T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TANE DAĞILIMI OPTİMİZE EDİLMİŞ PUZOLANLARIN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİSİ

BURAK SİVRİKAYA

EKİM 2018

İnşaat Anabilim Dalında Burak SİVRİKAYA tarafından hazırlanan TANE DAĞILIMI OPTİMİZE EDİLMİŞ PUZOLANLARIN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİSİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN
Anabilim Dalı Başkanı

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

Prof. Dr. İlhami DEMİR
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan	: Doç. Dr. Ahmet BEYCİOĞLU	_____
Üye (Danışman)	: Prof. Dr. İlhami DEMİR	_____
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Murat GÖKÇE	_____

……/…../…….

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

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür

ÖZET

TANE DAĞILIMI OPTİMİZE EDİLMİŞ PUZOLANLARIN
ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA ETKİSİ

SİVRİKAYA, Burak
Kırıkkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Prof. Dr. İlhami DEMİR
Ekim 2018, 82 sayfa

İnşaat sektöründe oldukça önemli bir yere sahip olan beton, çevresel ve kimyasal etmenlerden dolayı zamanla deforme olmaktadır. Bu kimyasal etmenlerden biriside Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)' dur.

Alkali silika reaksiyonu, çimentoda bulunan alkali oksitler ve agrega içerisindeki reaktif silisin yeterli nem miktarında kimyasal tepkimeye girerek alkali silika jeli oluşturmasıyla başlar. Yüksek su emme özelliğine sahip bu jeller, zaman içerisinde çok fazla su absorbe ederek hacimsel olarak büyür ve betonun içsel gerilmesini artırarak betonda kılcal çatlaklar oluşmasına yol açar. Bu çatlaklar betonu ve içerisindeki donatıyı çevresel faktörlere (iklim değişikliği, donma çözülme vs. gibi) mâruz bırakarak servis ömrünün kısalmasına yol açmaktadır.
Bu çalışmada, tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu (YFC) ve F sınıfı uçucu külün (UK) alkali silika reaksiyonuna (ASR) etkisi incelenmiştir.

Çimento malzemesi yerine, Çatalağzı Termik Santralinden alınan uçucu kül ve Zonguldak Ereğli Demir Çelik Fabrikası atığı olan yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Agrega olarak ise, aktif silis içeriği çeşitli çalışmalarla belirlenen İzmir Gediz bölgesine ait dere agregası kullanılmıştır.

Bu çalışmada; çimento yerine % 5, % 10, % 15, % 20 oranlarında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikame edilerek, farklı numunelere aynı oranlarda tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikame edilerek alkali silika reaksiyonu etkisi araştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışma sonucunda, tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ve uçucu küle göre alkali silika reaksiyonunu azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : alkali silika reaksiyonu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, tane dağılım optimizasyonu.

ABSTRACT

EFFECT OF OPTIMIZED PARTICLE SIZE DISTRIBUTION
OF PUZZOLANS ON ALKALI SILIKA REACTION

SİVRİKAYA, Burak
Kırıkkale University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Deparment of Civil Engineering, M. Sc. Thesis
Supervisor : Prof. Dr. İlhami DEMİR
October 2018, 82 Pages

Concrete, which has a very important place in the construction sector, is deformed over time due to environmental and chemical factors. One of these chemical factors is Alkali Silica Reaction.

The alkaline silica reaction begins by reacting the alkali oxides in the cement and the reactive silica in the aggregate by reacting the chemical amount with sufficient moisture to form alkali silica gel. These gels, which have high water absorption properties, grow volumically by absorbing a lot of water over time and increase the internal tension of the concrete, causing the formation of capillary cracks in the concrete. These cracks lead to shortening of the service life of the concrete and its equipment by environmental factors (climate change, freezing, thawing etc.).

In this study, the effect of grain distribution optimized blast furnace slag and F class fly ash on the alkali silica reaction was investigated.

Instead of cement material, blast furnace slag with waste ash from Çatalağzı Thermal Power Plant and Zonguldak Ereğli Iron and Steel Plant waste was used. Aggregate aggregates of Izmir Gediz region, which are determined by various studies, were used as aggregate.

In this study; instead of cement, 5%, 10%, 15%, 20% of blast furnace slag and fly ash were replaced by different blast furnace slag and fly ash.

As a result of the experimental study, the distribution of grain distribution optimized fly ash and blast furnace slag has been found to be more effective in reducing the alkali silica reaction compared to un-optimized blast furnace slag and fly ash.

Key Words: alkali silica reaction, fly ash, blast furnace slag, grain distribution optimization.

TEŞEKKÜR

İlk olarak beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan maddi manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim annem Gülsen SİVRİKAYA'ya, babam Abidin SİVRİKAYA'ya ve ablam Merve SİVRİKAYA'ya ve ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca maddi manevi her türlü desteklerini esirgemeyen benim için bir abi olan Hakan KILIÇ'a ve teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince ilgisini ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, tez çalışması için gerekli olan cihaz ve malzemelerin temininde, karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında bana yol gösterici benim için çok değerli olan, Kırıkkale Üniversitesi'nde öğrencilik hayatım boyunca desteklerini hep hissettiğim saygıdeğer danışman hocam Sayın Prof. Dr. İlhami DEMİR'e sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince desteklerini ve laboratuvar konusunda yardımlarını esirgemeyen çok saygıdeğer hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Osman ŞİMŞEK ve Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na, ayrıca her konuda yardımlarını esirgemeyen Dr. Özer SEVİM'e teşekkürü borç bilirim.

Son olarak yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Ahmet BEYCİOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Murat GÖKÇE'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET i

ABSTRACT ii

TEŞEKKÜR v

İÇİNDEKİLER DİZİNİ vi

ÇİZELGELER DİZİNİ vii

ŞEKİLLER DİZİNİ viii

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ xi

1. GİRİŞ 1

2. MATERYAL VE YÖNTEM 6

2.1. Materyal 7

2.1.1. Agrega Özellikleri 9

2.1.2. Çimento Özellikleri 10

2.1.3. Uçucu Kül Özellikleri 11

2.1.4. Yüksek Fırın Cürufu Özellikleri 13

2.2. Yöntem 14

2.2.1. ASTM C 1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Metodu 15

2.2.2. ASTM C 227 Standart Harç Çubuğu Deney Metodu 16

2.2.3. Elektron Tarayıcı Mikroskop (SEM) İle Mikro Yapı İncelemesi 17

3. ARAŞTIRMA BULGULARI 18

3.1. Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül İkamesinin Alkali Silika Reaksiyonuna etkisi 18

3.1.1. ASTM C 1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçlarının İrdelenmesi 18

3.1.2. ASTM C 227 Standart Harç Çubuğu Deney Sonuçlarının İrdelenmesi 31

3.2. ASR Etkisinde YFC ve UK İkameli Harç Çubuklarının Mikro Yapısal Özellikleri 48

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 76

KAYNAKLAR 78

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE Sayfa

2.1. İzmir Gediz bölgesine ait agrega XRF test sonuçları 9
2.2. Elek tane boy analizi 9
2.3. CEM I 42,5 R portland çimentosu kimyasal özellikleri 10
2.4. Uçucu kül tane optimizasyonu için gerekli elenmiş uçucu kül miktarları 12
2.5. Uçucu külün kimyasal analiz tablosu 12
2.6. Yüksek fırın cürufu tane optimizasyonu için gerekli elenmiş yüksek fırın cürufu miktarları 14
2.7. Yüksek fırın cürufu kimyasal analizi 14
2.8. ASTM C 1260 ve ASTM C 227 deney metotları karşılaştırılması 15
3.1. ASTM C 1260 boy uzama değerleri tablosu 30
3.2. Tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarının boy uzama oranları (%) 34
3.3. Tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarının boy uzama oranları (%) 36
3.4. Tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarının boy uzama oranları (%) 39
3.5. Tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarının boy uzama oranları (%) 42

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL Sayfa

1.1. Alkali – Silika reaksiyonu nedeniyle betonun bozulma mekanizması ve çatlak görünümü 2
1.2. Betonda ASR Çatlağı 3
2.1. Hassas terazi 7
2.2. Otomatik mikser 7
2.3. Komparatör 8
2.4. Sarsma tablası 8
2.5. Vakumlu elek seti 8
2.6. Uçucu kül tane dağılım eğrileri 11
2.7. Yüksek fırın cürufu tane dağılım eğrileri 13
3.1. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin boy uzama oranları 19
3.2. Uçucu kül ikameli numunelerin boy uzama oranları 20
3.3. Tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarının boy uzama oranları 22
3.4. Tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubuklarının boy uzama oranları 23
3.5. NYFC ve NUK boy uzama değerleri 24
3.6. OYFC ve OUK boy uzama değerleri 26
3.7. NYFC ve OYFC boy uzama değerleri 27
3.8. NUK ve OUK boy uzama değerleri 29
3.9. ASTM C 1260 boy uzama değerleri 29
3.10. Tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları boy uzama grafiği 33
3.11. Tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları boy uzama grafiği 36
3.12. Tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları boy uzama grafiği 39
3.13. Tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları boy uzama grafiği 41

3.14. Harç çubukları boy uzama oranları grafiği 47
3.15. Şahit numune üzerinde ASR oluşumu kimyasal analizi 49
3.16. Şahit numune SEM görüntüsü x130 büyütme (a), x250 büyütme (b), x500 büyütme (c), x4000 büyütme (d) 50
3.17. % 10 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x250 büyütme (a), x800 büyütme (b), x1600 büyütme (c), x5000 büyütme (d) 51
3.18. NYFC10 kimyasal analizi (a), NYFC10 kimyasal analiz yapılan bölge (b), NYFC10 kimyasal analiz raporu (c) 52
3.19. NYFC10 kimyasal analizi (a), NYFC10 kimyasal analiz yapılan bölge (b), NYFC10 kimyasal analiz raporu (c) 53
3.20. % 20 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x1000 büyütme (a), x1500 büyütme (b), x3000 büyütme (c), x6000 büyütme (d) 54
3.21. NYFC20 kimyasal analizi (a), NYFC20 kimyasal analiz yapılan bölge (b), NYFC20 kimyasal analiz raporu (c) 55
3.22. NYFC20 kimyasal analizi (a), NYFC20 kimyasal analiz yapılan bölge (b), NYFC20 kimyasal analiz raporu (c) 56
3.23. % 10 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x600 büyütme (a), x1300 büyütme (b), x2500 büyütme (c), x5000 büyütme (d) 57
3.24. OYFC10 kimyasal analizi (s), OYFC10 kimyasal analiz yapılan bölge (b), OYFC10 kimyasal analiz raporu (c) 58
3.25. OYFC10 kimyasal analizi (a), OYFC10 kimyasal analiz yapılan bölge (b), OYFC10 kimyasal analiz raporu (c) 59
3.26. % 20 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x2500 büyütme (a), x5000 büyütme (b), x10000 büyütme (c) 60
3.27. OYFC20 kimyasal analizi (a), OYFC20 kimyasal analiz yapılan bölge (b), OYFC20 kimyasal analiz raporu (c) 61
3.28. OYFC20 kimyasal analizi (a), OYFC20 kimyasal analiz yapılan bölge (b), OYFC20 kimyasal analiz raporu (c) 62

3.29. % 10 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x300 büyütme (a), x600 büyütme (b), x1200 büyütme (c) 63
3.30.NUK10 kimyasal analizi (a), NUK10 kimyasal analiz yapılan bölge (b), NUK10 kimyasal analiz raporu (c) 64
3.31. NUK10 kimyasal analizi (a), NUK10 kimyasal analiz yapılan bölge (b), NUK10 kimyasal analiz raporu (c) 65
3.32. % 20 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x1000 büyütme (a), x4000 büyütme (b) 66
3.33. NUK20 kimyasal analizi (a), NUK20 kimyasal analiz yapılan bölge (b), NUK20 kimyasal analiz raporu (c) 67
3.34. NUK20 kimyasal analizi (a), NUK20 kimyasal analiz yapılan bölge (b), NUK20 kimyasal analiz raporu (c) 68
3.35. % 10 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x500 büyütme (a), x2000 büyütme (b), x4000 büyütme (c), x8000 büyütme (d) 69
3.36. OUK10 kimyasal analizi (a), OUK10 kimyasal analiz yapılan bölge (b), OUK10 kimyasal analiz raporu (c) 70
3.37. OUK10 kimyasal analizi (a), OUK10 kimyasal analiz yapılan bölge (b), OUK10 kimyasal analiz raporu (c) 71
3.38. % 20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x300 büyütme (a), x600 büyütme (b), x1200 büyütme (c) 72
3.39. OUK20 kimyasal analizi (a), OUK20 kimyasal analiz yapılan bölge (b), OUK20 kimyasal analiz raporu (c) 73
3.40. OUK20 kimyasal analizi (a), OUK20 kimyasal analiz yapılan bölge (b), OUK20 kimyasal analiz raporu (c) 74

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER DİZİNİ

P(D)	D Açıklıktaki Elekten Geçen Malzeme
D	Elek Açıklığı
Dmaks	Maksimum tane çapı
q	Dağılım Modülü
CaO	Kalsiyum Oksit
CO_2	Karbondioksit
Fe_2O_3	Demir Oksit
K_2O	Potasyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
Na_2O	Sodyum Oksit
SiO_2	Silisyum Oksit
SO_3	Kükürt

KISALTMALAR DİZİNİ

ASR	Alkali Silika Reaksiyonu
ŞN	Şahit (Referans) Numune
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
UK	Uçucu Kül
NYFC	Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş Yüksek Fırın Cürufu
OYFC	Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu
NUK	Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş Uçucu Kül
OUK	Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Uçucu Kül
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
EDX	Enerji Dağılım Spektroskopisi (Energy Dispersive Spectroscopy)

1. GİRİŞ

Beton günümüz yapılarında gerek ekonomik olması gerekse kolay uygulanabilirliği sebebi ile en çok tercih edilen yapı malzemelerindendir. Betonarme yapılarda beton, yapıyı ayakta tutan en önemli etmenlerden biridir. Yapının kullanım ömrünü en üst düzeye çıkarmak için kullanılacağı yerin özellikleri, yapılacak yapının özellikleri göz önünde bulundurularak kullanılacak betonun özelliği seçilmelidir. Beton, yapılarda kullanıldıktan sonra servis ömründe kısalma olmaması için çevresel etmenler ve kimyasal etmenler gibi birçok zararlı faktörden korunmalıdır.

Betonun servis ömrünü kısaltan kimyasal etkiler, çimentonun içeriğindeki kimyasal bileşenler ve agregadaki kimyasallar tepkimeye girerek oluşacağı gibi, beton içerisindeki kimyasallar ve çevredeki kimyasalların tepkimeye girmesiyle de alkali silika reaksiyonu, sülfat etkisi vb. oluşabilir. Çevresel etmenler ise, donma-çözünme, nemden dolayı donatı korozyonu gibi faktörler olabilir.

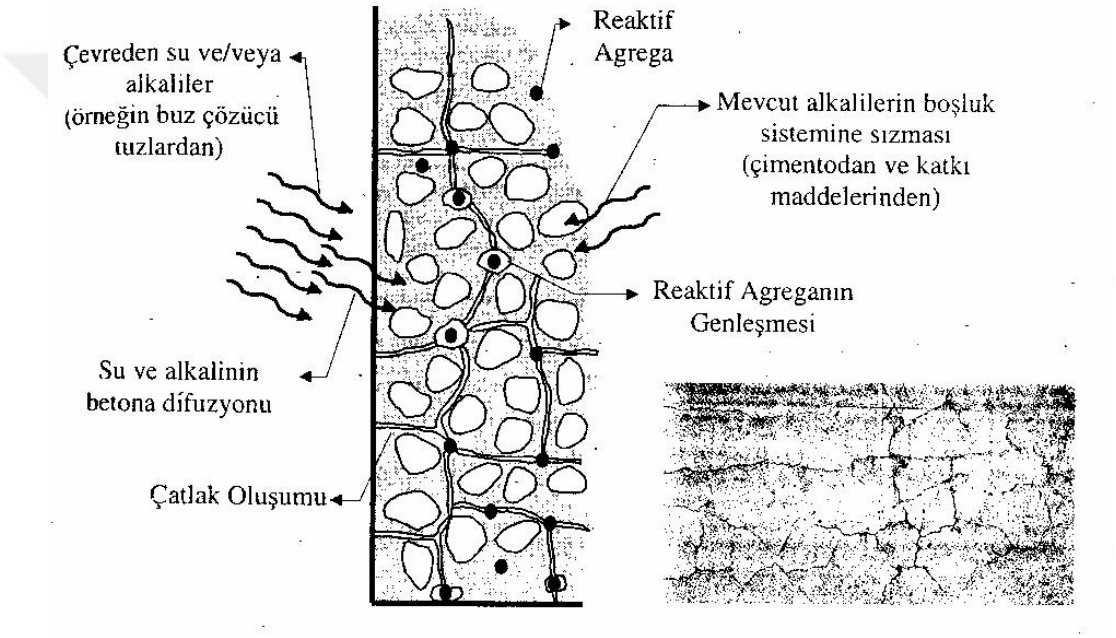
Beton, içerisindeki boşluk oranı azaldıkça dayanımı artan bir malzemedir. Betonda hidratasyon sonucu oluşan ürünler, bu boşlukları doldurmada yeterli olamamakta ve beton dayanımı açısından olumsuz etkiler yapmaktadır. Beton üretiminde minimum boşluk için agrega granüle edilsede, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi ince malzemelerin gradasyonu önemsenmemektedir [1].

1920'li ve 1930'lu yıllarda ABD, Kaliforniya'daki beton yapılarda nedeni belirsiz çatlak oluşumlarına bağlı yıkımlar tespit etmiştir. Beton malzemelerin standartlara uygun olmasına karşılık yapının imalatını takiben birkaç yıl içinde çatlaklar meydana gelmiştir. Bu sorun genellikle harita çatlağı şeklinde görülür. Bazen de çatlaklardan jel çıkışı, betonun patlaması gibi sorunlar da yaşanabilir. Stanton, 1940 yılında çatlamanın kimyasal bir reaksiyondan kaynaklandığını bulmuştur. Bu reaksiyon Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) olarak adlandırılmıştır[2].

ASR, çimentonun içerisindeki alkali oksitler ($Na_2O+0,658\ K_2O$) ve agrega içerisindeki reaktif silis (SiO_2) kimyasal tepkimeye girerek yüksek su emme

kapasitesine sahip alkali silika jeli oluşturması ile başlar. Oluşan bu jeller dış etkenlerde nemli ortamda fazla miktarda su emmesi ile hacim artışına uğrar. Oluşan hacim artışına bağlı olarak betonun içsel gerilmesini artırarak devam eder.

Sıcaklık artışı alkali silika reaksiyonu hızını arttırmaktadır. Agregaların büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaktiflik göstermektedir. Ayrıca sık kuruma-ıslanma tekrarı betonda alkali taşınmasını kolaylaştırmakta ve alkalilerin kuruma bölgelerinde yoğunlaşmasına neden olmaktadır [3].



Şekil 1.1. Alkali-silika reaksiyonu nedeniyle betonun bozulma mekanizması ve tipik çatlak görünümü [4]

Beton ya da çimento için kullanılan toplam alkali içeriği terimi "sodyum oksit eşdeğeri" olarak ifade edilir ve aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır [5].

$Na2_2Oeq = Na_2O + 0{,}658\ K_2O$

Bu gerilmeler sonucunda beton yüzeyinde harita çatlakları oluşur. Oluşan çatlaklardan dolayı beton iklim şartları, donma çözünme etkisi gibi dış etkenlerden

zarar görmeye başlar ve servis ömrü kısalır. Alkali silika reaksiyonu neme bağlı olarak oluşan bir tepkime olduğundan dolayı, oluşan çatlaklar daha çok dere yataklarındaki köprü ayakları, kıyı yapıları gibi yüksek oranda neme maruz kalan bölgelerde gözlemlenir.

- Alkali + Reaktif Silika → Alkali Silika Jel Ürünleri
- Alkali Silika Jel Ürünleri + Rutubet → Genleşme

Yüksek performanslı beton için malzeme tasarımı ve ASR arasındaki ilişki üzerine yapılmış pek çok çalışma vardır. Bu araştırmalarda genel olarak, mineral katkı kullanımı, düşük porozite - su/çimento oranı etkileriyle ASR'ndan oluşan hasarlardan, koruma sağlanabileceği belirtilmiştir [6,7].

Ülkemizde, ASR'nun ilk hasarları, Karayolları 2. Bölge Müdürlüğü köprü mühendislerinin incelemeleri sırasında İzmir yöresindeki birçok köprüde geniş çatlakların gözlenmesi ile ortaya çıkmıştır. 1995 yılında, TC Karayolu Köprülerinin Korunması ve İyileştirilmesi Çalışmaları projesi kapsamında, İzmir bölgesinde hasar gören 5 köprünün (Naldöken, Turgutlu, Buca, Hilal II, Turan) inceleme çalışmaları Japon Jica firmasınca üstlenilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, beton üretiminde kullanılan özellikle Gediz ve Nif nehri yatak ve teraslarındaki doğal kumların içerdiği reaktif silislerin ASR'na yol açtığı anlaşılmıştır [8].



Şekil 1.2. Betonda ASR çatlağı

Betonda tipik bir ASR etkisi Şekil 1.2.'de harita çatlağı şeklinde açıkça görülmektedir. ASR'nun önlenmesi için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Öncelikle reaksiyonun oluşmasına sebep olan faktörler; nem, reaktif silika ve alkalinin bir ya da daha fazlasının ortadan kaldırılması bir önlem olarak düşünülebilir. Mineral ve kimyasal katkı maddeleri ile doğal puzolanlar kullanılarak da reaksiyonun zararları azaltılabilir. Tek başına kullanıldığında herhangi bir bağlayıcı özelliği bulunmayan, çimento ve benzeri bir bağlayıcı ile beraber kullanıldığında bağlayıcı özellik kazanan malzemelere puzolan denir. [9-15].

Uçucu kül, termik santrallerde yakılan kömürden uçan parçaların baca filtrelerinde tutulması ile elde edilen, ana kimyasal bileşenleri SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 olan malzemedir [16].

Yüksek fırın cürufu ise, demir-çelik üretimi esnasında ortaya çıkan atık olup, öğütüldükten sonra puzolanik özellik kazanan malzemedir [17].

Puzolanlar, çimento harcında bulunan kireci tutarak pH derecesini indirger. PH değerinin düşmesi silisin çözünürlüğünü azaltır ve alkali silika jeli oluşumunu önler. Yapılmış bazı çalışmalarda % 30 C sınıfı uçucu kül kullanımı ve % 5 minimum silika tozu kullanımının ASR etkisini azalttığı gözlemlenmiştir ve yüksek fırın cürufununda ASR etkisini tehlikesiz boyutlara düşürebildiği görülmüştür [18-20].

Andiç ve Ramyar, yaptıkları bir çalışmada uçucu kül ve yüksek fırın cürufu inceliğinin alkali silika reaksiyonuna etkisini incelemiştir. Bulunan sonuçlarda, uçucu külün, yüksek fırın cürufuna göre ASR yi azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür [21].

Yıldırım vd., mineral katkıların ASR2ye etkisini inceledikleri çalışmalarında uçucu kül ikameli harç çubuklarında yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarına göre ASR oluşumunun daha az olduğu gözlemlenmiştir. Yaptıkları çalışmada ASTM C 227 ve ASTM C 1260 deney metotlarını kullanmışlardır [22].

Bentz vd. (2011), uçucu kül ikameli çimentoların mekanik dayanımına ilişkin yaptıkları çalışmalarda, %65 oranına kadar uçucu kül ikamesi kullanmışlar ve 28 günlük basınç dayanım testlerinden sonra %20 üzerinde uçucu kül ikame edilmesinin basınç dayanımında düşüş olduğunu tespit etmişlerdir [23].

Binici vd. (2010), yüksek fırın cürufu su geçirgenliği ile ilgili yaptığı deneylerde, yüksek fırın cürufu katmasının geçirimliliği azalttığını tespit etmiştir. Buda yüksek fırın cürufunun dolgu etkisini göstermektedir. [24]

Dinçer vd. (2013), yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkısının dayanıma ve dayanıklılığa katkısını incelediği çalışmada, erken dayanımlarda katkısız numunelerle hemen hemen aynı dayanımı yakalarken, harçlardaki boşluk miktarını ve oluşan etrenjit miktarını azalttığını tespit etmişlerdir [25].

Bu çalışmanın amacı; yüksek nem oranına sahip yapılarda oluşan alkali silika reaksiyonunu en aza indirmek için, tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu külün ikame malzemesi olarak çimentoda kullanılmasının etkisini incelemektir. Bu amaçla yapılan literatür araştırmalarında, çimento yerine % 20 üzerinde yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikamesi yapılmasının çimento harçlarında dayanımı düşürdüğü için bu çalışmada yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikamesi % 20 oranına kadar yapılmıştır.

2.MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan çalışmada; katkısız şahit numune, %5, 10, 15, 20 oranlarında tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül, tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikameli harç çubukları her birinden 3 er adet olacak şekilde hazırlanmıştır.

Sevim (2018), uçucu kül tane dağılımı optimizasyonu araştırmasında, q=0,4 tane dağılım modülünü 28 günlük en büyük basınç ve eğilme dayanımını tespit etmiştir. Bu çalışmada görüldüğü gibi, tane dağılımı optimizesi yapılırken q=0,4 tane dağılım modülü kullanılmıştır [1].

Dinger ve Funk, yaptığı çalışmalarda tane dağılım optimizasyonu için önerdikleri Denklem 2.1. de verilen bağlantı kullanılarak tane dağılımı optimizasyonu için en uygun elek tane boy analizi belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül için en büyük tane çapı 63µm olarak belirlenmiş ve Denklem 2.1. de verilen bağlantı kullanılarak gerekli tane boy analizi hesaplanmış,Çizelge 2.4. ve Çizelge 2.7. de verilmiştir.[26]

$$P(D) = \frac{D^q}{D_{maks}^q} x\ 100 \qquad \text{Denklem (2.1)}$$

P(D) : D Açıklıktaki Elekten Geçen Malzeme
D : Elek açıklığı
D_{maks} : Maksimum tane çapı
q : Dağılım Modülü

Yapılan çalışmada uçucu kül ve yüksek fırın cürufu için maksimum tane dağılımı 63µm seçilmiştir. Kullanılacak elek aralıkları 25, 38, 53, 63 µm olarak seçilmiştir. Örneğin; %5 ikameli bir numunede 25µm açıklıklı elekten geçen malzeme miktarını bulacak olursak,

q : 0,4

D : 25

D_{maks} : 63

$$\frac{25^{0.4}}{63^{0.4}} \times 100 = 69.09$$

$$(440 \times 0.05) \times 0.6909 = 15.20$$

Denklem (2.2)

belirtilen elek aralığından geçen malzeme oranı % 69,09 olarak bulunur. ASTM C 1260'da verilen su/çimento oranına göre belirlenen çimento miktarı 440gr olarak hesaplandığından dolayı %5 ikameli harç çubuklarında kullanılan 25µm açıklıklı elekten geçen puzolan miktarı Denklem 2.2.'de görüldüğü gibi %15.20 olarak hesaplanmıştır.

2.1.Materyal

Yapılan çalışmada öncelikle alkali silika reaksiyonu için gerekli kimyasal özelliklere sahip çimento ve agrega seçilmiş ve temin edilmiştir. Çimento harcı hazırlanırken uçucu kül, yüksek fırın cürufu, çimento ve kum tartımında Şekil 2.1'de verilen 0.1gr hassasiyetli tartım yapan hassas terazi kullanılmıştır. Şekil 2.2. 'de verilen otomatik mikser ile karıştırılan çimento harcı, 25x25x285 mm ebatlarında boy uzama harç çubuğu kalıplarına dökülerek hazırlanmıştır. Hazırlanan boy uzama harç çubuklarının boy ölçüleri 0,001 mm hassasiyetle ölçüm yapan Şekil 2.3. ' de verilen komparatör ile yapılmıştır. Boy uzama ölçümleri yapılırken, komparatöre takılan harç çubuğunda 3 okuma yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Harç çubukları hazırlanırken kullanılan sarsma tablası Şekil 2.4.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Hassas terazi

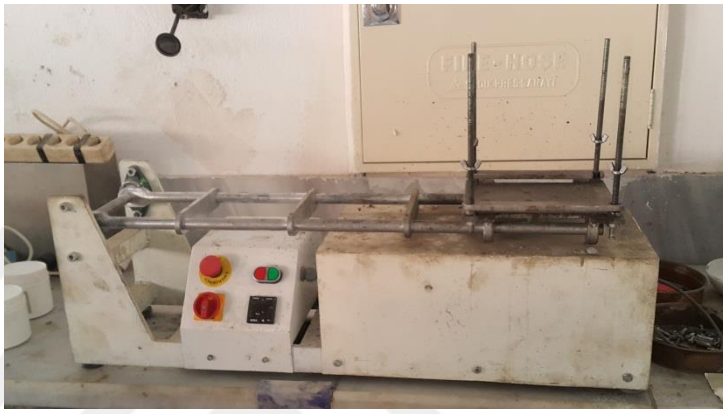


Şekil 2.2. Otomatik mikser

Çimento harcı kalıbın yarısı dolacak şekilde doldurulup 60 sarsma yapıldıtan sonra kalıbın kalan yarısı doldurulup 60 sarsma daha yapıldıktan sonra üzeri mastarlanmış ve çimento harç çubuklarının hazırlanması tamamlanmıştır. Deneylerde kullanılan yüksek fırın cürufu ve uçucu külün tane dağılımı optimizasyonu yapılmasında, Şekil 2.5.'de verilen vakumlu elek seti kullanılmıştır. Vakumlu elek seti, içerisinde dönen oluklu bir parça bulunan elek takımı ve elektrikli süpürge yardımı ile mevcut elek tane boyutundan küçük tanelerin çekilmesiyle çalışan sistemdir.



Şekil 2.3. Komparatör



Şekil 2.4. Sarsma tablası



Şekil 2.5. Vakumlu elek seti

ASTM C 1260 ve ASTM C 227'de verilen agrega gradasyonunu sağlamak için ise, titreşimli elek seti kullanılmıştır.

2.1.1.Agrega Özellikleri

Hazırlanan numunelerde, reaktif silis oranı yüksek olduğu bilinen İzmir Gediz bölgesine ait agrega kullanılmıştır. Kullanılan agreganın kimyasal analiz sonucu Çizelge 2.1.'de, kullanılan agreganın ASTM C 1260 ve ASTM C 227 deney metotları için uygulanan elek tane boy analizi tablosu Çizelge 2.2.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Agreganın kimyasal analizi

Kimyasal Bileşim	Oran (%)
SiO_2	73,05
Na_2O	0,057
MgO	0,683
Al_2O_3	7,302
Fe_2O	3,338
CaO	5,46
K_2O	1,49

Çizelge 2.2. Agreganın tane boyut analizi

ELEK ÇAPI		GEREKLİ MİKTAR (%)
ELEKTEN GEÇEN	ELEK ÜZERİNDE KALAN	
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	10
2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	25
1.18 mm (No. 16)	600 µm (No. 30)	25
600 µm (No. 30)	300 µm (No. 50)	25
300 µm (No. 50)	150 µm (No. 100)	15

2.1.2.Çimento Özellikleri

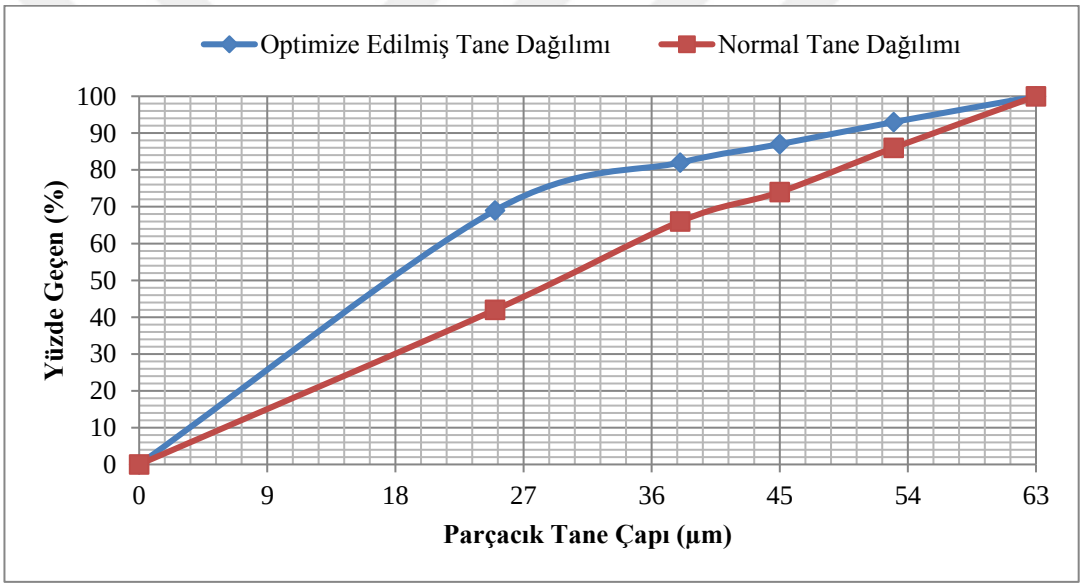
Alkali silika reaksiyonunda, alkali silis jelleri oluşumu için çimento içerisindeki alkali oksit oranının ($Na_2O+0.658K_2O$) % 0.06 dan büyük olması gerekmektedir. Kullanılan çimentonun eşdeğer alkali oksit miktarı Çizelge 2.3.'de gösterildiği gibi % 0.82'dir. Çalışmada, CEM I 42,5 R sınıfı portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi Çizelge 2.3.'de verilmiştir. Kullanılan çimentonun blaine inceliği 3220 cm²/gr olarak bulunmuştur.

Çizelge 2.3. CEM I 42,5 R Portland çimento kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	Oran (%)
SiO_2	18,79
$Al2O_3$	5,05
Fe_2O_3	2,54
CaO	63,28
MgO	2,23
K_2O	0,83
Na_2O	0,28
SO_3	3,44
$Cr2O_3$	0,03
Mn_2O_3	0,06
TiO_2	0,26
P_2O_5	0,08
Kızdırma kaybı	3,20
$Na_2O+0,658*K_2O$	0,82

2.1.3.Uçucu Kül Özellikleri

Kullanılan uçucu kül, Çatalağzı termik santralinden alınmıştır. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan uçucu kül, Çizelge 2.4. verilen miktarlara uygun gradasyona sahip şekilde elenip, tane dağılımı optimizasyonu yapılarak ve termik santralden alındığı şekilde kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Uçucu kül, vakumlu elek yardımı ile elenip, Çizelge 2.4. 'de verilen gerekli miktarlarda karıştırılarak tane dağılımı optimizasyonu yapılmıştır. Tane dağılım optimizasyonu yapılan ve termik santralden alındığı şekilde tane dağılımı bulunan uçucu külün tane dağılım eğrileri Şekil 2.6.'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Uçucu kül tane dağılım eğrileri

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller, F ve C sınıflarına ayrılırlar. Termik santrallerde yanan malzemelerden elde edilen uçucu küller; $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ yüzdesi % 70'den fazla olan ve CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılan F sınıfı uçucu küllerdir. Puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, toplam $SiO_2+Al_2O3+Fe_2O_3$ miktarı % 50'den fazladır. CaO > %10 olduğu için de yüksek kireçli uçucu kül olarak adlandırılırlar. C sınıfı uçucu

küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler [15]. Bu çalışmada kullanılan uçucu küle ait kimyasal analiz tablosu Çizelge 2.5. 'de verilmiştir. Belirtilen yönetmelik ve yapılan kimyasal analize göre bu çalışmada kullanılan uçucu kül F sınıfı olduğu belirlenmiştir. Kullanılan uçucu külün blaine inceliği 2695 cm²/dr olarak tespit edilmiştir. Tane dağılımı optimize edilmiş uçucu külün blaine inceliği ise 2943 cm²/gr olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 2.4. Uçucu kül tane optimizasyonu için vakumlu elek ile elenmiş uçucu kül miktarları (gr)

İkame	Elek Çapları (μ)				
Oran (%)	0-25	25-38	38-45	45-53	53-63
5	15,20	2,77	1,26	1,30	1,47
10	30,40	5,54	2,52	2,60	2,94
15	45,60	8,31	3,77	3,90	4,41
20	60,80	11,09	5,03	5,2	5,88

Çizelge 2.5. Uçucu külün kimyasal analizi

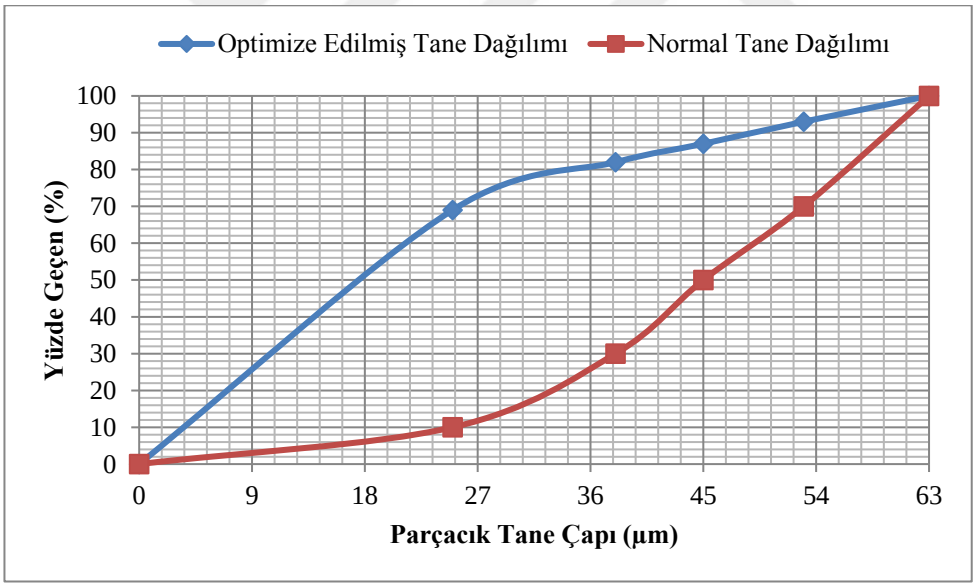
Kimyasal Bileşim	Oran (%)	Kimyasal Bileşim	Oran (%)
SiO_2	57,11	Na_2O	0,64
Al_2O_3	19,27	K_2O	2,39
Fe_2O_3	9,21	TiO_2	0,90
CaO	5,31	Cr_2O_3	0,02
MgO	2,03	Mn_2O_3	0,08
SO_3	0,13		

Uçucu kül ikamesi yapılması betonda kullanımında betondan tasarruf sağlamasının yanı sıra beton priz süresini uzattığı, beton prizinin yavaşlaması ve süresinin

uzamasının bir sonucu olarak hidratasyon ısısını düşürdüğü ve 90 gün üzeri beton dayanımını artırdığı bilinmektedir [27-34].

2.1.4.Yüksek Fırın Cürufu Özellikleri

Zonguldak Ereğli Demir Çelik Fabrikasına ait yüksek fırın cürufu Bolu Çimento Fabrikasından öğütülmüş olarak elde edilmiştir. Kullanılan yüksek fırın cürufu, fabrikadan öğütülmüş haliyle ve tane dağılımı optimizasyonu yapılarak iki farklı şekilde numuneler hazırlanmıştır. Tane dağılımı optimizasyonu yapılabilmesi için gereken miktarlarda elenmiş malzeme vakumlu elek ile elenmiştir. Tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş haliyle direkt olarak kullanılan yüksek fırın cürufundan elde edilen tane dağılımları Şekil 2.7.'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Yüksek fırın cürufu tane dağılım eğrileri

Kullanılan yüksek fırın cürufunun tane dağılımı optimizasyonu için gerekli miktarlar ve elek çapları Çizelge 2.6. 'da verilmiştir. Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal analiz tablosu ise Çizelge 2.7. 'de verilmiştir. Deneyde kullanılan yüksek

fırın cürufunun blaine inceliği 3594 cm²/gr oalrak bulunmuştur. Tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufunun blaine inceliği ise 3722 cm²/gr olarak bulunmuştur.

Çizelge 2.6. Yüksek fırın cürufu tane optimizasyonu için vakumlu elek ile elenmiş yüksek fırın cürufu miktarları (gr)

İkame Oranı (%)	Elek Çapları (μ)				
	0-25	25-38	38-45	45-53	53-63
5	15,20	2,77	1,26	1,30	1,47
10	30,40	5,54	2,52	2,60	2,94
15	45,60	8,31	3,77	3,90	4,41
20	60,80	11,09	5,03	5,2	5,88

Çizelge 2.7. Yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi

Kimyasal Bileşim	Oran (%)	Kimyasal Bileşim	Oran (%)
SiO_2	42,4	Na_2O	0,14
Al_2O_3	12,56	K_2O	0,75
Fe_2O_3	1,03	TiO_2	0,86
CaO	35,04	Cr_2O_3	0,01
MgO	5,11	Mn_2O_3	0,95
SO_3	0,37		

2.2.Yöntem

Deneysel çalışmalar, ASTM C 1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Metodu ve ASTM C 227 Standart Harç Çubuğu Deney Metoduna göre karşılaştırmalı olarak

yapılmıştır. ASTM C 1260'da kullanılan harç çubuklarının iç yapısı SEM yardımı ile incelenmiştir.

Çizelge 2.8. ASTM C 1260 ve ASTM C 227 deney metotları karşılaştırılması [35]

Deney	ASTM C 1260	ASTM C 227
Numune Tasarımı	Harç Çubukları; w/c : 0.47 Agregalar : Sabit dereceli Kum/Çimento : 2.25	Harç veya beton çubuklar; w/c : belirtilmemiş Agregalar : Sabit dereceli Kum/Çimento : 2.25
Kür Koşulları	80°C'de 1N NaOH çözeltisinde	%100 bağıl nem ve 38°C'de
Genleşme Değerlendirmesi	Eğer; 14 günde genleşme > % 0.2 ise zararlı	Eğer; • 12 ayda genleşme > %0.1 ise zararlı

ASTM C 1260, kısa süreli deney metodu olduğu ve hızlı sonuçlar verdiği için ASTM C 227 ye göre daha çok tercih edilen bir deney yöntemidir. ASTM C 227 daha uzun süreli deney metodu olduğu için ASR açısıdan daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Yapılan çalışmada her iki deney metodundan elde edilen sonuçlarda karşılaştırılmıştır.

2.2.1.ASTM C 1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Metodu

ASTM C 1260 Hızlandırılmış harç çubuğu deney metodu 16 günde sonuç veren kısa süreli bir deney yöntemidir. ASTM C 1260 da verilen gradasyona göre hazırlanan agrega, çimento miktarının 2,25 katı olacak şekilde, su/çimento oranı 0,47 olacak şekilde 25x25x285 ebatlarında boy uzama harç çubukları hazırlanır. Hazırlanan numuneler kalıplara döküldükten sonra 24 saat kalıpta bekletildikten sonra kalıptan

sökülür. Sökülen numuneler 80C sıcaklığa sahip, 1M NaOH çözeltisinde 24 saat süre ile bekletilir. 1M NaOH çözeltisi, 900gr suya 40gr NaOH karıştırılarak elde edilir. Bu süreden sonra numunelerin ilk okuması yapılır ve tekrar 80ºC sıcaklıkta NaOH çözeltisinde bekletilerek numunelerin 7 ve 14 günlük boy uzama değerleri okunarak deney sonuçlandırılır [36].

Yapılan ölçümler ve hesaplanan boyca genleşme oranları değerlendirmesi, % 0,2 genleşme oranı üzerinde kalan genleşme değerine sahip numuneler alkali silika reaksiyonu açısından zararlı bölgede, % 0,2 - % 0,1 arası genleşme oranlarına sahip numuneler alkali silika reaksiyonu açısından zararsız zararlı bölgede, % 0,1 genleşme oranı altında kalan değerlere sahip numuneler ise alkali silika reaksiyonu açısından zararsız bölgede olarak değerlendirilir.

2.2.2.ASTM C 227 Standart Harç Çubuğu Deney Metodu

ASTM C 227 standart harç çubuğu deney metodu, mineral ve kimyasal katkıların alkali silika reaksiyonundan dolayı oluşturduğu boy uzama oranındaki etkisini ölçmek için kullanılan 12 aylık ölçümler sonucunda genleşme değerleri ile ASR etkisi belirlenen bir deney yöntemidir [37].

ASTM C 227 deney metodu için, çimentonun kütlece 2,25 katı büyüklüğünde agrega, 0,47 su/çimento oranı kullanılarak 25x25x285 ebatlarında her karışım için en az 3 adet olacak şekilde numuneler hazırlanır. Hazırlanan numuneler kalıplara döküldükten sonra 24 saat kalıpta bekletilir. 24 saat sonunda kalıplardan sökülen numunelerin ilk ölçümleri yapılır ve numuneler kür suyuna temas etmeyecek şekilde hazırlanmış nem dolabında 38ºC'de bekletilir. Numunelerin 2, 7, 28, 90 ve 180 günlük boy uzaman değişim değerleri ölçülür ve genleşmeleri hesaplanır [38].

Harç çubuklarının hazırlanmasında kullanılan çimento içerisindeki alkali miktarı % 0,6 üzerinde olması ve agrega elek tane boy analizi Çizelge 2.2. 'de verilen şekilde olmalıdır.

ASTM C 227 ‘ye göre çimento harç çubukları alkali silika reaksiyonu için, 6 aylık periyotlar şeklinde elde edilen boy uzama değerleri ile değerlendirme yapılır. Boy uzama oranında % 0,1 sınır değer olarak kabul edilir. Bu sınır değer altında kalan genleşmelerin olduğu numuneler alkali silika reaksiyonu açısından zararsız, % 0,1‘den fazla boy uzamaya sahip numuneler alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olarak kabul edilir.

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

ASTM C 1260’a göre hazırlanan numunelerden şahit numune, % 10 ve % 20 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubukları, % 10 ve % 20 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubukları, % 10 ve % 20 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubukları, % 10 ve % 20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarının mikro yapıları incelenmiştir. Mikro yapı incelemesi SEM (taramalı elektron mikroskobu) yardımı ile yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobunda görüntü, numune üzerine odaklanan elektron demetinin, numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan elastik ve elastik olmayan çarpışmaların meydana getirdiği etkilerin uygun algılayıcılarda toplanarak sinyal güçlendiricilerinden sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.

Taramalı elektron mikroskobu, aynı zamanda malzemenin kimyasal analizini yapabilmektedir. İncelenen numunede seçilen bir noktaya elektron demeti göndererek, EDS (Enerji Saçılım Spektrometresi) dedektörleri ile elementlerden gelen X-ışınlarının algılanıp analiz edilmesi ile kimyasal analizi elde edilir.

3.ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1.Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül İkamesinin Alkali Silika Reaksiyonuna etkisi

Hazırlanan harç çubuklarında yapılan incelemeler sonucu elde edilen veriler incelenmiş ve ASTM C 1260 ve ASTM C227 deney metotları karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Kullanılan deney metotlarının birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçların, SEM yardımı ile yapılan incelemeler sonucunda ASR etkisi ile oluştuğu desteklenmiştir.

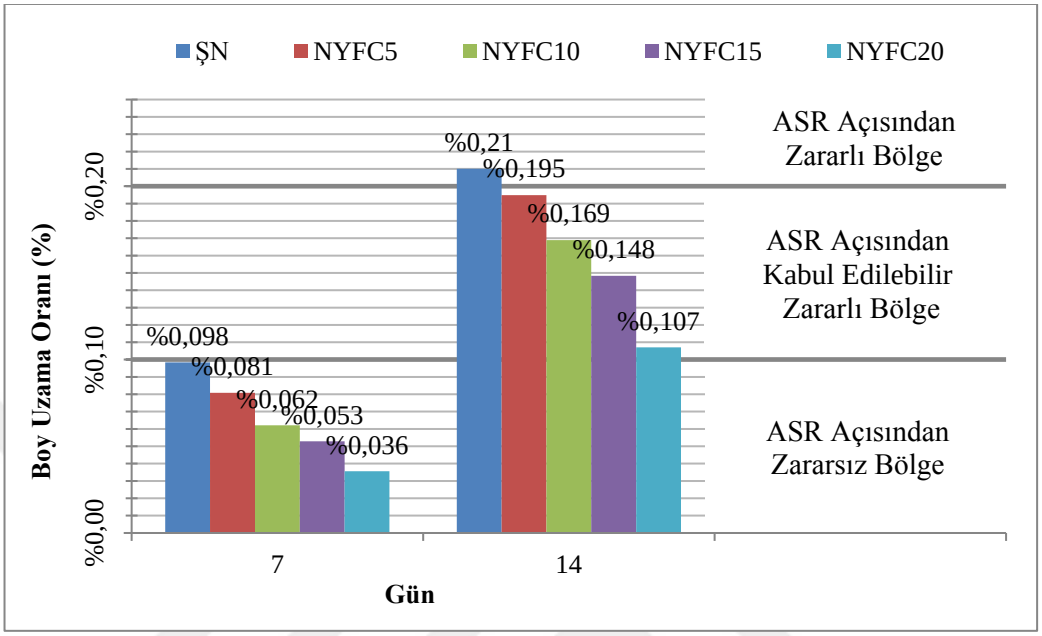
3.1.1 ASTM C 1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deney Sonuçların İrdelenmesi

Yapılan çalışmalar sonucunda ASTM C 1260'a göre elde edilen boy uzama değerleri Şekil 3.9. 'da verilmiştir. Değerler her deney grubu için en az 3 numune üzerinde tekrar edilmiştir.

Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harç Çubukların ASR Boy Uzamaları

14 gün sonunda yapılan değerlendirmeler ve okumalar sonucunda Şekil 3.1. ve Çizelge 3.1. 'de verilen deney sonuçlarına göre, şahit numune (ŞN) de % 0,21 oranında boy uzaması görülürken; yüksek fırın cürufu ikameli çimento harçlarında Şekil 3.1. 'de gösterildiği gibi; NYFC5 numunede yapılan okumalar sonucu, şahit numuneye göre boy uzama oranında % 7,2 oranında azalma gözlemlenmiş ve % 0,195 boy uzama görülmüştür. NYFC10 numunede yapılan okumalar sonucu şahit numuneye göre boy uzama değerinde % 19,5 oranında azalma görülmüş olup % 0,169 genleşme göstermiştir. NYFC15 numunede yapılan okumalar sonucunda % 0,148 oranında genleşme gözlemlenmiş, şahit numuneye göre boy uzama oranında % 30,6 azalma görülmüştür. NYFC20 numunede yapılan okumalar sonucunda

% 0,107 oranında genleşme gözlemlenmiş, şahit numuneye göre % 20 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmasının genleşme oranını % 49,1 azalttığı gözlemlenmiştir.

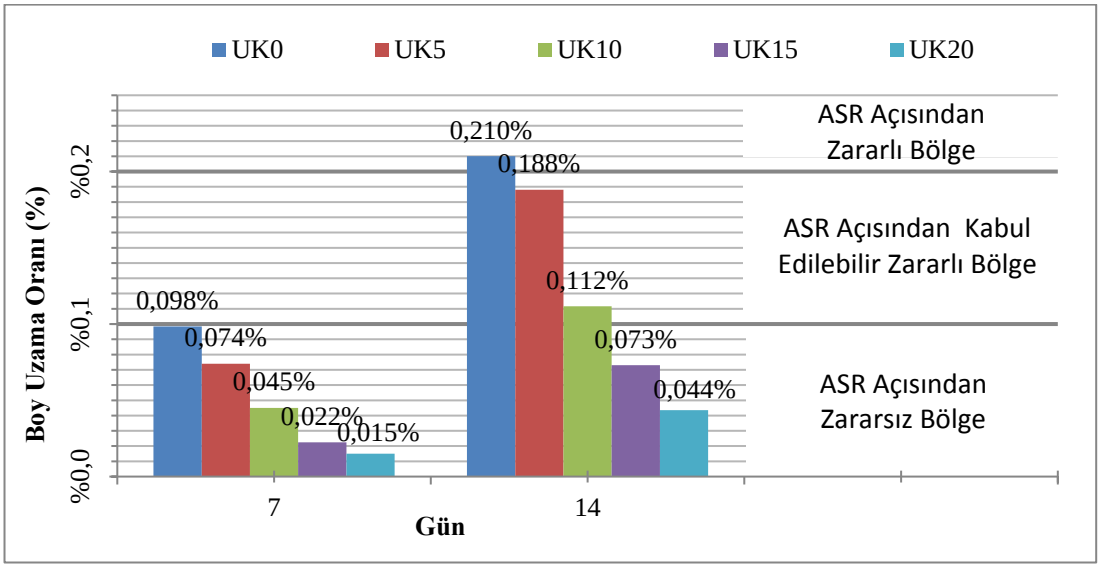


Şekil 3.1. Yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarının boy uzamaları

Katkısız numunede (ŞN) yapılan deneyler sonucunda boyca genleşme oranı % 0,2 değerinin üzerinde kalarak ASTM C 1260 ‘a göre alkali silika reaksiyonu açısından zararlı bölgede kalmıştır. % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmasının ASTM C 1260 ‘a göre verilen ASR açısından güvenli bölgede kalmaya yeterli olmadığı görülmüş ve bu numunelerin ASR açısından kabul edilebilir zararlı bölgede kaldığı gözlemlenmiştir. NYFC harç çubukları incelendiğinde, ASR etkisini azaltmada en etkili % 20 NYFC ikameli harç çubukları olduğu görülmüştür.

Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Çubuklarının ASR Boy Uzamaları

Uçucu kül ikameli harç çubuklarında yapılan ASR deneyleri sonucunda Şekil 3.2. de gösterilen boyca genleşme oranları elde edilmiş olup; NUK5 numunede yapılan okumalar sonucunda % 0,188 genleşme gözlemlenmiş şahit numuneye göre % 11,5 oranında boyca genleşmede azalma görülmüştür. NUK10 numunede yapılan okumalar sonucunda % 0,111 oranında boyca genleşme gözlemlenmiş olup şahit numunede belirlenen değerlere göre % 47,2 oranında genleşme değerinde azalma gözlemlenmiştir. NUK15 numunede yapılan okumalar neticesinde % 0,073 oranında boyca genleşme tespit edilmiş olup şahit numuneye göre genleşmede % 65,3 oranında azalma tespit edilmiştir. NUK20 numunede yapılan okumalarda % 0,044 oranında boyca genleşme tespit edilmiş olup şahit numuneye göre genleşme oranında %79,1 düşüş gözlemlenmiş ve optimize yapılmamış puzolan katkılarından en düşük genleşme değerini veren numuneler % 20 uçucu kül ikameli harçlar (NUK20) olmuştur. Şekil .. de görüldüğü gibi, NUK5 ve NUK10 çimento harçlarında yapılan ikameler güvenli bölgede kalmak için yetersiz kalırken kabul edilebilir zararlı bölgede kalmış, % 15 ve % 20 uçucu kül ikamesi yapılan harçlar ASTM C 1260 'a göre alkali silika reaksiyonu açısından güvenli bölgede olduğu gözlemlenmiştir.



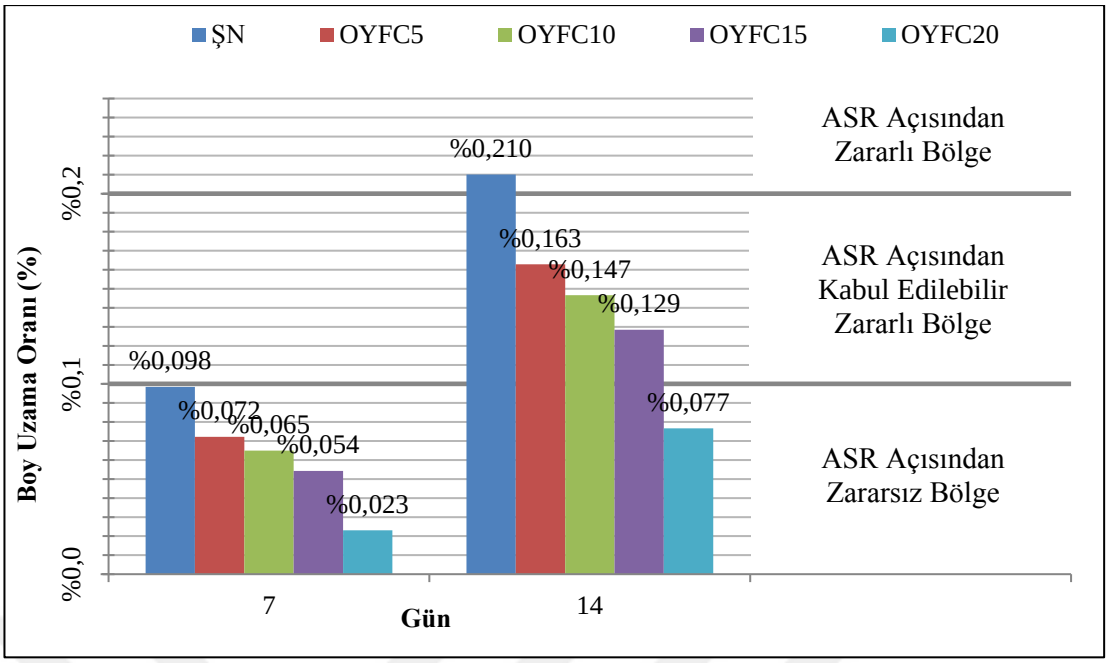
Şekil 3.2. Uçucu kül ikameli harç çubuklarının boy uzamaları

NUK ikameli harç çubuklarında yapılan incelemeler sonucu, ikame oranı arttıkça ASR etkisinin düştüğü ve bu numuneler arasında ASR etkisinin en az % 20 ikameli harç çubuklarında oluştuğu görülmüştür.

Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harç Çubukların Boy Uzama Değerlerinin Şahit Numune İle Karşılaştırılması

Tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın curuf ikameli çimento harçlarında; OYFC5 numunede yapılan okumalar sonucu % 0,163 boyca genleşme tespit edilmiş, şahit numuneye göre boy uzama oranında % 22,4 oranında azalma gözlemlenmiş ve ASR etkisini azattığı görülmüştür. OYFC10 numunede yapılan okumalar sonucu şahit numuneye göre %30 oranında boy uzama değerinde azalma görülmüş olup % 0,147 genleşme göstermiştir. OYFC15 numunede yapılan okumalar sonucunda % 0,129 oranında genleşme gözlemlenmiş, şahit numuneye göre boy uzama oranında % 38,6 azalma görülmüştür. OYFC20 numunede yapılan okumalar sonucunda % 0,077 oranında genleşme gözlemlenmiş, şahit numuneye göre % 20 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmasının genleşme oranının yaklaşık yarı yarıya düştüğü % 63,4 azalttığı ve 14 günlük boyca genleşme oranı tespiti sonucunda % 20 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin ASTM C 1260 a göre alkali silika reaksiyonu açısından zararsız bölgede kaldığı görülmüş olup, Şekil 3.3 ‘de boy uzama oran grafiği verilmiştir. Şekil 3.3. ‘de de görüldüğü gibi, OYFC5, OYFC10 ve OYFC15 ikameli harçlar ASR açısından kabul edilebilir zararlı bölgede kalmış, % 20 oranında tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli harçlarda boyca genleşme oranı ASTM C 1260 da belirtilen % 0,1 sınır değerinin altına düşerek ASR açısından zararsız bölgede kalmıştır.

OYFC ikameli harç çubukları incelendiğinde, ikame oranı arttıkça ASR etkisi azaldığı görülmüştür. % 20 OYFC ikamesi yapılması ASR etkisini azaltmada en etkili OYFC ikameli harç çubuğu olduğu görülmüştür.

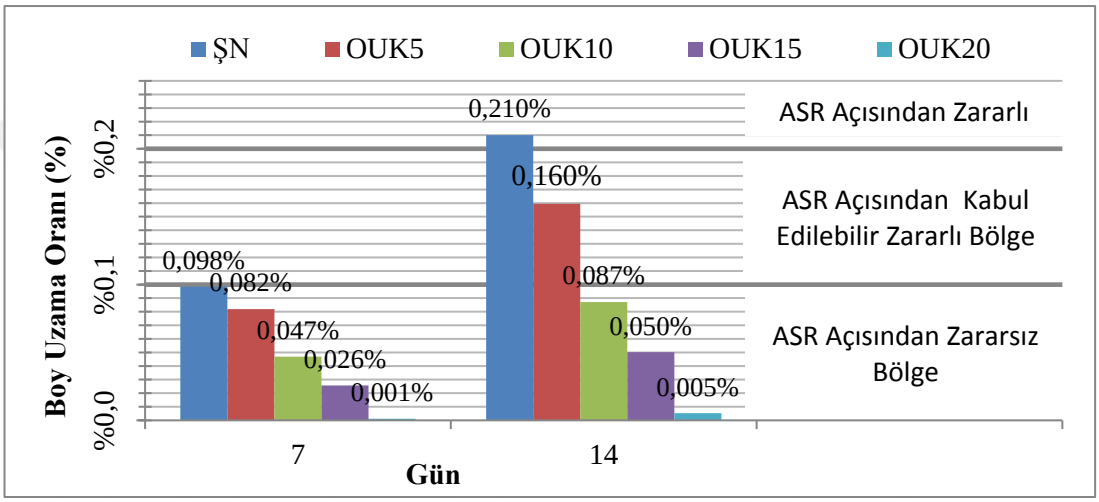


Şekil 3.3. Tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarının boy uzamaları

Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Çubukların ASR Boy Uzamaları

Tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubuklarında Şekil 3.4.'de de görüldüğü gibi; OUK5 numunede yapılan okumalar sonucunda % 0,160 genleşme gözlemlenmiş şahit numuneye göre % 23,9 oranında boyca genleşmede azalma görülmüştür. OUK10 numunede yapılan okumalar sonucunda % 0,087 oranında boyca genleşme gözlemlenmiş olup şahit numunede belirlenen değerlere göre % 58,6 oranında genleşme değerinde azalma gözlemlenmiştir. OUK15 numunede yapılan okumalar neticesinde % 0,050 oranında boyca genleşme tespit edilmiş olup şahit numuneye göre genleşmede % 76,2 oranında azalma tespit edilmiştir. OUK20 numunede yapılan okumalarda % 0,005 oranında boyca genleşme tespit edilmiş olup şahit numuneye göre genleşme oranında % 97,6 düşüş göstererek, tane dağılımı optimizasyonu yapılmış uçucu külün çimento harcına % 20 oranında ikame edilmesi hızlandırılmış harç çubuğu deney metodunda en düşük boyca genleşme değerini vermiştir.

% 5 oranında tane optimizasyonu yapılmış uçucu kül ikamesi yapılması sonucu boyca genleşme oranı ASTM C 1260 'a göre ASR için kabul edilebilir zararlı bölgede kalırken, % 10, % 15 ve % 20 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikamesi yapılması boyca genleşme oranını ASR açısından güvenli olan boyca genleşme oranı sınır değeri % 0,1 değerninin altına düşürerek zararsız bölgede kalmış ve ASR açısından zararsız olarak nitelendirilmiştir.



Şekil 3.4. Tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubuklarının boy uzamaları

OUK ikameli harç çubuklarına bakıldığında, ikame oranı artıkça ASR etkisinin azaldığı ve % 20 ikame oranının ASR etkisinin en aza indirdiği gözlemlenmiştir.

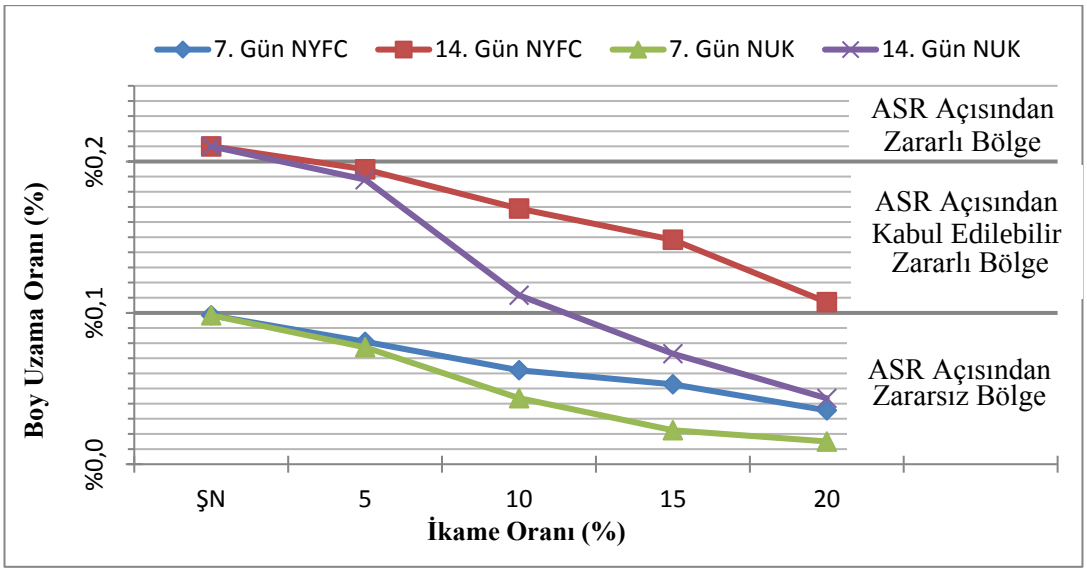
NYFC İkameli ve NUK İkameli Çimento Harç Çubuklarının ASR Boy Uzamaları

NYFC5 numuneler de boyca genleşme oranı % 0,194 olarak okunurken NUK5 numunelerde % 0,188 okunmuş ve yüksek fırın cürufu yerine uçucu kül ikamesi yapımasının boyca genleşme miktarını %3 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Her

iki numuneninde ASTM C 1260 ‘a göre kabul edilebilir zararlı bölgede kaldığı gözlemlenmiştir.

NYFC10 numunelerde % 0,169 oranında boyca genleşme görülürken, NUK10 numunelerde % 0,111 oranında genleşme gözlemlenmiştir. % 10 oranında uçucu kül ikamesi yapılması yüksek fırın cürufu ikamesine göre genleşme değerini % 34,3 düşürmüştür. % 10 oranında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikamesi yapılması sonucunda harç çubuklarının zaralı bölgede olmadığı ve ASR açöısından kabul edilebilir zararlı bölgede olduğu gözlemlenmiştir.

NYFC15 numunelerde % 0,148 oranında hacimce genleşme gözlemlenirken NUK15 numunelerde % 0,073 oranında boyca genleşme gözlemlenmiştir. % 15 oranında yüksek fırın cürufu ikamesi sonucunda harç çubukları ASR açısından kabul edilebilir bölgede bulunurken, % 15 oranında uçucu kül ikamesi yapılması ASTM C 1260’a göre ASR açısından zararsız bölgede kaldığı ve NUK15 harç çubuklarında NYFC15’e göre % 50,7 oranında boyca genleşme oranında düşüş olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.5. NYFC ikameli ve NUK ikameli harç çubuklarının boy uzamaları

NYFC20 numunelerde boyca % 0,107 oranında genleşme gözlemlenirken NUK20 harç çubuklarında % 0,044 oranında genleşme görülmüştür. % 20 oranında yüksek fırın cürufu ikamesi yapılması ASTM C 1260 açısından, güvenli bölgede kalmaya yetersiz olup kabul edilebilir zararlı bölgede kalırken % 20 uçucu kül ikamesi yapılması ASR açısından zararsız bölgede kalmıştır.

% 20 optimize edilmemiş UK ikameli harç çubuklarının % 20 optimize edilmemiş YFC ikameli harç çubuklarına göre ASR etkisini azaltmada daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde yapılan çalışmalar incelendiğinde, UK ikameli harç çubuklarının YFC ikameli harç çubuklarına göre ASR etkisini azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür [22].

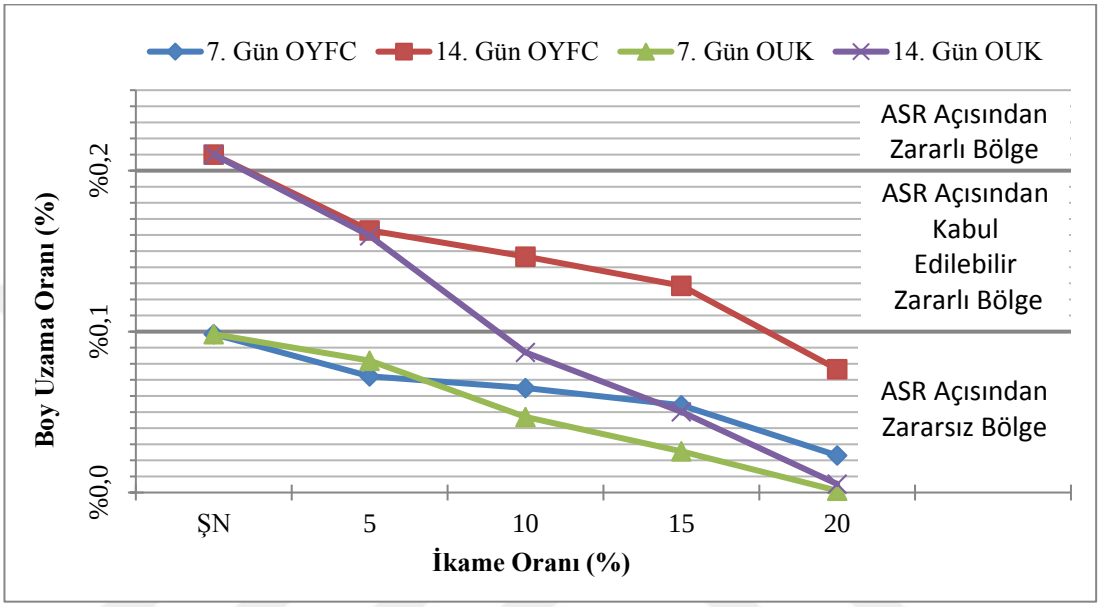
OYFC İkameli ve OUK İkameli Çimento Harç Çubuklarının ASR Boy Uzamaları

Tane dağılımı optimize edilmiş YFC ve tane dağılımı optimize edilmiş UK ikameli numuneler kıyaslandığında, OYFC5 numuneler de boyca genleşme oranı % 0,163 olarak okunurken OUK5 numunelerde %0,159 okunmuş ve yüksek fırın cürufu yerine uçucu kül ikamesi yapılmasının boyca genleşme miktarını % 2,5 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. OUK5 ve OYFC5 numunelerin ASTM C 1260 açısından kabul edilebilir zararlı bölgede kaldığı gözlemlenmiştir.

OYFC10 numunelerde % 0,146 oranında boyca genleşme görülürken, OUK10 numunelerde % 0,087 oranında genleşme gözlemlenmiştir. % 10 oranında tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu katkılı harç çubukları ASR açısından kabul edilebilir zararlı bölgede kalırken % 10 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli numuneler ASR açısından zararsız bölgede kalmış ve OUK10 numunelerde OYFC10 numunelere göre % 40,4 daha az boyca genleşme görülmüştür.

OYFC15 numunelerde % 0,128 oranında hacimce genleşme gözlemlenirken OUK15 numunelerde % 0,050 oranında boyca genleşme gözlemlenmiştir. OYFC15 harç

çubuklarına göre OUK15 harç çubuklarında % 60,9 daha az boyca genleşme görülmüş ve OYFC15 harç çubuklarının ASTM C 1260'a göre ASR açısından kabul edilebilir zararlı bölgede, OUK15 harç çubuklarının zararsız bölgede olduğu gözlemlenmiştir.



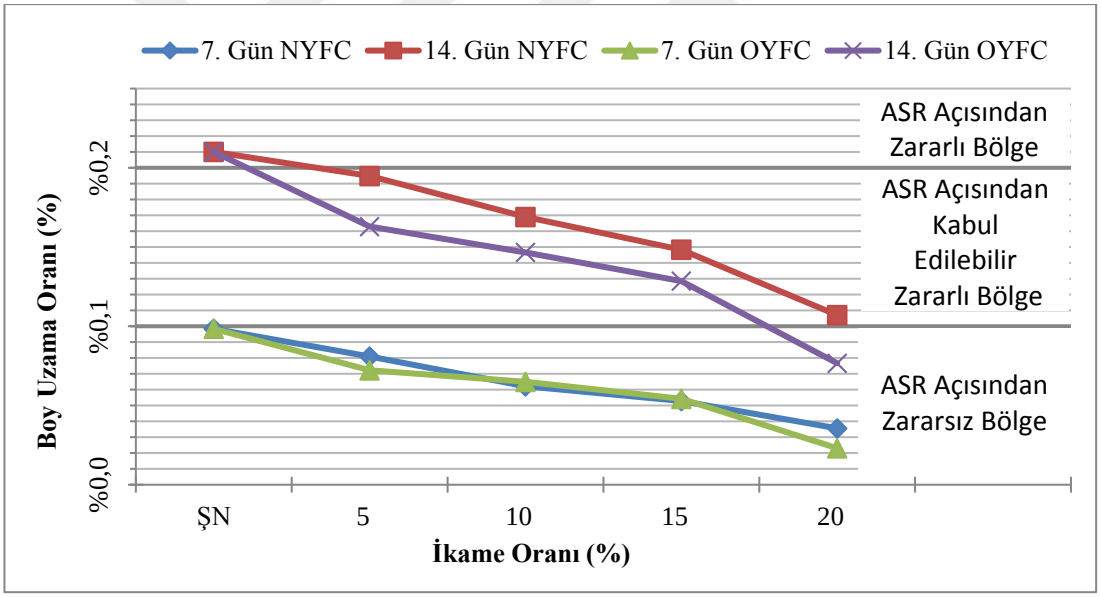
Şekil 3.6. OYFC ikameli ve OUK ikameli harç çubuklarının boy uzamaları

OYFC20 numunelerde boyca % 0,077 oranında genleşme gözlemlenirken OUK20 harç çubuklarında % 0,005 oranında genleşme görülmüştür. OYFC20 numunelere göre OUK20 numunelerde % 93,5 daha az boy uzama gözlemlenmiş olup, OYFC20 ve OUK20 numunelerin ASTM C 1260 'a göre ASR açısından zararsız bölgede kaldığı görülmüştür.

NYFC İkameli ve OYFC İkameli Çimento Harç Çubukları ASR Boy Uzamaları

Tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ve optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları karşılaştırıldığında; % 5 oranında YFC ikameli NYFC5 harç çubuklarında % 0,194, % 5 oranında tane dağılımı optimize edilmiş

YFC ikameli OYFC5 harç çubuklarında % 0,163, NYFC10 harç çubuklarında % 0,169, OYFC10 harç çubuklarında %0,146, NYFC15 harç çubuklarında 0,148, OYFC15 harç çubuklarında %0,128 boyca genleşme tespit edilmiş olup, % 5, % 10 ve % 15 ikameli numunelerde tane dağılımı optimizasyonu yapılmasının boyca genleşme oranında yaklaşık % 15 lik bir düşüş sağladığı gözlemlenmiştir. NYFC20 harç çubuklarında % 0,107, OYFC20 harç çubuklarında 0,077 boyca genleşme değerleri bulunmuş, % 20 YFC ikameli harç çubuklarında tane dağılımı optimizasyonu yapılmasının boyca genleşme oranında % 72 düşüş sağladığı tespit edilmiştir. % 20 oranında tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmış harç çubuklarının güvenli bölgede kaldığı fakat % 20 normal yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarının kabul edilebilir zararlı bölgede kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.7. NYFC ikameli ve OYFC ikameli harç çubuklarının boy uzamaları

NYFC ve OYFC ikameli harç çubukları boy uzama değerlerine genel olarak bakıldığında, tae dağılımı optimizasyonu yapılmasının alkali silika reaksiyonu etkisini düşürmede daha etkili olduğu görülmüştür. Bu etkiyi tane dağılımı optimizasyonu yapılmasının dolgu etkisini artırmasıyla açıklamak mümkündür.

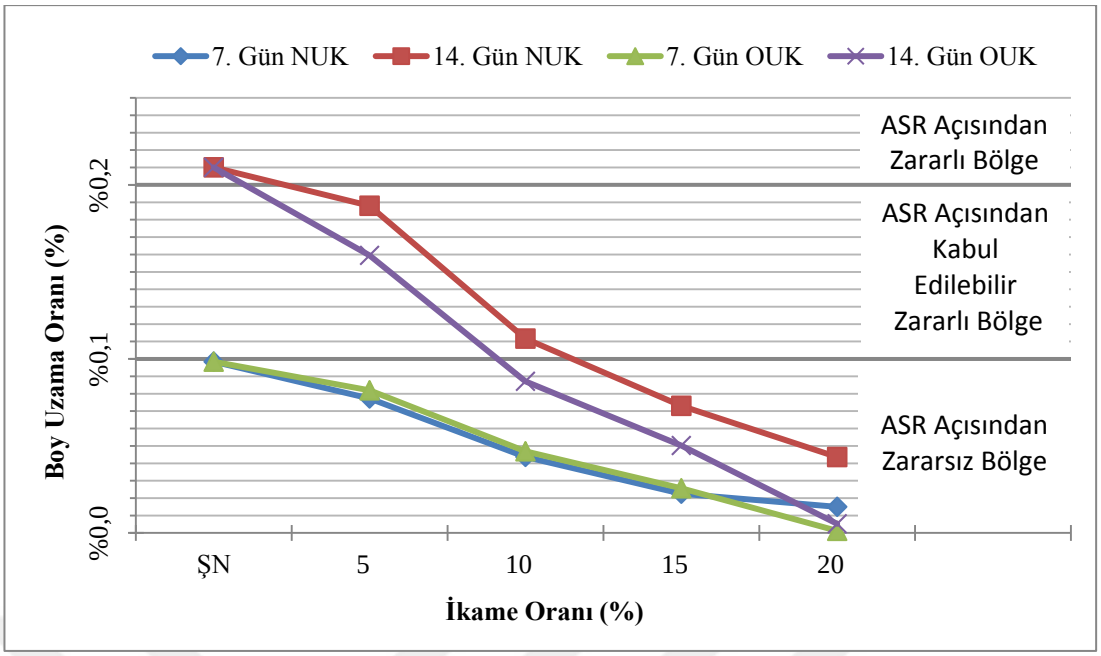
NUK İkameli ve OUK İkameli Çimento Harç Çubukları ASR Boy Uzamaları

Tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları karşılaştırıldığında; % 5 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli OUK5 harç çubuklarında % 0,159 boca genleşme, tane dağılımı optimize edilmemiş NUK5 harç çubuklarında % 0,188 boy uzama oranı gözlemlenmiştir. % 5 oranında ikame edilen uçucu külün tane dağılımının optimize edilmesi boyca genleşme oranını % 15,4 düşürmesine rağmen, NUK5 ve OUK5 harç çubukları ASTM C 1260'a göre ASR açısından kabul edilebilir zararlı bölgede kalmıştır.

NUK10 harç çubuklarında % 0,111 boyca genleşme, OUK10 harç çubuklarında % 0,087 boyca genleşme oranı gözlemlenmiş olup, % 10 ikame oranında tane dağılımı optimizasyonu yapılması boyca genleşme değerinde % 21,6 oranında düşüş göstermiştir.NUK10 harç çubukları ASTM C 1260'a göre kabul edilebilir zararlı bölgede kalırken, tane dağılımı optimize edilmiş OUK10 harç çubuklarının ASR açısından zararsız bölgede kaldığı gözlemlenmiştir.

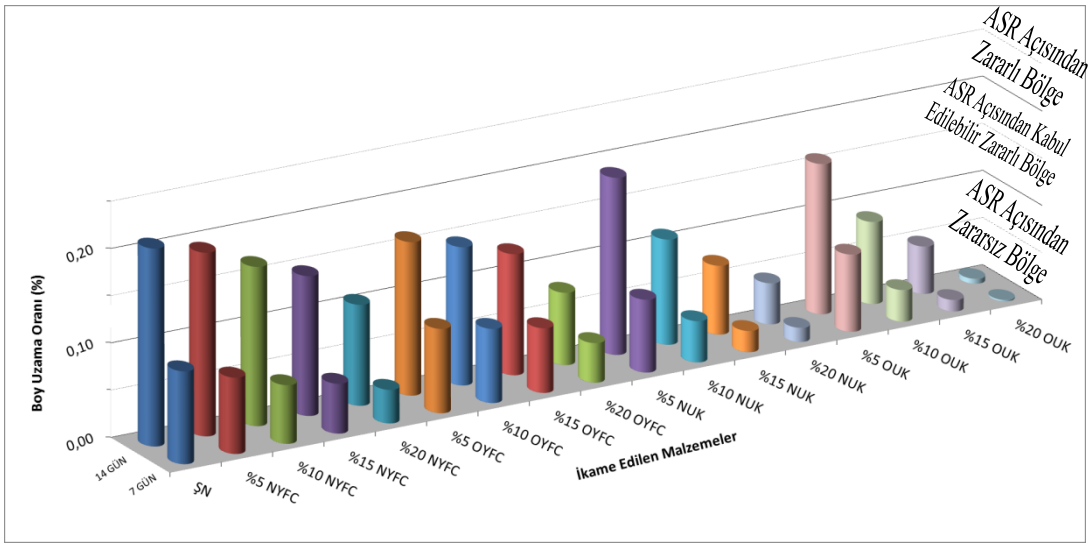
NUK15 harç çubuklarında görülen boyca genleşme oranı % 0,073, OUK15 harç çubuklarında görülen boyca genleşme oranı ise %0,05 olarak gözlemlenmiştir. % 15 oranında ikame edilen yüksek fırın cürufunun tane dağılım optimizasyonunun yapılması boyca genleşme oranında % 31,5 azalma sağlamıştır. % 15 uçucu kül katkısı yapılması harç çubuklarının ASTM C 1260 'a göre zararsız bölgede kalması için yeterli olmuştur.

NUK20 numunelerde % 0,044, OUK20 numunelerde % 0,005 oranında boy uzamalar tespit edilmiş olup, % 20 oranında uçucu kül ikame edilen numunelere kıyasla tane dağılımı optimizasyonu yapılmasının boy uzama değerini % 11,4 azaltmıştır. NUK20 ve OUK20 harç çubuklarının ASTM C 1260 'a göre ASR açısından zararsız bölgede olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.8. NUK ikameli ve OUK ikameli harç çubuklarının boy uzamaları

NUK ve OUK ikameli harç çubukları boy uzama değerlerine bakıldığında, ikame edilen UK'ün tane dağılımı optimizesi yapılması kimyasal etkinin yanında dolgu etkisi ile de alkali silika reaksiyonunu azaltmada etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 3.9. ASTM C 1260 boy uzama değerleri

Çizelge 3.1. ASTM C 1260 boy uzama değerleri tablosu

İkame Edilen Puzolan	İkame Oranı (%)	Boy Uzama Oranı	
		7 Gün	14 Gün
Şahit Numune	-	0,098	0,21
Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numuneler	% 5	0,081	0,194
	% 10	0,062	0,169
	% 15	0,053	0,148
	% 20	0,036	0,107
Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numuneler	% 5	0,089	0,163
	% 10	0,079	0,146
	% 15	0,069	0,128
	% 20	0,042	0,077
Uçucu Kül İkameli Numuneler	% 5	0,077	0,188
	% 10	0,044	0,111
	% 15	0,022	0,073
	% 20	0,015	0,044
Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Uçucu Kül İkameli Numuneler	% 5	0,082	0,159
	% 10	0,033	0,087
	% 15	0,012	0,05
	% 20	0,001	0,005

Sonuç olarak, Şekil 3.9. da da görüldüğü gibi, yapılan çalışmalar sonucunda ASTM C 1260 ‘a göre, katkısız harç çubukları (ŞN) ASR açısından zararlı bölgede kalmıştır. % 5-10 arası tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları kabul edilebilir zararlı bölgede kalmıştır. % 5 ve % 10 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları, tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları kabul edilebilir zararlı bölgede kalmıştır. % 5-10-15 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları ASR açısından kabul edilebilir zararlı, % 15-20 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları, % 20 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın

cürufu ikameli harç çubukları ve tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül katkılı harç çubukları ise ASR açısından zararsız olarak kabul edilebilir boyca genleşme değerlerine sahip olduğu görülmüş ve uçucu kül kullanımının yüksek fırın cürufuna göre alkali silika reaksiyonunu azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür.

Şekil 3.9. ve Çizelge 3.1.'de de görüldüğü gibi, ikame malzemesi olarak kullanılan yüksek fırın cürufu ve uçucu külün, tane dağılımı optimizasyonu yapılması harç çubuklarında tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubuklarına göre ASR etkisini azaltmada daha etkili olduğu gözlemlenmiş olup, hazırlanan numunelerde ASR açısından en zararsız tane dağılımı optimize edilmiş % 20 uçucu kül ikameli harç çubukları olduğu görülmüştür.

Bu sonuç bize, tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun dolgu etkisinin ASR yi önlemede daha etkin olduğunu göstermiştir.

3.1.2. ASTM C 227 Standart Harç Çubuğu Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

ASTM C 227 standart harç çubuğu deney metoduna göre hazırlanan çimento harç çubuklarının boy uzama değerleri 7 gün, 14 gün, 1 ay, 2 ay, 3 ay, 4 ay, 6 ay, 9 ay ve 12 ay sonlarında okunan harç çubuklarının boyca genleşmesinin değerlendirilmesi sonucu elde edilen deney verilerine göre,
Katkısız şahit numunede (referans) erken yaşlarda yavaş ve düşük oranda boy uzama gözlemlenmiş, birinci ay sonuna takiben hazırlanan numuneler arasında en yüksek boy uzama değerine sahip harç çubuğu olmuştur. Şahit numune, 6. ayda % 0.1689 boy uzama gösterirken, 12. Ay sonunda ise bu değer % 0.1761 olmuştur. ASTM C 227 ye göre 12. Aylık ölçümler sonucu boy uzama oranı % 0.1 den büyük olan numuneler ASR açısından zararlı olarak kabul edilmektedir ve şahit numune ASTM C 227 'ye göre ASR açısından zararlı olarak kabul edilmiştir.

Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harç Çubukları ASR Boy Uzamaları

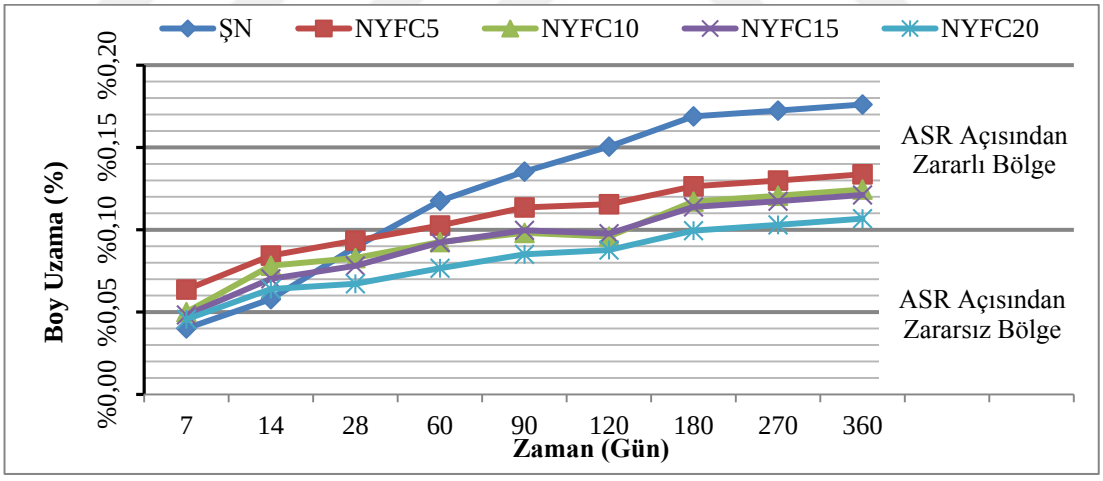
Çimento yerine % 5 oranda yüksek fırın cürufu ikame edilen çimento harç çubuklarında, 7 günlük ölçümler sonucu boy uzama değeri % 0.0637, 14 günde % 0.0843, 1 ayda % 0.0934, 2 ayda % 0.1025, 3 ayda % 0.1135, 4 ayda % 0.1155, 6 ayda % 0.1264, 9 ayda % 0.1299, ve, 360 gün sonunda ölçülen boy uzama değeri % 0.1337 olarak tespit edilmiştir. Harç çubuklarına % 5 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikamesi yapılması sonucunda, katkısız şahit numunelere göre boy uzama oranında 6 aylık değerlendirmede % 25.1, 12 aylık ölçümler sonucunda ise % 24.1 azalma görülmüştür. ASTM C 227 ye göre % 5 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli numuneler 6 aylık okumalar sonucu % 0.05 boy uzama sınır değerinin ve 12 aylık okumalar sonucu % 0.1 boy uzama sınır değerinin üzerinde kaldığı için ASR açısından zararlı olarak nitelendirilmiştir.

% 10 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubukları, 7 günlük değerlendirmeler sonucu % 0.0500, 14 günde % 0.0781, 1 ayda % 0.0828, 2 ayda % 0.0925, 3 ayda % 0.0982, 4 ayda %0.0958, 6 ayda %0.1172, 9 ayda %0.1207 genleşme tespit edilmiş ve 12 aylık değerlendirmeler sonucunda ise %0.1245 oranında boy uzama göstermiştir. Katkısız numunelere göre boy uzama oranında 6 ay sonunda %30.6 azalma gösterirken 12 aylık değerlendirmeler sonucu %29.3 azalma göstermiştir. Fakat yapılan okumalar neticesinde NYFC10 harç çubuklarının ASTM C 227 de belirtildiği üzere 6 aylık okuma sonucunda %0.05 sınır değer üzerinde kalması, 12 aylık okumalar sonucunda %0.1 sınır değer üzerinde kalması sonucu ASR açısından zararlı olarak değerlendirilmiştir.

%15 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları 7 günlük değerlendirmeler sonucunda %0.0482 boy uzama görülürken, 14 günde %0.0702, 1 ayda %0.0781, 2 ayda %0.0923, 3 ayda %0.0997, 4 ayda %0.0976, 6 ayda %0.1138, 9 ayda %0.1173, ve 12 ay sonunda %0.1212 oranında boy uzama tespit edilmiştir. NYFC 15 numunelerde katkısız harç çubuklarına göre boy uzama oranını azaltmada 6 aylık okumalarda %32.6, 12 aylık okumalarda %31.2 etkili

olduğu gözlemlenmiştir. Fakat NYFC15 harç çubukları 12 ay sonunda yapılan değerlendirmeler sonucunda boy uzama oranları ASTM C 227 de belirtilen sınır değer üzerinde olduğundan dolayı ASTM C 227 'ye göre ASR açısından zararlı olarak değerlendirilmiştir.

%20 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarında yapılan değerlendirmeler sonucunda 7 günlük boy uzama değeri %0.0456, 14 günlük boy uzama değeri %0.064, 1 aylık boy uzama değeri %0.0672, 2 aylık boy uzama değeri %0.0767, 2 aylık boy uzama değeri %0.0767,3 aylık boy uzama değeri %0.085, 4 aylık boy uzama değeri %0.0877, 6 aylık boy uzama değeri %0.0994, 9 aylık boy uzama değeri %0.1029 ve 12aylık boy uzama değeri %0.1068 olarak tespit edilmiştir. Şahit numuneye kıyasla boy uzama değerlerinde 6 aylık ve 12 aylık okumalar sonucunda %39.3 azalma görülmüştür. Fakat NYFC20 harç çubukları, ASTM C 227 de verilen sınır değerlere göre değerlendirildiğinde ASR açısından zararlı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.10. Tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları boy uzama grafiği

Çizelge 3.2. Tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarının boy uzama oranları (%)

Gün	7	14	30	60	90	120	180	270	360
ŞN	0,0401	0,0578	0,0895	0,1176	0,1354	0,1505	0,1689	0,1724	0,1761
NYFC5	0,0637	0,0843	0,0934	0,1025	0,1135	0,1155	0,1264	0,1299	0,1337
NYFC10	0,0500	0,0781	0,0828	0,0925	0,0982	0,0958	0,1172	0,1207	0,1245
NYFC15	0,0482	0,0702	0,0781	0,0923	0,0997	0,0976	0,1138	0,1173	0,1212
NYFC20	0,0456	0,0640	0,0672	0,0767	0,0850	0,0877	0,0994	0,1029	0,1068

Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harç Çubukları ASR Boy Uzamaları

%5 oranında çimento yerine tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikamesi yapılarak hazırlanan numunelerde Şekil 3.11. ve Çizelge 3.3. de görüldüğü gibi 7 günde %0.061, 14 günde %0.0878, 1. Ay sonunda %0.0894, 2. ay sonu okumalarda %0.0991, 3. ay sonu okumalarda %0.1052, 4. ay sonunda %0.1104, 6. ay sonunda %0.1194, 9. ay sonunda %0.1228, 12. ay sonunda ise %0.1266 boy uzama göstermiş olup zararlı bölgede kalmıştır. Şahit numuneye kıyasla 6 aylık okumalar sonucunda, %5 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin boy uzama oranında %29.33 azalma gözlemlenmiştir. 12 aylık okumalar sonucunda ise tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarının boy uzamasında %28.11 oranında azalma görülmüştür. %5 oranında çimento yerine ikame edilen tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu harç çubuklarının boy uzamasında yaklaşık %29 düşüş sağlasa da ASTM C 227 'ye göre 6 aylık değerlendirmeler sonucu belirtilen %0.1 boy uzama genleşmesi sınır değeri üzerinde kaldığı için ASR açısından zararlı olarak sınıflandırılmıştır.

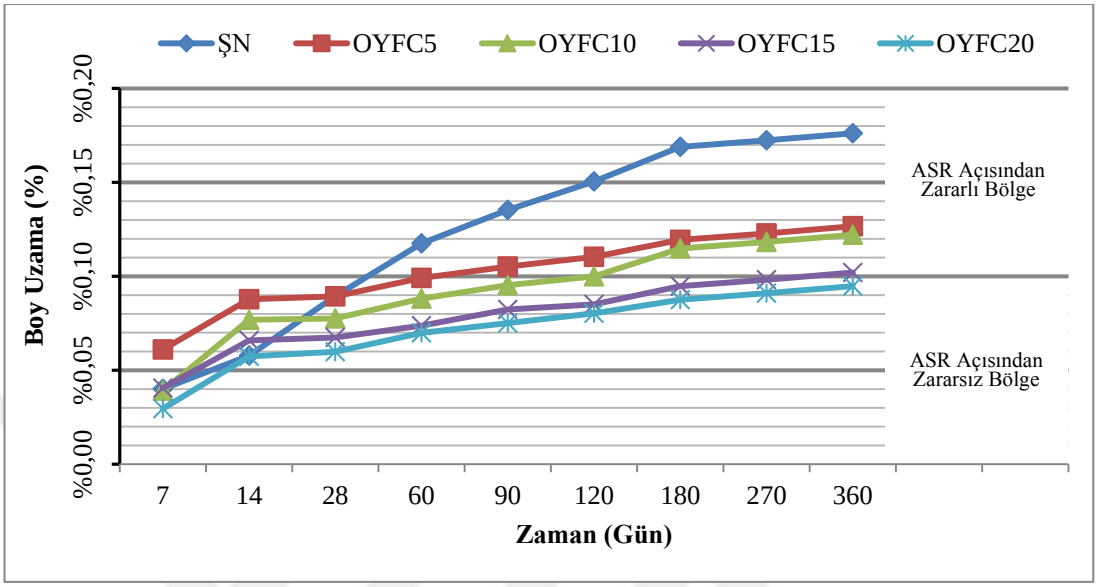
%10 oranında tane dağılımı optimizasyonu yapılmış yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan çimento harç çubuklarında 7. Günlük boy uzama değerleri %0.0392, 14. gün %0.0769, 1 ay sonunda %0.0776, 2 ay sonunda %0.0881, 3 ay sonunda %0.0953, 4

ay sonunda %0.100, 6 ay sonunda %0.1148, 9 ay sonunda %0.1183 ve 12 ay sonunda %0.1221 olarak tespit edilmiş ve Şekil 3.11. ve Çizelge 3.3. de elde edilen sonuçlar verilmiştir. Okunan değerler sonucunda tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarında şahit numuneye kıyasla 6 aylık boy uzama oranında %32.1 düşüş gözlemlenmiş, 12 aylık boy uzama oranında 30.7 düşüş gözlemlenmiştir. %10 oranında tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları 6 ay sonunda yapılan okumalar ve değerlendirmeler sonucunda ASTM C 227 de belirtilen %0.1 sınır genleşme değeri üzerinde kaldığı için ASR açısından zararlı olarak kabul edilir.

Şekil 3.11. ve Çizelge 3.3. ‘de de verilen, %15 oranında çimento yerine tane dağılım optimizasyonu yapılmış yüksek fırın cürufu ikame edilen harç çubuklarında yapılan okumalar sonucunda 7 günde %0.0405, 14 günde %0.0659, 1 ayda %0.0674, 2 ayda %0.0738, 3 ayda %0.0823, 4 ayda %0.0851, 6 ayda %0.0948, 9 ayda %0.982, ve 12 ayda %0.1020 boy uzama oranı tespit edilmiştir. Şahit numunede okunan değerlere kıyasla çimento yerine %15 optimize yüksek fırın cürufu ikamesi yapılması 6 aylık okumalarda boy uzama oranını %43.89, 12 ay sonu yapılan okumalar sonucunda %42.09 düşürdüğü tesit edilmiştir. Yapılan okumalar sonucunda %15 oranında çimento yerine tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikamesi yapılması boy uzama oranını ASTM C 227 de 6. ay sonu okumada %0.1 olarak belirtilen sınır değerin altına düşürdüğü gözlemlenmiş ve OYFC15 harç çubukları ASTM C 227 ‘ye göre ASR açısından zararsız olarak değerlendirilmiştir.

%20 çimento yerine tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikame edilen çimento harç çubuklarında Şekil 3.11., Çizelge 3.3. ‘de görüldüğü gibi, 7 günlük okumalar sonucunda %0.296 boy uzama, 14 günde %0.0574, 1. Ay sonunda %0.0599, 2. ay sonu okumalarda %0.0699, 3. ay sonu okumalarda %0.0751, 4. ay sonunda %0.0803, 6. ay sonunda %0.0876, 9. ay sonunda %0.0910, 12. ay sonunda ise %0.0948 boy uzama tespit edilmiş olup, 6 ay ve 12 ay sonunda yapılan okumalar neticesinde ASTM C 227 de belirtilen 6 aylık süreçte %0.1 boyca genleşme sınır değeri altında boy uzama değeri elde edildiği için OYFC20 çimento harç çubukları alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olarak sınıflandırılmıştır. Şahit numune ile kıyaslandığı zaman %20 çimento yerine tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın

cürufu ikame edilmesi 6 aylık sonuçlarda %48.16, 12 aylık sonuçlarda %46.19 boy uzama oranını düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 3.11. Tane dağılımı optimize edilmiş Yüksek Fırın Cürufu İkameli Harç çubukları boy uzama grafiği

Çizelge 3.3. Tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarının boy uzama oranları (%)

Gün	7	14	30	60	90	120	180	270	360
ŞN	0,0401	0,0578	0,0895	0,1176	0,1354	0,1505	0,1689	0,1724	0,1761
OYFC5	0,0610	0,0878	0,0894	0,0991	0,1052	0,1104	0,1194	0,1228	0,1266
OYFC10	0,0392	0,0769	0,0776	0,0881	0,0953	0,1000	0,1148	0,1183	0,1221
OYFC15	0,0405	0,0659	0,0674	0,0738	0,0823	0,0851	0,0948	0,0982	0,1020
OYFC20	0,0296	0,0574	0,0599	0,0699	0,0751	0,0803	0,0876	0,0910	0,0948

%15 ve %20 optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubukları ASR açısından zararlı bölgede iken, optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli

harç çubukları ASR açısından zararsız bölgede kalmıştır. Bu sonuç bize, tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufunun, tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufuna göre ASR 'yi önlemede daha etkin olduğunu göstermektedir.

Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Çubuklarının ASR Açısından Değerlendirilmesi

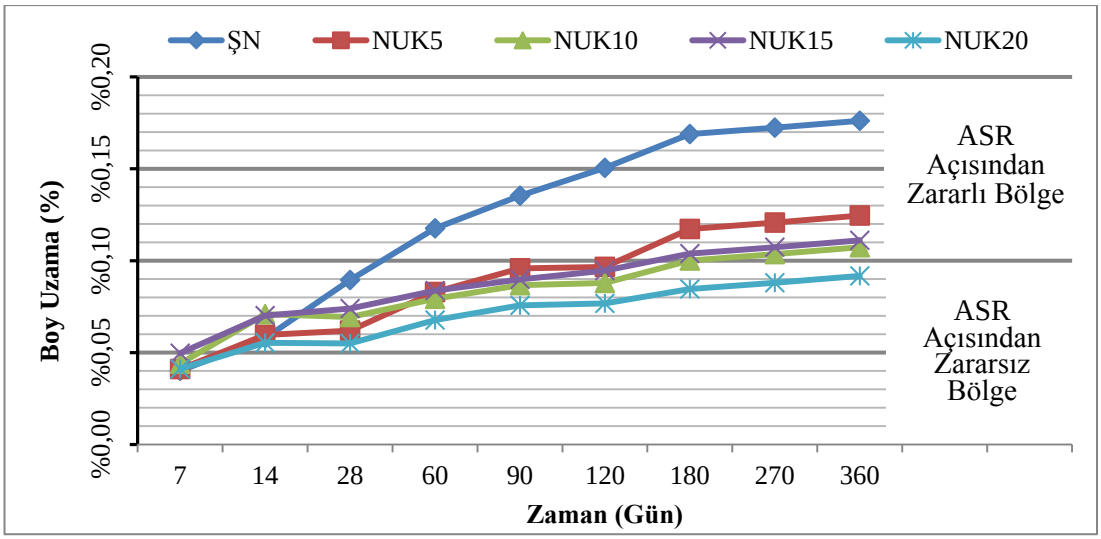
%5 çimento yerine tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikame edilen çimento harç çubuklarında 7 günlük okumalarda %0.0410 , 14 günlük okumalarda %0.0596, 1 aylık okumalarda %0.0619 , 2 aylık okumalarda %0.0829 , 3 aylık okumalarda %0.0958 , 4 aylık okumalarda %0.0966 , 6 aylık okumalarda %0.1173 , 9 aylık okumalarda %0.1207 ve 12 aylık okumalar sonucunda ise %0.1245 boy uzama tespit edilmiştir. %5 oranda tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikamesi yapılması, şahit numuneye göre boy uzama oranında 6 aylık okumalar sonucunda %30.6, 12 aylık okumalar sonucunda ise %29.3 azalma sağlamş fakat ASTM C 227 de alkali silika reaksiyonu için tehlike sınırını belirtilen %0,1 boy uzama sınır değerinin altına düşmede yeterli olamamış ve 6 aylık okumalar sonucu sınır değerin üzerinde kalarak alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olarak değerlendirilmiştir.

Çimento yerine %10 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarında yapılan okumalarda 7 günde, %0.0439, 14 günde %0.0709, 1 ayda %0.0693, 2 ayda %0.0793, 3 ayda %0.0866, 4 ayda %0.0879, 6 ayda %0.1001, 9 ayda %0.1035 ve 12 ayda %0.1073 boy uzama değerleri elde edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda şahit numuneye kıyasla boy uzama oranlarında 6 aylık okumalarda %40.75, 12 aylık okumalarda 39.1 azalma olduğu gözlemlenmiştir. ASTM C 227 harç çubuğu deney metodunda 6 aylık süre sonunda yapılan okumalardan elde edilen boy uzama oranı %0.1 den büyük olan çimento harç çubukları alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olarak kabul edilmekte olup, yapılan deneyler sonucu %10 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olarak kabul edilir.

%15 çimento yerine tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikame edilmiş çimento harç çubuklarında Çizelge 3.4. ve Şekil 3.12. ‘de görüldüğü gibi 7 günlük boy uzama değeri %0.0358, 14 günlük boy uzama değeri %0.0562, 1 aylık boy uzama değeri %0.0601, 2 aylık boy uzama değeri %0.0698, 3 aylık boy uzama değeri %0.0759, 4 aylık boy uzama değeri %0.0807, 6 aylık boy uzama değeri %0.0899, 9 aylık boy uzama değeri %0.0934 ve 12 aylık boy uzama değeri %0.0972 olarak bulunmuştur. Çimento harç çubuklarına çimento yerine %15 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikamesi yapılması 6 aylık boy uzama değerinde %46.8, 12 aylık boy uzama değerinde %44.8 azalma sağlamış ve çimento harç çubuklarının ASTM C 227 ‘ye göre 6 aylık okumalar sonucunda alkali silika reaksiyonu için sınır değer olarak belirlenen %0.1 boy uzama oranının altında kalarak alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olarak sınıflandırılmıştır.

%20 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli numunelerde Şekil 3.12. Çizelge 3.4. ‘de görüldüğü üzere, 7 günde %0.0411, 14 günde %0.0553, 1. Ay sonunda %0.0550, 2. ay sonu okumalarda %0.0677, 3. ay sonu okumalarda %0.0757, 4. ay sonunda %0.0768, 6. ay sonunda %0.0846, 9. ay sonunda %0.0880, 12. ay sonunda ise %0.0917 boy uzama değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Harç çubuklarına %20 normal uçucu kül ikamesi yapılması katkısız şahit numunede belirlenen boy uzama değerinin 6 aylık okumalar sonucunda %49.9 oranında düşürdüğü, 12 ay sonunda ise %47.9 oranında düşüş olduğu gözlemlenmiş olup, harç çubuklarına %20 uçucu kül ikamesi yapılması ASTM C 227 ‘ye göre alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olan numunelerin alkali silika reaksiyonu açısından zararsız hale getirmede etkili olmuş ve boy uzama oranını ASTM C 227 de sınır değer olarak belirtilen %0.1 değerinden daha aşağıda olmasını sağlamıştır.

%15 ve %20 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubukları, tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubukları karşılaştırıldığında yüksek fırın cürufuna göre uçucu külün ASR yi azaltmada daha etkin olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12. Tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları boy uzama grafiği

Çizelge 3.4. Tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubuklarının boy uzama oranları (%)

Gün	7	14	30	60	90	120	180	270	360
ŞN	0,0401	0,0578	0,0895	0,1176	0,1354	0,1505	0,1689	0,1724	0,1761
NUK5	0,0410	0,0596	0,0619	0,0829	0,0958	0,0966	0,1173	0,1207	0,1245
NUK10	0,0439	0,0709	0,0693	0,0793	0,0866	0,0879	0,1001	0,1035	0,1073
NUK15	0,0497	0,0701	0,0740	0,0837	0,0898	0,0946	0,1038	0,1073	0,1111
NUK20	0,0411	0,0553	0,0550	0,0677	0,0757	0,0768	0,0846	0,0880	0,0917

Tane Dağılımı Optimize Edilmiş Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Çubuklarının ASR Açısından Değerlendirilmesi

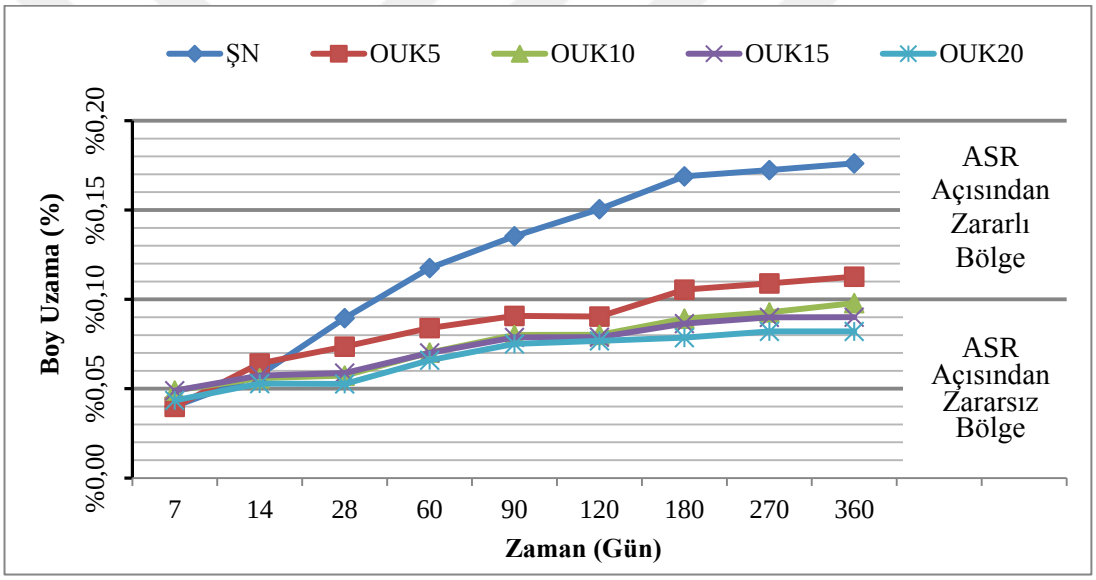
%5 oranında çimento yerine tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikamesi yapılan çimento harç çubuklarında Şekil 3.13. ve Çizelge 3.5. ‘de görüldüğü gibi 7 günde %0.0399, 14 günde %0.0641, 1. ay sonunda %0.0736, 2. ay sonu okumalarda

%0.0839, 3. ay sonu okumalarda %0.0908, 4. ay sonunda %0.0904, 6. ay sonunda %0.1055, 9. ay sonunda %0.1089, 12. ay sonunda ise %0.1127 boy uzama değerleri tespit edilmiştir. Şahit numuneye göre boy uzama değerlerinde 6. ay yapılan ölçümler sonucunda çimento harç çubuklarında izlenen boy uzama oranında %37.5, 12 ay sonunda yapılan ölçümlerde ise %35.9 azalma olduğu kaydedilmiştir. %5 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları ASTM C 227 de verilen sınır değerin üzeride boy uzama oranına sahip olduğu için alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olarak sınıflandırılmıştır.

%10 çimento yerine tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarında yapılan boy uzama ölçümleri sonucunda Şekil 3.13. ve Çizelge 3.5. de görüldüğü gibi, 7 günde, %0.0491, 14 günde %0.0559, 1 ayda %0.0573, 2 ayda %0.0702, 3 ayda %0.0801, 4 ayda %0.0802, 6 ayda %0.0892, 9 ayda %0.0927 ve 12 ayda %0.0979 boy uzama değerleri elde edilmiştir. %10 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları şahit numuneye göre 6 aylık okumalar sonucunda %47.18, 12 aylık okumalar sonucu %44.40 oranında azalma göstermiştir. ASTM C 227 de 6 aylık okuma sonucu boy uzama oranı %0.1 in üzerinde olan numuneler alkali silika reaksiyonu için zararlı kabul edilmekte ve %10 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikame edilmiş çimento harç çubuklarının boy uzama değeri bu sınır değer altında kalarak alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olarak kabul görmüştür.

Çimento yerine %15 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikamesi yapılarak hazırlanan çimento harç çubuklarında şahit numuneye göre boy uzama oranlarında yaklaşık %48.8 azalma olmuş ve 7 günde %0.0489, 14 günde %0.0573, 1 ayda %0.0587, 2 ayda %0.0700, 3 ayda %0.0788, 4 ayda %0.0789, 6 ayda %0.864, 9 ayda %0.0899 ve 12 ayda %0.900 boy uzama değerleri elde edilmiştir. Şahit numune ile kıyaslandığı zaman 6 aylık ve 12 aylık okumalar sonucunda tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubuklarının boy uzamalarında %48.8 azalma meydana gelmiştir. ASTM C 227 de verilen sınır değerler ve 6 aylık okumalar sonucunda %15 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olarak değerlendirilmiştir.

%20 oranda tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubuklarında 7 günde %0.0435, 14 günde %0.0529, 1 ay sonunda bulunan boy uzama değeri %0.0527, 2 ay sonunda bulunan boy uzama değeri %0.0660, 3 ay sonunda bulunan boy uzama değeri %0.0751, 4 ay sonunda bulunan boy uzama değeri %0.0768, 6 ay sonunda bulunan boy uzama değeri %0.0786, 9 ay sonunda bulunan boy uzama değeri %0.0821, 12 ay sonunda bulunan boy uzama değeri %0.0822, olarak Şekil 3.13. ve Çizelge 3.5. 'de de verildiği gibi belirlenmiştir. %20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları boy uzama oranı 6 aylık ve 12 aylık okumalar sonucu Şekil 3.13. 'de görüldüğü gibi ASTM C 227de belirtilen %0.1 boy uzama sınır değeri altında kalmış ve alkali silika reaksiyonu için zararsız olarak kabul edilmiştir. Şahit numune ile kıyasladığımız zaman ise 6 aylık ve 12 aylık boy uzama ölçümleri sonucu boyca genleşme oranında % 53.4 azalma tespit edilmiştir.



Şekil 3.13 Tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubukları boy uzama grafiği

%10, %15 ve %20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları tane dağılımı optimize edilmemiş çimento harç çubuklarına göre ASR etkisini azaltma açısından daha etkin olarak görülmüştür.

%10 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubukları ASR açısından zararlı bölgede kalırken tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubukları zararsız bölgede kalmıştır.

Çizelge 3.5. Tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarının boy uzama değerleri (%)

Gün	7	14	30	60	90	120	180	270	360
ŞN	0,0401	0,0578	0,0895	0,1176	0,1354	0,1505	0,1689	0,1724	0,1761
OUK5	0,0399	0,0641	0,0736	0,0839	0,0908	0,0904	0,1055	0,1089	0,1127
OUK10	0,0491	0,0559	0,0573	0,0702	0,0801	0,0802	0,0892	0,0927	0,0979
OUK15	0,0489	0,0573	0,0587	0,0700	0,0788	0,0788	0,0864	0,0899	0,0900
OUK20	0,0435	0,0529	0,0527	0,0660	0,0751	0,0768	0,0786	0,0821	0,0821

NYFC ikameli ve OYFC İkameli Çimento Harç Çubukları ASR Boy Uzamaları

%5 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları ve aynı oranda tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubukları kıyaslandığında, tane dağılımı optimize edilmiş ikameli harç çubuklarında boyc uzama oranı tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubuklarına göre 6 aylık ölçümler sonucunda %5.5, 12 aylık ölçümler sonucunda %5.3 daha az genleşme göstermiş olup, tane dağılımı optimize edilsin yada edilmesin %5 yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarının boy uzama oranını ASTM C 227 de verilen %0.1 boyca genleşme sınır değeri altına düşmesine yeterli olmamış ve her iki kategorideki harç çubukları da ASR açısından zararlı olarak değerlendirilmiştir.

%10 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli ve %10 oranında tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubukları karşılaştırıldığında, tane dağılımınım optimize edilmesi boy uzama oranını %2 azalma sağlamıştır fakat %10 ikame oranında tane dağılımı optimize edilmesi

ASTM C 227 ye göre güvenli bölge olan %0.1 boyca genleşme sınır değer altında kalmasında etkili olamamıştır.

%15 oranında tane dağılımı optimize edilmiş ve optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarında okunan boyca genleşme değerlerinde tane dağılımı optimizesi yapılması boyca genleşme oranında %15,8'lik bir azalma sağlamış ve tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubukları ASTM C 227 ye göre zararlı bölgede kalırken, tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları ASTM C 227 ye göre güvenli bölgede kalarak ASR açısından zararsız olarak sınıflandırılmıştır.

%20 oranında yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları karşılaştırıldığında, Şekil 3.14. 'de görüldüğü gibi tane dağılımı optimize edilmiş harç çubukları tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubuklarına göre boyca genleşme oranında %11,2'lik bir azalma sağlamıştır. Tane dağılımı optimize edilmemiş %20 ikameli harç çubukları ASTM C 227 ye göre zararlı bölgede kalırken, tane dağılımı optimize edilmiş harç çubukları güvenli bölgede kalmış ve alkali silika reaksionu açısından zararsız olarak değerlendirilmiştir.

NUK İkameli ve OUK İkameli Çimento Harç Çubukları ASR Boy Uzamaları

%5 oranında uçucu kül ikameli harç çubuklarında tane dağılımı optimize edilmesi boyca genleşme oranını %9,4 azalma sağladığı gözlemlenmiştir. Tane dağılımı optimizasyonu yapılması boyca genleşme oranını düşürmesine rağmen, ASTM C 227 ye göre alkali silika reaksiyonu açısından zararsız bölgede kalmaya yeterli olmamış ve %5 tane dağılımı optimize edilmiş ve edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları alkali silika reaksiyonu açısından zararlı bölgede kalmıştır.

%10 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları karşılaştırıldığında tane dağılımı optimize edilmesinin boyca genleşme oranını %16,1 azaltmıştır. %10 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubukları ASTM C

227 ye göre zararlı bölgede iken, tane dağılımı optimize edilmiş harç çubukları ASTM C 227 ye göre alkali silika reaksiyonu açısından zararsız bölgede kalmıştır.

%15 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli ve tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları karşılaştırıldığında tane dağılımı optimizasyonu yapılması boyca genleşme değerini %7,4 oranında azaltmıştır. Şekil 3.14. ‘de de görüldüğü gibi %15 uçucu kül ikameli harç çubukları ASTM C 227 ye göre zararsız bölgede kalmıştır.

Çimento yerine %20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları , %20 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubuklarına göre %10,4 daha az boyca genleşme oranı göstermiş olup, tane dağılımı optimize edilsin yada edilmesin %20 uçucu kül ikameli harç çubukları ASTM C 227 de belirtilen sınır değer altında kalarak Şekil 3.14. ’de görüldüğü gibi alkali silika reaksiyonu açısından zararsız bölgede kalmıştır.

NYFC İkameli ve NUK İkameli Çimento Harç Çubuklarının ASR Açısından Karşılaştırılması

Tane dağılımı optimize edilmemiş %5 yüksek fırın cürufu ve %5 uçucu kül ikameli harç çubukları karşılaştırıldığında 6 aylık yüksek fırın cürufuna göre uçucu kül ikameli harç çubuklarının boyca genleşme değerinde %7,2 azalma görülürken, 12 ay sonunda bulunan boyca genleşme oranları incelendiğinde yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarına göre uçucu kül ikameli harç çubukları % 6,8 daha az genleşme gösterdiği gözlemlenmiştir. Her iki takım harç çubuklarınında ASTM C 227 ‘ye göre zararlı bölgede kaldığı gözlemlenmiştir.

%10 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubukları karşılaştırıldığında, optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları, tane dağılımı optimizesi yapılmamış yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarına göre boyca genleşme değerinde 6 ay sonunda %14,6 lık bir düşüş sağlarken, 12 aylık okuma sonunda %13,8 lik bir farkla azalma göstermiştir. Fakat ayrı ayrı harç çubuklarında %10

oranında tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ve tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikamesi yapılması harç çubuklarının ASTM C 227 de belirtilen sınır değer altında kalmasını sağlayamamış ve alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olarak değerlendirilmiştir.

%15 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubuklarında ise 6 aylık okumalarda uçucu kül ikameli numuneler 6 aylık boyca genleşme değerinde yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarına göre %21 daha az genleşme gösterirken, 12 aylık okumalar sonucunda %19,8 daha az boyca genleşme göstermiştir. Tane dağılımı optimize edilmeyen %15 yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları ASTM C 227 ye göre ASR açısından zararlı bölgede kalırken, %15 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları belirtilen sınır değer altında kalarak alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olarak değerlendirilmiştir.

%20 oranında çimento yerine tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubuklarında ise, yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarına göre uçucu kül ikamesi yapılmış harç çubukları 6 aylık okumalar sonucunda %15, 12 aylık okumalar sonucunda ise %14,1 boyca genleşmede azalma gösterdiği görülmüştür. %20 çimento yerine tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları ASTM C 227 de belirtilen sınır değerin üzerinde kalarak alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olarak değerlendirilirken, tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli harç çubukları sınır değer altında kalarak alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olarak değerlendirilmiştir.

OYFC İkameli ve OUK İkameli Çimento Harç Çubukları ASR Boy Uzamaları

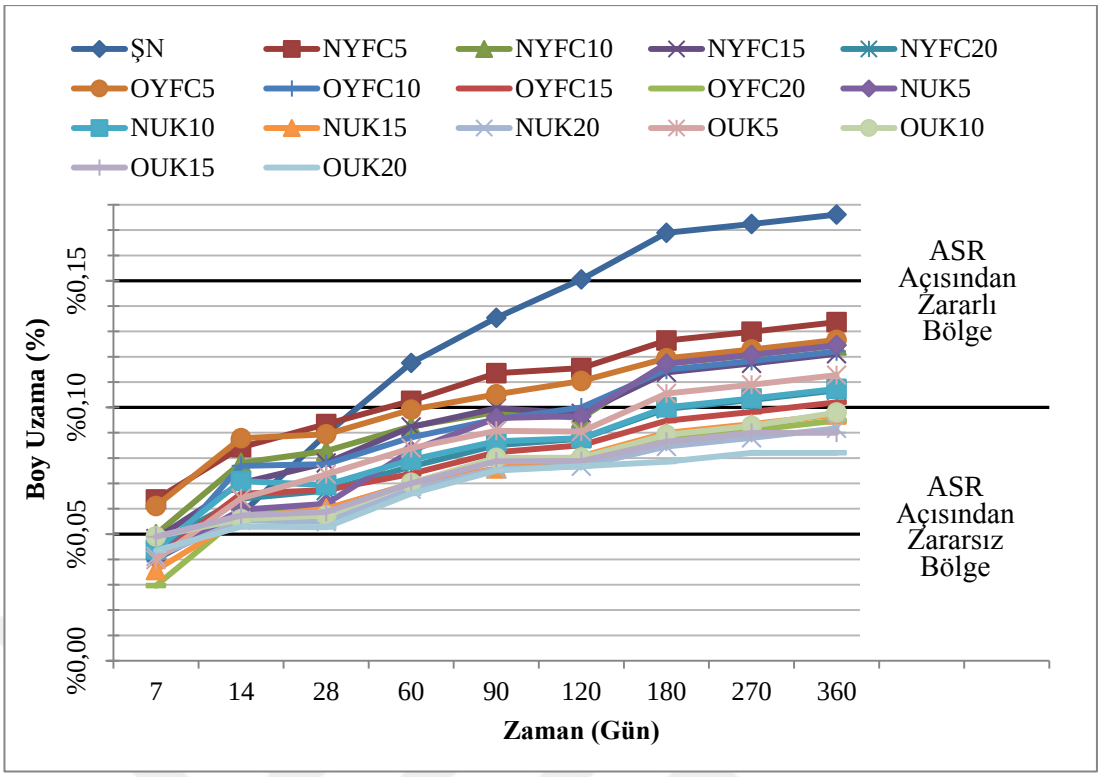
Tane dağılımı optimize edilmiş harç çubuklarında ise, %5 ikameli uçucu kül içeren harç çubukları yüksek fırın cürufu içeren harç çubuklarına göre 6 aylık okumalar sonucunda %11,6 daha az, 12 aylık okumalar sonucunda ise %11 daha az boyca genleşme göstermiş olup, %5 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül veya %5 oranında tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikamesi yapılması sonucu elde edilen boyca genleşme oranlarının ASTM C 227 de belirtilen

%0,1 değerinden az olmadığı ve alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olduğu tespit edilmiştir.

%10 oranında çimento yerine tane dağılımı optimize edilerek ikame edilen yüksek fırın cürufu ve %10 oranında çimento yerine tane dağılımı optimize edilerek ikame edilen uçucu kül içerikli harç çubuklarında ise uçucu kül içerikli olan numunelerde 6 aylık okumalar sonucunda boyca genleşme oranında %22,3, 12 aylık okumalar sonucunda %19,8 düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Her iki takım harç çubukları değerlendirildiğinde, %10 oranında çimento yerine yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan numuneler ASTM C 227 ye göre alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olarak değerlendirilirken, çimento yerine %10 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikamesi yapılması harç çubuklarını alkali silika reaksiyonu açısından zararsız hale getirmiştir.

%15 tane dağılımı optimize edilmiş harç çubukları karşılaştırıldığında ise, uçucu kül ikamesi yapılması yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarına göre 6 ay sonunda %8,8, 12 ay sonunda ise %11,7 daha az boyca genleşme sağladığı görülmüştür. %15 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli harç çubukları ve %15 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları, boyca genleşme değerini ASTM C 227 de belirtilen sınır değer altına düşürmede etkili olmuş ve alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olarak değerlendirilmiştir.

%20 oranında tane dağılımı optimize edilmiş harç çubuklarında uçucu kül ikameli harç çubukları yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarına göre 6 aylık okumalar sonucu %10,3, 12 aylık okumalar sonucunda ise %13,4 daha az genleşme göstermiştir. %20 ikame ile hazırlanan tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ve tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu içerikli numunelerden elde edilen boyca genleşme değerleri sonucu her iki numunede ASTM C 227 ye göre alkali silika açısından zararsız olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.14. Harç çubukları boy uzama oranları grafiği

ASTM C 227 'ye göre; yapılan çalışmalar ve değerlendirmeler sonucunda, çimento harçlarına yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikamesi yapılmasının boyca genleşme oranını düşürdüğü göstermiştir. Tane dağılımı optimize edilmemiş numunelerden çimento yerine %15 ve %20 oranında uçucu kül ikameli harç çubukları ASTM C 227 ye göre zararsız, tane dağılımı optimize edilmiş numunelerde ise, %15 ve %20 oranında yüksek fırın cürufu ikameli ve %10, %15 ve %20 oranında uçucu kül ikameli harç çubukları alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olarak değerlendirilmiştir. En düşük boyca genleşme oranı çimento yerine %20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubuklarında gözlemlenmiştir.

Çimento yerine ikame edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu külün tane dağılımının optimize edilmesinin boyca genleşme oranını düşürmede daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, ASR 'yi önlemede uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun dolgu etkisinin daha etkili olduğunu göstermektedir.

3.2.ASR Etkisinde YFC ve UK İkameli Harç Çubuklarının Mikro Yapısal Özellikleri

Tarayıcı elektron mikroskobu ile harç örneklerinin farklı yerlerinden alınan örneklerin SEM yardımı ile harçların mikro yapı analizleri yapılmıştır. SEM görüntülerinde ASR ürünlerinin genellikle boşluklarda agrega-çimento hamuru arasında yer aldığı görülmüştür. Farklı morfolojik yapıya sahip ASR ürünleri yaklaşık olarak x100 veya daha büyük görüntülerde net olarak görülebilmiştir. ASR ürünlerinin üzerinde nokta tarama olarak EDX (Enerji Dispersive/ X-Ray Analysis) ile kimyasal oksit analizi yapılmıştır.

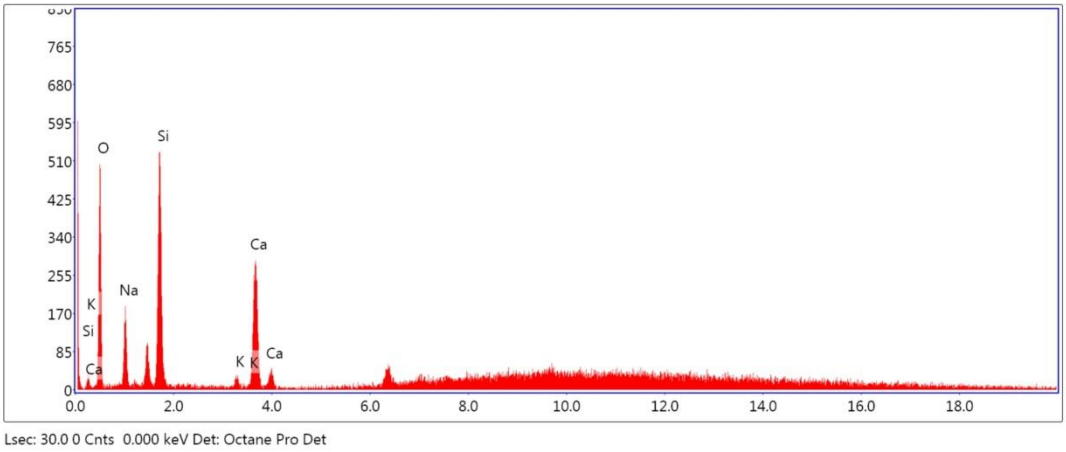
Şahit (% 0 İkameli) Çimento Harç Çubuklarının SEM Analizi

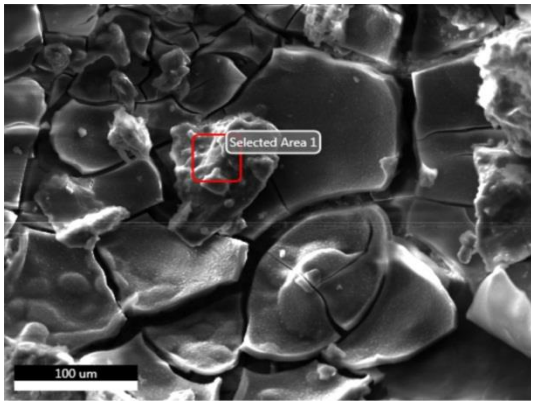
Yapılan incelemeler sonucunda şahit numune üzerinde X130 yakınlaşmada alkali silika oluşumları açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.16.a.). Oluşan bu yapının kimyasal analizi Şekil 3.15. 'de verilmiştir. Şahit numune üzerinde yaklaşık olarak 100µm parçalar halinde kapak atması şeklinde ASR bulgularına rastlanılmış ve yaklaşık 700µm büyüklükte oluşan bir ASR etkisi görülmüştür.

İkame yapılmayan şahit çimento harç çubuklarından alınan örneklerin SEM görüntülerinde ASR ürünlerinin genellikle boşluklarda, agregaların çatlakları ve agrega çimento hamuru arasında yer aldığı görülmüştür. Katkısız harç çubuklarının farklı morfolojik yapıya sahip olan masif ASR ürünleri yaklaşık olarak x100 ve daha büyük görüntülerde net olarak görülebilmiştir (Şekil 3.16.) .

Şekil 3.16. 'ya göre referans örneklerinde ASR ürünlerine sıkça rastlanılmıştır. ASR ürünleri genellikle kapak atma şeklinde çatlamalar oluşturmuştur. Çatlamalar genellikle boşluklu yapıda başlayarak boşluk etrafında yayılmışlardır. ASR çatlakları bu boşlukların oluştuğu bölgelerde görünen çatlaklar 2 ile 10µm arasında yoğunlaşmıştır. ASR nin oluşturduğu boşluklu yapı ise 500 ile 1000µm civarında olmuştur. Şekil 3.16.a. x130 büyütme, Şekil 3.16.b. x250 şekil c x500 şekil d. x4000 büyütmelerde ASR nin genleşme sonucu oluşturduğu çatlak ve boşluklu yapıları net

olarak görülebilmektedir. Şekil 3.16.a.'da x130 büyütmede ASR nin varlığı 330µm mikron dağılımında mısır patlağı şeklinde görülmüştür. Ayrıca aynı şekilde kapak atma şeklinde çatlaklarda gözlemlenmiştir. Şekil 3.16.b. de x250 büyütmede kapak atma şeklindeki ASR çatlakları daha net görülmüştür. Şekil 3.16. 'da bulunan çatlaklar genel olarak bakıldığında harita çatlağı ve x4000 büyütmede jel oluşumu gözlemsel olarak ASR'nin varlığını net olarak işaret etmektedir. Bu boşlukların jelin genleşmesi sonucu oluştuğu söylenebilir. Şekil 3.16.c. de 50 ile 25 µm çapında masif ürünler yapraklanma şeklinde betonu tahrip etme etkisi göstermiştir.



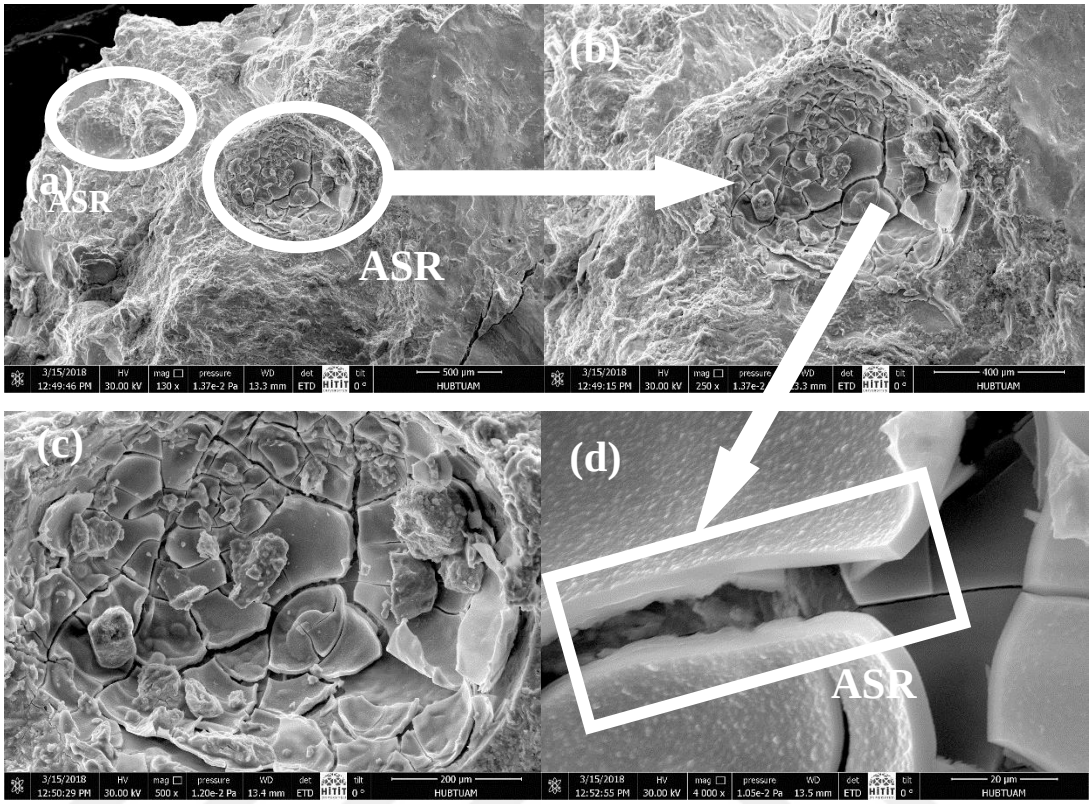


Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	26.4
Si O2	50.2
K 2O	1.2
Ca O	22.2

Şekil 3.15. Şahit numune üzerinde ASR oluşumu kimyasal analizi

Şekil 3.15. 'de görüldüğü gibi Şekil 3.15.b. de görülen kare içerisindeki bölgede yapılan EDX analizi sonucu, 14 gün ASR etkisinde kalmış referans harç çubuğu örneklerinin EDX (Energy Dispersive Spectroscopy) analizlerine göre SiO_2 %50.2,

Na_2O %26.4, CaO %22.2 K_2O %1.2 oranlarında kimyasal oksitler tespit edilmiştir. En yüksek oksit miktarı %50.2 oranla SiO_2 çıkmıştır.

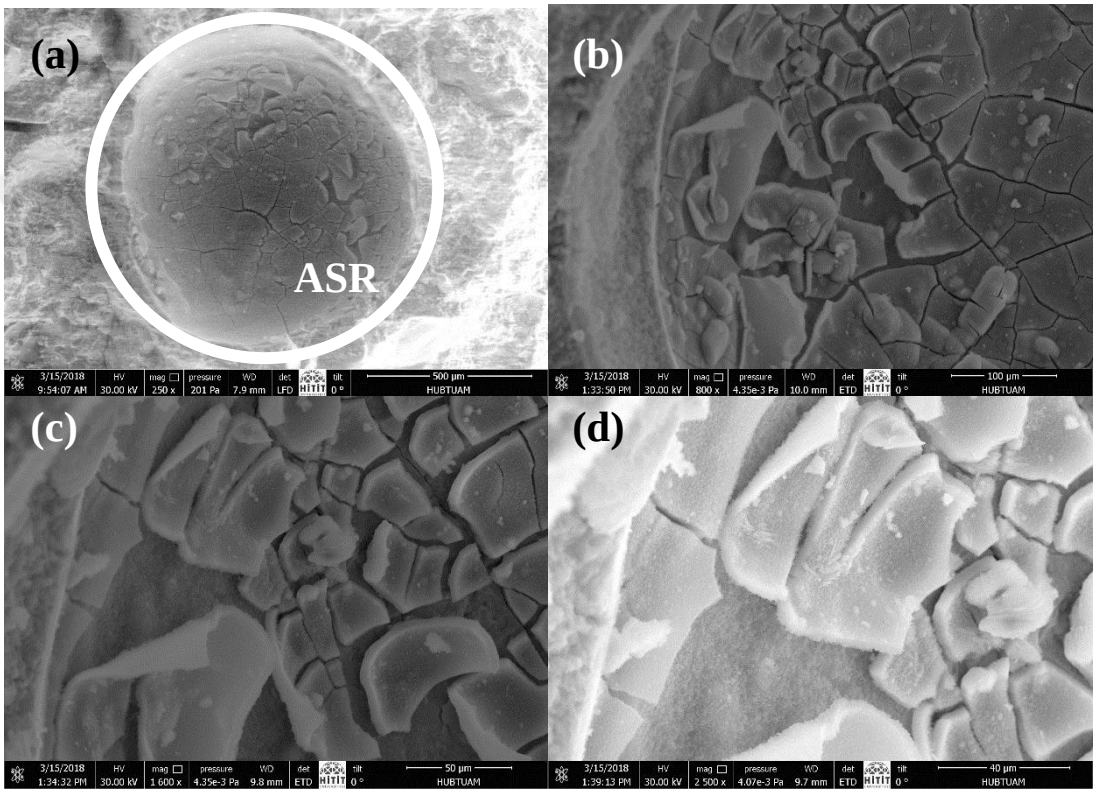


Şekil 3.16. Şahit numune SEM görüntüsü x130 büyütme (a), x250 büyütme(b), x500 büyütme (c), x4000 büyütme (d)

Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş %10 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harç Çubuklarının SEM Analizi

Şekil 3.17. 'de verilen %10 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuğuna ait SEM görüntüsü incelendiğinde, x250 yakınlaşmada alkali silika bulgularına rastlanılmıştır. Yapılan incelemelerde rastlanılan alkali silika bulgularının kimyasal analizi Şekil 3.18. de verilmiştir. Tane dağılımı optimize edilmemiş %10 yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarından alınan örneklerin SEM görüntüleri üzerinde yapılan incelemelerde ASR oluşumları boşluklarda, agrega çatlakları ve agrega çimento hamuru arasında

oluştuğu görülmüştür. Şahit numunelerde x100 ve daha büyük yaklaşımlarda ASR etkileri gözlemlenebilirken, tane dağılımı optimize edilmemiş %10 yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarında x250 ve daha büyük görüntülerde oluşumlar gözlemlenebilmiştir. %10 tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubuklarında kapak atma şeklinde çatlamalar oluşmuştur. Çatlamalar genellikle boşluklu yapılarda oluşmuş ve boşluk etrafında yayılmışlardır.

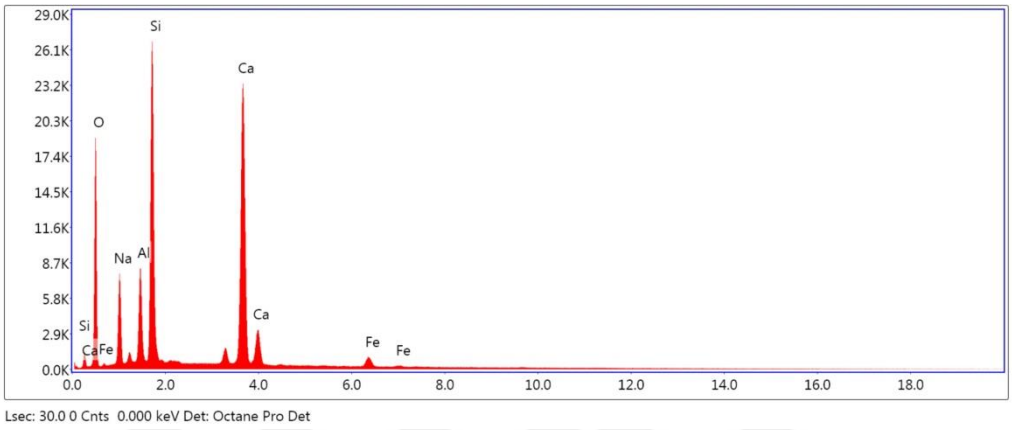


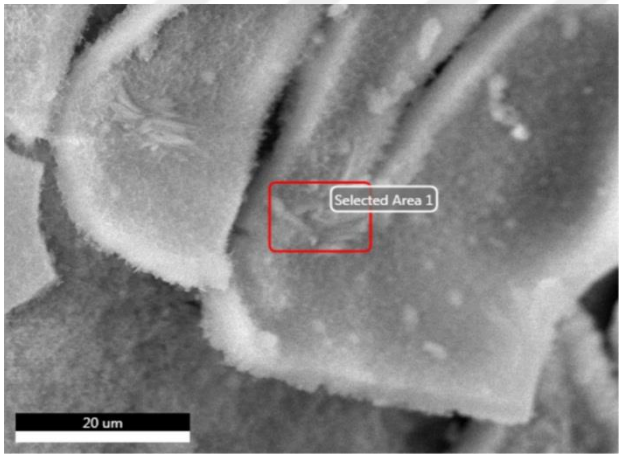
Şekil 3.17. %10 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x250 büyütme (a), x800 büyütme(b), x1600 büyütme (c), x5000 büyütme (d)

İncelemeler sonucu bulunan çatlakların 2 ile 14 µm arasında yoğunlaştığı görülmüştür. ASR nin oluşturduğu boşluklu yapı 500 ile 750 µm arası boşluklu yapı oluşmuştur. Şekil 3.17.a'da da görüldüğü gibi oluşan çatlaklar harita çatlağı şeklinde

oluşmuş ve ASR nin varlığı yaklaşık 650µ büyüklüğündeki boşlukta yaklaşık 15-20µm büyüklüklerde kapak atması şeklinde görüntülenmiştir.

Sonuç olarak, %10 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmasının çimento harç çubuklarında ASR etkisini azalttığı mikroyapısal olarak gözlemlenebilmiştir.



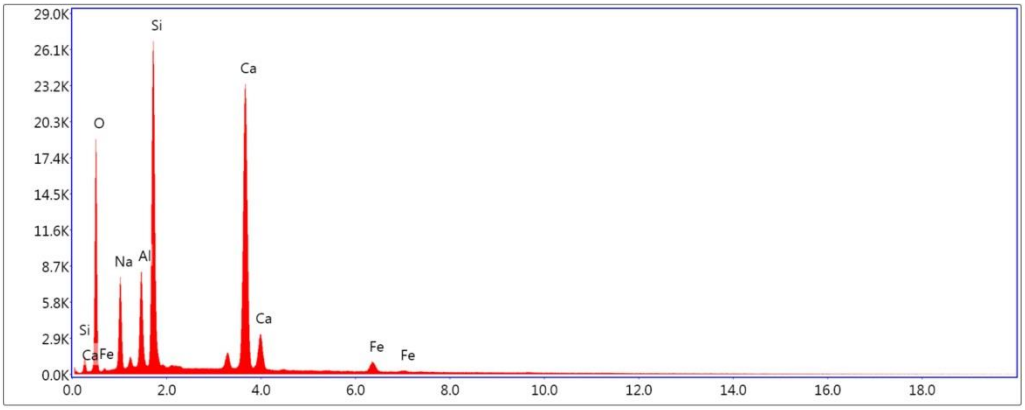


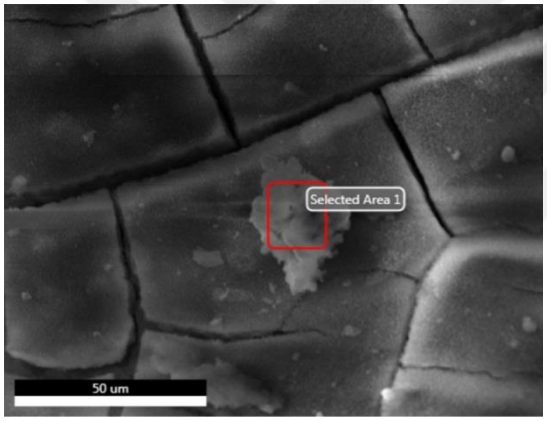
Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	22.0
Al 2O3	12.1
Si O2	35.3
Ca O	27.7
Fe 2O3	0.4

Şekil 3.18. NYFC10 kimyasal analizi (a), NYFC10 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), NYFC10 Kimyasal analizi (c)

Şekil 3.18. ‘de verilen kırmızı bölge üzerinde yapılan EDX analizi sonucunda, en fazla oluşan oksit %41.3 oranla SiO2 olduğu ve %26.4 CaO2, %19.0 Na2O, %12.3 Al2O3, %0.7 Fe2O3 oluştuğu görülmüştür. Şahit numuneye göre SiO2 oranında

azalma ve Na2O oranında artış gözlemlenmiştir. Şekil 3.19. ‘da verilen aynı numune üzerinde farklı noktada yapılan EDX kimyasal analizi sonucu çimento iç yapısında benzer kimyasal değerler görülmüştür.





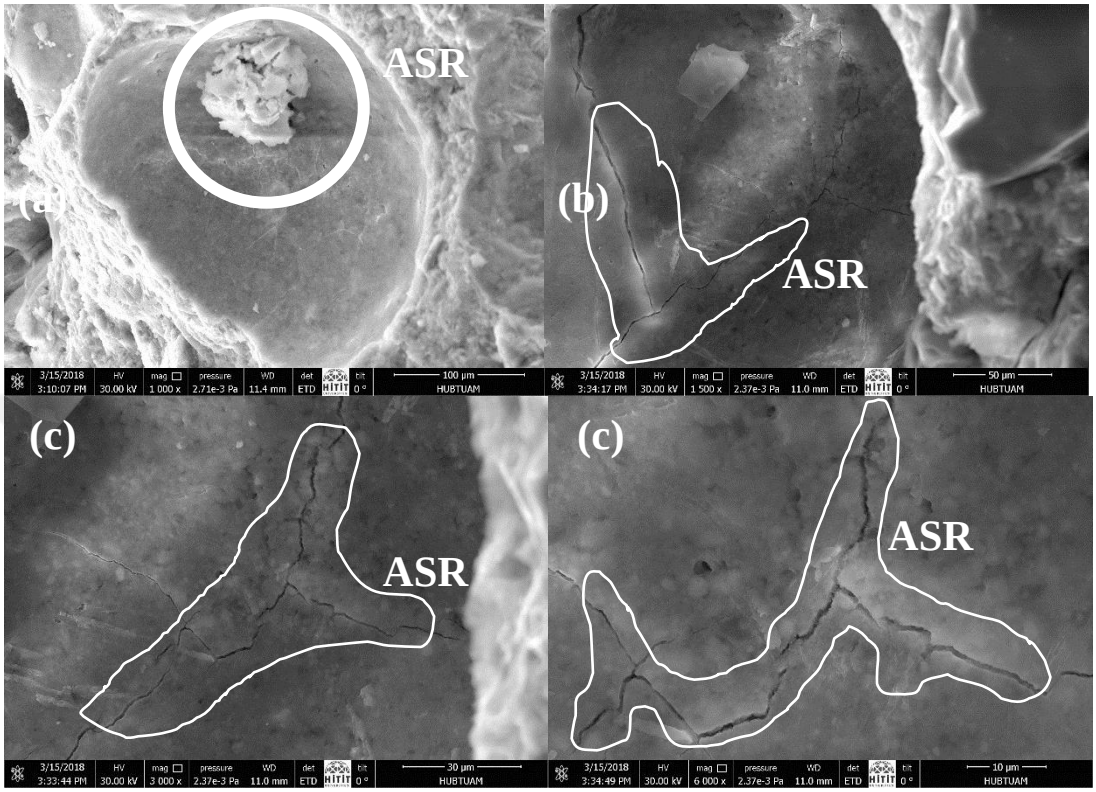
Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	19.0
Al 2O3	12.3
Si O2	41.3
Ca O	26.7
Fe 2O3	0.7

Şekil 3.19. NYFC10 Kimyasal analizi (a), NYFC10 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), NYFC10 Kimyasal analizi (c)

Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş %20 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harç Çubuklarının SEM Analizi

%20 çimento yerine tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarında Şekil 3.20.a. ’da görüldüğü gibi, x1000 büyütmede mısır patlağı, x1500 yakınlaşmada harita çatlağı şeklinde ASR bulgularına rastlanılmıştır. %20 çimento yerinde tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli

harç çubuklarında yaklaşık 85µm büyüklüğünde mısır parlağı şeklinde (Şekil 3.20.a) ASR oluşumu ve yaklaşık 40 ile 400µm uzunluklarda 3-4µm kalınlığında harita çatlakları şeklinde (Şekil 3.20.a - 3.20.b) ASR etkisi görülmüştür.

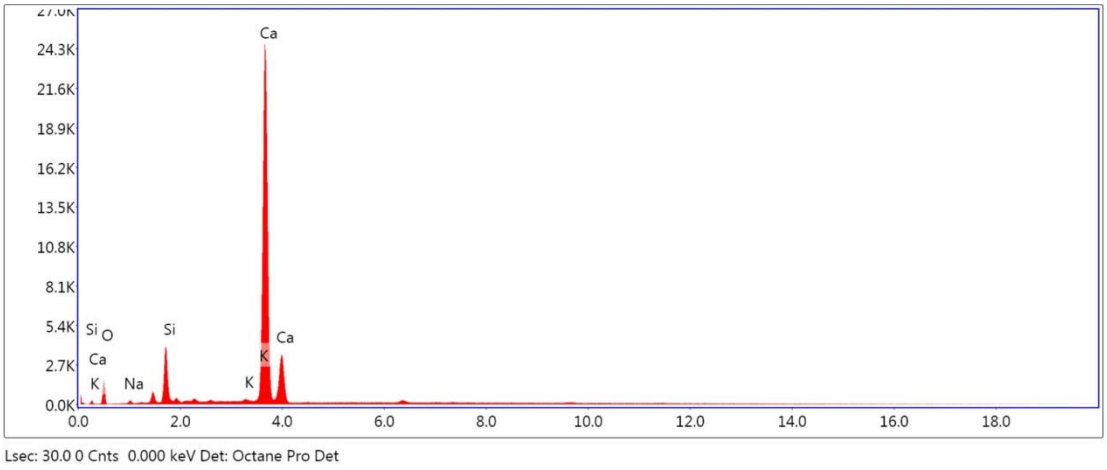


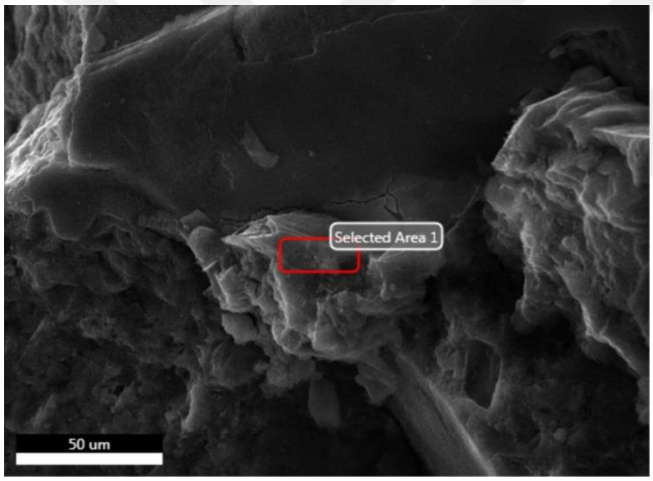
Şekil 3.20. %20 tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x1000 yakınlaştorma (a), x1500 büyütme (b), x3000 büyütme(c), x6000 büyütme (c)

Tane dağılımı optimize edilmemiş harç çubuklarında elde edilen görüntüler sonucunda, şahit numune ve tane dağılımı optimize edilmemiş %10 yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarına göre ASR oluşumlarına daha az rastlanılmıştır.

Tane dağılımı optimize edilmemiş %20 yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarında, mısır patlağı şeklinde ASR oluşumları ve harita çatlakları boşluklu yapılarda olduğu görülmüştür. ASR 'nin varlığı 80µm üzerindeki boşluklarda harita

çatlağı şeklinde, 300µm ve üzeri boşluklarda harita çatlağı şeklinde ve mısır patlağı şeklinde görüntülemiştir.

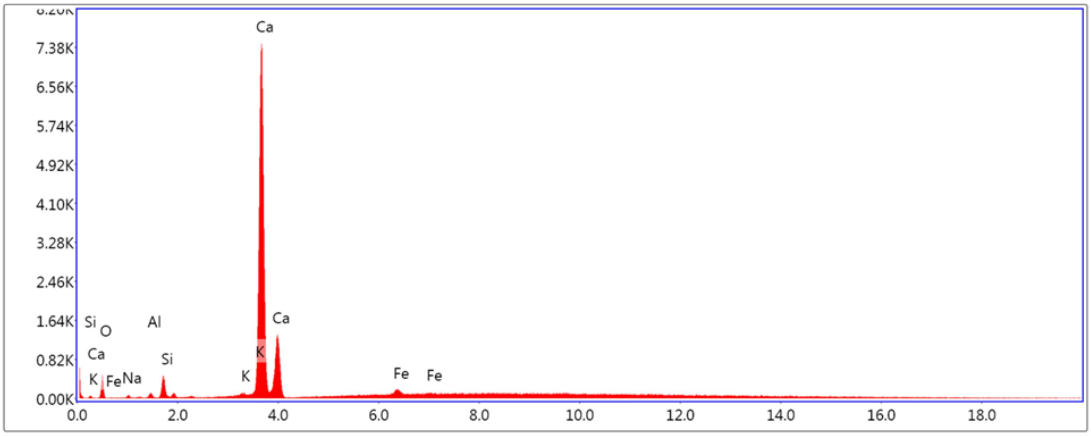


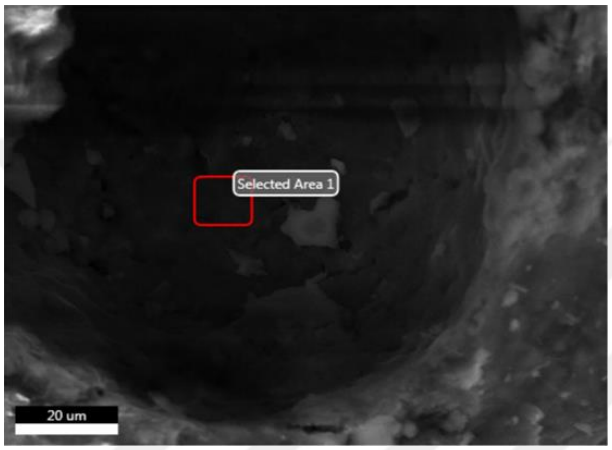


Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na2O	1.2
SiO2	14.7
K2O	0.2
CaO	83.9

Şekil 3.21. NYFC20 Kimyasal analizi (a), NYFC20 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), NYFC20 Kimyasal analizi (c)

Şekil 3.21. ‘de ve Şekil 3.22. ‘de verilen kırmızı bölgeler üzerinde yapılan EDX analizi sonucunda yaklaşık olarak aynı değerler bulunmuş olup, %14.7 SiO2, %83,9 CaO2, %1.2 Na2O, %12.3 ve %0.2 K2O oksitleri oluştuğu görülmüştür. Şahit numuneye göre SiO2 oranında bir azalma ve CaO2 oranında artış gözlemlenmiştir.



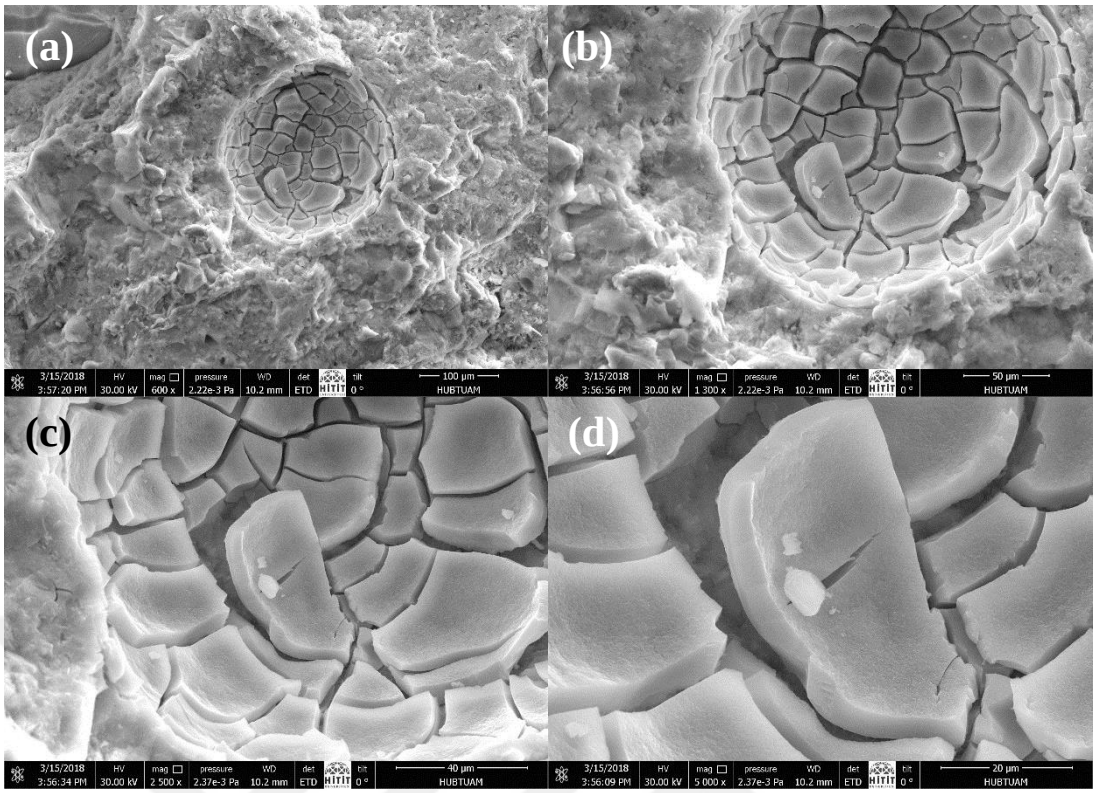


Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	2.2
Al 2O3	1.4
Si O2	6.2
K 2O	0.8
Ca O	88.3
Fe 2O3	1.1

Şekil 3.22. NYFC20 Kimyasal analizi (a), NYFC20 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), NYFC20 Kimyasal analizi (c)

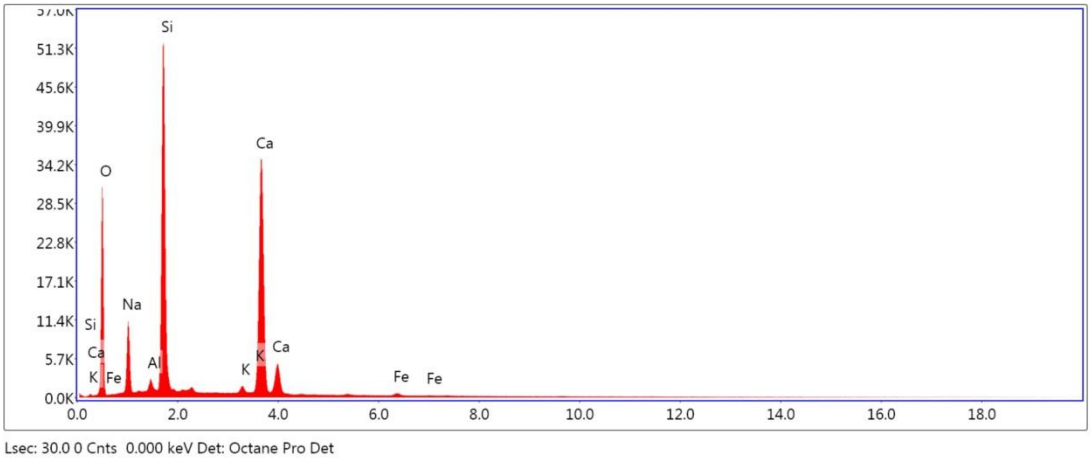
Tane Dağılımı Optimize Edilmiş %10 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harç Çubuklarının SEM Analizi

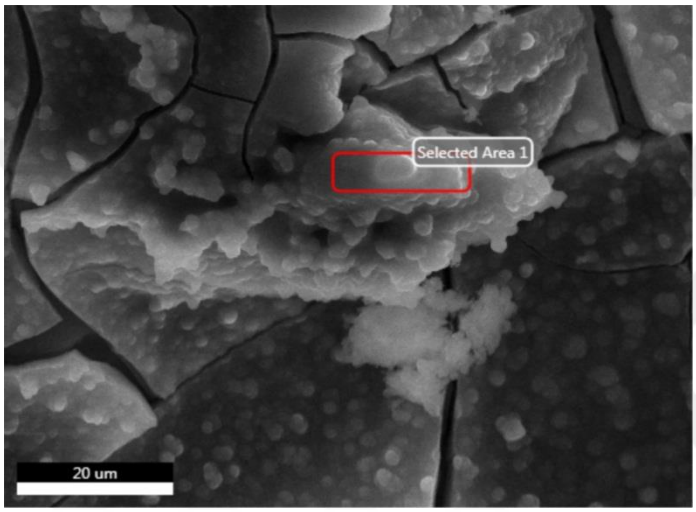
Tane dağılımı optimize edilmiş %10 yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubukları üzerinde yapılan incelemeler sonucunda Şekil 3.23.a. 'da görüldüğü gibi x600 yakınlaşmada ASR oluşumlarına rastlanılmıştır. Oluşan bu ASR yapısının Şekil 3.24.b. de verilen nokta üzerinde yapılan EDX incelemeleri sonucu elde edilen kimyasal analizi ve oksit tablosu şekil 3.24. 'de verilmiştir. İncelenen numunede ASR etkisinin, yaklaşık olarak 10-75µm arası büyüklükte parçalar halinde kapak atması şeklinde oluştuğu gözlemlenmiş ve yaklaşık 500µm büyüklükte oluşan bir ASR etkisi görülmüştür.



Şekil 3.23. %10 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x600 büyütme (a), x1300 büyütme(b), x2500 büyütme (c), x5000 büyütme (d)

Tane dağılımı optimize edilmiş %10 yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarından ASR oluşumlarının genellikle agrega çatlakları ve boşluklarda oluştuğu SEM görüntülerinde tespit edilmiştir. Bu çimento harç çubuklarında oluşan ASR ürünleri x600 ve daha büyük görüntülerde net olarak görülebilmektedir. Başka bir ifadeyle x600 büyütmenin altında ASR ürünleri görüntülemek oldukça güçtür. Bu sonuç bize göstermiştir ki, Tane dağılımı optimize edilmiş çimento harç çubuklarında oluşan ASR ürünleri incelendiğinde, tane dağılımı optimize edilmemiş %10 yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarına göre daha küçük ve daha az oluşum gösterdiği tespit edilmiştir.

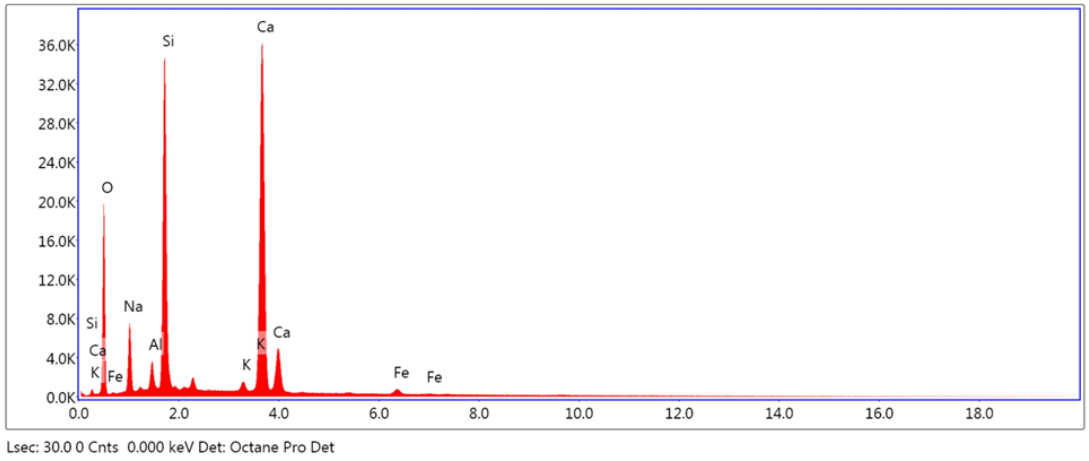


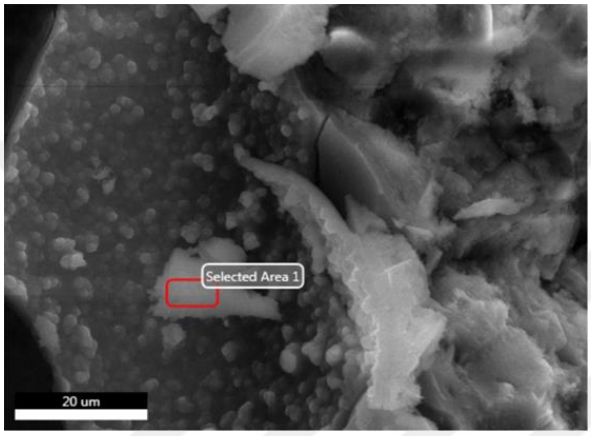


Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	18.8
Al 2O3	1.4
Si O2	50.4
K 2O	0.4
Ca O	28.9
Fe 2O3	0.2

Şekil 3.24. OYFC10 Kimyasal analizi (a), OYFC10 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), OYFC10 Kimyasal analizi (c)

Şekil 3.24. ‘de verilen kırmızı bölge üzerinde yapılan EDX analizi sonucunda, en fazla oluşan oksit %50.4 oranla SiO2 olduğu ve %28.9 CaO, %18.8 Na2O, %1.4 Al2O3, %0.2 Fe2O3 oluştuğu görülmüştür. Şahit numuneye göre CaO2 oranında artış ve Na2O oranında azalma gözlemlenmiştir. Şekil 3.25.b. ‘de verilen noktada yapılan okumalarda yaklaşık aynı sonuçlar elde edilmiş fakat SiO2 ve CaO oranlarında ASR çatlağı yoğun olan bölgelerde değişimler gözlenmiş, çatlağın yoğun olduğu kısımlarda SiO2 oranında artış, CaO2 oranında azalma görülmüştür.



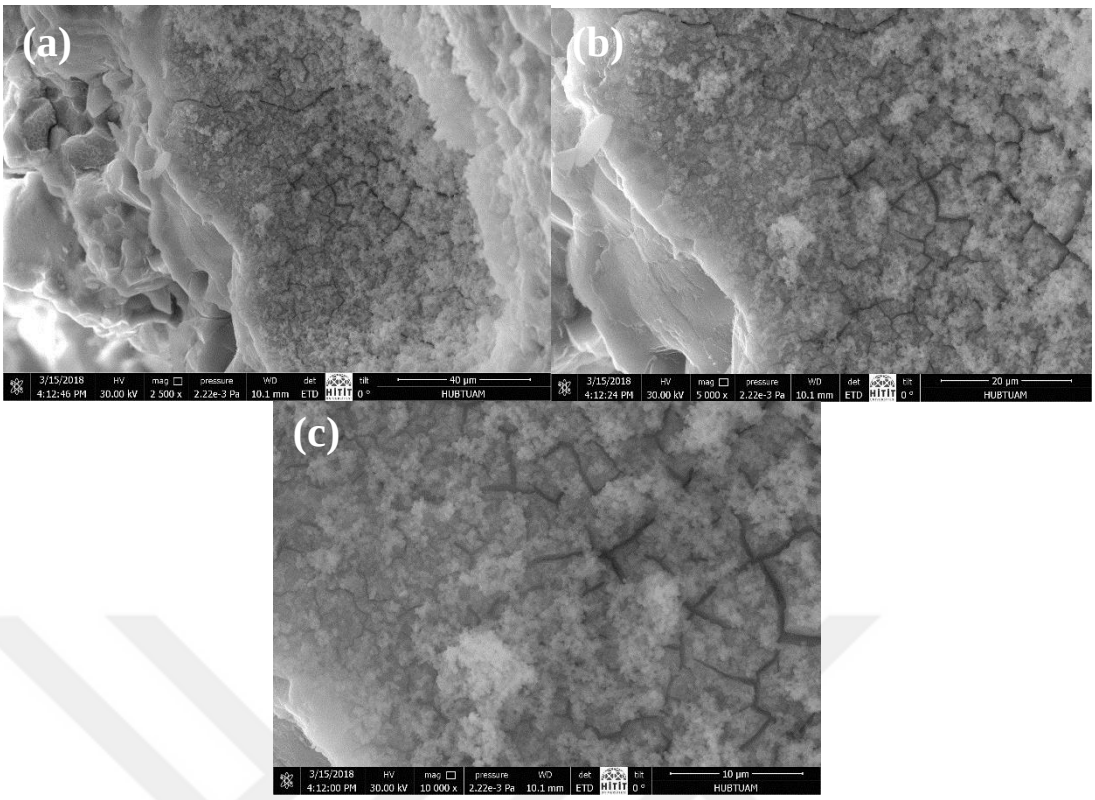


Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	15.8
Al 2O3	2.9
Si O2	42.7
K 2O	0.4
Ca O	37.9
Fe 2O3	0.4

Şekil 3.25. OYFC10 Kimyasal analizi (a), OYFC10 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), OYFC10 Kimyasal analizi (c)

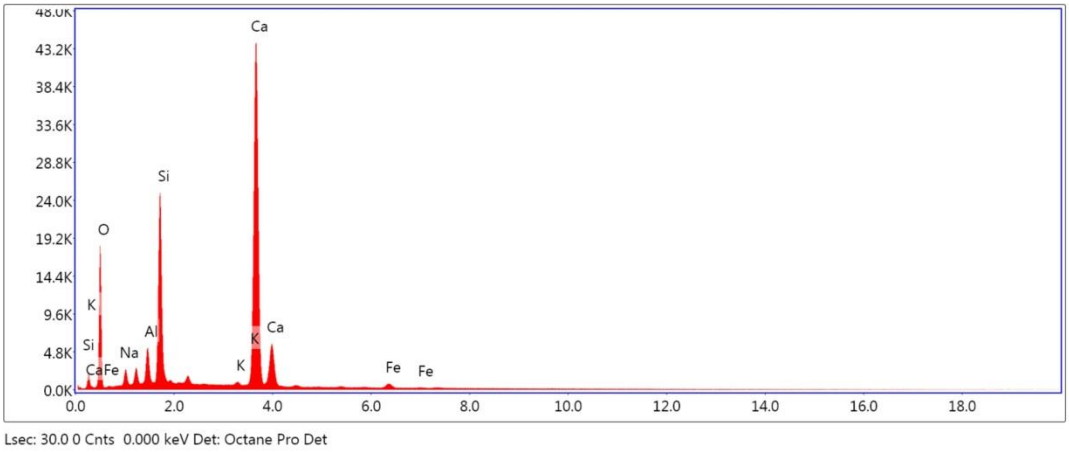
Tane Dağılımı Optimize Edilmiş %20 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harç Çubuklarının SEM Analizi

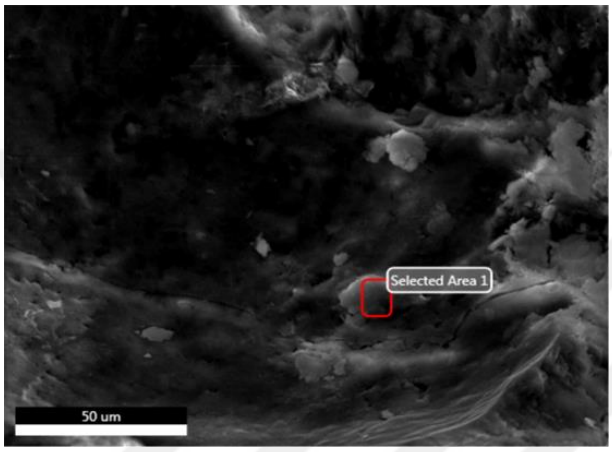
Tane dağılımı optimize edilmiş %20 yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubukları SEM ile incelendiğinde, şekil .. da görüldüğü gibi x2500 yakınlaşmada ASR etkileri görülmüştür. Yaklaşık 140µm çapında oluşan boşluklarda meydana gelen alkali silika reaksiyonu etkileri harita çatlağı şeklinde 1-1.5µm kalınlıklarda oluşmuş ve kapak atması şeklinde meydana geldiği ekil 3.26.b. ‘de de görülmektedir. Şekil 3.26. ‘da verilen SEM görüntülerinde oluşan ağ şeklindeki yapının alkali silika jelleri olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.26. %20 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x2500 büyütme (a), x5000 büyütme(b), x10000 büyütme (c)

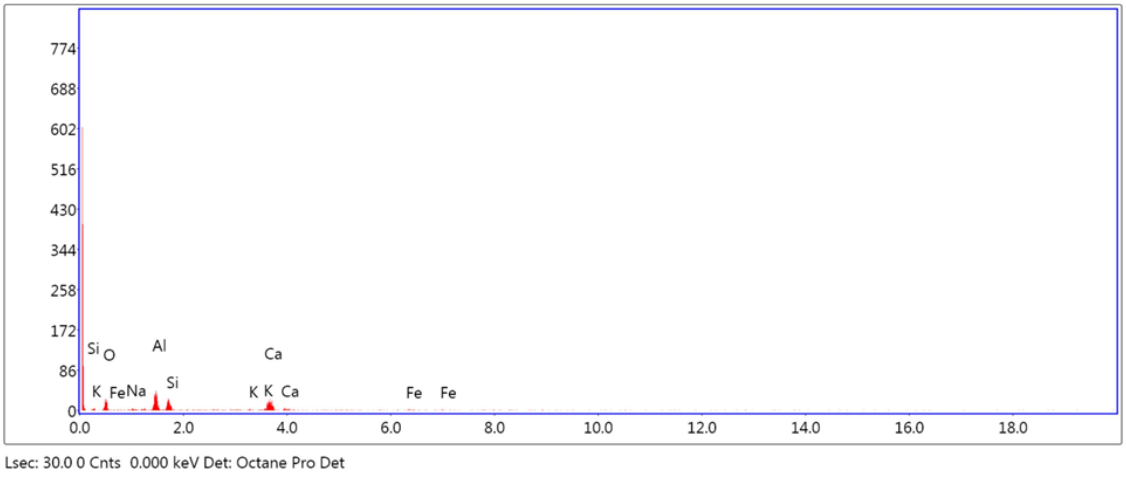
Tane dağılımı optimize edilmiş %20 yüksek fırın cürufu ikameli çimento harç çubuklarından alınan örnekler üzerinde Şekil 3.27.b. ‘de kırmızı nokta üzerinde belirlenen alanda yapılan EDX analizi sonuçları Şekil 3.27.a. ‘da verilmiştir. EDX analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde %52.2 CaO, %34.8 SiO2, %6.4 NaO2, %6.1 Al2O3 ve %0.5 Fe2O3 oksitleri içerdiği bulunmuştur. ASR ürünleri oluşan bölgede yapılan nokta analizinde ise Al2O3 oranında artış gözlemlenmiş, CaO oranında azalma görülmüştür.

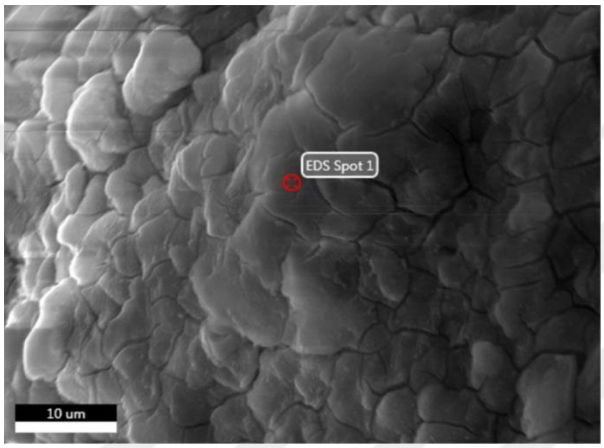




Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na2O	6.4
Al 2O3	6.1
Si O2	34.8
CaO	52.2
Fe2O3	0.5

Şekil 3.27. Şekil 3.27. OYFC20 Kimyasal analizi (a), OYFC20 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), OYFC20 Kimyasal analizi (c)





Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	7.5
Al 2O3	39.6
Si O2	29.9
K 2O	1.0
Ca O	20.4
Fe 2O3	1.7

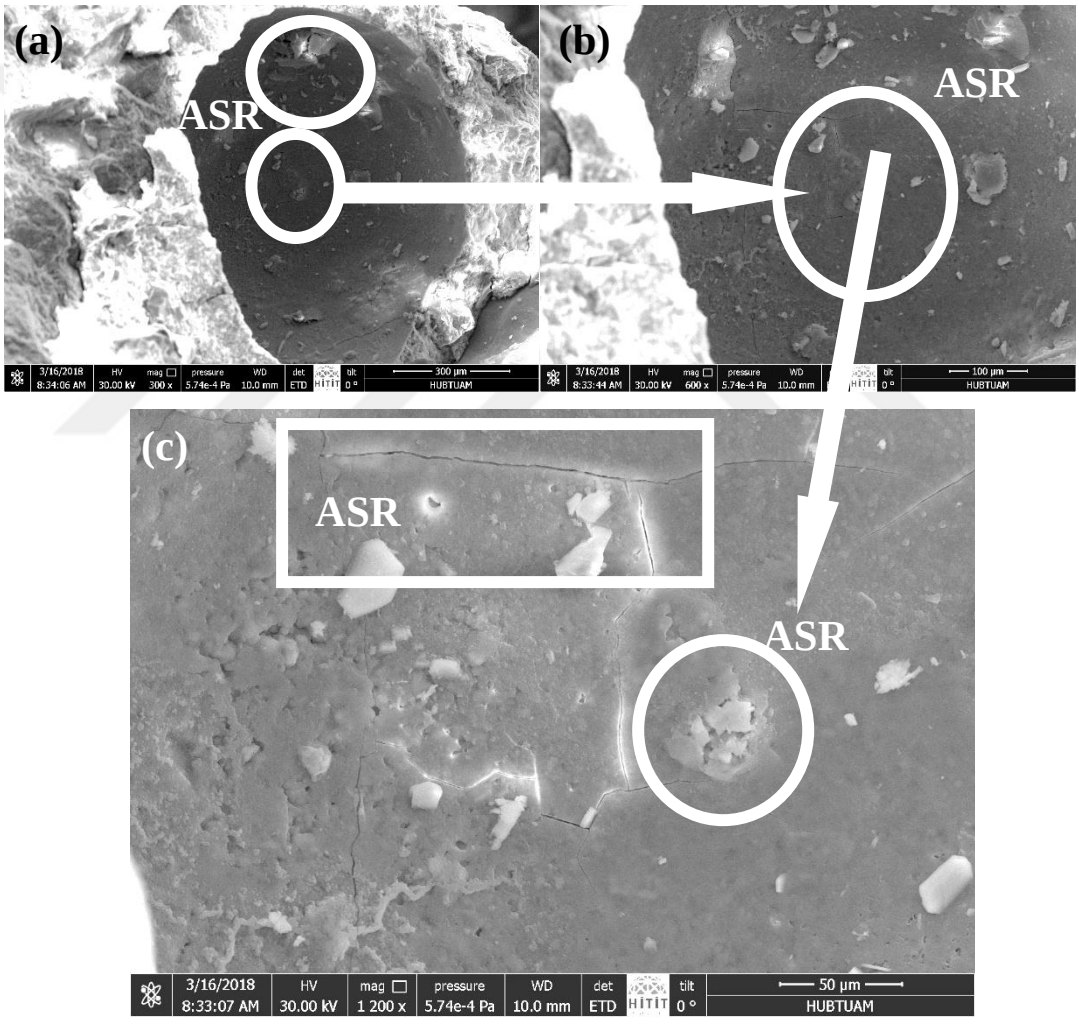
Şekil 3.28. OYFC20 Kimyasal analizi (a), OYFC20 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), OYFC20 Kimyasal analizi (c)

Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş %10 Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Çubuklarının SEM Analizi

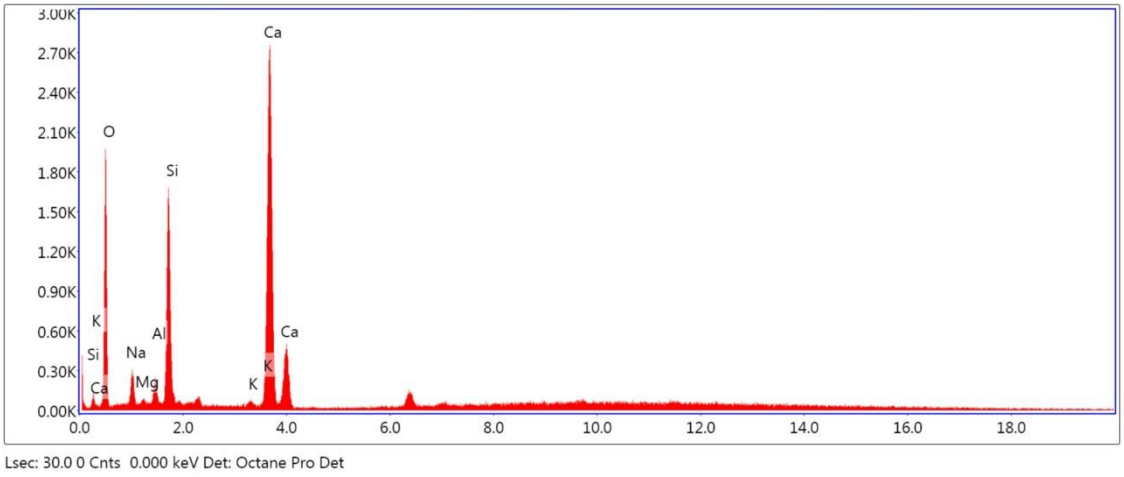
Tane dağılımı optimize edilmemiş %10 uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarına ait SEM görüntüsü Şekil 3.29. ‘da verilmiştir. Şekil 3.29. ‘da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, x300 yakınlaşmada alkali silika reaksiyonu oluşumlarına rastlanılmıştır. Yaklaşık 600µm çapında boşlukda oluşan alkali silika reaksiyonu etkileri mısır patlağı şeklinde olduğu görülmektedir. Aynı bölgede x1200 yakınlaşmada yapılan incelemelerde harita çatlağı şeklinde alkali silika reaksiyonu oluşumları gözlenmiştir. Oluşan bu çatlakların 2µm dan daha küçük kalınlıklara sahip olduğu görülmüştür. Alkali silika reaksiyonuna bağlı olarak mısır patlağı

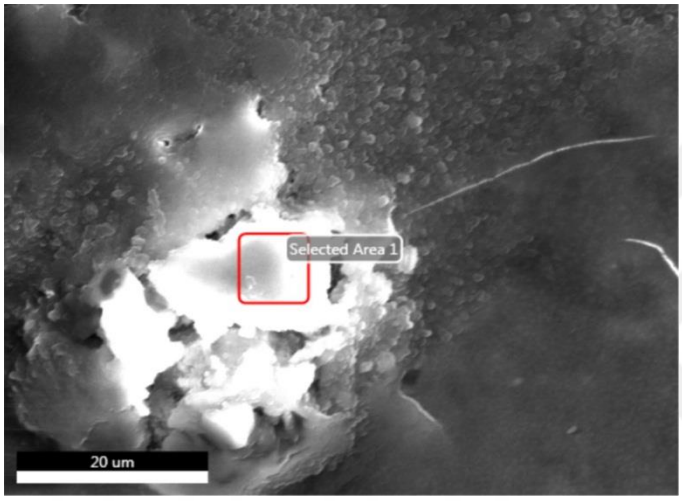
şeklinde oluşan alkali silika ürününü ise yaklaşık 75µm boyutlarında olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 3.29.c. ‘de görülen mısır patlağı şeklinde oluşmuş ASR ürünü üzerinde EDX yardımı ile yapılan kimyasal oksit analizi Şekil 3.30. ‘da verilmiştir. Yapılan EDX analizine göre, %46.7 CaO, %34.2 SiO2, %13.4 Na2O, %4.1 Al2O3, %1.4 MgO oluşumları gözlemlenmiştir. Ayrıca ASR den kaynaklı oluşan çatlaklara da EDX analizi yapılmış ve Şekil 3.30. da verilmiştir. Her iki sonuç karşılaştırıldığında benzer kimyasal oksit oranlarına sahip oldukları görülmüştür.



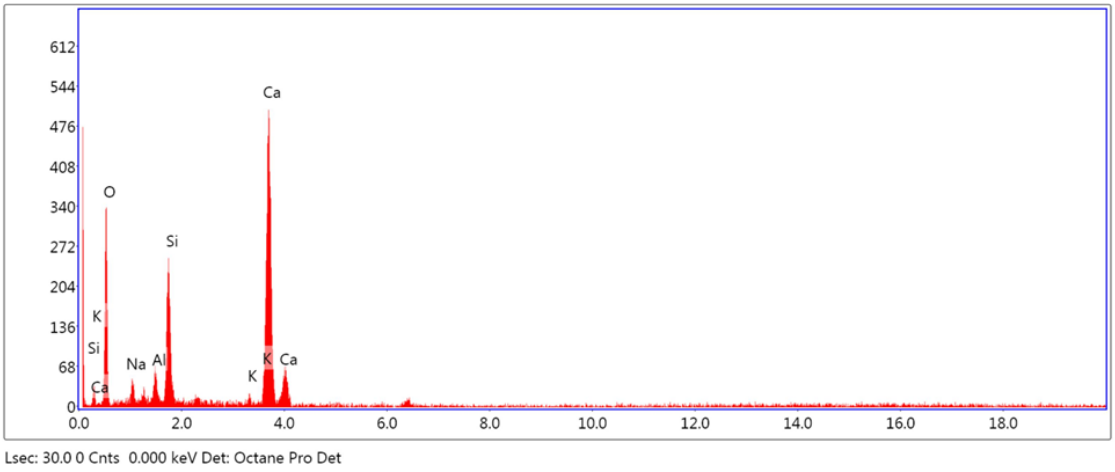
Şekil 3.29. %10 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x300 büyütme (a), x600 büyütme (b), x1200 büyütme (c)

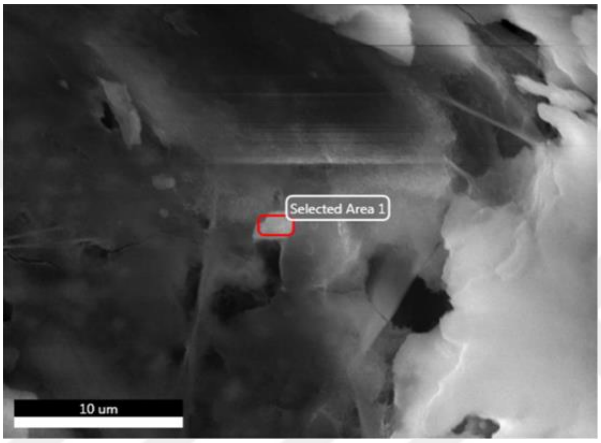




Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	13.4
Mg O	1.4
Al 2O3	4.1
Si O2	34.2
K 2O	0.2
Ca O	46.7

Şekil 3.30. NUK10 Kimyasal analizi (a), NUK10 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), NUK10 Kimyasal analizi (c)





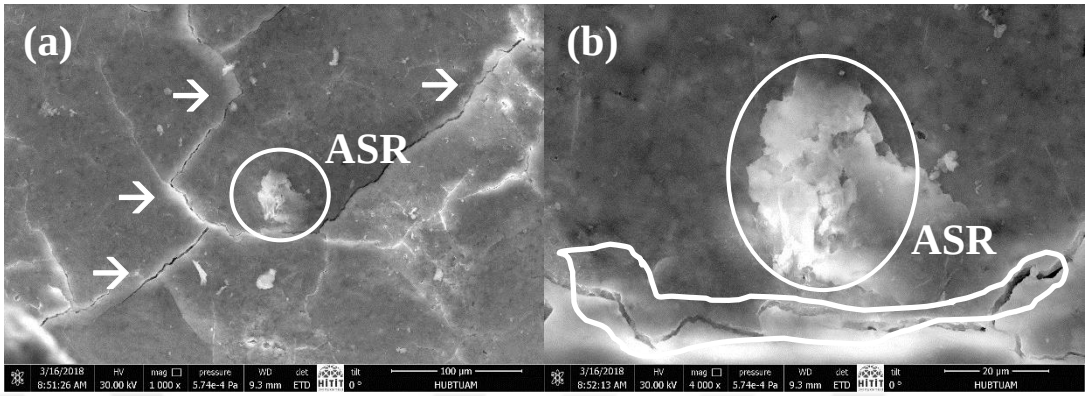
Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	12.1
Al 2O3	6.9
Si O2	31.5
K 2O	0.4
Ca O	49.1

Şekil 3.31. NUK10 Kimyasal analizi (a), NUK10 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), NUK10 Kimyasal analizi (c)

Tane Dağılımı Optimize Edilmemiş %20 Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Çubuklarının SEM Analizi

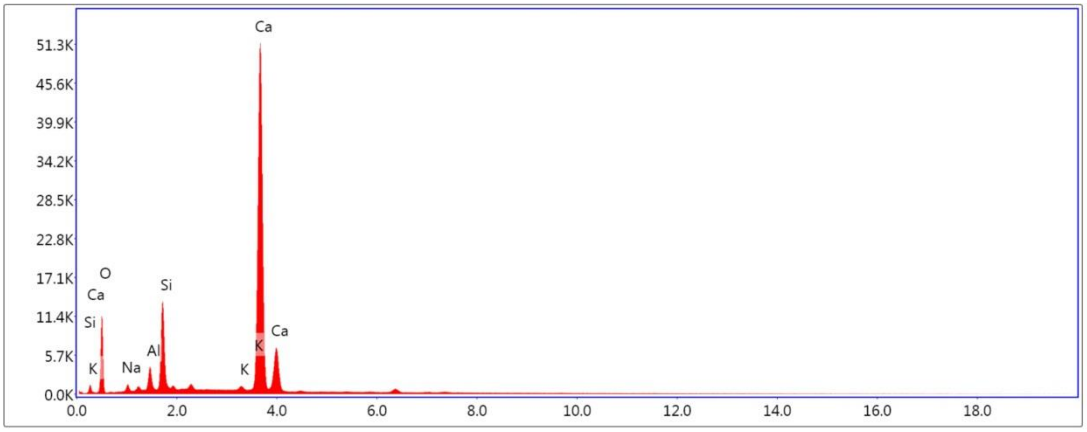
Yapılan incelemelerde, %20 oranında tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarında x1000 yakınlaşmada alkali silika reaksiyonu etkilerine rastlanılmıştır. Şekil 3.32.a. 'da görüldüğü gibi yaklaşık 30µm dağılımında mısır patlağı şeklinde ASR ürünü görülmüş ve ayrıca harita çatlakları şeklinde ASR etkisine rastlanılmıştır. Bu çatlaklar 1-3µm kalınlıkta 400-600µm boyutlarında boşluk boyunca devam ettiği görülmüştür. Tane dağılımı optimize edilmemiş %20

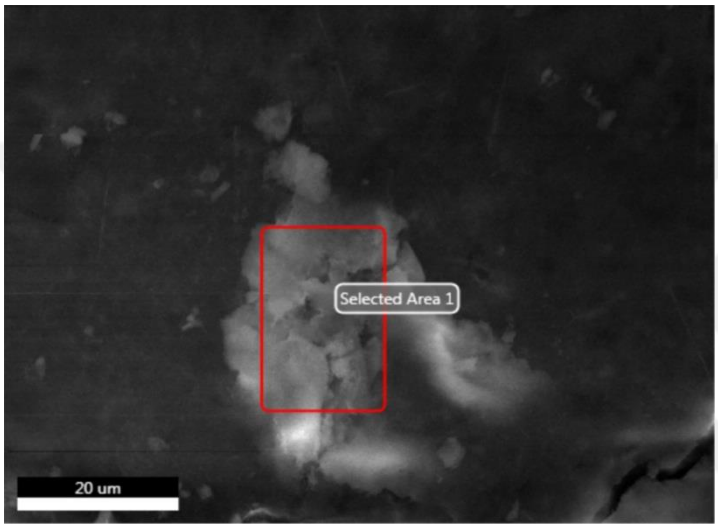
uçucu kül ikameli harç çubuklarında kapak atması olarak bilinen alkali silika reaksiyonu etkisine rastlanılmamıştır.



Şekil 3.32. %20 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x1000 büyütme (a), x4000 büyütme(b)

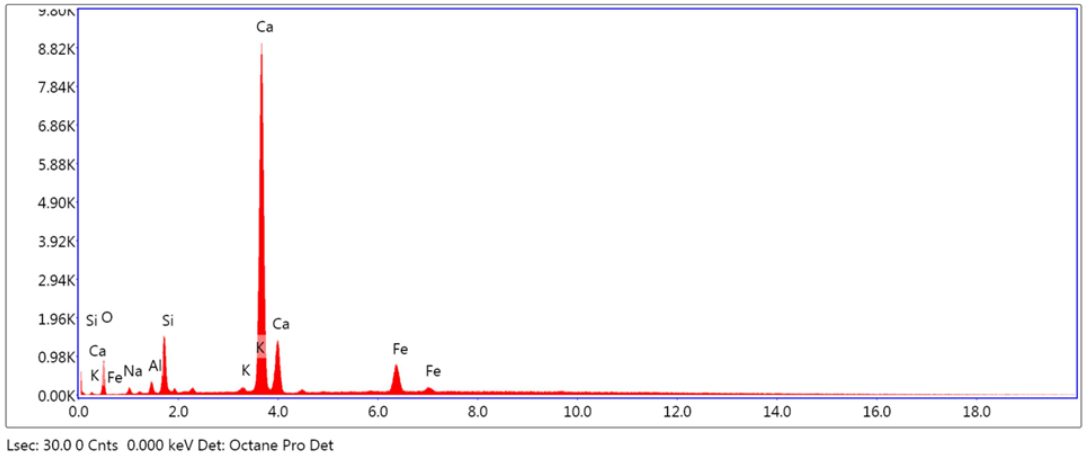
İncelenen numunede oluşan mısır patlağı şeklinde ASR ürünü olan kısımda yapılan EDX incelemeli sonucu elde edilen kimyasal analiz Şekil .3.33. ‘de verilmiştir. Elde edilen bu kimyasal analiz sonuçlarına göre ; Na2O %3.5 oranda, Al2O3 %5.1 oranda, Si O2 %21.0 oranda, K2O %0.2 oranda ve CaO %70.2 oranda tespit edilmiştir. Ayrıca ASR ye bağlı olarak harita çatlağı şeklinde oluşan bölgededе EDX analizi yapılmış ve mısır patlağı oluşumuna benzer veriler elde edilmiştir.

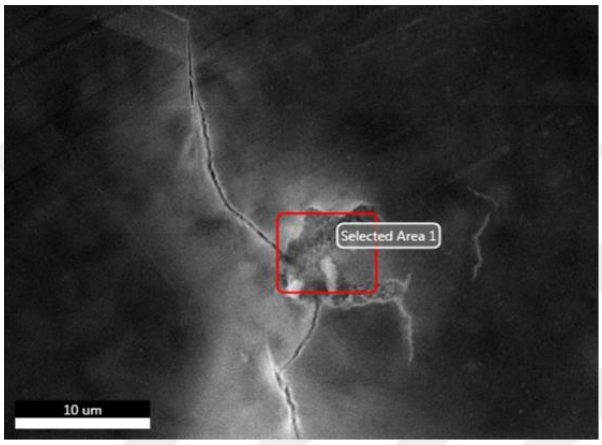




Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	3.5
Al 2O3	5.1
Si O2	21.0
K 2O	0.2
Ca O	70.2

Şekil 3.33. NUK20 Kimyasal analizi (a), NUK20 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), NUK20 Kimyasal analizi (c)





Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na2O	3.4
Al2O3	2.4
SiO2	14.8
K2O	0.3
CaO	74.1
Fe2O3	5.0

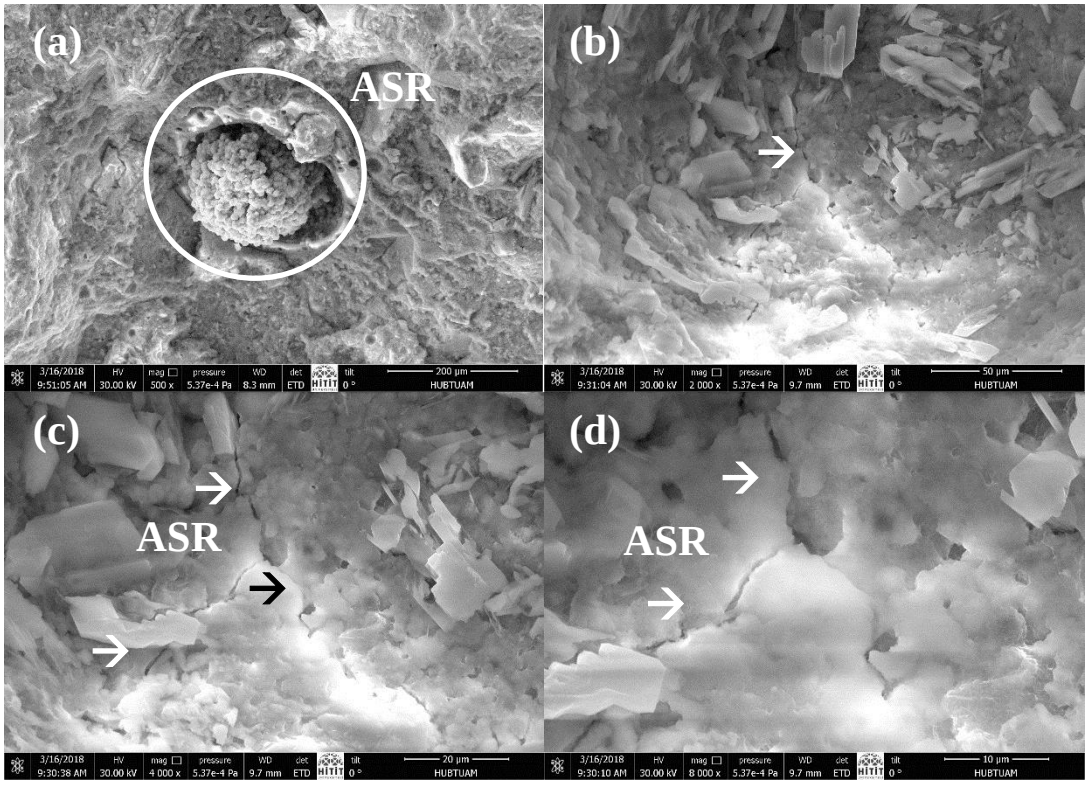
Şekil 3.34. NUK20 Kimyasal analizi (a), NUK20 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), NUK20 Kimyasal analizi (c)

Tane Dağılımı Optimize Edilmiş %10 Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Çubuklarının SEM Analizi

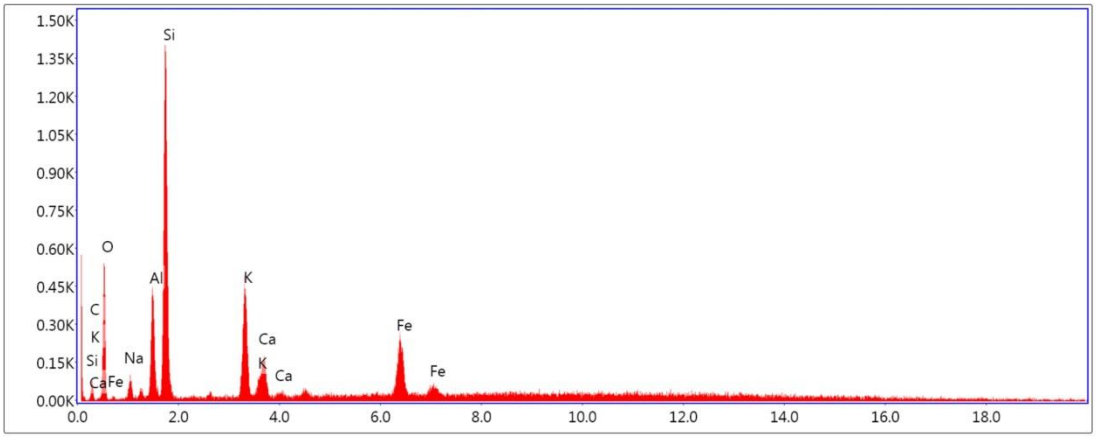
Tane dağılımı optimize edilmiş %10 uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarında yapılan SEM incelemeri sonucu x500 yakınlaşmada boşlukta oluşan ASR ürünlerine rastlanırken, x2000 yakınlaşmada ASR etkisi olan harita çatlaklarına rastlanılmıştır. Mısır patlağı olarak tabir edilen Şekil 3.35. ‘de görülen bir alkali silika reaksiyonu ürünü, 200µm dağılımında oluştuğu görülmüştür. Alkali silika reaksiyonuna bağlı olarak oluşan çatlaklar ve alkali silika reaksiyonuna bağlı oluşan ürünlerin 150 ile 350µm arası boşluklarda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar Şekil 3.35.c. ‘de de görüldüğü gibi x4000 yakınlaşmada net olarak görülmektedir.

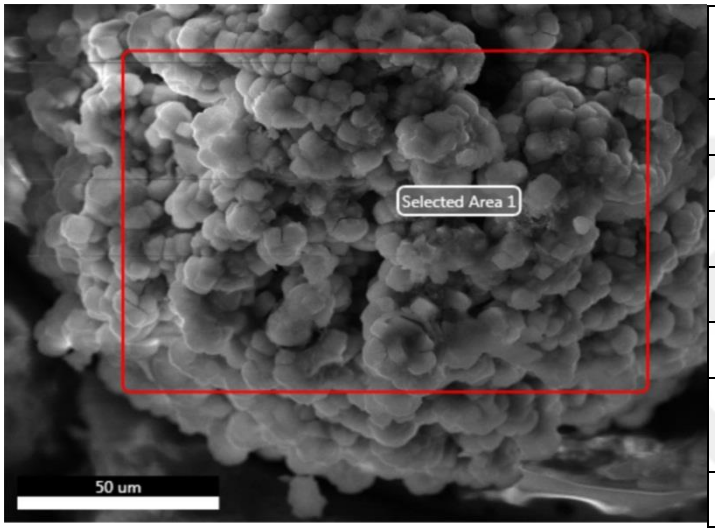
Mısır patlağı şeklinde oluşan alkali silika reaksiyonu ürünü üzerinde EDX ile kimyasal analiz yapılmış olup, sonuçları Şekil 3.36. da verilmiştir. EDX yardımı ile bulunan bu sonuçlara göre, %45.6 CO2, %4.2 NaO2, %9.7 Al2O3, %30.0 SiO2, %5.4 K2O, %2.3 CaO, %2.7 Fe2O3 oluşumu tespit edilmiştir.

Harita çatlağı şeklinde oluşan ASR etkisi üzerinde yapılan EDX incelemelerinde ise, Na2O %6.9, MgO %2.7, SiO2 %17.7, K2O %1.5, CaO%71.2 olarak bulunmuş olup CO2 'e rastlanılmamıştır.



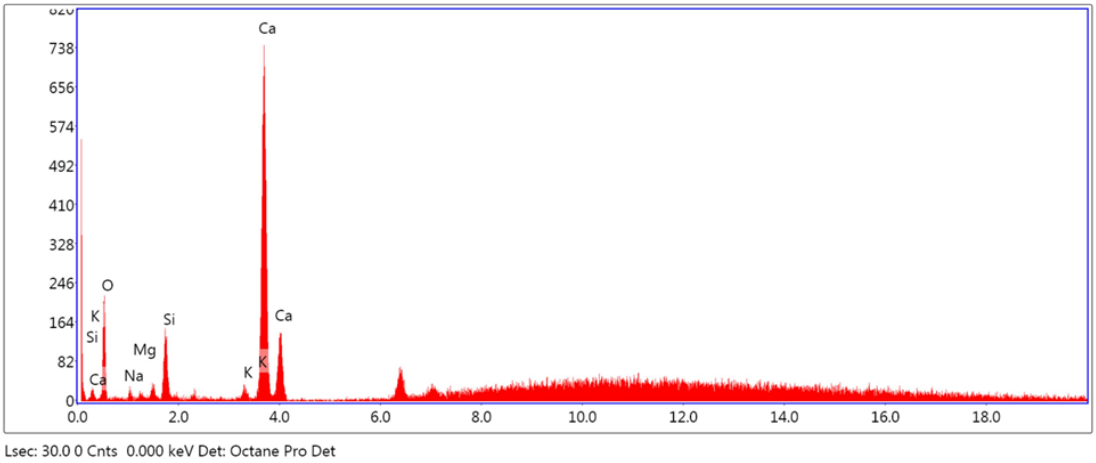
Şekil 3.35. %10 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x500 büyütme (a) x2000 büyütme (b), x4000 büyütme(c), x8000 büyütme (d)

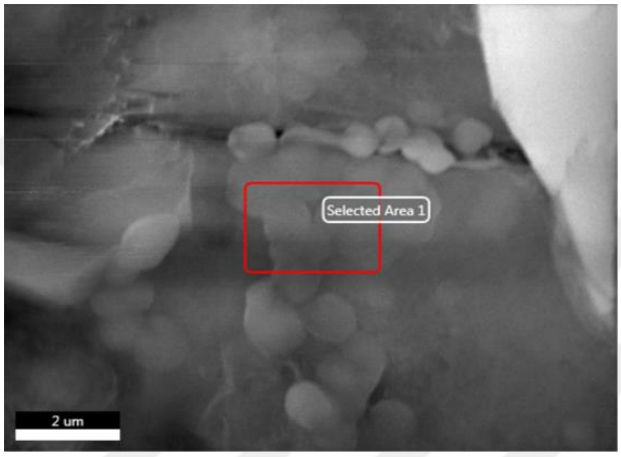




Kimyasal Oksit	Oran (%)
CO2	45.6
Na 2O	4.2
Al 2O3	9.7
Si O2	30.0
K 2O	5.4
Ca O	2.3
Fe 2O3	2.7

Şekil 3.36. OUK10 Kimyasal analizi (a), OUK10 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), OUK10 Kimyasal analizi (c)





Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na2O	6.9
MgO	2.7
SiO2	17.7
K2O	1.5
CaO	71.2

Şekil 3.37. OUK10 Kimyasal analizi (a), OUK10 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), OUK10 Kimyasal analizi (c)

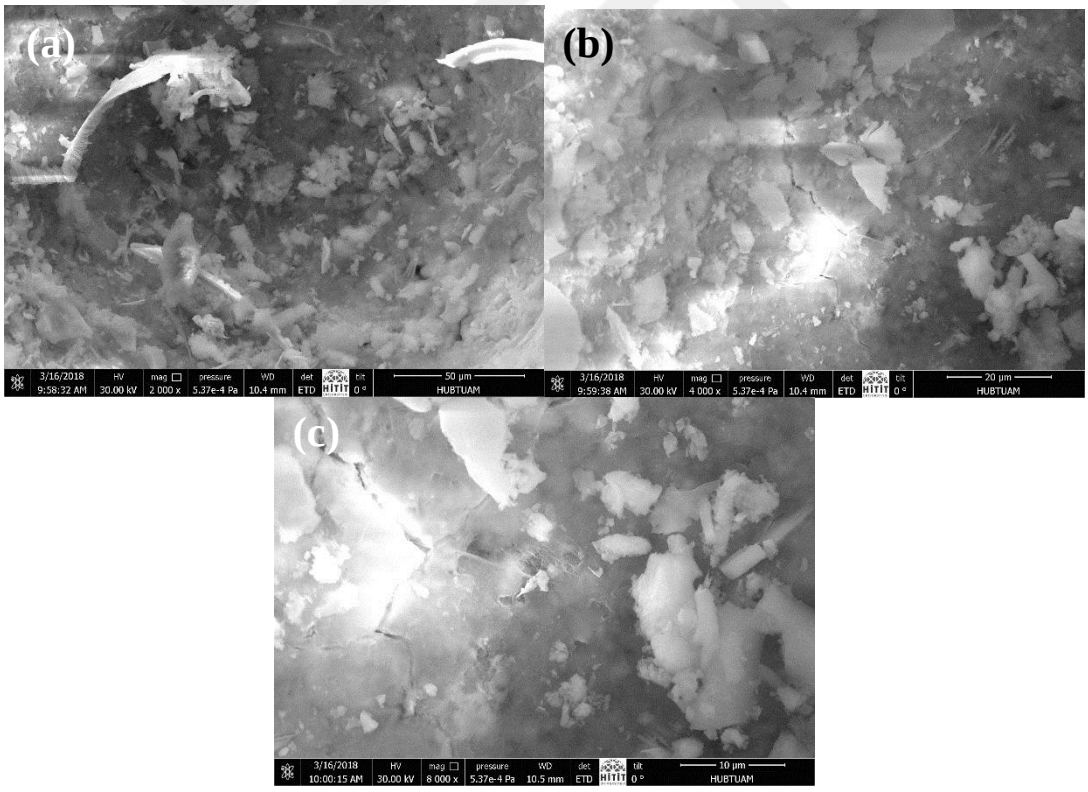
Tane Dağılımı Optimize Edilmiş %20 Uçucu Kül İkameli Çimento Harç Çubuklarının SEM Analizi

%20 çimento yerine tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikamesi yapılan çimento harç çubuklarında elde edilen SEM görüntüleri Şekil 3.38. ‘de verilmiştir. İncelenen bu görüntüler sonucunda x2000 büyütmede ASR oluşumlarına rastlanırken, x8000 büyütmede ASR oluşumunu gösteren harita çatlaklarına rastlanılmıştır. Yaklaşık olarak 200µm dağılımında oluşan ASR boşluklarında x2000 yakınlaşmada alkali silika reaksiyonu ürünleri oluştuğu görülmüş fakat bu ürünlere bağlı çatlaklar x8000 büyütmede görülebilmiştir.

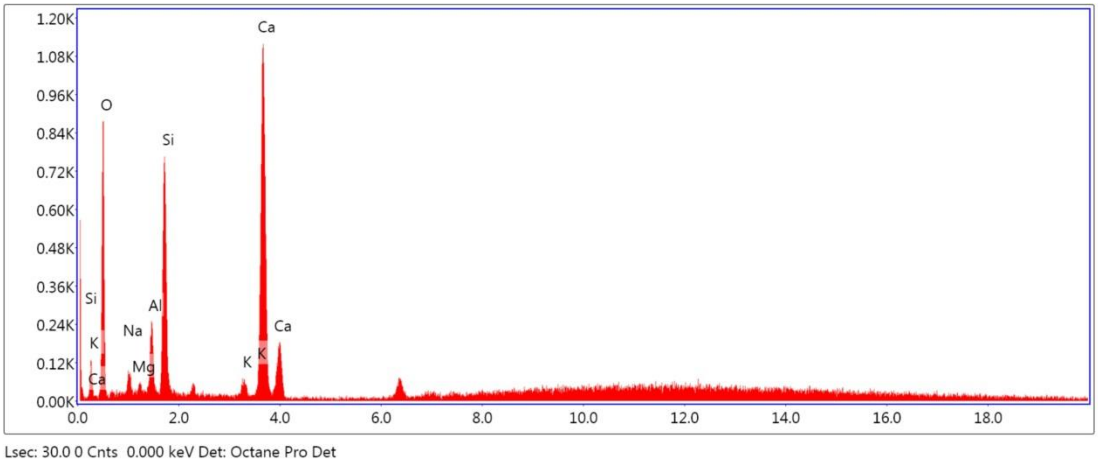
Hazırlanan diğer yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikameli harç çubuklarına göre %20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubuklarının yüzeyinde daha az boşluklu yapıya rastlanılmıştır.

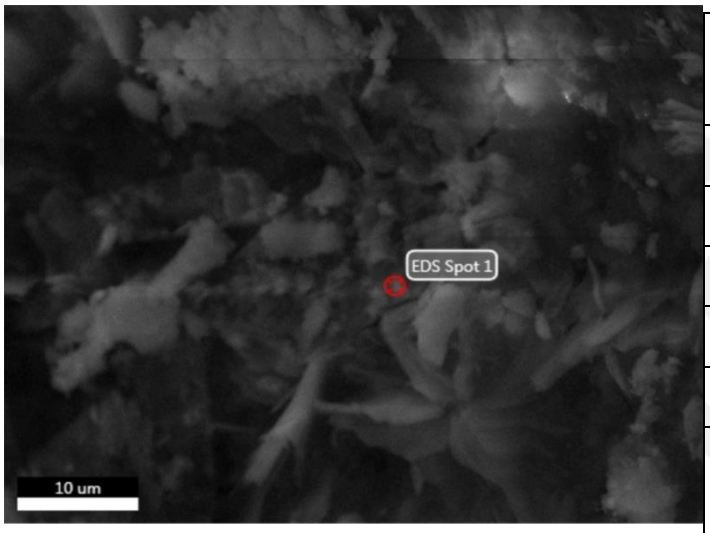
Yaklaşık 200µm çapında boşluklarda oluşan çatlaklar yaklaşık 0.5-1µm kalınlıklarda olup, Şekil 3.38.b. ‘de görüldüğü gibi sürekli olmayan çatlaklardır. %20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubukarında oluşan harita çatlaklarında EDX ile nokta kimyasal analizi yapılmış, analiz yapılan bu nokta şekil 3.39.b. ‘de verilmiştir.

EDX yardımı ile yapılan bu kimyasal analiz sonucunda; Na2O %8.6, MgO %2.3, Al O3 %10.6, SiO2 %36.1, K2O %1.1, CaO %41.3 oranlarında oksitler oluştuğu bulunmuştur. Şekil 3.40.b. ‘de kırmızı olarak gösterilen bölgede yapılan EDX verileride benzer sonuçlar vermiştir.



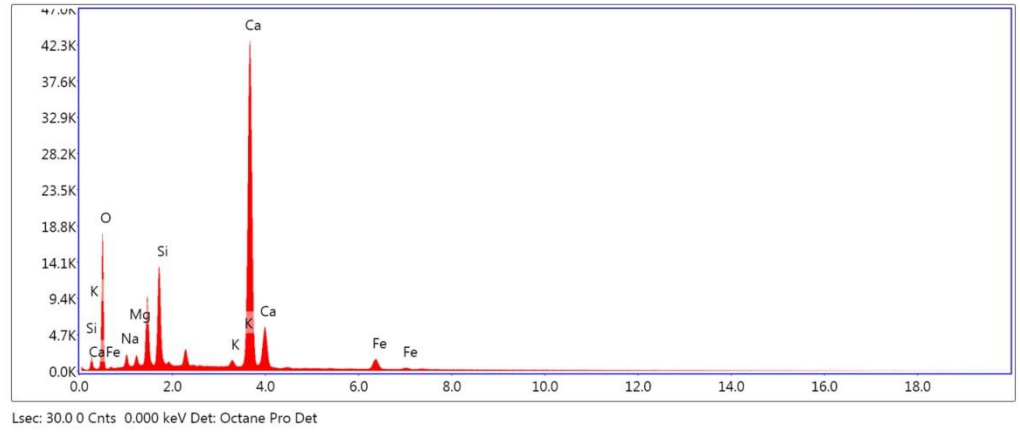
Şekil 3.38. %20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuğu SEM görüntüsü x300 büyütme (a), x600 büyütme(b), x1200 büyütme (c)

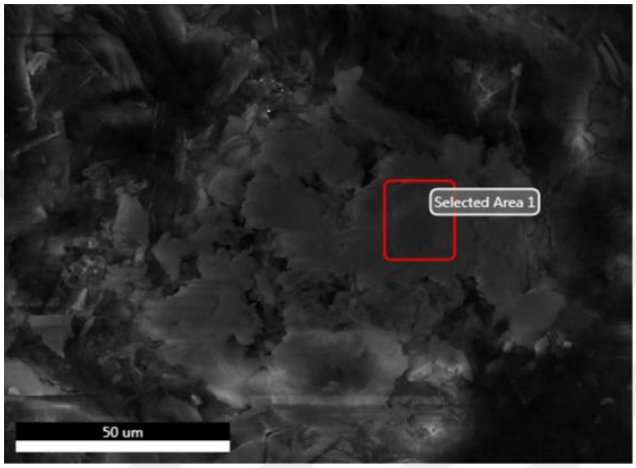




Kimyasal Oksit	Oran (%)
Na 2O	8.6
Mg O	2.3
Al 2O3	10.6
Si O2	36.1
K 2O	1.1
Ca O	41.3

Şekil 3.39. OUK20 Kimyasal analizi (a), OUK20 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), OUK20 Kimyasal analizi (c)





Kimyasal Oksit	Oran %
Na 2O	6.1
Mg O	2.2
Si O2	22.7
K 2O	0.3
Ca O	67.0
Fe 2O3	1.7

Şekil 3.40. OUK20 Kimyasal analizi (a), OUK20 Kimyasal analiz yapılan bölge (b), OUK20 Kimyasal analizi (c)

Tane dağılımı optimize edilmiş % 20 uçucu kül ikameli harç çubuklarında yapılan SEM incelemelerinde elde edilen görüntüler ASR etkisi olduğu düşünülsede, ASR etkisi yok denilebilecek kadar azdır.

Sonuç olarak, çimento harç çubuklarında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikame oranı arttıkça oluşan ASR etkisi, SEM analizi Şekil 3.38. ‘de görüldüğü gibi daha büyük görüntülerde görülmektedir. Bu durum, ikame oranı azaldıkça ASR etkisinin yüksek, ikame oranı arttıkça ASR etkisinin küçük olduğunu göstermektedir. Başka bir değişle, YFC ve UK ikame oranı arttıkça ASR etkisinde azalma olmuştur.

Yapılan SEM incelemeleri sonucunda, katkısız şahit çimento harç çubuklarına göre, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikameli harç çubuklarında alkali silika reaksiyonunun daha az görüldüğü, çimento harç çubuklarına yapılan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikame oranı arttığında alkali silika reaksiyonu etkisi daha az görüldüğü, ikame edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu külün tane dağılımın optimize edilmesinin alkali silika reaksiyonunu azalttığı görülmüştür.

Yapılan SEM incelemelerinde, ikame oranı artmasının ve tane dağılımı optimizesi yapılmasının ASR etkisinden dolayı oluşan çatlaklarının kalınlıklarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu da tane dağılımı optimize edilmesinin ASR etkisini azalttığını açıkca göstermektedir.

Alkali silika reaksiyonu oluşum ve etkilerine en çok katkısız şahit numunelerde, en az ise %20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli çimento harç çubuklarında rastlanılmıştır. Hazırlanan harç çubuklarından, tane dağılımı optimize edilmiş %20 uçucu kül ikamesi yapılmasının alkali silika reaksiyonu etkisini azaltmada en etkili olduğu görülmüştür.

4.SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgulara göre,

- Çimento harçlarına yapılan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikamesinin alkali silika reaksiyonunu azalttığı gözlemlenmiştir.

- ASTM C 1260'a göre; Tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli numunelerde % 15-20 ikame oranlarında ASR açısından zararsız bulunmuştur. Fakat tane dağılımının optimize edilmesi katkı miktarını % 5 azaltmış, tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli numunelerin % 10-15-20 ikameli harç çubuklarında ASR açısından zararsız olduğu gözlemlenmiştir. Tane dağılımı optimize edilmemiş yüksek fırın cürufu ikameli numuneler ASR açısından kabul edilebilir zararlı bölgede iken, tane dağılımının optimize edilmesi %20 yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarını alkali silika reaksiyonu açısından zararsız hale getirmiştir.

- ASTM C 227'ye göre yapılan deneylerde %20 tane dağılımı optimize edilmiş yüksek fırın cürufu ikameli, % 15-20 tane dağılımı optimize edilmemiş uçucu kül ikameli, %10-20 arası tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubuklarının alkali silika reaksiyonu açısından zararsız bölgede olduğu gözlemlenmiştir. Fakat tane dağılımı optimize edilmemiş %20 yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuğu ASTM C 1260'a göre kabul edilebilir zararlı bölgede iken, ASTM C 227'de belirtilen sınır değerlere göre alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olarak kabul edilmiştir.

- ASTM C 1260 ve ASTM C 227'ye göre yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, en büyük boy uzaması şahit numunelerde görülürken, en az boy uzama oranı %20 tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubuklarında elde edilmiştir. Bunun sonucunda, alkali silika reaksiyonu açısından en zararlı şahit numune, zararı en az olan ise %20 oranında tane dağılımı optimize edilmiş uçucu kül ikameli harç çubukları olmuştur.

- Tarayıcılı elektron mikroskobu ile yapılan mikro yapısal incelemeler sonucunda, alkali silika reaksiyonu etkisinde boy uzama oranı değerlerine paralel olarak, alkali silika etkisinde boy uzama oranı yüksek olan numunelerde daha küçük görüntülerde alkali silika reaksiyonuna bağlı olarak oluşan harita çatlakları ve mısır patlağı şeklinde oluşan genleşmelere rastlanırken, boy uzama değerleri düşük numunelerde daha büyük görüntülerde rastlanılmıştır. Bu incelemeler, tespit edilen boy uzama değerlerindeki değişimlerin alkali silika reaksiyonu etkisinde oluştuğunu destekler şekilde göstermiştir. Aynı şekilde çatlak genişlikleri de ASR etkisi daha belirgin gözlemlenen numunelerde daha büyük olurken, ASR etkisi az görülen numunelerde daha küçük gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak; harç çubuklarına ikame edilen uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun şahit numuneye göre alkali silika reaksiyonu açısından daha az zararlı olduğu, harç çubuklarına uçucu kül ikamesi yapılmasının yüksek fırın cürufuna göre ASR etkisini azaltmada daha etkili olduğu, YFC ve UK ikame oranı arttıkça ASR etkisinin azaldığı, ikame edilen YFC ve UK tane dağılımlarının optimize edilmesinin ASR etkisini azaltma açısından daha etkili olduğu görülmüştür.

Yüksek fırın cürufu ve uçucu külün tane dağılımının optimize edilmesinin alkali silika reaksiyonu oluşumunu azaltmadaki etkisi, hazırlanan harç çubuklarında dolgu faktörünü artırarak boşluk oranını azalttığından dolayı açıklamak mümkündür. Bu sebeplerden dolayı, alkali silika reaksiyonu en az görülen tane dağılımı optimize edilmiş %20 uçucu kül ikameli harç çubukları baz alınarak, çimento üretiminde çimento yerine, tane dağılımı optimize edilmiş %20 uçucu kül ikamesi yapılması %20 oranında çimentodan tasarruf sağlarken, atık malzeme olan uçucu kül kullanımını artıracak ve alkali silika reaksiyonunu en aza indirecektir.

Bu çalışmadaki sonuçlara bağlı olarak; uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kompoze edilerek yeniden tane dağılımı yapılarak ASR etkisine bakılabilir. Ayrıca TS 206'da belirtilen çimento yerine ikame malzeme sınır değeri olan %33 oranına kadar %20-33 oranları arası uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikame edilerek ASR etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Ö. Sevim, Yüksek Kompasiteli Çimento Bağlayıcılı Sistemler İçin Uçucu Kül Tane Boyut Dağılımlarının Optimizasyonu. Doktora Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2018.

[2] F. Bektaş, Preventive Measures Against Alkali–Silica Reaction. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2002.

[3] Neville, A.M., Properties of Concrete, John Wiley & Sons Inc., New York, U.S.A, 1997.

[4] Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2002.

[5] TS EN 196-2 Çimento Deney Metodları-Bölüm 2- Çimentoların Kimyasal Analizi.

[6] Schumann David C., Carrasquillo Ramon L. and Farbiarz Joseph State of the part report on the Mechanism of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete containing Fly Ash, Research report p.450-2, Center for Transportation Research 1988.

[7] Yeğinobalı A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Ankara, Nisan 2001.

[8] Katayama, T., 1996, Characteristics on Alkali Aggregate Reaction, The Study on the Maintenance and Rehabilitation of Highway Bridges in the Republic of Turkey, 11p, (unpublished).

[9] ASTM, C 125, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. ASTM Standards, New York, 64-65, 1994.

[10] Massazza, F., Pozzolanic Cements. Cement and Concrete Composites, 15, 185-214, 1993.

[11] Swamy, R.N., Cement Replacement Materials. Surrey University Press, London, 1986.

[12] Bouzoubaa, N., Zhang, M. H., Malhotra, V. M., Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with High-Volume Fly Ash Blended Cements Using a Coarse Fly Ash. Cement and Concrete Research, 31(10), 1393-402, 2001.

[13] L. Turanlı, Effects of Natural Pozzolan Addition to the Properties of Portand Pozzolan Cements and the Concretes Made with Those Cements. Ph.D. Thesis, in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 1995.

[14] Aruntaş, H.Y., Tokyay, M., Katkılı Çimento Üretiminde Diatomitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği. Çimento ve Beton Dünyası. 1(4), 33-41, Ankara, 1996.

[15] ASTM C 618, 2000, Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standart, No. 04.02.

[16] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğinobalı, A. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri, TÇMB, Ankara, 2003.

[17] H. Ün, Yapay Puzolanlar, PAÜ Ders Notları, Yapı Malzemesi/Yapay Puzolanlar, 2007.

[18] Shehata, M.H., Shashiprakash, S.G., Thomas, M.D.A., "Alkali Aggregate Reaction and Fly Ash", Sixth NCB International Seminar on Cement and Building Materials, 1999.

[19] Swamy, R.N., The Alkali-Silica Reaction in Concrete. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.

[20] Tosun, K., Yazıcı, H., Baradan, B., "Uçucu Kül ve Silika Tozunun Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisinin İncelenmesi", Türkiye İnşaat Mühendisliği 16. Teknik Kongresi, Ankara, 2001.

[21] Ramyar K., Andiç, Ö.; Uçucu Kül İnceliği ve Kullanım Oranının Alkali-Silis Reaksiyonuna Etkisi. Türkiye İnşaat Mühendisliği On Yedinci Teknik Kongre ve Sergisi, 2004.

[22] Yıldırım, K., & Sümer, M., Alkali Silika Reaksiyonunun Azaltılmasında Dört Farklı Mineral Katkı Kombinasyonunun Optimisazyonu. Sakarya University Journal Of cience, 22(5), 1-1, 2018.

[23] Bentz, D.P., Hansen, A. S., Guynn, J.M. Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes. Cement and Concrete Composites, 33(8), 824-831, 2011.

[24] Binici, H., Görür, E. B., & Durgun, M. Y., Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Mekanik Aşınması ve Su Geçirimliliği. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(1), 1-10, 2010.

[25] Binici, H., Eken M., Dinçer, A., Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28.1: 11-21, 2013.

[26] Funk, J.E., Dinger, D.R., Funk, J.E.J., Caol 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.

[27] Manz, O.E., Coal Fly Ash: a Retrospective and Future Look. Fuel, 78(2), 133-136, 1999.

[28] Bayazıt, Ö.L., Application of Fly Ash in Gökçekaya Dam and Economy. Europe Committee on Electric Power, Symposium on the Use of Ash, Paper A-2, 1970.

[29] Özel, İ., Utilization of Fly Ash in the Production of Mass Concretes Used in the Construction of Porsuk Dam in Turkey. Europe Committee on Electric Power, Symposium on the Use of Ash, Paper A-5, 1970.

[30] Shabab, M. E., Shahzada, K., Gencturk, B., Ashraf, M., Fahad, M., Synergistic effect of fly ash and bentonite as partial replacement of cement in mass concrete. KSCE Journal of Civil Engineering, 20(5), 1987-1995, 2016.

[31] 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.

[32] Kim, S. J., Yang, K. H., Moon, G. D., Hydration characteristics of low-heat cement substituted by fly ash and limestone powder. Materials, 8(9), 5847-5861, 2015.

[33] Zhao, Z. F., Mao, K. K., Ji, S. W., Zhang, Z. Y., Zhu, H. N., Wang, W. L., Adiabatic Temperature Rise Model of Ultra-High-Volume Fly Ash Conventional Dam Concrete and a FEM Simulation of the Temperature History Curve. In CONCREEP 10, 1410-1419, 2015.

[34] Schindler, A. K., Keith, K. P., Behavior of high-volume fly ash concrete in mass concrete applications. In Construction Materials and Structures: Proceedings of the First International Conference on Construction Materials and Structures, 268, IOS Press, 2014.

[35] Davraz, M., Gündüz, L., Doğal Amorf Silikanın Alkali Silika Reaksiyonu Gelişimine Etkisi, 2004.

[36] ASTM C1260-14, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

[37] K. Ramyar, H. Dönmez, Ö. Andiç, Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı Đle Kontrol Altına Alınması, TÇMB, Çimento Endüstrisi-Üniversite İşbirliği Araştırma Projesi Raporları, Rapor No:9, Ege Üniversitesi, İzmir, 2002.

[38] ASTM C227-10, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010,