiş Çimento Harçlarının Klor Geçirgenliği,

7, 28 ve 90 gün normal suda olgunlaştırılan Ø100×50 mm boyutunda olacak şekilde çimento harçları hazırlanarak, Klor Geçirgenliği deneyine tabii tutulmuştur. Çimento ağırlığınca %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında ikame edilerek hazırlanan ve 7, 28 ve 90 gün boyunca kür edilen F ve C sınıfı uçucu küllü çimento harcı numunelerinin hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerleri ASTM C 1202'ye göre belirlenmiştir.

3.10.1. Malzemeler ve Karışım Oranları

ASTM C 1202 Hızlı Klor İyonu Geçirimsizliği deneyine tabi tutulan numuneler TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken CEM I 42.5 R çimentosu seçilmiştir. Standart kum ve içilebilir nitelikteki su numune karışımının diğer unsurlarıdır. %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş UK ikameli çimento harçları üretilerek Hızlı Klor İyonu Geçirimsizliği deneyine tabi tutulmuştur.

3.10.2. UK İkameli Çimento Harçlarının Hazırlanması ve Deneyler

Üretilen numuneler kalıba yerleştirildikten 24 saat sonra kalıptan çıkartılarak 23±2°C sıcaklıktaki kür havuzuna yerleştirilmiştir. Burada numuneler 7, 28 ve 90 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. Ø100×200 mm silindir çimento harçları Ø100×50 mm boyutlarında olacak şekilde kesilmiştir. Elde edilen çimento harcı deney örnekleri Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Ø100×50 mm silindir deney numuneleri

Numune boyutlandırma işlemi sonrası silindirik çimento harcı numunelerinin bir yüzüne 0.30 N NaOH çözeltisi diğer yüzünde ise %3 NaCl çözeltisi temas ettirilir. Böylece deney hücresine aktarım gerçekleştirilmiş olur. (Şekil 3.13)



Şekil 3.13. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deney hücrelerinin hazırlanması

Çimento harcı yüzeylerine doğrudan 60.0 ± 0.1 V gerilim uygulanarak 6 saatlik sürede çimento harcı üzerinden geçen akımın kaydı veri kaydedici yardımı ile tutulur.

6 saat sonra çimento harcı numunelerinden geçen akım değerleri belirlendikten sonra ASTM C1202 hızlı klor iyonu geçirimsizliği Coulomb değerlerine göre; > 4000 ise ‘Yüksek’, 2000-4000 ise ‘Orta’, 1000-2000 ise ‘Düşük’, 100-1000 ise ‘Çok Düşük’, < 100 ise ‘İhmal Edilebilir’ olmak üzere klor geçirimsizliği düzeyi beş temel kategoride incelenmiştir.

%5, %10, %15, %20, %25 ve %30 UK ikameli çimento harçlarının klor geçirimsizliği 7,28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda incelenmiştir. Sonuçlar 4 adet silindirik çimento harcına ait klorür geçirimsizliği deney sonuçlarının ortalamaları alınarak elde edilmiştir

3.11. İstatistiksel Anlamlılık ve Kalite Kontrol Derecesi

İstatistiksel anlamlılık iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin şanstın başka bir şeyden kaynaklanma olasılığıdır. Bir veri setinin sonucunun istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için istatistiksel hipotez testi kullanılır. Bu test, rastgele şansın sonucu açıklayabileceği ihtimalini temsil eden bir p değeri sağlar. Genel olarak, %5 veya daha düşük bir p değerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilir.

TS500’de, “Beton karakteristik dayanımı, beton sınıfını tanımlamak için kullanılan, istatistiksel verilere dayanılarak belirlenen ve bu değerden daha küçük dayanım değeri elde edilmesi olasılığı, belirli bir oran olan (genelde %10) dayanım değeridir.” olarak geçmektedir.

Bu çalışma kapsamında istatistiksel anlam ve hipotez testleri uygulamanın, çalışma sonucunda ulaşılması gereken bir hedef veya beklenen sonuç gibi bir kesin bir değer yerine, tane boyutu optimizasyonu ve uçucu kül ikamesinin etkisini incelemek ve aralarındaki en yüksek performansa sahip değeri bulmak olduğundan tutarsız olabileceği, bundan dolayı ACI (American Concrete Institute) tarafından belirlenen beton basınç dayanımı kalite kontrol çizelgesini (Çizelge 3.8) kullanmanın daha uygun olacağı belirlenmiştir. Çizelge 3. 9’e göre numunelerin basınç dayanımı ortalaması 25 MPa’dan küçük olduğu durumlarda varyasyon katsayısı hesaplanarak kalite belirlenirken, basınç dayanımı ortalamasının 25 MPa’dan büyük olduğu durumlarda ise standart sapma değerleri ile kalite kontrolü yapılmaktadır. Böylece beton kaliteleri çok iyi, iyi, orta ve zayıf olmak üzere 4 grupta toplanmıştır [146].

Çizelge 3. 10 ACI tarafından belirlenen kalite dereceleri

Kalite Kontrol Derecesi	$X_{ort} \leq 25$ MPa için V,%	$X_{ort} \geq 25$ MPa için
Sx, MPa		
Çok İyi	<10	<5
İyi	10-20	5-6.5
Orta	20-30	6.5-8
Zayıf	>30	>8

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. F ve C Sınıfı UK Tane Boyut Dağılımının Optimizasyonun Elde Edilmesi

Uçucu küller; 0-20, 20-38, 38-45, 45-53, 53-63µm (mikron) aralıklarında Fuller-Thompson $P=100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n$ göre tane boyut optimizasyonu tasarlanmıştır.

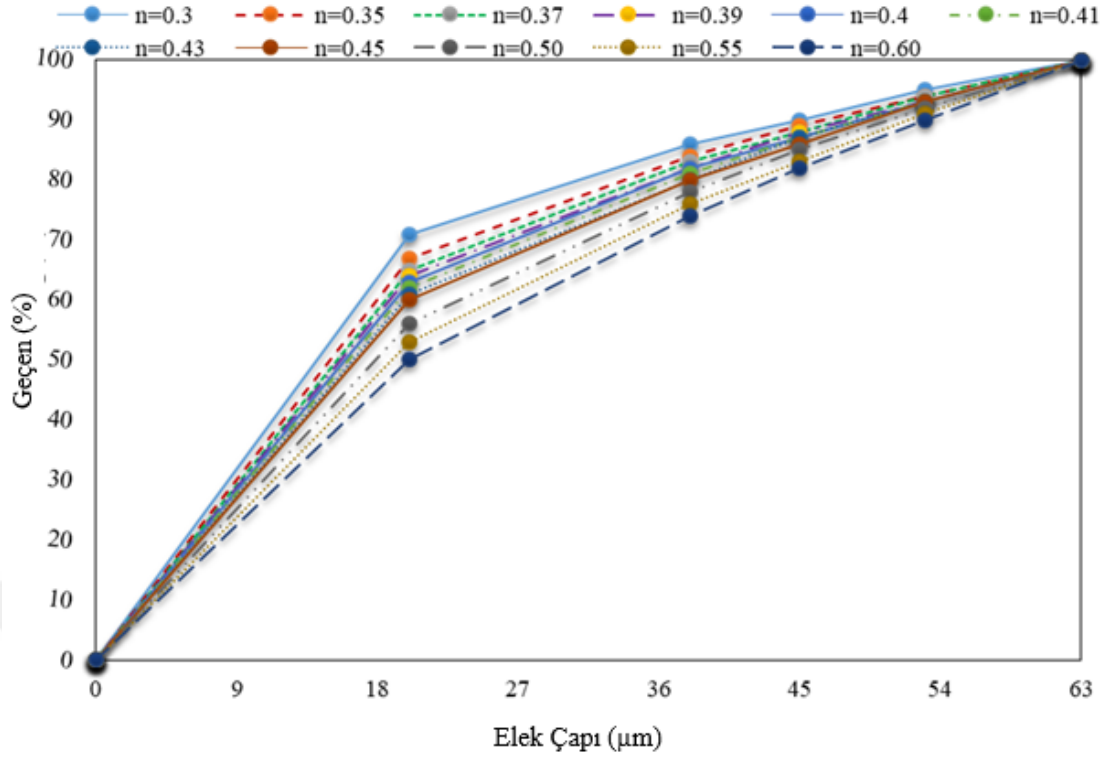
Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1 'de verilen, n deki her dağılım katsayısı için tane dağılımı belirlenerek, uçucu külün en ideal tane dağılım yapılarak, UK' ün her biri için denkleme göre dağılım katsayısının n=0.3 ile n=0.6 arasında 0.05 hassasiyetle artırılarak optimum tane dağılımı n dağılım katsayısına göre n=0.35-n=0.45 göre belirlenmiştir. En uygun iki değer arasında hassasiyet 0.02'ye indirilerek optimum tane dağılımı katsayısı n=0.4 olarak tespit edilmiştir.

Toplam karışım içerisindeki malzemelerin birbirine oranı, n dağılım katsayısının aldığı farklı değerlere göre belirlenmiştir. Bu belirlenen dağılım katsayısı kullanarak, belirli bir amaca uygun çimento harcı tasarımı hazırlandı. Dağılım katsayısının, sayısal sonuçları azaldıkça karışım ince, artıkça daha iri bir karışıma dönüşür. Tane dağılımı için tane çapı 0-63 mikron alınmıştır.

“n” dağılım katsayısı belirlerken, 20, 38, 45, 53 ve 63 µm elekler için belirtilen elek çaplarından geçen kümülatif yüzde değerleri belirlenmiştir. Bu malzemelere göre her bir dağılım katsayısı için geçen yüzdeler esas alınarak tane dağılım eğrileri elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. UK'ün tane dağılım katsayısına (n) göre kümülatif yüzdeleri (%)

Elek Çapı (µ)	n=0.30	n=0.35	n=0.37	n=0.39	n=0.40	n=0.41	n=0.43	n=0.45	n=0.50	n=0.55	n=0.60
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
53	95	94	94	93	93	93	93	93	92	91	90
45	90	89	88	87	87	87	87	86	85	83	82
38	86	84	83	82	82	80	80	80	78	72	74
20	71	67	65	63	63	62	61	60	56	53	50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Şekil 4.1. UK'nın tane dağılım katsayısına (n) göre, oluşturulan farklı tane dağılım eğrileri

Bu çalışmada farklı n dağılım katsayısının aldığı değere göre, eğilme ve basınç özelliklerinin etkisi incelenmiştir. Bu dağılım katsayısının belirlenmesinde, uçucu külün etkinliğini daha iyi anlayabilmek için çimento içerisine ağırlıkça %20 oranında UK ikame edilmiştir. 7, 28 ve 90 günlük F ve C sınıfı UK'lerin eğilme ve basınç deneylerinin farklı n katsayısının aldığı sonuçlar, Çizelge 4.2' de ve Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Tane boyut dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme ve basınç değerleri

Dağılım Katsayısı (n)	Basınç Dayanımı (MPa)			Eğilme Dayanımı (MPa)		
	7-Gün	28-Gün	90-Gün	7-Gün	28-Gün	90-Gün
Referans	32.44	43.89	52.49	6.48	9.02	11.42
0.3	30.15	38.92	50.88	5.76	8.41	11.45
0.35	30.73	39.13	51.23	5.85	8.87	11.86
0.37	31.12	39.49	51.86	5.93	9.05	12.12
0.39	31.25	39.98	52.02	5.98	9.47	12.40
0.4	31.30	41.04	52.16	6.02	9.52	12.45
0.41	31.22	39.93	52.04	5.98	9.48	12.41
0.43	31.04	39.71	51.90	5.82	9.05	12.18
0.45	30.88	39.41	51.45	5.64	8.46	11.92
0.50	30.67	38.82	51.04	5.24	8.02	11.74
0.55	30.38	38.55	50.87	5.04	7.87	11.62
0.60	29.42	37.84	49.87	4.97	7.49	11.44

Çizelge 4.2 'ye göre; %20 F sınıfı UK ikameli optimize edilmiş çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük kür sonunda en iyi eğilme ve basınç dayanımlarını 0.4 dağılım katsayısının verdiği görülmüştür. Tane dağılım katsayısı 0.3'den 0.4'de artırılırken eğilme ve basınç dayanımları yükselmiş, dağılım katsayısı 0.4'den 0.6'ya yükseldiğinde eğilme dayanımlarında düşüşler görülmüştür.

Tane dağılım katsayısı, 0.35-0.45 değerleri arasında en iyi eğilme ve basınç dayanım artışı tespit edilmiştir. Bu durum çimento harçlarında UK'lerin filler etkisinin olumlu yönde arttırmıştır. n=0.4 tane dağılım katsayısı, birim hacim ağırlığının artışıyla gerçekleştirilecek olup, eğilme ve basınç dayanımlarında yükselişlerini sağlamıştır.

n=0.4 dağılım katsayısında eğilme ve basınç dayanımının yüksek çıkma sebebinin bu dağılım katsayısının çimento harçlarının boşlukları en iyi şekilde doldurduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3 Tane boyut dağılı optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçların Eğilme ve Basınç Değerlerinin İstatistiksel Parametreleri

Dağılım Katsayısı (n)	Basınç Dayanımı Standart Sapma			Eğilme Dayanımı Varyasyon Katsayısı		
	7-Gün	28-Gün	90-Gün	7-Gün	28-Gün	90-Gün
Referans	2.92	3.29	3.36	8.95	7.10	6.83
0.3	2.71	2.92	3.26	9.03	7.13	6.81
0.35	2.77	2.93	3.28	9.06	7.10	6.83
0.37	2.80	2.96	3.32	8.94	7.07	6.77
0.39	2.81	3.00	3.33	9.03	7.07	6.77
0.4	2.82	3.08	3.33	8.97	7.14	6.83
0.41	2.81	2.99	3.33	9.03	7.07	6.77
0.43	2.79	2.98	3.32	8.93	7.07	6.81
0.45	2.78	2.96	3.29	9.04	7.09	6.80
0.50	2.76	2.91	3.27	8.97	7.11	6.81
0.55	2.73	2.89	3.26	8.96	7.12	6.80
0.60	2.65	2.84	3.19	9.05	7.08	6.82

Çizelge 4.3 incelendiğinde, üretilen numunelerin basınç dayanımının ortalamasının, çizelge 3.8’de belirtilen 25 MPa değerinden büyük bir değer olmasından dolayı ve üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde olup olmadığının ve kalite kontrol derecesinin belirlenebilmesi için standart sapma değeri esas alınmıştır. Standart sapma değerinin 7 günlük çimento harç numunelerin basınç değerleri 2.65-2.92 arasındadır. 28 günlük standart sapma değerleri 2.84-3.29 ve 90 günlük standart sapma değeri 3.19-3.36 değerleri arasındadır. Standart sapma değerlerini 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

İstatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.4. Tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanım değerleri

Dağılım Katsayısı	Basınç Dayanımı (MPa)			Eğilme Dayanımı (MPa)		
	7-Gün	28-Gün	90-Gün	7-Gün	28-Gün	90-Gün
Referans	32.44	43.89	52.49	6.48	9.02	11.42
0.3	31.80	41.16	51.02	5.84	8.13	11.02
0.35	32.03	41.61	51.24	5.92	8.24	11.44
0.37	32.35	41.94	51.84	6.12	8.52	11.68
0.39	32.50	42.01	51.92	6.24	8.69	11.90
0.4	32.57	42.07	51.98	6.57	9.71	11.96
0.41	32.48	41.98	51.94	6.25	8.70	11.92
0.43	32.29	41.34	51.88	6.16	8.57	11.72
0.45	31.98	40.67	51.23	5.97	8.32	11.43
0.50	31.77	39.57	50.98	5.81	8.09	11.35
0.55	31.08	38.23	50.02	5.59	7.76	11.04
0.60	30.83	37.22	49.57	5.23	7.28	10.96

Çizelge 4.4'e göre; %20 C sınıfı UK ikameli optimize edilmiş çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük kür sonunda en iyi eğilme ve basınç dayanımlarını 0.4 dağılım katsayısının verdiği görülmüştür. Tane dağılım katsayısı 0.3'den 0.4'de artırılırken eğilme ve basınç dayanımları yükselmiş, dağılım katsayısı 0.4'den 0.6'ya yükseldiğinde eğilme dayanımlarında düşüşler görülmüştür.

Tane dağılım katsayısı, 0.35-0.45 değerleri arasında en iyi eğilme ve basınç dayanım artışı tespit edilmiştir. Bu durum çimento harçlarında UK'lerin filler etkisinin olumlu yönde arttırmıştır. $n=0.4$ tane dağılım katsayısı, birim hacim ağırlığının artışıyla gerçekleştirilecek olup, eğilme ve basınç dayanımlarında yükselişlerini sağlamıştır.

$n=0.4$ dağılım katsayısında, eğilme ve basınç dayanımının yüksek çıkma sebebinin bu dağılım katsayısının çimento harçlarının boşlukları en iyi şekilde doldurduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5. Tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçların Eğilme ve Basınç Değerlerinin İstatistiksel Parametreleri

Dağılım Katsayısı (n)	Basınç Dayanımı Standart Sapma			Eğilme Dayanımı Varyasyon Katsayısı		
	7Gün	28Gün	90Gün	7Gün	28Gün	90Gün
Referans	2.92	3.29	3.36	8.95	7.10	6.83
0.3	2.86	3.09	3.35	9.08	7.13	6.81
0.35	2.88	3.12	3.28	8.95	7.16	6.82
0.37	2.91	3.15	3.32	8.99	7.04	6.76
0.39	2.93	3.15	3.32	8.97	7.13	6.81
0.4	2.93	3.16	3.33	8.98	7.11	6.77
0.41	2.92	3.15	3.32	8.96	7.13	6.80
0.43	2.91	3.10	3.32	8.93	7.12	6.83
0.45	2.88	3.05	3.32	9.05	7.09	6.82
0.50	2.86	2.97	3.28	8.95	7.05	6.78
0.55	2.80	2.87	3.26	8.94	7.09	6.79
0.60	2.77	2.79	3.19	8.99	7.14	6.84

Çizelge 4.5 incelendiğinde, üretilen numunelerin basınç dayanımının ortalamasının Çizelge 3.8’de belirtilen 25 MPa değerinden büyük bir değer olmasından dolayı ve üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde olup olmadığının ve kalite kontrol derecesinin belirlenebilmesi için standart sapma değeri esas alınmıştır. Standart sapma değerinin 7 günlük çimento harç numunelerin basınç değerleri 2.77-2.92 arasındadır. 28 günlük standart sapma değerleri 2.79-3.29 ve 90 günlük standart sapma değeri 3.19-3.36 değerleri arasındadır. Standart sapma değerlerini 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

İstatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

C ve F sınıfı UK' ün, eğilme ve basınç dayanımları, farklı olsa da farklı dağılım katsayıları için en iyi eğilme ve basınç dayanımlarına göre, $n=0.4$ dağılım katsayısı bulunmuştur.

F ve C sınıfı UK için yapılan tane dağılım optimizasyonu çalışmasında filler etkisi, $n=0.4$ dağılım katsayısında, elde edilen sonuçlara göre, tane dağılımının filler etkisinde çok önemli bir yeri olduğu, UK dağılımındaki boşlukları minimize ederek daha yüksek doluluk sağlayarak, yüksek hacimli çimento harcı üretilmesinin, basınç ve eğilme dayanımlarındaki değişimlere bakılarak görülmektedir. Beton karışımında yapılan agrega tane dağılımı olduğu gibi, uçucu küllerde de tane dağılımı yapılarak çimento harçlarındaki yüksek hacim ve minimum boşlukların elde edildiği görülmüştür.

UK kimyasal kompozisyonu baktığımızda, F ve C sınıfı UK' ların kimyasal özelliklerinin her elek arasındaki kimyasal bileşeni ile referans numunelerinin arasında kimyasal kompozisyonlarının benzer olduğu gözükmemektedir. Burada elde ettiğimiz sonuçlarının UK kimyasal yapısından olmadığı tane dağılımı yapılmış uçucu külün çimento harçlarının yapısını değiştirdiği görülmektedir.

4.2. Tane dağılım optimizasyonu yapılmış, F ve C Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının Üretimi

Optimum tasarımı veren n tane dağılım katsayısı elde edildikten sonra, $n=0.4$ tane dağılım katsayısına göre, F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının optimum tane boyut oranının belirlenmiş olup, F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının optimum tasarımı veren $n=0.4$ tane dağılım katsayısı elde edildikten sonra %5 - %60 ikame oranları için %5 artırılarak tasarımlar yapılmıştır.

C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının optimum tasarımı veren $n=0.4$ tane dağılım katsayısı elde edildikten sonra %5, %30, ikame oranları için %5 artırılarak tasarımlar yapılmıştır.

%30 C sınıfı ikame oranından sonra çimento harcının işlenebilirliği zorlaşmıştır. C sınıfı uçucu külün ikame oranı arttıkça çimento harçları plastik halden daha katı bir hale geçmeye başlamıştır. Bu durum çimento harcının kalıba yerleştirme ve sıkıştırma işlemini zorlaştırmıştır.

4.2.1. Tane Boyut Dağılımı Optimize Edilmiş ve Edilmemiş F Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının Dayanımlarının Belirlenmesi

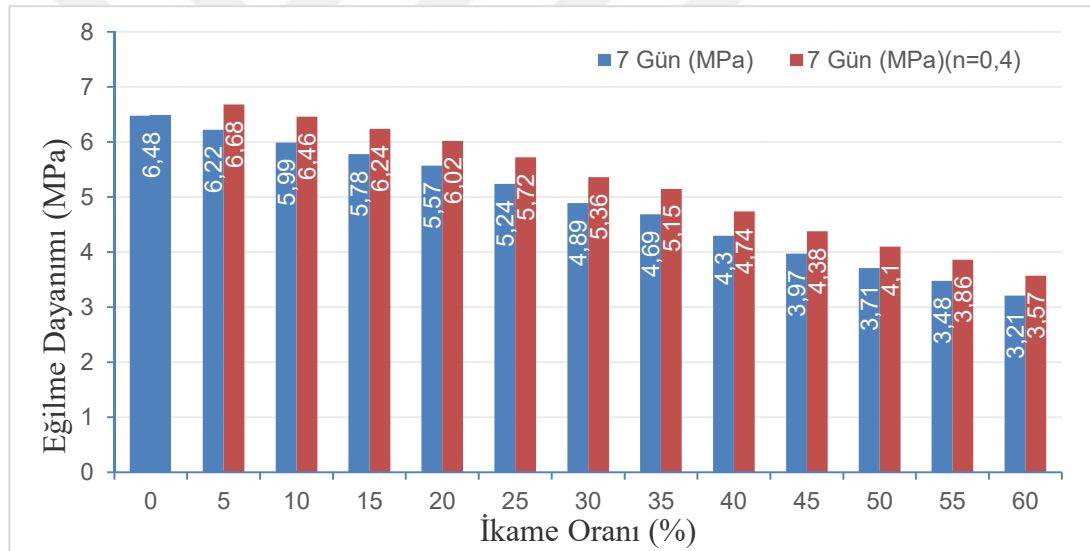
Çizelge 4.6’de optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 7 günlük eğilme dayanımları ve standart sapmaları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.6. F Sınıfı UK’ ün 7 Günlük Eğilme Dayanımları ve İstatistiksel Parametreleri

İkame Oranı (%)	7 Gün (MPa)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)	7 Gün (MPa) (n=0.4)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)
0	6.48	0.62	9.57	6.48	0.62	9.57
5	6.22	0.60	9.65	6.68	0.61	9.13
10	5.99	0.58	9.68	6.46	0.50	7.74
15	5.78	0.59	10.21	6.24	0.51	8.17
20	5.57	0.56	10.05	6.02	0.55	9.14
25	5.24	0.57	10.88	5.72	0.54	9.44
30	4.89	0.54	11.04	5.36	0.52	9.70
35	4.69	0.52	11.09	5.15	0.49	9.51
40	4.3	0.41	9.3	4.74	0.46	9.70
45	3.97	0.38	9.57	4.38	0.41	9.36
50	3.71	0.37	9.97	4.10	0.39	9.51
55	3.48	0.35	10.06	3.86	0.35	9.07
60	3.21	0.30	9.35	3.57	0.33	9.24

Çizelge 4.6’da verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 7 günlük eğilme dayanımlarında, optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin optimize edilmemiş F sınıfı UK’lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25, %30,%35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında artış yüzdeleri,%7.40, %7.85, %7.96, %8.08, %9.16, %9.61, %9.81, %10.23, %10.33, %10.51, %10.92 ve %11.21, eğilme dayanımlarında artış görülmüştür. Tane dağılımı yapılarak çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurduğu optimize edilmiş çimento harçların, optimize edilmemiş çimento harçlarının eğilme dayanımlarından yüksek çıktığı bize açıkça göstermektedir.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde en büyük değerin, referans numunede 0.62 olarak görülmüştür. Standart sapmanın optimize edilmemiş numunelerde standart sapmanın 0.68-0.37 arasında değişmektedir. Optimize edilmemiş numunelerde ise standart sapma 0.62-0.39 arasındadır. İstatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 9 ile 11 MPa değeri arasında olduğu görülmektedir. Üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.2. F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 7 günlük eğilme dayanımlarının grafiği

7 günlük sonuçlar içerisinde, optimize edilen %5 F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 6.68 MPa bulunmuştur. %5 ikame oranındaki eğilme dayanımı referans numunenin eğilme dayanımından %3.08 daha fazla elde edilmiştir. Şekil 4.2’ de görüldüğü gibi tüm ikame oranlarında optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır.

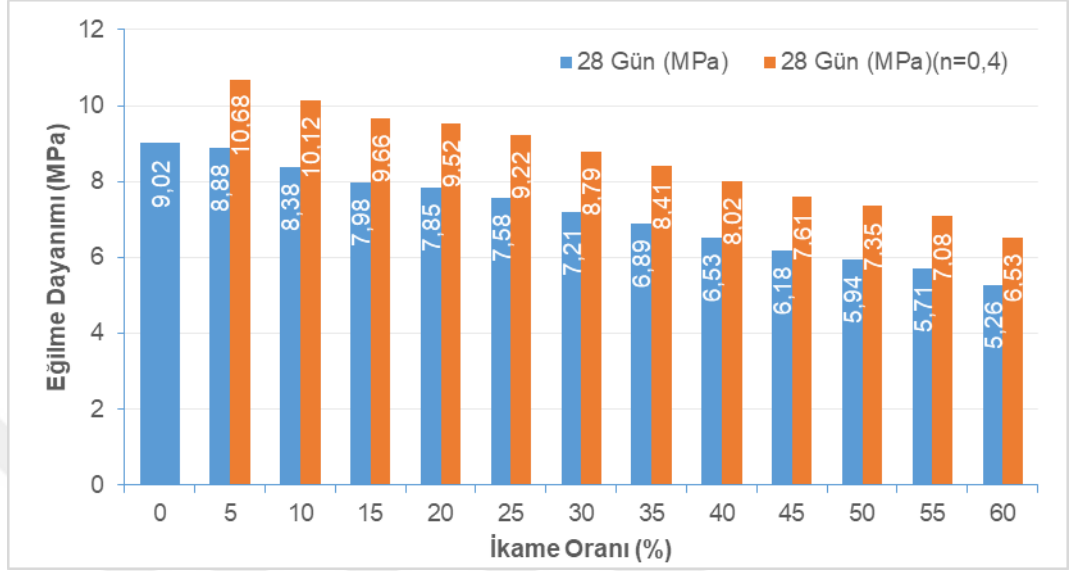
Çizelge 4.7. F sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının 28 Günlük Eğilme Dayanımları ve İstatistiksel Parametreleri

İkame Oranı (%)	28 Gün (MPa)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)	28 Gün (MPa) (n=0.4)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)
0	9.02	0.88	9.76	9.02	0.88	9.76
5	8.88	0.87	9.80	10.68	1.05	9.83
10	8.38	0.82	9.79	10.12	0.99	9.78
15	7.98	0.78	9.77	9.66	0.95	9.83
20	7.85	0.77	9.81	9.52	0.93	9.77
25	7.58	0.74	9.76	9.22	0.90	9.76
30	7.21	0.75	10.40	8.79	0.86	9.78
35	6.89	0.68	9.87	8.41	0.82	9.75
40	6.53	0.64	9.80	8.02	0.79	9.85
45	6.18	0.61	9.87	7.61	0.75	9.86
50	5.94	0.65	10.94	7.35	0.72	9.80
55	5.71	0.56	9.81	7.08	0.69	9.75
60	5.26	0.60	11.41	6.53	0.64	9.80

Çizelge 4.7’de verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 28 günlük eğilme dayanımlarında, Optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK’lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında artış yüzdeleri, %20.27, %20.76, %21.05, %21.27, %21.64, %21.91, %22.06, %22.82, %23.14, %23.74, %23.99 ve %24.14 eğilme dayanımlarında artış görülmüştür. Olgunlaşma yaşı ilerledikçe hidrasyon olayı da ilerlemiştir. Dolayısıyla eğilme dayanımlarında artış gerçekleşmiştir.

28 günlük çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 9 ile 11 MPa değeri arasında olduğu görülmektedir. Üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa

değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.3. F sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği

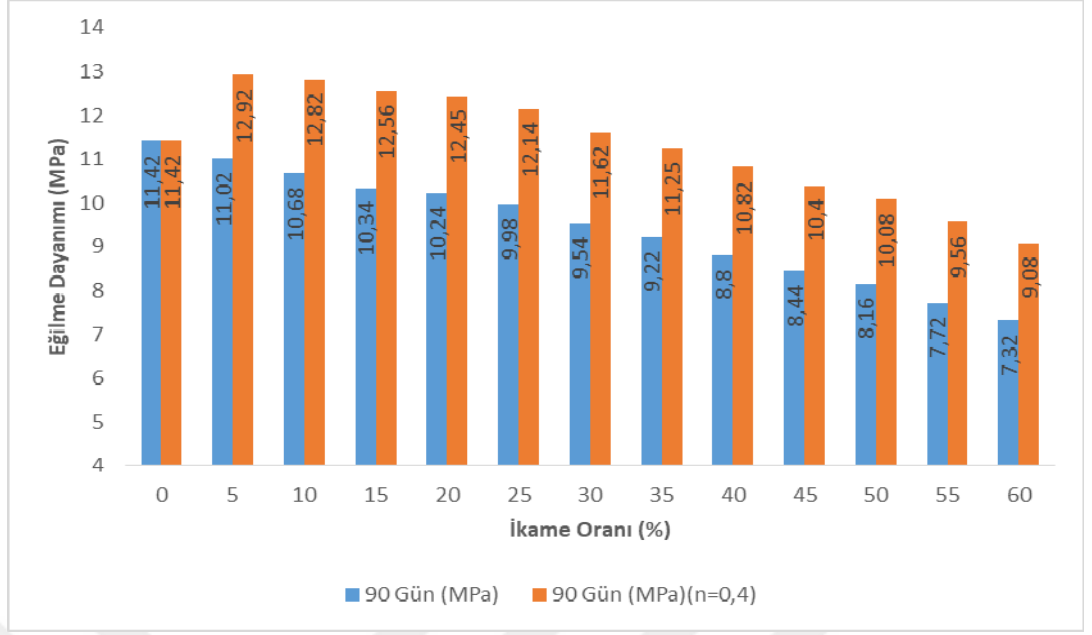
28 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 10.68 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki eğilme dayanımı referans çimento harçlarında ki eğilme dayanımından %18.40 daha fazla elde edilmiştir. %10, %15, %20 ve %25 ikameli optimize edilen çimento harçları, referans numuneden yüksek çıkmıştır. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi tüm ikame oranlarında optimize edilen F sınıfı UK’lerin eğilme dayanımları, optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır.

Çizelge 4.8. F Sınıfı Uçucu Külün 90 Günlük Ortalama Eğilme Dayanımları ve İstatistiksel Parametreleri

İkame Oranı (%)	90 Gün (MPa)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)	90 Gün (MPa) (n=0.4)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)
0	11.42	1.04	9.11	11.42	1.04	9.11
5	11.02	1.00	9.07	12.92	1.08	8.36
10	10.68	0.97	9.08	12.82	1.17	9.13
15	10.34	0.94	9.09	12.56	1.14	9.08
20	10.24	0.93	9.08	12.45	1.13	9.08
25	9.98	0.95	9.52	12.14	1.10	9.06
30	9.54	0.87	9.12	11.62	1.15	9.90
35	9.22	0.84	9.11	11.25	1.02	9.07
40	8.8	0.85	9.66	10.82	0.98	9.06
45	8.44	0.79	9.36	10.4	1.02	9.81
50	8.16	0.66	8.09	10.08	0.92	9.13
55	7.72	0.68	8.81	9.56	0.87	9.10
60	7.32	0.72	9.84	9.08	0.90	9.91

Çizelge 4.8’de verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 90 günlük eğilme dayanımlarında, Optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK’lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında artış yüzdeleri %19.06, %17.24, %21.47, %21.58, %21.64, %21.80, %22.02, %22.95, %23.22, %23.53, %23.83 ve %24.04 eğilme dayanımlarında artış görülmüştür.

90 günlük çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.4. F sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği

90 günlük sonuçlar arasında, %5 optimize edilen F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 13.12 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki eğilme dayanımı referans numunede ki eğilme dayanımından %14.88 daha fazla elde edildiği tespit edilmiştir. Şekil 4.4’de görüldüğü gibi tüm ikame oranlarında optimize edilen F sınıfı UK’ ün eğilme dayanımları, optimize edilmeyen F sınıfı UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarından yüksek çıktığı tespit edilmiştir. %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 optimize edilmiş F sınıfı UK’ ün, eğilme dayanımları referans numunenin eğilme dayanımından daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli 7 günlük erken dayanımlarda düşük çıkmıştır. Bunun sebebi ise, F tipi uçucu külün de ortamda serbest kireç oluşmasını beklemesinden dolayı erken dayanıma çok fazla etkisinin olmadığı düşünülmektedir.

28 günlük eğilme dayanımları sonucun da optimize edilen F sınıfı UK’lerin optimize edilmeyene göre belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Referans çimento harç numunesine göre, optimize edilmiş %25 UK ikemesinin aynı mekanik dayanımı verdiği görülmüştür. Bu durum optimize edilenlerin çimento harçları içerisinde boşlukları doldurarak, dolgun etkisini arttırdığından kaynaklanmaktadır.

90 günlük eğilme dayanımlarına bakıldığında ise, referans çimento harç numusine göre, optimize edilmiş, %30 UK ikemesinin aynı eğilme dayanımı verdiği görülmüştür. F sınıfı uçucu külün de ortamda serbest kireç oluşmasını beklemesinden dolayı ilerleyen yaşlarda eğilme dayanımı daha iyi artırmıştır.

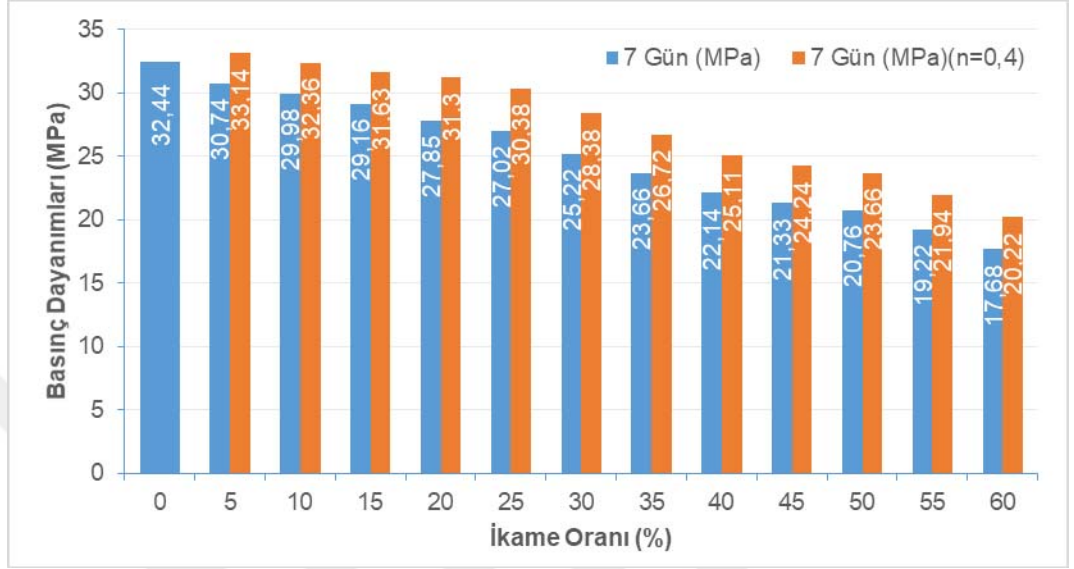
Çizelge 4.9. F Sınıfı Uçucu Külün 7 Günlük Ortalama Basınç Dayanımları ve Standart Sapma Değerleri

İkame Oranı (%)	7 Gün (MPa)	Standart Sapma	7Gün (MPa)(n=0.4)	Standart Sapma
0	32.44	2.95	32.44	2.95
5	30.74	2.93	33.14	3.02
10	29.98	2.84	32.36	2.94
15	29.16	2.82	31.63	2.88
20	27.85	2.67	31.3	2.89
25	27.02	2.69	30.38	2.76
30	25.22	2.68	28.38	2.59
35	23.66	2.67	26.72	2.49
40	22.14	2.42	25.11	2.29
45	21.33	2.02	24.24	2.21
50	20.76	1.89	23.66	2.22
55	19.22	1.90	21.94	2.12
60	17.68	1.91	20.22	1.80

Çizelge 4.9’de verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 7 günlük basınç dayanımı tayininde, optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK’lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında artış yüzdeleri, %7.81, %7.94, %8.47, %12.39, %12.44, %12.53, %12.93, %13.41, %13.64, %13.97, %14.15 ve %14.37 basınç dayanımlarında iyileşme görülmüştür.

Çizelge 4.9 incelendiğinde, üretilen numunelerin basınç dayanımının ortalamasının Çizelge 3.8’de belirtilen 25 MPa değerinden büyük bir değer olmasından dolayı ve üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde olup olmadığının ve kalite kontrol derecesinin belirlenebilmesi için standart sapma değeri esas alınmıştır. Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük

değirin, 2.95, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 3.02 olarak tespit edilmiştir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.5. F sınıfı uçucu külün 7 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği

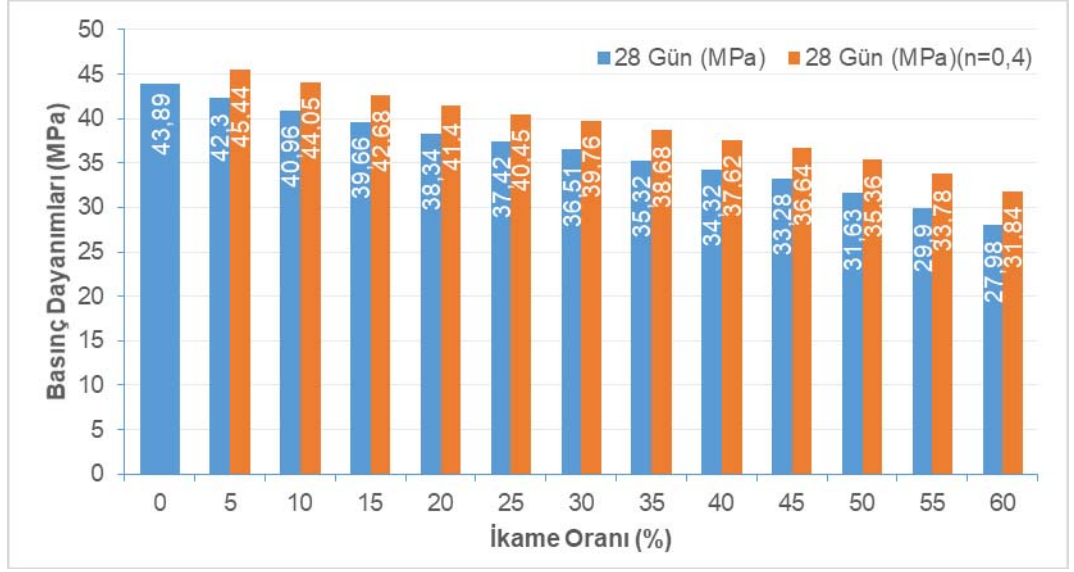
7 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 33.14 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki basınç dayanımı referans numuneye göre, %2.15 basınç dayanımında iyileşme görülmüştür. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi, %5 optimizasyonu yapılmış uçucu kül ikame oranında basınç dayanımı ikamesiz basınç dayanımından yüksek çıkmıştır. %10, %15, %20 ve %25 optimize edilmiş F sınıfı UK ikame oranında basınç dayanımı ikamesiz basınç dayanımının değerine çok yakın çıkmıştır

Çizelge 4.10. F Sınıfı Uçucu Külün 28 Günlük Ortalama Basınç Dayanımları ve Standart Sapma Değeri

İkame Oranı (%)	28 Gün (MPa)	Standart Sapma	28Gün (Mpa)(n=0.4)	Standart Sapma
0	43.89	3.95	43.89	3.95
5	42.3	3.80	45.44	4.02
10	40.96	3.67	44.05	3.94
15	39.66	3.55	42.68	3.80
20	38.34	3.42	41.4	3.71
25	37.42	3.34	40.45	3.69
30	36.51	3.25	39.76	3.52
35	35.32	3.26	38.68	3.55
40	34.32	3.21	37.62	3.45
45	33.28	3.05	36.64	3.30
50	31.63	2.80	35.36	3.32
55	29.9	2.85	33.78	3.02
60	27.98	2.65	31.84	2.87

Çizelge 4.10'de verilen $n=0.4$ tane dağılım katsayısına göre yapılan, 28 günlük basınç dayanımlarında, optimize edilmiş F sınıfı UK'lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK'lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında artış yüzdeleri, %7.42, %7.54, %7.61, %7.98, %8.10, %8.90, %9.51, %9.62, %10.10, %11.79, %12.98 ve %13.80 basınç dayanımlarında iyileşme olduğu görülmüştür.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değerin, 3.95, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 4.02 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ortalaması alınan dayanım değeri sonuçlarının birbirine yakın olduğunun göstergesidir. Standart sapma değerlerini 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde "Çok İyi" kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.6. F sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği

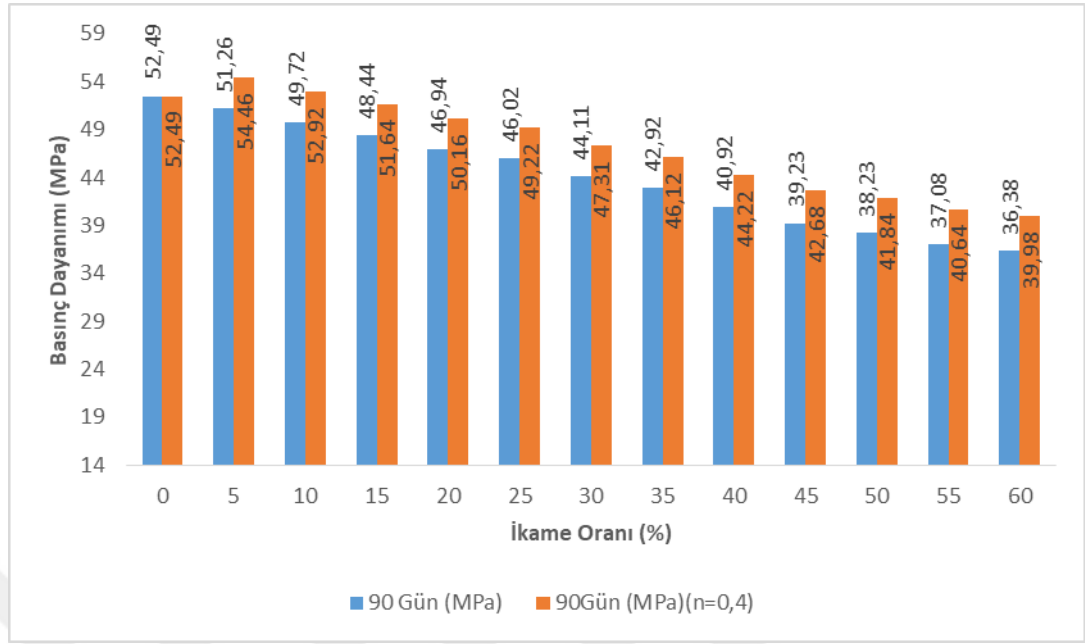
Şekil 4.6’da görüldüğü gibi, 28 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 45.44 MPa olarak elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımını en iyi artıran optimize edilmiş F sınıfı UK ikame oranı %5 olarak görülmüştür. %5 ikame oranında ki basınç dayanımı referans numunenin basınç dayanımından %3.53 daha yüksek elde edilmiştir. Tüm ikame oranlarında Optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin basınç dayanımları optimize edilmemiş F sınıfı UK dayanımlardan yüksek çıkmıştır. %5 ve %10 optimize edilmiş UK ikame oranında basınç dayanımı referans numunenin basınç dayanımından yüksek çıkmıştır. %15, %20 ve %25 optimize edilmiş F sınıfı UK ikame oranında basınç dayanımı referans numunenin basınç dayanımının değerine çok yakın çıkmıştır.

Çizelge 4.11. F Sınıfı Uçucu Külün 90 Günlük Ortalama Basınç Dayanımları ve Standart Sapma Değeri

İkame Oranı (%)	90 Gün (MPa)	Standart Sapma	90 Gün (MPa)(n=0.4)	Standart Sapma
0	52.49	2.10	52.49	2.10
5	51.26	2.05	54.46	2.18
10	49.72	1.99	52.92	2.12
15	48.44	1.94	51.64	2.07
20	46.94	1.88	50.16	2.01
25	46.02	1.84	49.22	1.97
30	44.11	1.76	47.31	1.89
35	42.92	1.72	46.12	1.84
40	40.92	1.64	44.22	1.77
45	39.23	1.57	42.68	1.71
50	38.23	1.53	41.84	1.67
55	37.08	1.48	40.64	1.63
60	36.38	1.46	39.98	1.60

Çizelge 4.11’da verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 90 günlük basınç dayanımlarında, optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK’lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında artış yüzdeleri,%6.24, %6.44, %6.61, %6.86, %6.95, %7.25, %7.46, %8.06, %8.79, %9.44, %9.60 ve %9.90 basınç dayanımlarında iyileşme olduğu görülmüştür.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değeri 2.10, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 2.12 olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar basınç dayanım ortalama değerinde belirtilen sınırlar içerisinde yaklaşık olarak dengeli olacak biçimde dağılmıştır. 90 günlük numuneler olması ve daha homojen bir yapıda olması bunun en önemli sebebidir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.7. F sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi, 90 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 54.46 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranındaki basınç dayanımı referans numuneye göre, %3.75 daha fazla çıkmıştır. %5, %10 ve %15 optimize edilmiş F sınıfı UK ikame oranında basınç dayanımı referans numuneye göre daha yüksek çıkmıştır. %30 kadar da optimize edilen F sınıfı UK ikame numunelerin, referans numuneye göre basınç dayanımları çok yakın çıkmıştır.

28 günlük basınç dayanımları sonucunda optimize edilen F sınıfı UK’lerin optimize edilmeyene göre belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Referans çimento harç numunesine göre, optimize edilmiş, %10 UK ikemesinin aynı mekanik dayanımı verdiği görülmüştür. Bu durum optimize edilenlerin çimento harçları içerisinde boşlukları doldurarak, dolgun etkisini arttırdığından kaynaklanmaktadır.

90 günlük basınç dayanımlarına bakıldığında ise, referans çimento harç numunesine göre, optimize edilmiş, %10 UK ikemesinin aynı basınç dayanımı verdiği görülmüştür ve yaklaşık olarak %20 ikame oranında ise referans numuneyi yaklaştığı görülmektedir. F sınıfı uçucu külün de ortamda serbest kireç oluşmasını beklemesinden dolayı ilerleyen yaşlarda basınç dayanımı daha iyi artırmıştır.

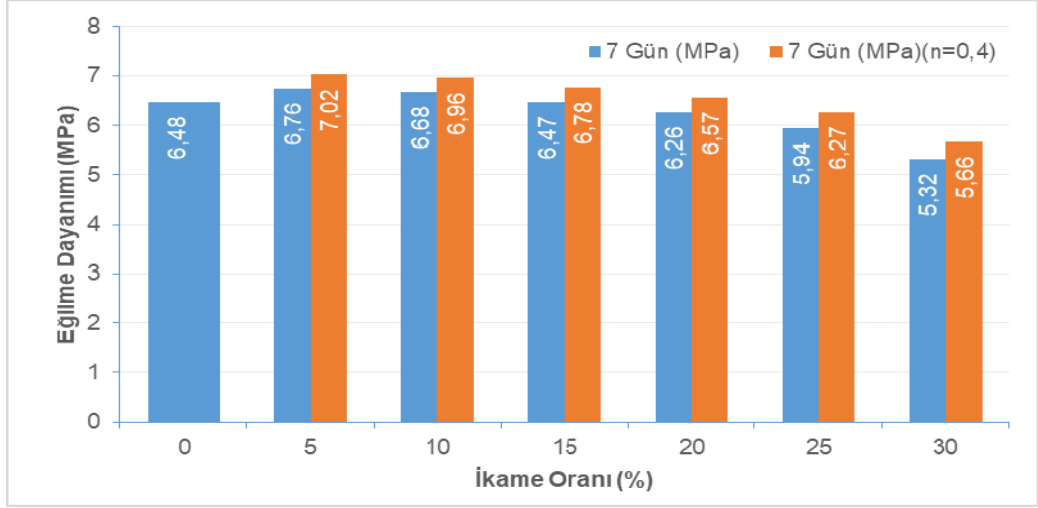
4.2.2. Optimize Edilmiş C Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının Eğilme ve Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

Çizelge 4.12. C sınıfı UK'ün 7 günlük ortalama eğilme dayanımları ve İstatiksel Parametreleri

İkame Oranı (%)	7 Gün (MPa)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)	7 Gün (MPa) (n=0.4)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)
0	6.48	0.71	10.96	6.48	0.71	10.96
5	6.76	0.74	10.95	7.02	0.77	10.97
10	6.68	0.75	11.23	6.96	0.78	11.21
15	6.47	0.71	10.97	6.78	0.74	10.91
20	6.26	0.68	10.86	6.57	0.75	11.42
25	5.94	0.69	11.62	6.27	0.68	10.85
30	5.32	0.58	10.90	5.66	0.62	10.95

Çizelge 4.12'da verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 7 günlük eğilme dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin, optimize edilmemiş C sınıfı UK'lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında artış yüzdeleri, %3.85, %4.19, %4.79, %4.95, %5.56, %6.39 eğilme dayanımlarında iyileşme olduğu görülmüştür.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değeri 0.75, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 0.78 olarak tespit edilmiştir. Çok hafif bir sapmanın olduğu görülmektedir. Bunun büyük nedeni numuneleri 7 günlük olması, hidratasyonun devam etmesi numunelerin homojen bir yapıya henüz ulaşamamasından kaynaklanmaktadır. 7 günlük çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10-20 MPa değerinden arasında olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde "İyi" kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.8. C sınıfı UK'ün 7 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği

Şekil 4.8'de, 7 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 7.02 MPa olarak elde edilmiş olup referans numunenin eğilme dayanımından %8.33 daha yüksek elde edilmiştir. %5, %10 ve %15 optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin referans numunenin eğilme dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

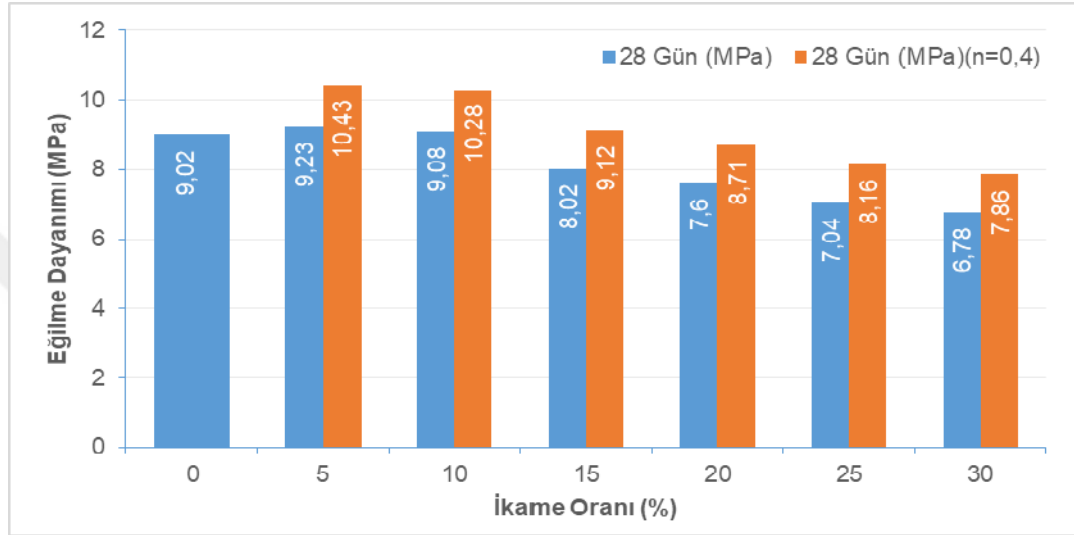
Çizelge 4.13. C sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama eğilme dayanımları ve İstatiksel Parametreleri

İkame Oranı (%)	28 Gün (MPa)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)	28 Gün (MPa) (n=0.4)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)
0	9.02	0.86	9.53	9.02	0.86	9.53
5	9.23	0.88	9.53	10.43	1.04	8.44
10	9.08	0.90	9.91	10.28	1.05	8.75
15	8.02	0.78	9.73	9.12	0.98	8.55
20	7.6	0.71	9.34	8.71	0.95	8.15
25	7.04	0.70	9.94	8.16	0.82	8.58
30	6.78	0.67	9.88	7.86	0.85	9.92

Çizelge 4.13'de verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 28 günlük eğilme dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin, optimize edilmemiş C sınıfı UK'lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında artış yüzdeleri, %13,

%13.22, %13.72, %14.61, %15.91, %15.93 eğilme dayanımlarında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değerin, 0.90, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 1.05 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ortalaması alınan dayanım değeri sonuçlarının istenilen sınır seviyesinde olduğunun göstergesidir.



Şekil 4.9. C sınıfı UK'ün 28 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği

Şekil 4.9'da, 28 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimum C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 10.43 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki eğilme dayanımı referans çimento harçlarında ki eğilme dayanımından %15.63 daha yüksek elde edilmiştir. %10, %15 optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin referans numunenin eğilme dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

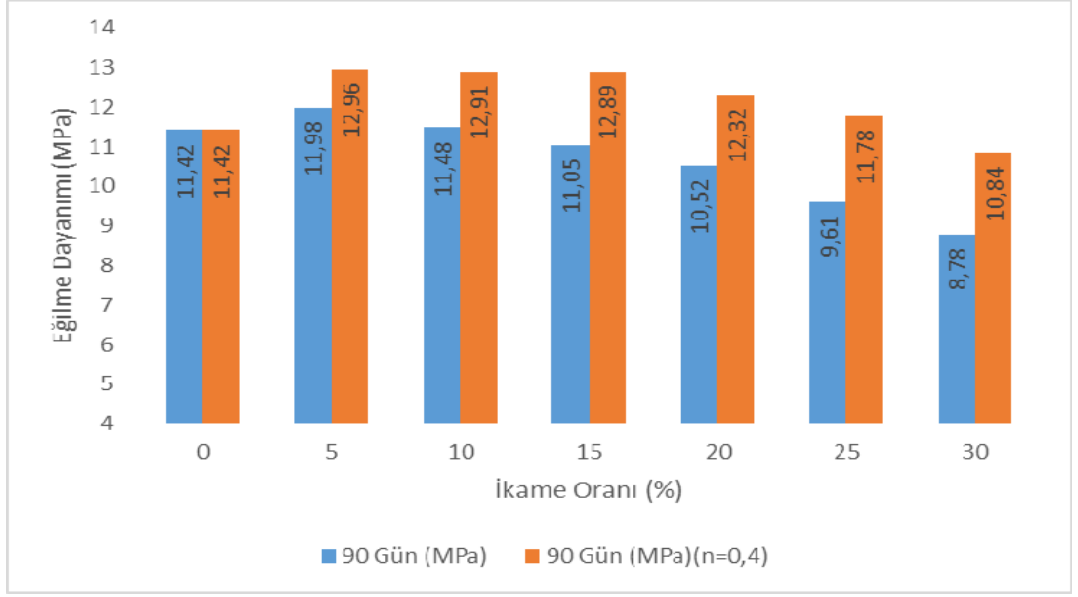
Çizelge 4.14. C sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama eğilme dayanımları ve İstatistiksel Parametreleri

İkame Oranı (%)	90 Gün (MPa)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)	90 Gün (MPa) (n=0.4)	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı (%)
0	11.42	1.14	9.98	11.42	1.14	9.98
5	11.98	1.24	10.35	12.96	1.41	10.88
10	11.48	1.19	10.37	12.91	1.38	10.69
15	11.05	1.18	10.68	12.89	1.39	10.78
20	10.52	1.06	10.08	12.32	1.34	10.88
25	9.61	0.95	9.89	11.78	1.18	10.02
30	8.78	0.95	10.82	10.84	1.08	9.96

Çizelge 4.14’de verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 90 günlük eğilme dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş C sınıfı UK’lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında artış yüzdeleri, %8.18 %12.46, %16.65, %17.11 %22.58, %23.46 eğilme dayanımlarında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değirin, 1.24, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 1.41 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ortalaması alınan dayanım değeri sonuçlarda, %10 sapmanın biraz aşağısında tespit edilmiştir. Ortalama 90 günlük eğilme dayanımlarının birbirine yakın değer verdiği ve sınırlar içerisinde olduğu görülmüştür.

90 günlük çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10-20 MPa değerinden arasında olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.10. C sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama eğilme dayanımlarının grafiği

Şekil 4.10’de görüldüğü gibi, 90 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimum C sınıfı uçucu kül ikameli çimento harçlarında 12.96 MPa olarak elde edilmiş olup, referans numunenin eğilme dayanımından %13.49 daha yüksek elde edilmiştir. %5, %10, %15, %20 ve %25 Optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin referans numunenin eğilme dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli 7 günlük çimento harçlarında ise, %15’e kadar referans numuneyi geçtiği, optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise, %20’ye kadar referans numuneyi geçtiği görülmektedir. Bu durumun C sınıfı uçucu kül bileşenin oluşturan CaO miktarının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. %10’dan fazla CaO içeren UK’ler puzolanik özelliklerinin yanında, bağlayıcılık özellikleri vardır. C sınıfı UK’ün hidratasyon tepkimesini hızlandırdığı ve boşlukları daha çabuk doldurduğu görülmektedir.

Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli 28 günlük dayanımında %5 ikame oranı referans numuneyi geçerkenken, optimizasyon yapılarak bu oran %15’e çıkmıştır.

Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli 90 günlük dayanımında %10 ikame oranı referans numuneyi geçerkenken, optimizasyon yapılarak bu oran %20’e çıkmıştır.

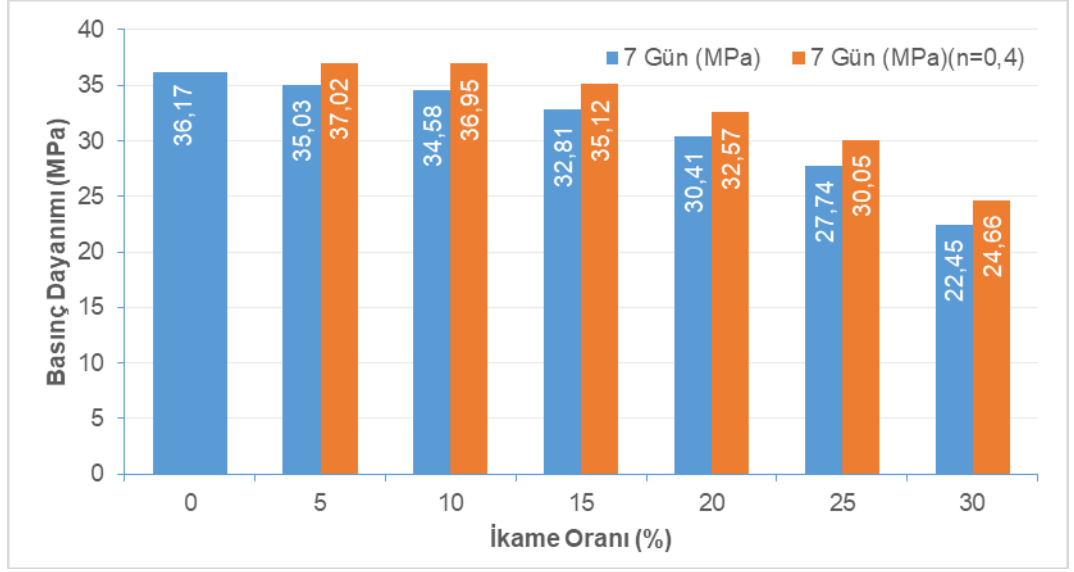
28 ve 90 günlük eğilme dayanım sonucunda optimizasyon yaparak UK’lerde yapılan tane dağılımlarında filler etkisi sağlandığında, çimentonun içerisine daha yüksek hacimde UK oranı, dolayısıyla yüksek kompakte ile çok iyi dayanımların elde edildiği görülmüştür.

Çizelge 4.15. C sınıfı uçucu külün 7 günlük ortalama basınç dayanımları ve İstatiksel Parametreleri

İkame Oranı (%)	7Gün (MPa)	Standart Sapma	7 Gün (MPa)(n=0.4)	Standart Sapma
0	36.17	3.69	36.17	3.69
5	35.03	3.57	37.02	3.85
10	34.58	3.58	36.95	3.84
15	32.81	3.35	35.12	3.68
20	30.41	3.10	32.57	3.45
25	27.74	2.83	30.05	3.42
30	22.45	2.29	24.66	2.98

Çizelge 4.15’de verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 7 günlük basınç dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin, Optimize edilmemiş C sınıfı UK’lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında artış yüzdeleri, %5.68, %6.85, %7.04, %7.10, %8.33, %9.84 basınç dayanımlarında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değeri 3.69, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 3.85 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ortalaması alınan dayanım değeri sonuçlarında, sapmanın çok az olduğunun değerlerinin birbirine yakın olduğunun göstergesidir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.11. C sınıfı uçucu külün 7 günlük ortalama basınç dayanımları

Şekil 4.11’de, 7 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 37.02 MPa olarak elde edilmiş olup, referans numuneye göre %2.35 artış gerçekleşmiştir. %5 ve %10 Optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin referans numunenin basınç dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

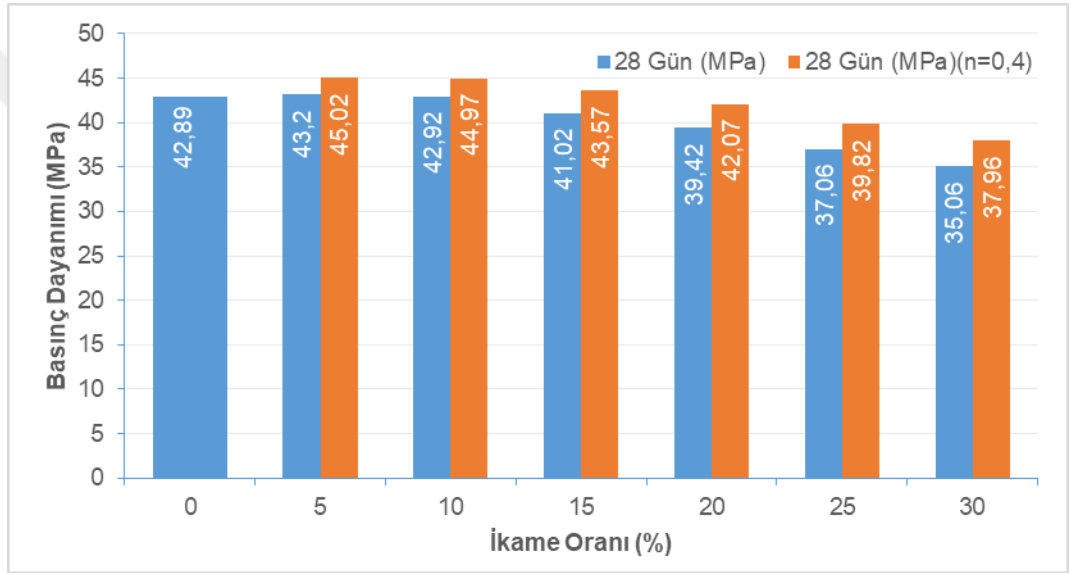
Çizelge 4.16. C sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama basınç dayanımları ve Standart Sapma Değerleri

İkame Oranı (%)	28 Gün (MPa)	Standart Sapma	28 Gün (MPa)(n=0.4)	Standart Sapma
0	42.89	4.01	42.89	4.01
5	43.2	4.32	45.02	4.24
10	42.92	4.29	44.97	4.26
15	41.02	4.10	43.57	4.12
20	39.42	3.94	42.07	4.01
25	37.06	3.71	39.82	3.98
30	35.06	3.51	37.96	3.80

Çizelge 4.16’de verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 28 günlük basınç dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin, Optimize edilmemiş C sınıfı UK’lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında artış yüzdeleri,

%4.21, %4.78, %6.22, %6.72, %7.45, %8.27 basınç dayanımlarında iyileşme olduğu görülmüştür.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değerin, 4.29 optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 4.26 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ortalaması alınan dayanım değeri sonuçlarında, sapmanın çok az olduğunun değerlerinin birbirine yakın olduğunun göstergesidir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.12. C sınıfı uçucu külün 28 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği

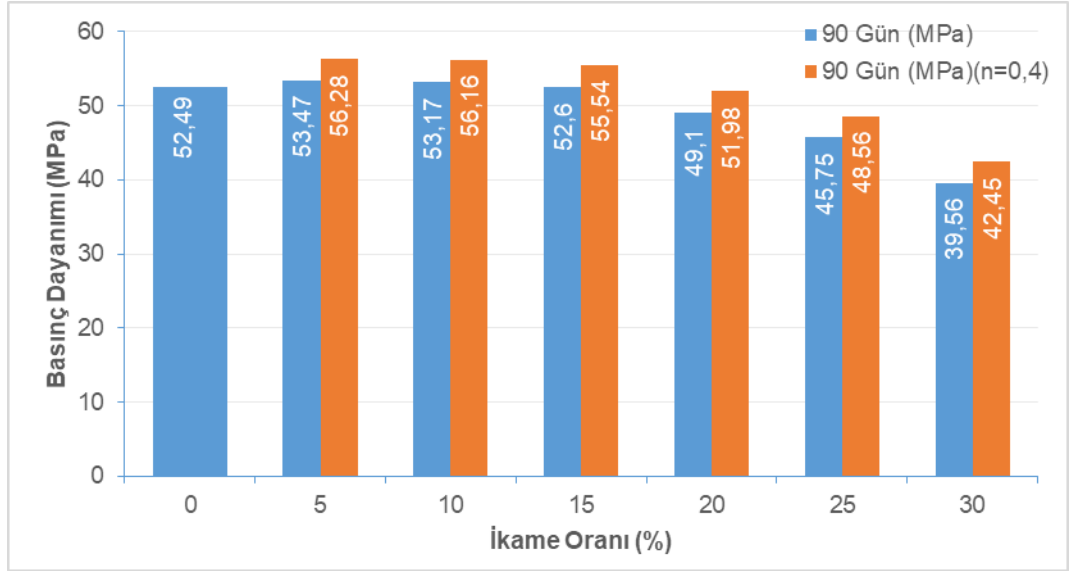
Şekil 4.12’de, 28 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 45.02 MPa olarak elde edilmiş olup, referans numuneye göre %4.96 artış gerçekleşmiştir. %5, %10 ve %15 Optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin referans numunenin basınç dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.17. C sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama basınç dayanımları ve Standart Sapma Değerleri

İkame Oranı (%)	90 Gün (MPa)	Standart Sapma	90 Gün (MPa)(n=0.4)	Standart Sapma
0	52.49	2.10	52.49	2.10
5	53.47	2.14	56.28	2.25
10	53.17	2.15	56.16	2.26
15	52.6	2.10	55.54	2.21
20	49.1	1.96	51.98	2.08
25	45.75	1.83	48.56	1.94
30	39.56	1.58	42.45	1.70

Çizelge 4.17’de verilen n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 90 günlük basınç dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin, Optimize edilmemiş C sınıfı UK’lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında artış yüzdeleri, %5.26, %5.62, %5.59, %5.87, %6.14, %7.31 basınç dayanımlarında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değirin, 2.15, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 2.26 olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar basınç dayanım ortalama değerinde belirtilen sınırlar içerisinde yaklaşık olarak dengeli olacak biçimde dağılmıştır. 90 günlük numuneler olması ve daha homojen bir yapıda olması bunun en önemli sebebidir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.13. C sınıfı uçucu külün 90 günlük ortalama basınç dayanımlarının grafiği

Şekil 4.13’de, 90 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 Optimize edilmiş C sınıfı uçucu kül ikameli çimento harçlarında 56.28 MPa olarak elde edilmiş olup, referans numuneye göre %7.22 artış gerçekleşmiştir. %5, %10 ve %15 Optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin referans numunenin basınç dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli 7 günlük erken dayanımlarda düşük çıkmıştır. Bu durum ilk günlerde puzolanik malzemelerinin aktivitelerin yavaş olduğunu göstermektedir. Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise, %10 kadar referans numuneyi geçtiği görülmektedir. Optimizasyonu yapılan C sınıfı UK’ün hidratasyon tepkimesini hızlandırdığı ve boşlukları daha çabuk doldurduğu görülmektedir.

Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli 28 günlük dayanımında %10 ikame oranı referans numuneyi geçerkenken, optimizasyon yapılarak bu oran %20’e çıkmıştır.

Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli 90 günlük dayanımında %15 ikame oranı referans numuneyi geçerkenken, optimizasyon yapılarak bu oran %20’e çıkmıştır.

28 ve 90 günlük basınç dayanım sonucunda optimizasyon yaparak UK’lerde yapılan tane dağılımlarında filler etkisi sağlandığında, çimentonun içerisine daha yüksek hacimde UK oranı, dolayısıyla yüksek kompasite ile çok iyi dayanımların elde edildiği görülmüştür.

F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımı karşılaştırılması Çizelge 4.18’ da verilerek basınç dayanım sonuçları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Çizelge 4.18. F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımı karşılaştırılması

		Basınç Dayanımı (MPa) (F sınıfı)					Basınç Dayanımı (MPa) (C sınıfı)		
	İkame Oranı (%)	7 Gün	28 Gün	90 Gün		İkame Oranı (%)	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Optimize edilmemiş	Referans	6.48	9.02	11.42	Referans	6.48	9.02	11.42	
	5	6.22	8.88	11.02	5	6.76	9.23	11.98	
	10	5.99	8.38	10.68	10	6.68	9.08	11.48	
	15	5.78	7.98	10.34	15	6.47	8.02	11.05	
	20	5.57	7.85	10.24	20	6.26	7.6	10.52	
	25	5.24	7.58	9.98	25	5.94	7.04	9.61	
	30	4.89	7.21	9.54	30	5.32	6.78	8.78	
Optimize edilmiş	5	6.68	10.68	11.42	5	7.02	10.43	11.42	
	10	6.46	10.12	12.92	10	6.96	10.28	12.96	
	15	6.24	9.66	12.82	15	6.78	9.12	12.91	
	20	6.02	9.52	12.56	20	6.57	8.71	12.89	
	25	5.72	9.22	12.45	25	6.27	8.16	12.32	
	30	5.36	8.79	12.14	30	5.66	7.86	11.78	

Çizelge 4.18 incelendiğinde, 7 günlük eğilme dayanımlarının optimize edilmemiş F ve C sınıfı UK’lerin referans numuneyi geçemediği görülmektedir. Bu durum ilk günlerde puzolanik malzemelerinin aktivitelerin yavaş olduğunun göstergesidir. F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 7 günlük eğilme dayanım değerlerinde en yüksek eğilme dayanım değeri referans numunesinde olduğu görülmüştür. %5 UK F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanım değerinde referans numuneye yakın çıktığı görülmüştür. Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise, %20’ye kadar referans numuneyi geçtiği görülmektedir.

28 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 10.68 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki eğilme dayanımı referans çimento harçlarında ki eğilme dayanımından %18.40 daha fazla elde edilmiştir. %10, %15, %20 ve %25 ikameli optimize edilmiş çimento harçları, referans numuneden yüksek çıkmıştır.

28 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimum C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 10.43 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranında ki eğilme dayanımı referans çimento harçlarında ki eğilme dayanımından %15.63 daha yüksek elde edilmiştir. %10, %15 optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin referans numunenin eğilme dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

28 günlük optimize edilen C sınıfının F sınıfı arasında ikame oranları karşılaştırıldığında hemen hemen aynı değerleri yakın çıktığı 28 günlük optimize edilmiş eğilme dayanım sonuçlarının F sınıfında daha iyi olduğu görülmektedir.

90 günlük eğilme dayanımlarında, optimize edilmiş F sınıfı UK'lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK'lerin incelendiğinde, %5, %10, %15, %20, %25, %30 ikame oranlarında artış yüzdeleri %19.06, %20.04, %21.47, %21.58, %21.64, %21.80, eğilme dayanımlarında artış görülmüştür.

90 günlük sonuçlar arasında %5 optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 13.12 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranındaki eğilme dayanımı referans numunedeki eğilme dayanımından %14.88 daha fazla elde edildiği tespit edilmiştir.

n=0.4 tane dağılım katsayısına göre yapılan, 90 günlük eğilme dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin, optimize edilmemiş C sınıfı UK'lerin sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında artış yüzdeleri, %17.71 %20.73, %21.45, %22.24, %22.58, %23.46 eğilme dayanımlarında iyileşme olduğu görülmüştür.

90 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimum C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 14.03 MPa olarak elde edilmiş olup, referans numunenin eğilme dayanımından %22.85 daha yüksek elde edilmiştir. %5, %10, %15 %20 ve %25

Optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin referans numunenin eğilme dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

F ve C sınıfı Optimize edilmiş UK'ler 7 günlük C sınıfı UK'lerin eğilme dayanımının F sınıfı UK'lere daha yüksek çıktığı, 28 ve 90 günlerin sonunda ise bu olayın tam tersi şekilde F sınıfı UK'lerin C sınıfı UK'lere göre basınç dayanımının daha iyi olduğu yapılan çalışmada görülmüştür. Bunun sebebi ise, 7 günlük erken dayanımda C sınıfı UK'lerin yüksek çıkmasının sebebi olarak içerisinde yüksek oranda kireç içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. F tipi uçucu külün de ortamda serbest kireç oluşmasını beklemesinden dolayı ilerleyen yaşlarda dayanım artışı oluşturduğu kanaatine varılmıştır. F sınıfının düşük kireçli olması, silis ve alümina açısından zengin olmasından dolayı F sınıfı UK'ler yavaş olarak reaksiyona girdiği düşünülmektedir.

F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı karşılaştırılması Çizelge 4.19' da verilerek basınç dayanım sonuçları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Çizelge 4.19. F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı karşılaştırılması

		Basınç Dayanımı (MPa) (F sınıfı)					Basınç Dayanımı (MPa) (C sınıfı)		
	İkame Oranı (%)	7 Gün	28 Gün	90 Gün		İkame Oranı (%)	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Optimize edilmemiş	Referans	32.44	42.89	52.49	Referans	32.44	42.89	52.49	
	5	30.74	42.3	51.26	5	35.03	43.2	53.47	
	10	29.98	40.96	49.72	10	34.58	42.92	53.17	
	15	29.16	39.66	48.44	15	32.81	41.02	52.6	
	20	27.85	38.34	46.94	20	30.41	39.42	49.1	
	25	27.02	37.42	46.02	25	27.74	37.06	45.75	
	30	25.22	36.51	44.11	30	22.45	35.06	39.56	
Optimize edilmiş	5	33.14	45.44	54.46	5	36.17	45.02	56.28	
	10	32.36	44.05	52.92	10	37.02	44.97	56.16	
	15	31.63	42.68	51.64	15	36.95	43.57	55.54	
	20	31.3	41.4	50.16	20	35.12	42.07	51.98	
	25	30.38	40.45	49.22	25	32.57	39.82	48.56	
	30	28.38	39.76	47.31	30	30.05	37.96	42.45	

7 günlük optimize edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimentolu bağlayıcı numunelerin basınç dayanımları referans numuneyi geçemediği görülmüştür. 7 günlük optimize edilmiş F sınıfı ikameli UK ikameli çimento harcı %5 ikame oranındaki basınç dayanımı (33.14 MPa) referans çimento harcı basınç dayanımından (32.44MPa) %2.16 daha yüksek elde edilmiştir.

7 günlük optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcı, %5 ikame oranındaki basınç dayanımı (36.17 MPa) iken, referans çimento harcı basınç dayanımından (32.44MPa) %15.69 yüksek çıkmıştır. %10 ikame oranındaki basınç dayanımı (37.02 Mpa) %12.98, %15 ikame oranındaki basınç dayanımı (36.95 MPa) %7.83 ve %20 ikame oranındaki basınç dayanımı (32.57) %0.40 daha yüksek elde edilmiştir.

Optimize edilmiş, F ve C sınıfı 7 günlük basınç dayanımlarını incelendiğinde, tüm ikame oranlarında F sınıfı UK' ün Basınç dayanımından yüksek olduğu görülmektedir.

28 günlük optimize edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimentolu bağlayıcı numunelerin basınç ve eğilme dayanımları referans numune (42.89 MPa) geçememiştir. 28günlük optimize edilmiş F sınıfı ikameli çimentolu bağlayıcılarda %5 ikame oranındaki basınç dayanımı (45.44 MPa) referans çimento harcı basınç dayanımından (42.89MPa) %3.53, %10 ikame oranında (45.57Mpa) % 0.36 daha yüksek elde edilmiştir. 28 günlük optimize edilmiş C sınıfı ikameli çimentolu bağlayıcılarda %5 ikame oranındaki basınç dayanımı (42.20 MPa) katkısız çimento harcı basınç dayanımından (43.89MPa) %4.85, %10 ikame oranındaki basınç dayanımı (42.42 Mpa) %3.83, daha yüksek elde edilmiştir.

Optimize edilmiş, F ve C sınıfı 28 günlük basınç dayanımlarını incelendiğinde, %5-%20 ikame oranlarına göre basınç dayanımları hemen hemen aynı çıktığı, %25 ve %30 ikame oranlarında ise C sınıfı UK ikameli çimento harçlarını geçtiği görülmektedir.

90 günlük optimize edilmemiş %5 ikameli F sınıfı uçucu külün basınç dayanımı (56.06 MPa) referans çimento harcı basınç dayanımından (52.49MPa) %6.80, %10 ikameli (54.72 MPa) %4.25, %15 ikameli (53.44 MPa) %1.81daha yüksek elde edilmiştir. 90 günlük optimize edilmiş F sınıfı çimentolu bağlayıcılara %5 ikame oranındaki basınç dayanımı (57.46 MPa) referans çimento harcı basınç dayanımından (52.49MPa) %9.47, %10 ikame oranında (55.92 MPa) %6.53, %15 ikame oranında (54.64 MPa) %4.10 daha fazla artış göstermiştir. 90 günlük optimize edilmiş C sınıfı çimentolu bağlayıcılara %5 ikame oranındaki basınç dayanımı (56.28 MPa) referans çimento harcı basınç dayanımından (52.49MPa) %7.22, %10 ikame oranında (54.66MPa) %4.13 ve %15 ikame oranında (53.64MPa) %4.10 daha fazla artış göstermiştir.

Literatürde yapılan bazı araştırmalar incelendiğinde, Mueller vd. [105] yaptıkları, kendiliğinden yerleşen betonlarda optimizasyon çalışmasında, Modifiye edilmiş Andreasen & Andersen Model ile $q=0.27$ dağılım katsayısı değeri ile düşük toz malzeme ile üretilmesi hedeflenen kendiliğinden yerleşen betonda tane dağılımı için daha uygun olduğunu ifade etmektedir. Wang vd., [106] yaptıkları, çalışmasında, kendiliğinden yerleşen betonlarda Modifiye edilmiş bir Brouwers partikülü karışım tasarım algoritması önerilmişler ve dağılım katsayısının $q=0.23-0.29$ arasındaki değerlerinin uygun olduğu belirtilerek bağlayıcı miktarının %20 azaltarak sonuçlarının iyi olduğunu söylemişlerdir. Yu vd., [107,108] Ultra-Yüksek Performanslı Betonun (UHPC) geliştirilmesine yönelik olarak verimli çimento ve mineral katkıların kullanımı incelenmişlerdir. Modifiye edilmiş

Andreasen & Andersen Modelini kullanarak Yüksek performanslı çimentolu kompozitler için ise $q = 0.23$ dağılım katsayısını bularak, UK gibi puzolanların hidrasyonu reaksiyonlarını ve mekanik dayanımların arttığını yaptıkları çalışmalarda söylemişlerdir. Sevim and Demir [109,110] Yüksek kompasiteli çimentolu sistemlerde UK tane boyut dağılımı ile yaptıkları çalışmada, Funk ve Dinger tarafından önerilen denklemde, $q=0.4$ dağılım katsayısının, en iyi mekanik dayanımı elde ettiklerini, uçucu külün % 10 optimize edilmemiş yerine % 20 optimize UK kullanmanın mümkün olabileceğini çimento harçlarında geçirimsizlik gibi fiziksel özelliklerinde iyileşmeler olduğunu söylemişlerdir. Bentz vd [111,112] Sürdürülebilir beton için çimento ve UK için tane boyut optimizasyonu çalışmasında, çimento ve uçucu külün tane dağılımlarının uygun seçilerek 1 günlük ve 28 günlük basınç dayanımlarının aynı olduğu ve çimento içeriğinde %35 azalma meydana geldiği söylemişlerdir.

Bu tez çalışmasında, literatüre yakın bulduğumuz $n=0.4$ tane dağılım katsayısı ile UK'lere tane dağılımı optimizasyonu yaparak büyük hacimli UK kullanımı artırılmış ve bu artış oranı %30 ikame oranıdır. Tane dağılımı yapılmayan, 90 günlük UK'lerin basınç dayanımları incelendiğinde F sınıfı UK ikame %5, %10 ikame oranlarında referans numuneye yakaladığı, C sınıfı UK'lerin ise %15 ikamede referans numuneyi geçtiğini görmekteyiz. Tane dağılımı yapılarak F sınıfı UK' ler de 3 kat, C sınıfı UK' ler de ise 2 kat hacim olarak UK kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise, C sınıfı UK'lerin Yüksek oranda kireç içermesi, F tipi uçucu külün de ortamda serbest kireç oluşmasını beklemesinden dolayı zamana ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. Buda çimento üretimini azaltacak hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlayacaktır.

4.3. Durabilite Deneyleri

Tane boyut dağılımlarının belirlenen F ve C sınıfı uçucu küllerin, çimento harcının dayanımına etkisinden sonra durabilite özellikleri için sırasıyla, Donma - çözölmeye karşı dayanıklılık, Sülfata karşı dayanıklılık, Civalı porozimetre (MIP), Klor geçirgenliği, deneyleri yapılmıştır.

4.3.1. Donma- Çözölmeye Karşı Dayanıklılık;

ASTM C666 [138] “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing” da belirtilen, “betonun donma-çözölmeye karşı dayanıklılığını” belirlemek için kullanılan yöntemle göre donma-çözölmeye yapılmıştır. Su içinde donma suyun dışarı kaçmasını engellediğinden daha şiddetli etki oluşmaktadır. Bu yüzden donma ve çözölmeye su içinde olan deney yöntemi kullanılmıştır. Yöntemde donma-çözölmeye 300 devire kadar devam edilebilmektedir. Burada betonun ağırlık kaybı esas alınmıştır. Fakat ağırlık kaybının ölçümü, çoğunlukla yüzeydeki hasarı belirlediğinden, iç bünyedeki göçmeleri tespit için ultrasonik test cihazı kullanılmıştır.

Tane dağılımı Optimize edilmiş ve edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harcını referans, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarının 0, 100, 200 ve 300 döngüde Su emme, Ağırlık kaybı ve Basınç dayanım değerleri çizelgeler, şekiller şeklinde aşağıda verilmiştir.

Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında D-Ç deneyleri su emme, ağırlık kaybı ve basınç dayanımı çizelge 4.20’de verilmiştir.

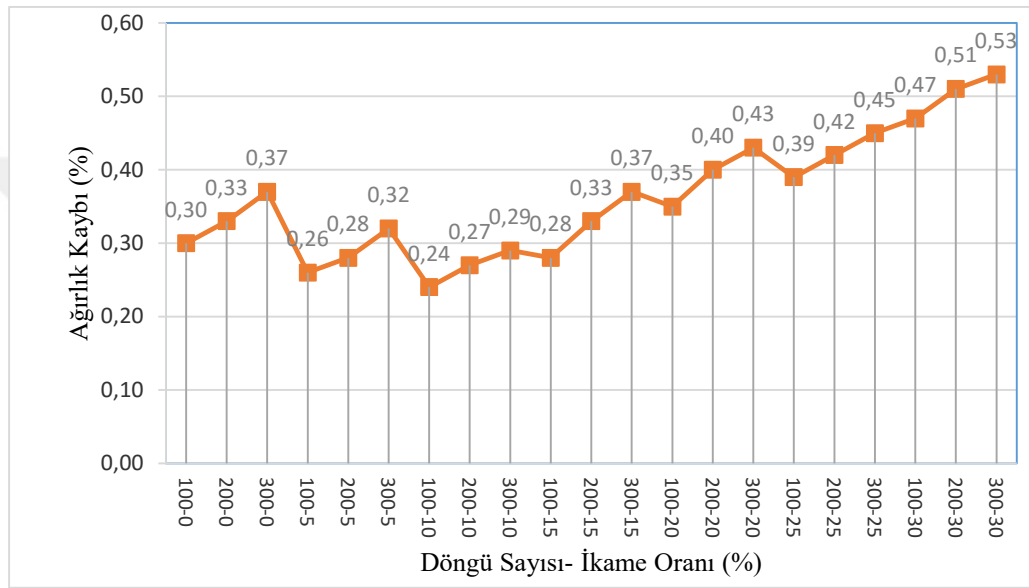
Çizelge 4.20. Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında D-Ç deneyleri

	Döngü Sayısı	Su Emme (%)	Ağırlık Kaybı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma (Basınç D.)
Referans Numune	0	9.27	0.00	52.49	2.92
	100	9.03	0.30	51.07	2.84
	200	8.26	0.33	45.92	2.55
	300	7.66	0.37	41.62	2.31
%5 F Sınıfı UK	0	9.29	0.00	51.26	2.85
	100	9.02	0.26	49.88	2.77
	200	8.01	0.28	44.85	2.49
	300	7.32	0.32	40.64	2.26
%10 F Sınıfı UK	0	9.34	0.00	49.72	2.76
	100	9.23	0.24	48.38	2.69
	200	8.25	0.27	43.50	2.42
	300	7.56	0.29	39.42	2.19
%15 F Sınıfı UK	0	9.8	0.00	48.44	2.69
	100	9.5	0.28	47.13	2.62
	200	8.4	0.33	42.38	2.36
	300	7.75	0.37	38.41	2.14
%20 F Sınıfı UK	0	10.21	0.00	46.94	2.61
	100	9.93	0.35	45.67	2.54
	200	8.96	0.40	41.07	2.28
	300	8.14	0.43	37.22	2.07
%25 F Sınıfı UK	0	10.24	0.00	46.02	2.56
	100	9.98	0.39	44.78	2.49
	200	9.03	0.42	40.26	2.24
	300	8.25	0.45	36.49	2.03
%30 F Sınıfı UK	0	10.56	0.00	44.11	2.45
	100	10.13	0.47	42.92	2.39
	200	9.23	0.51	38.59	2.15
	300	8.28	0.53	34.97	1.94

Çizelge 4.20’de su emme özellikleri incelendiğinde, D-Ç olamadan her ikame oranında UK ikame oranları arttıkça su emme yüzdeleri artmıştır. D-Ç yapılmadan önce referans çimento harcında su emme yüzdesi, %5 ikame oranında %0.22, %10 ikame oranında 0.76, %15 ikame oranında %5.72, %20 ikame oranında %10.14, %25 ikame oranında %10.46 ve %30 ikame oranında ise %13.92 oranında su emme yüzdeleri artmıştır.

Standart sapma sonuçları Çizelge 4.20 incelendiğinde, numunelerde standart sapma değerleri 2.92-1.94 arasında değişmektedir. Üretilen çimento harçları ortalama değerler normal sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Ağırlık kaybı özellikleri incelendiğinde Şekil 4.14 de, optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç yüzde değişimleri verilmiştir.



Şekil 4.14. Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi

Şekil 4.14 incelendiğinde, referans çimento harç numuneleri sırasıyla, 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.30, %0.33 ve %0.37 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%5 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.26, %0.28 ve %0.32 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

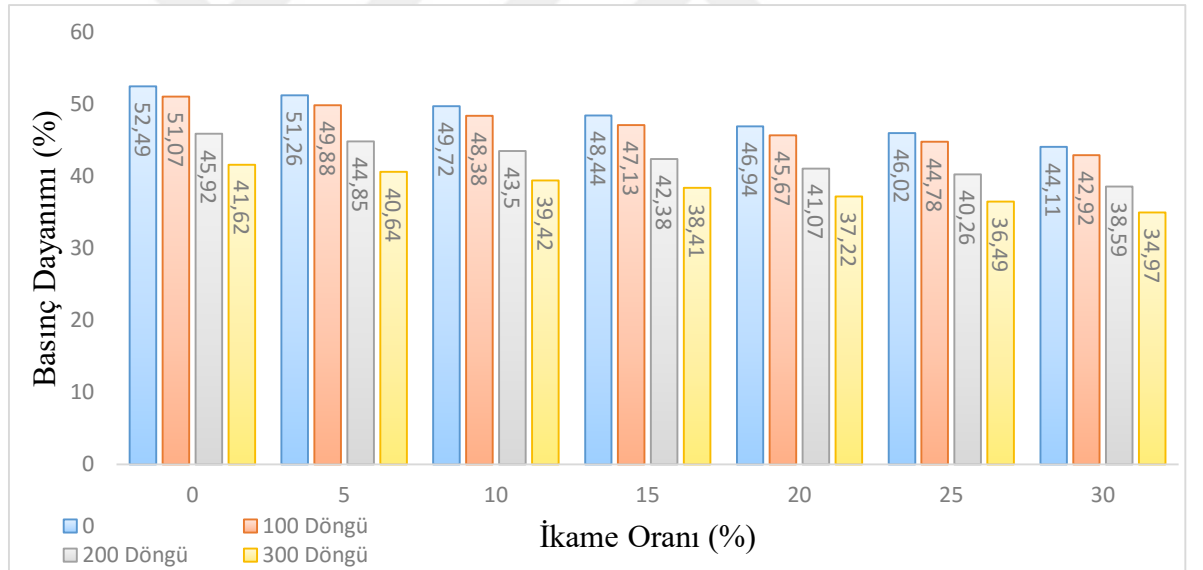
%10 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.24, %0.27 ve %0.29 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%15 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.28, %0.33 ve %0.37 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%20 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.35, %0.40 ve %0.43 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%25 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.39, %0.42 ve %0.45 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%30 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.47, %0.51 ve %0.53 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

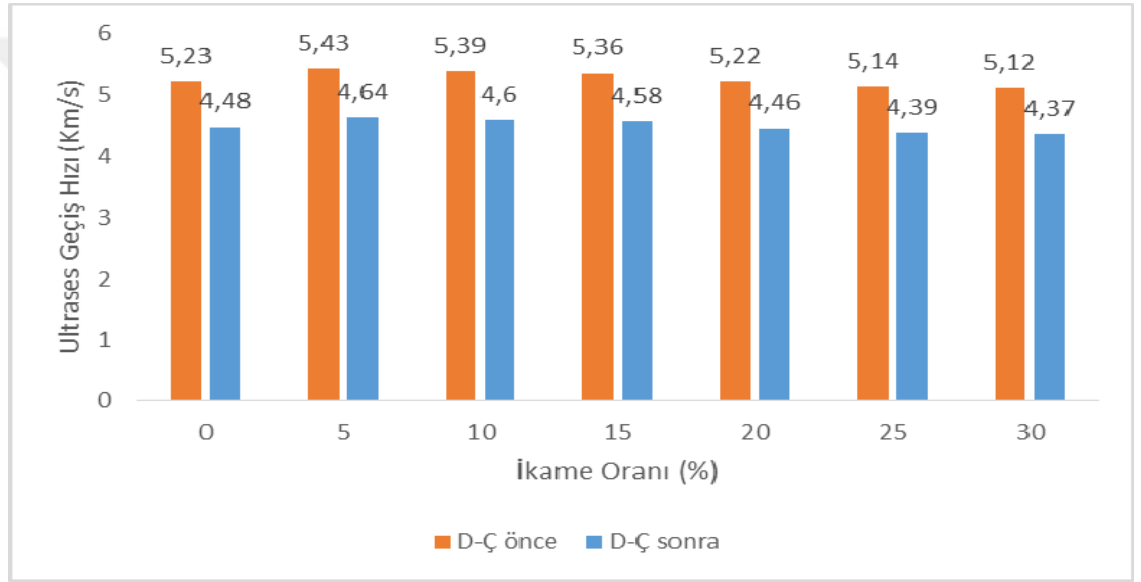


Şekil 4.15. Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi basınç kaybı değeri

ASTM C 666 yöntem A donma-çözölmeye göre 0, 100, 200 ve 300 döngülü numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerlerinin ikame oranlarına göre basınç değişimleri verilmiştir. Şekil 4.15’de görüldüğü gibi %5, % 10 ve yaklaşık %15 ikameli F sınıfı UK ikameli çimento harçların D-Ç karşı daha dirençli oldukları tespit edilmiştir.

Optimize edilmemiş F Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ses dalga hızının beton içerisindeki geçiş hızı sayesinde harçların basınç dayanımı ve harçların diğer özellikleri arasında bağıntı kurabilmek mümkündür. ASTM C597 [144] standardına uygun 0.1 μ s duyarlılıkta ultrases cihazından 55 kHz'lik ses dalgaları gönderilerek çimento harcından geçen ses dalgalarının geçiş sürelerini belirlenmiştir. Bu sayede çimento harcından geçen ses dalgalarının geçiş süresi (t, μ s) okunarak, ses geçiş hızı (V_s , km/s) hesaplanmıştır. Çizelge 3.7'de verilen ultrases geçiş hızlarının pratik değerlendirilmesine göre değerlendirilmiştir.



Şekil 4.16. 90 günlük optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı

Şekil 4.16'da verilen ultrasonik ses hızı deney sonuçları değerlendirildiğinde 90 günlük numunelerin beton kalitesi Çizelge 3.7'de verilen ultrases geçiş hızlarının pratik değerlendirilmesi göre değerlendirilmiştir. Referans numune, %5, %10 ve %15 UK ikameli çimento harçları “mükemmel” olarak %20, %25 ve %30 ikameli numuneler ise “iyi” olarak tespit edilmiştir. 90 günlük numunelerin beton kalitesi “mükemmel” olarak tespit edilmiştir. 90 günlük F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı sonuçlarını karşılaştırıldığında benzer olarak en yüksek ses hızına %5 UK içeren numuneler olduğu ve %5, %10 ve %15 ikameli numunelerin referans numuneye göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

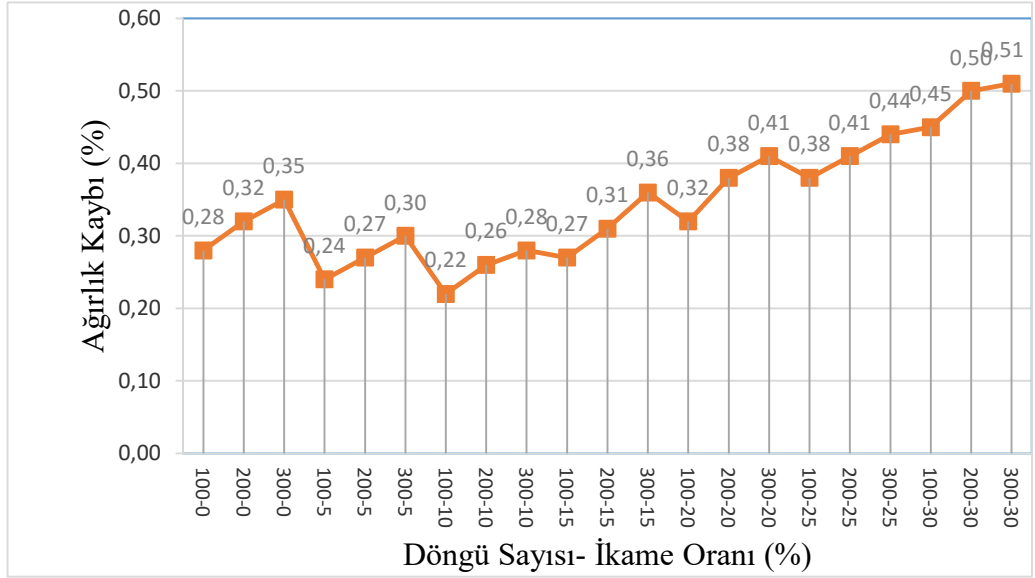
Bu bölümde sonuç olarak; tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK’lerde, D-Ç oldukça emme oranları tüm ikame oranlarında düşmüştür. Döngü sayıları artıkça su emme değerlerinde Çizelge 4.20’de görüldüğü gibi düşüşler meydana gelmiştir. Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi sonucunda %15 ikame oranına kadar D-Ç karşı daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarında ise referans çimento harçlarını geçemediği görülmüştür. İkame oranı artıkça çimento harçlarında daha fazla hasar görmeye başlamıştır. Bunun sebebi ise, döngü sayılarının artması birlikte, çimento hamurunda yüzeydeki hasar oluşmakta iç bünyedeki göçmeler oluşmuştur.

Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında D-Ç deneyleri su emme, ağırlık kaybı ve basınç dayanımı çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.21. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçların D-Ç deneyleri

	Döngü Sayısı	Su Emme (%)	Ağırlık Kaybı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma
Referans Numune	0	9.27	0.00	52.49	2.92
	100	9.03	0.28	51.07	2.84
	200	8.26	0.32	45.92	2.55
	300	7.66	0.35	41.62	2.31
%5 F Sınıfı UK	0	8.83	0.00	54.46	3.03
	100	8.57	0.24	52.99	2.95
	200	7.61	0.27	47.65	2.65
	300	6.95	0.30	43.18	2.40
%10 F Sınıfı UK	0	8.87	0.00	53.92	3.00
	100	8.77	0.22	51.89	2.89
	200	7.84	0.26	46.30	2.57
	300	7.18	0.28	41.96	2.33
%15 F Sınıfı UK	0	9.31	0.00	52.64	2.93
	100	9.03	0.27	52.05	2.89
	200	7.98	0.31	47.18	2.62
	300	7.36	0.36	42.95	2.39
%20 F Sınıfı UK	0	9.70	0.00	50.16	2.79
	100	9.43	0.32	48.81	2.71
	200	8.51	0.38	43.88	2.44
	300	7.73	0.41	39.77	2.21
%25 F Sınıfı UK	0	9.73	0.00	49.22	2.74
	100	9.48	0.38	47.89	2.66
	200	8.58	0.41	43.06	2.39
	300	7.84	0.44	39.03	2.17
%30 F Sınıfı UK	0	10.03	0.00	47.31	2.63
	100	9.62	0.45	46.03	2.56
	200	8.77	0.50	41.39	2.30
	300	7.87	0.51	37.51	2.09

Su emme özellikleri incelendiğinde, D-Ç olamadan her ikame oranında UK ikame oranları arttıkça su emme yüzdeleri artmıştır. Donma- çözülme yapılmadan önce referans çimento harcında su emme yüzde, %5 ikame oranında %0.23, %10 ikame oranında 0.68, %15 ikame oranında %5.68, %20 ikame oranında %10.10, %25 ikame oranında %10.44 ve %30 ikame oranında ise %13.85 oranında su emme yüzdeleri artmıştır.



Şekil 4.17. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi

Şekil 4.17 incelendiğinde, referans çimento harç numuneleri sırasıyla, 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.28, %0.32 ve %0.35 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%5 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.24, %0.27 ve %0.30 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%10 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.22, %0.26 ve %0.28 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

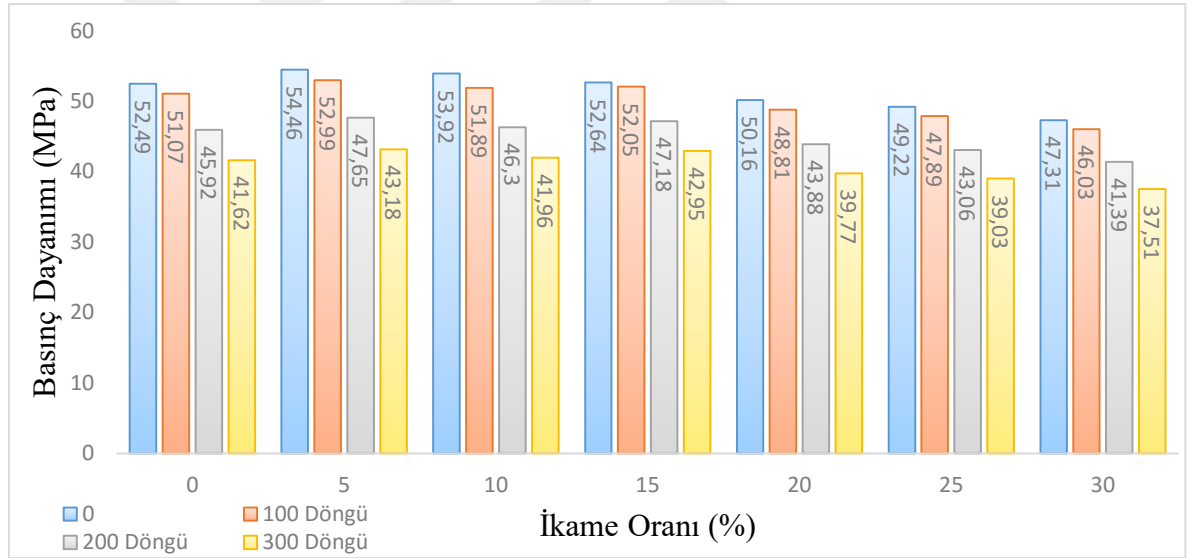
%15 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.27, %0.31 ve %0.36 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%20 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, % 0.35, % 0.40 ve %0.43 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%25 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.38, %0.41 ve %0.44 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%30 F sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.45, % 0.50 ve %0.51 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

Standart sapma sonuçları Çizelge 4.21 incelendiğinde, numunelerde standart sapma değerleri 3.03-2.09 arasında değişmektedir. Bu değerler yaklaşık olarak basınç dayanımlarındaki tüm değerler sınır değer içerisinde kalmıştır. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

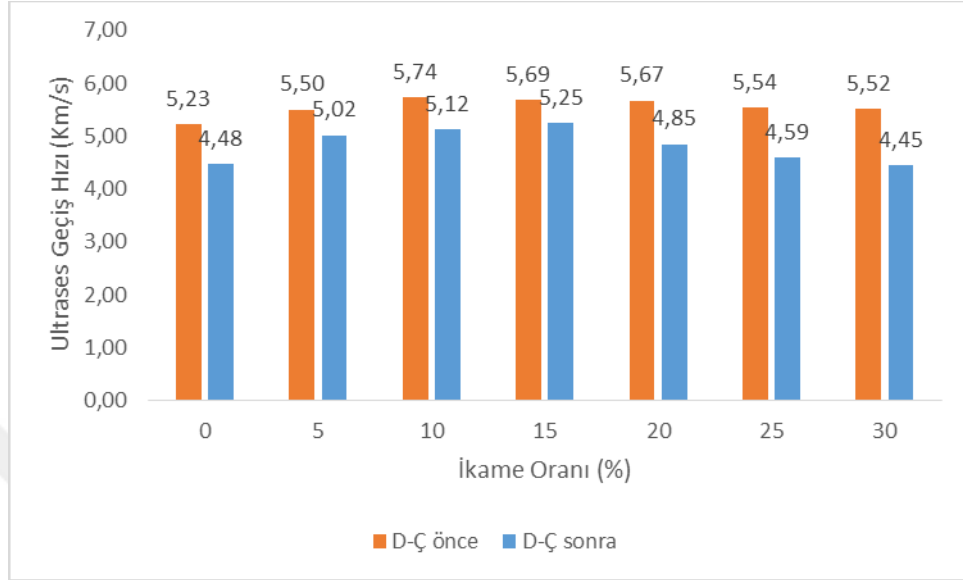


Şekil 4.18. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçların 90 günlük D-Ç deneyi basınç deneyi

ASTM C 666 yöntem A donma-çözülmeye göre 0, 100, 200 ve 300 döngülü numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerlerinin İkame oranlarına göre basınç değişimleri verilmiştir. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi %5, %10, %15 ve yaklaşık %20 ikameli optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında iyileşme olduğu gözükmemektedir.

Optimize Edilmiş F Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Optimize edilmiş F sınıfı ikameli çimento harç karışımlarının 90 günlük D-Ç öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızları deney sonuçları Şekil 4.19’ de verilmiştir.

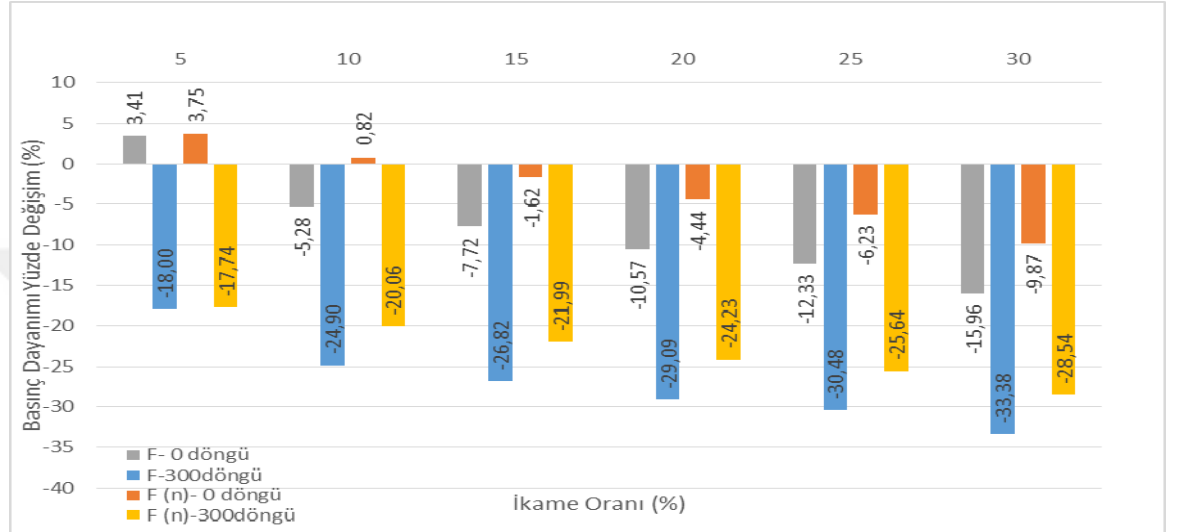


Şekil 4.19. 90 günlük optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı

Şekil 4.19’da verilen ultrasonik ses hızı deney sonuçları değerlendirildiğinde 28 günlük numunelerin beton kalitesi Çizelge 3.7’de verilen ultrases geçiş hızlarının pratik değerlendirilmesi göre değerlendirilmiştir. Referans numune, %5, %10, %15 ve %20 UK ikameli çimento harçları “mükemmel” olarak %25 ve %30 ikameli numuneler ise “iyi” olarak tespit edilmiştir. 90 günlük numunelerin beton kalitesi “mükemmel” olarak tespit edilmiştir. 90 günlük Tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı sonuçlarını karşılaştırıldığında benzer olarak en yüksek ses hızına %5 UK içeren numuneler olduğu ve %5, %10 ve %15 ikameli numunelerin referans numuneye göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

Bu bölümde sonuç olarak; tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK’lerde, Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi sonucunda %20 ikame oranına kadar D-Ç karşı daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmada görülmektedir. D-Ç oldukça emme oranları ve ağırlık kayıpları tüm ikame oranlarında düşmüştür. Tane dağılımı yapılan uçucu küllerin çimento harcı

içerisindeki boşlukları doldurması ile çimento harçlarının bünyesi su almasını zorlaştırmıştır. Basınç dayanımlarına bakıldığında ise %15 ikame oranına kadar D-Ç ye karşı etkili olduğu, Sonraki ikame oranlarında ise dayanımının düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi ise, döngü sayılarının artması birlikte, çimento hamurunda yüzeydeki hasar oluşması ve iç bünyedeki göçmeler olduğundan dolayı döngü sayıları artıkça su emme değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir.



Şekil 4.20. 300 Döngü Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı 90 günlük Donma-Çözülme deneyi basınç kaybı yüzde değişimi

Şekilde basınç dayanımı değişimleri incelendiğinde donma- çözülme olmadan ve tane dağılımı yapılmadan, %5 ikame oranında %3.41 artış görülmüştür. %10 ikame oranında ise %-5.28, %15 ikame oranında %-7.72, %20 ikame oranında %-10.57, %25 ikame %-12.23 ve %30 ikame oranında ise %-15.96 basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Tane dağılımı yapılmadan 300 döngüde donma-çözülme yapılarak basınç dayanımı değişimleri incelendiğinde, %5 ikame oranında %-18, %10 ikame oranında ise %-24.90, %15 ikame oranında %-26.82, %20 ikame oranında %-29.09, %25 ikame %-30.48 ve %30 ikame oranında ise %-33.38 basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Tane dağılımı yapılarak, donma-çözülme yapılmadan basınç dayanımları değişimleri incelendiğinde %5 ikame oranında %3.75, %10 ikame oranında ise %0.82 basınç dayanımında artış görülmüştür. %15 ikame oranında %-1.62, %20 ikame oranında %-

4.44, %25 ikame %-6.23 ve %30 ikame oranında ise %-9.87 basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Tane dağılımı yapılarak, 300 döngüde donma-çözülme yapılarak basınç dayanımları değişimleri incelendiğinde, %5 ikame oranında %-17.74, %10 ikame oranında ise %-20.06, %15 ikame oranında %-21.99, %20 ikame oranında %-24.23, %25 ikame %-25.64 ve %30 ikame oranında ise %-28.54 basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçları su emme ve ağırlık kaybı değerleri karşılaştırıldığında, optimize edilmemiş harç numunelerinin su emmesi biraz da fazla olduğudur. Bunun sebebi ve bu boşlukların su dolmasında D-Ç sırasında çimento harçlarına daha fazla hasar vermesi ve daha fazla ağırlık kaybının meydana gelmesiyle açıklanabilir. Basınç dayanımlarına bakıldığında ise tane dağılımı optimize edilmeyen F sınıfı UK'ler referans çimento harcının dayanımını geçemezken, tane dağılımı optimize edilen F sınıfı UK'lerde 300 döngüde %15 ikame oranında D-Ç'ye karşı daha etkili olduğu görülmüştür. Bu da bize gösteriyor ki, tane dağılımının çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurduğu yani, kompasitesi yüksek çimento harçlarının D-Ç karşı daha etkili olduğunu göstermektedir.

Optimize Edilmemiş C Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının D-Ç Deneyleri Çizelge 4.22'de verilmiştir.

ASTM C666 [138] "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing" da belirtilen, "betonun donma-çözölmeye karşı dayanıklılığını" belirlemek için kullanılan yöntemle göre donma-çözölmeye yapılmıştır. Yöntemde donma-çözölmeye 300 devire kadar devam edilebilmektedir. Burada C Sınıfı UK İkameli Çimento Harçlarının D-Ç deneyleri yapılmıştır. Çoğunlukla yüzeydeki hasarı belirlediğinden, iç bünyedeki göçmeleri tespit için ultrasonik test cihazı kullanılmıştır.

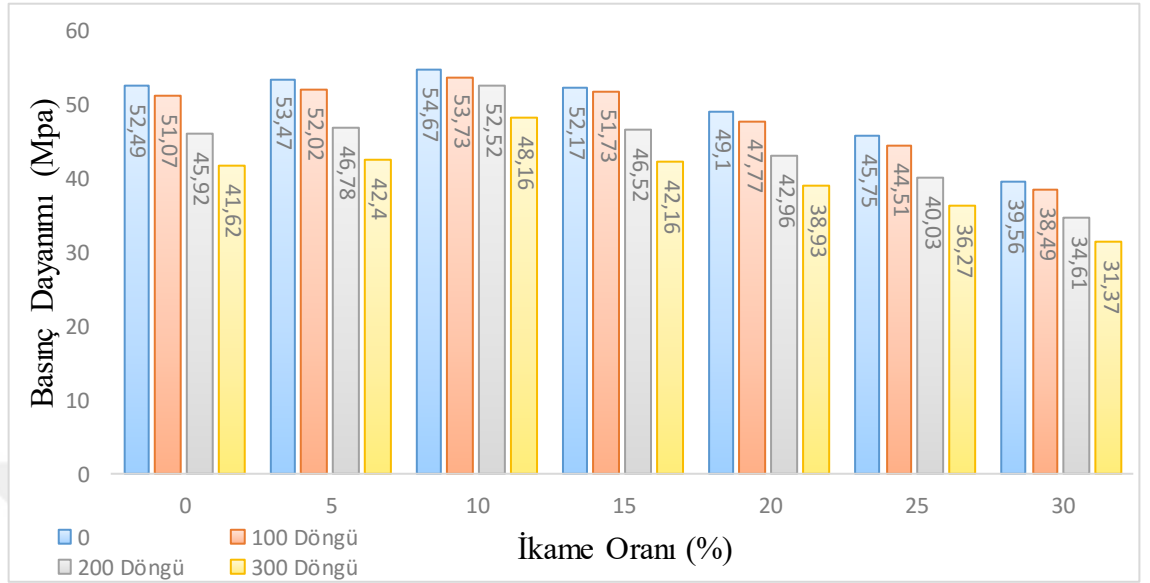
Çizelge 4.22. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçları D-Ç deneyleri

	Döngü Sayısı	Su Emme (%)	Ağırlık Kaybı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma
Referans Numune	0	9.27	0.00	52.49	2.92
	100	9.03	0.30	51.07	2.84
	200	8.26	0.33	45.92	2.55
	300	7.66	0.37	41.62	2.31
%5 C Sınıfı UK	0	9.34	0.00	53.47	2.97
	100	9.09	0.29	52.02	2.89
	200	8.17	0.32	46.78	2.60
	300	7.41	0.36	42.4	2.36
%10 C Sınıfı UK	0	9.55	0.00	54.67	3.04
	100	9.41	0.28	53.73	2.99
	200	8.46	0.30	52.52	2.92
	300	7.67	0.35	48.16	2.68
%15 C Sınıfı UK	0	9.83	0.00	52.17	2.90
	100	9.56	0.32	51.73	2.88
	200	8.60	0.36	46.52	2.59
	300	7.79	0.40	42.16	2.34
%20 C Sınıfı UK	0	10.19	0.00	49.1	2.73
	100	9.91	0.38	47.77	2.66
	200	8.92	0.42	42.96	2.39
	300	8.08	0.45	38.93	2.16
%25 C Sınıfı UK	0	10.23	0.00	45.75	2.54
	100	9.95	0.41	44.51	2.47
	200	8.95	0.46	40.03	2.23
	300	8.11	0.50	36.27	2.02
%30 C Sınıfı UK	0	10.32	0.00	39.56	2.20
	100	10.04	0.52	38.49	2.14
	200	9.03	0.54	34.61	1.92
	300	8.18	0.60	31.37	1.74

Su emme özellikleri incelendiğinde, UK ikame oranları arttıkça su emme yüzdeleri artmıştır. Donma- çözülme yapılmadan önce ikamesiz çimento harcında su emme kayıpları, %5 ikame oranında %0.75, %10 ikame oranında 3.02, %15 ikame oranında %6.04, %20 ikame oranında %9.92, %25 ikame oranında %10.35 ve %30 ikame oranında ise %11.32 oranında su emme yüzdeleri artmıştır.

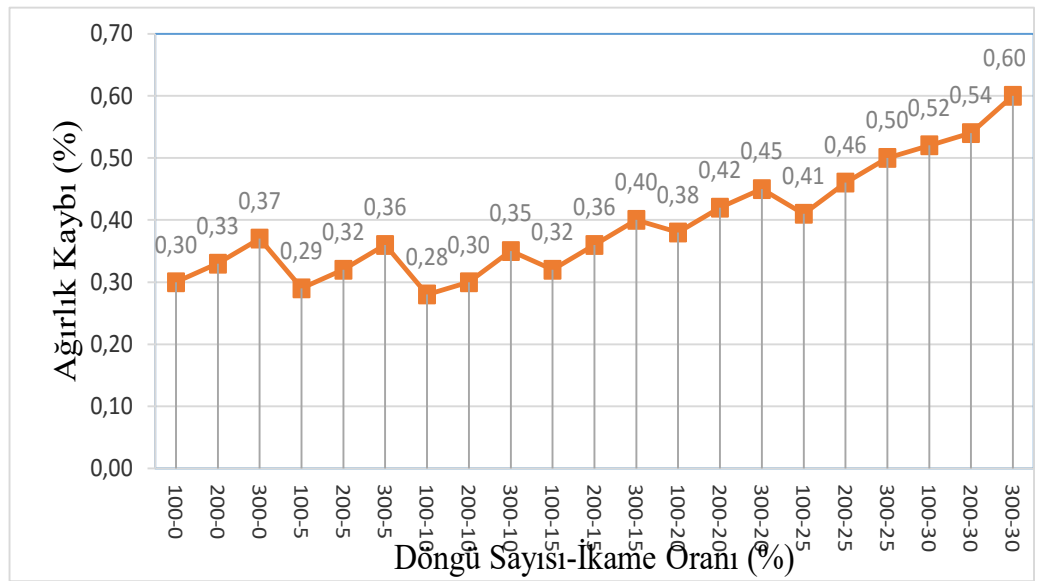
Standart sapma sonuçları Çizelge 4.22 incelendiğinde, numunelerde standart sapma değerleri 2.97-1.74 arasında değişmektedir Standart sapma değerlerinin 5 MPa

değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.21. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçların 90 günlük D-Ç deneyi basınç değişimi

ASTM C 666 yöntem B'ye donma-çözölmeye göre 0, 100, 200 ve 300 döngülü numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerlerinin İkame oranlarına göre basınç değişimleri verilmiştir. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi %5 ve % 10 ikameli C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında iyileşme olduğu gözükmemektedir.



Şekil 4.22. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi

Şekil 4.22 incelendiğinde, referans çimento harç numuneleri sırasıyla, 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.30, %0.33 ve %0.37 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%5 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.29, %0.32 ve %0.36 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%10 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.28, %0.30 ve %0.35 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

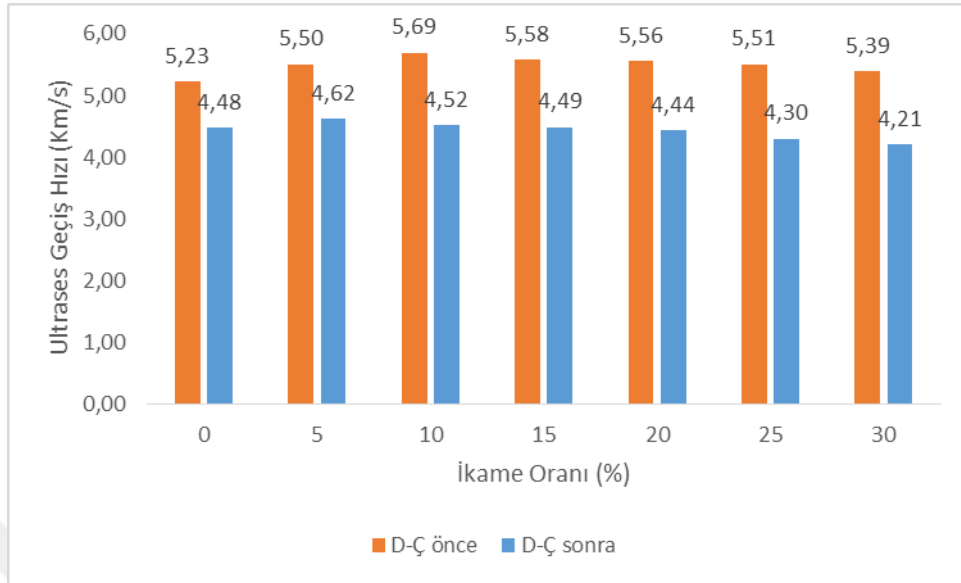
%15 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.32, %0.36 ve %0.40 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%20 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.38, %0.42 ve %0.45 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%25 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.41, %0.46 ve %0.50 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%30 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.52, %0.54 ve %0.60 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harç karışımlarının 90 günlük D-Ç öncesi ve D-Ç sonrası ultrases geçiş hızları Şekil 4.23’de verilmiştir.



Şekil 4.23. 90 günlük optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı

Şekil 4.23’ de verilen ultrasonik ses hızı deney sonuçları değerlendirildiğinde 28 ve 90 günlük numunelerin beton kalitesi Çizelge 3.7’de verilen ultrases geçiş hızlarının pratik değerlendirilmesi göre değerlendirilmiştir. Referans numune, tüm ikame oranlarında UK ikameli çimento harçları “mükemmel” olarak tespit edilmiştir. 90 günlük C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı sonuçları karşılaştırıldığında benzer olarak en yüksek ses hızına %5 UK içeren numuneler olduğu ve %5, %10, %15 ve %20 ikameli numunelerin referans numuneye göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

Bu bölümde sonuç olarak, D-Ç oldukça emme oranları ve ağırlık kayıpları tüm ikame oranlarında düşmüştür. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi sonucunda %15 ikame oranına kadar D-Ç karşı daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmada görülmektedir. D-Ç oldukça emme oranları ve ağırlık kayıpları tüm ikame oranlarında düşmüştür. Tane dağılımı optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı bakıldığında ise, %10 ikame oranına kadar D-Ç karşı etkili olduğu görülmektedir. C sınıfı UK’lerin çimento harcı içerisinde boşlukları doldurduğu ve %10 ikame oranına göre etkili olduğu görülmüştür. Fakat ikame oranı arttıkça dayanımda düşüşler meydana gelmiştir. Bunun

sebebi ise, döngü sayılarının artması birlikte, çimento hamurunda yüzeydeki hasar oluşması ve iç bünyedeki göçmeler olduğundan dolayı döngü sayıları arttıkça su emme değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir.

Optimize Edilmiş C Sınıfı UK İkameli Çimento Harçların D-Ç Deneyleri Çizelge 4.23’de verilmiştir.

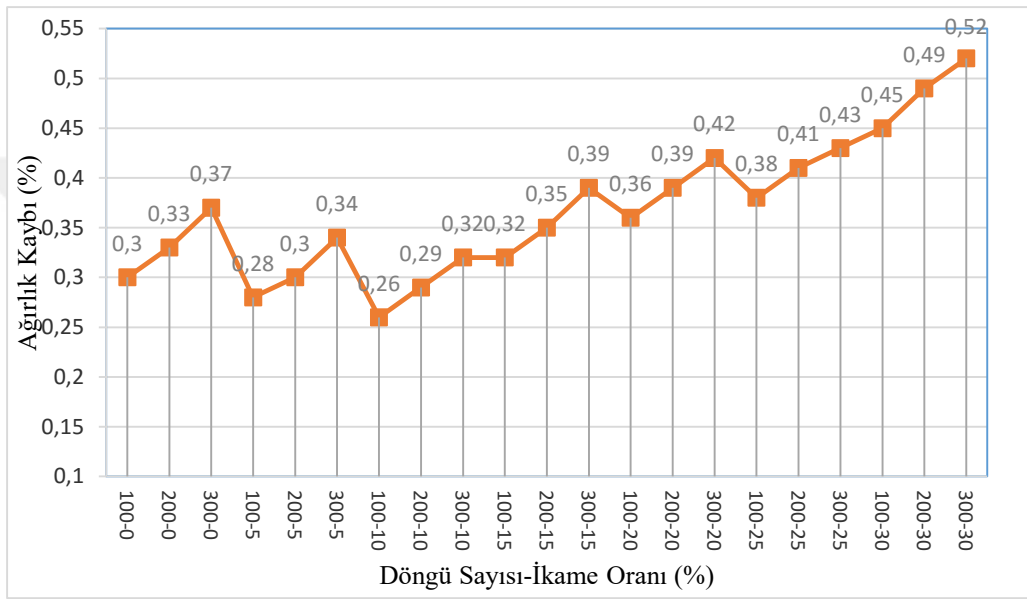
Çizelge 4.23. Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçların D-Ç deneyleri

	Döngü Sayısı	Su Emme (%)	Ağırlık Kaybı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma
Referans Numune	0	9.27	0.00	52.49	2.92
	100	9.03	0.30	51.07	2.84
	200	8.26	0.33	45.92	2.55
	300	7.66	0.37	41.62	2.31
%5 C Sınıfı UK	0	8.406	0.00	54.28	3.02
	100	8.181	0.28	52.81	2.94
	200	7.353	0.30	47.49	2.64
	300	6.669	0.34	43.04	2.39
%10 C Sınıfı UK	0	8.595	0.00	56.96	3.17
	100	8.469	0.26	55.42	3.08
	200	7.614	0.29	49.83	2.77
	300	6.903	0.32	45.16	2.51
%15 C Sınıfı UK	0	8.847	0.00	54.64	3.04
	100	8.604	0.32	53.16	2.96
	200	7.74	0.35	47.8	2.66
	300	7.011	0.39	43.32	2.41
%20 C Sınıfı UK	0	9.171	0.00	51.98	2.89
	100	8.919	0.36	50.58	2.81
	200	8.028	0.39	45.48	2.53
	300	7.272	0.42	41.21	2.29
%25 C Sınıfı UK	0	9.207	0.00	48.56	2.70
	100	8.955	0.38	47.25	2.63
	200	8.055	0.41	42.49	2.36
	300	7.299	0.43	38.5	2.14
%30 C Sınıfı UK	0	9.288	0.00	40.45	2.25
	100	9.036	0.45	39.36	2.19
	200	8.127	0.49	35.39	1.97
	300	7.362	0.52	32.07	1.78

Su emme özellikleri incelendiğinde, UK ikame oranları arttıkça su emme yüzdeleri artmıştır. Donma- çözülme yapılmadan önce ikamesiz çimento harcında su emme

kayıpları, %5 ikame oranında %0.76, %10 ikame oranında 3.02, %15 ikame oranında %6.04, %20 ikame oranında %9.92, %25 ikame oranında %10.35 ve %30 ikame oranında ise %11.32 oranında su emme yüzdeleri artmıştır.

Standart sapma sonuçları Çizelge 4.23 incelendiğinde, numunelerde standart sapma değerleri 3.17-1.78 arasında değişmektedir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.24. Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi

Şekil 4.24 incelendiğinde, referans çimento harç numuneleri sırasıyla, 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, % 0.30, % 0.33 ve %0.37 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%5 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.28, % 0.32 ve %0.36 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

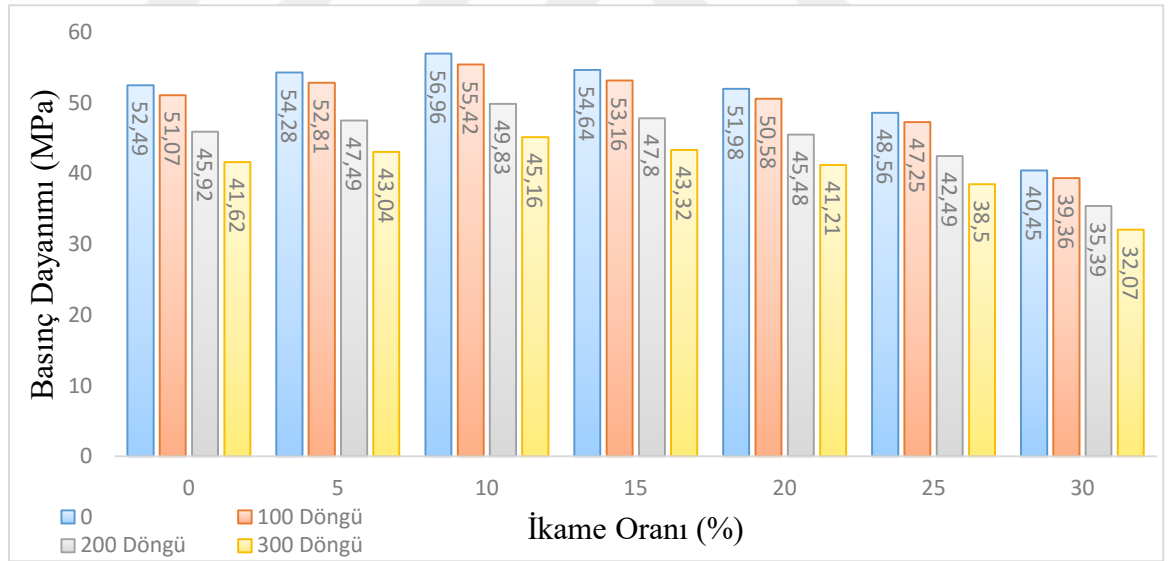
%10 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, % 0.28, % 0.29 ve %0.32 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%15 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, % 0.32, % 0.35 ve %0.39 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%20 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, % 0.36, % 0.39 ve %0.42 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%25 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.38, %0.41 ve %0.43 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

%30 C sınıfı UK ikameli çimento harç numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 döngüde ağırlık kayıpları, %0.45, %0.49 ve %0.52 çimento harçlarında, ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

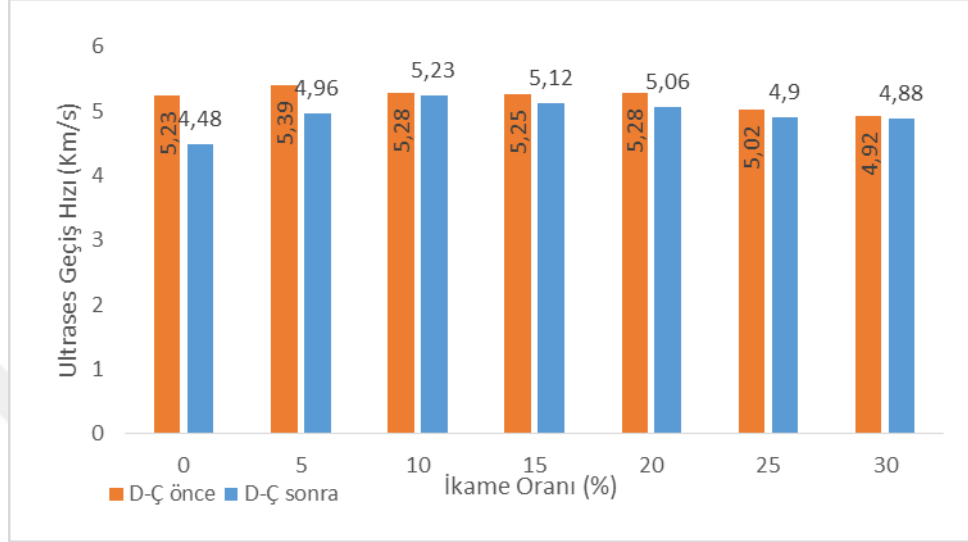


Şekil 4.25. Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçların 90 günlük D-Ç deneyi basınç değişimi

ASTM C 666 yöntem B'ye donma-çözölmeye göre 0, 100, 200 ve 300 döngülü numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerlerinin ikame oranlarına göre basınç

değişimleri verilmiştir. Şekil 4.25’de görüldüğü gibi %5, % 10, %15 ve %20 ikameli C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında D-Ç karşı dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük ultrases geçiş hızları Şekil 4.26’ da verilmiştir.



Şekil 4.26. Optimize edilmiş 90 günlük C sınıfı UK ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı

Şekil 4.26’ da verilen ultrasonik ses hızı deney sonuçları değerlendirildiğinde 28 ve 90 günlük numunelerin beton kalitesi düzeyi referans numune, tüm ikame oranlarında UK ikameli çimento harçları “mükemmel” olarak tespit edilmiştir. 90 günlük C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı sonuçları karşılaştırıldığında benzer olarak en yüksek ses hızına %5 UK içeren numuneler olduğu ve %5, %10, %15 ve %20 ikameli numunelerin referans numuneye göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

Bu bölümde sonuç olarak; tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi sonucunda %20 ikame oranına kadar D-Ç karşı daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmada görülmektedir. Tane dağılımı optimize edilen C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, D-Ç oldukça emme oranları ve ağırlık kayıpları tüm ikame oranlarında düşmüştür. Tane dağılımı optimize edilen UK’lerin boşlukları minimize etmesi bünyesi su almasını ve basınç dayanımının %20 ikame oranına kadar referans numuneye karşı D-Ç etkili olduğu görülmüştür. Fakat ikame oranı arttıkça dayanım, su emme ve ağırlık kayıplarında düşüşler meydana

gelmesidir. Bunun sebebi ise, döngü sayılarının artması birlikte, çimento hamurunda yüzeydeki hasarı belirlediğinden, iç bünyedeki göçmeler oluştuğundan dolayı döngü sayıları artıkça su emme değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir.

Beton numunelerinden boşluk yapısı, oluşturan malzemenin yapısı yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır [137]. Çimento harçlarının kompasitesi düşmesi ve yoğunluğunun azalması ultrases geçiş hızındaki sonuçların azalmasına neden olmaktadır [138]. Üretilen F ve C sınıfı UK'lü çimento harçlarının optimize edilmişlerin basınç dayanımlarına benzer şekilde ultrases geçiş hızlarında da artış olduğu, D-Ç olduktan sonrada Optimize edilmiş çimento harçların daha dirençli olduğu görülmektedir. Bunun en önemli sebebi kompasitenin yüksek olmasıdır.

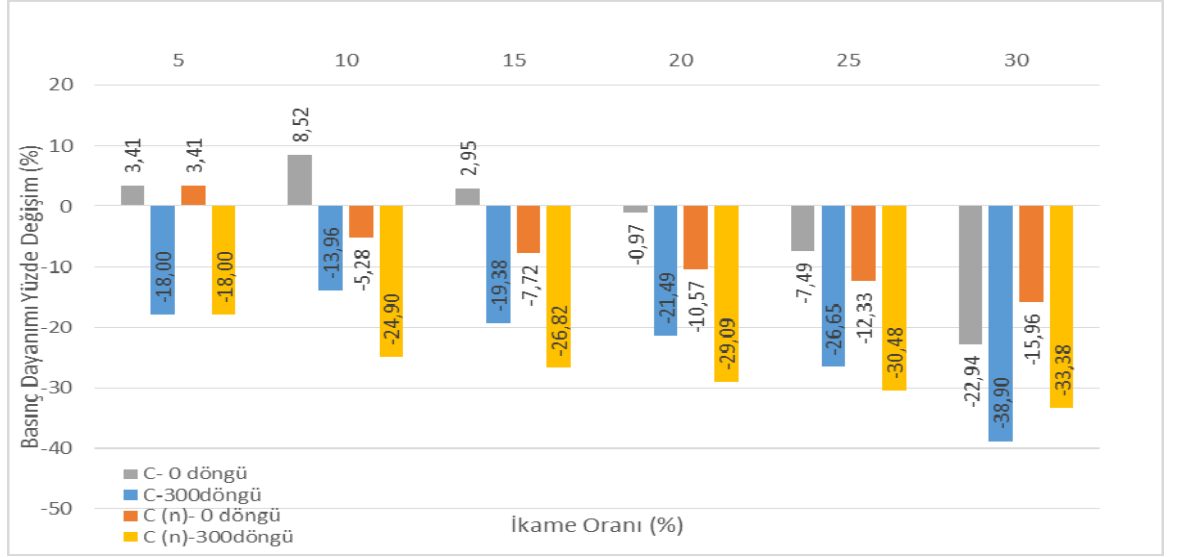
Neville ve Brooks (1993) ile Jones ve Gatfield (1955), kaliteli betondaki ultrases geçiş hızının 4.1- 4.7 km/sn arasında değerlerde olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Üretilen çimento harç numunelerinin;

Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli D-Ç öncesi ultrases geçiş hızı 5.23-5.12 km/sn arasında. Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli D-Ç sonra ultrases geçiş hızı 4.48-4.37 km/sn arasında,

Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli D-Ç öncesi ultrases geçiş hızı 5.23-5.52 km/sn arasında, optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli D-Ç sonra ultrases geçiş hızı 4.28- 4.45 km/sn arasında,

Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli D-Ç öncesi ultrases geçiş hızı 5.23-5.39 km/sn arasında, Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli D-Ç sonra ultrases geçiş hızı 4.48-4.21 km/sn arasında,

Optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli D-Ç öncesi ultrases geçiş hızı 5.23-4.48 km/sn arasında, optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli D-Ç sonra ultrases geçiş hızı 4.48- 4.92 km/sn arasında değişmektedir.



Şekil 4.27. 300 Döngü Optimize edilmiş ve edilmemiş C sınıfı 90 günlük D-Ç deneyi basınç kaybı yüzde değişimi

Şekilde 4.27’de, basınç dayanımı değişimleri incelendiğinde donma- çözülme olmadan tane dağılımı yapılmadan, %5 ikame oranında %3.41 artış görünmüştür. %10 ikame oranında ise %8.52, %15 ikame oranında %2.95 basınç dayanımında artış görülmüştür. %20 ikame oranında %-0.97, %25 ikame %-7.49 ve %30 ikame oranında ise %-22.94 basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Tane dağılımı yapılmadan 300 döngüde donma-çözülme yapılarak basınç dayanımı değişimleri incelendiğinde, %5 ikame oranında %-18, %10 ikame oranında ise %-13.96, %15 ikame oranında %-19.38, %20 ikame oranında %-21.49, %25 ikame %-26.65 ve %30 ikame oranında ise %-38.90 basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Tane dağılımı yapılarak, donma-çözülme yapılmadan basınç dayanımları değişimleri incelendiğinde %5 ikame oranında %3.41 basınç dayanımında artış görülmüştür. %10 ikame oranında %-5.28, %15 ikame oranında %-7.72, %20 ikame oranında %-10.57, %25 ikame %-12.33 ve %30 ikame oranında ise %-15.96 basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Tane dağılımı yapılarak, 300 döngüde donma-çözülme yapılarak basınç dayanımları değişimleri incelendiğinde, %5 ikame oranında %-18 %10 ikame oranında ise %-24.90, %15 ikame oranında %-26.82, %20 ikame oranında %-29.09, %25 ikame %-30.48 ve %30 ikame oranında ise %-33.38 basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

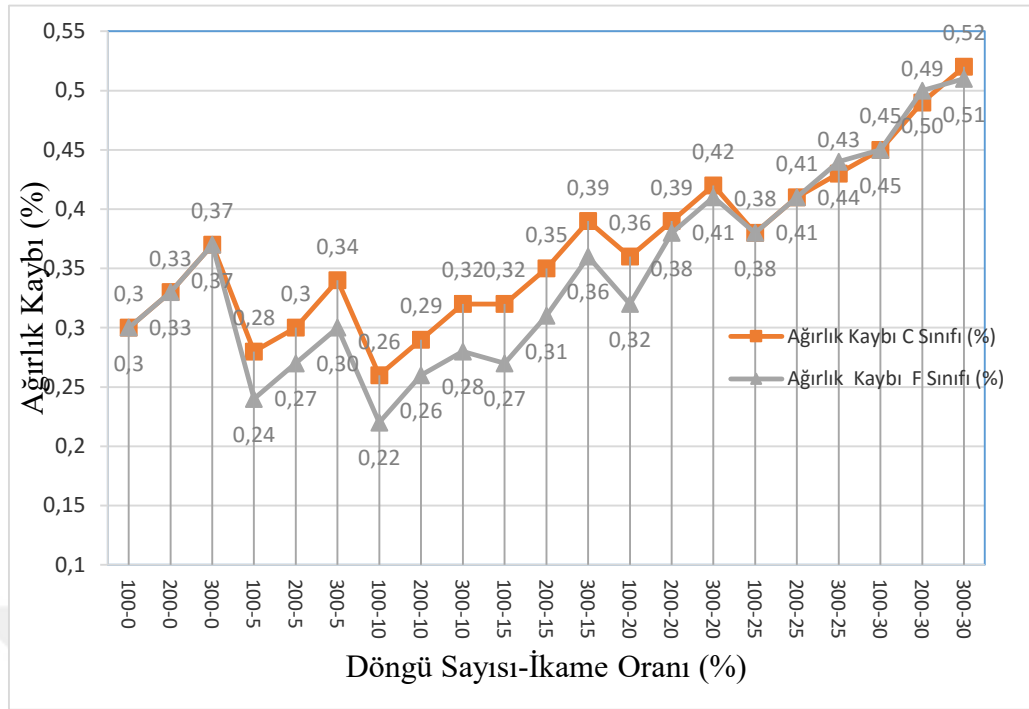
Tane dağılımı yapılmış F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının, C sınıfı UK'lere donma-çözülmede daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmada görülmüştür. Bunun sebebi, numunelerin 90 günlük olmalarından dolayı, F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının F sınıfı UK içerisindeki silisin (%60.74) C sınıfı UK daha fazla olmasıdır. Silislerin, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek ortamdaki portlandit miktarını azaltarak C-S-H miktarının daha fazla olması, tane dağılımı yapılarak da hidrasyon ürünlerin boşlukları daha iyi doldurmasından dolayı donma-çözölmeye karşı daha dirençli çimento harçları üretilmiştir.

Referans numunelerinin döngü sonrasındaki basınç dayanım kaybının UK ikameli çimento harçlarına göre daha yüksek olduğu görölmektedir. Tane Dağılım yapılan çimento bağlayıcıli sistemlerde dayanım kaybı, ikamesiz çimentolu sistemlerde, eğilme ve basınç dayanımı kaybı daha az olmuştur. Tane dağılımı yapılmamış UK ikameli çimento bağlayıcıli sistemlerin boşluk oranının daha yüksek olmasından dolayı, basınç dayanımı kaybı, tane dağılımı yapılmış çimentolu bağlayıcıli sistemlere göre daha fazla gerçekleşmiştir.

Bunun nedeni olgunlaştırma yaşı ilerlediğinde hidrasyon süreci ile meydana gelen ürünler boşlukları dolduracaktır. Su emme oranı arttıkça boşluk oranı ve geçirimsizlik artmakta ve mekanik özellikler azalmaktadır. Döngü sayılarının artması birlikte, çimento hamurunda yüzeydeki hasarı belirlediğinden, iç bünyedeki göçmeler oluştuğundan dolayı döngü sayıları artıkça su emme değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir.

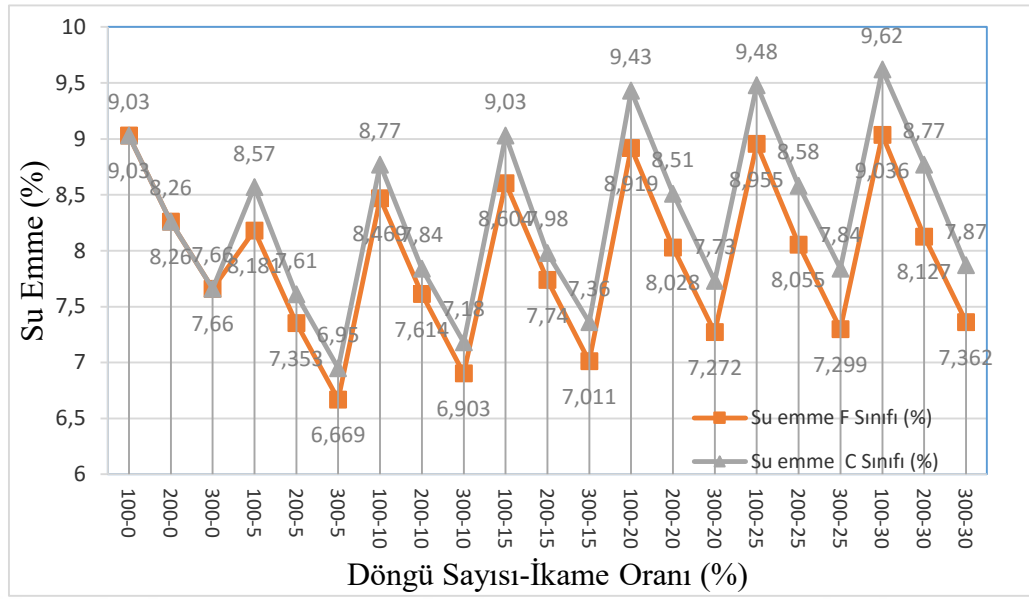
Sonuç olarak; ASTM C 666 yöntem A donma-çözölmeye göre 0, 100, 200 ve 300 döngülü numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Optimize edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında %5 ve % 10 ikamede iyileşme olurken, optimizasyonu yapılan, F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında bu oran %15 ve %20 ikame oranında kadar, iyileşme olduğu gözükmemektedir.

Optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının ağırlık Kaybı, Su emme Yüzdelilerinin Karşılaştırılması



Şekil 4. 28. Optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç sonrası ağırlık kaybı karşılaştırma grafiği

Şekil 4.28 incelendiğinde Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının C sınıfı UK ikameli çimento harçlarına göre ağırlık kayıpların yaklaşık olarak birbirlerine benzer oranda çıktığı görülmektedir. Fakat F sınıfı UK kül ikameli çimento harçların C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının %5, %10, %15 ve %20 ikame oranlarında ağırlık kayıplarının 0, 100, 200 ve 300 döngü de daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise, tane dağılımı yapılmış F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının, C sınıfı UK'lere D-Ç daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmada görülmüştür. Bunun sebebi, numunelerin 90 günlük olmalarından dolayı, F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının F sınıfı UK içerisindeki silisin (%60.74) C sınıfı UK daha fazla olmasıdır. Silislerin, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek ortamdaki portlandit miktarını azaltarak C-S-H miktarının daha fazla olması, tane dağılımı yapılarak da hidrasyon ürünlerin boşlukları daha iyi doldurmasından dolayı, D-Ç karşı daha dirençli çimento harçları üretilmiştir. Bu durum da 90 günlük basınç dayanımı yüksek olan F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının D-Ç etkisi, C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının D-Ç etkisine göre, çimento hamurundaki yüzeysel hasarlar oluşması ve iç bünyedeki göçmelerden daha düşük olmasına neden olmuştur.



Şekil 4. 29. Optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç sonrası su emme yüzdesi karşılaştırma grafiği

Şekil 4.29 incelendiğinde, tane dağılımı optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, ikame oranı arttıkça referans çimento harcına göre su emme yüzdesi C sınıfı UK ikame %15 iken F sınıfı UK ikameli çimento harcında %30 ikame oranına kadar su emme yüzdesini düşürmüştür. Buda bize gösteriyor ki, UK ikameli çimento harçlarında UK ikamesi belirli oranlarda boşlukları doldururken optimizasyon yaparak C ve F sınıfında sırasıyla %15 ve %30 kadar su emme oranını düşürmüştür. Bu durumda da su emme yüzdesi düşük olan çimento harçlarında tane dağılımı yapılarak da hidrasyon ürünlerinin boşlukları daha iyi doldurmasından yani kompasitesi yüksek çimento harçlarının üretildiğinin göstergesidir.

4.3.2. Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Dayanıklılık Deneyleri

7, 28, 90, 180 ve 360 günlük boy ölçümleri, 25*25*285 cm boyutundaki yapılmış ve boy uzamaları ASTM C 1012 [145] standardına göre test edilmiştir.

4.3.2.1. Optimize Edilmiş ve Edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Eğilme Dayanıklılık Deneyleri

F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük NS ve SS'da bekletilen numunelerin eğilme dayanımları verilmiştir.

Çizelge 4.24. NS ve SS de olgunlaştırılan F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımları

		İkame Oranı(%)	7-gün	28-gün	90-gün	180-gün	360-gün
F Sınıfı UK	Normal Su	Referans	6.48	9.02	11.42	11.96	12.68
		UK5	6.22	8.88	11.02	12.22	12.82
		UK10	5.99	8.38	10.68	12.68	13.31
		UK15	5.78	7.98	10.34	12.44	13.05
		UK20	5.57	7.85	10.24	12.26	12.85
		UK25	5.24	7.58	9.98	12.08	12.66
		UK30	4.89	7.21	9.54	11.98	12.58
	Sülfatlı Su	Referans	6.16	8.57	10.85	11.36	11.93
		UK5	5.91	8.44	10.47	11.61	12.2
		UK10	5.69	7.96	10.15	11.76	12.64
		UK15	5.49	7.58	9.82	11.82	12.42
		UK20	5.29	7.46	9.73	11.65	12.23
		UK25	4.98	7.20	9.48	11.48	12.06
		UK30	4.65	6.85	9.06	11.38	11.95
n=0.4 F Sınıfı UK	Normal Su	Referans	6.48	9.02	11.42	11.65	12.68
		UK5	6.68	10.68	13.12	13.38	14.05
		UK10	6.46	10.12	12.82	13.08	13.73
		UK15	6.24	9.66	12.56	12.81	13.45
		UK20	6.02	9.52	12.45	12.70	13.34
		UK25	5.72	9.22	12.14	12.38	13.02
		UK30	5.36	8.79	11.62	11.85	12.40
	Sodyum Sülfat Çözelti	Referans	6.16	8.57	10.85	11.36	11.93
		UK5	6.35	10.15	12.46	12.71	13.35
		UK10	6.14	9.61	12.18	12.42	13.04
		UK15	5.93	9.18	11.93	12.17	12.78
		UK20	5.72	9.04	11.83	12.06	12.66
		UK25	5.43	8.76	11.53	11.76	12.35
		UK30	5.09	8.35	11.04	11.26	11.81

Çizelge 4.24'de, optimize edilmiş ve edilmemiş, F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, normal suda ve sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen numunelerin 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük eğilme dayanım değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.24 de, optimize edilmemiş 7 günlük F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının NS ve SS'de olgulaştırılan referans numunenin sülfatlı suda bekletilen F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında sırasıyla referans numunde %,4.94, %5 ikame oranında %8.8, %10

ikamede %12.19, %15 ikame oranında 15.28, %20 ikame oranında %18.36, %25 ikame oranında 23.15, %30 ikame oranında ise %28.24 azalmıştır. Bu durum bize göstermektedir ki 7 günlük erken dayanım F sınıfı UK miktarının artırılması eğilme dayanımında azalmalara sebep olmaktadır. Hem SS de Hem de NS erken dayanımı düşürmüştür. NS yun SS ya göre karşılaştırılmasında ise SS lerin eğilme dayanım kaybı daha fazladır.

7 günlük NS da olgulaştırılan optimize edilmiş çimento harçlarının ve optimize edilmiş SS da olgunlaştırılan çimento harçlarının referans numuneye göre, %10'a kadar eğilme dayanımında artış görülmüştür. %10 ikame oranından sonra UK miktarı artıkça eğilme dayanımlarında azalmalar görülmüştür. SS da bekletilen çimento harç numunelerin NS eğilme dayanımı ile karşılaştırıldığında eğilme dayanımı daha düşük çıkmıştır.

Çizelge 4.24 de verilen, 7 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında; NS de SS de optimize edilmeyen çimento harçlarında referans numuneye göre her artış oranında dayanım kaybı oluşurken optimize edilen UK ikamesinde ise %10 kadar (%5 ve %10) eğilme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Bu durum bize tane dağılım optimizasyonun ($n=0.4$ de) boşluk yapısını daha iyi doldurduğunu ve Ca(OH)_2 bağlayarak erken dayanımlarda daha iyi sonuç verdiğini ifade edebiliriz.

Çizelge 4.24 de verilen, 28 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında UK oranının artırılması eğilme dayanımlarını referans numuneye göre düşürmüştür. 28 günlük optimize edilmemiş NS ve SS da UK ikame oranını arttırılması referansdan %5, %10, %15, %20 ve %25'e kadar sırasıyla %1 den, %20 e kadar eğilme dayanımlarını düşürmüştür.

Tane dağılımı $n=0.4$ göre optimize edilmiş çimento harçlarında NS ve SS de %25 e kadar eğilme dayanım referans numuneye göre azaltmıştır.

Çizelge 4.24 de verilen, 28 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarında; Her ikisinde de referans numune ile karşılaştırıldığın %25 ikame oranına kadar eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. NS eğilme dayanımının SS eğilme dayanımı karşılaştırıldığında ise NS ile olgulaştırılan çimento harç numunelerin eğilme dayanımı daha yüksek olmuştur. 28 günlük optimize edilmiş NS ve SS da UK ikame

oranını arttırılması referansdan %5, %10, %15, %20 ve %25'e kadar sırasıyla %18'den, %2 e kadar eğilme dayanımında artış görülmüştür. Optimize edilmemiş NS ve SS suda dayanımları düşüş görülmekte iken, optimize edilmişlerde artış görülmesinin sebebi; UK'lerin tane dağılımının yapılması çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurarak eğilme dayanımını iyileştirdiği görülmüştür.

Çizelge 4.24 de verilen, 90 günlük NS ve SS de kür edilen optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında UK oranının artırılması eğilme dayanımlarını referans numune ile kıyaslandığında referans numeye 7 ve 28 güne göre daha yakın dayanım değerleri elde edilmiştir. 90 günlük optimize edilmemiş NS ve SS da UK ikame oranını arttırılması referansdan %5, %10, %15, %20 ve %25'e kadar sırasıyla %3 ile %16'ya kadar eğilme dayanımlarını düşürmüştür.

Çizelge 4.24 de verilen, 90 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarında; Her ikisinde de referans numune ile karşılaştırıldığın %30 ikame oranına kadar eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. NS eğilme dayanımının SS eğilme dayanımı karşılaştırıldığında ise NS ile olgulaştırılan çimento harç numunelerin eğilme dayanımı daha yüksek olmuştur. 90 günlük optimize edilmiş NS ve SS da UK ikame oranını arttırılması referansdan %5, %10, %15, %20 ve %25'e kadar sırasıyla %14den, %1'e kadar eğilme dayanımında artış görülmüştür. 7 günlük optimize edilmişlerde referans numunelerde %10 a kadar dayanım artış oluşmuş, 28 günde ise SS ve NS'de eğilme dayanımları referans numuye göre %25 ikame oranına kadar eğilme dayanımında artış olduğu, 90 gün sonunda ise SS ve NS'de eğilme dayanımlarının %30 ikame oranına kadar artış olduğu görülmüştür.

Optimize edilmemiş NS ve SS suda dayanımları düşüş görülmekte iken, optimize edilmişlerde artış görülmesinin sebebi; UK'lerin tane dağılımının yapılması çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurarak eğilme dayanımını iyileştirdiği görülmüştür.

Çizelge 4.24 de verilen, 180 günlük NS ve SS de kür edilen optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında UK oranının artırılması referans numuneye göre %30 ikame oranına kadar eğilme dayanımlarında artış meydana geritmiştir. NS bekletilen optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında en yüksek değer %10 ikame oranında iken, SS da bekletilen çimento harçlarında bu oran %15 olarak tespit edilmiştir.

180 günlük optimize edilmemiş NS UK ikame oranını arttırılması referansdan %5, %10, %15, %20 ve %25'e kadar sırasıyla %2 ile %6 ya kadar eğilme dayanımlarını artış görülmüştür. SS suda ise bu oranı %1 ve %4 arasında gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.24 de verilen, 180 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarında; NS bekletilen çimento harçları referans numune ile karşılaştırıldığı %30 ikame oranında iken, SS'da bekletilen çimento harçlarında ise, referans numune ile karşılaştırıldığında %25 ikame oranına kadar eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. NS eğilme dayanımının SS eğilme dayanımı karşılaştırıldığında ise NS ile olgulaştırılan çimento harç numunelerin eğilme dayanımı daha yüksek olmuştur. 180 günlük optimize edilmiş NS'da UK ikame oranını arttırılması referansdan %5, %10, %15, %20 ve %25'e kadar sırasıyla %14'den, %1'e kadar, SS'da ise UK ikame oranını arttırılması referansdan %5, %10, %15, %20 ve %25'e kadar sırasıyla %11'den, %3'e kadar eğilme dayanımında artış görülmüştür.

Optimize edilmemiş NS ve SS suda dayanımları düşüş görülmekte iken, optimize edilmişlerde artış görülmesinin sebebi; UK'lerin tane dağılımının yapılması çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurarak eğilme dayanımını iyileştirdiği görülmüştür.

Çizelge 4.24 de verilen, 360 günlük çimento harçlarının 180 günlük değerlendirme benzer şekilde sadece eğilme dayanımlarında %1 ile %4 arasında dayanımların artış gerçekleştiği görülmektedir. 360 günlük NS ve SS de kür edilen optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında UK oranının arttırılması referans numuneye göre %25 ikame oranına kadar eğilme dayanımlarında artış meydana geritmiştir. NS bekletilen optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında en yüksek değer %10 ikame oranında iken, SS da bekletilen çimento harçlarında bu oran %15 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.24 de verilen, 360 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarında; NS bekletilen çimento harçları referans numune ile karşılaştırıldığı %25 ikame oranında iken, SS'da bekletilen çimento harçlarında ise, referans numune ile karşılaştırıldığında %30 ikame oranına kadar eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. NS eğilme dayanımının SS eğilme dayanımı karşılaştırıldığında ise NS ile olgulaştırılan çimento harç numunelerin eğilme dayanımı daha yüksek olmuştur. 360 günlük optimize edilmiş NS'da UK ikame oranını arttırılması referansdan %5, %10,

%15, %20 ve %25'e kadar sırasıyla %1'den %4 e kadar, SS'da ise UK ikame oranını artırılması referansdan %5, %10, %15, %20 ve %25'e kadar sırasıyla %1den, %5 e kadar eğilme dayanımında artış görülmüştür.

Optimize edilmemiş NS ve SS suda dayanımları düşüş görülmekte iken, optimize edilmişlerde artış görülmesinin sebebi; UK'lerin tane dağılımının yapılması çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurarak eğilme dayanımını iyileştirdiği görülmüştür.

Optimize edilmiş ve edilmemiş Sülfat etkisine maruz kalan bütün ikame oranları, sülfatlı suda bekletilen referans numuneye göre her ne kadar dayanıklı gözükse de normal suda bekletilen referans numuneleri geçemediği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK'ler erken çimento harcı içerisinde erken hidrasyona girerek tane dağılımı optimize edilmeyene göre hem SS da hemde NS küründe daha yüksek dayanıma ulaşmışlardır. Diğer bir ifade ile Lazer tane boyut dağılımında görüldüğü üzere $n=0.4$ UK inceliğinin de yüksek olduğu bu durumda puzolanik aktivite hızını olumlu yönde etkileyerek hem SS da hmdede NS suda eğilme dayanımını artırmıştır.

Çizelge 4.25. NS ve SS de olgunlaştırılan C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımları

		İkame Oranı(%)	7-gün	28-gün	90-gün	180-gün	360-gün
C Sınıfı UK	Normal Su	Referans	6.48	9.02	11.42	11.65	12.11
		UK5	6.76	9.23	11.98	12.38	13.91
		UK10	6.68	9.08	11.48	12.08	13.6
		UK15	6.47	8.02	11.05	11.81	13.05
		UK20	6.26	7.6	10.52	11.70	12.85
		UK25	5.94	7.04	9.61	10.38	12.62
		UK30	5.32	6.78	8.78	10.05	11.72
	Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	6.16	8.57	10.85	11.07	11.52
		UK5	6.52	8.77	11.46	12.21	13.22
		UK10	6.29	8.72	11.18	11.92	12.92
		UK15	6.15	7.62	10.93	11.74	12.66
		UK20	5.95	7.22	10.83	11.56	12.54
		UK25	5.64	6.94	9.43	10.06	12.24
		UK30	5.05	6.46	8.04	9.26	11.38
n=0.4 C Sınıfı UK	Normal Su	Referans	6.48	9.02	11.42	11.65	12.12
		UK5	7.02	10.43	12.96	13.49	14.02
		UK10	6.96	10.28	12.91	13.99	14.54
		UK15	6.78	9.12	12.89	13.86	14.42
		UK20	6.57	8.71	12.32	13.12	13.65
		UK25	6.27	8.16	11.78	11.77	13.25
		UK30	5.66	7.86	10.84	11.00	12.44
	Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	6.16	8.57	10.85	11.07	11.51
		UK5	6.86	9.91	12.57	12.82	13.33
		UK10	6.73	9.86	13.03	13.29	13.82
		UK15	6.48	8.76	12.91	13.17	13.72
		UK20	6.24	8.27	12.22	12.46	13.96
		UK25	6.05	7.39	10.96	11.18	12.62
		UK30	5.66	6.97	10.24	10.45	11.87

Çizelge 4.25 de, optimize edilmiş ve edilmemiş, C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, normal suda ve sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen numunelerin 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük eğilme dayanım değerleri görülmektedir.

7 günlük NS da olgulaştırılan optimize edilmiş çimento harçlarının ve optimize edilmiş SS da olgunlaştırılan çimento harçlarının referans numuneye göre, %10'a kadar eğilme dayanımında artış görülmüştür. %10 ikame oranından sonra UK miktarı artıkça eğilme dayanımlarında azalmalar görülmüştür. SS da bekletilen çimento harç numunelerin NS eğilme dayanımı ile karşılaştırıldığında eğilme dayanımları düşük çıkmıştır.

7 günlük NS da olgulaştırılan optimize edilmiş çimento harçlarının ve optimize edilmiş SS da olgunlaştırılan çimento harçlarının referans numuneye göre, %10'a kadar eğilme dayanımında artış görülmüştür. %10 ikame oranından sonra UK miktarı artıkça eğilme dayanımlarında azalmalar görülmüştür. SS da bekletilen çimento harç numunelerin NS eğilme dayanımı ile karşılaştırıldığında eğilme dayanımı daha düşük çıkmıştır.

Çizelge 4.25 de verilen, 7 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında; NS de SS de optimize edilmeyen çimento harçlarında referans numuneye göre her artış oranında dayanım kaybı oluşurken optimize edilen UK ikamesinde ise %10 kadar eğilme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Bu durumun F sınıfı UK görülmeyip C sınıfı UK da oluşmasının sebebi C sınıfı UK lerin yüksek kireç içermesinden dolayı daha reaktif olmasına bağlıdır.

Çizelge 4.25 de verilen, 28 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında %10 kadar artırılması eğilme dayanımını artırmıştır. %10'dan sonra UK oranının artırılması eğilme dayanımlarını referans numuneye göre düşürmüştür.

Çizelge 4.25 de verilen, 28 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarında; Her ikisinde de referans numune ile karşılaştırıldığında %15 ikame oranına kadar eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. NS eğilme dayanımının SS eğilme dayanımı karşılaştırıldığında ise NS ile olgulaştırılan çimento harç numunelerin eğilme dayanımı daha yüksek olmuştur. Optimize edilmemiş NS ve SS suda dayanımları düşüş görülmekte iken, optimize edilmişlerde artış görülmesinin sebebi; UK'lerin tane dağılımının yapılması çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurarak eğilme dayanımını iyileştirdiği görülmüştür.

Çizelge 4.25 de verilen, 90 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında; NS da referans numuneye göre %10 kadar, SS da ise %15 kadar eğilme dayanımında artış görülmüştür.

Çizelge 4.25 de verilen, 90 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarında; Her ikisinde de referans numune ile karşılaştırıldığında %25 ikame oranına kadar eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. Bu durum optimizasyonun hem dolgu etkisi hemde incelikten dolayı puzolanik etkisinin olduğu göstermektedir.

Çizelge 4.25 de verilen, 180 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarında; NS ve SS da bekletilen çimento harçları referans numune ile karşılaştırıldığı %20 ikame oranına kadar eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. Optimize edilmişlerde ise bu oran %25 e kadar çıktığı görülmektedir.

Çizelge 4.25 de verilen, 360 günlük NS ve SS de olgulaştırılan optimize edilmemiş UK ikameli çimento harçlarında; NS ve SS da bekletilen çimento harçları referans numune ile karşılaştırıldığı %25 ikame oranında kadar eğilme dayanımının arttığı görülmüştür. Optimize edilmiş F sınıfı UK lerde ise bu oran %30 a kadardır.

Optimize edilmemiş NS ve SS suda dayanımları düşüş görülmekte iken, optimize edilmişlerde artış görülmesinin sebebi; UK'lerin tane dağılımının yapılması çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurarak eğilme dayanımını iyileştirdiği görülmüştür.

Sülfat etkisine maruz kalan bütün ikame oranları, sülfatlı suda bekletilen referans numuneye göre her ne kadar dayanıklı gözüксе de normal suda bekletilen referans numuneleri geçemediği tespit edilmiştir.

Optimize edilmemiş C Sınıfı UK ikameli çimento harçlarında normal suda bekletilen UK ikame oranlarındaki eğilme dayanımlarının, sodyum sülfat bekletilen numunelerin eğilme dayanımlarından daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Çizelge 4.26. SS de olgunlaştırılan F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

		İkame Oranı(%)	7-gün	28-gün	90-gün	180-gün	360-gün
F sınıfı UK SS	Optimize Edilmemiş	Referans	6.16	8.57	10.85	11.36	11.93
		UK5	5.91	8.44	10.47	11.61	12.2
		UK10	5.69	7.96	10.15	11.76	12.64
		UK15	5.49	7.58	9.82	11.82	12.42
		UK20	5.29	7.46	9.73	11.65	12.23
		UK25	4.98	7.20	9.48	11.48	12.06
		UK30	4.65	6.85	9.06	11.38	11.95
	Optimize Edilmiş	Referans	6.16	8.57	10.85	11.36	11.93
		UK5	6.35	10.15	12.46	12.71	13.35
		UK10	6.14	9.61	12.18	12.42	13.04
		UK15	5.93	9.18	11.93	12.17	12.78
		UK20	5.72	9.04	11.83	12.06	12.66
		UK25	5.43	8.76	11.53	11.76	12.35
		UK30	5.09	8.35	11.04	11.48	11.81
C Sınıfı UK SS	Optimize Edilmemiş	Referans	6.16	8.57	10.85	11.07	11.52
		UK5	6.52	8.77	11.46	12.21	13.22
		UK10	6.29	8.72	11.18	11.92	12.92
		UK15	6.15	7.62	10.93	11.74	12.66
		UK20	5.95	7.22	10.83	11.56	12.54
		UK25	5.64	6.94	9.43	10.06	12.24
		UK30	5.05	6.46	8.04	9.26	11.38
	Optimize Edilmiş	Referans	6.16	8.57	10.85	11.07	11.51
		UK5	6.86	9.91	12.57	12.82	13.33
		UK10	6.73	9.86	13.03	13.29	13.82
		UK15	6.48	8.76	12.91	13.17	13.72
		UK20	6.24	8.27	12.22	12.46	13.96
		UK25	6.05	7.39	10.96	11.18	12.62
		UK30	5.66	6.97	10.24	10.45	11.87

Çizelge 4.26 da verilen SS küründe bekletilen, F sınıfı ve C sınıfı UK ikameli 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük eğilme dayanımı karşılaştırılması yapılmıştır. Bu sonuçlara göre;

Çizelge 4.26 da göre; 7 günlük optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre eğilme dayanımları daha düşük çıkmıştır. 7 günlük optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %10 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür.

7 günlük optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre eğilme %15 ikame oranına kadar dayanımında artış görülmüştür. 7 günlük optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %20 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür. C sınıfı UK'lerde F sınıfı UK 'lere göre optimize edilmişler optimize edilmemişlere göre 7 günlük eğilme dayanımlarında daha etkili olmuşlardır. Bu sonuca göre; düşük kireçli F sınıfı UK'lerin yüksek kireçli C sınıfı UK'lere göre erken dayanımı daha az reaktif olduğu görülmektedir.

28 günlük optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre eğilme dayanımları daha küçük çıkmıştır. 28 günlük optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %25 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür. 28 günlük optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre eğilme %10 ikame oranına kadar dayanımında artış görülmüştür. 28 günlük optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %15 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür.

28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre F sınıfı UK ler 28 gün eğilme dayanımları daha yüksek çıkmıştır. 7 günlük erken dayanımında C sınıfı daha etkin olurken 28 gün sonunda F sınıfı UK ler daha etkili olmuştur. Bunun sebebi olarakta yüksek kireç içeren UK lar burada hidrasyon sırasında portlandit dönüşerek eğilme dayanımı düşürdüğünü söylemek mümkündür.

90 günlük optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre eğilme dayanımları daha küçük çıkmıştır. 90 günlük optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %30 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür. 90 günlük optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre eğilme %20 ikame oranına kadar dayanımında artış görülmüştür. 90 günlük optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %25 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür.

Bu sonuca göre; F sınıfı UK'ün tane dağılımının yanısıra puzolanik aktivitenin ön plana çıkarak dayanım artışına devam ettiği fakat C sınıfı UK'lerin ise serbest kireç nedeniyle Ca(OH)_2 oluşumu nedeniyle genleşme sebebiyle eğilme dayanımının düştüğü söylenebilir.

180 günlük optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre %30 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür. 180 günlük optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %30 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür. 180 günlük optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre eğilme %20 ikame oranına kadar dayanımında artış görülmüştür. 180 günlük optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %25 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür. Bu sonuç bize göstermiş oluyor ki C sınıfı UK'lerde F sınıfı UK 'lere göre optimize edilmişler optimize edilmemişlere göre daha etkili olmuşlardır.

360 günlük optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre %30 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür. 360 günlük optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %25 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür. 360 günlük optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının referans numuneye göre eğilme %25 ikame oranına kadar dayanımında artış görülmüştür. 360 günlük optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında referans numuneye göre %30 ikame oranında kadar dayanımında artış görülmüştür.

Sonuç olarak; Çizelge 4.26 ya göre; sülfat etkisine maruz bırakılan optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimentolu harçlar erken dayanımlarda %20 ye kadar eğilme dayanımını artırması sebep olarak yüksek kireçli UK'ün puzolanik özelliğinin yanısıra kendiliğinden bağlayıcı olma özelliğine bağlanabilir. 28 gün ile 360 gün arasında optimize edilmiş F sınıfı UK lerin C sınıfı UK ikameli çimento harçlarına göre daha iyi eğilme dayanımı sonuçları vermesinin sebebi ise optimize edilmiş tane dağılımının inceliği ve ileriki yaşlarda puzolanik aktivitesinin yüksek olamsına bağlanabilir.

Çizelge 4.27. SS de olgunlaştırılan F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımlarının Varyasyon Katsayısı (%)

		İkame Oranı(%)	7-gün	28-gün	90-gün	180-gün	360-gün
F sınıfı UK SS	Optimize Edilmemiş	Referans	9.25	8.40	7.93	7.22	6.79
		UK5	8.63	8.41	7.93	6.80	6.56
		UK10	9.14	8.42	8.37	7.31	5.62
		UK15	10.02	8.97	7.94	7.19	6.76
		UK20	9.26	8.45	7.91	7.21	6.79
		UK25	9.24	8.61	8.02	7.23	7.05
		UK30	9.25	8.47	7.95	7.21	6.78
	Optimize Edilmiş	Referans	9.25	8.40	7.93	7.22	6.79
		UK5	9.13	8.37	7.87	7.24	6.82
		UK10	9.12	8.43	7.88	7.17	6.83
		UK15	9.95	8.39	7.63	7.23	7.20
		UK20	9.27	8.74	7.86	7.46	6.79
		UK25	9.21	8.45	7.89	7.23	6.80
		UK30	9.23	8.38	7.88	7.23	6.77
C Sınıfı UK SS	Optimize Edilmemiş	Referans	9.25	8.40	7.93	7.23	6.77
		UK5	9.20	8.44	7.94	7.21	6.81
		UK10	9.22	8.37	7.87	7.47	6.81
		UK15	10.08	8.40	7.87	7.24	7.03
		UK20	9.24	9.00	8.22	7.18	6.78
		UK25	9.22	8.36	7.85	7.16	6.78
		UK30	9.11	8.36	7.96	7.24	6.77
	Optimize Edilmiş	Referans	9.25	8.40	7.93	7.23	6.78
		UK5	9.18	8.38	7.88	7.18	6.83
		UK10	9.21	8.42	7.90	7.22	6.80
		UK15	9.88	8.45	7.90	7.21	6.78
		UK20	9.13	9.43	7.94	7.22	6.81
		UK25	9.26	8.39	7.94	7.16	6.81
		UK30	9.19	8.46	7.91	7.18	6.82

Üretilen çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır.

SS çözeltinde 7 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı 8.63-10.02 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %9.12-9.95 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %9.11-

10.08 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %9.13-9.88 arasında değişmiştir.

SS çözeltinde 28 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %8.40-8.97 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %8.37-8.74 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma %8.36-9.00 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %8.38-9.43 arasında değişmiştir.

SS çözeltinde 90 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %7.93-8.37 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %7.63-7.93 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %7.85-8.22 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %7.88-7.94 arasında değişmiştir.

SS çözeltinde 180 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %6.80-7.23 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %7.17-7.46 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %7.16-7.47 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %7.16-7.23 arasında değişmiştir.

SS çözeltinde 360 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %5.62-7.05 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %6.79-7.20 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %6.77-7.03 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %6.78-6.82 arasında değişmiştir.

Tüm eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

4.3.2.2. Optimize Edilmiş ve Edilememiş F ve C Sınıfı UK ikameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Basınç Dayanıklılık Deneyleri

F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, NS ve SS çözelti küründe bekletilen numunelerin 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük basınç dayanım değerleri Çizelge 4.28 de görülmektedir.

Çizelge 4.28. NS ve SS de olgunlaştırılan F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımları

		İkame Oranı (%)	7-gün	28-gün	90-gün	180-gün	360-gün
F Sınıfı UK	Normal Su	Referans	32.44	43.89	52.49	53.54	57.25
		UK5	30.74	42.3	51.26	54.94	60.18
		UK10	29.98	40.96	49.72	55.20	61.55
		UK15	29.16	39.66	48.44	53.02	61.92
		UK20	27.85	38.34	46.94	48.92	62.05
		UK25	27.02	37.42	46.02	46.00	61.40
		UK30	25.22	36.51	44.11	44.09	61.13
	Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	30.82	41.70	49.87	50.86	55.72
		UK5	29.20	40.19	49.70	51.67	58.54
		UK10	28.48	38.91	48.23	50.98	59.30
		UK15	27.70	37.68	46.02	47.94	60.20
		UK20	26.46	36.42	44.59	46.48	59.31
		UK25	25.67	35.55	43.72	44.59	57.48
		UK30	23.96	34.68	41.90	42.74	54.02
n=0.4 F Sınıfı UK	Normal Su	Referans	32.44	43.89	52.49	53.54	57.25
		UK5	33.14	45.44	54.46	55.55	61.14
		UK10	32.36	44.05	52.92	56.98	62.90
		UK15	31.63	42.68	51.64	54.80	65.24
		UK20	31.30	41.40	50.16	53.16	64.72
		UK25	30.38	40.45	49.22	50.20	63.15
		UK30	28.38	39.76	47.31	48.26	62.15
	Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	30.82	41.70	49.87	50.86	55.72
		UK5	31.48	43.17	51.74	52.77	60.75
		UK10	30.74	41.85	50.27	52.28	61.18
		UK15	30.05	40.55	49.86	51.24	62.02
		UK20	29.74	39.33	47.65	48.61	61.42
		UK25	28.86	38.43	46.76	47.69	59.86
		UK30	26.96	37.77	44.94	45.84	56.23

Çizelge 4.28 incelendiğinde, 7 günlük NS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve

%30 ikame oranlarında %5.24, %7.5, %10, %14.14, %16.70 ve %22.25 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 7 günlük SS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.99 %9.98, %12.2, %14.61, %18.43, %20.86 ve %26.14 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür.

7 günlük NS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %5 ikame oranında %2.16 bir artış görülürken, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında ise sırasıyla %0.24, %2.49, %3.51, %6.35 ve %12.51 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 7 günlük SS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.99 %2.95, %5.24, %7.36, %8.32, %11.03 ve %16.89 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. Bu durum bize tane dağılım optimizasyonun boşluk yapısını daha iyi doldurduğunu ve Ca(OH)_2 bağlayarak erken dayanımlarda daha iyi sonuç verdiğini ifade edebiliriz.

Çizelge 4.28 incelendiğinde 28 günlük NS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %3.6, %6.67, %9.63, %12.64, %14.74 ve %16.81 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 28 günlük SS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.98 %8.43, %11.34, %14.14, %17.01, %19 ve %20.98 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 7 günlük çimento harçları gibi basınç değerlerinde referans numuneye göre azalma olsada yüzde olarak bu değerler düşmüştür. Bunun sebebi ise çimento harçlarının Ca(OH)_2 lerin SiO_2 lerle daha fazla birleşerek C-S-H yapısını daha falza oluşturarak, çimentonun basınç dayanım kazanmasını sağlamaktadır.

28 günlük NS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %5 ikame oranında %3.15 ve %10 ikame oranında ise %0.36 bir basınç artışı görülmüştür. %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında ise sırasıyla %2.75, %5.67, %7.83 ve %9.4 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 28 günlük SS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.98 %1.64, %4.64, %7.6,

%10.38, %12.44 ve %13.94 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 28 günlük NS da optimize edilmişlerin optimize edilmemişlere göre basınç dayanım değerleri yüksek çıkmış ve optimize edilmişlerin %10 ikame oranına kadar referans numuneyi geçtiği görülmüştür.

Çizelge 4.28 incelendiğinde 90 günlük NS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %2.34, %5.27, %7.71, %10.57, %12.32 ve %15.96 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 90 günlük SS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.98 %5.31, %8.11, %12.32, %15.05, %16.70 ve %20.17 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 90 günlük çimento harçları gibi basınç değerlerinde referans numuneye göre azalma olsada yüzde olarak bu değerler düşmüştür. Bunun sebebi ise çimento harçlarının Ca(OH)_2 lerin SiO_2 lerle daha fazla birleşerek C-S-H yapısını daha falza oluşturarak, çimentonun basınç dayanım kazanmasını sağlamaktadır.

90 günlük NS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %5 ikame oranında %3.75 ve %10 ikame oranında ise %0.82 bir basınç artışı görülmüştür. %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında ise sırasıyla %1.61, %4.43, %6.22 ve %9.86 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 28 günlük SS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.98 %1.42, %4.22, %5.01, %9.22, %10.91 ve %14.38 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 90 günlük NS da optimize edilmişlerin optimize edilmemişlere göre basınç dayanım değerleri yüksek çıkmış ve optimize edilmişlerin %10 ikame oranına kadar referans numuneyi geçtiği görülmüştür. Tane dağılımı yapılarak çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurduğu ve kompasitesi yüksek çimento harçları üretildiği sonuçlara göre görülmüştür.

Çizelge 4.28 incelendiğinde 180 günlük NS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5 ikame oranında %2.61, %10 ikame oranında 3.1 basınç dayanımında artış görülmüştür. %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %0.9, %8.62, %14.08, %17.65 basınç dayanımında bir azalma

görülmüştür. 180 günlük SS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %5, %3.49, %4.78, %10.46, %13.18, %16.71 ve %20.17 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 28 ve 90 günlük çimento harçları gibi basınç değerlerinde referans numuneye göre azalma olsada yüzde olarak bu değerler düşmüştür. NS da basınç dayanımlarında artış görülürken sülfat etkisindeki çimento harçlarında basınç kayıpları görülmektedir. Bu durumda sülfatlı suya maruz kalan çimento harçlarında dayanımı olumsuz yönde etkileyen etrenjit yapıların oluştuğu görülmektedir.

180 günlük NS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %5 ikame oranında %3.75, %10 ikame oranında %6.43 ve %15 ikame oranında ise %2.35 basınç artışı görülmüştür. %20, %25 ve %30 ikame oranlarında ise sırasıyla %0.7, %6.23 ve %9.86 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 180 günlük SS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %5, %1.43, %2.35, %4.29, %9.20, %10.92 ve %14.38 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 90 günlük NS da optimize edilmişlerin optimize edilmemişlere göre basınç dayanım değerleri yüksek çıkmış ve optimize edilmişlerin %15 ikame oranına kadar referans numuneyi geçtiği görülmüştür. Tane dağılımı yapılarak çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurduğu ve kompasitesi yüksek çimento harçları üretildiği sonuçlara göre görülmüştür.

Çizelge 4.28 incelendiğinde 360 günlük NS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5 ikame oranında %5.12, %10 ikame oranında 7.51, %15 ikame oranında %8.16 ve %20 ikame oranında ise 8.38, %25 ikame oranında %7.25 ve %30 ikame oranında 6.78 basınç dayanımında artış görülmüştür. 360 günlük SS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre, %5, %10, %15, %20 ve %25 ikame oranlarında sırasıyla, %2.25, %3.58, %5.15, %3.6 ve %0.40 basınç dayanımında bir artış olmuştur. Basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. %30 ikame oranında ise %5.54 basınç dayanımında azalma olmuştur.

360 günlük NS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %30 ikame oranına kadar basınç dayanımında bir artış

görülmüştür. 360 günlük SS da optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye %15 ikame oranına göre basınç dayanımında artış olmuştur. Tane dağılımı yapılarak çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurduğu ve kompasitesi yüksek çimento harçları üretildiği sonuçlara göre görülmüştür.

NS da basınç dayanımlarında artış görülürken sülfat etkisindeki çimento harçlarında basınç kayıpları görülmektedir. Bu durum da sülfatlı suya maruz kalan çimento harçlarında dayanımı olumsuz yönde etkileyen etrenjit yapıların oluştuğu görülmektedir.



Çizelge 4.29. NS ve SS de olgunlaştırılan C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımları

		İkame Oranı (%)	7-gün	28-gün	90-gün	180-gün	360-gün
C Sınıfı UK	Normal Su	Referans	36.17	42.89	52.49	53.54	57.25
		UK5	35.03	43.20	53.47	55.29	56.02
		UK10	34.58	42.92	53.17	56.71	57.04
		UK15	32.81	41.02	52.60	57.65	58.42
		UK20	30.41	39.42	49.10	56.88	57.72
		UK25	27.74	37.06	45.75	53.94	55.92
		UK30	22.45	35.06	39.56	50.99	54.68
	Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	34.36	40.75	49.87	50.86	55.72
		UK5	34.83	41.04	50.65	51.07	54.82
		UK10	33.80	40.30	50.20	51.18	55.44
		UK15	31.25	38.97	49.90	52.90	57.24
		UK20	28.89	37.45	47.50	52.48	56.68
		UK25	26.35	32.71	44.05	49.08	55.30
		UK30	21.33	30.82	38.06	46.32	53.87
n=0.4 C Sınıfı UK	Normal Su	Referans	36.17	42.89	52.49	53.54	57.25
		UK5	37.02	45.02	56.28	55.37	57.74
		UK10	36.95	44.97	55.54	57.10	58.91
		UK15	35.12	43.57	54.64	55.20	60.15
		UK20	32.57	42.07	51.98	53.02	58.95
		UK25	30.05	39.82	48.56	49.53	57.67
		UK30	24.66	37.96	42.45	41.26	56.19
	Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	34.36	40.75	49.87	50.86	55.72
		UK5	35.65	41.82	51.57	52.6	55.98
		UK10	34.82	41.39	50.11	53.19	57.18
		UK15	33.23	40.44	49.91	54.11	57.02
		UK20	30.94	39.97	47.38	53.90	56.92
		UK25	27.98	34.79	46.13	53.05	56.54
		UK30	23.43	32.41	38.43	51.20	53.02

Çizelge 4.29 göre, 7 günlük NS da optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %3.15, %4.39, %9.2, %15.92, %23.30 ve %37.93 basınç dayanımda bir azalma görülmüştür. 7 günlük SS da optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %5, %3.7, %6.55, %13.60, %20.12, %27.14 ve %41.02 basınç dayanımda bir azalma görülmüştür.

7 günlük NS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %5 ikame oranında %2.35, %10 ikame oranında ise %2.15 bir artış görülmüştür. %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında ise sırasıyla %2.9, %9.95, %16.92 ve %31.82 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 7 günlük SS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %5, %1.43, %3.73, %8.12, %14.45, %22.64 ve %35.22 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür.

Çizelge 4.29 incelendiğinde 28 günlük NS da optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5 ikame oranında %0.72 ve %10 ikame oranında %0.06 basınç dayanım artışı olmuştur. %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.35, %8.09, %13.59 ve %18.25 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 28 günlük SS da optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.98 %4.31, %6.03, %9.13, %12.68, %23.73 ve %28.17 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 7 günlük çimento harçları gibi basınç değerlerinde referans numuneye göre azalma olsada yüzde olarak bu değerler düşmüştür. Bunun sebebi ise çimento harçlarının Ca(OH)_2 lerin SiO_2 lerle daha fazla birleşerek C-S-H yapısını daha falza oluşturarak, çimentonun basınç dayanım kazanmasını sağlamaktadır.

28 günlük NS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %5 ikame oranında %4.96 ve %10 ikame oranında ise %4.84, %15 ikame oranında ise %1.58 basınç artışı görülmüştür. %20, %25 ve %30 ikame oranlarında ise sırasıyla %1.91, %7.15 ve %11.49 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 28 günlük SS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.98 %2.49, %3.49, %5.71, %6.08, %18.88 ve %24.43 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 28 günlük NS da optimize edilmişlerin optimize edilmemişlere göre basınç dayanım değerleri yüksek çıkmış ve optimize edilmişlerin %15 ikame oranına kadar referans numuneyi geçtiği görülmüştür. Bu da bize gösteriyor ki optimize edilen C sınıfı UK'lerin çimento veya çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurarak basınç dayanım değerinin artmasını sağlamıştır.

Çizelge 4.29 incelendiğinde 90 günlük NS da optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5 ikame oranında %1.86, %10 ikame oranında %1.29 ve %15 ikame oranında ise %0.29 basınç dayanımı artışı görülmüştür. %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %6.45, %12.84, ve %24.63 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 90 günlük SS da optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.99, %5.41, %8.17, %12.55, %15.22, %17.20 ve %32.02 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. Hem puzolanik aktivite hem de hidratasyon devam etmesi ile çimento harçlarının Ca(OH)_2 lerin SiO_2 lerle daha fazla birleşerek C-S-H yapısını daha fazla oluşturmuş ve çimentonun basınç dayanım kazanmasını sağlamaktadır.

90 günlük NS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %5 ikame oranında %7.22 ve %10 ikame oranında ise %5.81 ve %15 ikame oranında ise %4.09 bir basınç artışı görülmüştür. %20, %25 ve %30 ikame oranlarında ise sırasıyla %0.97, %7.48 ve %19.12 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 28 günlük SS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %4.99, %1.75, %4.53, %4.91, %9.73, %12.11 ve %26.78 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 90 günlük NS da optimize edilmişlerin optimize edilmemişlere göre basınç dayanım değerleri yüksek çıkmış ve optimize edilmişlerin %15 ikame oranına kadar referans numuneyi geçtiği görülmüştür. Tane dağılımı yapılarak çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurduğu ve kompasitesi yüksek çimento harçları üretildiği sonuçlara göre görülmüştür. Optimize Edilmiş C Sınıfı UK ikameli Çimento Harçlarında Normal suda bekletilen UK ikame oranlarındaki eğilme dayanımlarının, sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen numunelerin basınç dayanımlarından daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir

Çizelge 4.29 incelendiğinde, 180 günlük NS da optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5 ikame oranında %3.26, %10 ikame oranında %5.92, %15 ikame oranında %7.67, %20 ikame oranında %6.23, %25 ikame oranında ise %0.74 basınç dayanımı artışı görülmüştür. %30 ikame oranlarında %4.76 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 180 günlük SS da optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre

sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %5, %4.61, %4.40, %1.19, %1.97, %8.33 ve %13.48 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. Hem puzolanik aktivite hem de hidratasyon devam etmesi ile çimento harçlarının Ca(OH)_2 lerin SiO_2 lerle daha fazla birleşerek C-S-H yapısını daha fazla oluşturmuş ve çimentonun basınç dayanım kazanmasını sağlamaktadır.

180 günlük NS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %5 ikame oranında %3.41 ve %10 ikame oranında ise %6.64 ve %15 ikame oranında ise %3.10 bir basınç artışı görülmüştür. %20, %25 ve %30 ikame oranlarında ise sırasıyla %0.97, %7.48 ve %22.93 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 180 günlük SS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %5, %1.75, %0.65, %1.06, %0.67, %0.91 ve %4.37 basınç dayanımında bir azalma meydana gelmiştir.

Çizelge 4.29 incelendiğinde 360 günlük NS da optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %5 ikame oranında %0.75, %10 ikame oranında %1.2, %15 ikame oranında %2.04, %20 ikame oranında %0.82, basınç dayanımı artışı görülmüştür. %25 ikame oranında %2.32, %30 ikame oranlarında %4.48 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 360 günlük SS da optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %2.67, %4.24, %3.16, %0.01, %0.99, %3.4 ve %5.90 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür.

360 günlük NS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının, NS daki referans numuneye göre %5 ikame oranında %0.85 ve %10 ikame oranında ise %2.89 ve %15 ikame oranında ise %5.06, %20 ikame oranında %0.73 bir basınç artışı görülmüştür. %30 ikame oranlarında ise %1.85 basınç dayanımında bir azalma görülmüştür. 360 günlük SS da optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harcının NS daki referans numuneye göre sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında %2.67, %2.21, %0.12, %0.4, %0.57, %1.24 ve %7.38 basınç dayanımında bir azalma meydana gelmiştir.

% 30 a kadar yapılan puzolan ikamesi ile betonun sülfat etkisine karşı dayanımı artmış bu durumun düşük klinker içeriği ve ileriki yaşlarda gelişen puzolanik reaksiyonlara da bağlı olduğu söylenebilir. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin optimize edilmiş

UK ikameli çimento harçlarında optimize edilmemişlere göre basınç dayanımlarının yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi en yüksek kompasiteyi elde edecek en uygun UK tane boyut dağılımını elde etmek için tasarımlar yapılmış ve basınç dayanım değerlerinin kompasiteye bağlı olarak arttığı görülmüştür. Sodyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları ile ilgili olarak; C sınıfı UK’ün ortamda serbest kirecin açığa çıkması ile puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi durumunun ileriki yaşlarda olması ve buna bağlı olarak da dayanımların ileriki yaşlarda artması belirlenen sonuçlar arasındadır.

Çizelge 4.30. NS ve SS da olgunlaştırılan F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının karşılaştırılması

		İkame Oranı(%)	7-gün	28-gün	90-gün	180-gün	360-gün
n=0.4 F Sınıfı UK	Normal Su	Referans	32.44	43.89	52.49	53.54	57.25
		UK5	33.14	45.44	54.46	55.55	61.14
		UK10	32.36	44.05	52.92	56.98	62.90
		UK15	31.63	42.68	51.64	54.80	65.24
		UK20	31.30	41.40	50.16	53.16	64.72
		UK25	30.38	40.45	49.22	50.20	63.15
		UK30	28.38	39.76	47.31	48.26	62.15
	Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	30.82	41.70	49.87	50.86	55.72
		UK5	31.48	43.17	51.74	52.77	60.75
		UK10	30.74	41.85	50.27	52.28	61.18
		UK15	30.05	40.55	49.86	51.24	62.02
		UK20	29.74	39.33	47.65	48.61	61.42
		UK25	28.86	38.43	46.76	47.69	59.86
		UK30	26.96	37.77	44.94	45.84	56.23
n=0.4 C Sınıfı UK	Normal Su	Referans	36.17	42.89	52.49	53.54	57.25
		UK5	37.02	45.02	56.28	55.37	57.74
		UK10	36.95	44.97	55.54	57.10	58.91
		UK15	35.12	43.57	54.64	55.20	60.15
		UK20	32.57	42.07	51.98	53.02	58.95
		UK25	30.05	39.82	48.56	49.53	57.67
		UK30	24.66	37.96	42.45	41.26	56.19
	Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	34.36	40.75	49.87	50.86	55.72
		UK5	35.65	41.82	51.57	52.60	55.98
		UK10	34.82	41.39	50.11	53.19	57.18
		UK15	33.23	40.44	49.91	54.11	57.02
		UK20	30.94	39.97	47.38	53.90	56.92
		UK25	27.98	34.79	46.13	53.05	56.54
		UK30	23.43	32.41	38.43	51.20	53.02

Çizelge 4.30 da verilen, F sınıfı UK ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında normal su ve sodyum sülfat çözeltisi küründe ileriki yaşlarda referans numunelere göre %30 ikame oranına kadar basınç dayanım değerleri artmıştır. Wu' nun yaptığı çalışmada, Uçucu külün çimentoların basınç dayanımına etkisini araştırmak için, F ve C sınıfı UK çimento yerine ikame edilerek üretilen beton numunelerin, 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. İkame oranları dikkate alınarak değerlendirme yapıldığında; beton numunelerin maksimum basınç dayanımı değerleri; F sınıfı uçucu külde %20, C sınıfı uçucu külde %30 ikame oranlarında elde edilmiştir. C sınıfı uçucu külde en yüksek dayanım %40 ikame oranında elde edilirken; F sınıfı uçucu külde en yüksek dayanım %20 ikame oranında sağlanmıştır [93]. Yaptığımız çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiş olup, C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ilk gün dayanımlarının yüksek olduğu fakat ileriki yaşlarda ise F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının dayanımının yüksek olduğu açıktır. Bu durum C sınıfı uçucu küllerde CaO miktarının %10'dan fazla olması ve bu küllerin ilk günlerdeki hidratasyon oranının fazla olması ile açıklanabilir. Ayrıca, puzolan ikamesi ile genellikle betonun sülfat etkisine karşı dayanıklılığının artması, düşük klinker içeriği ve ileriki yaşlarda gelişen puzolanik reaksiyonlara da bağlı olduğu söylenebilir.

Ayrıca optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harçlarında optimize edilmemişlere göre basınç dayanımlarının yüksek olduğu görülmektedir. Şengül Ö. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada blaine değerindeki artışa bağlı olarak daha fazla uçucu külün puzolanik reaksiyona girmesi ile mekanik dayanımları arttırdığı belirtilmiştir [94]. Yaptığımız çalışmada ise benzer olarak en yüksek kompasiteyi elde edecek en uygun UK tane boyut dağılımını elde etmek için tasarımlar yapılmış ve basınç dayanım değerlerinin kompasiteye bağlı olarak arttığı görülmüştür. Basınç dayanımları ile ilgili olarak; F sınıfı uçucu külün ortamda serbest kirecin açığa çıkması ile puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi durumunun ileriki yaşlarda olması ve buna bağlı olarak da dayanımların ileriki yaşlarda artmasıdır. C sınıfı uçucu külün ilk gün dayanımlarının yüksek olması ise bünyesinde barındırdığı CaO miktarının yeterince puzolanik reaksiyon oluşturmaya yetecek seviyede olmasıdır.

Çizelge 4.31. SS de olgunlaştırılan F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının Standart Sapması

		İkame Oranı(%)	7-gün	28-gün	90-gün	180-gün	360-gün
F sınıfı UK SS	Optimize Edilmemiş	Referans	2.84	3.50	3.89	3.66	3.23
		UK5	2.69	3.38	3.88	3.72	3.40
		UK10	2.62	3.27	3.76	3.67	3.44
		UK15	2.55	3.17	3.59	3.45	3.49
		UK20	2.58	3.06	3.48	3.35	3.44
		UK25	2.36	2.99	3.41	3.21	3.33
		UK30	2.20	2.91	3.27	3.08	3.13
	Optimize Edilmiş	Referans	2.84	3.50	3.89	3.66	3.23
		UK5	2.90	3.63	4.04	3.80	3.52
		UK10	2.83	3.52	3.92	3.76	3.55
		UK15	2.76	3.67	3.89	3.69	3.60
		UK20	2.85	3.30	3.72	3.50	3.56
		UK25	2.66	3.23	3.65	3.43	3.47
		UK30	2.48	3.17	3.51	3.30	3.26
C Sınıfı UK SS	Optimize Edilmemiş	Referans	3.16	3.42	3.89	3.66	3.23
		UK5	3.20	3.45	3.95	3.68	3.18
		UK10	3.11	3.39	3.92	3.68	3.22
		UK15	2.88	3.27	3.89	3.81	3.32
		UK20	2.66	3.15	3.71	3.78	3.29
		UK25	2.42	2.75	3.44	3.53	3.21
		UK30	1.96	2.59	2.97	3.34	3.12
	Optimize Edilmiş	Referans	3.16	3.42	3.89	3.66	3.23
		UK5	3.28	3.51	4.02	3.79	3.25
		UK10	3.20	3.48	3.91	3.83	3.32
		UK15	3.06	3.40	3.89	3.90	3.31
		UK20	2.85	3.36	3.70	3.88	3.30
		UK25	2.57	2.92	3.60	3.82	3.28
		UK30	2.16	2.72	3.00	3.69	3.08

SS çözeltinde 7 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 2.20-2.84 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 2.48-2.84 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 1.96-3.16 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 2.16-3.16 arasında değişmiştir.

SS çözeltinde 28 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 2.91-3.50 arasında değişmiştir. Optimize

edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 3.17-3.50 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 2.59-3.42 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 2.72-3.42 arasında değişmiştir.

SS çözeltilinde 90 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 3.27-3.89 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 3.51-3.89 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 2.97-3.89 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 3.00-3.89 arasında değişmiştir.

SS çözeltilinde 180 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 3.08-3.66 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 3.30-3.66 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 3.34-3.66 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 3.66-3.69 arasında değişmiştir.

SS çözeltilinde 360 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 3.13-3.23 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 3.23-3.26 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma 3.12-3.23 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise 3.08-3.23 arasında değişmiştir.

Tüm bulunan bu standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

4.3.2.3. Optimize Edilmiş Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Harç Çubuklarının Boyca Uzama Deneyi

Sodyum sülfat çözelti kürü içerisinde tutulan numunelerde boy değişim ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzlardan çıkartılarak kuru hale getirilmiş, numunelere ait boy uzaması- zaman ilişkisi Şekil 4.28-4.31’de gösterilmiştir.

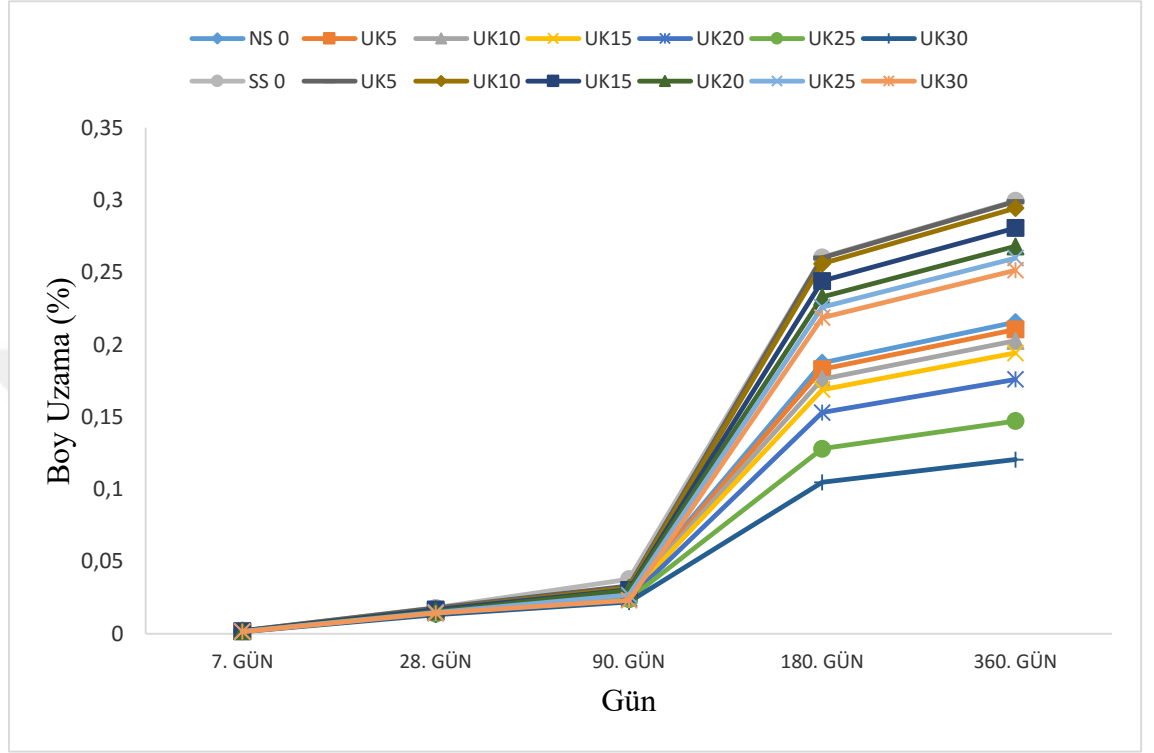
Çizelge 4.32. NS ve SS’da olgunlaştırılan optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%)

	İkame Oranı (%)	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180.Gün	360.Gün
Normal Su	Referans	0.0021	0.0161	0.0288	0.1875	0.2156
	UK5	0.0020	0.0158	0.028	0.1830	0.2105
	UK10	0.0019	0.0152	0.0271	0.1762	0.2026
	UK15	0.0019	0.0148	0.0260	0.1689	0.1942
	UK20	0.0018	0.0144	0.0243	0.1530	0.1760
	UK25	0.0017	0.0140	0.0240	0.1280	0.1472
	UK30	0.0015	0.0131	0.0220	0.1048	0.1205
Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	0.0021	0.0180	0.0378	0.2604	0.2995
	UK5	0.0020	0.0178	0.0330	0.2600	0.2990
	UK10	0.0019	0.0170	0.0318	0.2560	0.2944
	UK15	0.0018	0.0168	0.0304	0.2441	0.2807
	UK20	0.0017	0.0154	0.0300	0.2330	0.2680
	UK25	0.0016	0.0148	0.0268	0.2260	0.2599
	UK30	0.0015	0.0142	0.0232	0.2187	0.2515

7, 28, 90, 180 ve 360 gün sonunda; sodyum sülfat ve normal su küründe bekletilen numunelerin boy uzama değerlerine bakıldığında, numunelerin boy uzamalarının 90 ve sonra ki yaşlarda artış gösterdiği gözlenmiştir.

Bütün ikame şekilleri ve oranları incelendiğinde sodyum sülfat çözelti kürü için en fazla boy uzaması %0.2604 ile referans çimento harçları yaparken en az boy uzaması ise %0.2421 değeri ile %30 UK ikameli çimento harçlarında olduğu görülmüştür. Bu sonuçla birlikte referans çimento harcının basınç dayanımına bakıldığında 50.86 MPa iken %30 UK ikameli çimento harçlarında ise 42,74 MPa olduğu görülmüştür. Normal su küründeki numuneler incelendiğinde ise, en az boy uzamasının %0.1048 ile UK ikameli çimento harçlarında, en fazla boy uzamasının ise %0.1875 ile referans çimento harçlarında olduğu görülmüştür. Bu sonuçla birlikte UK ikamesinin basınç dayanımlarını %10 ikame oranına kadar arttırdığı fakat boy uzamalarını ise %30 ikame oranına kadar düşürdüğü görülmüştür. Özellikle sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen %30 UK

ikameli çimento harçları ile normal su küründe bekletilen referans numuneleri arasındaki boy uzaması arasındaki farkın yaklaşık binde beş civarında olması da UK' ün etkisini açıkça göstermektedir.



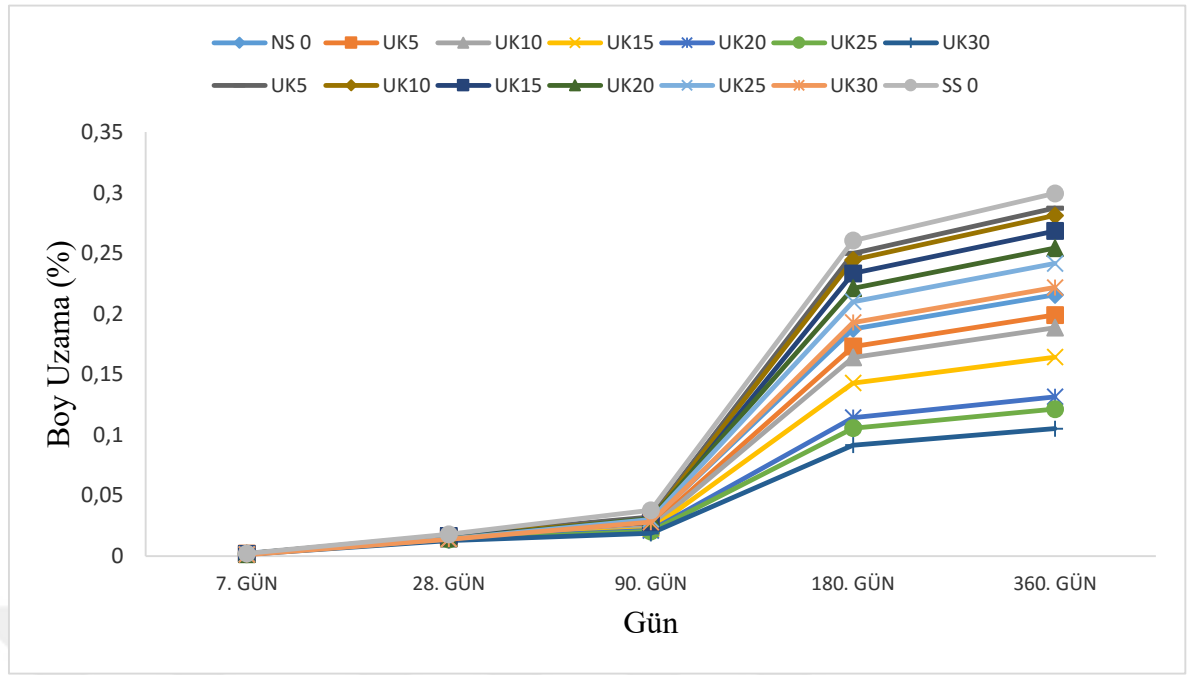
Şekil 4.30. NS ve SS' da olgunlaştırılan optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%)

Şekil 4.30 göre; Optimize edilmemiş NS ve SS de olgunlaştırılan F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamalarında 90 güne kadar fazla artış olmamasına rağmen 90 günden sonra 360 güne kadar %0.25 dolayında boy uzama olduğu görülmüştür. Burada UK ikamesinin artışı boy uzamalarını hem SS hem NS da azalttığı görülmektedir.

Çizelge 4.33. NS ve SS’da olgunlaştırılan optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%)

	İkame Oranı (%)	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180.Gün	360.Gün
Normal Su	Referans	0.0021	0.0161	0.0288	0.1875	0.2156
	UK5	0.0019	0.0152	0.0249	0.1730	0.1990
	UK10	0.0018	0.0148	0.0236	0.1640	0.1886
	UK15	0.0018	0.0146	0.0220	0.1428	0.1642
	UK20	0.0017	0.0140	0.0211	0.1143	0.1314
	UK25	0.0015	0.0136	0.0203	0.1055	0.1213
	UK30	0.0014	0.0128	0.0187	0.0915	0.1052
Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	0.0021	0.0180	0.0378	0.2604	0.2995
	UK5	0.0020	0.0173	0.0323	0.2498	0.2873
	UK10	0.0019	0.0168	0.0301	0.2445	0.2812
	UK15	0.0018	0.0165	0.0278	0.2334	0.2684
	UK20	0.0016	0.0144	0.0310	0.2211	0.2543
	UK25	0.0015	0.0140	0.0302	0.2100	0.2415
	UK30	0.0012	0.0138	0.0280	0.1928	0.2217

7, 28, 90, 180 ve 360 gün sonunda; sodyum sülfat çözelti küründe ve normal su küründe olgunlaştırılan harç çubuklarının boy uzama değerleri incelendiğinde; Bütün ikame şekilleri ve oranlarında sodyum sülfat çözelti kürü için en fazla boy uzaması %0.2604 ile referans çimento harçları yaparken en az boy uzaması ise %0.1928 değeri ile %30 UK ikameli çimento harçlarında olduğu görülmüştür. Bu sonuçla birlikte sodyum sülfat çözelti küründe olgunlaştırılan referans çimento harcının basınç dayanımına bakıldığında 50.86 MPa iken %30 UK ikameli çimento harçlarında ise 45.84 MPa olduğu görülmüştür.



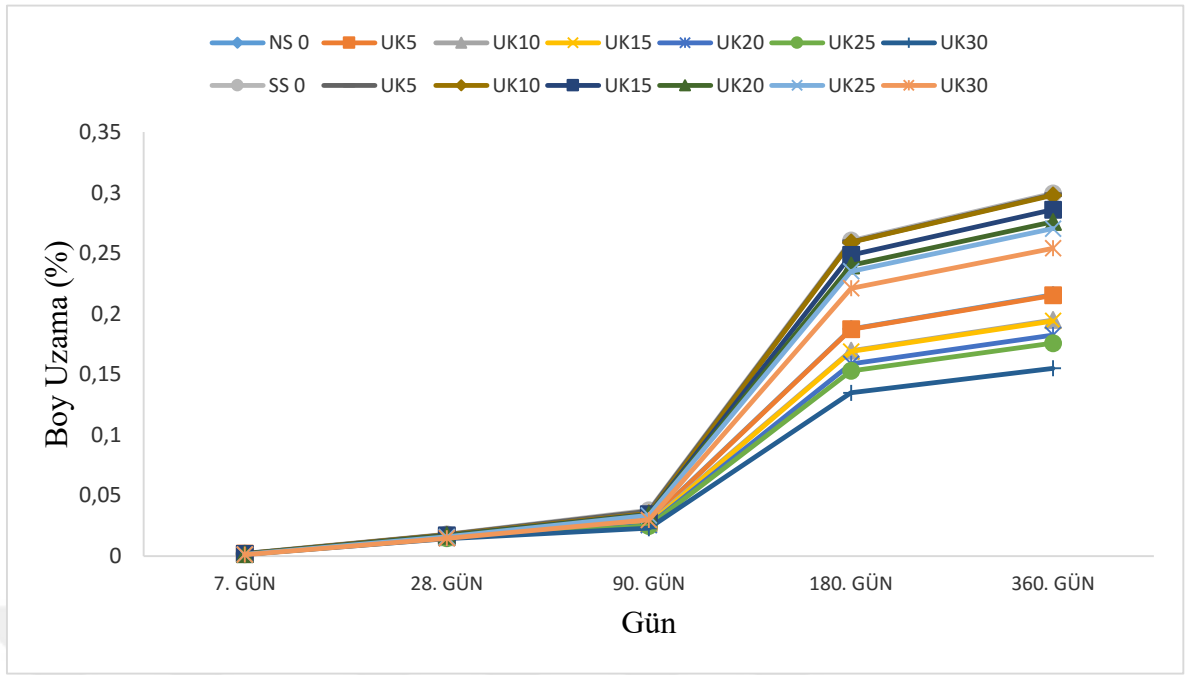
Şekil 4.31. NS ve SS’da olgunlaştırılan optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%)

Şekil 4.31’de görüldüğü gibi, normal su küründeki numuneler incelendiğinde, en az boy uzamasının %0.0915 ile %30 UK ikameli çimento harçlarında, en fazla boy uzamasının ise %0.1875 ile referans çimento harçlarında olduğu görülmüştür. Bu sonuçla birlikte UK ikamesinin sodyum sülfat çözelti küründe basınç dayanımlarını %15 ikame oranına kadar arttırdığı fakat boy uzamalarını ise %30 ikame oranına kadar düşürdüğü görülmüştür. Bu da göstermiştir ki, UK ikamesi betonun durabilite özelliklerini arttırmakla birlikte belli bir ikame oranından sonra basınç dayanımlarını düşürmüştür. Özellikle sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen %30 UK ikameli çimento harçları ile normal su küründe bekletilen referans numuneleri arasındaki boy uzaması arasındaki farkın yaklaşık %0.05 civarında olması da UK’ün etkisini açıkça göstermektedir.

Çizelge 4.34. NS ve SS’da olgunlaştırılan optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%)

	İkame Oranı (%)	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
Normal Su	Referans	0.0021	0.0161	0.0288	0.1875	0.2156
	UK5	0.0019	0.0160	0.0282	0.1872	0.2153
	UK10	0.0018	0.0155	0.0273	0.1695	0.1949
	UK15	0.0016	0.0152	0.0262	0.1688	0.1941
	UK20	0.0015	0.0150	0.0255	0.1587	0.1825
	UK25	0.0014	0.0148	0.0248	0.1528	0.1757
	UK30	0.0013	0.0144	0.0230	0.1348	0.1550
Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	0.0021	0.0180	0.0378	0.2604	0.2995
	UK5	0.0020	0.0178	0.0370	0.2594	0.2983
	UK10	0.0018	0.0175	0.0352	0.2590	0.2979
	UK15	0.0017	0.0170	0.0344	0.2486	0.2859
	UK20	0.0016	0.0168	0.0341	0.2399	0.2759
	UK25	0.0013	0.0158	0.0335	0.2351	0.2704
	UK30	0.0012	0.0147	0.0298	0.2210	0.2542

180 gün sonunda; sodyum sülfat çözelti küründe ve normal su küründe olgunlaştırılan numunelerin boy uzama değerleri incelendiğinde bütün ikame şekilleri ve oranlarında sodyum sülfat çözelti kürü için en fazla boy uzaması %0.2604 ile referans çimento harçları yaparken en az boy uzaması ise %0.2210 değeri ile %30 UK ikameli çimento harçlarında olduğu görülmüştür. Bu sonuçla birlikte sodyum sülfat çözelti küründe olgunlaştırılan referans çimento harcının basınç dayanımına bakıldığında 50.86 MPa iken %30 UK ikameli çimento harçlarında ise 42.74 MPa olduğu görülmüştür.



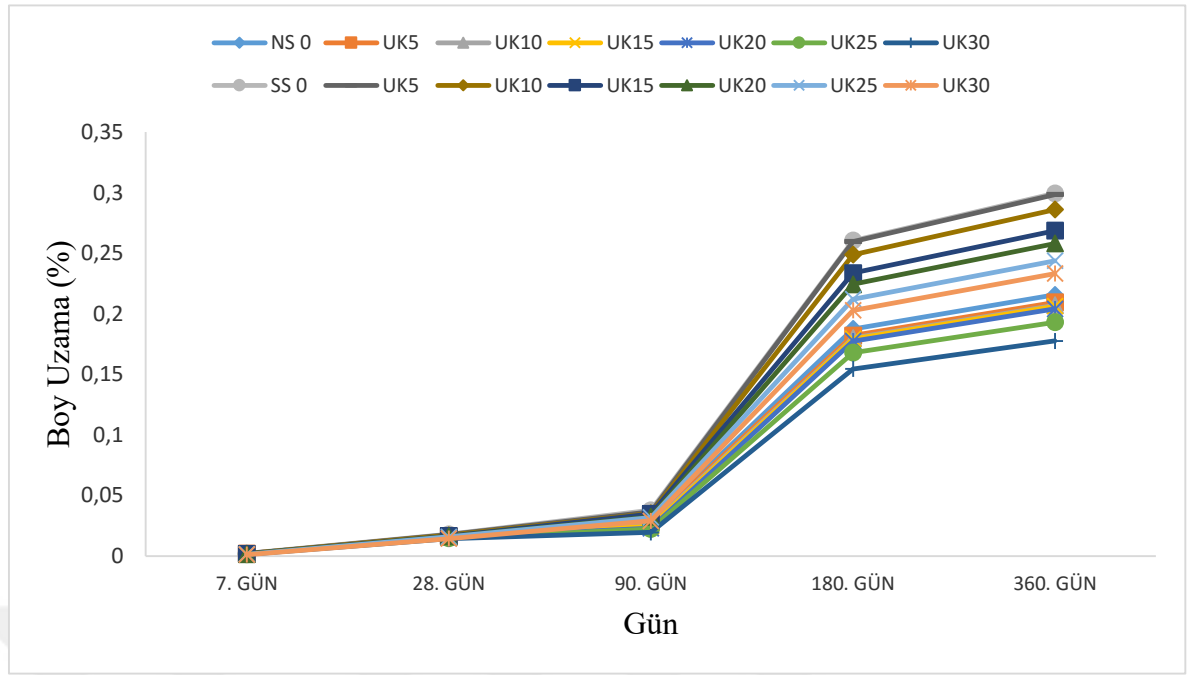
Şekil 4.32. NS ve SS’da olgunlaştırılan optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%)

Şekil 4.32 de görüldüğü gibi, normal su küründeki numuneler incelendiğinde, en az boy uzamasının %0.1348 ile %30 UK ikameli çimento harçlarında, en fazla boy uzamasının ise %0.1875 ile referans çimento harçlarında olduğu görülmüştür. Bu sonuçla birlikte sodyum sülfat çözelti küründe UK ikamesinin basınç dayanımlarını %5 ikame oranına kadar arttırdığı fakat boy uzamalarını ise %30 ikame oranına kadar düşürdüğü görülmüştür. Bu da göstermiştir ki UK ikamesi betonun durabilite özelliklerini arttırmakla birlikte belli bir ikame oranından sonra basınç dayanımlarını düşürmüştür. Özellikle sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen %30 UK ikameli çimento harçları ile normal su küründe bekletilen referans numuneleri arasındaki boy uzaması arasındaki farkın yaklaşık binde beş civarında olması da UK’ün etkisini açıkça göstermektedir.

Çizelge 4.35. NS ve SS’da olgunlaştırılan optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%)

	İkame Oranı (%)	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	360. Gün
Normal Su	Referans	0.0021	0.0161	0.0288	0.1875	0.2156
	UK5	0.0021	0.0160	0.0278	0.1821	0.2094
	UK10	0.0020	0.0159	0.0259	0.1800	0.2070
	UK15	0.0019	0.0150	0.0245	0.1793	0.2062
	UK20	0.0016	0.0151	0.0230	0.1774	0.2040
	UK25	0.0015	0.0148	0.0223	0.1679	0.1931
	UK30	0.0014	0.0142	0.0195	0.1544	0.1776
Sodyum Sülfat Çözelti Kürü	Referans	0.0021	0.0180	0.0378	0.2604	0.2995
	UK5	0.0020	0.0178	0.0364	0.2596	0.2985
	UK10	0.0018	0.0172	0.0352	0.2488	0.2861
	UK15	0.0017	0.0165	0.0347	0.2336	0.2686
	UK20	0.0016	0.0162	0.0324	0.2244	0.2581
	UK25	0.0014	0.0158	0.0318	0.2120	0.2438
	UK30	0.0012	0.0144	0.0290	0.2028	0.2332

180 gün sonunda; sodyum sülfat çözelti küründe ve normal su küründe olgunlaştırılan numunelerin boy uzama değerleri incelendiğinde bütün ikame şekilleri ve oranlarında sodyum sülfat çözelti kürü için en fazla boy uzaması %0.2604 ile referans çimento harçları yaparken en az boy uzaması ise %0.2028 değeri ile %30 UK ikameli çimento harçlarında olduğu görülmüştür. Bu sonuçla birlikte sodyum sülfat çözelti küründe olgunlaştırılan referans çimento harcının basınç dayanımına bakıldığında 50.86 MPa iken %30 UK ikameli çimento harçlarında ise 39.20 MPa olduğu görülmüştür.



Şekil 4.33. NS ve SS’da olgunlaştırılan optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamaları (%)

Şekil 4.33’de görüldüğü gibi, normal su küründeki numuneler incelendiğinde ise, en az boy uzamasının %0.1544 ile %30 UK ikameli çimento harçlarında, en fazla boy uzamasının ise %0.1875 ile referans çimento harçlarında olduğu görülmüştür. Bu sonuçla birlikte sodyum sülfat çözelti küründe UK ikamesinin basınç dayanımlarını %15 ikame oranına kadar arttırdığı fakat boy uzamalarını ise %30 ikame oranına kadar düşürdüğü görülmüştür. Bu da göstermiştir ki UK ikamesi betonun durabilite özelliklerini arttırmakla birlikte belli bir ikame oranından sonra basınç dayanımlarını düşürmüştür. Özellikle sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen %30 UK ikameli çimento harçları ile normal su küründe bekletilen referans numuneleri arasındaki boy uzaması arasındaki farkın yaklaşık binde beş civarında olması da UK’ün etkisini açıkça göstermektedir.

Çizelge 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 incelendiğinde optimize edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında normal su küründe en fazla boy uzamasının 7, 28, 90 ve 180 günlük numunelerden %5 ikame oranında olduğu, en az boy uzamasının ise %30 ikame oranındaki numunelerde olduğu görülmüştür.

SS küründe bekletilen numunelerin boy uzama değerleri incelendiğinde en fazla boy uzamanın referans numunelerde en az boy uzamasının ise %30 ikame oranında olduğu görülmüştür.

Optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında normal su küründe en fazla boy uzamasının 7, 28, 90 ve 180 günlük numunelerden %5 ikame oranında olduğu, en az boy uzamasının ise %30 ikame oranındaki numunelerde olduğu gözlenmiştir. Sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen numunelerde boy uzama değerlerini referans numunelerde en fazla olduğu %30 ikameli numunelerde ise en az olduğu görülmüştür. Sülfat etkisine maruz çimento harçlarının durabilitesinin sağlamanın en iyi yöntemlerinden birinin bu çalışma ile geçirimsiz harçlar üretmek olduğunu, UK'leri tane dağılımı yapılarak boşlukları minimize ederek geçirimsiz harç numuneler üretildiği boy uzama sonuçları göstermiştir.

Sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen numunelerin boy uzama değerleri, normal suda bekletilen numunelere göre daha fazladır. Optimize edilmiş ve optimize edilmemiş F ve C sınıfı UK ikame oranının artması ile boy uzama değerleri azalmıştır. Optimize edilmiş ve optimize edilmemiş F ve C sınıfı uçucu küllerin boy uzama değerlerini karşılaştırdığımızda ise optimize edilmiş UK ikameli numunelerin boy uzama değerlerinin %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında optimize edilmemiş uçucu küllerden daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca F ve C sınıfında 180 gün sonunda ki boy uzamalarına bakıldığında F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının boy uzamalarının daha az olduğu ve basınç dayanımlarının da bu durumu destekler nitelikte olduğu görülmüştür.

Tane dağılımı optimize edilmiş, uçucu küller ile hazırlanan çimento harçlarında boy uzama değerlerinin optimize edilmemiş uçucu küller ile hazırlanan çimento harçlarına göre normal su ve sodyum sülfat çözelti küründe daha az olması nedeniyle optimizasyonun çimento harçlarında durabiliteyi artırdığı yapılan çalışmalarda görülmektedir.

F sınıfı UK ve C sınıfı UK İkameli çimento harçlarında normal su ve sodyum sülfat çözeltisi küründe ikame oranı arttıkça boy uzama değerlerinin azaldığı açıktır. Bu durum optimize edilmiş harçlarda doluluk oranının artması ile açıklanabilir. Optimize edilmiş ve edilmemiş, UK ikameli F ve C sınıfı çimento harçlarında boy uzama değerleri aynı ikame oranları ile karşılaştırıldığında, ilk günlerde, boy uzamalarının birbirine çok yakın olduğu dolayısı ile net bir sonuç söylemenin mümkün olmadığı görülmüştür. Fakat ileriki

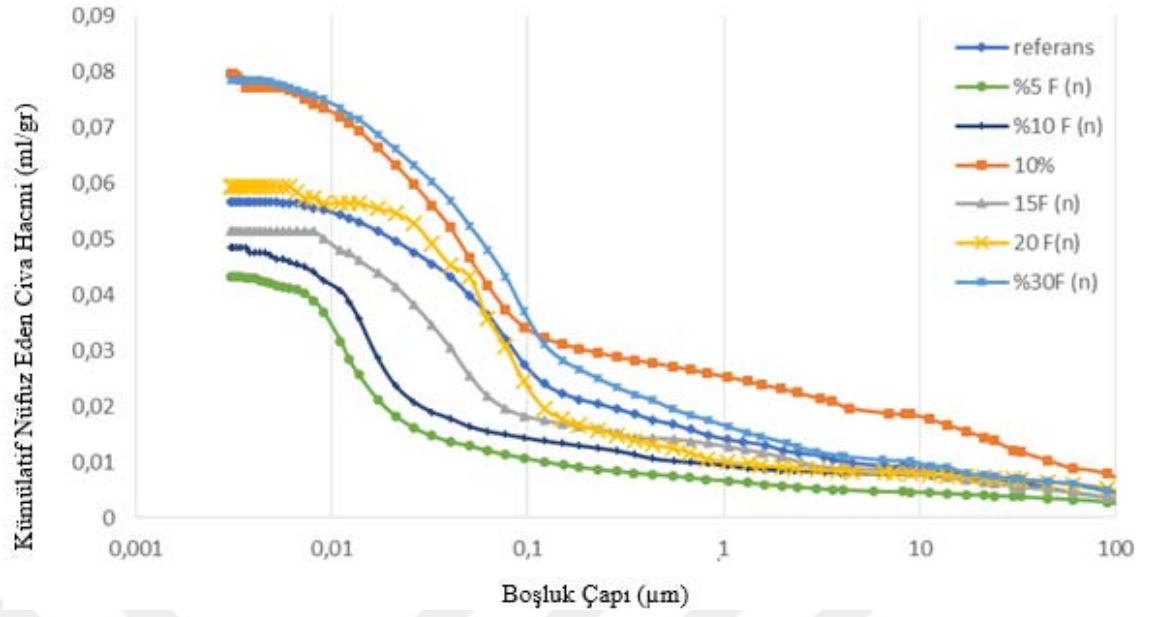
yaşlarda etkisini gösteren agresif ortamda ise, F sınıfı uçucu külün C sınıfı uçucu küle göre, boy uzama oranlarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bunun sebebi, C sınıfı uçucu küllerde CaO miktarının %30.80'dan kaynaklanmaktadır [58]. Crow ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, CaO miktarı %10'dan düşük UK içeren betonların UK ikamesiz betona göre daha az hidratasyon ısı yaydığı fakat CaO miktarı %10'dan yüksek UK içeren betonun referans betonuna yakın hidratasyon ısı yaydığını belirtmişlerdir [113]. Bu sonuç C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ilk günlerde hidratasyonun CaO miktarına bağlı olarak hızlı olduğunu göstermektedir. Bulunan sonuç elde ettiğimiz sonuçları destekler niteliktedir. Bir başka durum ise; uçucu külün bağladığı Ca(OH)_2 miktarı, uçucu külün aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 , Al_2O_3 miktarı ile ilişkilidir. F Tipi uçucu külün kimyasal bileşim analizine bakıldığında ise içerisinde yer alan SiO_2 ve Al_2O_3 miktarı C Tipi uçucu küle oranla daha fazladır ve bu durum dayanıklılık bakımından ileriki yaşlarda F sınıfı uçucu külü daha kullanılabilir bir hale getirmiştir.

4.4. Çimento Harçlarının Civalıporozimetre (MIP) Deney Sonuçları

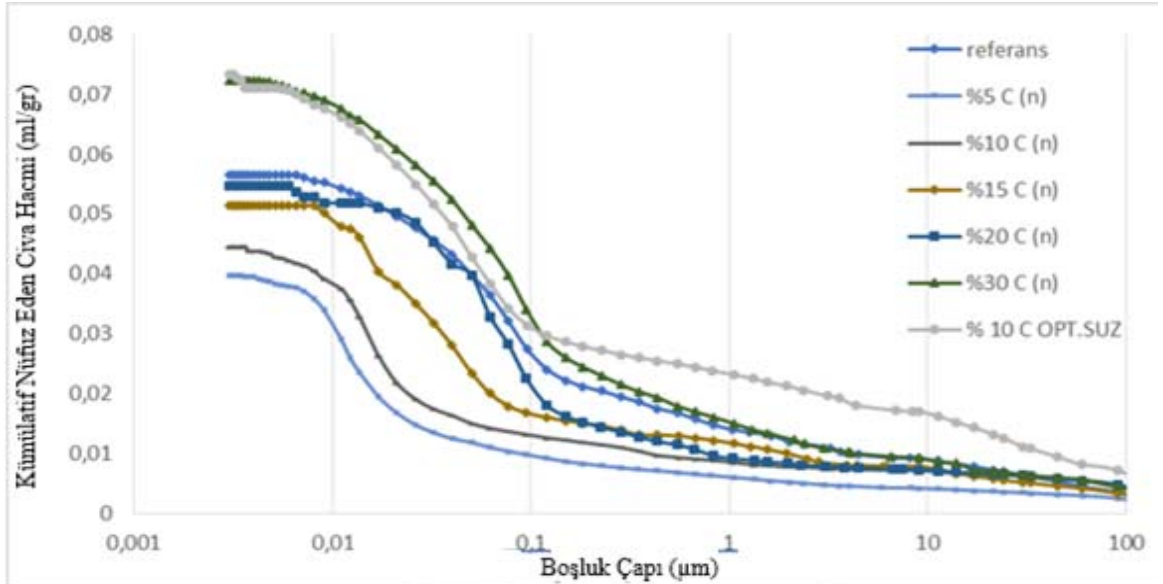
Civalı porozimetre deneyinde, deney için hazırlanan numune kapalı bir kap içerisinde yerleştikten sonra hazneye civa doldurulmuş ve bu civanın giderek artan basınç ile numuneye nüfuz ettirilmesi sağlanmıştır. Deney sistemine ait bir yazılım ile numune içerisindeki boşluk dağılımları numuneye nüfuz eden civa hacmine bağlı olarak (ml/gr) tespit edilmiştir. Boşluk dağılımı tayini için Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM) bulunan, AutoPore IV 9500 V1.09 civalı porozimetre cihazı ile yapılmıştır.

F ve C sınıfı civalı porozimetre boşluk dağılımı kümülatif gözenek alanı arasındaki ilişkiler Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'de verilmiştir.



Şekil 4.34. F sınıfı civalı porozimetre boşluk dağılımı kümülatif gözenek alanı arasındaki ilişki

Şekil 4.34 incelendiğinde referans çimento harcına göre, %5, %10 ve %15 optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında nüfuz eden civa hacminin daha düşük çıktığı görülmüştür. Bunun sebebi ise çimento harcı içerisindeki boşlukları minimize ettiği, yani kompasitesi yüksek çimento harçlarının üretildiği görülmüştür.



Şekil 4.35. C sınıfı civalı porozimetre boşluk dağılımı kümülatif gözenek alanı arasındaki ilişki

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 incelendiğinde optimize edilmiş C sınıfı UK'ün %10'a ikame edilmesi sonucu civalı porozimetrede toplam boşluk miktarını referansa göre azalttığı görülmüştür. Numune içerisindeki boşluklar birbirleri ile ilişkili olup sürekli bir sisteme sahip ise, basıncın artması ile birlikte civa numunenin tüm boşluklarına dolabilir. Bunun yanında eğer boşluk sistemi sürekli bir sisteme sahip değilse, böyle bir durum hidrasyon ürünlerinin birbirleri ile bağlantılı olan sistemleri tıkaması ile olabilir ve bu tıkanıklar civanın basıncıyla kırılacak ve civa numunenin içerisine doğru ilerlemeye devam edecektir. Basınç deneyleri ve civalı porozimetre deney sonuçları incelendiğinde optimizasyonun yapılmış %5, %10 ve %15 UK ikameli çimento bağlayıcılı numunelerin referans numuneye göre çimento harçlarının içerisindeki kılcal boşlukları daralmakta ve bu boşlukların hacmi daralarak kompasitesi yüksek bir bağlayıcılı sistem üretilmiştir.

UK ikameli çimento harçlarında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu küllerin kullanımı sertleşmiş çimento hamurunun boşluk yapısını değiştirmiş ve daha yoğun bir içyapı elde edilmiştir.

4.5. Optimize Edilmiş Çimento Harçlarının Klor Geçirgenliği, 28 ve 90 Günlük Çimento Harçlarının Numuneleri Hazırlanacak Deney Sonuçları;

Hızlı Klorür İyonu Geçirirliği;

Çalışmanın bu aşamasında; tane dağılımı optimize edilen ve tane dağılımı optimize edilmeyen %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük hızlı klorür iyonu geçirirliği ASTM C 1202'e göre incelenmiştir. Optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirirliği deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş 5, %10, %15, %20, %25 ve %30 uçucu küllü çimento harçlarının 7, 28 ve 90 gün sonunda hızlı klorür iyonu geçirirliği incelenmiştir. Üretilen çimento harçları olgunlaştırılması istenen yaşa kadar içilebilir su içinde bekletilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere her bir karışım için Şekil verilen 4'er adet Ø100×50 mm silindirik çimento harçlarından oluşturulmuştur. Bu silindirik çimento harçları hızlı klorür iyonu geçirirliği deneyine tabii tutulmuştur. Sonuçlar 4 adet silindirik çimento harcı klorür geçirirliği deney sonucu ortalamaları alınarak elde edilmiştir.

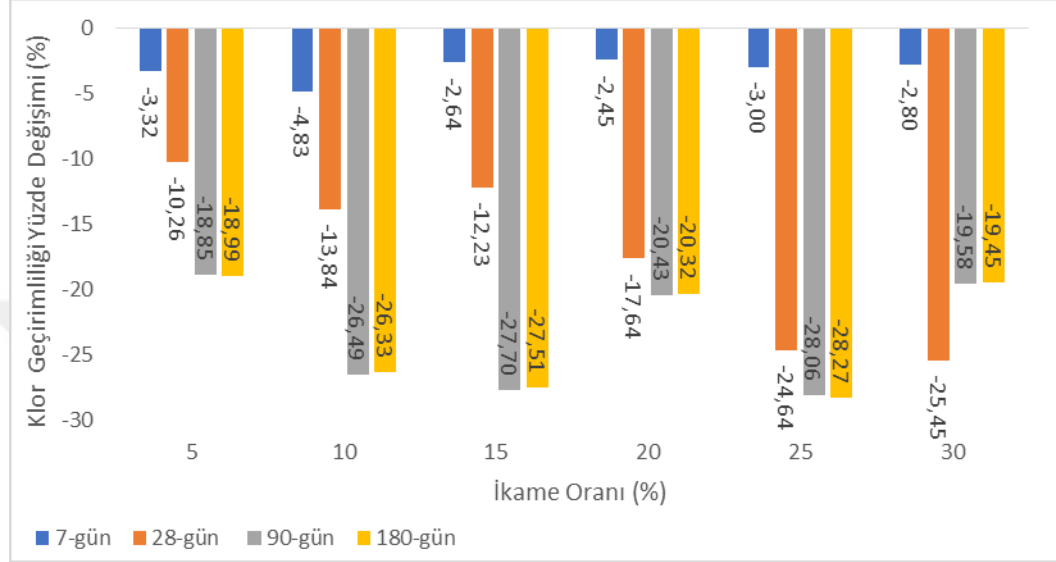
Çizelge 4.36. F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının klor geçirimliliği deney sonuçları (C)

	İkame Oranı	7-gün	28-gün	90-gün	180-gün	360-gün
Optimize Edilmemiş (F Sınıfı)	Referans	4325	3105	2380	2330	2210
	UK5	4545	3216	2435	2385	2265
	UK10	5241	3556	2405	2355	2235
	UK15	6054	3745	2332	2283	2165
	UK20	7385	4110	2051	2008	1905
	UK25	7845	4745	1675	1645	1560
	UK30	8224	4786	1486	1455	1380
Optimize Edilmiş (F Sınıfı)	0.4UK5	4394	2886	1976	1932	1835
	0.4UK10	4988	3064	1768	1735	1645
	0.4UK15	5894	3287	1686	1655	1570
	0.4UK20	7204	3385	1632	1600	1520
	0.4UK25	7610	3576	1205	1180	1120
	0.4UK30	7994	3568	1195	1172	1110
Optimize Edilmemiş (C Sınıfı)	Referans	4325	3105	2380	2330	2210
	UK5	4437	3195	2514	2466	2340
	UK10	5205	3445	2486	2436	2310
	UK15	5996	3685	2445	2396	2275
	UK20	7280	4025	2114	2072	1965
	UK25	7795	4685	1872	1835	1740
	UK30	8115	4705	1536	1505	1425
Optimize Edilmiş (C Sınıfı)	0.4UK5	4286	3137	2126	2083	1975
	0.4UK10	4874	3319	1928	1889	1790
	0.4UK15	5775	3518	1846	1809	1710
	0.4UK20	7118	3626	1802	1766	1675
	0.4UK25	7540	3828	1405	1377	1305
	0.4UK30	7885	3818	1358	1331	1260

Tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento bağlayıcı kompozitlerin klor iyonu geçirimliliği Coulombs (C) cinsinden 7, 28, 90, 180 ve 360 günlerde Çizelge 4.36’da gösterilmiştir. Numunelerin olgunlaşma yaşı arttıkça durabilite özelliklerinde de iyileşme görülmektedir.

Çizelge 4.36 ’da görüldüğü üzere 7 günlük Hızlı klor geçirimliliğinde tüm değerler yüksek klor geçirimliliğine sahiptir. 28 günlük F ve C sınıfı optimizasyonsuz hızlı klor geçirimliliğinde optimizasyonsuz F ve C sınıfı uçucu küllerde %15 ikame oranına kadar orta geçirimlilikte iken, tane dağılımı yapılmış numunelerde, orta geçirimlilik düzeyi %30 ikame oranına kadar çıkmıştır. 90, 180 ve 360 günlük numuneler incelendiğinde ise ikame oranı arttıkça düşük klor geçirimliliği deney sonuçları elde edilmiştir. Tane

dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı klorür geçirimliliği değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında, tane dağılımı optimize edilmiş sonuçların tüm ikame oranlarında en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.



Şekil 4.36. Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi

Şekil 4.36’da görüldüğü gibi 7 günlük numunelerin hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirimliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirimliliğine göre %5 ikame oranında %-3.32, %10 ikame oranında %-4.83, %15 ikame oranında %-2.64, %20 ikame oranında %-2.45, %25 ikame oranında %-3 ve %30 ikame oranında %-2.80 klor geçirimliliğinde düşüş görülmüştür.

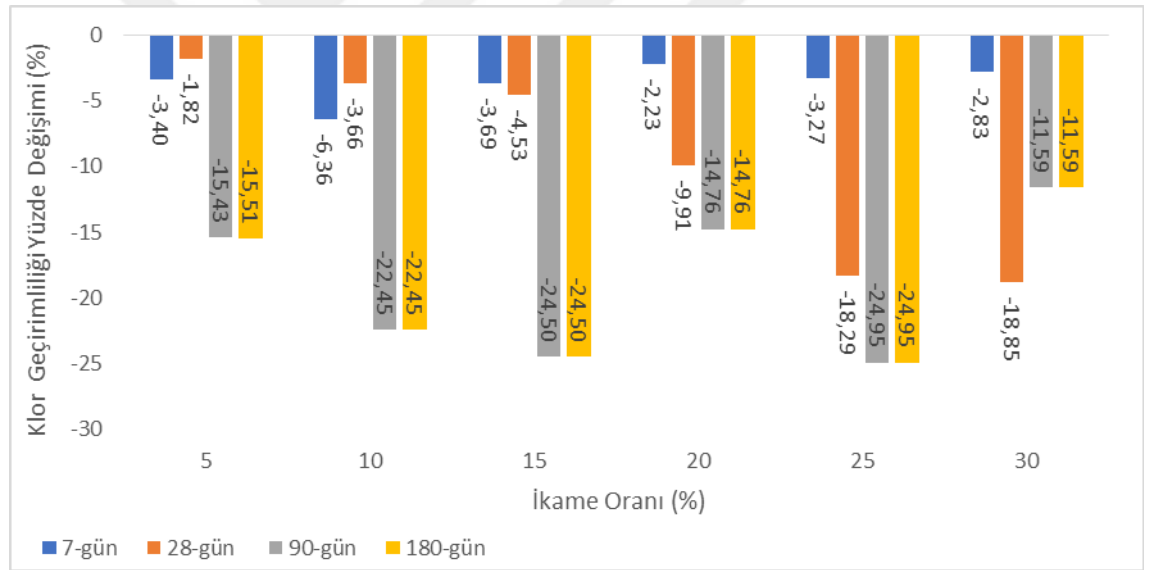
28 günlük numunelerin hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirimliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirimliliğine göre %5 ikame oranında %-10.26, %10 ikame oranında %-13.84, %15 ikame oranında %-12.23, %20 ikame oranında %-17.64, %25 ikame oranında %-24.64 ve %30 ikame oranında %-25.45 klor geçirimliliğinde düşüş görülmüştür.

90 günlük numunelerin hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirimliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirimliliğine göre %5 ikame oranında %-18.85, %10 ikame oranında %-26.49, %15 ikame oranında %-27.70, %20 ikame oranında

%-20.43, %25 ikame oranında %-28.06 ve %30 ikame oranında %-19.58 klor geçirimsizliğinde düşüş görülmüştür.

180 günlük numunelerin hızlı klorür geçirimsizliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirimsizliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirimsizliğine göre %5 ikame oranında %-18.99, %10 ikame oranında %-26.33, %15 ikame oranında %-27.51, %20 ikame oranında %-20.32, %25 ikame oranında %-28.77 ve %30 ikame oranında %-19.45 klor geçirimsizliğinde düşüş görülmüştür.

Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı klorür geçirimsizliği değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında, tane dağılımı optimize edilmiş sonuçların tüm ikame oranlarında en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.



Şekil 4.37. Optimize edilmiş ve edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının hızlı klorür geçirimsizliğinde yüzde değişimi

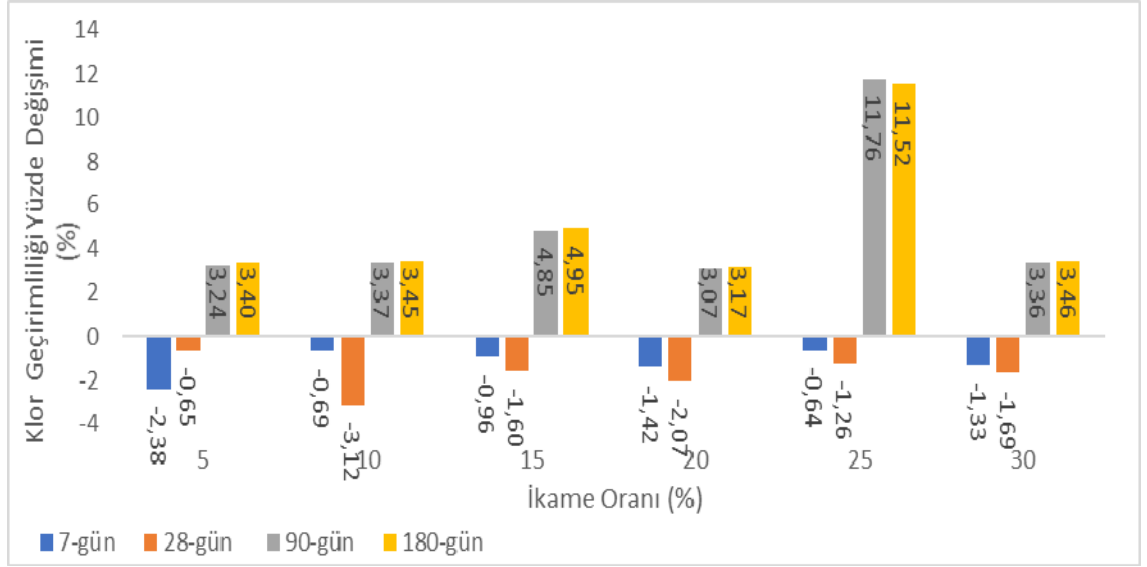
Şekil 4.37’de görüldüğü gibi, 7 günlük numunelerin hızlı klorür geçirimsizliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirimsizliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirimsizliğine göre %5 ikame oranında %-3.40, %10 ikame oranında %-6.36 %15 ikame oranında %-3.69, %20 ikame oranında %-2.23, %25 ikame oranında %-3.27 ve %30 ikame oranında %-2.83 klor geçirimsizliğinde düşüş görülmüştür.

28 günlük numunelerin hızlı klorür geçirirliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirirliğı, optimizasyonuz hızlı klorür geçirirliğıne göre %5 ikame oranında %-1.82, %10 ikame oranında %-3.66, %15 ikame oranında %-4.53, %20 ikame oranında %-9.91, %25 ikame oranında %-18.29 ve %30 ikame oranında %-18.85 klor geçirirliğinde düşüş görölmüştür.

90 günlük numunelerin hızlı klorür geçirirliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirirliğı, optimizasyonuz hızlı klorür geçirirliğıne göre %5 ikame oranında %-15.43, %10 ikame oranında %-22.45, %15 ikame oranında %-24.50, %20 ikame oranında %-14.76, %25 ikame oranında %-24.95 ve %30 ikame oranında %-11.59 klor geçirirliğinde düşüş görölmüştür.

180 günlük numunelerin hızlı klorür geçirirliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirirliğı, optimizasyonuz hızlı klorür geçirirliğıne göre %5 ikame oranında %-15.51, %10 ikame oranında %-22.45, %15 ikame oranında %-24.50, %20 ikame oranında %-14.76, %25 ikame oranında %-24.95 ve %30 ikame oranında %-11.59 klor geçirirliğinde düşüş görölmüştür.

Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen C Sınıfı UK ikameli çimento harcı klorür geçirirliğı değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında, tane dağılımı optimize edilmiş sonuçların tüm ikame oranlarında en iyi sonuçları verdiği Klor Geçirirliğı deney sonucunda açıkça görölmüştür.



Şekil 4.38. Optimize edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının hızlı klorür geçirirliliğinde yüzde değişimi

Şekil 4.38’de görüldüğü gibi 7 günlük numunelerin hızlı klorür geçirirliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirirliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirirliliğine göre %5 ikame oranında %-2.38, %10 ikame oranında %-0.69 %15 ikame oranında %-0.96, %20 ikame oranında %-1.42, %25 ikame oranında %-0.64 ve %30 ikame oranında %-1.33 klor geçirirliliğinde düşüş görülmüştür.

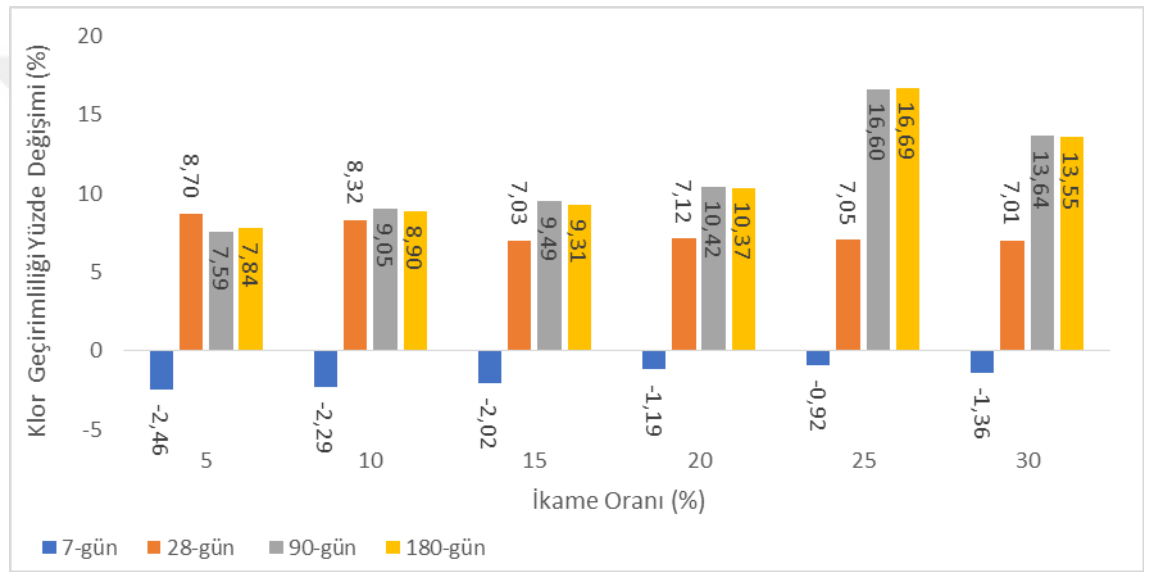
28 günlük numunelerin hızlı klorür geçirirliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirirliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirirliliğine göre %5 ikame oranında %-0.65, %10 ikame oranında %-0.65, %15 ikame oranında %-1.60, %20 ikame oranında %-2.07, %25 ikame oranında %-1.26 ve %30 ikame oranında %-1.69 klor geçirirliliğinde yüzde değişimleri görülmüştür.

90 günlük numunelerin hızlı klorür geçirirliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirirliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirirliliğine göre %5 ikame oranında %3.40, %10 ikame oranında %3.37, %15 ikame oranında %4.85, %20 ikame oranında %3.07, %25 ikame oranında %11.76 ve %30 ikame oranında %3.36 klor geçirirliliğinde yüzde değişimleri görülmüştür.

180 günlük numunelerin hızlı klorür geçirirliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirirliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirirliliğine göre %5 ikame oranında %3.40, %10 ikame oranında %3.45, %15 ikame oranında %4.95, %20 ikame oranında

%3.17, %25 ikame oranında %11.52 ve %30 ikame oranında %3.45 klor geçirirliliğinde düşüş görülmüştür.

Tane dağılımı optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı klorür geçirirliliği değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre, C sınıfı uçucu külün ilk zamanlarda geçirirliliğin F sınıfı uçucu küle göre daha düşük olduğunu ilerleyen yaşlarda ise, F sınıfı uçucu külün C sınıfı uçucu küle göre, geçirirliliğin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi C sınıfı kimyasal yapısında yüksek oranda CaO içermesidir.



Şekil 4.39. Optimize edilmiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının hızlı klorür geçirirliliğinde yüzde değişimi

Şekil 4.39'da görüldüğü gibi 7 günlük numunelerin hızlı klorür geçirirliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirirliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirirliliğine göre %5 ikame oranında %-2.46, %10 ikame oranında %-2.29 %15 ikame oranında %-2.02, %20 ikame oranında %-1.19, %25 ikame oranında %-0.92 ve %30 ikame oranında %-1.36 klor geçirirliliğinde düşüş görülmüştür.

28 günlük numunelerin hızlı klorür geçirirliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirirliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirirliliğine göre %5 ikame oranında %8.70, %10 ikame oranında %8.32, %15 ikame oranında %7.03, %20 ikame oranında %7.12,

%25 ikame oranında %7.05 %30 ikame oranında %7.01 klor geçirimliliğinde yüzde değişimleri görülmüştür.

90 günlük numunelerin hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirimliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirimliliğine göre %5 ikame oranında %7.59, %10 ikame oranında %9.05, %15 ikame oranında %9.49, %20 ikame oranında %10.42, %25 ikame oranında %16.60ve %30 ikame oranında %13.64 klor geçirimliliğinde yüzde değişimleri görülmüştür.

180 günlük numunelerin hızlı klorür geçirimliliğinde yüzde değişimi, optimum hızlı klorür geçirimliliği, optimizasyonuz hızlı klorür geçirimliliğine göre %5 ikame oranında %-7.84, %10 ikame oranında %8.90, %15 ikame oranında %9.31, %20 ikame oranında %10.37, %25 ikame oranında %16.69 ve %30 ikame oranında %13.55 klor geçirimliliğinde düşüş görülmüştür.

Tane dağılımı optimize edilen ve optimize edilmeyen UK ikameli çimento harcı klorür geçirimliliği değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırıldığında, tane dağılımı optimize edilmiş sonuçların tüm ikame oranlarında en iyi sonuçları verdiği Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da gösterilmiştir. Tane dağılımı optimize edilen, UK ikameli çimento harcı klorür geçirimliliği değerleri, kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda; C sınıfı uçucu külün ilk zamanlarda geçirimliliğin F sınıfı uçucu küle göre daha düşük olduğunu ilerleyen yaşlarda ise, F sınıfı uçucu külün C sınıfı uçucu küle göre, geçirimliliğin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi C sınıfı kimyasal yapısında yüksek oranda CaO içermesidir.

Bağlayıcı kompozitlerde tane dağılımı optimize edilmiş uçucu küllerin kullanımı sertleşmiş çimento hamurunun boşluk yapısını değiştirmiş ve daha yoğun bir içyapı elde edilmiştir. Uçucu külleri optimize ederek yüksek dayanıma sahip, daha düşük klor geçirimlilikle UK içeren bağlayıcı kompozitler çalışmada da ortaya konmuştur.

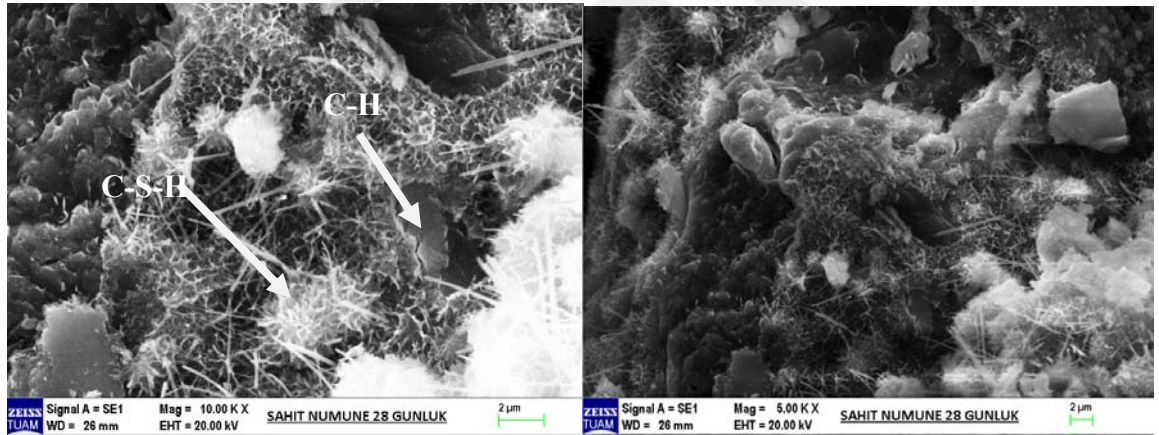
Tane dağılımı optimize edilen bağlayıcı kompozitlerin erken yaşlarda hem basınç hemde hızlı klor geçirimliliğine olumlu katkısı olduğu yaptığımız çalışmada görülmektedir. Bu derecede geliştirici etkileri tanecik yapılarının çimentodan daha ince olması ve bu sayede kazandıkları doldurucu etki ile açıklanabilir. Bu doldurucu etki ile birlikte ara yüzey geçiş bölgesindeki gelişen mikroyapı sayesinde daha kompakt ve daha yoğun bir çimentolu

bağlayıcı kompozit bir malzeme oluşmaktadır. Bu olumlu etkiye ek olarak puzolanik malzemelerin su ve çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 'i içeriklerindeki SiO_2 ile bağlayarak ek C-S-H jelleri oluşturmaları da sağlamaktadır.

4.6. Elektron Tarayıcı Mikroskop (SEM) ile Mikro Yapı İncelemesi

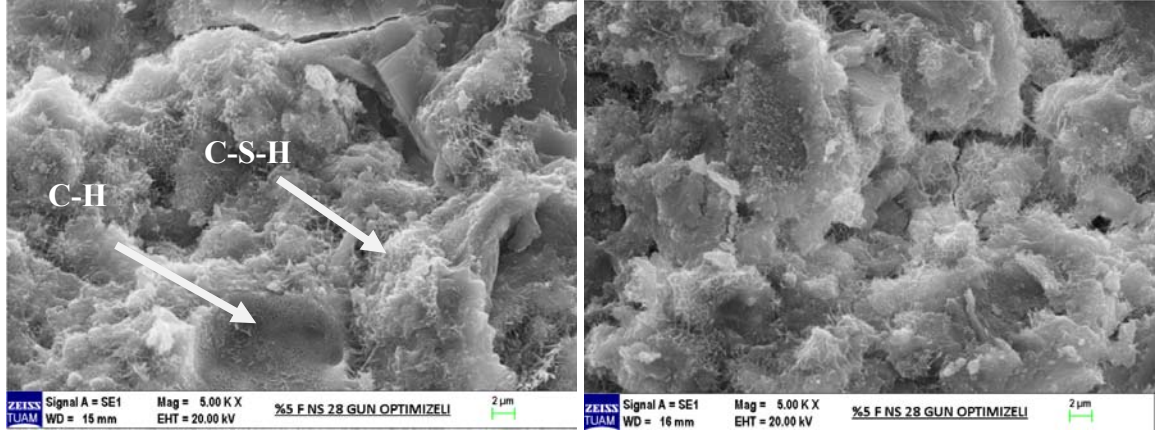
Çimento harcı numunelerin mikroyapılarını incelemek amacı ile Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) analizleri yapılmıştır. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM) bulunan, LEO 1430 VP model SEM cihazı W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron (backscattered electron) ve X ışınları (EDX- Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü bulunan araştırma merkezinde deneyler test edilmiştir.

Normal Suda Bekletilen Çimento Harçların Sem Görüntüleri



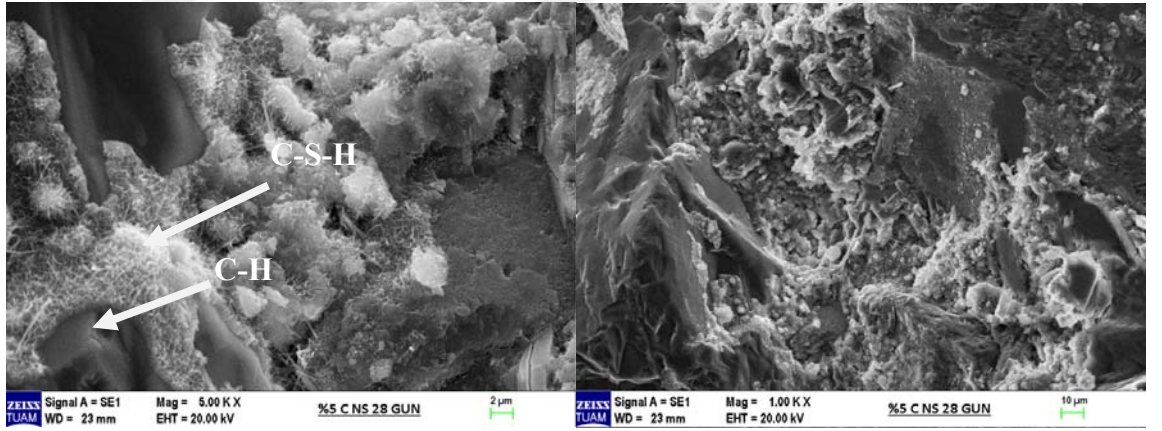
Şekil 4.40. 28 gün normal su küründe bekletilen örneklerin sem görüntüsü

28 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde C-S-H jelleri açıkça görülebilmektedir. Ayrıca CH oluşumlarının üstünün C-S-H jelleri ile kaplanmış olduğu ve yer yer CH oluşumlarına rastlanmaktadır. Burada dayanım artışları ile birlikte değerlendirilecek olan görüntülerde C-S-H jellerinin artışı dayanım artışını da sonuç olarak ortaya çıkarmıştır.



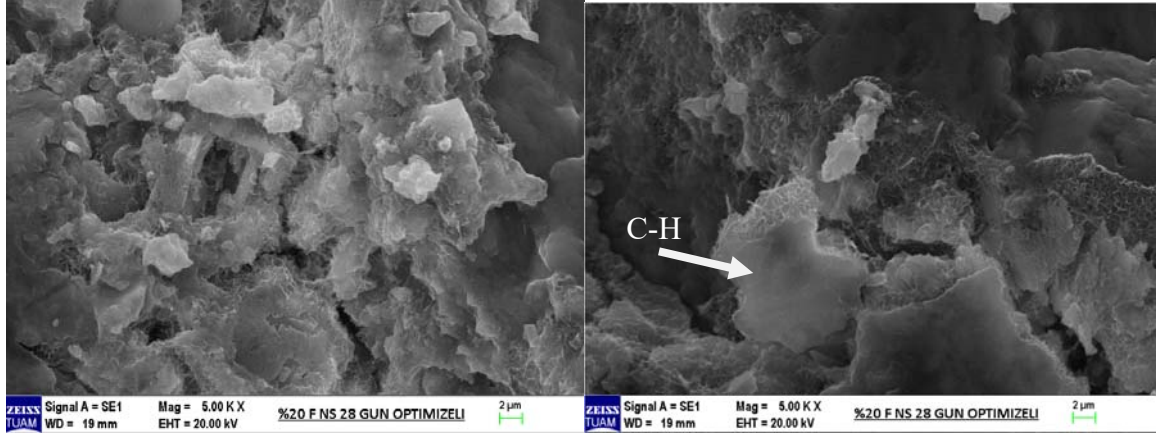
Şekil 4.41. 28 günlük normal su küründe %5 ikameli F sınıfı UK sem görüntüsü

28 günlük %5 F sınıfı UK ikameli SEM görüntüleri incelendiğinde, C-S-H jellerinin oluştuğu ve CH oluşumlarının üstünün C-S-H jelleri ile kaplanmış olduğu ve yer yer CH oluşumları gözükmetedir. Şekil 4.40'da verilen şahit numuneler ile karşılaştırılma yapıldığında, Şekil 4.41'de oluşan hidratasyon ürünlerinin azlığı göze çarpmaktadır. Bunun sonucu; puzolan ikameli harçlarının ilk gün dayanımlarının ikamesiz numunelere göre daha düşük olmasıdır.

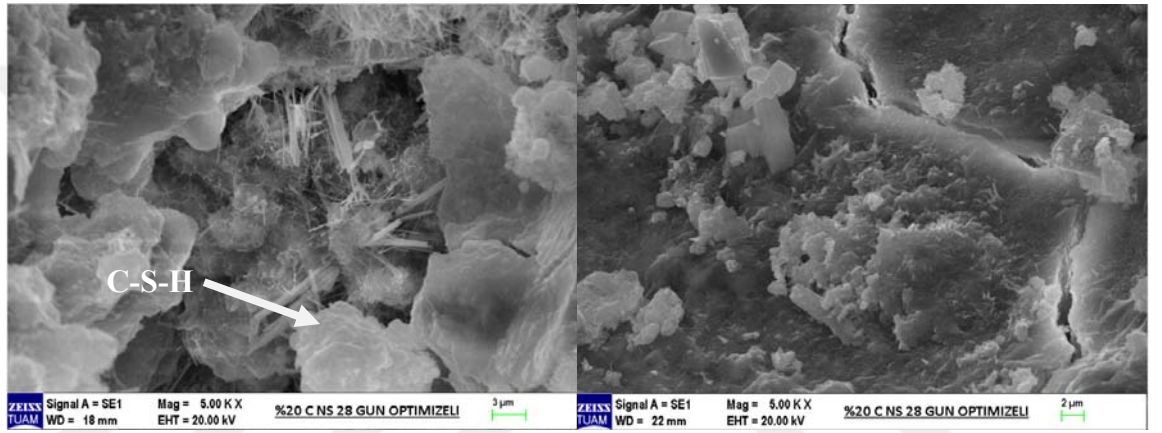


Şekil 4.42. 28 günlük normal su küründe %5 ikameli C sınıfı UK sem görüntüsü

28 günlük %5 C sınıfı UK ikameli SEM görüntüleri incelendiğinde, C-S-H jellerinin oluştuğu ve CH oluşumlarının üstünün C-S-H jelleri ile kaplanmış olduğu CH oluşumlarının ise yer yer kapandığı görülmektedir.

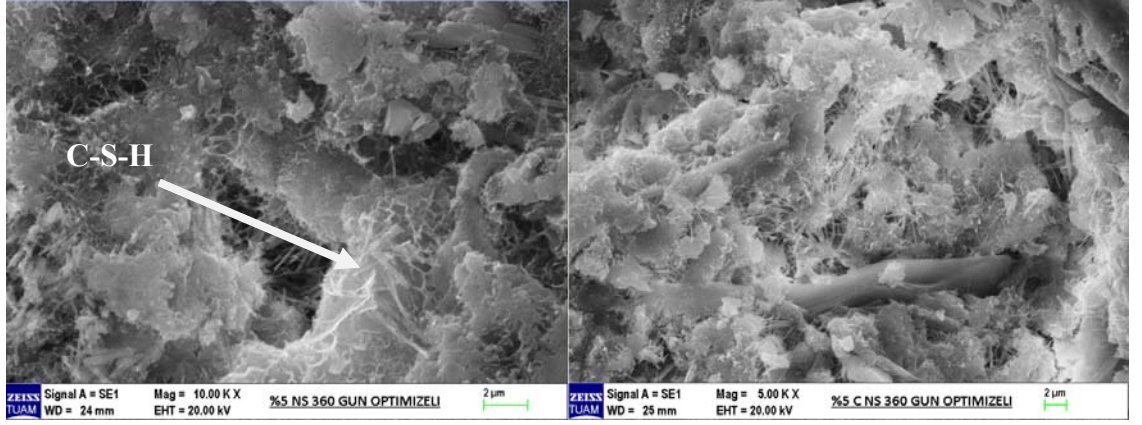


Şekil 4.43. 28 günlük normal su küründe %20 F sınıfı ikameli UK sem görüntüsü

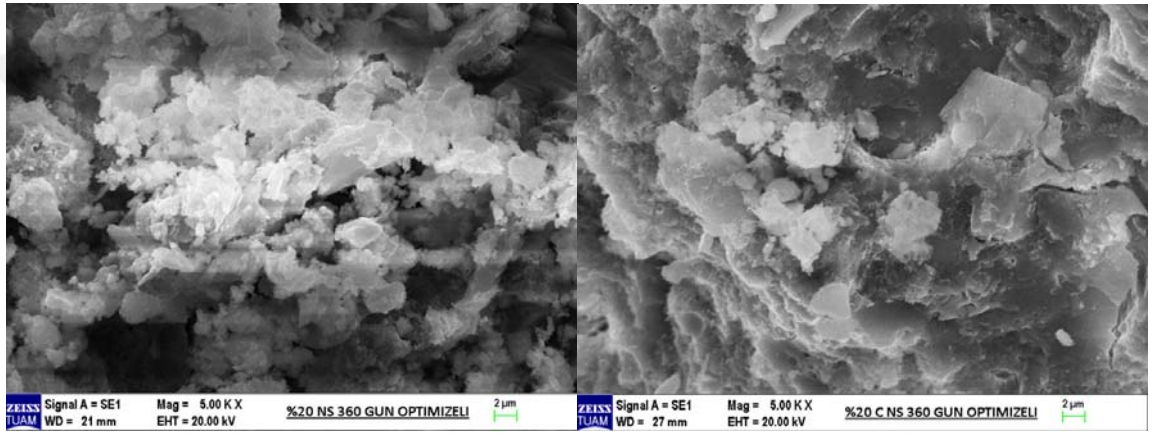


Şekil 4.44. 28 günlük normal su küründe %20 ikameli UK örneklerin sem görüntüsü

Şekil 4.41 ve Şekil 4.44 incelendiğinde %20 ikameli C ve F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, CH oluşumlarının üstünün C-S-H jelleri ile kapanmaya başladığı görülmektedir ama C-S-H oluşumlarının yavaş olduğunu %5 ve referans numuneni SEM görüntülerine bakarak anlaşılmaktadır. Bu durumun sebebi, puzolan ikamesinin hidrasyonu yavaşlattığı bu durumda bir hidrasyon ürünü olan C-S-H ve CH oluşum hızını azalttığı görülebilmektedir. Görüntüler şahit numuneler ile karşılaştırıldığında CH oluşumlarının üstünün tamamen kapanmadığı görülmekte olup, bu durum puzolan ikamesinin % 20 olması ile açıklanabilir.



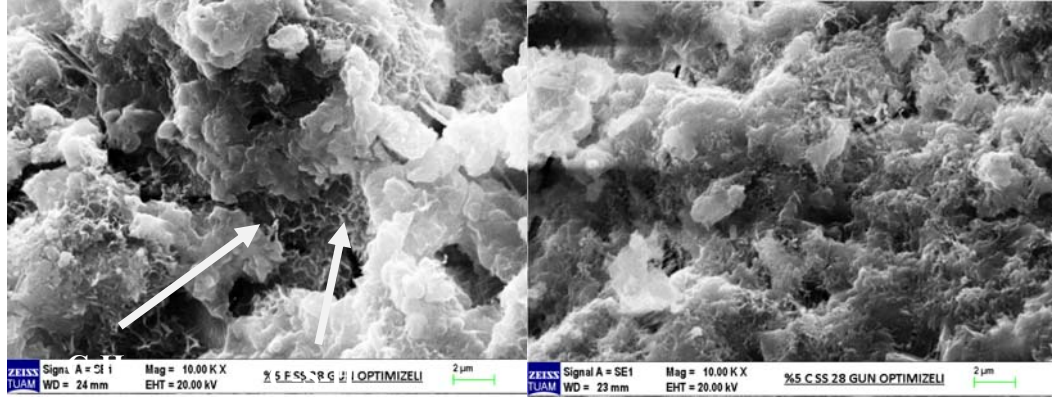
Şekil 4.45. 360 gün normal su küründe bekletilen % 5 sınıfı UK sem görüntüsü



Şekil 4.46. 360 gün normal su küründe bekletilen C sınıfı UK sem görüntüsü

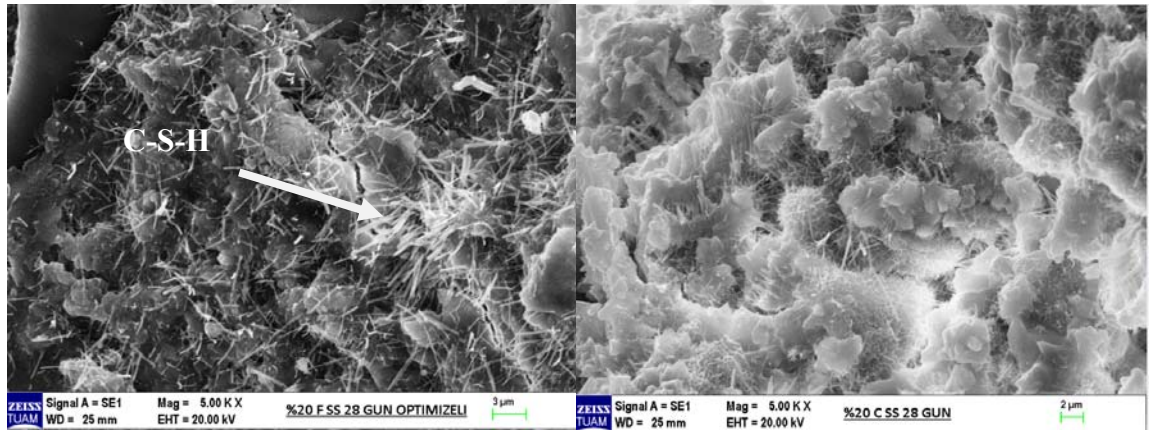
360 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde ise C-S-H jellerinin görüntülerde net bir şekilde arttığı ve bununla birlikte dayanımlarda da artış olduğu görülmüştür. Burada herhangi bir agresif ortam kürü uygulanmaması zararlı oluşumların da önüne geçmiştir.

Sodyum Sülfat Çözelti Küründe (SS) Bekletilen Çimento Harçların Sem Görüntüleri



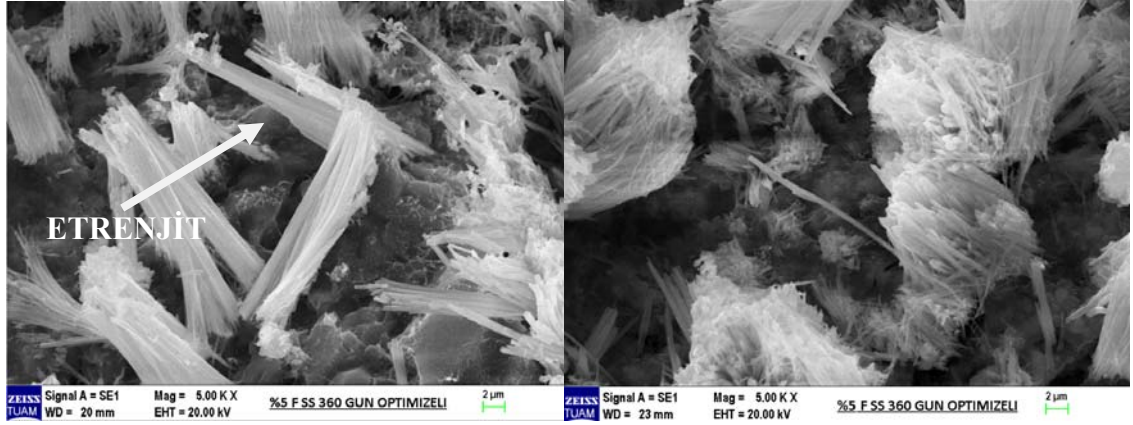
Şekil 4.47. 28 gün sodyum sülfat çözeltisi küründe %5 UK bekletilen örneklerin sem görüntüsü

C-S-H jellerinin görüntülerde net bir şekilde arttığı ve bununla birlikte dayanımlarda da artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.48. 28 gün sodyum sülfat çözeltisi küründe %20 bekletilen sem görüntüsü

Şekil 4.48 incelendiğinde yoğun bir C-S-H oluşumu göze çarpmaktadır. Sodyum sülfat çözelti kürü numuneler 28 günlük olduğu için etkisini tam gösterememiş olup boy uzama değerlerine bakıldığında sonuçların görüntüleri destekler nitelikte olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.49. 360 gün sodyum sülfat çözeltisi küründe bekletilen bem görüntüsü

28 ve 360 günlük sodyum sülfat çözelti kürü SEM görüntüleri incelendiğinde C-S-H jellerinin gittikçe arttığı görülmüştür. C-S-H jellerinin gittikçe arttığı bunun yanı sıra betona zarar veren etrenjit oluşumlarının başladığı görülmüştür. Sodyum Sülfat Çözeltisi kürü zararlı oluşumlara sebebiyet vererek, etrenjit oluşumlarına sebebiyet vermiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada optimize edilmiş F ve C sınıfı uçucu küllerin (UK) çimentoya ikame edilmesiyle üretilen çimentolu bağlayıcılı kompozitlerin mekanik özellikleri ve durabilite özellikleri değerlendirilmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir:

F ve C sınıfı UK'nin vakumlu elek ile tane boyu optimizasyon çalışma sonuçları:

0-20, 20-38, 38-45, 45-53, 53-63 mikron aralıklarında F ve C sınıfı uçucu küllerin, vakumlu elek ile tane boyutları optimize edilmiştir. Optimize edilen F sınıfı uçucu küllerin 45 µm altında %92.74'ü geçerken; 20 µm altında %63.70'i geçmiştir. C sınıfı uçucu küllerin ise 45 µm altında %75.74'ü geçerken; 20 µm altında %43.92' si geçmiştir. Lazer tane boyut dağılımı sonuçlarına bakıldığında ise çalışmada vakumlu elek yardımıyla yapılan tane boyut optimizasyonunun aralıklarının, elde ettiğimiz sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlenmektedir.

7, 28 ve 90 günlük % 20 F ve C Sınıfı UK ikameli çimento harçlarından eğilme ve basınç dayanımları farklı olsa da dağılım katsayısı 0.3'ten 0.4'e artırılırken eğilme ve basınç dayanımları yükselmiş; 0.4'den 0.6'ya kadar olan dağılım modüllerinde eğilme ve basınç dayanımları azalmıştır. Farklı dağılım katsayı için en iyi eğilme ve basınç dayanımlarını 0.4 dağılım katsayısının verdiği belirlenmiştir.

Tane boyut dağılı optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçların Eğilme ve Basınç Değerlerinin İstatistiksel Parametreleri incelenmiştir. Bunun sonucunda basınç değerlerinin istatistiksel analizinde, üretilen numunelerin 25 MPa değerinden büyük bir değer olmasından dolayı ve üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde olup olmadığının ve kalite kontrol derecesinin belirlenebilmesi için standart sapma değeri esas alınmıştır. Standart sapma değerinin 7 günlük çimento harç numunelerin basınç değerleri 2.65-2.92 arasındadır. 28 günlük standart sapma değerleri 2.84-3.29 ve 90 günlük standart sapma değeri 3.19-3.36 değerleri arasındadır. Standart sapma değerlerini 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Eğilme değerlerinin istatistiksel analizinde ise, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçların Eğilme ve Basınç Değerlerinin İstatistiksel Parametreleri incelenmiştir. Bunun sonucunda üretilen numunelerin basınç dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden büyük bir değer olmasından dolayı ve üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde olup olmadığının ve kalite kontrol derecesinin belirlenebilmesi için standart sapma değeri esas alınmıştır. Standart sapma değerinin 7 günlük çimento harç numunelerin basınç değerleri 2.77-2.92 arasındadır. 28 günlük standart sapma değerleri 2.79-3.29 ve 90 günlük standart sapma değeri 3.19-3.36 değerleri arasındadır. Standart sapma değerlerini 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Eğilme değerlerinin istatistiksel analizinde ise, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Yapılan tane dağılım deney sonuçları gösteriyor ki, UK’lerin çimento harcı içerisindeki boşlukları en iyi dolduracak filler etkisin, $n=0.4$ tane dağılım katsayısı olduğu tespit edilmiştir. Agregalarda yapılan granülometri gibi, UK’lerde yapılan tane dağılımlarında da filler etkisi sağlandığında, çimentonun içerisine daha yüksek hacimde UK ikame edilmesi kompasiteyi arttırmış ve daha iyi dayanımların elde edildiği görülmüştür.

Tane dağılım optimize edilmiş ve edilmemiş UK ikameli çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanım sonuçları:

7 günlük eğilme dayanımlarında, tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK’lere göre artış oranları incelenmiştir. Bu sonuçlara göre,

sırasıyla; %5, %10, %15, %20, %25, %30,%35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında eğilme dayanımlarındaki artış yüzdeleri sırasıyla; %7.40, %7.85, %7.96, %8.08, %9.16, %9.61, %9.81, %10,23, %10,33, %10.51, %10.92 ve %11.21, olarak görülmüştür.

Standart sapma sonuçları incelendiğinde en büyük değerin, referans numunede 0.62 olarak görülmüştür. Standart sapmanın optimize edilmemiş numunelerde standart sapmanın 0.68-0.37 arasında değişmektedir. Optimize edilmemiş numunelerde ise standart sapma 0.62-0.39 arasındadır. İstatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 9 ile 11 MPa değeri arasında olduğu görülmektedir. Üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

28 günlük eğilme dayanımlarında ise tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK’lere göresırasıyla; %5, %10, %15, %20, %25, %30,%35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında eğilme dayanımlarındaki artış yüzdeleri sırasıyla; %20.27, %20.76, %21.05, %21.27, %21.64, %21.91, %22.06, %22.82, %23.14, %23.74, %23.99 ve %24,14 olarak görülmüştür. %5 ikame oranındaki eğilme dayanımı referans çimento harçlarındaki eğilme dayanımından %18.40 daha fazla elde edilmiştir. %10, %15, %20 ve %25 ikameli optimize yapılan çimento harçları, referans numuneden yüksek çıkmıştır. Tüm ikame oranlarında, tane dağılımı optimize yapılan F sınıfı UK’lerin eğilme dayanımları, tane dağılımı optimize yapılmayan F sınıfı UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç gösteriyor ki, tane dağılım optimizasyonunun doluluk faktörünün yüksek olduğu sonucunu vermektedir.

28 günlük çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması

nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Eğilme dayanımının varyasyon katsayısının optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 9 ile 11 MPa değeri arasında olduğu görülmektedir. Üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

90 günlük eğilme dayanımlarında ise, optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK’lere göre, sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında eğilme dayanımlarındaki artış yüzdeleri sırasıyla %19.06, %20.04, %21.47, %21.58, %21.64, %21.80, %22.02, %22.95, %23.22, %23.53, %23.83 ve %24.04 olarak görülmüştür. 90 günlük sonuçlarda ise, %5 optimize yapılan F sınıfı UK ikameli çimento harçlarındaki eğilme dayanımı 13.12 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranındaki eğilme dayanımı referans numunedeki eğilme dayanımından %14.88 daha fazla elde edilmiştir. Eğilme dayanımlarında; Yapılan her ikame oranında ikame oranlarında tane dağılımı optimize edilen F sınıfı UK’ ün eğilme dayanımları, optimize edilmeyen F sınıfı UK ikameli çimento harcı eğilme dayanımlarından yüksek çıktığı tespit edilmiştir. %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 optimize edilen F sınıfı UK’nin eğilme dayanımları, referans numunenin eğilme dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür.

90 günlük çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Tane dağılım optimize edilmiş ve edilmemiş UK ikameli çimento harçlarının basınç dayanım sonuçlarına göre:

7 günlük basınç dayanımlarında, tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK’lere göre artış oranlarına göre, sırasıyla; %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında basınç

dayanımlarındaki artış yüzdeleri sırasıyla, %7.81, %7.94, %8.47, %12.39, %12.44, %12.53, %12.93, %13.41, %13.64, %13.97, %14.15 ve %14.37 olduğu görülmüştür.

7 günlük basınç dayanımlarında en yüksek basınç dayanımı %5 tane dağılım optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 33.14 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranındaki basınç dayanımı referans numuneye göre, %2.15 basınç dayanımında iyileşme görülmüştür. %5 optimizasyonu yapılmış UK ikame oranında basınç dayanımı, ikamesiz basınç dayanımından yüksek çıkmıştır. %10, %15, %20 ve %25 tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK ikame oranında basınç dayanımı, ikamesiz basınç dayanımının değerine çok yakın çıkmıştır.

7 günlük basınç dayanımlarında, üretilen numunelerin basınç dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden büyük bir değer olmasından dolayı ve üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde olup olmadığının ve kalite kontrol derecesinin belirlenebilmesi için standart sapma değeri esas alınmıştır. Standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değirin, 2.95, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 3.02 olarak tespit edilmiştir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

28 günlük basınç dayanımlarında ise optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş lere göre; sırasıyla; %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarındaki basınç dayanımları artış oranları sırasıyla; %7.42, %7.54, %7.61, %7.98, %8.10, %8.90, %9.51, %9.62, %10.10, %11.79, %12.98 ve %13.80 olarak görülmüştür. Bu sonuçlar ile birlikte optimizasyon sonucu basınç dayanımlarındaki iyileşmelerin %13,8’ e kadar çıktığı görülmüştür. 28 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 45.44 MPa olarak elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımını en iyi artıran optimize ikame oranı %5 olarak görülmüştür. %5 ikame oranındaki basınç dayanımı referans çimento harçlarında basınç dayanımından %3.53 daha yüksek elde edilmiştir. Tüm ikame oranlarında optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin basınç dayanımları, optimize edilmemiş F sınıfı UK dayanımlardan yüksek çıkmıştır. %5 ve %10 optimize edilmiş UK ikame oranında basınç dayanımı, referans numunenin basınç dayanımından yüksek çıkmıştır. %15, %20 ve %25 optimize edilmiş F sınıfı UK

ikame oranında basınç dayanımı, referans çimento harçlarının basınç dayanımının değerine çok yakın çıkmıştır.

28 günlük basınç dayanımlarının, standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değerin, 3.95, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 4.02 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ortalaması alınan dayanım değeri sonuçlarının birbirine yakın olduğunun göstergesidir. Standart sapma değerlerini 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

90 günlük basınç dayanımlarında, tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş F sınıfı UK’lere göre, sırasıyla; %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, %50, %55 ve %60 ikame oranlarında basınç dayanımlarındaki artış yüzdelерinin sırasıyla; ,%6.24, %6.44, %6.61, %6.86, %6.95, %7.25, %7.46, %8.06, %8.79, %9.44, %9.60 ve %9.90 olduğu görülmüştür. 90 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 54.46 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranındaki basınç dayanımı referans çimento harçlarına göre, %3.75 daha fazla çıkmıştır. %5, %10 ve %15 optimize edilmiş F sınıfı UK ikame oranında basınç dayanımı, referans çimento harçlarına göre daha yüksek çıkmıştır. %30 kadar da optimize edilen F sınıfı UK ikame numunelerin, referans çimento harçlarına göre basınç dayanımları çok yakın çıkmıştır.

90 günlük basınç dayanımlarında, standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değeri 2.10, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 2.12 olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar basınç dayanım ortalama değerinde belirtilen sınırlar içerisinde yaklaşık olarak dengeli olacak biçimde dağılmıştır. 90 günlük numuneler olması ve daha homojen bir yapıda olması bunun en önemli sebebidir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

7 günlük eğilme dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin, optimize edilmemiş C sınıfı UK’lere göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarındaki eğilme dayanımları artış yüzdeleri sırasıyla %3.85, %4.19, %4.79, %4.95, %5.56 ve %6.39 olduğu görülmüştür. 7 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5

optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 7.02 MPa olarak elde edilmiş olup referans numunenin eğilme dayanımından %8.33 daha yüksek elde edilmiştir. %5, %10 ve %15 optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin referans çimento harçlarının eğilme dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

7 günlük eğilme dayanımlarının, standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değeri 0.75, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 0.78 olarak tespit edilmiştir. Çok hafif bir sapmanın olduğu görülmektedir. Bunun büyük nedeni numuneleri 7 günlük olması, hidratasyonun devam etmesi numunelerin homojen bir yapıya henüz ulaşamamasından kaynaklanmaktadır. 7 günlük çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10-20 MPa değerinden arasında olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

28 günlük eğilme dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin, optimize edilmemiş C sınıfı UK'lere göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında eğilme dayanımı artış yüzdeleri %13, %13.22, %13.72, %14.61, %15.91 ve %15.93 olduğu görülmüştür. 28 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı, %5 optimum C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 10.43 MPa olarak elde edilmiştir. %5 ikame oranındaki eğilme dayanımı referans çimento harçlarındaki eğilme dayanımından %15.63 daha yüksek elde edilmiştir. %10, %15 optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin referans çimento harçlarının eğilme dayanımına göre daha yüksek çıktığı görülmüştür.

28 günlük eğilme dayanımlarının, standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değerin, 0.90, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 1.05 olarak tespit edilmiştir. 28 günlük çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden arasında olması nedeni ile üretilen çimento

harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “ Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

90 günlük eğilme dayanımlarında, tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin, tane dağılımı optimize edilmemiş C sınıfı UK’lere göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında eğilme dayanımı artış yüzdeleri %17.71 %20.73, %21.45, %22.24, %22.58 ve%23.46 olduğu tespit edilmiştir. 90 günlük sonuçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı %5 optimum C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 14.03 MPa olarak elde edilmiş olup, referans numunenin eğilme dayanımından %22.85 daha yüksek elde edilmiştir. %5, %10, %15 %20 ve %25 optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin referans numunenin eğilme dayanımına göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

90 günlük çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır. Optimize edilmiş ve edilmemiş F sınıfı UK ikameli eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10-20 MPa değerinden arasında olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

7 günlük basınç dayanımlarında, optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin, tane dağılımı optimize edilmemiş C sınıfı UK’lere göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında basınç dayanımı artış yüzdeleri sırasıyla %5.68, %6.85, %7.04, %7.10, %8.33 ve%9.84 olarak bulunmuştur. 7 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 37.02 MPa olarak elde edilmiş olup, referans numuneye göre %2.35 artış gerçekleşmiştir. %5 ve %10 optimize edilmiş C sınıfı UK’lerin referans numunenin basınç dayanımına göre daha yüksek çıktığı belirlenmiştir.

7 günlük basınç dayanımlarının, standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değeri 3.69, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 3.85 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ortalaması alınan dayanım değeri sonuçlarında, sapmanın çok az olduğunun değerlerinin birbirine yakın olduğunun göstergesidir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

28 günlük basınç dayanımlarında, tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin, optimize edilmemiş C sınıfı UK'lere göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında basınç dayanımı artış yüzdeleri %4.21, %4.78, %6.22, %6.72, %7.45 ve %8.27 olduğu görülmüştür. 28 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı, %5 optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 45.02 MPa olarak elde edilmiş olup, referans numuneye göre %4.96 artış gerçekleşmiştir. %5, %10 ve %15 optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin referans numunenin basınç dayanımına göre daha yüksek çıktığı görülmüştür.

28 günlük basınç dayanımlarının, standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değirin, 4.29 optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 4.26 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ortalaması alınan dayanım değeri sonuçlarında, sapmanın çok az olduğunun değerlerinin birbirine yakın olduğunun göstergesidir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

90 günlük basınç dayanımlarında, tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin, optimize edilmemiş C sınıfı UK'lere göre sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında basınç dayanım artış yüzdeleri; %5.26, %5.62, %5.59, %5.87, %6.14 ve %7.31 olduğu görülmüştür. 90 günlük sonuçlar arasında en yüksek basınç dayanımı %5 optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında 56.28 MPa olarak elde edilmiş olup, referans numuneye göre %7.22 artış gerçekleşmiştir. %5, %10 ve %15 optimize edilmiş C sınıfı UK'lerin referans numunenin basınç dayanımına göre daha yüksek çıktığı görülmüştür.

90 günlük basınç dayanımlarının, standart sapma sonuçları incelendiğinde optimize edilmemiş çimento harçlarında en büyük değirin, 2.15, optimize edilmiş çimento harçlarında ise, 2.26 olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar basınç dayanım ortalama değerinde belirtilen sınırlar içerisinde yaklaşık olarak dengeli olacak biçimde dağılmıştır. 90 günlük numuneler olması ve daha homojen bir yapıda olması bunun en önemli sebebidir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Tane dağılım optimizasyonu edilmiş ve edilmemiş UK ikameli çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımı deneyleri sonucunda, tane dağılımı optimizasyonunu F sınıfı UK'lerde ve C sınıfı UK'lerde basınç ve eğilme dayanımı sağlamakta etkili olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak tane dağılımı optimizasyonu yapılan uçucu küllerin, çimento harcı içerisindeki boşlukları iyi doldurduğu görülmektedir. Komposite daha yüksek çimento harçları üretilmiş ve UK kullanımı arttırılmıştır.

C ve F sınıfı arasındaki basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, F tipi UK ikameli betonların daha çok erken yaşlarda referans betonuna çok yakın değerler aldığı, ileriki yaşlarda ise uçucu küllü betonların basınç dayanımlarının büyük bir kısmının referans betonundan daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. C sınıfı uçucu küllerde CaO miktarının %30,80 olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuç C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ilk günlerde hidratasyonun CaO miktarına bağlı olarak hızlı olduğunu göstermektedir. Bulunan sonuçlar, elde ettiğimiz sonuçları destekler niteliktedir. Bir başka durum ise; uçucu külün bağladığı Ca(OH)_2 miktarı, uçucu külün aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 , Al_2O_3 miktarı ile ilişkilidir. F Tipi uçucu külün kimyasal bileşim analizine bakıldığında ise içerisinde yer alan SiO_2 ve Al_2O_3 miktarı C tipi uçucu küle oranla daha fazladır ve bu durum dayanım bakımından ileriki yaşlarda F sınıfı uçucu külü daha kullanılabilir bir hale getirmiştir.

Tane Dağılımı Optimize Edilmiş ve Edilmemiş UK İkameli Çimento Harçlarının Durabilite Özellikleri:

Donma - çözölmeye karşı dayanıklılık veri sonuçları:

Tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, D-Ç oldukça emme oranları tüm ikame oranlarında düşmüştür. Döngü sayıları artıkça su emme değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi sonucunda %15 ikame oranına kadar D-Ç karşı daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarında ise referans çimento harçlarını geçemediği görülmüştür. İkame oranı artıkça çimento harçlarında daha fazla hasar görmeye başlamıştır. Bunun sebebi ise, döngü sayılarının artması birlikte, çimento hamurunda yüzeydeki hasar oluşmakta iç bünyedeki göçmeler oluşmuştur. Standart sapma değerleri 2.92-1.94 arasında değişmektedir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile

Üretilen imento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “ok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK’lerde, optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli imento harçlarının 90 günlük D- deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi sonucunda %20 ikame oranına kadar D- karşı daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmada görülmektedir. D- oldukça emme oranları ve ağırlık kayıpları tüm ikame oranlarında düşmüştür. Tane dağılımı yapılan uçucu küllerin imento harcı içerisindeki boşlukları doldurması ile imento harçlarının bünyesi su almasını zorlaştırmıştır. Basınç dayanımlarına bakıldığında ise %15 ikame oranına kadar D- ye karşı etkili olduğu, Sonraki ikame oranlarında ise dayanımının düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi ise, döngü sayıların artması birlikte, imento hamurunda yüzeydeki hasar oluşması ve i bünyedeki göçmeler oluştuğundan dolayı döngü sayıları artıkça su emme değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Standart sapma değerleri 3.03-2.09 arasında değerismektedir. Bu değerler yaklaşık olarak basınç dayanımlarındaki tüm değerler sınır değer içerisinde kalmıştır. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen imento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “ok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli imento harçlarının 90 günlük D- deneyi ağırlık kaybı yüzde değerişimi sonucunda %15 ikame oranına kadar D- karşı daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmada görülmektedir. D- oldukça emme oranları ve ağırlık kayıpları tüm ikame oranlarında düşmüştür. Tane dağılımı optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli imento harçlarının basınç dayanımı bakıldığında ise, %10 ikame oranına kadar D- karşı etkili olduğu görülmektedir. C sınıfı UK’lerin imento harcı içerisinde boşlukları doldurduğu ve %10 ikame oranına göre etkili olduğu görülmüştür. Fakat ikame oranı artıkça dayanımda düşüşler meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise, döngü sayıların artması birlikte, imento hamurunda yüzeydeki hasar oluşması ve i bünyedeki göçmeler oluştuğundan dolayı döngü sayıları artıkça su emme değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Standart sapma değerleri 2.97-1.74 arasında değerismektedir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen imento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “ok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarının 90 günlük D-Ç deneyi ağırlık kaybı yüzde değişimi sonucunda %20 ikame oranına kadar D-Ç karşı daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmada görülmektedir. Tane dağılımı optimize edilen C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, D-Ç oldukça emme oranları ve ağırlık kayıpları tüm ikame oranlarında düşmüştür. Tane dağılımı optimize edilen UK'lerin boşlukları minimize etmesi bünyesi su almasını ve basınç dayanımının %20 ikame oranına kadar referans numuneye karşı D-Ç etkili olduğu görülmüştür. Fakat ikame oranı artıkça dayanım, su emme ve ağırlık kayıplarında düşüşler meydana gelmesidir. Bunun sebebi ise, döngü sayılarının artması birlikte, çimento hamurunda yüzeydeki hasarı belirlediğinden, iç bünyedeki göçmeler olduğundan dolayı döngü sayıları artıkça su emme değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Standart sapma sonuçları, 3.17-1.78 arasında değişmektedir. Standart sapma değerlerinin 5 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Tane dağılımı yapılmış F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının, C sınıfı UK'lere donma-çözülmede daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmada görülmüştür. Bunun sebebi, numunelerin 90 günlük olmalarından dolayı, F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının F sınıfı UK içerisindeki silisin (%60.74) C sınıfı UK'den daha fazla olmasıdır. Silislerin, Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek ortamdaki portlandit miktarını azaltarak C-S-H miktarının daha fazla olması, tane dağılımı yapılarak da hidrasyon ürünlerin boşlukları daha iyi doldurmasından dolayı donma-çözölmeye karşı daha dirençli çimento harçları üretilmektedir.

Tane Dağılımı Optimize Edilmiş UK İkameli Çimento Harçlarının Sülfatın Etkisi:

Tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, normal suda ve sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen numunelerin 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük eğilme dayanım değerleri incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda; NS küründe olgunlaştırılan, UK ikameli referans çimento harçları 7, 28 ve 90 günde en yüksek eğilme dayanım sonuçlarını, 180 ve 360 günde ise %10 UK ikameli çimento harçlarının en yüksek eğilme dayanım değeri aldığı görülmüştür.

Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan UK ikameli referans çimento harçları 7, 28, 90 günlerde en yüksek eğilme dayanım sonuçlarını, 180 günde %15 UK ikameli, 360 günde ise %10 UK ikameli çimento harçlarının en yüksek eğilme değeri aldığı görülmüştür.

Tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, NS ve SS ‘daki eğilme dayanımlarının tüm kür süreleri için %5 UK ikameli, çimento harçlarında en yüksek dayanım değerini aldığı görülmüştür.

Optimize edilmemiş NS ve SS’de dayanımlarında düşüş görülmekteyken optimize edilmişlerde artış görülmesinin sebebi, UK’lerin tane dağılımının yapılması çimento ve çimento harcı içerisindeki boşlukları doldurarak eğilme dayanımını iyileştirdiğinin görülmüş olmasındandır.

Optimize edilmiş ve edilmemiş sülfat etkisine maruz kalan bütün ikame oranları, sülfatlı suda bekletilen referans numuneye göre her ne kadar dayanıklı gözüксе de normal suda bekletilen referans numuneleri geçemediği tespit edilmiştir.

Tane dağılımı optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, normal suda ve sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen numunelerin 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük eğilme dayanım değerleri incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda; NS ve SS ‘deki eğilme dayanımlarının tüm kür süreleri için %5 UK ikameli çimento harçlarında en yüksek eğilme dayanım değerini aldığı görülmüştür.

Tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında NS küründe bekletilen numunelerin eğilme dayanımlarının, 7, 28 ve 90 günde %5 UK ikameli çimento harçlarında; 180, 360 günde ise %10 UK ikameli çimento harçlarında en yüksek değeri aldığı görülmüştür. SS çözeltisi küründe bekletilen numunelerin ise eğilme dayanımları, 7, 28 günde %5 UK ikameli çimento harçlarında; 90, 180, 360 günde ise %10 UK ikameli çimento harçlarında en yüksek eğilme dayanım değeri aldığı görülmüştür.

Sülfat etkisine maruz bırakılan optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimentolu harçlar erken dayanımlarda %20’ye kadar eğilme dayanımını artırması sebep olarak yüksek kireçli UK’nin puzolanik özelliğinin yanı sıra, kendiliğinden bağlayıcı olma özelliğine bağlanabilir. 28 gün ile 360 gün arasında optimize edilmiş F sınıfı UK’lerin C sınıfı UK

ikameli çimento harçlarına göre daha iyi eğilme dayanımı sonuçları vermesinin sebebi ise optimize edilmiş tane dağılımının inceliği ve ileriki yaşlarda puzolanik aktivitesinin yüksek olmasına bağlanabilir.

Tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli NS ve SS'de olgunlaştırılan çimento harçlarının basınç dayanımları deney veri sonuçlarına göre, NS'de olgunlaştırılan referans çimento harçları 7, 28 ve 90 günde en iyi basınç dayanımı; 180 günde %10; 360 günde ise %20'de en iyi basınç dayanım değerini vermiştir. SS' de bekletilenlerde ise, 7, 28 ve 90 günlerde en iyi basınç değerini referans çimento harçları verirken; 180 günde %5; 360 günde ise en iyi basınç dayanım değerini %10 UK ikameli çimento harçlarında en yüksek basınç dayanımı değeri aldığı görülmüştür.

Tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, NS, SS çözeltilisinde olgunlaştırılan 7, 28, 90 günlerde en iyi sonucu %5 ikame UK; 180 günde %10 ikameli; 360 günde ise %15 UK ikameli çimento harçlarında en yüksek basınç dayanım değeri aldığı görülmüştür.

NS' de basınç dayanımlarında artış görülürken, sülfat etkisindeki çimento harçlarında basınç kayıpları görülmektedir. Bu durumda sülfatlı suya maruz kalan çimento harçlarında dayanımı olumsuz yönde etkileyen etrenjit yapıların oluştuğu görülmektedir.

Tane dağılımı optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli NS ve SS'de olgunlaştırılan çimento harçlarının basınç dayanımları deney veri sonuçlarına göre; NS'de olgunlaştırılan çimento harçları; 7 günde referans, 28ve 90 günde %5 UK ikameli, 180 günde %10, 360 günde ise %15 ikameli çimento harçları en iyi basınç dayanım değerini vermiştir. SS'de bekletilenlerde ise, 7, 28 ve 90 günlerde %5 UK ikameli çimento harçları verirken, 180 ve 360 günde ise en iyi basınç dayanım değerini %15 UK ikameli çimento harçlarında en yüksek basınç dayanım değeri aldığı görülmüştür.

Tane dağılımı optimize edilmiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında NS, SS çözeltilisinde olgunlaştırılan 7, 28,90 günlerde en iyi sonucu %5 ikame UK, 180 günde %10 ikameli, 360 günde ise %15 UK ikameli çimento harçlarında en yüksek basınç dayanımı değeri aldığı görülmüştür.

Üretilen çimento harçlarının istatistiksel parametrelerin hesaplanması sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımının ortalamasının 25 MPa değerinden küçük olması nedeniyle varyasyon katsayısı değeri esas alınmıştır.

SS çözeltinde 7 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı 8.63-10.02 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %9.12-9.95 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %9.11-10.08 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %9.13-9.88 arasında değişmiştir.

SS çözeltinde 28 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %8.40-8.97 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %8.37-8.74 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında standart sapma %8.36-9.00 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %8.38-9.43 arasında değişmiştir.

SS çözeltinde 90 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %7.93-8.37 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %7.63-7.93 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %7.85-8.22 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %7.88-7.94 arasında değişmiştir.

SS çözeltinde 180 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %6.80-7.23 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %7.17-7.46 arasında değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %7.16-7.47 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %7.16-7.23 arasında değişmiştir.

SS çözeltinde 360 gün olgunlaştırılan tane dağılımı optimize edilmemiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %5.62-7.05 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %6.79-7.20 arasında

değişmiştir. Optimize edilmemiş C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında varyasyon katsayısı %6.77-7.03 arasında değişmiştir. Optimize edilmiş F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ise %6.78-6.82 arasında değişmiştir.

Tüm eğilme dayanımının varyasyon katsayısının 10 MPa değerinden küçük olması nedeni ile üretilen çimento harçlarının istatistiksel olarak anlamlı mertebelerde “Çok İyi” kalite kontrol derecesinde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Optimize edilmiş çimento harç numunelerinin basınç dayanım değerleri, optimize edilmemiş çimento harç numunelerinden daha yüksek değerdedir.

Sonuç olarak tane dağılımı optimize edilmiş F sınıfı UK’ler erken çimento harcı içerisinde erken hidrasyona girerek tane dağılımı optimize edilmeyene göre hem SS’de hemde NS küründe daha yüksek dayanıma ulaşmışlardır. Diğer bir ifade ile lazer tane boyut dağılımında görüldüğü üzere $n=0,4$ UK inceliğinin de yüksek olduğu bu durumda puzolanik aktivite hızını olumlu yönde etkileyerek hem SS’de hem de NS’de eğilme ve basınç dayanımını arttırmıştır.

F sınıfı UK ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında normal su ve sodyum sülfat çözeltisi küründe ikame oranı arttıkça boy uzama değerlerinin azaldığı açıktır. Bu durum, optimize edilmiş harçlarda doluluk oranının artması ile açıklanabilir. Tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş, UK ikameli F ve C sınıfı çimento harçlarında boy uzama değerleri aynı ikame oranları ile karşılaştırıldığında, ilk günlerde, boy uzamalarının birbirine çok yakın olduğu, dolayısı ile net bir sonuç söylemenin mümkün olmadığı görülmüştür. Fakat ileriki yaşlarda etkisini gösteren agresif ortamda ise F sınıfı uçucu külün C sınıfı uçucu küle göre boy uzama oranlarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bunun sebebi, C sınıfı uçucu küllerde CaO miktarının %30.80 olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuç C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında ilk günlerde hidrasyonun CaO miktarına bağlı olarak hızlı olduğunu göstermektedir. Bulunan sonuç, elde ettiğimiz sonuçları destekler niteliktedir. Bir başka durum ise, uçucu külün bağladığı Ca(OH)_2 miktarı, uçucu külün aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 , Al_2O_3 miktarı ile ilişkilidir. F tipi uçucu külün kimyasal bileşim analizine bakıldığında ise içerisinde yer alan SiO_2 ve Al_2O_3 miktarı C Tipi uçucu küle oranla daha fazladır ve bu durum

dayanıklılık bakımından ileriki yaşlarda F sınıfı uçucu külü daha kullanılabilir bir hale getirmiştir.

Sonuç olarak, tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, normal suda bekletilen uçucu kül ikame oranlarındaki eğilme ve basınç dayanımlarının, sodyum sülfat çözelti küründe bekletilen numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarından daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Optimize edilen çimento harçlarının ise, kompasitesinin yüksek çıkmasından dolayı sodyum sülfat çözelti kürü dayanımının daha yüksek olduğu yapılan çalışmada ortaya çıkmıştır.

Tane Dağılımı Optimize edilmiş UK ikameli çimento harçlarının Civalı Porozimetre (MIP)

Tane dağılımı optimize edilmiş C ve F sınıfı UK'nin %10 ikame edilmesi sonucu civalı porozimetrede toplam boşluk miktarının referansa göre azaldığı görülmüştür. Civalı porozimetre deney sonuçları incelediğinde optimizasyonu yapılmış %5, %10 ve %15 uçucu kül ikameli çimento harçlarının referans çimento harçlarına göre çimento harçlarının içerisindeki kılcal boşlukları daralmakta ve bu boşlukların hacmi daralarak kompasitesi yüksek çimento harçları üretilmiştir.

Tane Dağılımı Optimize Edilmiş ve Edilmemiş UK İkameli Çimento Harçlarının Klor Geçirgenlik Sonuçları

Tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş F ve C sınıfı UK ikameli çimento bağlayıcı kompozitlerin klor iyonu geçirimsizliği Coulombs (C) cinsinden 7, 28, 90, 180 ve 360 günlerde yapılan çalışmada, numunelerin olgunlaşma yaşı arttıkça durabilite özelliklerinde de iyileşme görülmektedir.

7 günlük hızlı klor geçirimsizliğinde tüm değerler yüksek klor geçirimsizliğine sahiptir. 28 günlük F ve C sınıfı optimizasyonsuz hızlı klor geçirimsizliğinde optimizasyonsuz F ve C sınıfı uçucu küllerde %15 ikame oranına kadar orta geçirimsizlikteyken, tane dağılımı yapılmış numunelerde, orta geçirimsizlik düzeyi %30 ikame oranına kadar çıkmıştır. 90, 180 ve 360 günlük numuneler incelendiğinde ise ikame oranı arttıkça düşük klor geçirimsizliği deney sonuçları elde edilmiştir. Optimize edilmiş ve edilmemiş UK ikameli çimento harçları, klorür geçirimsizliği değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında

karşılaştırıldığında, optimize edilmiş sonuçların tüm ikame oranlarında en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

Tane dağılımı optimize edilmeyen, UK ikameli çimento harcı klorür geçirimsizliği değerleri kendi aralarında aynı ikame oranlarında karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, C sınıfı uçucu külün ilk zamanlarda geçirimsizliğin F sınıfı uçucu küle göre daha düşük olduğu; ilerleyen yaşlarda ise, F sınıfı uçucu külün C sınıfı uçucu küle göre geçirimsizliğinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi C sınıfı kimyasal yapısında yüksek oranda CaO içermesidir.

F ve C sınıfı UK ikameli çimento harçları, klor iyon geçirimsizliği test sonuçları referans numuneye göre oldukça yüksek çıkmıştır. Yüksek olmasının sebebi, hidrasyon ürünü olan Ca(OH)_2 zamanla artması ve UK' ün Ca(OH)_2 tepkimeye girerek C-S-H jellerini oluşturarak çimento harçlarının dayanımını artırmasıdır.

UK kimyasal bileşimindeki SiO_2 , Al_2O_3 miktarı bağladığı Ca(OH)_2 miktarı kadar çok ise daha fazla C-S-H jelleri oluşacaktır. F sınıfı UK ve C sınıfı UK'lerin kimyasal yapısına bakıldığında zaman, SiO_2 ve Al_2O_3 miktarının C sınıfı UK'lerde daha fazla olması bağlayıcılık özelliğinin daha fazla olmasına sebep olduğu için, C sınıfı ikameli çimento harçlarında daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Çimento yerine, optimize edilmiş UK ikamesi ile elde edilen çimento harçlarının, hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deney sonuçlarına göre, optimize edilmemiş UK ikamesine deney sonuçlarına daha da iyi veriler elde edildiği yapılan çalışmada görülmüştür. Bu sonuçlar yüksek hacim, minimum boşluk ile dayanımı yüksek çimento harçlar elde edilmiştir.

Sonuçta, tane dağılımı optimize edilmiş uçucu küllerin kullanımı sertleşmiş çimento hamurunun boşluk yapısını değiştirmiş ve daha yoğun bir içyapı elde edilmiştir. Uçucu külleri optimize ederek yüksek dayanıma sahip, daha düşük klor geçirimsizlikle UK içeren bağlayıcı kompozitler çalışmada da ortaya konmuştur.

Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Mikro-Yapısal Özellikleri:

28 günlük normal suda olgunlaştırılan çimento harçlarının SEM görüntüleri incelendiğinde C-S-H jelleri açıkça görülebilmektedir. Ayrıca CH oluşumlarının üstünün C-S-H jelleri ile kaplanmış olduğuna ve yer yer CH oluşumlarına rastlanmaktadır.

28 günlük normal suda olgunlaştırılan %5 F ve C sınıfı UK ikameli SEM görüntüleri incelendiğinde; C-S-H jellerinin oluştuğu, CH oluşumlarının üstünün C-S-H jelleri ile kaplanmış olduğu ve yer yer CH oluştuğu gözükmemektedir.

28 günlük normal suda olgunlaştırılan %20 ikameli C ve F sınıfı UK ikameli çimento harçlarında, CH oluşumlarının üstünün C-S-H jelleri ile kapanmaya başladığı görülmektedir ama C-S-H oluşumlarının yavaş olduğu, %5 ve referans numunenin SEM görüntülerine bakarak anlaşılmaktadır. Bu durumun sebebi, puzolan ikamesinin hidrasyonu yavaşlattığı, bu durumun da bir hidrasyon ürünü olan C-S-H ve CH oluşum hızını azalttığı görülebilmektedir.

Normal suda olgunlaştırılan çimento harçlarının mikro yapıları karşılaştırıldığında, puzolan ikamesinin hidrasyonu yavaşlattığı bu durumun da bir hidrasyon ürünü olan C-S-H ve CH oluşum hızını azalttığı görülebilmektedir.

360 günlük normal suda olgunlaştırılan çimento harçlarının SEM görüntüleri incelendiğinde ise C-S-H jellerinin görüntülerde net bir şekilde arttığı ve bununla birlikte dayanımlarda da artış olduğu görülmüştür. Burada herhangi bir agresif ortam kürü uygulanmaması zararlı oluşumların da önüne geçmiştir.

28 ve 360 günlük sodyum sülfat çözelti kürü SEM görüntüleri incelendiğinde C-S-H jellerinin gittikçe arttığı görülmüştür. C-S-H jellerinin gittikçe arttığı, bunun yanı sıra betona zarar veren etrenjit oluşumlarının başladığı görülmüştür. Sodyum sülfat çözeltisi kürü, zararlı oluşumlara ve etrenjit oluşumlarına sebebiyet vermiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarla desteklen, $n=0.4$ tane dağılım katsayısı ile UK'lere tane dağılımı optimizasyonu yaparak büyük hacimli UK kullanımı artırılmış ve bu artış oranı %30 ikame oranıdır. Tane dağılımı yapılmayan, 90 günlük UK'lerin basınç dayanımları incelendiğinde F sınıfı UK ikame %5, %10 ikame oranlarında referans numuneyi yakaladığı; C sınıfı UK'lerin ise %15 ikamede referans numuneyi geçtiğini görmekteyiz.

Bu sonuca göre tane dağılımı optimizasyonunun sayesinde optimizasyonu yapılmayan UK'lere göre, optimizasyon işlemi yapılarak %10 UK ikame yerine, F sınıfı UK'lerde %30 kadar, C sınıfı UK'lerde ise %20 ikameye kadar UK kullanarak basınç dayanımlarının aynı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Uçucu küllerin en önemli fiziksel özelliklerinden birisi tane dağılımı olup, bu özellik betonda puzolanik aktiviteyi etkileyen parametrelerden biridir. Örnekler üzerinde yapılan değerlendirmelerde optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harçlarında optimize edilmemişlere göre dayanım ve dayanıklılığın daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi en yüksek kompasiteyi elde edecek en uygun uçucu kül tane boyut dağılımı açısından tasarımlar yapılmış ve kompasiteye bağlı olarak dayanım ve dayanıklılığın arttığı görülmüştür. Ayrıca uçucu küllerin sınıfına da bağlı olarak F sınıfı uçucu külün ortamda serbest kirecin açığa çıkması ile puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi durumunun ileriki yaşlarda olması ve buna bağlı olarak da dayanımların ileriki yaşlarda artması belirlenen sonuçlar arasındadır. F sınıfı uçucu külün uzun dönemde C sınıfı uçucu küle göre, dayanım ve dayanıklılık açısından daha kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi C sınıfı uçucu küllerde CaO miktarının %10'dan fazla olması ile reaksiyonun ilk günlerde daha hızlı olması ile açıklanabilir. Bu karşılaştırmalara ek olarak da uçucu külün inceliğinin artması ile reaksiyon hızının arttığı buna bağlı olarak da ilk gün dayanımlarının da referans numunelere göre daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, tane dağılımı optimize edilen UK'ların, daha yüksek hacimde ve boşlukları minimize ederek eğilme ve basınç dayanımlarını ve durabilite özelliklerini geliştirdiği açıkça görülmektedir. Bir atık olan UK kullanımının optimizasyon ile birlikte daha fazla olacağı açıktır. Bunun en önemli faydası çimento kullanımı azalacak ve ekonomik bir beton elde edilmiş olacaktır. Ayrıca, çevreyi kirleten karbondioksit (CO₂) miktarındaki artış, çimentonun daha az kullanılmasıyla azalacaktır. En önemlisi doğal kaynakların korunması ve ülke ekonomisine büyük oranlarda katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışmada ışığında öneri olarak ultra ince birden fazla puzolanik malzemeler hibrit olarak kullanılarak mekanik ve durabilite özellikleri incelenebilir. Özellikle 5 mikron altı puzolan malzeme elenerek elde etme güçlülüğü göz önüne alındığında 0.1-0.2 mikron aralığında silis dumanı ile 1 mikron üstü uçucu kül ve yüksek fırın cüruf gibi endüstriyel

atıkların kullanımı elde edilen ultra ince malzemelerin kullanarak hibrit yapı malzemelerinin kullanımı önerilebilir.



6. KAYNAKLAR

- [1] Garboczi E.J., Computation materials science of cement-based materials. *Mater Struc*, 26:191–5, 1993.
- [2] Mindess S, Young JF., Concrete. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall Inc 1981.
- [3] Bilodeau A., Sivasundaram V., Painter K.E., Malhotra V.M. 1994. Durability of concrete incorporating high volumes of fly ash from sources in U.S., *ACI Mater. J.* 91, 3–12, 1994.
- [4] Alasali M.M., Malhotra V.M. “Role of structural concrete incorporating high volumes of fly ash in controlling expansion due to alkali-aggregate reaction”, *ACI Mater. J.* 88, 159–163, 1991.
- [5] Lee S.H., Sakai E., Daimon M., Bang W.K. “Characterization of fly ash directly collected from electrostatic precipitator” *Cem. Concr. Res.* 29(11). 1791-1797, 1999.
- [6] Liv S., Cooke R.A., Wang L., Ma F., Bhattarai R. “Characterization of fly ash ceramic pellet for phosphorus removal” *J. Environ. Manage.* 189. 67-74, 2017.
- [7] Bernard 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, *Mater. Struct.* 50(1), 26, 2017.
- [8] Mármol G., Savastano H., Monzó J.M., Borrachero M.V., Soriano L., Payá J. 2016. “Portland cement, gypsum and fly ash binder systems characterization for lignocellulosic fiber-cement” *Constr. Build. Mater.* 124, 208-218, 2016.
- [9] Aruntaş H.Y., “ Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli” *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* Vol 21, No 1, 193-203, 2006.
- [10] 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.

- [11] Şahmaran M., Yıldırım G., Erdem T.K., Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Compos.* 35(1), 89-101, 2013.
- [12] Yıldırım G., Sahmaran M., Ahmed H.U., “Influence of hydrated lime addition on the self-healing capability of high-volume fly ash incorporated cementitious composites” *J. Mater. Civ. Eng.* 27(6), 1-11, 2014.
- [13] Şahmaran M., Yıldırım G., Noori R., Ozbay E., Lachemi M., “Repeatability and pervasiveness of self-healing in engineered cementitious composites” *ACI Mater. J.* 112(4), 513-522, 2015.
- [14] Yıldırım G., Sahmaran M., Balcikanli M., Ozbay E., Lachemi M., “Influence of cracking and healing on the gas permeability of cementitious composites” *Constr. Build. Mater.* 85, 217-226, 2015.
- [15] Yeşilmen S., Al-Najjar Y., Balav M.H., Şahmaran M., Yıldırım G., Lachemi M., “Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites” *Cem. Concr. Res.* 76, 170-179, 2015.
- [16] Lane, R.O., Best, J .F., “Properties and Use of Fly Ash in Cement Concrete” *Concrete International*, V.4, No.7, pp.81-92, 1982.
- [17] Shaikh F.U., Supit S.W., “Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA)” *Constr. Build. Mater.* 82, 192-205, 2015.
- [18] Shaikh F.U., “Effect of ultrafine fly ash on the properties of concretes containing construction and demolition wastes as coarse aggregates”, *Struct. Concr.* 17(1), 116-122, 2016.
- [19] 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” *Cem. Concr. Res.* 29(10), 1663-1671, 1999.

- [20] Aiqin W., Chengzhi Z., Ningsheng Z., “The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement”, *Cem. Concr. Res.* 29(11) 1721-1726, 1999.
- [21] 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” *J. Am. Ceram. Soc.* 84(1), 129-135, 2001.
- [22] Slanička S., “The influence of fly ash fineness on the strength of concrete” *Cem. Concr. Res.* 21(2-3), 285-296, 1991.
- [23] Monzo J., Paya J., Peris-Mora E., “A preliminary study of fly ash granulometric influence on mortar strength” *Cem. Concr. Res.* 24(4), 791-796, 1994.
- [24] Erdoğan K., Türker P., “Effects of fly ash particle size on strength of Portland cement fly ash mortars” *Cem. Concr. Res.* 28(9), 1217-1222, 1998.
- [25] 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” *Cem. Concr. Res.* 33(5), 763-768, 2003.
- [26] 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.
- [27] Bentz D.P., Hansen A.S., Guynn J.M., “Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes” *Cem. Concr. Compos.* 33(8), 824-831, 2011.
- [28] Sevim O., Demir I., “Optimization of fly ash particle size distribution for cementitious systems with high compactness” *Constr. Build. Mater.* 195, 104-114, 2019.
- [29] Sevim O., Demir I., “Physical and permeability properties of cementitious mortars having fly ash with optimized particle size distribution” *Cem. Concr. Compos.* 96, 266-273, 2019.

- [30] Feret, R., “Sur la compacité des mortiers hydrauliques” Annales des Ponts et Chaussees. Vol.4(7), 5-161 (in French), 1892.
- [31] Fuller, W.B. and Thompson, S.E., “The laws of proportioning concrete.” ASCE J. Transport., Vol. 59, pp. 67-143, 1907.
- [32] Zhao J., Wang D., Yan P., “Design and experimental study of a ternary blended cement containing high volume steel slag and blast-furnace slag based on Fuller distribution model” Constr. Build. Mater. 140, 248-256, 2017.
- [33] Corominas-Gonzalez A., Etxeberria M., Poon C.S., “Influence of steam curing on the pore structures and mechanical properties of fly-ash high performance concrete prepared with recycled aggregates” Cem. Concr. Compos. 71, 77-84, 2016.
- [34] Ye H., Gao X., Wang R., Wang H., “Relationship among particle characteristic, water film thickness and flowability of fresh paste containing different mineral admixtures” Constr. Build. Mater. 153, 193-201, 2017.
- [35] Kovářik T., Rieger D., Kadlec J., Křenek T., Kullová L., Pola M., Belsky P., France P., Říha J. 2017. “Thermomechanical properties of particle-reinforced geopolymer composite with various aggregate gradation of fine ceramic filler” Constr. Build. Mater. 143, 599-606, 2017.
- [36] ASTM, C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Rawor Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Annual book of ASTM Standards, New York, 141-148, 1994.
- [37] ASTM, C125, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. ASTM Standards, New York, 64-65, 1994.
- [38] Massazza, F., Pozzolanic Cements. Cement and Concrete Composites, 15, 185-214, 1993.
- [39] Haque, M., Langan, B., Ward, M., High Fly Ash Concretes. ACI Materials Journal, 81,54-60, 1984.

- [40] Malhotra, V., Durability of Concrete Incorporating High-Volume of Low-Calcium (ASTM class F) Fly Ash. *Cement and Concrete Composites*, 12, 271–277, 1990.
- [41] 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.
- [42] Malhotra V.M., Mehta P.K., Pozzolanic and cementitious materials. *Advances in concrete technology*, Ottawa: Gordon and Breach Publishers, 1996.
- [43] Mehta P.K., Monteiro P.J.M., *Concrete – microstructure properties and materials*. 3rd ed. McGraw-Hill, 2006.
- [44] Mehta, P.K., Pozzolanic and Cementitious by-Products as Mineral Admixtures for Concrete: A Critical Review, The use of flyash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete. American Concrete Institute special publication, Detroit, 1983.
- [45] TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, 2012.
- [46] Erdoğan, T.Y., *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim, Ankara, 2003.
- [47] 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.
- [48] Neville, A.M., *Properties of Concrete*. Longman Scientific and Technical, New York, 1981.
- [49] TS EN 450, Uçucu kül, betonda kullanılan tarifler, özellikler ve kalite Referansı. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1998.

- [50] TMMOB Makina Mühendisleri Odası Oda Raporu, Türkiye’de Termik Termik Santraller. Ankara, 2017.
- [51] Tokyay, M., Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi). End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Semp., 29-36, 18-19 Kasım, Ankara, 1993.
- [52] McCarthy, M.J., Dhir, R.K., Towards Maximising the Use of Fly Ash as a Binder. Fuel, 78, 2, 121-132, 1999.
- [53] Li, S., Cooke, R. A., Wang, L., Ma, F., Bhattarai, R., Characterization of fly ash ceramic pellet for phosphorusremoval. Journal of Environmental Management, 189, 67-74, 2017.
- [54] Bernal, S. A., Juenger, M. C., Ke, X., Matthes, W., Lothenbach, B., De Belie, N., Provis, J. L., Characterization of supplementary cementitious materials bythermal analysis. Materials and Structures, 50(1), 26, 2017.
- [55] Mármol, G., Savastano, H., Monzó, J. M., Borrachero, M. V., Soriano, L., Payá, J., Portland cement, gypsum and fly ash binder systems character ization forlignocellulosic fiber-cement. Construction and Building Materials, 124, 208-218. 2016.
- [56] ASTM, C 618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Rawor Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Annual book of ASTM Standards, New York, 141-148, 1994.
- [57] TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, 2002.
- [58] ASTM C 618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, No. 04.02, 2000.

- [59] Wang, W., Lu, C., Yuan, G., Zhang, Y., Effects of pore water saturation on the mechanical properties of flyash concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 54-63, 2017.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] Gluth, G. J., Rickard, W. D., Werner, S., Pirskawetz, S., Acoustic emission and microstructural changes in fly ash geopolymer concrete exposed to simulated fire. *Materials and Structures*, 49(12), 5243-5254, 2016.
- [63] Zhao, Q., He, X., Zhang, J., Jiang, J., Long-term curing effect on performance of carbonation resistance of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 577-587, 2016.
- [64] Zhao, Q., He, X., Zhang, J., Jiang, J., Long-term curing effect on performance of carbonation resistance of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 577-587, 2016.
- [65] 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.
- [66] Chousidis, N., Ioannou, I., Rakanta, E., Koutsodontis, C., Batis, G., Effect of fly ash chemical composition on the rate of cement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes. *Construction and Building Materials*, 126, 86-97, 2016.
- [67] 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.

- [68] Dąbrowski, M., Glinicki, M. A., Gibas, K., Józwiak-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.
- [69] Zhang, D., Cai, X., Shao, Y., Carbonation curing of precast fly ash concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(11), 2016.
- [70] 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.
- [71] Shabab, M. E., Shahzada, K., Gençtürk, 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.
- [72] Zhang, G., Li, G., Effects of mineral admixtures and additional gypsum on the expansion performance of sulphoaluminate expansive agent at simulation of mass concrete environment. *Construction and Building Materials*, 113, 970-978, 2016.
- [73] Kim, S. J., Yang, K. H., Moon, G. D., Hydration characteristics of low-heat cement substituted by fly ash and lime stone powder. *Materials*, 8(9), 5847-5861, 2015.
- [74] 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*, pp. 1410-1419, 2015.
- [75] 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*, p. 268, IOS Press, 2014.
- [76] Atakay, O., Uçucu küllerin katkılı çimento üretiminde kullanılması-tane inceliği ve katkı miktarının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2006.

- [77] Demir, İ., (Proje yürütücüsü), Uçucu Külün Yapı Tuğlası Üretiminde Kullanımının Araştırılması, (TUBİTAK: Proje no: 106M002).
- [78] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A., Uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 2003.
- [79] Thipse, S.S., Schoenitz, M. and Dreizin, E.L., Morphology and Composition of the Fly Ash Particles Produced in Incineration of Municipal Solid Waste”, Fuel Processing Technology, 75: 173-184, 2002.
- [80] Seames, W.S., An Initial Study of the Fine Fragmentation Fly Ash Particle Mode Generated during Pulverized Coal Combustion, Fuel Processing Technology, 81: 109-125, 2003.
- [81] 19. Gikunoo, E., Effect of Fly Ash Particles on the Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium Casting Alloy A534, Master of Science, University of Saskatchewan, The College of Graduate Studies and Research, Saskatchewan, Canada, 2004.
- [82] Türker, P., Erdoğan, B., Kantaş, F., Yeğinobalı, A., Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ankara 2009.
- [83] Matsunaga, T., Kim, J.K., Hardcastle, S., Rohatgi, P.K., Crystallinity and Selected Properties of Fly Ash Particles, Materials Science & Engineering: 333-343, 2002.
- [84] TS EN 450, Uçucu kül, betonda kullanılan tarifler, özellikler ve kalite kontrolü, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1998.
- [85] Teixeira, E.R. Mateus, R., Camõesa, A. F., Bragança, L., Branco, F.G., “Comparative Environmental Life-Cycle Analysis of Concretes Using Biomass and Coal Fly Ashes as Partial Cement Replacement Material”, Journal of Cleaner Production, 112, 2221-2230, 2016.
- [86] Kurama H., Kaya M., “Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture” Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 9, Pages 1922-1928, 2008.

- [87] Şahbaz O., Öteyaka B., Kelebek Ş., Uçar A., Demir U., “Separation of unburned carbonaceous matter in bottom ash using Jameson cell” Separation and Purification Technology, Volume 62, Issue 1, Pages 103-109, 2008.
- [88] Akakın, T., Kılınç, C., Işık, A., Zengin, H., Sayfa 1-13. “Hazır Beton Sektörü ve Beton Kullanımındaki Gelişmeler” Beton 2013 Hazır Beton Kongresi-Prof. Dr. Süheyl Akman Onuruna. İstanbul, 2013.
- [89] Mehta, P. K., “Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development”, Concrete International, 24(7), 23–7, 2002.
- [90] Martin, N., Worrell, E., Price, L., Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the U.S. cement industry. Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division, 1999.
- [91] Adesina, A., & Awoyera, P., “Overview of trends in the application of waste materials in self-compacting concrete production”. SN Applied Sciences, 1(9), 962, 2019.
- [92] Saifali S., Akhil R., Lakshmipathi S., Sheikh A. “Construction of A Building Using Fly Ash Concrete” International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Volume 8, Issue 4, pp. 1809–1814, 2017
- [93] Wu, Z. “Development of High- Performance Blended Cements” Doktora tezi, The University of Wisconsin-Milwaukee, 198, 2000.
- [94] ASTM C618, Standart specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, Annual Book of ASTM Standarts.
- [95] Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Koç, İ., Tarhan, M., Erenoğlu, T. 2007. “Doğal ve Endüstriyel Mineral Katkılar İçeren Betonların Tasarımı, Mekanik Özellikleri ve Durabilitesi” 7. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, Sf. 291-300, 2007.

- [96] Feret, R., Sur la compacité des mortiers hydrauliques. Annales des Ponts et Chaussées, Vol. 4, pp. 5-16, 1892.
- [97] 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.
- [98] Johansen, V., Andersen, P.J., (1991) Particle Packing and Concrete Properties. In: Skalny, J. and Mindess, S. (eds). Materials science of concrete 2, Westerville: American Ceramic Society, 1991.
- [99] Fuller, W.B., Thompson, S.E., The laws of proportioning concrete. ASCE J. Transport., Vol. 59, pp. 67-143, 1907.
- [100] 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, Vol. 50 (3), pp. 217-228, 1930.
- [101] Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A ve Öztürk, A, U. “Beton”, 2012, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, ISBN: 978-975-441-361-8, İzmir, 2012,
- [102] American Coal Ash Association, Fly Ash Facts for Highway Engineers, Federal Highway Administration, 2003.
- [103] Mora, E.P., Paya, J. ve Monzo, J. 1993, Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars, Cement and Concrete Research, Vol.23, pp.917-924, USA. , 1993,
- [104] Chandra, S., 1997, Waste materials used in concrete manufacturing, Division of concrete structures, Chalmers University of Technology, ISBN 0-8155-1393-3, USA, 1997.
- [105] Mueller, F. V., Wallevik O. H., Khayat K. H., “Linking solid particle packing of Eco-SCC to material performance”, Cement & Concrete Composites, 54, 117–125, 2014.

- [106] Wang, X., Wang K., Taylor P., Morcous G., “Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method”, *Construction and Building Materials*, 70, 439–452, 2014.
- [107] Yu, R., Spiesz P. , Brouwers H.J.H., “Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses”, *Cement & Concrete Composites*, 55, 383–394, 2015.
- [108] Yu, R., Spiesz P. , Brouwers H.J.H. “Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres”, *Construction and Building Materials*, 79, 273–282, 2015.
- [109] Sevim, Ö., Demir, İ., Optimization of fly ash particle size distribution for cementitious systems with high compactness, *Construction and Building Materials*, 195, 104-114, 2019.
- [110] Sevim, Ö., Demir, İ., Physical and Permeability Properties of Cementitious Mortars Having Fly Ash with Optimized Particle Size Distribution, *Cement and Concrete Composites*, 96, 266-273, 2019.
- [111] D.P. Bentz, A.S. Hansen, J.M. Guynn, Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes, *Cement Concr. Compos.* 33 (8) 824–831, 2011.
- [112] D.P. Bentz, C.F. Ferraris, J.J. Filliben, Optimization of Particle Sizes in High Volume Fly Ash Blended Cements, Department of Commerce, Washington DC, 2011.
- [113] Crow, R.D., and Dunstan, E.R. “Properties of fly ash concrete”, *Proceedings, Symposium on Fly Ash Incorporation in Hydrated Cement Systems*; Editor, Sidney Diamond; Materials Research Society; Boston; pp.214-225; 1981.
- [114] Dhir, R. K., Jones, M. R., “Development of Chloride-Resisting Concrete Using Fly Ash” *Fuel*, 78.2, 137-142, 1999.

- [115] Chalee, W., Ausapanit, P., Jaturapitakkul, C., “Utilization of Fly Ash Concrete in Marine Environment for Long Term Design Life Analysis” *Materials & Design*, 31, 1242-1249, 2010.
- [116] Wang, D., Zhou, X., Meng, Y., & Chen, Z. „Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack“ *Construction and Building Materials*, 147, 398-406, 2017.
- [117] Lane, R.O., and Best J.F., Properties and use of fly ash in portland cement concrete; *Concrete International* 4, pp. 81-92, July 1982.
- [118] Yuan, R.L., and Cook , J.E., Study of a class C fly ash concrete; Proceedings, first international conference on the use of fly ash, silica fumes, slag and other mineral by-products in concrete; montebello, Canada; July 31-August 5, Editor, V.M.Malhotra; ACI Special Publication SP-79, pp.307-319, 1983.
- [119] Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Sönmez, R., Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği, İMO Bülten, Sayı:77, 2005.
- [120] Mangat, P. S. and Khatib, J. M., Influence of fly ash, silica fume and slag on sulfate resistance of concrete, *ACI Materials Journal*, 92, pp. 542-552, 1995.
- [121] Tkalcsy, P. J. and Carrasquillo, R. L., Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, 89, pp. 69-75, 1992.
- [122] Fijestol, P., Durability of silica fume and fly ash concretes exposed to organic acids, Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, pp.459-485, 1989.
- [123] Saha, A. K., Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 28(1), 25-31, 2018.

- [124] Moghaddam, F., Sirivivatnanon, V., & Vessalas, K. The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00218, 2019.
- [125] Çil, İ., Betonarme Donatısında Elektriksel Yöntemlerle Korozyon Ölçümü, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt:8, Sayı:1,ss.59-63, 2006.
- [126] Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., Betonarme yapılarda kalıcılık, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, 282 s., 2002.
- [127] Aköz, F., Türker, F., Koral, S., Yüzer, N., Effects of sodium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and with out silica fume, *Cement and Concrete Research*, Vol.25, pp.1360-1368, 1995.
- [128] Neville, A.M., The confused world of sulfate attack on concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.1275-1296, 2004.
- [129] Al-Amoudi, O.S.B., Attack on plainand blended cements exposed to aggressive sulfate environments, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24,pp. 305-316, 2002.
- [130] Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y.W., Comparison of the strength and durability performance of normal and high strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol.31,pp.1291-1300, 2001.
- [131] Dhir, R. K., Jones, M. R., Development of Chloride-Resisting Concrete Using Fly Ash, *Fuel*, 78 (1999) 137-142, 1999.
- [132] Chalee, W., Ausapanit, P., Jaturapitakkul, C., Utilization of Fly Ash Concrete in Marine Environment for Long Term Design Life Analysis, *Materials & Design*, 31 (2010) 1242-1249, 2010.
- [133] Chindaprasirt, P., Chotithanorn, C., Cao, H. T., Sirivivatnanon, V., Influence of Fly Ash Fineness on the Chloride Penetration of Concrete, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 356-361, 2007.

- [134] Dal M, Kılınç C, Eren, Işık A. Beton Teknolojisi ve Beton Teknolojisi Laboratuvarı. Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi yayınları, 1.baskı, 164s İstanbul, 2013.
- [135] Bouzoubaa, N., Zhang, M. H., Malhotra, V. M. 2001. “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. Dogan, U. A., Ozkul, M.H., Ekincioglu, O. 2009. “Utilization of waste materials in concrete production for sustainable development”, Environmental Engineering and Management Journal, 8(4), 695-699.
- [136] Lane, R.O., Best, J.F., Properties and Use of Fly Ash in Cement Concrete, Concrete International, V.4, No.7, pp.81-92, 1982.
- [137] Akçaözoğlu, S., Akçaözoğlu, K. and Atiş, C.D., Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)”, Composites: Part B, 45(1), 721-726, 2013.
- [138] Whitehurst, E.A., Soniscope tests concrete structures; Research and development laboratories of the portland cement association, Journal of American Concrete Institute, 47, 433-444, 1951.
- [139] Zoldners, N.G., Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures. ACI publication SP-25, 8, 1-3, 1971.
- [140] Neville, A.M. and Brooks, J.J., Concrete Technology, Longman Scientific and Technical, USA, 1993.
- [141] Jones, R. and Gatfield, E.N., Testing concrete by an ultrasonic pulse technique, H.M. Stationery Office, London, 1955.
- [142] TS EN, T. 196-1, Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength. Turkish Standard Institution, Ankara, 2016.
- [143] ASTM C666 / C666M-15, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

- [144] ASTM C597-16, Betondan Darbe Hızı için Standart Test Yöntemi, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [145] ASTM C1012 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018
- [146] ACI 214R-11., Betonun Dayanım Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi Rehberi. American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü), (2011),



7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet FİLAZİ

Doğum Tarihi : 30.04.1982

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu :

Lisans : Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi 2005

Yüksek Lisans : Mustafa Kemal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği 2008

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

Kırıkkale Üniversitesi Öğretim Görevlisi 2009-Halen

Projelerde Yaptığı Görevler:

Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cüruf İnceliğinin Çimento Harçlarının Mekanik Dayanımlarına Etkisi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Yürütücü: Demir İ., Araştırmacı: Sevim Ö., Araştırmacı: Filazi A., 25.09.2017 - 25.12.2018 (Ulusal)

Yüksek Performanslı Beton Kullanılan Hibrit Kirişlerin Eğilme Davranışı”, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı: Bakırcı Er Ş., Araştırmacı: Filazi A., Araştırmacı: Elmas İ., Yürütücü: Avanoğlu S. E., , 10.05.2016 - 08.12.2018 (Ulusal)

Çimento Harçlarına Etkisi, 1001, Tübitak Projesi, Yürütücü: Demir İ., Bursiyer: Filazi A., Araştırmacı: Yaprak H., 01.11.2017 (Devam Ediyor) (ULUSAL)

Toplum Programları Müdürlüğü, Bilim Toplum, Tübitak Projesi, Yürütücü: Boyacı Ö., Eğitimci: Filazi A., 06.02.2018 - 30.12.2018 (Ulusal)

Hafif Betonlu Hibrit Kirişlerin Eğilme Davranışı, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı: Filazi A., Yürütücü: Bakırcı E. Ş., Araştırmacı: Avanoğlu S. E., 10.05.2016 -2018 (Ulusal)

Yayınları (SCI) :

Över S., Büyüksaraç A., Bektaş Ö., Filazi A. (2011). Assessment of potential seismic hazard and site effect in Antakya Hatay Province SE Turkey. Environmental Earth Sciences, 62(2), 313-326., Doi: 10.1007/s12665-010-0525-3 (Yayın No: 1515273)

Yayınları (Diğer) :

Demir İ., Güzelküçük S., Sevim Ö., Filazi A., Şengül Ç. (2018). Microstructural Evaluation of Cement Mortars with Blast Furnace Slag Exposed to Sulfate Attack. International Scientific and Vocational Studies Journal, 2(1), 8-18. (Yayın No: 4352962)

Filazi A., Sevim Ö., Toprak B. (2018). The Effect of Waste Granite Mud Substituted on Cement Mortars. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, 5(2), 37-39. (Yayın No: 4352880)

Sevim Ö., Demir İ., Filazi A., Güzelküçük S., Şengül Ç. (2018). Examination of Microstructure of Fly Ash in Cement Mortar. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, 5(1), 49-51. (Yayın No: 4219256)

Sevim Ö., Filazi A., Toprak B., Kartal S.(2017). 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., Doi: 10.22161/ijaers.4.2.19 (Yayın No: 3438989)

Yayınları (Diğer) :

Demir İ., Filazi A. (2019). Effect Of Mechanical Properties Of F-Class Fly Ash Cement Mortars With Particle Size Distribution. 4th International Sustainable Buildings Symposium (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5208366)

Güzelküçük S., Demir İ., Filazi A., Sevim Ö. (2019). Kompoze Taban Külü ve Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Dayanım ve Dayanıklılığının

İncelenmesi, International Conference on Innovation. Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering, (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5208299)

Güzelküçük S., Demir İ., Filazi A., Sevim Ö. (2019). Kompoze Taban Külü ve Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi. International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering, (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5208318)

Güzelküçük S., Demir İ., Filazi A., Sevim Ö. (2019). Kompoze Taban Külü ve Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi. International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5132465)

Över S., Büyüksaraç A., Bektaş Ö., Filazi A. (2019). Antakya Kent Merkezinde Sismik Mikro Bölgeleme Çalışması. International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5134396)

Güzelküçük S., Demir İ., Filazi A., Sevim Ö. (2019). Kompoze Taban Külü ve Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi. International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5132466)

Demir İ., Sivrikaya B., Sevim Ö., Filazi A., Güzelküçük S. (2019). Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metoduna Göre Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Uçucu Külün Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi. 10. Uluslararası Beton Sempozyumu, (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5208283)

Demir İ., Sivrikaya B., Sevim Ö., Filazi A., Güzelküçük S. (2019). Effect of Fly Ash Having Optimized Particle Size Distribution on Alkali Silica Reaction Accordingto Accelerated Mortar Bar Test Method. 10. International Concrete

Congress-Recent Advances in Concrete Technology, 585-591. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5041681)

Filazi A., Demir İ., Güzelküçük S. (2019). Mechanical Effect of Blast Furnace Slag Substitution on Different Cement Types. 4. International Conference on Civil, Environmental, Geology and Mining Engineering (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5072077)

Filazi A., Demir İ., Güzelküçük S., Sevim Ö. (2019). Mechanical Effect Of Blast Furnace Slag Substitution On Different Cement Types. 4th International Conference on Civil Environmental, Geology and Mining Engineering (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5007644)

Filazi A., Demir İ., Güzelküçük S., Sevim Ö. (2019). Mechanical Effect Of Fly Ash Substitution On Different Cement Types. 4th International Conference on Civil Environmental, Geology and Mining Engineering (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5007647)

Demir İ., Sivrikaya B., Filazi A., Yaprak H. (2019). Comparison of Short and Long Termed ASR Test Methods in Grain Dispersion Optimized Blast Furnace Slag Mortar Bars. International Congress on Engineering and Life Science, (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5208260)

Demir İ., Filazi A., Sevim Ö., Güzelküçük S. (2019). F Sınıfı Uçucu Kül İkameli Çimento Harcının Mekanik Özelliklerine Etkisi. International Agean Symposium On Innovative Interdisciplinary Scientific Researches, 140-147. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4989598)

Demir İ., Filazi A., Sevim Ö., Güzelküçük S. (2019). C Sınıfı Uçucu Kül İkameli Çimento Harcının Mekanik Özelliklerine Etkisi. International Agean Symposium On Innovative Interdisciplinary Scientific Researches, 148-155. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4989599)

Bakırcı E. Ş., Avanoğlu S. E., Filazi A. (2018). Hafif Betonlu Karbon (Cfrp) Ve Çelik Donatılı Hibrit Kirişlerin Eğilme Davranışı. II. International scientific and

Vocationalstudies Congress (Bilmes 2018) (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4388367)

Avanoğlu S. E., Bakırcı E. Ş., Filazi A. (2018). Yüksek Dayanımlı Betonlu Hibrit (Karbon ve Çelik) Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışı. II. International Scientific and Vocationalstudies Congress (Bilmes 2018) (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4388359)

Demir İ., Sivrikaya B., Sevim Ö., Filazi A. (2018). The Effect of Blast Furnace Slag on Alkali-Silica Reaction. International Congress on Engineering and Life Science (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4264922)

Demir İ., Sivrikaya B., Sevim Ö., Filazi A. (2018). The Effect of Çatalağzı Fly Ash on Alkali-Silica Reaction. International Congress on Engineering and Life Science (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4264916)

Filazi A., Sevim Ö., Toprak B. (2018). The Effect of Waste Granite Mud Substituted on Cement Mortars. International Conference on Innovative Engineering Technologies, 1(1), 7-9. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4202733)

Demir İ., Sevim Ö., Toprak B., Filazi A. (2017). Comparison of the Mechanical Strength of Fly Ash and Blast Furnace Slag Fineness. I. International Scientific and Vocational Studies Congress (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3881410)

Demir İ., Sevim Ö., Toprak B., Filazi A. (2017). Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu İnceliğinin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması. I. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi (BILMES 2017) (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3522632)

Demir İ., Filazi A., Sevim Ö., Kalkan İ., Güzelküçük S., Kartal S. (2017). The Effect of Mechanical Strength of Blast Furnace Slag Fineness. 2nd International Conference On Cıvıl And Environmental Engineering, 835 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3509492)

Bakırcı E. Ş., Avanoğlu Sıcacık E., Filazi A. (2017). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with LightweightConcrete. 2nd International Conference On

Civil And Environmental Engineering (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3513827)

Demir İ., Filazi A., Sevim Ö., Güzelküçük S. (2017). The Effect of Mechanical Strength of Red Mud. 2nd International Conference On Cıvıl And Environmental Engineering, 838 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3509503)

Demir İ., Filazi A., Sevim Ö., Güzelküçük S. (2017). The Effect of Mechanical Strength of Ground Fly Ash Fineness. 2nd International Conference On Cıvıl And Environmental Engineering, 837 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3509500)

Demir İlhami, Sevim Ö., Kalkan İ., Filazi A., Güzelküçük S., Kartal S. (2017). The Effect of Mechanical Strength of Fly Ash Fineness. 2nd International Conference On Cıvıl And Environmental Engineering, 836 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3509493)

Demir İ., Güzelküçük S., Yaprak H., Filazi A. (2016). Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Kompoze Çimento Harçlarına Mekanik Etkisi. 8. International Aggregates Symposium (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2891470)

Demir İ., Sevim Ö., Filazi A. (2015). Concrete Quality In Existing ReinforcedConcrete Structures In Ankara. ICESA 2015 International Civil Engineering&Arcitecture Symposium for Academicians (Özet Bildiri/)(Yayın No:1515278)

Araştırma Alanları : Yapı Malzemeleri, Geopolimerler, Puzolanlar, Durabilite.