

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MİNERAL KATKILI HARÇLARDA ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU
KAYNAKLI ÇATLAKLARIN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ
KULLANILARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim SELİM

HAZİRAN 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MİNERAL KATKILI HARÇLARDA ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU
KAYNAKLI ÇATLAKLARIN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ
KULLANILARAK İNCELENMESİ

İbrahim SELİM

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 / 05 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 13 / 06 / 2025

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Safa NAYIR

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

"Mineral Katkılı Harçlarda Alkali Silika Reaksiyonu Kaynaklı Çatlakların Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak İncelenmesi" adlı bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmada mineral katkıların alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkileri, reaksiyon sonucu elde edilen çatlak görüntüleri elde edilmesi, elde edilen çatlak görüntüleri ile genleşme yüzdeleri arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Çalışma süresince ilgi ve desteklerini esirgemeyen, değerli bilgi ve birikimleriyle bana yol gösteren, çalışmaların yürütülmesinde bana yardımcı olan değerli hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Safa Nayır'a ve sayın Arş. Gör. Yılmaz YILMAZ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Deney boyunca gerekli malzemelerin temini için yardımcı olan sayın Dr. Öğr. Üyesi Memduh NAS'a ve İnş. Müh. Serkan BAHADIR'a teşekkür ederim.

Ayrıca öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini zaman ve koşul fark etmeksizin esirgemeyen yanımda olan değerli aileme, iyi bir mühendis olarak yetişmemizde büyük katkısı olan başta sayın Doç. Dr. Ayşegül DURMUŞ DEMİR hocam olmak üzere değerli üniversitem ve çalışanlarına teşekkür ederim.

İbrahim SELİM

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum "Mineral Katkılı Harçlarda Alkali Silika Reaksiyonu Kaynaklı Çatlakların Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak İncelenmesi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Safa NAYIR'ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 13/06/2025

İbrahim SELİM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	2
1.3. Literatür Özeti	2
1.4. Betonda Durabilite	9
1.5. Betonda Bozulmaya Yol Açan Etkenler	9
1.5.1. Fiziksel ve Mekanik Etkenler	10
1.5.2. Kimyasal ve Biyolojik Etkenler.....	10
1.6. Alkali-Silika Reaksiyonu	12
1.6.1. Alkali-Silika Reaksiyonunun Oluşum Mekanizması.....	13
1.6.2. Alkali-Silika Reaksiyonu Ürünleri.....	14
1.6.3. Alkali-Silika Reaksiyonunun Belirtileri.....	14
1.6.4. Alkali-Silika Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler.....	16
1.7. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirlemede Kullanılan Deneysel Yöntemler	25
1.7.1. Harç Çubuk Deneyi (ASTM C227)	25
1.7.2. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C1260)	28
1.7.3. Beton Prizma Deneyi	29
1.7.4. Kimyasal Yöntem (ASTM C 289).....	31
1.8. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirlemede Kullanılan Diğer Yöntemler.....	31
1.8.1. Agregaların Petrografik Analizi	31
1.8.2. Mineral Katkıların veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu (ASTM C441)	32
1.8.3. Jel Pat Metodu.....	32

1.8.4. Otoklav Metodu	33
1.9. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi	33
1.9.1. Uçucu Külün Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi.....	34
1.9.2. Silis Dumanının Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi	34
1.9.3. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi.....	35
1.9.4. Metakaolinin Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi.....	36
1.9.5. Doğal Puzolanların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi	37
1.9.6. Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi	39
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	40
2.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	40
2.1.1. Çimento	41
2.1.2. Su	41
2.1.3. Agregası	41
2.1.4. Uçucu Kül	42
2.1.5. Yüksek Fırın Cürufu	42
2.1.6. Silis Dumanı.....	43
2.1.7. Metakaolin	44
2.1.8. Sodyum Hidroksit	44
2.1.9. Kullanılan Diğer Malzemeler.....	45
2.2. Gerçekleştirilen Deneysel Çalışma	46
2.2.1. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 1260 ve ASTM C 1567)	46
2.3. Kullanılan Agreganın Reaktifliğinin Belirlenmesi.....	47
2.4. Harç Çubuğu Numunelerinin Üretilmesi	49
2.5. Görüntü İşleme	51
2.5.1. Harç Çubuklarından Görüntü Elde Etme	51
2.5.2. Elde Edilen Görüntüler Üzerinden Gerçekleştirilen Morfolojik İşlemler.....	53
2.5.3. Milimetre Piksel Dönüşümünün ve Ortalama Çatlak Genişliğinin Belirlenmesi	59
2.5.4. Çatlak Genişliği Hesabı	62
3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME	64
3.1. Agreganın Reaktifliği	64
3.2. Reaktif Dere Agregasının Neden Olduğu Genleşmeyi Azaltmak İçin Kullanılan Mineral Katkıların Etkinliği	64
3.3. Genleşme Yüzdesi-Çatlak Genişliği İlişkisi.....	67

3.4. Genleşme Yüzdesi-Çatlak Genişliği Arasındaki İstatiksel İlişki	69
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
5. KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MİNERAL KATKILI HARÇLARDA ALKALİ SİLİKA REAKSİYON KAYNAKLI ÇATLAKLARIN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

İbrahim SELİM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Safa NAYIR
2025, 79 Sayfa

Alkali-silika reaksiyonu (ASR) çimentodaki alkalilerle agregada bulunan reaktif silis arasında oluşan ve reaksiyon sonucu oluşan genleşme ile beton ve betonarme yapıların dayanımını ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyen önemli bir süreçtir. Bu süreç çatlaklarla ile kendini gösteren iç gerilmelerin artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, mineral katkıların ASR kaynaklı çatlaklar üzerindeki etkisi görüntü işleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı oranlarda uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), silis dumanı (SD) ve metakaolin (MK) içeren harçlardan çatlak görüntüleri elde edilmiş ve harç numunelerin genleşme yüzdeleri ölçülmüştür. Bunun yanında görüntü işleme teknikleri kullanılarak harçların yüzeyinden ölçülen ortalama çatlak genişliği ile genleşme yüzdeleri arasındaki ilişki karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Mineral katkı harç numunelerinin referans numuneye göre 3, 7, 14 ve 28. gün sonunda genleşme değerlerinde önemli azalmalar meydana gelmiştir. Görüntü işleme tekniklerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde mineral katkı yüzdesindeki artışla birlikte ASR kaynaklı çatlak genişliklerinde önemli azalmalar olduğunu göstermiştir. Çatlak genişliğindeki en fazla azalma %60 oranında YFC, en az azalma ise %5 oranında SF içeren harç numunelerde görülmüştür. Silis dumanı içeren harç numuneler üzerinde elde edilen sonuçlar hariç, mineral katkı tüm harç numuneler için ölçülen ortalama çatlak genişliği ile genleşme arasında istatistiksel bir ilişkinin varlığı söz konusudur.

Anahtar Kelimeler: Alkali-Silika Reaksiyonu, Mineral Katkı, Görüntü İşleme, Çatlak Genişliği

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF CRACKS IN MORTARS CONTAINING MINERAL ADDITIVES QWING TO ALKALI-SILICA REACTION USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

İbrahim SELİM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Safa NAYIR
2025, 79 Pages

Alkali-silica reaction (ASR) is an important process that occurs between alkalis in cement and reactive silica in aggregates and negatively affects the strength and durability of concrete and reinforced concrete structures due to the expansion resulting from the reaction. This process causes an increase in internal stresses, which manifest themselves as cracks. In this study, the effect of mineral additives on ASR-induced cracks was investigated by image processing techniques. Within this scope, crack images were obtained from mortars containing different proportions of fly ash (FA), blast furnace slag (BFS), silica fume (SF), and metakaolin (MK), and the expansions of the mortar samples were measured. Additionally, the relationship between the average crack width measured from the mortar surface and the expansion percentages was analyzed comparatively using image processing techniques. Significant decreases in expansion values were observed in mineral-added mortar samples compared to the reference sample at 3, 7, 14, and 28 days. The results obtained from image processing techniques showed that there were significant decreases in ASR-induced crack widths with an increase in the mineral additive percentage. The greatest reduction in crack width was observed in mortar samples containing 60% YFC, while the smallest reduction was observed in mortar samples containing 5% SF. Except for the results obtained on mortar samples containing silica fume, there is a statistically significant relationship between the average crack width and expansion measured for all mineral-added mortar samples.

Key Words: Alkali-Silica Reaction, Mineral Additive, Image Processing, Crack Width

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. ASR'nin neden olduğu harita çatlakları	15
Şekil 2. ASR kaynaklı çatlakların görselleri.....	15
Şekil 3. Farklı agrega tane boyutlarına sahip harçların gün-genleşme ilişkisi	18
Şekil 4. Mevcut reaktif silis miktarı ile genleşme arasındaki ilişki	19
Şekil 5. Agregadaki reaktif maddenin boyutu ile genleşme arasındaki ilişki.....	20
Şekil 6. Çimentodaki alkali miktarı ile ASR kaynaklı genleşme arasındaki ilişki	21
Şekil 7. Farklı bölgesel koşullardaki derinlik-bağıl nem ilişkisi	23
Şekil 8. Kullanılan kalıplar	26
Şekil 9. Deneysel çalışmada kullanılan pimler.....	26
Şekil 10. 25x25x285 mm boyundaki harç çubuklar	27
Şekil 11. Dijital komparatör.....	27
Şekil 12. Deneysel kısımda içeresine harç çubuklarının yerleştirildiği tank	28
Şekil 13. %100 bağıl nemi saklayacak şekilde tasarlanmış kap	30
Şekil 14. Yüksek fırın cürufunun (OH) iyonu konsantrasyonu üzerindeki etkisi.....	36
Şekil 15. Farklı oranlarda zeolit in zamana bağıl ASR kaynaklı genleşmeye etkisi	38
Şekil 16. Deneysel çalışmada kullanılan sodyum hidroksit.....	44
Şekil 17. Deneysel çalışmada kullanılan aparatlar	46
Şekil 18. Kullanılan dere agregasına ait genleşme-gün ilişkisi	48
Şekil 19. Prizmatik numune kalıpları ve kalıpları doldurmada kullanılan aparatlar	49
Şekil 20. Kalıplarından çıkarılan harç numuneleri ve ölçüm okumaları kazan içindeki durumlara ait görseller	50
Şekil 21. Mikroskop kullanılarak numune üzerinde çatlak görüntüleme işlemi	52
Şekil 22. Gri tonlama, eşik, açılış, kontur çıkarma aşamaları.....	59
Şekil 23. Dönüşüm katsayısının hesaplanması	60
Şekil 24. Çatlak genişliklerinin hesaplanması	61
Şekil 25. Excel'de görüntü okuma aşamasına ait işlem adımlar	63
Şekil 26. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren harç çubuklarının genleşme gün ilişkisi.....	65
Şekil 27. Silis dumanı ve metakaolin içeren harç çubuklarının genleşme-gün ilişkisi.....	66

Şekil 28.	Katkılı harçlarda 14 ve 28 gün sonunda elde edilen çatlak genişlikleri dağılımı.....	67
Şekil 29.	Mineral katkı içeren harçlarda genleşme-ortalama çatlak genişliği arasındaki ilişki.....	70



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Reaktiflik derecesine göre mineral ve kayaçlar.....	17
Tablo 2. Kullanılan elek setleri ve karışım oranları.....	25
Tablo 3. Harç çubukları için karışım miktarları.....	26
Tablo 4. Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	41
Tablo 5. Deneysel çalışmada kullanılan agregaya ait fiziksel özellikler	42
Tablo 6. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu küle ait XRF analizi.....	42
Tablo 7. Deneysel çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufuna ait XRF analizi.....	43
Tablo 8. Deneysel çalışmada kullanılan silis dumanına ait XRF analizi.....	43
Tablo 9. Deneysel çalışmada kullanılan metakaolin XRF analizi	44
Tablo 10. Sodyum hidroksit muhteviyatı.....	45
Tablo 11. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan agreganın genleşme değerleri	48
Tablo 12. Deneysel çalışmada kullanılan agregaya ait granülometri	49
Tablo 13. Harç çubuğu numunelerinin üretiminde kullanılan malzemelerin karışım miktarları (gram cinsinden)	51
Tablo 14. İlgili standartlar uyarınca alkali-silika reaktiflik değerlendirmesi.....	51
Tablo 15. Mineral katkılı harç çubuklarından elde edilen çatlak görüntüleri.....	53

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ACR	: Alkali-Karbonat Reaksiyonu
ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	: Amerikan Standart
g	: Gram
ml	: Mililitre
CSH	: Kalsiyum silika hidrat
CH	: Kalsiyum hidrat
CAH	: Kalsiyum alümina hidrat
S/Ç	: Su/çimento oranı
SD	: Silis dumanı
MK	: Metakaolin
YFC	: Yüksek fırın cürufu
UK	: Uçucu kül

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton, agrega çimento ve su karışımından meydana gelen bir yapı malzemesi olup dünyada inşaat sektöründe oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Beton, fiziksel ve kimyasal dış etkenlere karşı dayanıklı, ekonomik, geçirimsiz ve az enerji ile elde edilebilen bir malzeme olması nedeniyle kullanılmaktadır. Beton kullanıldığı alanlara bağlı olarak çeşitli çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Betonun maruz kaldığı bu çevresel etkilerden bir tanesi de betonun kimyasal olarak bozulmasına neden olan alkali-silika reaksiyonudur.

Alkali-silika reaksiyonunun literatürde gelişim süreci incelendiğinde ilk olarak bu reaksiyon 1920'li ve 1930'lu yıllarda ABD'de yer alan Kaliforniya'daki nedeni belirsiz bir şekilde kaydedilen beton yapılarıdaki çatlak oluşumlarında gözlemlenmiştir. İlgili yapının betonunu oluşturan malzemeler, belirlenen standartlara uygun olsa da, birkaç yıl sonra yapı elemanlarında çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar çoğunlukla harita çatlağı şeklinde görülmüş ve bazen çatlaklardan jel çıkışı, betonun parçalanması gibi belirtilerle kendini göstermiştir. 1940 yılında Stanton, bu çatlamların kimyasal bir reaksiyon sonucu oluştuğunu rapor etmiştir. Ertesi yıl, 1941'de Blanks ve Meissner, Parker Barajı'ndaki beton çatlamlarını ve beton yüzeyindeki hasarları inceleyerek, alkali-silika reaksiyonunun betonda meydana gelen bu sorunların temel nedeni olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmalarında, agregaların %2'sini oluşturan altere andezit ve riyolit parçalarının reaktif bileşenler içerdiğini belirlemişlerdir (Bektaş, 2002). Türkiye'de alkali-silika reaksiyonu (ASR) ilk olarak 1995 yılında İzmir'deki bazı köprü ayaklarında gözlemlenen çatlaklar ile tespit edilmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü ve Japon Jica firması tarafından yapılan incelemelerde, özellikle Gediz Nehri ve Nif Nehri kumlarında bulunan reaktif silisin alkali-silika reaksiyonuna neden olduğu belirlenmiştir (Katayama, 1996).

ASR, betondaki reaktif silis içeren agregaların, çimentodaki alkalilerle kimyasal olarak etkileşime girmesiyle gerçekleşen bir süreçtir. Bu reaksiyon sonucunda meydana gelen alkali silika jeli su emerek şişer ve betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz şekilde etkiler. Bu genleşme, betonun çatlamasına, dayanıklılığının azalmasına ve yapısal bozulmalara yol açabilir (Munzni, 2014, Binal 2004).

1.2. Amaç ve Kapsam

Mineral katkıların ASR kaynaklı genleşme ve çatlamayı önleyici etkileri üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, çatlak gelişimini görüntü işleme yöntemi ile ilişkilendiren sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, mineral katkıların ASR kaynaklı meydana gelen çatlaklar üzerindeki etkisi görüntü işleme teknikleri vasıtasıyla incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, farklı oranlarda mineral katkılarla üretilen harç numuneler üzerinde ASR kaynaklı oluşan çatlak görüntüleri elde edilmiş ve harç numunelerinin genleşmesi ölçülmüştür. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak harç numunelerinin yüzeyinden ölçülen ortalama çatlak genişliği ile deney yöntemiyle belirlenen genleşmeler arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

1.3. Literatür Özeti

Bu bölümde geçmiş yıllarda çalışmalara konu olan çeşitli mineral katkıların alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkinliği ve mevcut reaksiyon sonucu oluşan çatlak genişliklerinin görüntü işleme teknikleri kullanılarak incelenmesi üzerine yapılan araştırma sonuçlarına değinilmiştir.

Demir (2010), gerçekleştirdiği deneysel çalışmada silis dumanı ve uçucu kül içeren karışımlar hazırlayarak ASR kaynaklı oluşan çatlakların betonun performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. ASR etkisini belirlemek için hızlandırılmış harç çubuk metodu kullanılmıştır. SEM ve EDX analizleriyle ASR'nin etkisindeki örneklerin morfolojisi ve kimyasal bileşimleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, %0,34'lük en yüksek genleşme kontrol harç çubuklarında, en düşük genleşme ise %20 silis dumanı içeren harç çubuklarında %0,04 olarak ölçülmüştür.

Moser vd. (2010), metakaolin ve iki farklı parçacık boyut dağılımına sahip C sınıfı uçucu külün yüksek reaktif ince agregayla kullanılması durumundaki alkali-silika reaksiyondaki etkinliği değerlendirilmiştir. İkili ve üçlü karışımların potansiyeli, hızlandırılmış harç çubuğu testi ve beton prizma testi yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Metakaolin ve C sınıfı uçucu külün ikili karışımları, kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %55-90 ve %25-37 oranlarında genleşmeyi azaltmıştır. Daha küçük ortalama parçacık boyutuna sahip metakaolin içeren ikili karışımlar, C sınıfı uçucu küle kıyasla daha büyük bir genleşme azalması gösterdiği ifade edilmektedir. Metakaolin ve C sınıfı uçucu külün üçlü karışımları, aynı miktarda metakaolin içeren ikili karışımlara göre biraz daha fazla bir

genleşme ile sonuçlanmıştır. Hızlandırılmış harç çubuk metodu ile ve beton prizma testi yöntemlerinin sonuçları arasında yüksek genleşme seviyelerinde iyi bir korelasyon bulunduğu ifade edilmektedir.

Thomas (2011) mineral katkıların alkali-silika reaksiyonunun etkisi üzerine yapmış olduğu derleme çalışmasında mineral katkıların, reaktif agregalarla reaksiyona giren alkali miktarını sınırlayarak ve alkalileri bağlayarak ASR kaynaklı genleşmeyi azalttığını belirtmiştir. Mineral katkıların etkinliği, kullanılan malzemenin bileşimine bağlı olduğunu ve kalsiyum ve alkali içeriği arttıkça, silika içeriği azaldıkça, Portland çimentosunun katkı sağladığı alkali miktarı arttıkça ve agreganın reaktifliği arttıkça ASR'yi kontrol etmek için daha fazla mineral katkının gerekli olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, mineral katkıların alümina içeriğinin alkali bağlama kapasitesini etkilediğine kanıtlar mevcut olduğu fakat alüminanın tam rolü ve katkısı net olarak anlaşılmadığı belirtilmektedir.

Dinçdemir (2015) yaptığı deneysel çalışmada, mineral ve kimyasal katkı içeren harç numunelerin ASR sonucu oluşan zarar verici durumları önlemedeki etkisi incelemiştir. Dere agregası kullanılarak hızlandırılmış harç çubuk deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda agrega zararlı sınıfta olduğu tespit edilmiştir. ASR'nin olumsuz etkilerini önlemek amacıyla, çimento 5 farklı mineral katkı kullanılarak farklı oranlarda ile ikame edilmiştir. İkame oranları arttıkça, bu katkıların betonun durabilitesine ve basınç dayanımına olumlu katkılar sağladığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, mineral ve kimyasal katkılar ASR'nin olumsuz etkilerini etkili bir şekilde azalttığı ifade edilmektedir.

Nayır vd., (2017) yaptıkları deneysel çalışmada, mineral katkıların alkali-silika reaksiyonunu (ASR) minimize etmedeki etkinliği araştırmışlardır. Mineral katkı içeren harçların deneyleri ASTM C1567 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında, ASTM C1260'a göre reaktif olan bir ocak agregası test edilmiştir. Deneysel çalışmada boyutları 25×25×285 mm olan prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Uzunluk değişimleri 3, 7, 14 ve 28. günlerde ölçülmüş ve genleşmeler yüzde olarak belirlenmiştir. UK, SD ve MK farklı oranlarda çimento ile ikame edilerek kullanılmıştır. Karışımlarda uçucu kül ikame oranları %20, %40 ve %60; silis dumanı ve metakaolin için ise %5, %10 ve %15 olarak belirlenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Mineral katkıların türünden bağımsız olarak, ikame oranları arttıkça ASR'dan kaynaklı genleşmeler minimize edilmiştir. Genel olarak çalışma kapsamında ASR'yi minimize etmede silis dumanı ve metakaolin için optimum ikame oranı %10 iken uçucu kül için ise %20 olarak belirlenmiştir.

Saha vd. 2018, reaktif agregaların alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkilerini ve kömür uçucu külünün bu reaksiyonu kontrol etmedeki etkinliğini incelemişlerdir. ASR, agregaların amorf silika ile bağlayıcıdaki yüksek alkali boşluk çözeltisi arasındaki reaksiyon sonucunda genleştirici bir jel oluşturur. Uçucu külün çimento yerine kullanılması, alkali bağlama yoluyla boşluk çözeltisinin pH'ını düşürerek, agregalardaki reaktif silisin çözünme hızını ve ASR kaynaklı genleşmeyi azalttığı ifade edilmektedir. Araştırmacılar, uçucu külün ASR genleşmesini kontrol etmedeki etkinliğinin, külün kimyasal bileşimine bağlı olduğunu ve düşük kalsiyum içeren uçucu külün ASR kaynaklı genleşmeyi azaltmada daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Wei vd. 2019, metakaolin ve bentonit kil minerallerini çimento ile ikame ederek alkali-silika reaksiyon kaynaklı bozulmayı engellemeye çalışmışlardır. Bu minerallerin %10 ve %20 oranında ikame edilmesi, harcın genleşmesini zararsız seviyeye indirdiği belirtilmektedir. Çimento ile %50 oranında ikame edildiğinde ise ASR genleşmesi ve çatlak oluşmadığı ifade edilmektedir. Minerallerin alüminyum içeriği, SiO₂ çözünmesini yavaşlatıp, alkaliliğin azalmasını sağlamıştır. Geliştirdikleri yöntemin ASR kaynaklı bozulmayı önlemek için düşük maliyetli ve etkili bir çözüm olduğu belirtilmektedir.

Figueira vd. (2019), araştırmacılar son yıllarda alkali-silika reaksiyonunun beton yapıların dayanıklılığı üzerinde önemli bir tehdit oluşturduğunu ve bu durumun bakım ve yeniden inşa maliyetlerinde artışa yol açabileceğini belirtmektedirler. ASR'nin dünya çapında birçok beton yapıda gözlemlenmesi, bu reaksiyonun tespit edilmesi ve etkilerinin azaltılması için yeni ve mevcut yapılarda araştırmalar yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ancak, ASR'nin kimyasal ve fiziksel mekanizmaları hala tam olarak anlaşılmadığı ifade edilmektedir. ASR konusunda anlaşılma eksik kalan bu kısımların, riskin doğru bir şekilde değerlendirilmesini, servis ömrünün maliyeti etkin bir şekilde tahmin edilmesini ve ASR nedeniyle oluşan bozulma sürecinin verimli bir şekilde önlenmesini engellediği belirtilmektedir. Yapılan bu derleme çalışmasında ayrıca literatürde bulunan verilerde aynı seviyede etki sağlamak için uçucu küle kıyasla daha fazla cüruf kullanımının gerekli olduğu konusunda birleşildiği ifade edilmektedir.

Nagrocki vd. (2019) silis dumanının betondaki alkali-silika reaksiyonuna etkisi üzerine yapmış oldukları bir çalışmada, çimentonun %10'u oranında silika dumanı ile ikame edilmesi ile betonun, alkali çevreye maruz kalan yapılar için en uygun oran olduğu belirtilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda çimentonun %10'u kadar silis dumanı ile

modifiye edilen betonun alkali-silika reaksiyonuna karşı daha iyi direnç gösterdiği ve daha iyi dayanıklılık özellikleri gösterdiği belirtilmektedir.

Fanijo vd. 2021, beton yapılarındaki alkali-silika reaksiyonu ve bu reaksiyonun yol açtığı deformasyonları incelemişlerdir. ASR'nin beton yapılarındaki etkileri, reaksiyon mekanizması, kimyası ve ASR ile ilişkili faktörleri detaylı bir şekilde ele almışlardır. Reaksiyonu tetikleyen başlıca faktörler arasında, betonun içindeki alkali çözeltiler, agregalarda bulunan reaktif amorf silika ve nem (diğer dış iklim faktörleriyle birlikte) yer almadığı belirtilmektedir. Çalışma ayrıca, Amerika Birleşik Devletleri'nde ASR değerlendirmesi için kullanılan çeşitli test yöntemlerine dair eleştirel bir değerlendirme sunmaktadır. Literatürden elde edilen verilerle yapılan bir deney çalışmasında, üç önemli test yönteminin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu inceleme sonucunda, yeni geliştirilen mini beton prizma testi (MCPT) yönteminin, diğer yöntemlere kıyasla daha hızlı, güvenilir ve agrega reaktifliği, alkali mevcudiyeti ve maruz kalma koşullarını belirlemede etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Hay & Ostertag 2021, yaptıkları çalışmada uçucu külün alkali-silika reaksiyonunu azaltma mekanizmaları incelenmiştir. Alüminyum oksit (Al_2O_3) içeriği, geleneksel mekanizmaların yanı sıra reaktif agregaların çözünmesini kontrol ederek ASR'yi azaltmada katkı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, uçucu kül içeren betonlara alkali eklenmesi, uzun süre ASR'ye maruz kalması sonrası genleşmeyi artırdığı ifade edilmektedir.

Fanijo vd. 2021, cam tozunun, cüruf ve silika dumanı gibi katkı maddeleriyle birlikte kullanıldığında ASR üzerindeki azaltıcı etkisini incelemişlerdir. Hızlandırılmış harç çubuk yöntemi ve küçük beton prizma testi kullanılarak yapılan testler, cam tozu ve mineral katkıların ASR genleşmesini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ayrıca, cam tozu içeren üçlü karışımlar, tek başına kullanılan mineral katkılara göre daha iyi performans sergilemiştir. Bu bulgular, cam tozu ve mineral katkıların ASR kaynaklı genleşmeyi etkili şekilde azaltabileceğini ortaya koymuştur.

Yazıcı vd. 2019, yaptıkları çalışmada hızlandırılmış harç çubuğu (ASTM C1260-14 ve ASTM C 1567-13) ve RILEM AAR-4 test yöntemlerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Bu yöntemler, mineral katkıların ve lityum tuzlarının alkali-silika reaksiyonunu engelleme potansiyelini değerlendirmek için kullanılmıştır. Çalışmada, iki farklı reaktif agrega ile hazırlanmış 96 karışım, hızlandırılmış harç çubuğu testi ve RILEM AAR-4 yöntemi ile analiz edilmiştir. Ayrıca, buhar kürünün etkisi de araştırılmıştır. Her iki

hızlandırılmış yöntemde de uçucu külün alkali-silika reaksiyonunu önleme potansiyelinin en yüksek olduğu belirlenmiştir.

Mohammadi vd. 2020, alkali-silika reaksiyonu ile betonun mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. ASR, agregadaki reaktif silis ile boşluk çözeltisinin alkali bileşenlerinin reaksiyona girmesi sonucu zararlı jel ürettiği, bu jelin çevresinden su alarak genleşir ve hacmini artırdığı ve eğer bu genleşme, boşlukları tamamen doldurur ve çevreye baskı uygularsa, hasar verici olmayacağı belirtilmektedir. Ancak uygun koşullar altında genleşmenin zararlı olabildiği ve çatlakların oluşmasına veya genişlemesine yol açabileceği ifade edilmektedir. Yeni çatlaklar ve mevcut çatlakların genişlemesi, betonun dayanıklılığını ve özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Çalışmada, ASR ile betonun fiziksel ve kimyasal özellikleri arasındaki ilişkiyi değerlendiren çalışmalar gözden geçirilmiştir. Sonuçlar, ASR'nin betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceğini, ancak bu etkinin agregaların reaktifliğine ve test yöntemlerine bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Elastisite modülü ve çekme dayanımının ASR'ye en duyarlı faktörler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, beton numunelerindeki genleşme ile beton özelliklerindeki azalma arasında iyi bir korelasyon olduğu bulunmuş ve bu azalma, agregaların reaktifliğini değerlendirmek için iyi bir test yöntemi olarak kullanılabileceği ifade edilmektedir.

Sinno & Shehata (2021), betonlarda alkali-silika reaksiyonunun neden olduğu genişlemeyi azaltmak amacıyla kullanılan mineral katkı maddesi ve sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada sahadaki genleşmenin, laboratuvar örneklerine göre daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmada, sıcaklığın agregalardan alkali salınımı, beton örneklerinden alkali sızması, hidrasyon ve mineral katkıların alkali bağlama kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırmanın bulgularına göre, yüksek sıcaklıklarda agregalarda alkali salınımının daha fazla olduğu belirtilmektedir. Test edilen çimento karışımlarının hidrasyonu ve alkali bağlama kapasitesi 60°C'de en yüksek seviyeye ulaştığı bunu sırasıyla 38°C ve 23°C takip ettiği ifade edilmektedir. Örneklerin genleşmeleri farklı sıcaklıklar ve sürelerle karşılaştırılmış ve test süresinin kısaltılması olasılığı incelenmiştir.

Salim & Mosaberpanah (2022), alkali-agrega reaksiyonu mekanizması ve nedenleri ile malzemeler (uçucu kül, metakaolin ve YFC karışımları) ve mineral katkı maddelerinin (UK, yüksek reaktif metakaolin, pirinç kabuğu külü, atık cam tozu, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silika dumanı ve trass) alkali-agrega reaksiyonunu nasıl etkilediğini ve betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Jeopolimerler ve mineral

katkı maddeleri uygun oranlarda kullanıldıklarında alkali-agrega reaksiyonunu etkin bir şekilde azaltıp betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir.

Olajide vd. 2023, sıcaklık ve nem etkisinin ASR üzerindeki etkinliği üzerine yapılan bir derleme çalışmasında, nem ve sıcaklığın reaksiyonda önemli bir rol oynadığı doğrulanmaktadır. Sıcaklığın ASR kaynaklı genleşme oranını artırdığı kanıtlanmıştır. Bunun yanında alkali sızması, jelin kuruması ve gözeneklerin iyileşmesi gibi etkenler sebebiyle nihai genleşmede bir azalmanın da olabileceği vurgulanmaktadır.

Lin vd. 2024, granit ile üretilmiş kum harcındaki alkali-silika reaksiyonuna mineral katkı maddelerinin etkileri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda, UK, SD ve YFC belirli oranlarda (sırasıyla %30, %20 ve %5) ASR'yi etkili bir şekilde engellediğini göstermiştir. En iyi sonuç, %5 oranında silis dumanı+ %5 oranında uçucu kül ve %5 cüruf kullanımı ile elde edilmiş olduğu ifade edilmektedir. Alkali silika reaksiyonunun önlenmesi, aktif bileşen içeriği ve katkı maddelerinin tane inceliğiyle ilişkili olduğu belirtilmektedir. Katkı maddeleri, alkali miktarını azaltarak ve mikro yapıyı iyileştirerek ASR'yi engellediği ifade edilmektedir.

Aytekin vd. 2024, geri dönüştürülmüş mermer, cam ve kireçtaşı tozunun ve kullanım oranlarının basınç dayanımı ve alkali-silika performansı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonunda atık kullanılması ile birlikte alkali-silika reaksiyon direncinin arttığını ifade etmektedirler. %35 oranında cam tozu ve %30 oranında mermer tozu içeren harçlarda sırasıyla en yüksek ve en düşük genleşmenin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Atıkların kullanımı ile hem ASR zararı en aza indirilebileceği hem de ekonomik ve çevreyle ilgili faydaları artırabileceği vurgulanmaktadır.

Krüger vd. 2024, yaptıkları çalışmada alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan jelin yapısı, şişme genişlemesi ve su emilimi arasındaki ilişkilerini incelenmiş, özellikle alüminyumun etkisi araştırılmıştır. Çalışma, farklı Al/Si (0-0.1) ve Ca/Si (0.1-0.4) oranlarına sahip sentetik ASR jelleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, jellere alüminyum ilavesinin genel şişme genişlemesini azalttığını göstermektedir. Ayrıca, Al-ASR jellerindeki suyun daha sıkı bağlandığı ve bu nedenle toplam su alımının azaldığı bulunmuştur. Çalışmada ayrıca, maksimum şişme sonuçları ile ASR jel kompozisyonu arasında doğrusal bir ilişki olduğu, ancak su emilimi ile serbest şişme arasında doğrudan bir ilişki olmadığı, bunun yerine şişme mekanizmasında su bağlanma türü ve jel gözenek boyutunun belirleyici faktörler olduğu ortaya konmuştur.

Geleneksel yöntemlerle beton yüzeyindeki çatlakların tespiti ve incelenmesi, yalnızca uzman kişiler tarafından yerinde görsel incelemelerle gerçekleştirilebilir (Nyathi vd., 2023). Ancak bu metotta insan hatalarına, yüksek işletme giderlerine, trafik kesintilerine ve erişim kısıtlamalarına ilişkin olası sınırlamaları vardır (Park vd., 2020). Son on yıllarda gelişen teknolojik gelişmelere dayalı olarak görüntü tabanlı çatlak tespiti yöntemleri üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar, beton yüzeylerinin görüntülerinin farklı görüntüleme cihazları kullanılarak elde edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Beton yüzeyindeki çatlaklar, kamera tabanlı görüntü işleme teknikleri (Zhang, 2014), (Alam vd., 2015), (Shivprakash ve Sunil, 2015), Uzaktan algılamaya dayalı görüntü işleme teknikleri (Patrik, 2013), (Will vd., 2015), ultrasonik görüntü tabanlı işleme teknikleri (Dhital & Lee, 2012) ve diğer çeşitli görüntü tabanlı işleme teknikleri yardımıyla belirlenebilmektedir (Vidal vd., 2016), (Xu & Zhang, 2013). Kamera tabanlı görüntü işleme teknikleri literatürde diğer yöntemlere kıyasla daha ağırlıklıdır.

Ito vd. 2002, beton blokların otomatik olarak incelenmesini sağlayan bir ölçüm sistemi önermişlerdir. Yüksek çözünürlüklü kamera görüntü işleme teknikleri kullanılarak oluşan çatlakları otomatik olarak belirlemişlerdir. Önerdikleri yöntem, çok ince çatlakların tespiti ve yüksek çözünürlükte çatlak analizi sağlamıştır. Sistem, beton blokların yük testinde kullanılmış ve sistemden olumlu geri bildirimler alındığı belirtilmektedir.

Kamera tabanlı görüntü işleme teknikleri çalışmalarında ilk araştırmacılar, görüntü işleme tekniklerinde eşik tabanlı yöntemlerin kullanımına odaklanmıştır. Yapılan bir çalışmada beton yüzeylerindeki çatlakları tespit etmek için yerel uyarlamalı eşikleme yöntemi önerilmiş ve ön işleme tabi tutulmuş görüntüye bu yöntemi uygulanmıştır (Fujita ve Hamamoto, 2011).

Ioli ve arkadaşları, çatlak tespiti ve ölçümü için medial eksen dönüşümü ve Canny kenar tespiti algoritmasına dayalı ikizleştirme ve iskeletleştirme yöntemlerini kullanmıştır (Ioli vd., 2022).

Tomczak ve arkadaşları, beton yüzeyi ile görüntü tarayıcısı arasındaki mesafeyi bilinen bir çözünürlükte sabit tutarak çatlak genişliğindeki değişimi milimetre cinsinden ölçmüştür (Tomczak vd., 2017). Ortalama çatlak genişliğinin tahmini standart belirsizliğini 0.008 mm olarak belirlemişlerdir.

Li ve Zhao 2020, Euclidean distance transformu ve en küçük kareler ilkesini kullanarak maksimum çatlak genişliğini ölçmüştür. Çatlak genişliği, lazer mesafe ölçer,

kamera görüş açısı ve yüzeye olan kamera mesafesiyle elde edilen piksel mesafesi arasındaki ilişkiye dayanılarak milimetre cinsinden hesaplamışlardır.

Jeong vd. 2021, beton yapıların çatlaklarını incelemek için dijital görüntüler ve dijital görüntü işleme tekniklerini kullanmıştır. Deneylerde farklı lens ve kameralar kullanılarak çeşitli kalınlıklarda çizgilerin görüntülerini yakalamışlardır. Çatlak genişliği ölçümünün piksel değerlerine dayandığını ve çalışma mesafesinin doğru ölçüm için kritik olduğunu gösteren sonuçlar elde etmişlerdir. Bu sonuçlar, belirli nesnelerin boyutlarını ölçmek için gereken optimal mesafelerin ve ölçüm yönergelerinin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Ayrıca, iç mekânda yapılan deneylerle belirlenen ölçüm parametrelerini doğrulamak amacıyla saha ölçüm testleri de gerçekleştirilmiştir. Görsel muayeneyle belirlenen gerçek çatlak genişlikleri, çözümleme için kullanılmıştır. Sonuçlar, görüntü işleme kullanılarak çatlak genişliği ölçüm doğruluğunu etkileyen faktörlerin belirlenmesine yardımcı olmuş ve bu çalışmada uygulanan görüntüleme ekipmanı ve optik ekipman için optimal mesafeleri ve ölçüm yönergelerini sunmayı amaçlamışlardır.

1.4. Betonda Durabilite

Durabilite, yapı malzemelerinin ve yapıların önemli bir bozulma olmaksızın uzun bir süre boyunca amaçlanan işlevlerini yerine getirme kapasitesini ifade eder. Beton bağlamında dayanıklılık, bir beton yapının hizmet ömrü boyunca hem iç hem de dış fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkilere dayanma kabiliyeti olarak tanımlanır.

1.5. Betonda Bozulmaya Yol Açan Etkenler

Beton ve betonarme elemanların zaman içinde bozulması hem iç hem de dış faktörlerden kaynaklanır. Sülfat saldırısı, donma-çözülme döngüleri, aşınma ve karbonatlaşma gibi dış etkiler betonun bütünlüğünü önemli ölçüde etkileyebilir. Hasarın boyutu, bu koşulların etkinliğine ve betonun kalitesine bağlıdır. Yüksek kaliteli beton bile şiddetli dış etkilerden yeterince korunmadığı takdirde hasara açık olabilir. Beton hasarına fiziksel, mekanik, kimyasal ve biyolojik etkenler sebep olmaktadır.

1.5.1. Fiziksel ve Mekanik Etkenler

Betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyen fiziksel ve mekanik faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- **Darbe:** Beton, kullanım süresi boyunca farklı darbe etkilerine maruz kalabilir. Bu tür darbeler, betonun zamanla dayanımı ve dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkileri olabilir.
- **Aşınma:** Beton yüzeyinde, farklı aşındırıcı etkenler nedeniyle kütle kayıpları oluşabilir. Sürtünmeye neden olan yaya ve araç trafiği gibi faktörler, aşınmaya neden olabilmektedir.
- **Erozyon:** Yüksek hızla akan suların beton yüzeyini aşındırarak deformasyona yol açmasına erozyon denir. Bu süreç betonun dayanıklılığını olumsuz etkiler.
- **Kavitasyon:** Bu olay genellikle su yapılarında meydana gelir. Suyu maruz yapıların oyulması şeklinde ortaya çıkan bir fiziksel bozulma biçimidir.
- **Donma ve Çözülme:** Betonun içindeki boşluklarda bulunan suyun donması, genleşmeye neden olur. Bu genleşme sonucu betonun bünyesinde gerilmeler oluşur. Bu durum, betonun yapısında bozulmalara yol açabilir.
- **Yüksek Sıcaklık:** Betonun örtü kalınlığı az ise, yüksek sıcaklık altında donatı daha fazla uzar. Bu durum, betonda ek gerilmeler meydana getirir ve yapının dayanıklılığını olumsuz etkiler.

1.5.2. Kimyasal ve Biyolojik Etkenler

Betonda kimyasal bozulma nedeniyle beton yüzeyinde çatlamlar, dökülmeler meydana gelebilir. Buna bağlı olarak gözeneklilik ve geçirimsizlik artar. Bunun sonucunda betonun dayanıklılığı olumsuz etkilenir. Kimyasal reaksiyonlar genellikle fiziksel ve biyolojik etkilerle ardışık olarak meydana gelebilir. Örneğin, fiziksel bir etki nedeniyle beton çatladığında, bu durum betonun kimyasal bozulmalara karşı daha savunmasız hale gelmesine yol açabilir. Betonun bozulmasına neden olan kimyasal süreçler aşağıda açıklanmıştır:

- **Alkali-Agrega Reaksiyonu:** Çimentolarda mevcut alkali oksitler ile agregada bulunan reaktif silislerin reaksiyona girmesiyle silika jeli oluşur. Bu jel, betonun

içinde baskı oluşturarak çatlaklara neden olur ve betonun dayanıklılığını olumsuz etkiler.

- **Sülfat Etkisi:** Betondan sızan sülfatlar reaksiyona girerek betonun bozulmasına yol açmaktadır. Bu etkileşim, özellikle betonun yüzeyinde beyaz lekeler, dökülme ve çatlaklar şeklinde kendini gösterir.
- **Karbonatlaşma:** Havada bulunan karbondioksit çimento ile reaksiyona girerek çimento hamurunun büzülmesine neden olur. Bu süreç, betonun pH değerinin düşmesine ve korozyon sürecinin başlamasına sebep olarak çatlakların oluşmasına yol açar.
- **Asit Etkisi (Asit Hücumu):** Betona sızan asitler, hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girer betonun hasar görmesine sebep olur. Bu olaya asit hücumu denir ve betonun yapısal bütünlüğünü tehdit eder.
- **Sertleşmiş Çimento Bileşenlerinin Hidrolizi ve Yıkanması:** Hidrate olmuş çimentonun katı bileşenleri, gözenek suyu içinde çözünmeyen CSH, CH ve CAH gibi bileşikler oluşturur. Eğer pH seviyesi 5,5'in altına düşerse, bu bileşiklerin çözünmesi hızlanır ve betonun dayanıklılığı azalır.
- **Alkali-Silika ve Alkali Karbonat Reaksiyonu:** Alkali oksitler ve agregalarla (aktif silis içeren) birlikte reaksiyona girerek jel oluşturur. Bu jel zamanla şişer ve betonun içinde çatlaklar oluşur, bu da betonun dayanıklılığını zayıflatır.
- **Kalsiyum ve Magnezyum Oksidin Gecikmiş Hidratasyonu:** Çimentodaki kalsiyum ve magnezyum oksitlerin geç hidratasyonu, betonun genleşmesine ve çatlamasına yol açar. Bu, özellikle betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkiler.
- **Biyolojik Etkiler:** Bitki ve ağaç kökleri betonun içerisine nüfuz ederek burada büyüyüp genişleyebilir, bu da çatlakların oluşmasına neden olabilir. Ayrıca deniz yapılarındaki yosunlar ve kanalizasyonlardaki mikroorganizmalar da betonun dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.

Tüm bu süreçler, betonun uzun vadeli dayanıklılığı üzerinde önemli olumsuz etkileri vardır. Bu tür etkilerle mücadele için çeşitli önlemler ve kaliteli malzeme kullanımı gereklidir.

1.6. Alkali-Silika Reaksiyonu

Yaygın bir sorun olan ASR, birçok beton ve/veya betonarme yapıya zarar veren çok karmaşık bir kimyasal reaksiyondur. Çimentodaki alkali oksitler, aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerek betonun hasar görmesine neden olan bir jel oluşturur. Nemli bir ortamda bu jel su emerek genişler. ASR kaynaklı genişleme, belirli bir sınır değerin üzerine çıktığında beton için olası bir risk oluşturur (Nayır, 2015).

Reaksiyonun gerçekleşebilmesi için agreganın reaktif silis içermesi gerekmektedir. Bunun yanında ortamın belirli düzeyde alkali içermesi gerekmektedir. Ve ayrıca ortamda nemin bulunması gerekmektedir. Bu parametrelerden herhangi birinin eksik olması durumunda betonda ASR nedeniyle genişleme meydana gelmez. Alkali-silika reaksiyonunun neden olduğu genişleme, iki aşamalı bir süreç olarak gelişir (Baradan vd., 2012). İlk aşamada alkaliler reaktif silis ile tepkimeye girerek alkali-silika jeli oluşur. İkinci aşamada ise alkali-silika jeli ortamdaki nemi alarak genişler ve çatlaklara sebebiyet verir.

Alkali-silika reaksiyonunun ilk aşamasında oluşan jel, ilerleyen süreçte ortamda mevcut suyu emmesi sonucu hacmi artar. Bu hacim artışı, çimento hamuru ve agrega çeperinde mikro çatlakların oluşmasına yol açabilir. Mikro çatlaklarla ilerleyen jel aynı zamanda büyüyerek betonda çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca dayanım kaybına sebebiyet verdiği belirtilmektedir. Alkali-silika reaksiyonunun yavaş ilerleyen bir süreç olması nedeniyle, genişlemenin etkisiyle beton içinde oluşan çatlakların belirginleşmesi genellikle uzun zaman alır (Neville, 1981).

Reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için eşdeğer alkali miktarı olarak hesaplanan değerin %0,60'ın üzerinde olması gerekmektedir. Eşdeğer alkali miktarı sodyum oksit eşdeğeri cinsinden Denklem 1'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$(Na_2O)_e = Na_2O + 0,658K_2O \quad (1)$$

Çimentodaki alkaliler (sodyum oksit ve potasyum oksit gibi) çimentonun hammaddelerinden kaynaklanır. Betondaki alkaliler, yalnızca çimentodan değil, aynı zamanda agrega, karışım suyu, zemin suyu, mineral katkıları, kimyasal katkıları ve endüstriyel atık suları gibi diğer bileşenlerden de kaynaklanabilir. Betonun alkaliliği, çimento ve bağlayıcı malzemelerin içeriği üzerinden değerlendirilir. Ancak beton karışımına eklenen kimyasal ve mineral katkıları da alkali miktarını artırabileceğinden, bu katkıların da etkisi

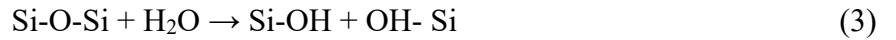
dikkate alınmalıdır. Alkaliler yalnızca çimentodan kaynaklanıyor ise alkali miktarı aşağıdaki Denklem 2’de hesaplanmaktadır (Baradan vd., 2010).

$$[\text{Çimento alkali oranı}] \times [\text{Çimento miktarı (kg/m}^3\text{)}] = \text{Betonda alkali miktarı (kg/m}^3\text{)} \quad (2)$$

1.6.1. Alkali-Silika Reaksiyonunun Oluşum Mekanizması

Çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan katı ürünler, esas olarak C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) ve C-H (kalsiyum hidroksit) yapılarından oluşur. Ancak, bu hidratasyon ürünleri çimento hamurundaki tüm boşlukları dolduramaz. Çimento hamurunda, özellikle mezo ve mikro boşluklar gibi büyük boşluk hacimleri kalmaktadır. Mezo boşluklar, su molekülleriyle (H-O-H) doludur, ancak mikro boşluklar çıplak gözle görünmez (Glasser, 1991).

Alkali-silika reaksiyonunda ilk olarak reaktif silis çözünmektedir. Devamında alkali-silika jeli meydana gelir ve alkali-silika jeli ortamdan su emerek genişler. İlk aşama olan reaktif silisin çözünmesi hidroksil iyonlarının (OH^-) etkisiyle iki aşamada gerçekleşmektedir. Betonda mevcut hidroksil iyonları sadece Ca(OH)_2 ile değil, potasyum hidroksit ve sodyum hidroksit vasıtasıyla da sağlanabilmektedir. İlk aşamada, silisin su ile reaksiyonu sonucunda silis yüzeyinin uç kısımları OH iyonlarına dönüşerek çözünür hale gelir. Bu süreçte silisin yapısı değişir ve Si atomları, OH iyonları aracılığıyla birbirlerine bağlanır. Bu yapıya "silanol" (Si-OH) denir ve bu reaksiyon Denklem 3'te gösterilmektedir (Özdemir, 2023).



Opal gibi su içeren silisli agregaların yapısında zaten birçok silanol bağı bulunur. Bu silanol bağları asidik bir karaktere sahip olup, bazik özellik gösteren boşluk çözeltisiyle reaksiyona girmeye hazırdır. Denklem 4’te gösterildiği gibi, silanol grupları OH^- iyonlarının ikinci saldırısına uğrar ve çözünür. Bu süreçte silanol grubu, ortamda bulunan H_2O molekülünü serbest bırakır. Sonuç olarak, silanol yapısı SiO^- ’ya dönüşür ve su içerisinde dağılır.



SiO^- iyonları kalsiyum (Ca^{2+}), potasyum (K^+) ve sodyum (Na^+) iyonlarını jel içerisine çekerek dengeyi sağlar. Bu etkileşim, alkali-silika reaksiyonunun sonucunda oluşan jelin yapısında dengeyi kurar ve genişlemenin kontrol edilmesine yardımcı olur.



Denklem 5'teki iyon dengesi sodyum oksit yardımıyla kurulur. Diğer katyonların da katılmasıyla Denklem 6'da verildiği üzere daha çok Si-O-Si yapısı zarar görür (Glasser,1991).



1.6.2. Alkali-Silika Reaksiyonu Ürünleri

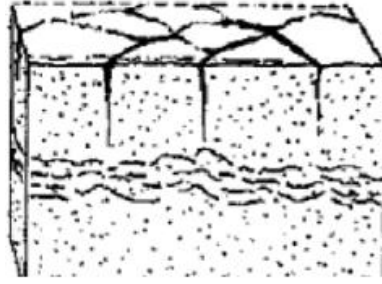
Reaksiyondan kaynaklı ürünün bileşimi ve yapısı, reaksiyonun sıcaklığına ve giren ürünlerin konsantrasyonuna, mevcut reaktif silis türüne ve boşluk suyunun bileşimine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Reaksiyon sonucunda meydana gelen çatlaklarda jel çoğunlukla şeffaf ve reçinemsî bir yapıya sahiptir. Jel örneklerinin viskoziteleri arasında belirgin farklar bulunur. Bazı jeller iyi düzeyde akışkan olup, çatlaklar arasından sızarak betondaki boşlukları kısmen ya da tamamen doldurabilir. Oluşan bu jeller havaya maruz kaldıklarında karbonatlaşarak kurur ve genellikle beyaz bir görünüm alır (Poole, 1991).

Regourd-Moranville (1989) alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan ürünler üzerine yaptığı çalışmada ürünleri jeller ve kristaller olarak iki gruba ayırmıştır. Harç çubuk metodunda elde edilen harçlardaki reaksiyon ürünleri ile sahada inşa edilen yapıda meydana gelen ASR ürünlerinin kimyasal ve morfolojik bakımdan benzerlik gösterdiği belirtilmektedir (Erdoğan, 2023).

1.6.3. Alkali-Silika Reaksiyonunun Belirtileri

Alkali-silika reaksiyonunun ürünleri oluşmadığı sürece, bu reaksiyonun yol açacağı hasarlardan söz edilemez. Alkali-silika reaksiyonu meydana geldiğinde, betonun yapısal bütünlüğü ciddi şekilde etkilenebilir. Bu reaksiyon sonucunda, genişleme ve deformasyon meydana gelir, bu da betonun çatlamasına yol açar. Ayrıca, çatlaklardan jel sızması, beton

yüzeylerinde renk değişimi gibi belirtiler de gözlemlenebilir. Bu tür hasarlar, betonun dayanıklılığını düşürür ve uzun vadede yapının güvenliğini riske atabilir. ASR'nin genleşme sonucu gerçekleşen belirtisi betonun yüzeyinde meydana gelen harita çatlağı şeklindeki görünümüdür (Şekil 1). ASR kaynaklı çatlaklar, zemin oturması ve aşırı yüklerin etkisiyle oluşan çatlak desenlerinden farklıdır.



Şekil 1. ASR'nin neden olduğu harita çatlakları (Arslan, 2001)

Yapılacak gözlemlerle; çatlakların yeri, deseni, uzunluğu, genişliği ve görünür derinlikleri belirlenebilir. Ayrıca, bu çatlakların agrega kesitinden veya çimento hamurundan mı geçtiği de tespit edilebilir. ASR'nin oluşturduğu jelleşme, agrega taneciklerinin içinde ya da çevresinde reaksiyon halkaları şeklinde gelişebilir. Bu jel, bulabildiği suyu emerek enerjisini boşaltır ve su emdikçe hacimsel olarak şişer. ASR nedeniyle oluşan çekme gerilmeleri, çatlakların 3 veya 4 kollu yıldız şeklinde meydana gelmesine yol açar (Şekil 2) (Arslan, 2001).



Şekil 2. ASR kaynaklı çatlakların görselleri (Arslan, 2001)

Alkali-Silika Reaksiyon jelinin suyu emerek şişmesi nedeniyle betonda oluşan gerilme bağlı enerji, çatlakların meydana gelmesiyle açığa çıkar. Tepkimeye giren parçacıkların sayısı arttıkça, bu çatlaklar birleşerek harita şeklinde bir çatlak deseni oluşturur. Ancak bu tür çatlamların tek nedeni ASR değildir. Tekrarlanan donma-çözülme döngüleri ve büzülme ve şişmeye yol açan mekanizmalar gibi diğer süreçler de betonda harita şeklinde çatlakların oluşmasına neden olabilmektedir (Farny ve Kosmatka, 1998).

Rengi beyazdan griye kadar değişebilen ASR jeli veya kalsiyum karbonat birikintileri genellikle betondaki çatlaklar boyunca görülebilir. Bu birikintiler bazen yüzey birikintileri veya salgılar olarak adlandırılır. Çatlaklardan sızan maddeler beyaz, sarımsı olabildiği gibi renksiz görünebilir ve viskoz, akışkan, mumsu, elastik, yapışkan ve hatta sert dahil olmak üzere çeşitli dokulara sahip olabilir. Bu birikintiler tipik olarak beton içinde devam eden kimyasal reaksiyonların bir işaretidir ve potansiyel dayanıklılık sorunlarına işaret edebilir. Harita çatlakları yüzeydeki renk kaybı veya renk değişimleri ile birlikte görülür. Koyu renkli veya kararmış bölgeler, genellikle ASR nedeniyle oluşur. Çatlak boyunca 2-3 mm genişliğinde renk açılmaları, beyazlaşma, pembeleşme ya da kahverengileşme görülebilir (Arslan, 2001).

Köprülerde ASR nedeniyle meydana gelen çatlaklar, genellikle köprü tabliyesinin ortasında ve köprü kolonlarında görülür. Bu çatlaklar, üstten alta doğru uzunlamasına uzanır. Uzunlamasına çatlaklar arasında ise yatay yönde genişleyen, kısa ve ince minik çatlaklar yer alır. Ayrıca, bu çatlakların çevresinde beyaz renkli depositler de görülebilir. Bu durum şişen ASR jelinin varlığını gösterir (Stark vd. 1993; Naik, 2008).

1.6.4. Alkali-Silika Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler

- Agreganın Reaktifliği

Betonda alkali-silika reaksiyonunun (ASR) meydana gelmesi için, reaktif silisin herhangi bir formda bulunması şarttır. Reaktif silis, farklı doku ve kristal yapılar gösterebilir. Silisin doku farklılıkları, kayalaşma sürecinde soğuma hızının azalmasıyla şekillenir. Agregadaki silisli mineraller, kayaç oluşumu sırasında soğuma hızına bağlı olarak, amorf ya da camsı (kristalleşmemiş) yapıdan, kriptokristal, mikro kristal ve kristal yapıya kadar çeşitlenebilir. Bu eşitlilik, silisin reaktifliğini etkileyerek, alkali-silika reaksiyonunun gelişmesine zemin hazırlar. Bazen kuvars kristallerinin oluşumu sırasında içsel gerilmeler de meydana gelir. Bu tür kuvars minerallerini içeren agregalar reaktif özelliğe sahiptir. Aşağıdaki Tablo 1'de, reaktiflik derecesine göre mineral ve kayaçlar tanımlanmaktadır (Ramyar vd., 2002).

Tablo 1. Reaktivlik derecesine göre mineral ve kayaçlar (Ramyar vd., 2002)

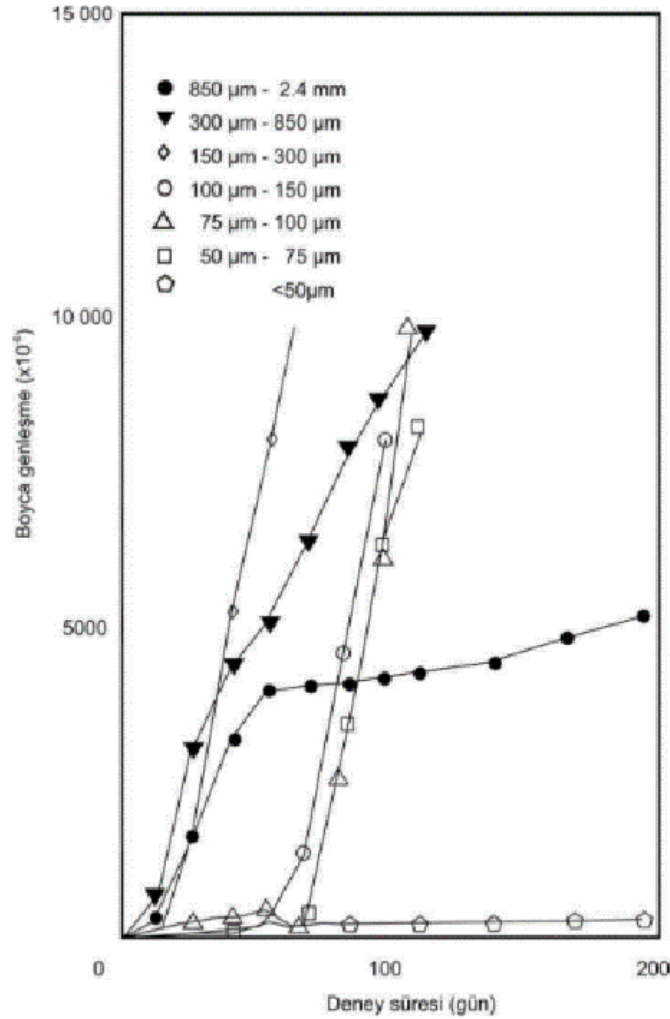
Reaktivitedeki azalmaya göre silis mineralleri	Reaktivitedeki azalmaya göre kayaçlar
Amorf silis	Tüfler dahil volkanik camlar
Opal	Metakuvarsit metamorfize kumtaşları
Stabil olmayan kristali silis	Granitik gnayslar
Cört	Deforme olmuş granitik gnayslar
Kalsedon	Diğer silis içeren metamorfik kayaçlar
Silisin diğer kriptokristalin formları	Silisli ve mikalı şist ve fillitler
Metamorfik olarak ayrılmış ve bozulmuş kuvars	İyi kristalize olmuş volkanik kayaçlar
Deforme olmuş kuvars	Pegmatitik volkanik kayaçlar
Yarı kristalleşmiş kuvars	Silis içermeyen kayaçlar
Saf kuvars	

Agrega içinde bulunan reaktif mineral miktarının, betonun genleşmesi için zararlı olup olmadığını belirlemek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Agregada içinde %3-5 opal bulunması durumunda betonun şişmesinin maksimum seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir; buna karşın %20'den fazla opal içeren agregalarda ise şişme meydana gelmediği tespit edilmiştir. Reaktif minerallerin fazla olması durumunda betonda şişme meydana gelmemesi ilk bakışta mantıksız gibi görünebilir. Ancak bu durum, agregada içinde bulunan reaktif silise yeterli alkali oksitlerin bulunmamasından ve etkisiz derecede alkali silis jeli oluşmasından kaynaklanmaktadır (Yalçın vd., 1974).

ASR nedeniyle oluşabilecek zararlarda reaktif agreganın tane büyüklüğü önemli bir etkiye sahiptir. Tane büyüklüğü 75 µm ile 1 mm arasında değişebilmektedir. Bazı durumlarda 5 mm'ye kadar ulaşabilen boyutlardaki reaktif agregalar kullanıldığında genleşmenin maksimum seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak, 75 µm'nin altındaki boyutlarda reaktif agreganın fazla miktarda bulunmasına rağmen genleşme meydana gelmemiş, buna karşın reaksiyonun izleri ortaya çıkmıştır. Agreganın fiziksel ve kimyasal özellikleri de reaktif agreganın boyutunun etkinliği üzerinde etkilidir. Özellikle gözenekliliği yüksek olan agregalarda, boşluk çözeltilisine giriş daha kolay olur ve bu da reaksiyon alanının artmasına yol açar. (Shrp, 2003).

Vivian (1951) ve Zhang (1999), opal içeren harç prizmalarında yaptıkları deneylerde, boyca en fazla genişlemenin 150-300 μm arasında tane boyutlarına sahip harçlarda gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Burada agrega reaktif durumdadır. Şekil 3, agrega tane boyutlarına sahip harç prizmalarının boyca genişlemesinin değişimini göstermektedir (Hobbs, 1988).

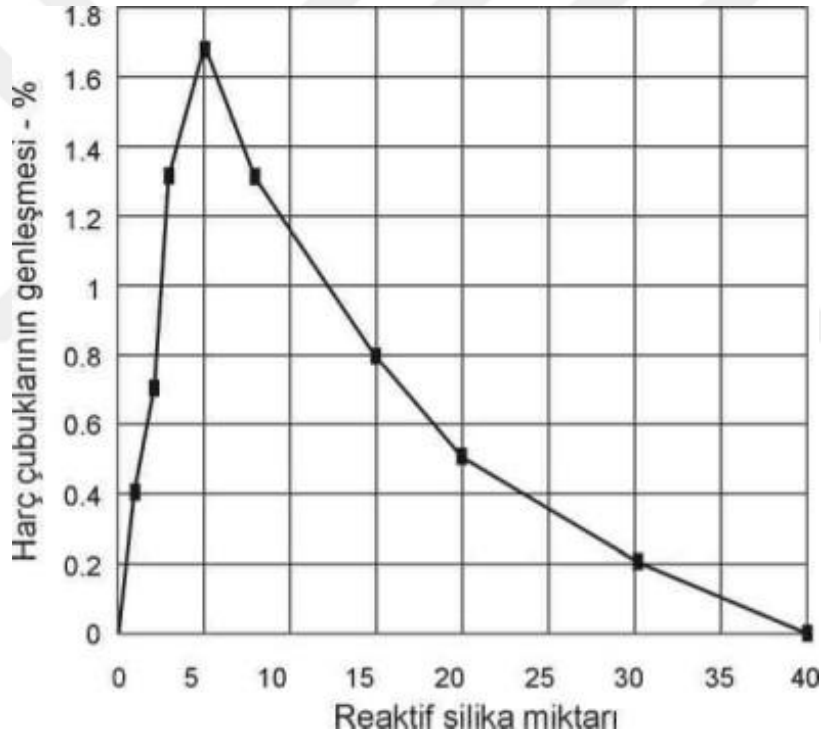


Şekil 3. Farklı agrega tane boyutlarına sahip harçların gün-genleşme ilişkisi

Reaktif agrega ve mineral türlerinin belirlenmesinde günümüzde oldukça yaygın olarak petrografik analiz yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Ancak, mikroskopik tespitlerle yapıdaki hasarların doğrudan bir ilişkisini kurmak oldukça zordur. Bu tür incelemeler, sadece reaktif minerallerin varlığını belirleyebilirken, hasarın boyutunu ve türünü kesin olarak anlamak için daha fazla analiz gereklidir. (Hewlett, 1998).

ASR'nin betondaki genleşme miktarı bazı durumlarda agregadaki reaktif bileşen miktarının artışıyla lineer olarak artmaktadır. Ancak, diğer birçok durumda, maksimum genleşme, şartlar aynı kaldığı sürece agregada bulunan reaktif bileşen miktarının belirli bir değeri aşması halinde meydana gelir. Bu durum literatürde "Sınır Değer Davranışı" olarak tanımlanmaktadır. (Hewlett, 1998).

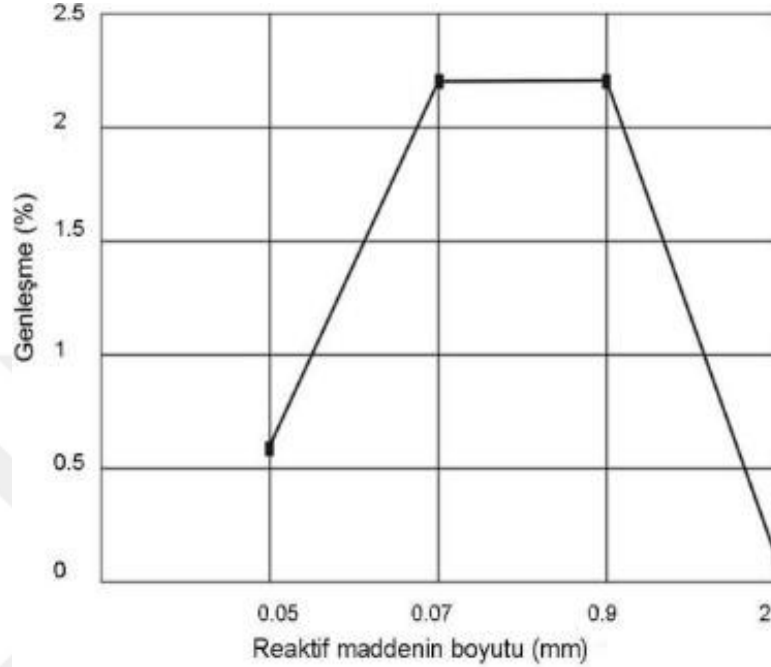
Herhangi bir agregada en fazla genleşmeye yol açan reaktif madde miktarı, su-çimento oranı düştükçe ve çimento dozajı arttıkça artar. Bu durum, çimento miktarının ve su-çimento oranının etkisiyle reaktif silis miktarının genleşme üzerindeki etkisini gösterir. Şekil 4, reaktif silis miktarı ile genleşme arasındaki ilişkiyi ve bu ilişkinin sonuçlarını göstermektedir (Vivian, 1951).



Şekil 4. Mevcut reaktif silis miktarı ile genleşme arasındaki ilişki

Şekilde gösterildiği gibi, reaktif silis miktarı %5'e yaklaştıkça alkali agreganın genleşmesinde artış gözlemlenmektedir. Ancak içeriğin %5'i geçmesiyle birlikte genleşme azalır. Yüksek miktarda silis içeren ortamlardaki alkali-silika genleşmesinin azalmasının nedeni, ortamda mevcut olan alkali miktarının fazla silis ile tam olarak reaksiyona girememesidir. Yani alkali, silisin tümüyle reaksiyona girip alkali silika jeli oluşturacak kadar yeterli miktarda değildir ve bu nedenle reaksiyonun tam olarak gerçekleşemeyeceği belirtilmektedir (Mindess vd., 1981).

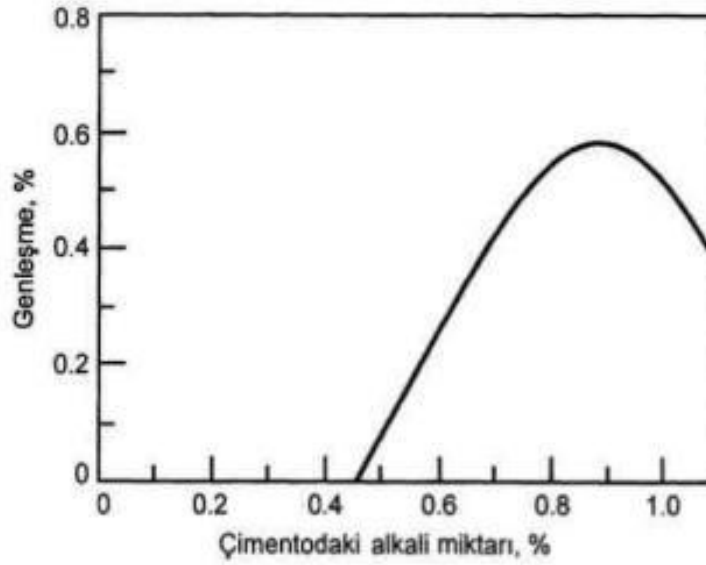
Şekil 5'te gösterildiği gibi orta boyuttaki reaktif taneciklerde en yüksek genleşme seviyesine ulaşmaktadır. Bu, belirli bir boyuttaki agregaların, alkali-silika reaksiyonunun en etkin şekilde gerçekleşmesine olanak sağladığını gösterir (Mindess, 1981).



Şekil 5. Agregadaki reaktif maddenin boyutu ile genleşme arasındaki ilişki

- Betonun Alkali İçeriği

Alkali mineraller hidrolik bağlayıcıların çoğunluğunu bulundurmaktadır. Bu durumda genellikle çimentolar içinde alt bileşenler olan sodyum ve potasyum elementlerinin bulunacağı anlamına gelir. Çimento içindeki bu maddelerin oranları genellikle %1,3'ü geçmez, ancak beton ve çimento özelliklerini genellikle olumsuz yönde etkileyebilir. Bu maddeleri çimento üretim süreçlerinde bertaraf etmek hem güç hem de ekonomik açıdan imkânsızdır. Bu nedenle, beton üreticilerinin bu zararlı etkileri iyi bir şekilde bilmeleri ve gerekli önlemleri almaları zorunludur. Şekil 6'da görüldüğü gibi, çimentodaki alkali miktarının yaklaşık %0,5' ulaştığında genleşme artmaya başlamaktadır. Çimentodaki alkali içeriği %0,9 mertebesine kadar yükseldiğinde ise genleşme yüzdesinde önemli bir artış meydana gelmektedir (Woods, 1968).



Şekil 6. Çimentodaki alkali miktarı ile ASR kaynaklı genleşme arasındaki ilişki

Betonun alkaliliği arttıkça, ASR potansiyeli de yükselmektedir. Kanada ve Avrupa’da, beton alkaliliği ASR’nin kontrolü açısından önemli bir faktör olarak kabul edilmekte ve saha performansı kullanılarak beton alkaliliği için belirli sınırlandırmalar getirilmektedir. Bu kriter, genellikle Portland çimentosu (PÇ) gibi ana bağlayıcı malzeme kullanılan betonlar için geçerlidir. Ayrıca, beton özelliklerini geliştirmek amacıyla mineral katkılarla yapılan betonlar için de bu yaklaşım uygulanabilir. Beton alkaliliğinin bir kriter olarak kullanılması halinde en doğru yöntem, betonu oluşturan tüm bileşenlerin alkalilikleri göz önünde bulundurularak betonun alkaliliğinin belirlenmesidir (Farny ve Kosmatka, 1998).

Genellikle, beton alkaliliği değerlendirilirken yalnızca çimentonun ve çimentomsu özelliklere sahip malzemelerin alkaliliği dikkate alınır, çünkü betonun diğer bileşenlerinin etkisi minimumdur. Sonuç olarak, betonun alkaliliği şu bağıntı ile belirlenir: $1\text{ m}^3\text{ Betondaki Alkali Miktarı (kg/m}^3) = [\text{Mçimento (kg/m}^3) \times \text{Çimento Na}_2\text{O Eş değeri \%}]$

Bu bağıntı, alkali içeriğini çimentonun ağırlığına ve sodyum oksit eşdeğer yüzdesine göre hesaplamaktadır (Farny ve Kosmatka, 1998).

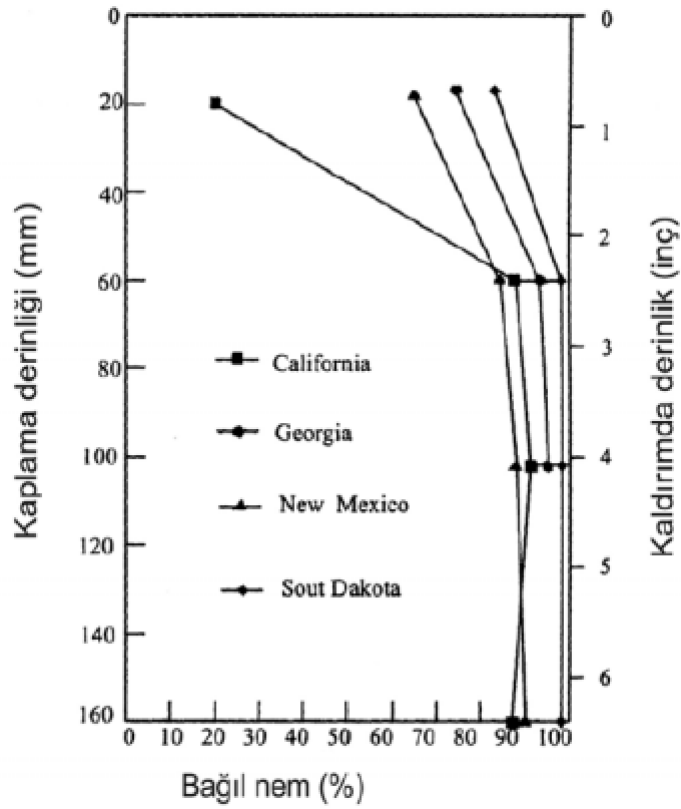
ABD’de betonun alkaliliğini kontrol etmek için çimento alkaliliğinin düşük seviyede tutulması (düşük alkalili çimento kullanımı) yaygın olarak kabul edilen görüştür. ASR’nin neden olduğu genleşmeyi azaltmak amacıyla düşük alkalili çimento kullanımı etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. ASTM C 150’ye göre Na_2O eşdeğeri yüzdesi %0.60’tan az olan çimentolar düşük alkali içeren çimento olarak tanımlanır. Ancak, bu tip çimento kullanılsa bile, belirli koşullar altında ASR riski devam edebilir. Bu durumlar şunları

İçerebilir: Su hareketi veya bağıl nem değişiklikleri nedeniyle betonda bazı noktalarda alkali konsantrasyonunun artması agregaların aşırı reaktif olması, beton karışımında kullanılan mineral ve kimyasal katkıları, karma suyu veya agregadan alkali ilavesi, çimento dozajının fazla olması nedeniyle betonun genel alkaliliğinin artması şeklindedir. Bu faktörler, düşük alkalili çimento kullanılsa dahi ASR riskinin ortaya çıkmasına neden olabilir (Farny ve Kosmatka, 1998).

Alternatif bir yaklaşımda, alkali içeriğini yalnızca toplam oksit miktarına dayanarak, özellikle Na_2O alkali eşdeğerini kullanarak ifade etmek yetersiz ve hatta yanlış olabilmektedir. Beton özelliklerini etkileyen toplam alkali miktarından ziyade boşluk çözeltisinde çözünebilen alkali iyonlarıdır. Dahası, potasyum ve sodyum iyonlarının etkileri çeşitli durumlarda önemli ölçüde farklılık gösterir, bu nedenle bu farklılıkları potasyumu miktar açısından sodyuma eşitleyerek basitleştirmek yanıltıcı ve yanlış olabilmektedir (Akman, 2002).

- Nem

Yeterli nemin varlığı, kimyasal reaksiyon sırasında oluşan alkali-silika jelinin suyu emmesini, genleşme basıncı oluşturmalarını ve çekme gerilmelerine neden olduğu için önemlidir. Sonuç olarak, uygulamalar sırasında ıslak depolama koşullarında veya nemli çevre koşullarında alkali-silika reaksiyonu (ASR) nedeniyle önemli hasar meydana gelebilir. Kütle betonda, düşük nem kaybı nedeniyle, nem zararlı genleşmeye neden olacak düzeyde yapı içinde kalabilir. Büyük yapı elemanlarda, ASR'nin oluşumu ve ilişkin genleşme için gereken suyun çoğu, hidrasyon sırasında kullanılmayan karışım suyudur. Sonuç olarak, ASR jeli nispeten kuru ortamlarda bile oluşabilir. Ancak, daha fazla genleşme ve hasarı tetiklemek için ek suya ihtiyaç vardır. Nemli beton kuru ortamlara (atmosferdeki bağıl nem $<75\%$) yerleştirilirse, tipik olarak bir binanın içinde, ASR hasarından muhtemelen etkilenmez. Ancak, yağmura, deniz suyuna veya yeraltı suyuna maruz kalan beton, bu koşullarda mevcut olan nem nedeniyle her zaman ASR kaynaklı hasar riski taşır. Çöl gibi kuru iklim bölgelerinde, iyi kürlenmiş betonlarda beton yüzeyinin hemen altında bağıl nem oranı 80% veya daha yüksek seviyelere ulaşabilir. Şekil 7'de bağıl nem-derinlik ilişkisi görülmektedir. Döşeme kaplamaları, temeller, barajlar ve istinat duvarları gibi yapılar bu sebeple ASR'ye karşı özellikle hassastır (Swamy, 1989).



Şekil 7. Farklı bölgesel koşullardaki derinlik-bağıl nem ilişkisi (Stark, 1992)

Betonun geçirgenliği düşük su/çimento oranı, ek çimento, mineral katkı maddeleri veya başka bir yöntem kullanılarak azaltılırsa, betona nem girişi ve malzeme içinde yayılımı sınırlanır. Sonuç olarak, alkalilerin beton içindeki hareketi de azalır ve alkali-silika reaksiyonu (ASR) riskini en aza indirmeye yardımcı olur. Nem emilimindeki bu azalma, zararlı genleşmeye ve potansiyel hasara yol açan kimyasal reaksiyonu yavaşlatır.

- Sıcaklık

Sıcak iklimlerdeki yapılar, soğuk iklimlerdekilere kıyasla ASR'ye daha yatkındır çünkü ASR hızı sıcaklık arttıkça hızlanır. Sıcaklık etkisi çoğu agregada aşırı termal genleşmeye yol açar. Bazı agregalar üzerinde 13-20°C arasındaki sıcaklıklarda yapılan ASR genleşme ölçümleri, 38°C'de yapılanlara kıyasla daha küçük genleşme değerleri göstermektedir. Yüksek ve düşük sıcaklıkların genleşme üzerindeki etkisi agreganın özelliklerine de bağlıdır. Genel olarak, çoğu agregada yüksek sıcaklıklarda daha yüksek reaktiflik gösterir (Swamy, 1989).

Agrega reaktifliğini etkileyen zaman ve çevre koşullarını kontrol etmek mümkün değildir. Genellikle reaktif olmayan bazı agregalar, sıcaklıklar 35-45°C'ye yükseldiğinde

hala zararlı genleşme reaksiyonlarına maruz kalabilir. Birçok yapı, yaşam ömürleri boyunca periyodik olarak bu yüksek sıcaklık koşullarına maruz kalabilir ve bu da potansiyel olarak alkali-silika reaksiyonlarını (ASR) tetikleyerek hasara neden olabilir. (Binal, 2002).

- Su/Çimento Oranı

Reaktif agregalar içeren betonda karışım oranlarının değiştirilmesi, malzemenin çeşitli özelliklerini etkiler. Bu değişiklikler, reaktif agregaların içeriğini, alkali seviyelerini, hidroksil iyonu konsantrasyonunu ve betonun mukavemetini ve dayanıklılığını kapsar. Düşük su/çimento oranı kullanmak, beton üzerinde olumlu etkiler yaratır. Bu, betonun daha yoğun, daha az boşluklu ve geçirimsiz bir yapıya sahip olmasına yol açarak, genel performansını iyileştirir. Ayrıca, daha düşük su/çimento oranına sahip beton daha yüksek mukavemet göstererek ASR dahil olmak üzere çevresel faktörlerden kaynaklanan hasara karşı daha dirençli hale gelmektedir (Nayır, 2015).

Düşük su/çimento oranının hem beton hem de alkali-silika reaksiyonu üzerinde olumlu etkisi vardır. Düşük su/çimento oranı alkali-silika reaksiyonunun zararlı etkilerini minimize edebilir. Su/çimento oranı ile genleşme doğru orantılı olabilmektedir.

- Sürüklenmiş Havanın Etkisi

ASR'den zarar görmemiş reaktif agregalar içeren yapılar incelendiğinde, hava boşluklarını tamamen veya kısmen ASR jeli tarafından doldurulduğu görülmektedir. Hava sürükleyici katkıları içeren betonlarda, çok küçük ve geniş aralıklı hava kabarcıkları (yaklaşık 50 µm çapında ve 200-250 µm aralıklı) betonun hasar görmesini önlemeye yardımcı olabilmektedir. Bu hava boşlukları ASR jelinin neden olduğu genleşme etkilerini beton içinde buz oluşumundan kaynaklanan genleşmeyi en aza indirdiği gibi minimize edebilir, sonuçta betonun dayanıklılığını ve hasara karşı direncini artırır (Arslan, 2021).

Bu nedenle, hasarsız betonda ASR jelinin hava boşluklarını doldurarak ilerlediği ve hava sürükleyici katkıların kullanımının ASR'nin neden olduğu hasarı önlemeye yardımcı olabileceği sonucuna varılabilir (Shrp, 2003).

- Karışım Oranlarının Etkisi

Betonun karışım oranları değiştirildiğinde, betonun reaktif agrega içeriği ve hidroksil iyonu konsantrasyonu da değişebilir. Bu değişiklikler, betonun genleşme seviyesini etkiler. Suyun mevcudiyeti ASR reaksiyonunu hızlandırdığından, suya maruz numunelerin genleşmesi su/çimento oranından etkilenir. Buna karşılık, suya maruz olmayan numunelerdeki reaksiyon, su buharının difüzyon hızı tarafından yönetilir (Ramyar vd., 2002).

1.7. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirlemede Kullanılan Deneysel Yöntemler

1.7.1. Harç Çubuk Deneyi (ASTM C227)

Bu yöntem, harç çubuklarının boy değişimlerini ölçerek çimento-agrega oranlarının alkali kaynaklı genleşmeye duyarlı olup olmadığını değerlendirmek için kullanılır. 25x25x285 mm boyutlarında hazırlanan harç çubukları, belirli koşullar altında belli bir süre boyunca kürlenir. Bu kürlenme işlemi sırasında çubukların uzunluğundaki değişimler, alkali-silika reaksiyonu ve bununla ilişkili beton genleşmesinin potansiyelini gösterir (Ramyar vd., 2002). ASTM C227 yöntemi ile ASTM C 1260 yönteminde kullanılan harç çubukları benzer şekilde hazırlanmaktadır. Tablo 2’de verilen elek setleri agrega granülometrisini belirlemede kullanılır.

Tablo 2. Kullanılan elek setleri ve karışım oranları

Elek göz açıklığı (mm)		Ağırlıkça (%)
Üzerinden geçen elek	Üzerinde kalan elek	
4,75 (No.4)	2,36 (No.8)	10
2,36 (No.8)	1,18(No.16)	25
1,18 (No.16)	0,60(No.30)	25
0,60 (No.30)	0,30(No.50)	25
0,30 (No.50)	0,15(No.100)	15

Na₂O eşdeğeri en az %0,60 olan bir çimento seçilmelidir. Su/çimento oranı harcın agrega türüne göre ASTM C109 standardında belirtildiği şekilde seçilmelidir. Standart uyarınca dikkate alınan miktarlar Tablo 3’te verilmektedir.

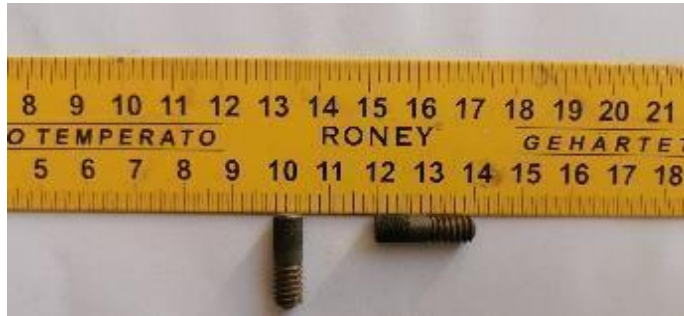
Tablo 3. Harç çubukları için karışım miktarları

Malzeme türü	Elek serisi					S/Ç	Su(ml)	Çimento(g)
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100			
	%10	%25	%25	%25	%15			
Doğal agrega	100 g	250 g	250 g	250 g	150 g	0,45	199,8	444
Kırmetaş agrega	100 g	250 g	250 g	250 g	150 g	0,50	222	444

Deneylerde kullanılacak alkali içeriği, en az %0,60 Na_2O eşdeğerine sahip olmalıdır. Üretimlerde, 25x25x285 mm boyutlarında çelik kalıplar kullanılmaktadır. Kalıplar, 2 adet örnek dökümüne imkân verecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 8. Kullanılan kalıplar



Şekil 9. Deneysel çalışmada kullanılan pimler

Harç çubukların boylarındaki değişimi ölçmek için 7 mm çapında ve 32 mm boyunda pimler kullanılmıştır (Şekil 9). Deney için en az dört adet harç çubuğu hazırlanır. Harç, kalıplara yerleştirilirken şişlenip sıkıştırılarak düzgün bir şekilde yerleştirilmelidir. Kalıplar, %90 nispi nemdeki bir kür odasında $23 \pm 1,7$ °C'de 24 saat bekletilir. Bu süre sonunda, harç çubuklarının boyları ölçülür ve ardından alt bölgesinde su haznesi bulunan bir kaba yerleştirilir. Hazne, yarıya kadar su ile doldurulur ve suyun, örneklerle temas etmemesi

sağlanır. Haznenin içinde, örneklerin yüksek bağıl nemde (%100) kalması sağlanmalıdır. Sonrasında, bu şekilde tasarlanmış kaplar, $37,8 \pm 1,7$ °C (100 ± 3 °F) sıcaklıkta sabit ısıda çalışan bir etüve yerleştirilir (Gümüş, 2009).



Şekil 10. 25x25x285 mm boyundaki harç çubuklar

Saklama kapları 16 saat boyunca kapalı bir şekilde $23 \pm 1,7$ °C ($73,4 \pm 3$ °F) sıcaklıkta kür odasına konarak soğumaya bırakılmalıdır. Bu süre sonunda, dijital komparatör kullanılarak harç çubuklarının boy değişimi ölçülür. İlk ölçüm 14 gün sonunda alınır, ardından ilk 6 ayda her ayda 1 sonra 9 ve 12. aylarda ölçümler yapılır. Gerektiğinde, uzunluk değişimi her 6 ayda bir tekrar ölçülür (Gümüş, 2009).



Şekil 11. Dijital komparatör

Birim boy değişim yüzdelerinin hesabı aşağıdaki Formül 8 ile yapılmaktadır.

$$\%L = (AL/L) \times 100 \quad (7)$$

Formülde:

$\%L$ = Yüzdesel olarak boy değişim,

ΔL = Harcın ya da örneğin boy değişimi (mm),

L = Kullanılan örneğin ilk uzunluğu (mm), ile ifade edilmektedir.

ASTM C 227'ye göre, boy değişim verilerinin 12. ay sonunda %0,1'lik genleşme sınırını aşması durumunda, agrega alkali-silika reaktifliği bakımından zararlı olarak değerlendirilir. Ancak, bu testin dezavantajı, test süresinin uzun olmasıdır (Gümüş, 2009).

1.7.2. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C1260)

Alkali reaktifliği belirlenecek agregalarla üretilen harç çubukları, yüksek alkaliliğe sahip bir çözelti içinde ve yüksek sıcaklıkta saklanarak test edilir. Bu süreçte, harç çubukların boy değişimleri düzenli aralıklarla ölçülür. Bu yöntem, reaktif agregaların alkali çözeltisiyle etkileşime girerek uzunluk değişimlerine yol açıp açmadığını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir.

Deney için hazırlanacak harç çubukları, harç çubuk yöntemi (ASTM C 227) ile aynı şekilde hazırlanır. En az 3 harç çubuğu, saf su içerisine konarak $80 \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ sabit sıcaklıktaki etüvde 24 saat süre boyunca bekletilir. Ardından, harç çubuklarının ilk boy ölçümleri alınır. Harç çubuklarının içerisine konulacak alkali çözeltisi, 1 N NaOH çözeltisidir ve 900 ml saf suya 40 g sodyum hidroksit eklenerek hazırlanır. Bu çözelti, sodyum hidroksit çözeltisi olarak adlandırılır. Hazırlanan bu çözelti, 80°C 'de sabit sıcaklıkta tutulur ve harç çubukları bu çözelti içerisine yerleştirilir (Şekil 12).



Şekil 12. Deneysel kısımda içerisine harç çubuklarının yerleştirildiği tank

Bu işlemden sonra, 3., 7. ve 14. günlerde boy ölçümleri alınarak, boy değişim yüzdeleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\%L = (\Delta L/L) \times 100 \quad (8)$$

Formülde:

$\%L$ = Boy değişim yüzdesi,

ΔL = Örneğin boy değişimi (mm),

L = Örneğin ilk uzunluğu (mm), ile ifade edilmektedir.

ASTM C 1260 standardına göre, harç çubuklarında ölçülen boy değişim verileri şu şekilde değerlendirilir:

- $\%0,1$ 'den küçük boy değişimi: Agregalar zararsız kabul edilir (14 gün sonunda).
- $\%0,1$ ile $\%0,2$ arasında boy değişimi: Deney süresi uzatılır ve örneklerin 28 günlük boy değişimleri ölçülür.
- $\%0,2$ 'den büyük boy değişimi: Agregalar potansiyel olarak zararlıdır (14 gün sonunda)

Bu test yönteminde uygulanan yüksek alkali ve sıcaklık koşulları, agregaların nadiren karşılaştığı koşullardır. Bu yüzden, ASR geçmişi olmayan zararsız olan bazı agregalar bazen test sırasında reaktifmiş gibi yanlış sonuç verebilmektedir. Bu nedenle, bu testin diğer test yöntemleriyle birlikte kullanılması önerilmektedir. Çok yavaş reaksiyon gösteren ve uzun süreli harç çubuğu metodu ile alkali potansiyeli belirlenemeyen agregalar için faydalı olması bu test yönteminin avantajıdır (Gümüş, 2009). Aynı zamanda kısa sürede sonuç elde edilebilmektedir.

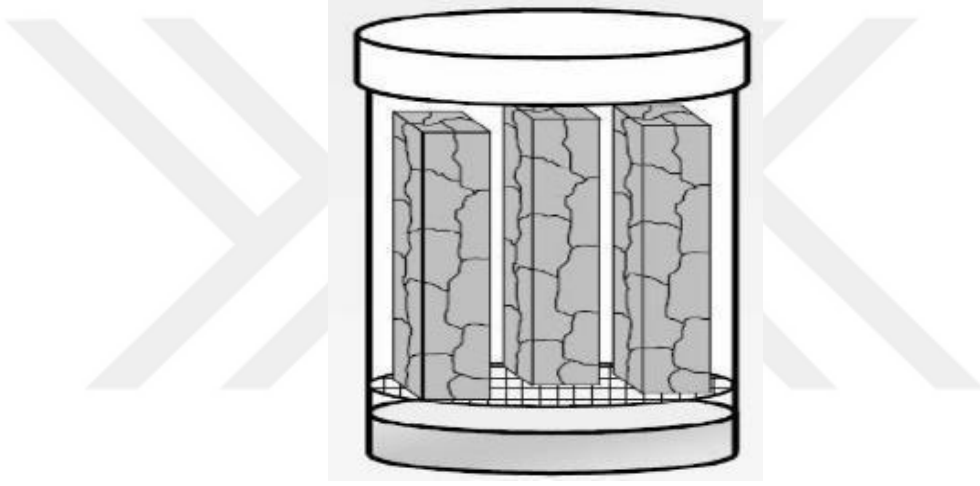
1.7.3. Beton Prizma Deneyi

Bu test yönteminde 75x75x285 mm boyutlarında harç çubukları hazırlanır ve zamana bağlı olarak genleşme ölçülür. Beton prizma testi çimento-agrega bileşimlerinin alkali kaynaklı genleşmelere duyarlı olup olmadığını belirlemek amacıyla yapılmaktadır (Şekil 13).

Bu deney yöntemini uzun dönem harç çubuğu yönteminden ayıran en önemli özellik, harç çubuklarının boyutlarının farklılığı ile birlikte, harç çubuklarının hazırlanması sırasında

karışım suyuna ilave NaOH nedeniyle alkaliliğin artırılmasıdır. Bu işlem, testin alkali etkilerini daha belirgin hale getirmektedir.

Deney yapılacak agrega ince agrega ise reaktif olmayan iri agrega ile karıştırılır. Kaba agreganın reaktifliği ölçülecekse, kalıplara dökülmeden önce reaktif olmayan ince agrega ile karıştırılarak belirli bir gradasyona getirilir. Numunelerin çimento miktarı $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ olmalıdır. Seçilecek su/çimento oranı 0,42 ile 0,45 arasında değişkenlik gösterebilir. Toplam alkali içeriği ise %0,9 Na_2O 'ya karşılık gelmelidir. Numunelerin ilk uzunluk ölçümleri alındıktan sonra, 24 saat sonra kalıplardan çıkarılır. Sonra standartta belirtildiği şekilde 38°C 'de nemli ortamda saklanır (Nayır, 2015).



Şekil 13. %100 bağıl nemi saklayacak şekilde tasarlanmış kap

Numunelerin uzunluk ölçümleri alınmadan önce, $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki kür odasına alınarak, saklama kapları kapalı olarak 16 saat soğumaya bırakılır. Bu süreden sonra harç çubukları üzerinde önce 7., 28. ve 56. günlerde, sonra 3., 6., 9. ve 12. aylarda dijital komparatörle ölçümler yapılır. Gerekirse bundan sonraki her 6 ayda bir uzunluk değişimi ölçülür. Bu yöntem, mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmeleri üzerindeki etkisine ilişkin en doğru sonuçları verir. Mineral katkıların etkinliğinin değerlendirilmesinde 2 yıllık genleşme değerinin %0,04 ile sınırlandırılması ve karışımın alkali içeriğinin çimentonun kütleye %1,25'ine çıkarılması önerilir (Berube & Duschene, 1992).

Genleşme bir yıl sonunda %0,04 veya daha fazla ise, bu standarda göre agreganın potansiyel tehlike oluşturduğu kabul edilir. Genleşmeleri etkileyen faktörler arasında çimento miktarı, su/çimento oranı, sıcaklık ve kaplarının nem durumu yer almaktadır (Gün, 2007).

1.7.4. Kimyasal Yöntem (ASTM C 289)

Bu test yöntemi, uygulama prosedürü bakımından hızlı harç çubuğu metoduna benzerdir. Her iki yöntemde de hazırlanan alkali ortam aynıdır. Ancak fark, kimyasal yöntemde agreganın reaktifliğini ölçmek için harç çubuğu yapılmaması ve doğrudan agreganın alkali ortama maruz bırakılmasıdır (Gümüş, 2009).

Kimyasal yöntemde reaktifliği belirlenecek agrega eleklerden elenerek alınan örnekler, akar saf su altında yıkanarak toz ve ince parçalardan arındırılır. Örnekler 24 saat $105 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta etüvde kurutulur. Reaksiyon kabına 3 adet alınan örnek yerleştirilir. Öncesinde elektronik tartı ile 25 gramlık 3 adet örnek hazırlanır. Çözelti 900 ml suya 40 g sodyum hidroksit katılarak hazırlanmaktadır. Diğerine ise örnek konulmadan sadece 25 ml 1 N NaOH çözeltisi eklenir ve bu kapta referans kabı olarak tanımlanır (Gümüş, 2009).

Örnek kaplar 24 saat $80 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıkta su banyosuna yerleştirilir. Buradaki sıcaklık sabittir. 24 saat sonunda su banyosundan çıkarılan örnekler 30°C 'ye kadar soğutulur. Daha sonra kapakları açılır. Kuru bir kap içerisine süzülür. Bir pipet yardımıyla 10 ml çözelti çekilir ve 200 ml'lik balon jöjeye aktarılır. Bu durum homojenliğin sağlanması için gerçekleştirilir. Sonraki işlemde üzeri damıtık su ile 200 ml'ye tamamlanır. Çözelti çözünmüş silisin ve alkali azalmasının tayini için kullanılır (Gümüş, 2009).

1.8. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirlemede Kullanılan Diğer Yöntemler

Başlıca deneyler dışında farklı deney yöntemleri de yapılmaktadır. Bu deneylerin arasında petrografik analiz, standart deney metodu (ASTM C 441), jel pat metodu, alman çözünme metodu, ozmotik hücre metodu ve otoklav metodu yer almaktadır. Bu metotların bazılarının detayları aşağıdaki alt başlıklarda bahsedilmiştir.

1.8.1. Agregaların Petrografik Analizi

Bu analiz, kayacın adlandırılması için minerallerin tür ve oranlarına bakılarak yapılan bir inceleme işlemidir. İnce kesitler agregadan alınarak, optik mikroskopla incelenerek içeriklerinde bulunan potansiyel reaktif minerallerin (reaktif silis) belirlenmesini sağlar. Reaktif silisin tespiti için X-ışını yayılımı ve tarayıcı elektron mikroskobu gibi teknikler de oldukça yaygındır. Agregalar dışında, zarar görmüş beton ve harç örneklerinden alınan ince kesitler de incelenerek, meydana gelen hasarın ASR'den kaynaklanıp kaynaklanmadığı

belirlenebilir. Petrografik incelemeyi yapan kişinin deneyimi ve bilgisi, analiz sonuçlarının doğruluğu için kritik öneme sahiptir. ASR ile ilgili kimyasal yöntemlerle beton veya harç örnekleri üzerinde testler yapılmadan önce bu tür analizlerin yapılması, zamandan tasarruf sağlar ve hangi test yönteminin uygulanacağına karar vermede olanak sağlar (ASTM C295).

1.8.2. Mineral Katkıların veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu (ASTM C441)

Bu yöntem, agregalar ve çimento alkalileri arasındaki reaksiyonlardan kaynaklanan zararlı genleşmeleri önlemek için yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların etkinliğini incelemeyi amaçlamaktadır. Pireks cam reaktif agrega ve mineral katkıları veya cüruf içeren çimento karışımları ile hazırlanan harç çubukları, belirli sürelerle standart kür koşullarında test edilir. İlk adımda, 400 g yüksek alkalili çimento ile 900 g belirli bir gradasyonda pireks cam agrega karıştırılarak bir kontrol karışımı hazırlanır. Bu karışımın 14 günlük genleşmesi en az %0,25 olmalıdır. Cüruf dışındaki mineral katkıları için, 300 g yüksek alkalili çimento ve çimentoya eşit hacme sahip 100 g mineral katkı kullanılır ($100 \times \text{mineral katkı yoğunluğu} / 3,15$). Cüruf kullanıldığında ise, 200 g çimentoya eşit mutlak hacme sahip 100 g cüruf ilave edilir ($100 \times \text{cüruf yoğunluğu} / 3,15$). Belli durumlar için şantiyede kullanılacak çimento ve katkı karışımları ile uygun alkaliliğe sahip çimentolar kullanılabilir. Numunelerin dökümü, kürlenmesi ve ölçüm işlemleri ASTM C 227 standardına göre yapılır. Deney süresinin sonunda, kontrol numunesi ile katkı içeren numuneler arasındaki "genleşmede meydana gelen azalma" yüzde olarak hesaplanır. Genleşmedeki azalma %75 veya daha fazla ise kullanılan mineral katkı uygun kabul edilmektedir. Ayrıca, belli bir çimento-agrega kombinasyonu kullanıldığında 14 günlük maksimum genleşme değeri %0,02 olarak belirlenmiştir. Bu yöntemin eleştirilen noktaları ise, Pireks camı gibi yüksek reaktifliğe sahip bir malzemenin doğal agregalar gibi davranmaması ve bu nedenle gerçekçi sonuçlar vermemesi ile ilgilidir (Ramyar vd., 2002).

1.8.3. Jel Pat Metodu

Jel pat metodunda, agrega örneği koyu kıvamda bir çimento hamuruna yerleştirilir ve yüzeyi bilenerak agrega parçalarının açığa çıkması sağlanır. Alkali çözeltiye batırılan bu hamur, stereoskopik mikroskop ile belirli aralıklarla incelenir. Deney, 20°C sıcaklıkta ya da daha yüksek sıcaklıklarda uygulanabilir. Bu yöntem, petrografik mikroskopla

incelenemeyecek kadar ince dağılımlı reaktif silisin tespit edilmesine imkân tanır. Sonuç olarak, reaktif olabileceği düşünülen agregalar için beton ya da harç prizma yöntemlerinden birinin uygulanması tavsiye edilmektedir (Ramyar vd., 2002).

1.8.4. Otoklav Metodu

Otoklav hücre metodu da alkali-silika reaktifliğini belirlemek için kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Bu metotta, agregaların alkali-silika reaktifliğini belirlemek için boy değişimi ve çatlakların incelenmesi amaçlanmaktadır. Otoklav hücre metodunda, agregalar belirli sıcaklık ve basınç koşullarında, alkali çözelti içinde uzun süre tutulur. Bu işlem sırasında meydana gelen boy değişiklikleri ve çatlamlar gözlemlenir, bu da agregaların potansiyel reaktifliğini değerlendirmeye yardımcı olur (Ramyar vd., 2002).

1.9. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Bu tür mineral katkıları arasında uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve zeolit gibi malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu katkıları, betonun özelliklerini iyileştirmek ve çeşitli inşaat uygulamalarında daha dayanıklı malzemeler elde etmek için kullanılır (Andıç, 2002).

Mineral katkıları betonun dayanım ve dayanıklılığı artırması açısından önem taşımaktadır. Mineral katkıları alkali-silika reaksiyonu ile ilişkili meydana gelebilecek genleşmeleri önlemek için de kullanılmaktadır. Mineral katkı kullanımı, ekonomik, teknik, enerji tasarrufu ve ekolojik açıdan birçok yararı mevcuttur (Swammy & Al-Asali, 1989).

Mineral katkıların ASR kaynaklı genleşmeyi azaltma konusunda farklı yaklaşımlar mevcuttur (Glasser, 1991; Thomas 2011; Saha vd. 2018; Lin vd. 2024). Bunlardan bazıları aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- Puzolanik reaksiyon, daha yoğun bir çimento harcı oluşmasına yol açar ve bu da harcın geçirimsizliğini azaltır. Sonuç olarak, iyonların hareketliliği ve dışarıdan alkali ile nemin girişi önemli ölçüde sınırlanır.
- Mineral katkı maddeleri, çimento hamurundaki Ca(OH)_2 içeriğini azaltır ve pH değerini düşürür. Ayrıca, boşluk çözeltisinin alkaliliğini de azaltır. Oluşan C-S- H jeli, alkali tutma kapasitesini artırarak daha az alkaninin serbest kalmasını sağlar.

- Mineral katkı maddeleri, hızlı alkali salınımı yapan Portland çimentosu yerine kullanıldığında seyreltici olarak işlev görür. Örneğin, çimentonun %50'si yerine cüruf kullanıldığında, cürufun içindeki alkalinin sadece yarısı bir yıl içinde reaksiyona girer. Sonuç olarak, cürufllu karışım çözeltisinde bulunan alkali miktarı, aynı su/çimento oranına sahip ve ek katkı maddesi içermeyen sadece çimentodan yapılmış kontrol örneğine kıyasla daha düşük olur.

1.9.1. Uçucu Külün Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Düşük kalorili oldukları için başka alanlarda kullanılmayan kömür ve atıkları öğütülüp termik santrallerinde yakılarak elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Ancak, termik santrallerde toz kömürün yanmasından sonra baca filtrelerinde biriken uçucu kül, artan enerji talepleriyle birlikte önemli miktarlarda birikmektedir. Bu uçucu küller büyük bir yer kaplamakta ve çevreye olumsuz etkisi olmaktadır. İnşaat sektöründe ise uçucu kül, kontrollü şekilde kullanılarak ekonomik bir şekilde değerlendirilmekte ve faydalı hale getirilmektedir (Baradan, 2000).

ASTM C 618 standardı uçucu külleri iki sınıfa ayırmaktadır (C ve F sınıfı). “F sınıfı uçucu külün genleşmeyi kontrol etmede C sınıfı uçucu küle göre daha etkili olduğu belirtilmektedir. Yapılan bir çalışmada F sınıfı uçucu kül için tavsiye edilen yüzdelere 15 ila 25 arasında değişmektedir (Shayan vd., 1996).

Uçucu küllerin ASR kaynaklı genleşme üzerindeki etkisi birçok parametreye bağlıdır, Bu parametreler uçucu külün kimyasal ve mineralojik özellikleri olabileceği gibi ve agreganın reaktivite derecesine bağlı olarak değişkenlikte gösterebilmektedir. Yapılan bir çalışmada yavaş reaksiyona giren agregalar değerlendirilmiştir. %20-30 oranında uçucu külün çimento ile ikame edilmesi durumunda ASR sebebiyle oluşabilecek genleşmelerin azaltılabileceği belirtilmektedir (Karakaş, 2013).

1.9.2. Silis Dumanının Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Silikon metali veya ferrosilikon üretimin bir atık ürünü olan silis dumanı portland çimentosundan 100 kat daha ince (yüzey alanı: 200000 cm²/g), küresel şekilli, kristal olmayan tanelerden oluşan oldukça ince yapıya sahip bir puzolandır. Silis dumanı ayrıca puzolanik aktiviteye sahiptir (Baradan, 2000).

Silis dumanının sahip olduğu puzolanik aktiflikten dolayı harç veya betonda oluşturduğu ilave C-S-H jeli sayesinde daha yoğun bir yapı elde edilmektedir. Bu sebeple yapı içerisine nem girişi zorlaşır. Nemin yapı içerisine girişi önlenerek alkali ile reaktif silis arasında meydana gelen jel oluşumu minimize edilmiş olur (Aquino vd., 2001).

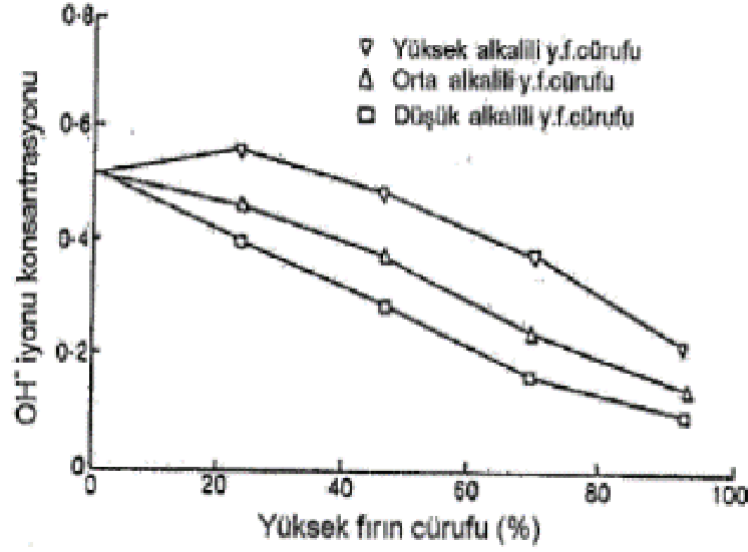
Alkali-silika reaksiyonu üzerinde silis dumanının kullanım oranının etkisi oldukça önemlidir. Silis dumanının belirli oranlarda kullanılması, genleşmede belirgin bir azalma sağladığı gözlemlenmiştir. Yapılan bir çalışmada, çimento yerine %5 oranında silis dumanı kullanıldığında, harç çubuklarında ASR etkisinden dolayı genleşme azalmakla birlikte, tehlikeli olarak kabul edilen genleşme değerinin hâlâ aşıldığı belirtilmiştir. Ancak çimento yerine %10 veya daha yüksek oranda silis dumanı kullanıldığında, genleşmenin sınır değeri olan %0,1'in altına çekilmesi sağlanabilmektedir. Bu bulgu, silis dumanının ASR'nin kontrol altına alınmasında etkili bir katkı olduğunu göstermektedir (Tosun, 2001). Mineral katkıların alkali-silika reaksiyonunu (ASR) bastırmadaki etkinliği üzerine yapılan çalışmada uçucu kül için %20, %40 ve %60; silis dumanı ve metakaolin için ise %5, %10 ve %15 oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Mineral katkı türünden bağımsız olarak, ikame oranları arttıkça ASR'yi bastırma etkisinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Silis dumanı ve metakaolin kullanımı için optimum oranının %10 olduğu ifade edilmektedir (Nayır vd., 2017).

1.9.3. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Cüruf, genellikle alüminyum, silis ve kireç gibi bileşenleri içeren metal endüstrilerinin atık malzemesidir. Cüruf, mineral katkı veya beton üretiminde ise agrega yerine kullanılabilir. Ayrıca, portland çimentosu, kireç ve alçı gibi bağlayıcı maddelerle karıştırılarak da kullanılabilen bir malzemedir. Cürufun bu şekilde kullanımı, hem çevre dostu bir çözüm sunar hem de beton ve çimento ürünlerinin özelliklerini iyileştirebilir (Nayır, 2015).

Yüksek fırın cürufunun kullanıldığı betonlarda alkali-silika reaksiyonu (ASR) kaynaklı genleşmeyi etkileyen başlıca parametreler arasında cürufun inceliği, betonun priz süresi, yetersiz sıkılaştırmaya bağlı olarak hapsolan hava miktarı ve dayanım kazanma hızı yer almaktadır. Özellikle yüksek fırın cürufunun inceliği, bağlayıcının reaktivitesini ve böylelikle ASR'nin ilerleme hızını ve şiddetini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür (Nayır, 2015).

Cürufun aktifliği ve alkali içeriğine bağlı olarak, hidroksil iyonu (OH^-) konsantrasyonu üzerindeki etkiler farklılık gösterebilir. Yüksek fırın cürufunun kullanım miktarı arttıkça, hidroksil iyonu konsantrasyonu azalır. Bu durum, cürufun alkali içeriğinin, çimento hamurundaki kimyasal ortamı değiştirir ve dolayısıyla alkali-silika reaksiyonunun hızını etkileyebilir. Azalan hidroksil iyonu konsantrasyonu, ASR'nin yavaşlamasına veya daha az şiddetli bir şekilde gerçekleşmesine yol açabilir (Hobbs, 1982). Şekil 14'te yüksek fırın cürufu miktarı ile hidroksil iyonu konsantrasyonu arasındaki ilişki verilmektedir.



Şekil 14. Yüksek fırın cürufunun (OH) iyonu konsantrasyonu üzerindeki etkisi

Yüksek fırın cürufu yüksek oranlarda kullanılması durumunda ASR kaynaklı genleşmeyi kontrol etmek için yeterli olabilmektedir. Deneysel bir çalışmada çimento ağırlığının en az %35 oranında kullanılması durumunda etkili olabileceği ifade edilmektedir (Lane ve Ozyıldırım, 1999).

1.9.4. Metakaolinin Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

100-200°C aralığında kil minerallerinde absorbe edilen su buharlaşmaya başlar. Kaolin kili 500-800°C mertebesinde mevcut suyunun yaklaşık %14'ünü kaybederek metakaoline dönüşür. Bu sıcaklık arasındaki dönüşümde kaolin kristal yapı düzenini kaybeder ve bu şekilde kaolin amorf yapı kazanır ve kimyasal reaktif hale gelir. Isıl işlem sayesinde yüksek puzolanik aktiviteye sahip, amorf yapıda metakaolin elde edilir. Buradaki ısı işlemin başarılı bir şekilde uygulanması önem arz etmektedir (Sun vd., 2005).

Metakaolinin büyük çoğunluğunu SiO_2 (%50-55) ve Al_2O_3 (%40-45) oluşturmaktadır. Ayrıca metakaolin eser miktarlarda Na_2O , Fe_2O_3 , CaO , K_2O ve TiO_2 içerir. Metakaolinin SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğine bağlı olarak betonda katkı olarak kullanılmaktadır. 1,5 ile 5,0 μm yarıçapında olan metakaolin taneleri çimento tanelerinden küçüktür (Vu, 2002, Rashad, 2013).

Metakaolin kullanımı beton ve harcın özelliklerini etkilemektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda belirli oranlarda metakaolinin çimento ile ikame edilmesi ile betonun mekanik ve durabilite özelliklerini pozitif şekilde etkilediği belirtilmektedir. Ayrıca betonda kuruma rötresi ve sünmeyi azaltıcı etki gösterdiği ifade edilmektedir (Brooks & Johari, 2001; Tosun vd., 2007).

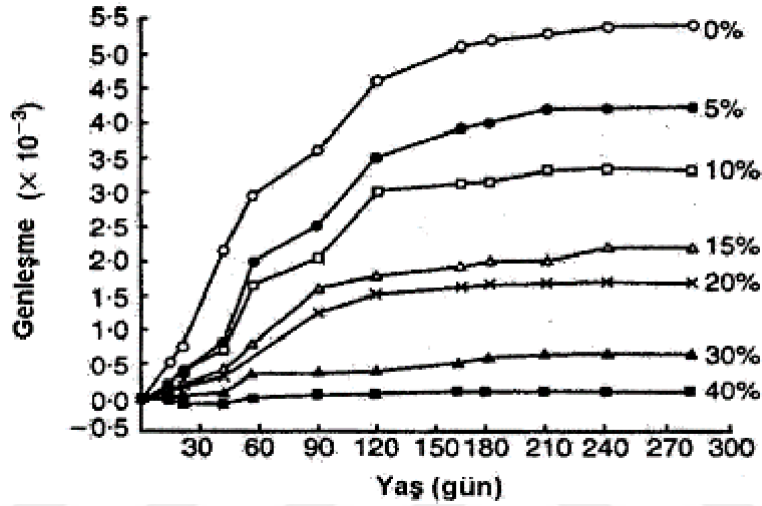
Metakaolinin mevcudiyeti kalsiyum hidroksil yoğunluğunu düşürerek alkali-silika reaksiyonunu minimize etmeye yardımcı olur. Yüksek reaktivliğe sahip metakaolinin ASR kaynaklı genleşmeyi kontrol etmedeki etkinliğini incelemiştir (Ramlochan vd., 2000). Beton ve harçlar, %0–20 oranında metakaolin çimento ile ikame olacak şekilde hazırlanmıştır. 2 yılsonunda, %10–%15 oranda metakaolin kullanımının genleşmeyi 0,04%'ün altında tuttuğu bulunmuştur. Ayrıca, %20 metakaolin eklenmesi, boşluk çözeltilerindeki OH^- , Na^+ , ve K^+ iyonlarının seviyelerini azaltarak genleşmeyi engellediği ifade edilmektedir (Ramlochan vd., 2000).

1.9.5. Doğal Puzolanların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Doğal puzolanlar, doğal olarak oluşan ve amorf yapıda silika içeren malzemelerdir. ASTM C 618'e göre, N sınıfı olarak tanımlanan bu malzemeler, amorf silika elde etmek amacıyla işlem görmüş olan doğal puzolanlardır. Kendi başlarına çok az ya da hiç bağlayıcı özelliğe sahip olmayan puzolanlar, kireç veya çimento gibi başka bağlayıcılarla karıştırıldığında bağlayıcı özellik kazanırlar. Puzolanların, betonda genleşme meydana getiren alkali-silika reaksiyonlarına karşı etkili olduğu bilinmektedir. Puzolanlar, çimento harcındaki kireci tutarak ortamın pH seviyesini düşürür ve reaktif silisin çözünürlüğünü azaltarak alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşabilecek hasarı kısmen veya tamamen engeller (Baradan, 2000).

Doğal puzolanlardan biri olan zeolit, alkali ve toprak kristal yapıya sahip silikatlar olarak tanımlanmaktadır. Zeolit puzolanik reaktivliği, iyon yer değiştirmesiyle betonun boşluk suyunun alkalitesini düşürür ve bu sayede alkali-silika jelinin oluşumunu engeller.

Ayrıca, zeolit agrega ile çimento ara yüzeyini iyileştirerek aderansı artırır. Zeolitın alkali-silika reaksiyonunu önlemedeki etkinliği kullanım oranına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Zeolit kullanım oranı arttıkça, alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşan genleşmeyi azaltmadaki etkinliği artar. Bu durum, Şekil 15'te verilen grafikte açıklanmıştır (Naiqian ve Tingyu, 1998).



Şekil 15. Farklı oranlarda zeolitın zamana bağlı ASR kaynaklı genleşmeye etkisi

Doğal bir puzolan olan pomza, volkanik faaliyetler sırasında ani soğuma ve gazların bünyeden hızla ayrılması sonucu oluşan, oldukça gözenekli bir yapıya sahip camsı bir volkanik kayaç türüdür. Pomza, özellikle hafifliği ve yüksek gözenekliliği ile bilinir. Ülkemizde, pomza aynı zamanda süngertaşı veya köpük taşı olarak da tanınmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, pomza inşaat sektöründe agregalar ve çeşitli bağlayıcılar olarak kullanılır ve betonun dayanıklılığını iyileştirmek amacıyla da yaygın bir şekilde tercih edilir (Baradan, 2000). Bu kapsamda pomza da ASR'yi minimize etmek için kullanılan mineral katkılarından biridir. Yapılan bir çalışmada pomza kullanım oranı arttıkça ASR kaynaklı genleşmelerin azaldığı belirlenmiştir. Çimento ile ikame olacak şekilde %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında pomza kullanımının ASR kaynaklı genleşmeyi azalttığı fakat sınır genleşme değerinin altına indirmek için yeterli olmadığı görülmüştür. Fakat pomzanın çimento ile ikame olacak şekilde %30 oranında kullanımı durumunda ASR kaynaklı genleşmenin sınır genleşme değerinin altında kaldığı belirlenmiştir (Gürkan, 2006).

1.9.6. Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

ASR'nin zararlı etkilerini azaltmak amacıyla çeşitli kimyasal katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkıları ya reaktif silikanın çözünürlüğünü minimize etmekte ya da alkali-silika jelinin oluşumunu engellemektedir (Abit, 1998).

McCoy ve Caldwell 1951'de kimyasal katkıları ilgili ilk çalışmaları başlatmışlardır. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde genleşmede en iyi azalmanın lityum tuzları ile sağlandığı ifade edilmiştir (Mc Joy ve Caldwell, 1951). Yapılan farklı bir çalışmada (Kawamura ve Fuwa 2003), lityum tuzlarının alkali-silika reaksiyonunun neden olduğu genleşmeyi nasıl baskıladığı incelenmiştir. Lityum hidroksidin, sodyum veya potasyum hidroksit ile reaktif silika arasındaki reaksiyonu azalttığı ve ASR jelinin daha az genleştiği bulunmuştur. Ayrıca, lityum tuzlarının ASR jelindeki CaO/SiO₂ oranını azalttığı ve jel içeriğini homojenleştirdiği gözlemlenmiştir.

Lityum hidroksitin betonda kullanılması durumunda OH⁻ iyonu konsantrasyonu artmaktadır. Lityum hidroksitin ASR kaynaklı genleşmeleri minimize edebilmesi için Li⁺ iyonlarının alkali-silika jeli ile yeteri kadar birleşmesi ve bu etkinin karşılanması gerekmektedir. Bu durumdan dolayı oluşacak tehlikeli genleşmeleri engelleyen lityum miktarı pH değerinin yükselmesi nedeniyle oluşan zararlı etkiyi engelleyecek miktarda ayarlanmalıdır (Andiç, 2002; Diamond, 1999).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, mineral katkıların ASR kaynaklı çatlaklar üzerindeki etkisi görüntü işleme teknikleri vasıtasıyla incelenmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında, alkali-silika reaksiyonundan kaynaklı harç numunelerinde meydana gelen çatlak genişlikleri ve genleşmeler ölçülmüştür. Farklı mineral katkı türleri ve bu katkıların değişen ikame oranlarının, çatlak genişlikleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Deneysel gerçeklemede mineral katkı içermeyen referans harç numuneler için ASTM C 1260 Hızlandırılmış Harç Çubuk Deney Yöntemi, mineral katkılı harç numuneler için ise ASTM C 1567 Hızlandırılmış Harç Çubuk Deney Yöntemi kullanılmıştır. Üretilen her bir harç numunenin 3, 7, 14 ve 28 günlük genleşmesi ölçülmüş ve genleşme yüzdeleri hesaplanarak tablo ve grafikler halinde aktarılmıştır. Detaylı ilişkilendirmeler ilgili başlıklar altında verilmiştir.

Deneyin ikinci aşamasındaysa alkali-silika reaksiyonu sonucu harç yüzeyinde meydana gelen çatlakların her biri mineral katkı türü için minimum 60 ve oran için 20 görüntü olacak şekilde görüntüleme cihazı ile fotoğraflanıp Phyton programı aracılığıyla Excel ortamına aktararak görüntülerin çatlak genişlikleri okumaları piksel olarak belirlenmiştir. Ardından piksel milimetre dönüşümü yapılarak çatlak genişliği okumaları tamamlanmıştır. Alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan çatlağa ait görüntüler belirlenirken maksimum çatlak boyuna ve en net çatlak görüntüsüne sahip olan görüntüler seçilmiştir. Bu kısma ait veri ve görüntüler de ilgili başlıkların içerisinde verilmektedir.

2.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deneysel çalışmada çimento, agrega, su, metakaolin, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit ve diğer yardımcı malzemeler (spatula, harç karıştırıcısı, silindirik silolar vb.) kullanılmıştır. Kullanılan malzemelere ait detaylı bilgiler aşağıdaki alt başlıklarda verilmektedir.

2.1.1. Çimento

Deneysel çalışmada CEM I 42,5 R tipi çimento, Trabzon Aşkale Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Kullanılan çimentoya ait bazı özellikler Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Deneysel çalışmada kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	Yüzde (%)	45 μm elek üstünde kalan (%)	9.8	
SiO ₂	19,46	90 μm elek üstünde kalan (%)	1.0	
Al ₂ O ₃	5,11	Özgül Yüzey (Blaine) (m ² /kg)	412.6	
Fe ₂ O ₃	3,31	Özgül Ağırlık	3.12	
CaO	60,23	Priz Süresi	Başlangıç	140
MgO	2,08	(Vicat)(dk)	Bitiş	200
SO ₃	3,05	Su İhtiyacı (%)	29,2	
Na ₂ O	0,27	Hacim Genleşmesi (mm)	1,0	
K ₂ O	0,69	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	28,0
Cl ⁻	0,02		7 gün	40,4
Kızdırma Kaybı	3,00		28 gün	51,5

2.1.2. Su

Karışımların hazırlanmasında, Trabzon'daki yerel şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.3. Agrega

Deneysel çalışmada kullanılan agrega dere agregası olup Artvin ili Şavşat yöresinden temin edilmiştir. Kullanılan agregaya ilişkin belirlenen bazı fiziksel özellikler Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Deneysel çalışmada kullanılan agregaya ait fiziksel özellikler

Kuru özgül ağırlık (g/cm ³)	2,45
Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (g/cm ³)	2,55
Görünen özgül ağırlık (g/cm ³)	2,71
Su emme oranı (%)	2,30

2.1.4. Uçucu Kül

Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül Hatay İskenderun Termik Santralinden temin edilmiştir. Uçucu küle ait XRF analizi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Uçucu küle ait XRF analizi sonuçları Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu küle ait XRF analizi

Kimyasal bileşim (%)	Uçucu Kül
SiO ₂	43,99
Al ₂ O ₃	13,39
Fe ₂ O ₃	7,83
CaO	19,22
MgO	0,076
Na ₂ O	0,163
K ₂ O	4,18
SO ₃	5,22
P ₂ O ₅	1,29
Kızdırma Kaybı	2,41

Çalışmada kullanılan uçucu küle ait XRF analizi ve kimyasal bileşimi incelendiğinde, toplam SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içeriğinin %50'nin üzerinde ve CaO içeriğinin ise %18'den fazla olduğu belirlenmiştir. Bu özellikler doğrultusunda, kullanılan uçucu kül ASTM C618 standardına göre C sınıfı kategorisine girmektedir.

2.1.5. Yüksek Fırın Cürufu

Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Hatay İskenderun Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufuna ait XRF analizi Niğde Ömer

Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yüksek fırın cürufuna ait XRF analizi sonuçları aşağıda Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 7. Deneysel çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufuna ait XRF analizi

Kimyasal bileşim (%)	Yüksek fırın cürufu
SiO ₂	42,71
Al ₂ O ₃	12,08
Fe ₂ O ₃	1,00
CaO	39,63
MgO	0,48
Na ₂ O	0,08
K ₂ O	1,00
SO ₃	0,37
P ₂ O ₅	0,011
Kızdırma Kaybı	0,70

2.1.6. Silis Dumanı

Deneysel çalışmada kullanılan silis dumanı özel bir şirketten temin edilmiştir. Silis dumanına ait XRF analizi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Silis dumanına ait XRF analizi sonuçları aşağıda Tablo 8’de verilmektedir.

Tablo 8. Deneysel çalışmada kullanılan silis dumanına ait XRF analizi

Kimyasal bileşim (%)	Silis dumanı
SiO ₂	86,11
Al ₂ O ₃	0,58
Fe ₂ O ₃	0,85
CaO	0,82
MgO	0,78
Na ₂ O	1,00
K ₂ O	2,54
SO ₃	0,17
P ₂ O ₅	0,041
Kızdırma Kaybı	5,43

2.1.7. Metakaolin

Deneysel çalışmada kullanılan metakaolin özel bir şirketten temin edilmiştir. Metakaolin XRF analizi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Silis dumanına ait XRF analizi sonuçları aşağıda Tablo 9’da verilmektedir.

Tablo 9. Deneysel çalışmada kullanılan metakaolin XRF analizi

Kimyasal bileşim (%)	Metakaolin
SiO ₂	56,10
Al ₂ O ₃	0,58
Fe ₂ O ₃	2,79
CaO	0,60
MgO	1,00
Na ₂ O	1,00
K ₂ O	0,10
SO ₃	0,50
P ₂ O ₅	-
Kızdırma Kaybı	-

2.1.8. Sodyum Hidroksit

Deneysel çalışmada çözelti hazırlamak için kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) (Şekil 16) Trabzon bölgesinde bulunan Akçay Kimya adlı şirketten temin edilmiştir. Sodyum hidroksit içeriğine ait veriler Tablo 10’da verilmektedir.



Şekil 16. Deneysel çalışmada kullanılan sodyum hidroksit

Tablo 10. Sodyum hidroksit muhteviyatı

Formülü	NaOH
Molekül Ağ. (MW)	39,9971 g/mol
Yoğunluk	2,13 g/cm ³
Saflık (A)	99%
Erime Nk. (MP)	318°C
Kaynama Nk. (BP)	1388°C

2.1.9. Kullanılan Diğer Malzemeler

Deneyssel çalışma kapsamında kullanılan diğer malzemeler aşağıda belirtilmiştir.

- Alkali-silika deney tankı (80°C sıcaklığa çıkarabilen ve bu sıcaklıktaki suyun sıcaklığını sabit tutabilen cihaz),
- Harç çubukları birim boy değişimlerini ölçen ölçüm ünitesi,
- Harç çubuk kalıpları,
- Elde edilen karışımın karıştırıldığı kazan, miktar hesabı için kullanılan terazi ve ikame için kullanılan kaşık,
- Karışımın harç çubuk kalıplarına doldurmak için kullanılan spatulalar,
- Harç karıştırıcısı,
- Harç çubuğu numunelerinin içerisine konulduğu dikdörtgen kap

Harç çubuğu numuneleri hazırlandıktan sonra etüve koymadan önce etüv içerisinde durabilmesi için dikdörtgen kaplar kullanılmıştır (Silindirik silolar). Harç çubuğu numunelerinin kazan içerisinde düzgün bir şekilde kalabilmesi için silindirik silolar kullanılmıştır. Deneyde kullanılan malzemeler aşağıdaki Şekil 17’de özet halinde verilmektedir.



Alkali silika tankı



Ölçüm ünitesi



Harç çubukları kalıbı



Karışım kazanı, kaşık ve terazi



Spatula



Harç karıştırıcısı



Dikdörtgen kazanlar



Silindirik silolar

Şekil 17. Deneysel çalışmada kullanılan aparatlar

2.2. Gerçekleştirilen Deneysel Çalışma

Alkali-silika reaksiyonunun belirlenmesinde kullanılan birçok yöntem mevcut olup, literatür kısmında detaylı olarak bahsedilmiştir. Çalışma kapsamında mineral katkı içermeyen referans harç numuneler için ASTM C 1260 Hızlandırılmış Harç Çubuk Deney Yöntemi, mineral katkılı harç numuneler için ise ASTM C 1567 Hızlandırılmış Harç Çubuk Deney Yöntemi kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 1260 ve ASTM C 1567)

ASTM C 1260 ve ASTM C 1567 standartlarında belirtildiği üzere harç çubukları 80 °C sıcaklıktaki NaOH çözeltisinde belirli sürelerle (3, 7, 14 ve 28 gün) bekletilmekte; bu süre sonunda ölçülen genleşmeler aracılığıyla, alkali-silika reaksiyonuna (ASR) girmesi muhtemel agregaların reaktiflik düzeyi incelenerek değerlendirilmektedir. Hızlandırılmış harç çubuk metodu, klasik harç çubuk metoduna alternatif olarak geliştirilmiş bir tekniktir ve özellikle granit, kuvars, kumtaşı, andezit, volkanik tüf, grovak, gnays gibi yavaş

reaksiyon gösteren veya genişleyen agregalar için uygundur. Bu yöntemle ASR kaynaklı genleşme hızlıca belirlenebilir.

ASTM C 1260 standardı betonda kullanılacak olan agreganın alkali-silika reaksiyonuna girerek potansiyel olarak zararlı iç genleşmeye yol açma potansiyelini tespit etmek için kullanılırken ASTM C1567 test yöntemi ise puzolanların ve cüruf çimentosunun, betonda kullanılacak olan agrega ile birlikte kullanıldığında alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan zararlı iç genleşmeyi kontrol etme yeteneğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Her iki standartta benzer test düzeneği kullanılmakla birlikte, ASTM C1567 standardı, ASR etkilerini azaltma potansiyelini değerlendirmek amacıyla puzolanik malzemelerin kullanımını da kapsarken, ASTM C1260 standardı yalnızca agregaların reaktifliğinin belirlenmesine odaklanmakta ve puzolan katkısını içermemektedir.

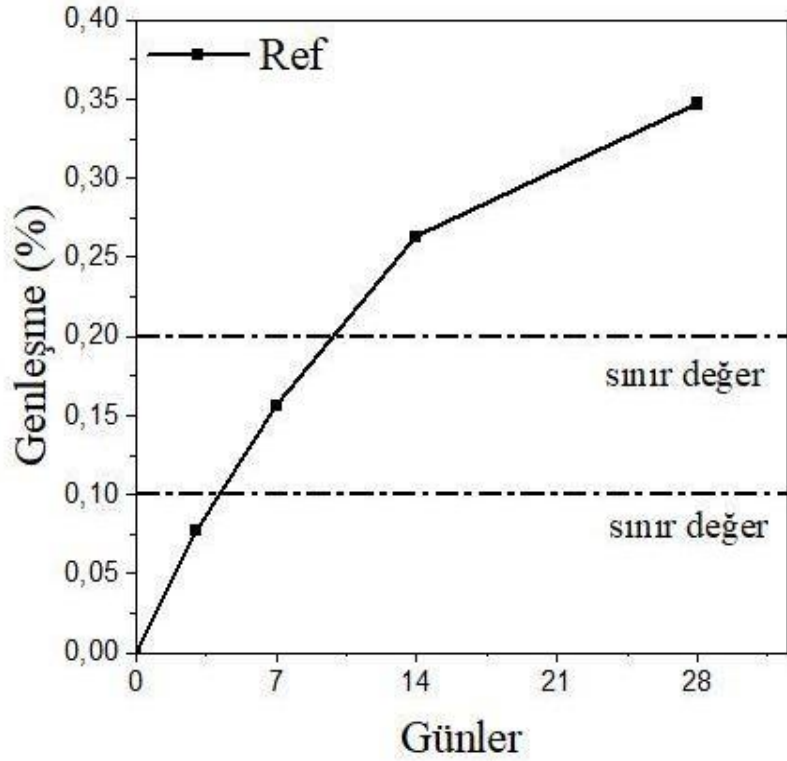
Bu deneyde, her bir üretim için üç adet harç çubuğu üretilir. Kalıplardan çıkarılan numunelerin başlangıç ölçümleri yapılır ve numuneler numaralandırılır. Ardından, harç çubukları saf su içerisine yerleştirilir ve $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ sabit sıcaklıkta 24 saat bekletilir. Bu süre sonunda, harç çubuklarının ilk boy ölçümleri (L_0) alınır. Harç çubukların içine konulacağı alkali çözeltisi, 1 N NaOH çözeltisi olup, 900 ml suya 40 g sodyum hidroksit eklenerek hazırlanır. Bu çözelti, sodyum hidroksit çözeltisi olarak adlandırılır. Hazırlanan bu çözelti 80°C sabit sıcaklıkta tutularak, harç çubukları bu çözeltiye yerleştirilir (ASTM C 1260).

İlk boy ölçümleri alındıktan sonra, üç, 7 ve 14 gün sonunda yapılan ölçümlerle birim boy değişimleri ölçülerek genleşme ilgili standart uyarınca hesaplanır. Bu hesaplama, harç çubuğu deney yönteminde belirtilen eşitlik kullanılarak yapılır. On dördüncü gün sonunda elde edilen genleşme $\%0,10$ 'dan küçükse agrega ASR itibarıyla zararsız, $\%0,20$ 'den büyükse agrega zararlı olarak değerlendirilir. Eğer boy değişimi $\%0,10$ ile $\%0,20$ arasında ise, deney süresi uzatılır ve çubukların 28 gün sonundaki boy değişimi ölçülüp genleşme yüzdesi hesaplanarak gerekli değerlendirmeler yapılır (ASTM C1260 ve ASTM C1567).

2.3. Kullanılan Agreganın Reaktifliğinin Belirlenmesi

İlk olarak, çalışmada kullanılan dere agregasının reaktif olup olmadığı deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma ASTM C 1260-14'e göre gerçekleştirilmiştir. Agrega için elde edilen alkali-silika reaktivlik ölçümleri Şekil 18'de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, agrega 1N NaOH çözeltisine 14 gün maruz bırakıldıktan sonra elde edilen ölçümler

dikkate alındığında ASTM C 1260'a göre reaktiftir. Genleşme yüzdesi 14 gün sonunda %0,285 olarak belirlenmiştir.



Şekil 18. Kullanılan dere agregasına ait genleşme-gün ilişkisi

Ayrıca 3, 7, 14 ve 28. gün sonunda ölçümler yapılarak genleşme yüzdeleri hesaplanmıştır. Dere agregasının 3, 7, 14 ve 28. gün sonunda genleşme yüzdeleri Tablo 11'de verilmektedir.

Tablo 11. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan agreganın genleşme değerleri

Numune No	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3. gün	7. gün	14. gün	28. gün
Ortalama (%)	0.07684	0.15626	0.285	0.34737

Kullanılan dere agregası hızlandırılmış harç çubuk yöntemine göre 14 gün sonunda hesaplanan genleşmesi sınır değer olan %0,20'yi aştığı için agregası ASR itibarıyla reaktif agregası olarak değerlendirilmiştir. Bu durum, agreganın alkali-silika reaksiyonuna girme potansiyeline sahip olduğunu ve betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

2.4. Harç Çubuğu Numunelerinin Üretilmesi

Deneyisel çalışmada harç çubuk numuneleri üretimi için kullanılan dere agregasına ilişkin granülometri Tablo 12’de verilmektedir.

Tablo 12. Deneyisel çalışmada kullanılan agregaya ait granülometri

Elekler	Agrega	
	Ağırlıkça (%)	Miktar (gr)
2,36mm	10	99,0
1,18 mm	25	247,5
600 µm	25	247,5
300 µm	25	247,5
150 µm	15	148,5

Su/çimento oranı 0,47 olarak alınmış harç karışımları her bir döküm için 990 gram agregaya, 440 gram çimento ve 206,8 gram su tartılarak hazırlanmıştır. Her döküm için her biri 25x25x285 mm boyutlarında üç harç çubuğu hazırlanmıştır. Dökümden 24 saat sonra harç çubuklarının ilk okumaları kaydedilerek çubuklar sırasıyla numaralandırılmıştır.

Daha sonra harç çubukları 20°C’de su içerisine yerleştirilmiştir. Numune kalıpları ve kalıpları doldurma işlemi için kullanılan aparatlar Şekil 19’da gösterilmektedir.



Şekil 19. Prizmatik numune kalıpları ve kalıpları doldurmada kullanılan aparatlar

Harç çubuklarının uzunluk değişimi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Boy Değişimi, } E(\%) = \frac{L_i - L_0}{L_0} \times 100 \quad (9)$$

Burada E, numunenin uzunluğundaki yüzde değişimdir, L₀ etüvde 24 saat geçtikten sonra numunenin ölçülen ilk uzunluğudur, L_i takip eden i. gündeki harç çubuğun uzunluğu

ve L ise harç çubuğunun ilk (28,5cm) uzunluğudur. Kalıplarından çıkarılan harç numuneleri, ölçüm okumaları ve 80°C kazan içindeki durumları Şekil 20’de gösterilmektedir.



Şekil 20. Kalıplarından çıkarılan harç numuneleri ve ölçüm okumaları kazan içindeki durumlara ait görseller

Çalışma kapsamında referans karışımla birlikte dere agregası kullanılarak toplam 13 karışım üretilmiştir. Deneysel çalışmada mineral katkı olarak çimento ile ikame olacak şekilde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve metakaolin kullanılmıştır. Üretilen karışımlar için belirlenen ikame oranları uçucu kül için %15, %30 ve %45, yüksek fırın cürufu için %20, %40 ve %60, silis dumanı ve metakolin için ise %5, %10 ve %15’tir.

25x25x285 mm ölçülerindeki harç çubuklarının karışımları için kullanılan oranlar Tablo 13’te ayrıntılı olarak verilmektedir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve metakaolinin kısaltmaları sırasıyla UK, YFC, SD ve MK şeklinde gösterilmektedir. UK 30 örneğinde ilk kısaltma kullanılan mineral katkıyı yanındaki rakam ise kullanım oranını (ikame oranı) göstermektedir.

Tablo 13. Harç çubuğu numunelerinin üretiminde kullanılan malzemelerin karışım miktarları (gram cinsinden)

Karışımlar	Çimento	UK	YFC	SD	Metakaolin	Toplam
UK 15	374	66	-	-	-	990
UK 30	308	132	-	-	-	990
UK 45	242	198	-	-	-	990
YFC 20	352	-	88	-	-	990
YFC 40	264	-	176	-	-	990
YFC 60	176	-	264	-	-	990
SD 5	418	-	-	22	-	990
SD 10	396	-	-	44	-	990
SD 15	374	-	-	66	-	990
MK 5	418	-	-	-	22	990
MK 10	396	-	-	-	44	990
MK 15	374	-	-	-	66	990

Harç çubuklarının 1N NaOH çözeltisinde 14 gün sonunda elde edilen genleşme değerlerinin yorumlanması, Tablo 15'te ilgili standartlarca belirlenen kriterlere göre yapılmaktadır.

Tablo 14. İlgili standartlar uyarınca alkali-silika reaktivlik değerlendirmesi

Genleşme (%)	Yorumlanması
< 0.10	Agrega zararsızdır.
0,10 ile 0,20 arasında ise	Agreganın potansiyel olarak reaktif olduğu değerlendirilir. Değerlendirme 28 gün sonunda alınan boy ölçümüne göre tekrarlanır.
> 0.20	Agrega reaktiftir.

2.5. Görüntü İşleme

Bu bölümde ASR kaynaklı çatlakların tespitine yönelik olarak uygulanmış olan görüntü işleme teknikleri kapsamlı bir şekilde incelenmektedir.

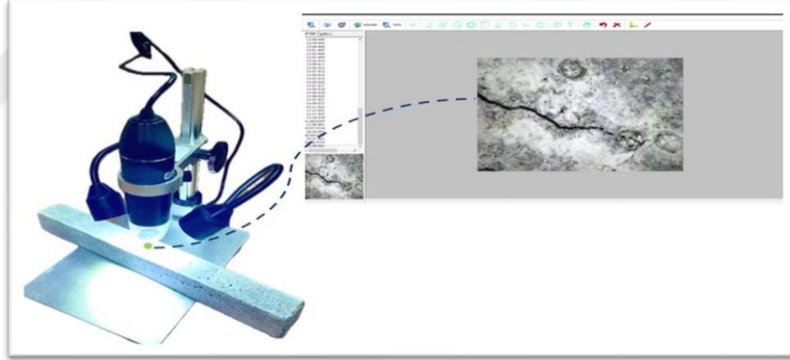
2.5.1. Harç Çubuklarından Görüntü Elde Etme

Çevresel etkiler nedeniyle beton ve harçta oluşan çatlakların erken tespiti çok önemlidir. Ancak mikro seviyedeki çatlakların geleneksel yöntemlerle erken aşamada tespit etmek oldukça zordur. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak geliştirilen yazılımlar

sayesinde mikro seviyedeki çatlaklar geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve zahmetsiz bir şekilde tespit edilebilmektedir.

Çalışma kapsamında toplamda 39 adet harç çubuğu dökülmüştür. Harç çubuğu numunesinin yüzeyleri 6 eş bölgeye ayrılmıştır. Harç çubuklarının isimlerinin yazılı oldukları yüzey hariç geriye kalan diğer üç yüzeyinden görüntüleme cihazı aracılığıyla yeterli sayıda görüntü alınmıştır. Yapılan bölme işlemi neticesinde harç çubuğunun yüzeyindeki çatlak dağılımı uniform şekilde belirlenmiştir.

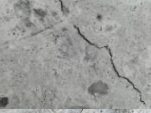
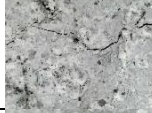
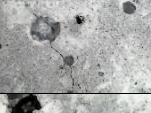
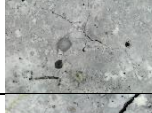
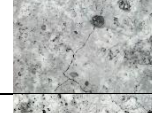
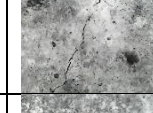
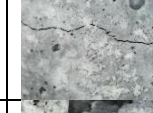
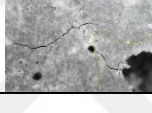
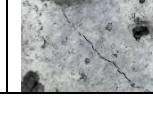
Görüntüler Bushman 1600x 2.mp Usb Cmos 8 Led Digital Mikroskop cihazı kullanılarak alınmıştır. Görüntü alınacak yüzeyin aydınlatması, dijital mikroskopta bulunan özellik sayesinde 30000 lux olarak ayarlanmıştır. Görüntü alınan yüzeyin digital ortamda görülebilmesi için mikroskop ile uyumlu HiView yazılımı kullanılmıştır. Yazılım ara yüzünde, görüntü boyutu 640×480 olarak seçilerek çubuk yüzeyinden görüntüler alınmış ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Numune üzerinden çatlak görüntülerin alınması Şekil 21’de gösterilmektedir.



Şekil 21. Mikroskop kullanılarak numune üzerinde çatlak görüntüleme işlemi

Bu çalışmada, farklı mineral katkılarla hazırlanan harç numunelerinde oluşan ASR kaynaklı çatlakların dağılımı ve gelişimi görüntü işleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Katkıların kullanım oranına bağlı olarak 14 ve 28 günlük çatlak yoğunluğu ve ortalama çatlak genişliği görüntü işleme yardımıyla belirlenmiştir. Numunelerden alınan örnek görüntüler Tablo 15'te verilmiştir. Tablo 15'te verilen 1, 2, 3 katkı etiketi adları, Tablo 13'teki her bir mineral katkının katkı yüzdelelerini temsil etmektedir.

Tablo 15. Mineral katkılı harç çubuklarından elde edilen çatlak görüntüleri

Günler	Katkı Etiket İsimleri	Numune Katkı İsimleri				
		Ref.	UK	YFC	SD	MK
14. Gün	1					
	2					
	3					
28. Gün	1					
	2					
	3					

2.5.2. Elde Edilen Görüntüler Üzerinden Gerçekleştirilen Morfolojik İşlemler

Harç yüzeyinden alınan görüntüler üzerinde, Python programlama dilinde bulunan Open Computer Vision (OpenCV) kütüphanesi kullanılarak çeşitli işlemler uygulanmıştır. Bu kütüphaneye ek olarak NumPy, Matplotlib, PIL ve Random kütüphaneleri de kullanılmıştır. İlk olarak, her bir katkı oranına göre sınıflandırılan görüntü dosyaları içerisinde 20 adet görüntü rastgele belirlenmiştir. Bu görüntülere sırasıyla *grayscale çevirme*, *eşikleme*, *opening*, *kontür bulma* işlemleri uygulanmıştır. Grayscale görüntülerin tercih edilme nedeni basitlik ve hızdır. Renk bilgisinin olmaması, veri boyutunu azaltır ve işlemlerin daha hızlı ve bellek açısından daha az maliyetli olmasını sağlar. Bir görüntü $I(x, y)$, x ve y piksel koordinatlarıyla belirtilen bir 2 boyutlu fonksiyon olarak ifade edilir. Her bir pikselin değeri, görüntünün o noktasında bulunan ışığın yoğunluğunu veya renk bilgisini barındırır. Eşikleme işlemi, bir eşik değeri T kullanarak her pikselin kararını belirler. Bu çalışmada, OpenCV kütüphanesinde bulunan `cv2.threshold()` fonksiyonunun bir parametresi `cv. thresh otsu` kullanılmıştır. Bu parametre aşağıda verilen denklemler yardımıyla daha detaylı şekilde açıklanmıştır (Otsu, 1975).

Belirli bir resmin pikselleri L gri seviyede $[1, 2, \dots, L]$ temsil edilsin. Seviye i 'deki piksel sayısı n_i ile ve toplam piksel sayısı $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$ ile gösterilir. Tartışmayı basitleştirmek için gri seviye histogramı normalleştirilir ve bir olasılık dağılımı olarak kabul edilir.

$$p_i = n_i/N, p_i \geq 0, (x+a)^n = \sum_{i=1}^L p_i \quad (10)$$

Şimdi pikselleri k seviyesinde bir eşikle C_0 ve C_1 (arka plan ve nesneler veya tam tersi) olarak iki sınıfa ayırdığı varsayalım; $C_0 [1, \dots, k]$ seviyelerine sahip pikselleri ve $C_1 [k+1,$

$\dots, L]$ seviyelerine sahip pikselleri gösterir. Daha sonra sınıf oluşma olasılıkları ve sınıf ortalama seviyeleri sırasıyla şu şekilde verilir:

$$w_0 = P_r(C_0) = \sum_{i=1}^k p_i = w(k) \quad (11)$$

$$w_1 = P_r(C_1) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - w(k) \quad (12)$$

ve

$$C_0 = \sum_{i=1}^k i P_r(i|C_0) = \sum_{i=1}^k i p_i / w_0 = \mu(k) / w(k) \quad (13)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^L i P_r(i|C_1) = \sum_{i=k+1}^L i p_i / w_1 = (\mu_r - \mu_k) / (1 - w(k)) \quad (14)$$

ve

$$w(k) = \sum_{i=1}^k (p_i) \quad (15)$$

ve

$$\mu(k) = \sum_{i=1}^k i p_i \quad (16)$$

Sırasıyla k. seviyeye kadar olan histogramın sıfıncı ve birinci dereceden kümülatif momentleridir ve orijinal resmin toplam ortalama seviyesidir.

$$\mu_T = \mu(L) = \sum_{i=1}^L i p_i \quad (17)$$

Herhangi bir k seçimi için aşağıdaki ilişkiyi kolayca doğrulayabiliriz:

$$w_0 \mu_0 + w_1 \mu_1 = \mu_T, w_0 + w_1 = 1 \quad (18)$$

Sınıf varyansları şu şekilde verilir:

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 P_r(i|C_0) = \sum_{i=1}^k (i - w_0)^2 p_i / w_0 \quad (19)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 P_r(i|C_1) = \sum_{i=1}^k (i - \mu_1)^2 p_i / w_1 \quad (20)$$

Bunlar ikinci dereceden kümülatif momentler (istatistikler) gerektirir. Eşiğin "iyiliğini" değerlendirmek için (k seviyesinde), diskriminant analizinde kullanılan aşağıdaki diskriminant kriter ölçülerini (veya sınıf ayrılabilirliği ölçülerini) tanıtacağız:

$$\lambda = \sigma_B^2 / \sigma_w^2, \kappa = \sigma_T^2 / \sigma_w^2, \eta = \sigma_B^2 / \sigma_w^2 \quad (21)$$

Burada,

$$\sigma_w^2 = w_0 \sigma_0^2 + w_1 \sigma_1^2$$

$$\sigma_w^2 = w_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + w_1 (\mu_1 - \mu_T)^2$$

$$= w_0 w_1 (\mu_0 - \mu_T)^2$$

$$\mu_T^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_T)^2 p_i \quad (22)$$

olmuş olur.

Sırasıyla sınıf içi varyans, sınıflar arası varyans ve seviyelerin toplam varyansıdır. Bu durumda problem, (12)'deki nesne fonksiyonlarından (kriter ölçütleri) birini maksimize eden bir k eşiği aramak için bir optimizasyon problemine indirgenir. Bu bakış açısı, iyi eşiklenmiş

sınıfların gri seviyelerde ayrılacağı ve tersine, gri seviyelerde sınıfların en iyi şekilde ayrılmasını sağlayan bir eşik en iyi eşik olacağı varsayımıyla motive edilmiştir. Bununla birlikte, k için sırasıyla λ , κ ve η 'yu maksimize eden ayırıcı kriterler birbirine eş değerdir; örneğin, $\kappa = \lambda + 1$ ve $\eta = \lambda / (\lambda + 1)$ cinsinden, çünkü aşağıdaki temel ilişki her zaman geçerlidir:

$$\sigma_w^2 + \sigma_B^2 = \sigma_T^2 \quad (23)$$

σ_w^2 ve σ_B^2 'nin k eşik seviyesinin fonksiyonları olduğu, ancak σ_T^2 'nin k 'dan bağımsız olduğu fark edilmektedir. σ_w^2 'nin ikinci dereceden istatistiklere (sınıf varyansları), (T2'nin ise (4) birinci dereceden istatistiklere (sınıf ortalamaları) dayandığı da belirtilmektedir. Bu nedenle η , k 'ye göre en basit ölçüdür. Bu nedenle q 'yu η k seviyesinde eşik "iyiliğini" (veya ayrılabilirliğini) değerlendirmek için kriter ölçüsü olarak kabul edilmektedir.

η 'yi maksimize eden veya eşdeğer olarak σ^2 'yi maksimize eden optimum eşik k^* , basit kümülatif nicelikler (6) ve (7) kullanılarak veya (2)-(5) kullanılarak açıkça ile aşağıdaki sıralı aramada seçilir:

$$\eta(\kappa) = \sigma_B^2(\kappa) / \sigma_T^2$$

$$\sigma_B^2(\kappa) = [\mu_T w(\kappa) - \mu(\kappa)]^2 / [w(\kappa) [1-w(\kappa)]]$$

ve optimum eşik k^* ise

$$\sigma_B^2(\kappa^*) = \max_{1 \leq \kappa \leq L} \sigma_B^2(\kappa) \quad (24)$$

Problemden hareketle, üzerinde maksimum değer arandığı k aralığı şu şekilde sınırlandırılabilir.

$$S^* = \{\kappa; w_0 w_1 = w(\kappa)[1-w(\kappa)] > 0, \text{ or } 0 < w(\kappa) < 1\} \quad (25)$$

Buna gri seviye histogramının etkin aralığı diyeceğiz. (24)'teki tanımdan, σ^2 (veya η) ölçütü $k \in S - S^* = \{k; w(\kappa) = 0 \text{ veya } 1\}$ gibi k için minimum sıfır değerini alır (yani, tüm

pikselleri ya $C1$ ya da $C0$ yapar, ki bu elbette bizi ilgilendirmeyebilir) ve $k \in S^*$ için pozitif ve sınırlı bir değer alır. Bu nedenle, maksimumun her zaman var olduğu açıktır.

Opening işlemi, görüntü işlemede yaygın olarak kullanılan bir morfolojik işlemdir. Bu işlem, gürültüyü azaltmak, nesne kenarlarını yumuşatmak veya nesneleri daha iyi ayırt etmek için kullanılır. Opening işlemleri sırasıyla erozyon ve genişleme işlemlerinin peş peşe gerçekleşmesiyle oluşmaktadır. Erosion işlemi, bir görüntünün üzerinde belirli bir yapısal eleman (kernel) boyutuyla kaydırılmasıyla gerçekleştirilir. Her bir piksel, kernel boyutu boyunca taranır ve çevresindeki piksellerin en küçük değeri alınır. Matematiksel olarak, bir pikselin erosion işlemi sonrası değeri, o pikselin çevresindeki piksellerin en küçük değeridir. Bu ifade Formül 26'da açıklanmıştır.

$$I \ominus B(x,y) = \min_{(s,t) \in B} \{ I(x + s, y + t) \} \quad (26)$$

Burada, (x,y) pikselin konumunu, $b(s,t)$ yapısal elemanın konumunu ve I görüntünün gri ton değerini temsil eder. Dilation işlemi, erosion işleminden sonra elde edilen görüntünün üzerinde bir kez daha belirli bir yapısal eleman boyutuyla kaydırılmasıyla gerçekleştirilir. Her bir piksel, kernel boyutu boyunca taranır ve çevresindeki piksellerin en büyük değeri alınır. Matematiksel olarak, bir pikselin dilation işlemi sonrası değeri, o pikselin çevresindeki piksellerin en büyük değeridir. Bu işlem, görüntüdeki nesnelerin kenarlarını genişleterek daha belirgin hale getirir ve nesneleri daha iyi ayırt etmeye yardımcı olur. Bu ifade Formül 27'de açıklanmıştır.

$$I \oplus B(x,y) = \max_{(s,t) \in B} \{ I(x - s, y - t) \} \quad (27)$$

Burada, (x, y) pikselin konumunu, (s,t) yapısal elemanın konumunu ve I görüntünün gri ton değerini temsil eder.

Kontur bulma işlemi matematiksel olarak, bir görüntüdeki nesnelerin kenarlarını veya sınırlarını belirlemek için kullanılan bir dizi işlemdir. Genellikle bu işlemler, görüntü işleme algoritmaları ve morfolojik operatörler kullanılarak gerçekleştirilir. Kenar algılama işlemi, bir görüntüdeki yoğunluk değişikliklerini belirlemek için kullanılır. Bir görüntüdeki kenarlar, piksel değerlerindeki ani değişiklikler veya gradyan büyüklükleri olarak tanımlanabilir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan bir yöntem Sobel operatörüdür. Sobel

operatörü, her bir pikselin x ve y yönündeki gradyanlarını hesaplayarak kenarları tespit eder. Matematiksel olarak, bir görüntünün Sobel gradyanı Formül 28 ve 29 ile hesaplanabilir.

$$G_x = I * H_x \quad (28)$$

$$G_y = I * H_y \quad (29)$$

Burada G_x ve G_y sırasıyla x ve y yönündeki gradyanlar I görüntüyü temsil eder. H_x ve H_y Sobel filtreleridir.

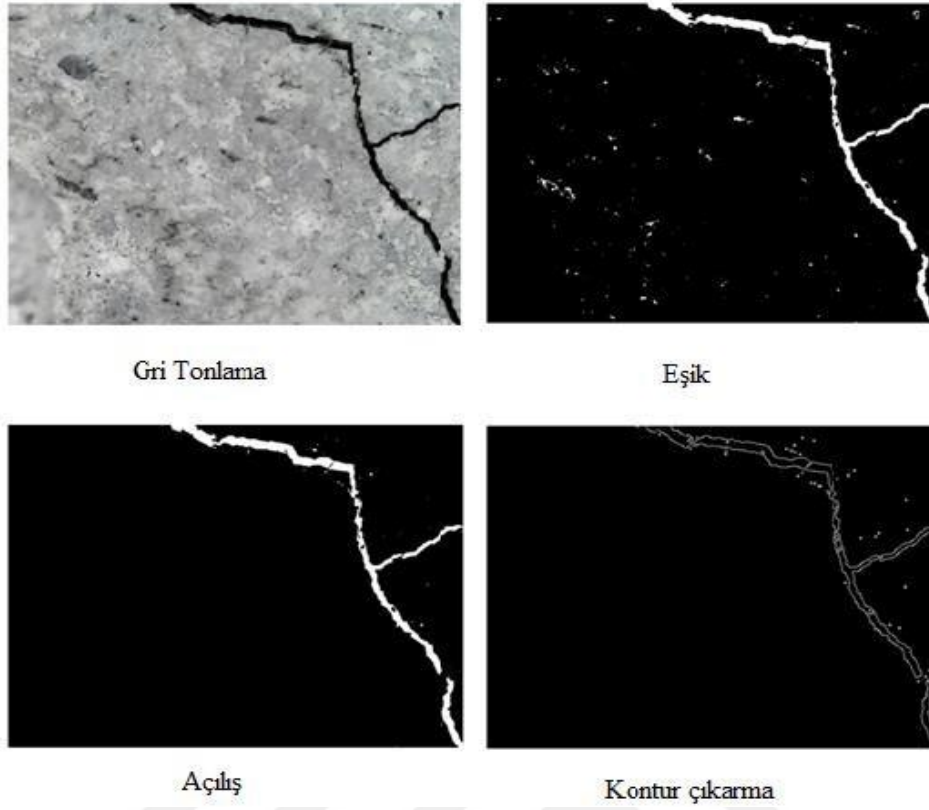
Kenar pikselleri, bir görüntünün gradyanı hesaplandıktan sonra bir eşik değeri ile karşılaştırılarak belirlenebilir. Bu eşik değeri genellikle bir thresholding işlemi kullanılarak belirlenir. Matematiksel olarak, bir görüntünün kenarları tespit edilirken Formül 30 kullanılabilir.

$$E(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } |G(x,y)| > T \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

Burada, $E(x,y)$ kenar görüntüsünü, $G(x,y)$ görüntünün gradyanını, ve T eşik değerini temsil eder. Kenar pikselleri birleştirilerek nesne sınırları belirlenebilir. Bu birleştirme işlemi, genellikle bir tarama veya birleştirme algoritması kullanılarak gerçekleştirilir. Matematiksel olarak, kontur tespiti için birleştirme işlemi Formül 31 ile ifade edilebilir.

$$C(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } |E(x,y) - E(x-1,y)| + |E(x,y) - E(x,y-1)| > 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (31)$$

Bu denklemde, $C(x,y)$ birleştirilmiş kontur görüntüsünü, $E(x,y)$ kenar görüntüsünü temsil etmektedir (Gonzalez ve Woods; 2008). Tüm bu aşamalara ait ilgili görüntüler Şekil 22'de verilmektedir.



Şekil 22. Gri tonlama, eşik, açılış, kontur çıkarma aşamaları

2.5.3. Milimetre Piksel Dönüşümünün ve Ortalama Çatlak Genişliğinin Belirlenmesi

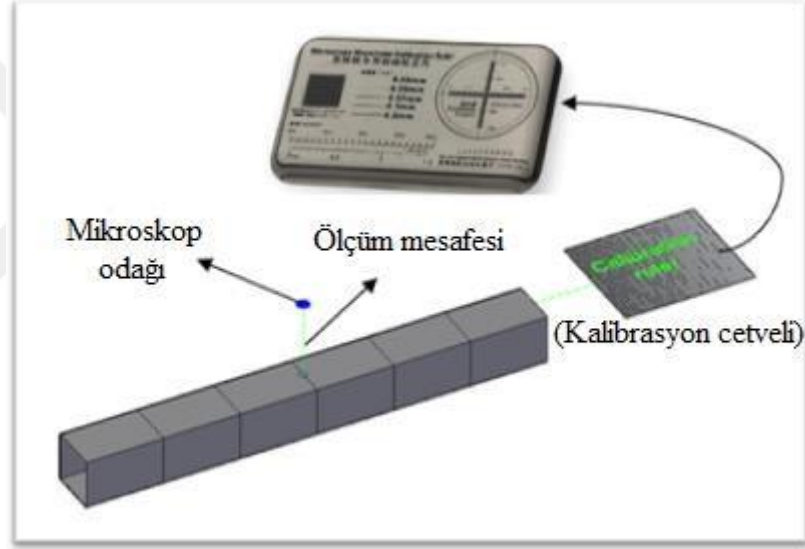
Görüntüler üzerinden ölçülen mesafeler pixel (pix) ölçü birimindedir. Bu nedenle çatlakların milimetre (mm) cinsinden uzunluğunu belirlemek için milimetre-pixel dönüşümü yapmak gerekmektedir. Bu çalışmada milimetre-pixel dönüşümü digital mikroskopta bulunan kalibrasyon cetveli vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Mikroskop standı üzerine yerleştirilen numuneyle ile aynı yüksekliğe kalibrasyon cetveli yerleştirilmiştir. Daha sonra kalibrasyon cetveli üzerinde mm cinsinden oluşturulan çizginin görüntüsü alınmıştır. Mikroskop yüksekliğinin 40 mm seçildiği çalışmada resim üzerindeki çizginin pix cinsinden uzunluğu belirlenmiştir. Daha sonra aşağıdaki bağıntı kullanılarak dönüşüm işlemi yapılmıştır.

$$dcmm = ac * dcpixel \quad (32)$$

Burada; d_{cmm} milimetre cinsinden çatlak genişliği, d_{cpixel} pixel cinsinden görüntüden elde edilen çatlak genişliği ve α_c mm-pixel dönüşüm katsayısıdır. α_c dönüşüm katsayısı eşitlik 33'teki gibi hesaplanır.

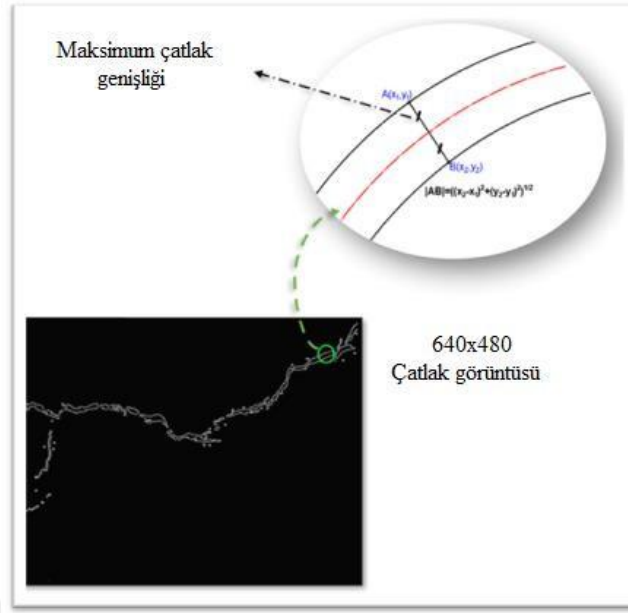
$$\alpha_c = \frac{d_{refmm}}{d_{refpixel}} \quad (33)$$

Burada; d_{refmm} mikroskop odak noktasından ölçülen referans çatlak uzunluğunun mm cinsinden ölçüsü ve $d_{refpixel}$ görüntü üzerindeki referans çatlak uzunluğunun pix cinsinden ölçüsüdür. Şekil 23'te dönüşüm katsayısının hesaplanmasına yönelik gerçekleştirilen çalışma görselleştirilmiştir.



Şekil 23. Dönüşüm katsayısının hesaplanması

Ortalama çatlak genişliği, iki nokta arası uzaklığa dayalı ölçüm yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu kapsamda, çatlak yolu boyunca her bir doğrultuda çatlakların orta eksenleri belirlenmiştir. Ardından, bu orta eksenlere dik doğrultuda çizilen doğru parçaları üzerinde, birbirine en uzak iki nokta arasındaki mesafe, ilgili doğrultudaki çatlak genişliği olarak tanımlanmıştır. Farklı doğrultularda elde edilen çatlak genişliklerinin aritmetik ortalaması, ortalama çatlak genişliği olarak ifade edilmiştir. Çatlak genişliği ölçüm yöntemine ilişkin görsel temsil Şekil 24'te sunulmaktadır.



Şekil 24. Çatlak genişliklerinin hesaplanması

Geleneksel yöntemlerle beton yüzeyindeki çatlakların tespiti ve incelenmesi, yalnızca uzman kişiler tarafından yerinde görsel incelemelerle gerçekleştirilir (Nyathi vd., 2023). Ancak, bu metodun insan hatalarına, yüksek işletme giderlerine, trafik kesintilerine ve erişim kısıtlamalarına ilişkin olası sınırlamaları vardır (Park vd., 2020).

Gelişen teknolojik gelişmelere dayalı olarak görüntü tabanlı çatlak tespiti yöntemleri üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar, beton yüzeylerinin görüntülerinin farklı görüntüleme cihazları kullanılarak elde edilmesiyle gerçekleşmektedir. Beton yüzeyindeki çatlaklar, kamera tabanlı görüntü işleme teknikleri (Yiyang, 2014), (Alam vd., 2015) ve (Iyer ve Sinha, 2005). IR tabanlı görüntü işleme teknikleri (Patrik ve Broberk, 2013), (Brooks vd., 2015), ultrasonik görüntü tabanlı işleme teknikleri (Dhital ve Lee, 2012), ve diğer çeşitli görüntü tabanlı işleme teknikleri yardımıyla belirlenebilmektedir (Vidal vd., 2016, Xu ve Zhang 2013).

Literatürde kamera tabanlı görüntü işleme teknikleri diğer yöntemlere göre daha ağırlıklıdır. A. Ito ve arkadaşları, beton yüzeylerinin otomatik olarak incelenmesini sağlayan bir ölçüm sistemi önermişlerdir (Ito vd., 2002).

Yüksek çözünürlüklü kamera ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak çatlaklar otomatik olarak belirlenmiştir. Önerdikleri yöntem, çok ince çatlakların tespiti ve yüksek kaliteli çatlak analizi sağlamıştır. Sistem, beton blokların yüklemesi altında kullanılmış ve olumlu geri bildirimler almıştır.

Kamera tabanlı görüntü işleme teknikleri çalışmalarda ilk araştırmacılar, görüntü işleme tekniklerinde eşik tabanlı yöntemlerin kullanımına odaklandı. Fujita ve Hamamoto (Fujita ve Hamamoto, 2011), gürültülü beton yüzeylerindeki çatlakları tespit etmek için yerel uyarlamalı eşikleme yöntemi önerdi ve önceden işlenmiş bir görüntüye bu yöntemi uyguladı.

Tomczak ve arkadaşları beton yüzeyi ile görüntü tarayıcısı arasındaki mesafeyi bilinen bir çözünürlükte sabit tutarak çatlak genişliğindeki değişimi milimetre cinsinden ölçtüler. Ortalama çatlak genişliğine ilişkin tahmini standart belirsizlik, 0.008 mm olarak belirlenmiştir (Tomczak vd., 2017).

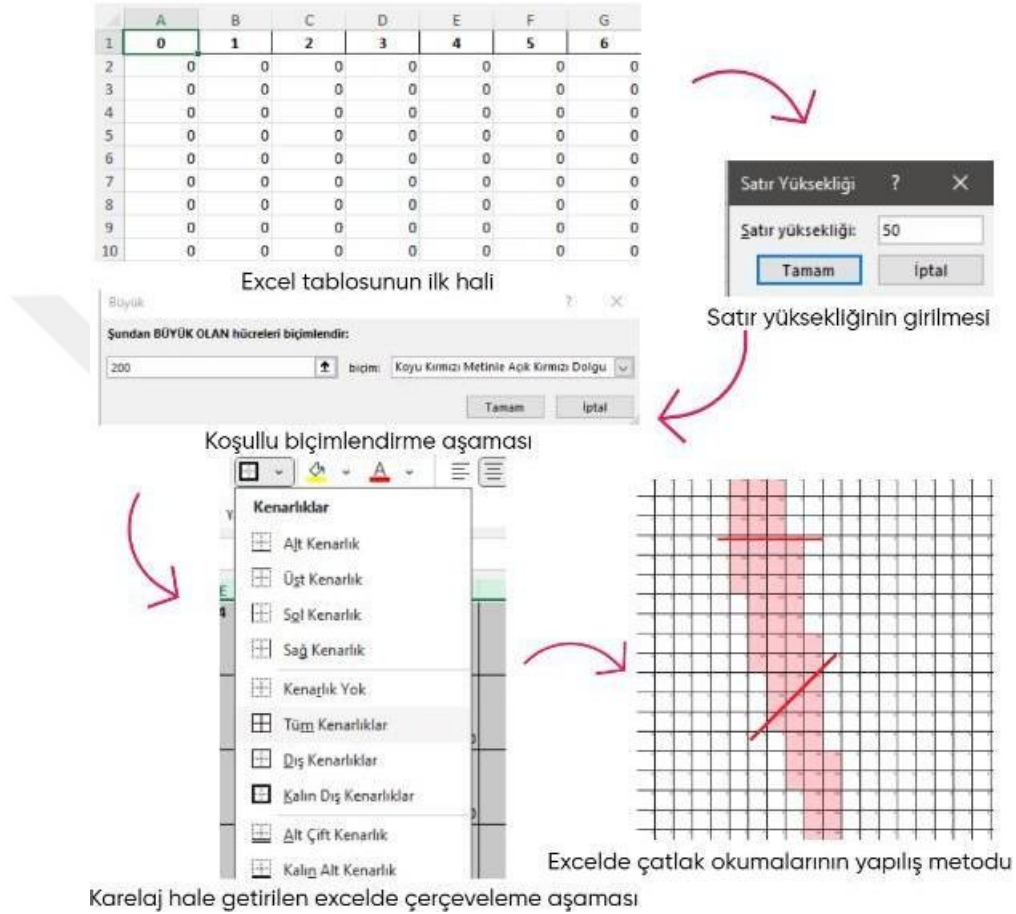
Li ve Zhao euclidean distance transformu ve en küçük kareler ilkesini kullanarak maksimum çatlak genişliğini ölçtüler. Çatlak genişliği, lazer mesafe ölçer, kamera görüş açısı ve yüzeye olan kamera mesafesiyle elde edilen piksel mesafesi arasındaki ilişkiye dayanılarak çatlak genişliğini milimetre cinsinden hesaplamışlardır (Li ve Zhao, 2020).

Jeong ve arkadaşları beton yapıların çatlaklarını incelemek için dijital görüntüler ve dijital görüntü işleme tekniklerini kullanmıştır. Deneylerde farklı lens ve kameralar kullanılarak çeşitli kalınlıklarda çizgilerin görüntüleri yakalamışlardır. Çatlak genişliği ölçümünün piksel değerlerine dayandığını ve çalışma mesafesinin doğru ölçüm için kritik olduğunu gösteren sonuçlar elde etmişlerdir. Bu sonuçlar, belirli nesnelerin boyutlarını ölçmek için gereken optimal mesafelerin ve ölçüm yönergelerinin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Ayrıca, saha ölçüm testleri, iç mekânda yapılan deneylerin sonuçlarıyla belirlenen ölçüm parametrelerini doğrulamak için gerçekleştirmişlerdir. Görsel muayeneye belirlenen gerçek çatlak genişlikleri, çözümleme için kullanılmıştır. Sonuçlar, görüntü işleme kullanılarak çatlak genişliği ölçüm sonuçlarının doğruluğunu etkileyen faktörlerin belirlenmesine yardımcı olmuş ve bu çalışmada uygulanan görüntüleme ekipmanı ve optik ekipman için optimal mesafeleri ve ölçüm yönergelerini sunmayı amaçlamışlardır (Jeong vd., 2021).

2.5.4. Çatlak Genişliği Hesabı

Python yazılımı kullanılarak ikili hale getirilen görüntüler (beyaz piksel=çatlak var (1), siyah piksel = çatlak yok (0)) 640x480 matrisi şeklinde excel programına aktarılmıştır. Bu işlem çatlak genişliğinin daha doğru tespitine yönelik yapılmış bir adımdır. Daha sonra çatlak yolu boyunca çatlak orta eksen çizgiler ile belirlenmiştir. Çatlak yolu boyunca farklı doğrultuların oluşması kaçınılmazdır. Süreci daha pratik hale getirmek adına Excel’de ilk

olarak arka çerçeve karelaj hale getirilmiştir. Arka yüzey karelaj haline getirildikten sonra çatlak değerleri okumaları piksel cinsinden yapılmıştır. Herbir karelaj görüntüdeki bir piksel uzunluğuna eşdeğerdir. Excel'den çatlak genişliklerini belirleme aşamaları Şekil 25'te görsel olarak detaylandırılmıştır.



Şekil 25. Excel'de görüntü okuma aşamasına ait işlem adımlar

3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME

3.1. Agreganın Reaktifliği

Deneysel çalışmada ilk aşamada kullanılan dere agregasının reaktifliğini ASTM C 1260-14 standardı uyarınca belirlenmiştir. Bölüm 2.3'te açıklandığı üzere 14 gün sonunda genleşme yüzdesi %0,285 olarak hesaplanmıştır. Kullanılan dere agregasının 14 günlük genleşme yüzdesi harç çubuk yöntemine göre sınır değer olan %0,20'yi aştığı için reaktif agrega sınıfına girdiği tespit edilmiştir.

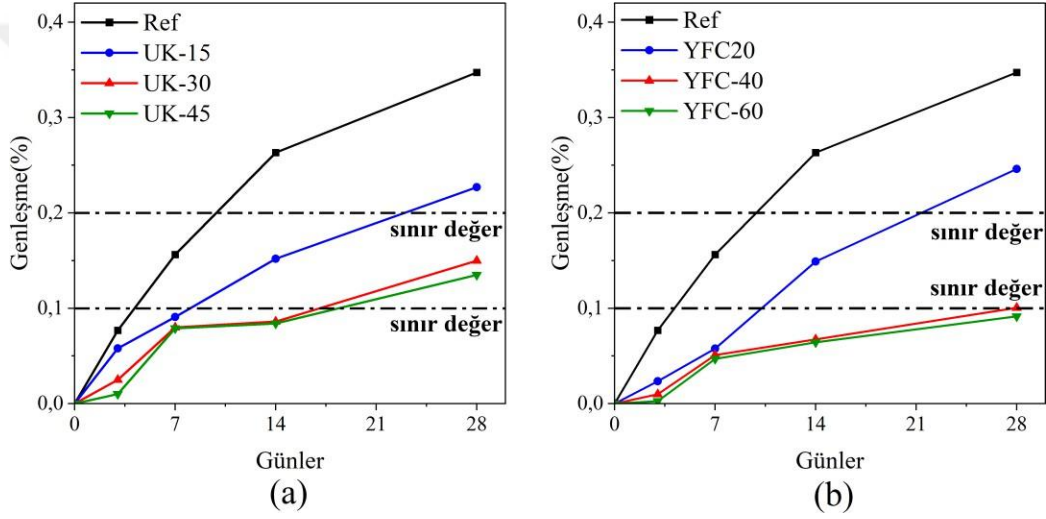
3.2. Reaktif Dere Agregasının Neden Olduğu Genleşmeyi Azaltmak İçin Kullanılan Mineral Katkıların Etkinliği

Bu kısımda dört farklı mineral katkının ASR kaynaklı genleşme üzerindeki etkinliği araştırılmıştır. Şekil 26.a ve Şekil 26.b çeşitli oranlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda ASR kaynaklı genleşmelerin yüzde olarak değişimini göstermektedir. Deneysel çalışmada, uçucu kül katkı oranı %15, %30 ve %45; yüksek fırın cürufu katkı oranı ise %20, %40 ve %60 oranlarında kullanılmıştır. Şekil 25a ve Şekil 25b'den de görüldüğü üzere uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun harç çubuklarının alkali-silika reaktifliği üzerindeki etkisi zamana ve mineral katkıların ikame oranına bağlı olarak değişmektedir.

Karışımındaki uçucu kül ikame oranı arttıkça genleşmenin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmektedir. Uçucu kül içeren harç numunelerin 14 gün sonundaki genleşmeleri

%15, %30 ve %45 katkı oranları için sırasıyla %0,152, %0,086 ve %0,084 olmuştur. Uçucu kül ikame oranı arttıkça ASR'den kaynaklanan genleşmenin azaldığı açıktır. 14 gün sonunda %15 uçucu kül ikame oranına sahip harç çubukların genleşmesi referans harca kıyasla yaklaşık %47 oranında azalmıştır. Ancak kullanılan ikame oranı, ilgili standartta belirtilen %0,1'lik sınır değerinin altına düşmesi için yeterli olmamıştır. Benzer şekilde %30 uçucu kül ikame oranı ile üretilen harç çubukları için ölçülen genleşme %70 oranında azalmış, %45 uçucu kül ikame oranı ile üretilenler için ise genleşmedeki azalma yaklaşık olarak %71 seviyesinde olmuştur. 28 gün sonunda genleşme yüzdesi tüm karışım oranlarında artmaya devam etmiştir. Ancak genleşme yüzdesindeki düşüş oranı referans

numuneye kıyasla azalmıştır. Genleşmedeki bu azalma, uçucu kül ile puzolanik reaksiyon nedeniyle Ca(OH)_2 tükenmesiyle açıklanabilir. Ayrıca uçucu kül ilavesinin etkinliği Al_2O_3 , SiO_2 ve Fe_2O_3 ve bunların Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek çimento hamurunun pH'ını düşürme kabiliyetlerine bağlanabilir. Bir başka çalışmada ise hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi ile uçucu külün ASR'yi hızlandırmadaki etkinliğini belirlemek için yapılan çalışmada F ve C sınıfı uçucu küller kullanılmıştır. Yüksek CaO içeriğine sahip uçucu küllerin ASR'yi azaltmada daha az etkili olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda %35 C sınıfı uçucu kül kullanımı ile genleşmedeki yüzdesinin yaklaşık %90 oranında azalttığı tespit edilmiştir (Shafaatian vd., 2013).

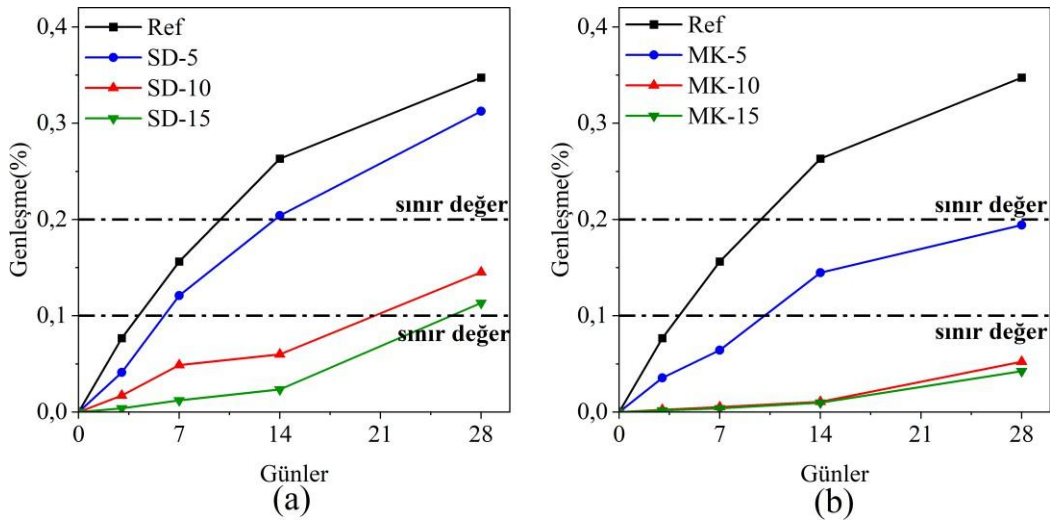


Şekil 26. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren harç çubuklarının genleşme gün ilişkisi

Yüksek fırın cürufu harçlarda ikame oranı arttıkça ASR kaynaklı genleşmenin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. 14 gün sonunda %20 oranında yüksek fırın cürufu içeren harç çubuklarının genleşmesi referans harca kıyasla yaklaşık %48 oranında azalmıştır. %20'lik yüksek fırın cürufu içeren harçların genleşmesi %0,149 seviyesinde kalmıştır. Ancak %20 uçucu kül ikamesi genleşmenin ilgili standartta belirtilen %0,1'lik sınır değer altına düşmesi için yeterli olmamıştır. Benzer şekilde %40 oranında yüksek fırın cürufu içeren harç çubukları için ölçülen genleşme değeri referans harç numuneye göre %77 oranında azalmış, %60 oranında yüksek fırın cürufu içeren harç numuneler için ise genleşmedeki azalma yaklaşık olarak %78 olmuştur. %40 ve %60 oranında yüksek fırın cürufu kullanım oranı, harçların genleşme yüzdelерinin ilgili standartta belirtilen %0,1 sınır değerinin altına düşmesi için yeterli olduğu belirlenmiştir. Bir çalışmada, %20 ve %40 oranında yüksek fırın

cürufu kullanımının ASR kaynaklı genişmeyi referans karışıma kıyasla sırasıyla yaklaşık olarak %54 ve %68 oranında azalttığı belirtilmiştir (Beglarigale ve Yazici, 2014).

Şekil 27a ve Şekil 27b çeşitli oranlarda silis dumanı ve metakaolin içeren harç çubuklarının 3,7,14 ve 28 gün sonunda ASR kaynaklı genişmesinin yüzdesel değişimini göstermektedir. Deneysel çalışmada, silis dumanı ve metakaolin %5, %10, %15 oranlarında kullanılmıştır. Şekil 26'dan da görüldüğü üzere silis dumanı ve metakaolin harç çubuklarının alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisi zamana ve mineral katkıların ikame oranına bağlı olarak değişmektedir. Silis dumanı ve metakaolin içeren karışımlardan hazırlanan harç çubuklarının referans harca kıyasla 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda önemli ölçüde daha düşük genişme yüzdeleri sergilemiştir. 14 gün sonunda %5 silis dumanı ikame oranına sahip harç çubukların genişmesi referans harca kıyasla yaklaşık olarak %28 oranında azalmıştır. Ancak kullanılan oran ilgili standartta belirtilen %0,1'lik genişme sınır değerinin altına düşmek için yeterli olamamıştır. Benzer şekilde %10 silis dumanı ikame oranı ile üretilen harç çubukları için ölçülen genişme %79 oranında olmuş, %15 silis dumanı ikame oranı ile üretilen harç çubuklarının genişmedeki azalma ise yaklaşık olarak %92 olmuştur. 14 günün sonunda %5 oranında metakaolin ikame oranına sahip harç çubuklarının genişmesi referans harca kıyasla yaklaşık %49 oranında azalmıştır. Ancak kullanılan oran ilgili standartta belirtilen %0,1'lik genişme sınır değerinin altına düşmesi için yeterli olmamıştır. Benzer şekilde %10 oranında metakaolin ikame oranı ile üretilen harç çubukları için ölçülen genişme %96 oranında azalmış, %15 ikame oranı ile üretilenler için ise genişmedeki azalma yaklaşık olarak %92 olmuştur.

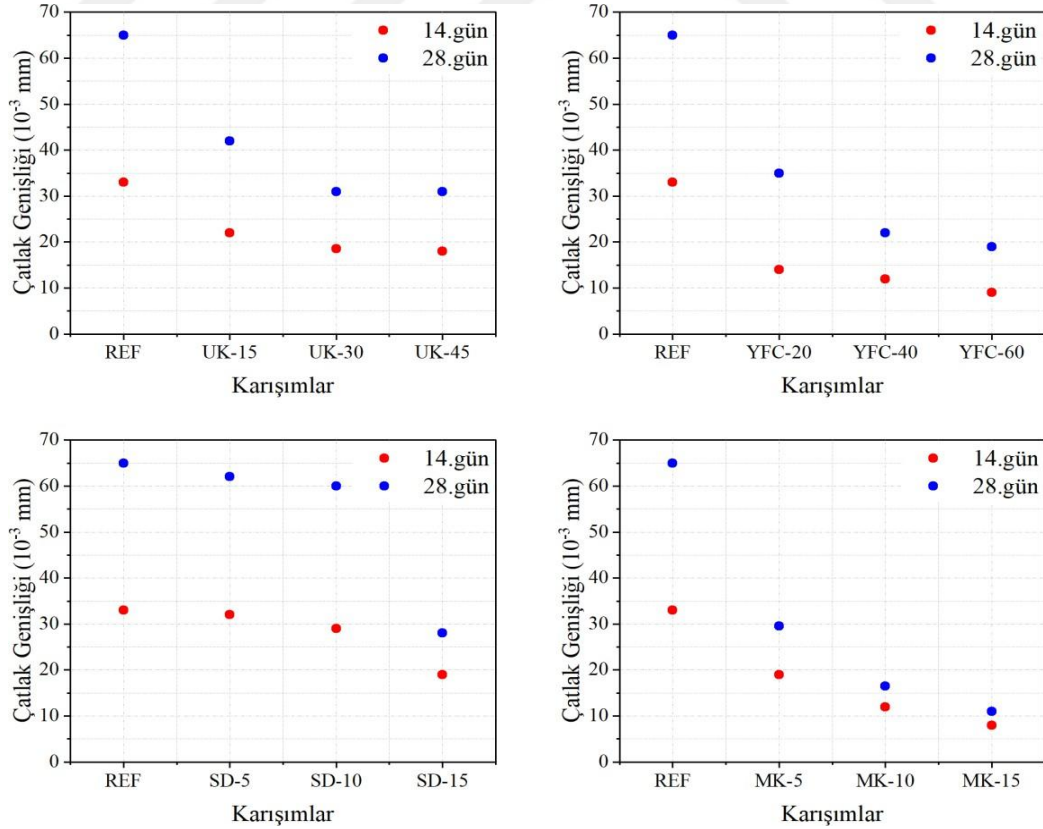


Şekil 27. Silis dumanı ve metakaolin içeren harç çubuklarının genişme-gün ilişkisi

Gerçekleştirilen bir çalışmada ASR kaynaklı genleşmeyi sınır değerinin altına düşürmenin %10 oranında silis dumanı ikamesi için mümkün olmadığı belirtilmiştir %10'luk silis dumanı içeren numunelerin genleşme yüzdelерinde yaklaşık %50-60 oranında azalma gösterdiği belirtilmiştir (Duchesne & Berube, 2001).

3.3. Genleşme Yüzdesi-Çatlak Genişliği İlişkisi

Çalışma sonunda elde edilen çatlak genişlikleri, Ito vd. 2002 tarafından kullanılan yöntemin iyileştirilmesiyle elde edilen bir algoritma yardımıyla hesaplanmıştır. Otsu Yöntemi (Otsu, 1979) birçok çatlak tespiti çalışmasında kullanılmıştır (Talab vd, 2016; Akagic vd., 2018; Quan vd., 2019; Han vd., 2021). Bu çalışmada Otsu Yöntemine göre piksel uzunluğu birimlerimde hesaplanan çatlak genişlikleri, ilgili bölümde belirtilen denklemler kullanılarak milimetre uzunluk birimine dönüştürülmüştür. Dönüşüm katsayısı (α_c) 0,004375 mm/pix olarak hesaplanmıştır. Katkılı harç numunelerinin zamana ve katkı oranına göre ortalama çatlak genişliği dağılımlarını gösteren grafikler Şekil 28'de verilmektedir.



Şekil 28. Katkılı harçlarda 14 ve 28 gün sonunda elde edilen çatlak genişlikleri dağılımı

Harç numunelerine ilave edilen mineral katkıları, zamanla çatlak genişliğinde meydana gelen değişimleri belirli mertebede etkilemiştir. Ortalama çatlak genişlikleri skalası farklı olduğu için karşılaştırmalar mineral katkı içermeyen referans harç numunenin 14 ve 28 gün sonunda elde edilen ortalama çatlak genişliğine göre karşılaştırılmıştır.

Mineral katkı çeşidinden bağımsız olarak, mineral katkı ikame oranı artıkça çatlak genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir. %15, %30 ve %45 oranında uçucu kül içeren numunelerin referans numuneye göre 14 gün sonunda elde edilen ortalama çatlak genişliğindeki azalma sırasıyla %33, %44 ve %45 mertebesinde olmuştur. 28 gün sonunda elde edilen ortalama çatlak genişliğinde yaklaşık azalma ise sırasıyla %35, %52 ve %52 mertebesindedir. %20, %40 ve %60 oranında yüksek fırın cürufu içeren numunelerin referans numuneye göre 14 gün sonunda elde edilen ortalama çatlak genişliğindeki azalma sırasıyla %58, %64 ve %73 mertebesinde olmuştur. 28 gün sonunda elde edilen ortalama çatlak genişliğinde azalma ise sırasıyla %46, %66 ve %71 mertebesindedir.

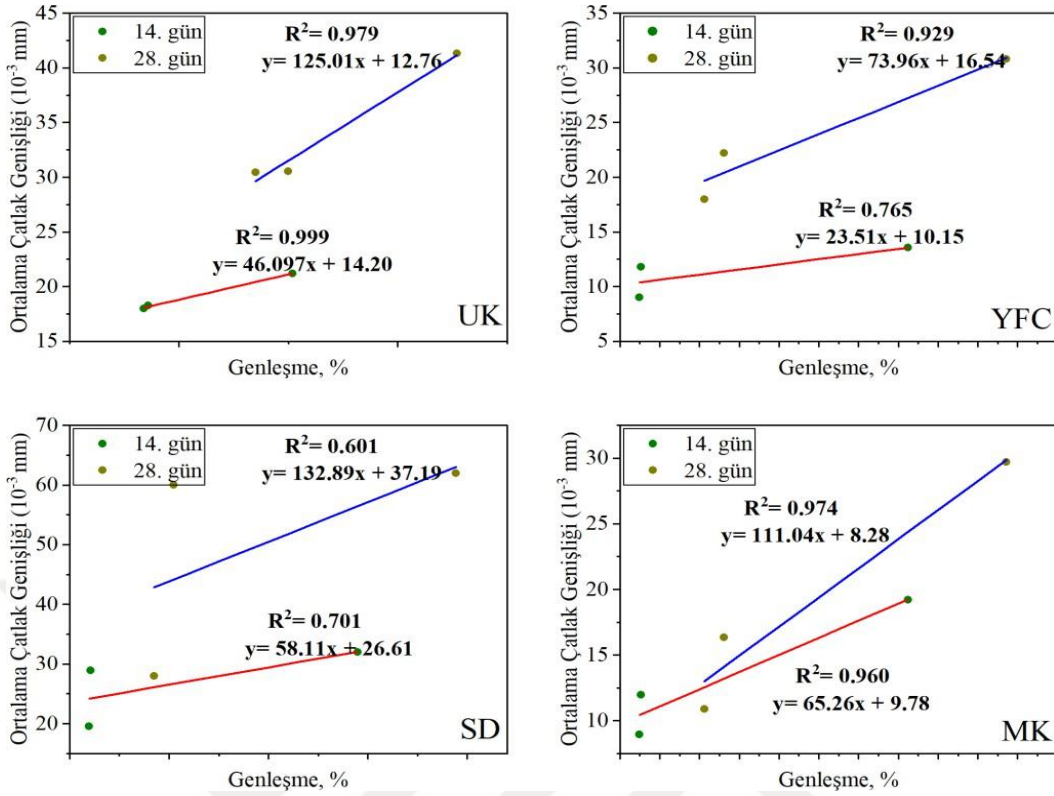
%5, %10 ve %15 oranında silis dumanı içeren numunelerin referans numuneye göre 14 gün sonunda elde edilen ortalama çatlak genişliğindeki azalma sırasıyla %3, %12 ve 42 mertebesinde olmuştur. 28 gün sonunda elde edilen ortalama çatlak genişliğinde azalma ise sırasıyla %5, %8 ve %57 mertebesindedir. %5, %10 ve %15 oranında metakaolin içeren numunelerin referans numuneye göre 14 gün sonunda elde edilen ortalama çatlak genişliğindeki azalma sırasıyla %42, %64 ve %76 mertebesinde olmuştur. 28 gün sonunda elde edilen ortalama çatlak genişliğinde azalma ise sırasıyla yaklaşık %54, %75 ve %83 mertebesindedir. Aynı oranlarda kullanılan silis dumanı ve metakolinin ortalama çatlak genişlikleri karşılaştırıldığında ise, metakolin içeren harç numunelerinde tespit edilen ortalama çatlak genişlikleri silis dumanı içeren harç numunelere göre daha küçüktür. Bu durumun %5, %10 ve %15 oranları ve her iki zaman dilimi için geçerli olduğu tespit edilmiştir.

Bütün mineral katkı içeren karışımlar değerlendirildiğinde 14 ve 28 gün sonunda en yüksek ortalama çatlak genişlikleri mineral katkı içermeyen referans numunede tespit edilmiştir. Referans numune hariç tutulduğunda ise, çalışma kapsamında 14 ve 28 gün sonunda en yüksek ortalama çatlak genişlikleri %5 oranında silis dumanı içeren harç numunelerde gözlemlenmiştir. Bazı değerler birbirine yakın olmakla birlikte 14 ve 28 gün sonunda en küçük ortalama çatlak genişlikleri %15 oranında metakaolin içeren harç numunelerde gerçekleşmiştir.

ASR'ye bağılı çatlaklar, çeşitli çevresel ve malzeme kaynaklı etkenlerin bir sonucu olarak harç içindeki birim hacim değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, farklı mineral katkı oranlarına sahip harçlarda ASR çatlakları ile birim boyut değişimi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Katkı türüne bakılmaksızın, katkı kullanımındaki artış ortalama çatlak genişliğini ve genleşme yüzdesini azaltmıştır. Katkı kullanımına bağılı olarak ortalama çatlak genişliği ve birim uzunluk değişimi büyük ölçüde lineer olmuştur. Bu durum %5 silis dumanı içeren harç numunelerde daha net görülmektedir. Bu numuneler referans numunelere kıyasla çok az değişkenlik göstermiştir. Bu durum ortalama çatlak genişliğindeki azalmadan da görülmektedir. Benzer şekilde %60 oranında yüksek fırın cürufu içeren harç numunelerde birim uzunluktaki değişim ile ortalama çatlak genişliğindeki azalma büyük ölçüde paralel olmuştur. Harç numuneleri üzerinden alınan görüntülerde katkı oranına bağılı olarak ortalama çatlak genişliğinde azalma olmasına rağmen birkaç resimde yüksek çatlak genişlikleri ölçülmüştür. Bu bireysel ve sınırlı yüksek çatlak genişliklerinin numunelerin birim uzunluk değişimini çok fazla etkilemediği değerlendirilmiştir. ASR sonucunda oluşan genleşme, harç içindeki birim uzunluk değişimini doğrudan etkilemektedir. Bu genleşme, reaktif agrega ile alkali hidroksitlerin reaksiyona girmesi sonucu jel oluşumu ve bu jelin su alarak hacimsel genleşmeye uğramasıyla meydana gelir. Bu süreç boyunca oluşan mikro çatlaklar zamanla ilerleyerek daha yoğun ve yaygın çatlak ağlarına dönüşür. Dolayısıyla, birim uzunlukta meydana gelen boyutsal değişimin en önemli belirleyicisinin, bu çatlakların yoğunluğu olduğu düşünülmektedir.

3.4. Genleşme Yüzdesi-Çatlak Genişliği Arasındaki İstatistiksel İlişki

Bu bölümde deneysel olarak elde edilen genleşme ile ortalama çatlak genişlikleri arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Şekil 29'da 14 ve 28 gün sonunda elde edilen genleşme ile ortalama çatlak genişliği arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 29. Mineral katkı içeren harçlarda genleşme-ortalama çatlak genişliği arasındaki ilişki

Şekil 29’da görüldüğü gibi, uçucu kül içeren harçlar için 14 ve 28 günlük sonuçlarda ortalama çatlak genişliği ile genleşme arasında, sırasıyla belirleme katsayısı $R^2=0,979$ ve $R^2=0,99$ olan önemli bir korelasyon vardır. Yüksek fırın cürufu içeren harçların 14 günlük sonuçlarında ortalama çatlak genişlikleri ile genleşme arasında orta düzeyde bir korelasyon ($R^2=0,765$) elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufu içeren harçların 28 günlük sonuçlarında ortalama çatlak genişlikleri ile genleşme arasında önemli bir korelasyon vardır.

Silis dumanı içeren harçlarda ortalama çatlak genişliği ile genleşme arasındaki ilişki değerlendirildiğinde, 14 günlük ortalama çatlak genişlikleri ile genleşme sonuçları arasında orta düzeyde bir korelasyon ($R^2=0,701$) vardır. Ancak, %10 ve %15 silis dumanı içeren harçların genleşmesi 28 gün sonra oldukça yakın gelmiştir. Sonuç olarak, ortalama çatlak genişliği ile genleşme arasındaki korelasyon düşük kalmıştır. Bu durum deneysel çalışmada ve/veya harçta oluşan kusurlarla ilişkili olabilir. Metakaolin içeren harçlar için 14 ve 28 günlük sonuçların ortalama çatlak genişlikleri ile genleşme arasında, sırasıyla $R^2=0,974$ ve $R^2=0,96$ belirleme katsayısı ile anlamlı bir korelasyon vardır. Sonuçlarda görüldüğü gibi, ortalama çatlak genişliği ile genleşme arasında doğrusal bir ilişki vardır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, mineral katkıların ASR kaynaklı çatlaklar üzerindeki etkisi görüntü işleme teknikleri vasıtasıyla incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı oranlarda mineral katkı maddeleri kullanarak üretilen harç numuneler üzerinde çatlak görüntüleri elde edilmiş ve harçların genleşme yüzdeleri ölçülmüştür. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak harç numunelerin yüzeyinde ölçülen ortalama çatlak genişliği ile genleşme yüzdeleri arasındaki ilişki karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- 1) Referans harç çubukların 1N NaOH çözeltisine 14 gün maruz kaldıktan sonraki genleşmesi yaklaşık %0,285 mertebesindedir, bu da deneysel çalışmada kullanılan dere agregasının ASTM C 1260-14'e göre reaktif olduğunu göstermektedir.
- 2) %15, %30 ve %45 oranında UK içeren harçların 14 gün sonunda elde edilen genleşmeleri sırasıyla %0,152, 0,086 ve %0,084'tür. Benzer şekilde %20, %40 ve %60 oranında YFC içeren harçların genleşmeleri sırasıyla %0,149, %0,067 ve %0,064'tür. Dolayısıyla %15 oranında UK ve %20 oranında YFC içeren harçlar dışında tüm katkılı karışımlar ASR kaynaklı genleşmeyi kontrol etmek için yeterli olduğu görülmektedir.
- 3) Silis dumanı ve metakaolin ikameli harç çubukları referans harca kıyasla 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda önemli ölçüde daha küçük genleşme göstermiştir. 14 gün sonunda %5, %10 ve %15 oranında silis dumanı ikame edilen harçların genleşmeleri sırasıyla %0,204, %0,060 ve %0,024 düzeyindedir. Ayrıca genleşme seviyeleri %5, %10 ve %15 MK ikame oranları için sırasıyla %0,145, %0,011 ve %0,010'dur.
- 4) Mineral katkı oranındaki artışa bağlı olarak ASR kaynaklı çatlak genişliğindeki önemli azalmalar meydana gelmiştir. Çatlak genişliğinde en fazla azalma %60 oranında yüksek fırın cürufu içeren ve %15 oranında metakaolin içeren harçlarda gerçekleşmiştir. Çatlak genişliğinde en az azalma ise %5 oranında silis dumanı içeren harçlarda gerçekleşmiştir.
- 5) Aynı oranda kullanıldığında metakaolin katkılı harç numunelerinde zamana bağlı çatlak genişliğindeki artış silis dumanı katkılı harç numunelerdekine

kıyasla daha sınırlı olmuştur. Bu durum özellikle erken yaşlarda (14 gün) dikkat çekicidir.

- 6) Mineral katkı en fazla miktarda kullanıldığında çatlak genişliği hafifçe azaltırken, çatlak yoğunluğu ve yüzeydeki ortalama çatlak genişliği önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca, ortalama çatlak genişliğinin, çatlak yoğunluğuna bağlı olarak genleşme yüzdesinden etkilenen bir parametre olduğu değerlendirilmiştir.
- 7) Çatlak genişliğinde en fazla azalma %60 oranında YFC, en az azalma ise %5 oranında SF içeren harçlarda görülmüştür.
- 8) İstatistiksel değerlendirmeye göre, silis dumanı içeren harçlardan 28 gün sonra elde edilen sonuçlar hariç, mineral katkılı tüm harçlarda ortalama çatlak genişliği ile genleşme arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.
- 9) Alkali-silika reaksiyonunun zamana bağlı seyri ve gelişimi görüntü işleme tabanlı yöntemlerle analiz edilebilir ve genleşme yüzdesi ile çatlak genişliğindeki değişim arasında ampirik formüller geliştirilebilir.
- 10) Numunelerden görüntü alma aşamasında farklı mineral katkı türleri için her çubuk numunenin aynı noktasından görüntü almayı sağlayabilecek bir sistem geliştirilebilir. Deney kapsamında bu metot uygulanmaya çalışılmış ancak nokta atışı aynı görüntü almanın zorluğu sonucuna varılmış bunun neticesinde de veri güvenliği için fazla sayıda görüntü alınmıştır. Veri fazlalığını önleyebilecek sağlıklı sonuçlar elde ettirebilecek bir sistem geliştirilebilir.
- 11) Genel sonuçlara bakıldığında alkali-silika reaksiyonu için mineral katkıların nasıl bir performans sergilediği gözlemlenebilse de bir başka deneyde aynı mineral katkıların ikili, üçlü, dörtlü vb. çeşitli kombinasyonları deneyerek bu varyasyonların ASR üzerindeki etkisi gözlemlenebilir.
- 12) Harç çubuk numunelerde okuma yapılırken yeni nesil nem hazneli okuma cihazları kullanmak harç çubuklarının okuma değerlerinin daha sağlıklı olmasını sağlar. Aksi halde dış ortamdan kaynaklanan nem, sıcaklık, vb. etmenler sebebiyle şaşırtıcı okumalar yapılabilir bu da okumaların tekrarlamasına, zaman kaybına ve yanlış okumalara neden olabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abit, Ö. (1998). *Alkali Silis Reaksiyonunun Kimyasal Katkılar ile Önlenmesi, Azaltılması veya Onarılması*. Ankara: T.C. Karayolları Kurs Programı.
- Akagic, A., Buza, E., Omanovic, S. & Karabegovic, A. (2018). Pavement Crack Detection using Otsu Thresholding for Image Segmentation. *In 2018 41st international convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO)*. s. 1092-1097.
- Akman, M. S. (2002). *Çimentolar İçindeki Çözünen Alkalilerin Miktar ve Türlerinin Beton ve Harç Özelliklerine Etkileri*. Çimento ve Beton Dünyası.
- Alam, S. Y., Loukili, A., Grondin, F. & Rozière, E. (2015). Use of the Digital Image Correlation and Acoustic Emission Technique to Study the Effect of Structural Size on Cracking of Reinforced Concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 143, 17-31.
- Andıç, Ö. (2002). *Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması*. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Arslan, M. (2001). *Beton: Dökümü, Kalıpları, Kusurları ve Dayanıklılığı*, Atlas Yayınevi.
- ASTM C 1260-14 (2014). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 1567-23 (2023). Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). American Society for Testing and Materials
- ASTM C 618-19 (2019). Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials.
- ASTM-C-295 (2009). Standard Test Method for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete. American Society for Testing and Materials.
- Aytekin, B., Biricik, Ö. & Mardani, A. (2024). Influence of recycled concrete, marble, glass, and limestone powder, and utilization ratios on the compressive strength and alkali-silica reaction performance of mortar mixtures. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(6), 5585-5602.
- Baradan B. (2000). *Yapı Malzemesi II*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Baradan, B., Yazıcı, H. & Aydın, S. (2010). *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. İstanbul: Türkiye Hazır Beton Birliği.

- Baradan, B., Yazıcı, H. & Aydın, S. (2012). *Beton*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Beglarigale, A., & Yazici, H. (2014). Mitigation of Detrimental Effects of Alkali-Silica Reaction in Cement-Based Composites by Combination of Steel Microfibers and Ground-Granulated Blast-Furnace Slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(12), 04014091.
- Bektaş, F. (2002). *Preventive Measures Against Alkali-Silika Reaction*, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Berube, M.A. & Duchesne, J., Evaluation of Test Methods Used for Assessing the Effectiveness of Mineral Admixtures in Suppressing Expansion due to Alkali Aggregate Reaction, Proceedings, 4th International Conference on Fly Ash, SilicaFume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 1992, Istanbul, Bildiriler Kitabı, 549- 575.
- Binal, A. (2002). *Beton Agregalarında Alkali Silika Reaksiyonu Etkisinin Belirlenmesi İçin Harç Prizma Deneyi Tasarımı ve Uygulaması*. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Binal, A. (2004). Pesimum Reaktif Agregası İçeriğinin Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisinin Deneyisel Yöntemlerle Araştırılması. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 17(2), 119-128.
- Broberg, P. (2013). Surface Crack Detection in Welds Using Thermography. *Ndt & E International*, 57, 69-73.
- Brooks, J. J., & Johari, M. A. 2001. *Structure and Performance of Cements*, Second Edition,
- Brooks, W. S., Lamb, D. A., & Irvine, S. J. (2015). IR Reflectance Imaging for Crystalline Si Solar Cell Crack Detection. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(5), 1271-1275.
- Demir, İ. (2010). Alkali-Silika Reaksiyonu Etkisine Maruz Aynı Oranda Silis Dumanı ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4).
- Dhital, D. & Lee, J. R. (2012). A Fully Non-Contact Ultrasonic Propagation Imaging System for Closed Surface Crack Evaluation. *Experimental Mechanics*, 52(8), 1111–1122.
- Diamond, S. (1999). Unique Response of LiNO_3 as an Alkali-Silica Reaction Preventive Admixture. *Cement and Concrete Research*, 29, 1271–1275.
- Dinçdemir, İ. (2015). *Alkali-Silika Reaksiyonunun İyileştirilmesinde Mineral ve Kimyasal Katkıların Kullanımı*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Duchesne, J. & Bérubé, M. A. (2001). Long-term Effectiveness of Supplementary Cementing Materials against Alkali-Silica Reaction. *Cement and concrete research*, 31(7), 1057-1063.

- Erdoğan, Ç. (2023). *Silis Dumanı İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonunun DeneySEL Olarak Değerlendirilmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Fanijo, E. O., Kassem, E. & Ibrahim, A. (2021). ASR Mitigation Using Binary and Ternary Blends with Waste Glass Powder. *Construction and Building Materials*, 280, 122425.
- Fanijo, E. O., Kolawole, J. T. & Almakrab, A. (2021). Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete Structures: Mechanisms, Effects and Evaluation Test Methods Adopted in the United States. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00563.
- Farny, J. A. & Kosmatka, S. H. (1998). *Betonda Alkali Agregası Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü*. Çeviren: Kalmış, M., Güngör, N., Eribol, S., American Concrete Pavement Association (ACPA).
- Figueira, R. B., Sousa, R., Coelho, L., Azenha, M., De Almeida, J. M., Jorge, P. A. S. & Silva, C. J. R. (2019). Alkali-Silica Reaction in Concrete: Mechanisms, Mitigation and Test Methods. *Construction and Building Materials*, 222, 903-931.
- Fujita, Y. & Hamamoto, Y. (2011). A Robust Automatic Crack Detection Method from Noisy Concrete Surfaces. *Machine Vision and Applications*, 22, 245-254.
- Glasser, F. P. (1991). *Chemistry of the Alkali-Aggregate Reaction*. In *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. London: CRC Press.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). *Digital image processing* (3rd ed.). University of Tennessee; MedData Interactive.
- Gümüş, S. (2009). *Kocaeli Bölgesindeki Agregaların Alkali Silika Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Gün, M. (2007). *Adapazarı Bölgesindeki Agregaların Alkali-Agregası Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Gürkan, A. (2006). *Pomza ve Zeolit Alkali-Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Han, H., Deng, H., Dong, Q., Gu, X., Zhang, T. & Wang, Y. (2021). An Advanced Otsu Method Integrated with Edge Detection and Decision Tree for Crack Detection in highway Transportation Infrastructure. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(1), 9205509.
- Hay, R. & Ostertag, C. P. (2021). New Insights into The Role of Fly Ash In Mitigating Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 144, 106440.
- Hewlett, P. C. (1998). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. London: John Wiley and Sons Inc.

- Hobbs, D. W. (1982). Influence of Pulverized-Fuel Ash and Granulated Blast Furnace Slag upon Expansion Caused by The Alkali-Silica Reaction. *Magazine of Concrete Research*, 34, 83-94.
- Hobbs, D.W. (1988). *Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Thomas Telford, London.
- Ioli, F., Pinto, A., & Pinto, L. (2022). UAV photogrammetry for metric evaluation of concrete bridge cracks. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 1025-1032.
- Ito, A., Aoki, Y., & Hashimoto, S. (2002). Accurate Extraction and Measurement of Fine Cracks from Concrete Block Surface image. In *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*. s. 2202-2207.
- Iyer, S., & Sinha, S. K. (2005). A Robust Approach for Automatic Detection and Segmentation of Cracks in Underground Pipeline Images. *Image and Vision Computing*, 23(10), 921-933.
- Jeong, H., Jeong, B., Han, M. & Cho, D. (2021). Analysis of Fine Crack Images Using Image Processing Technique and High-Resolution Camera. *Applied Sciences*, 11, 9714.
- Karakaş, S. (2013). *Harşit Çayı Vadisi Agregalarının Alkali Silika Reaksiyonu bakımından incelenmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Katayama, T. (1996). Characteristics on Alkali Aggregate Reaction. The Study on the Maintenance and Rehabilitation of Highway Bridges in the Republic of Turkey.
- Krüger, M. E., Hilbig, H., Stelzner, L. & Machner, A. (2024). Effect of the chemical composition of synthetic alkali-silica gels on their structure, swelling behavior and water uptake. *Cement and Concrete Research*, 184, 107596.
- Lane, D. S. & Ozyıldırım, C. (1999). Preventive measures for alkali-silica reactions *Cement and Concrete Research*, 29, 1281-1288.
- Li, S., & Zhao, X. (2020). Automatic Crack Detection and Measurement of Concrete Structure using Convolutional Encoder-Decoder network. *IEEE Access*, s. 134602-134618.
- Lin, Y., Bin, C., Su, F., Chen, Y., Rong, H., & Huang, Y. (2024). Effects of Mineral Admixtures on the Alkali-Silica Reaction in Granite Manufactured Sand Mortar. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 49, 2555-2574.
- McCoy, W. J. & Caldwell, A. G. (1951). New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion. *Journal Proceedings*, 47(5), 693-706.
- Mindess, S. (1981). *Concrete*. New Jersey: Prentice Hall.
- Mohammadi, A., Ghiasvand, E. & Nili, M. (2020). Relation between Mechanical Properties of Concrete and Alkali-Silica Reaction (ASR); A review. *Construction and Building Materials*, 258, 119567.

- Moser, R. D., Jayapalan, A. R., Garas, V. Y. ve Kurtis, K. E. (2010). Assessment of Binary and Ternary Blends of Metakaolin and Class C Fly Ash for Alkali-Silica Reaction Mitigation in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(12), 1664-1672.
- Nagroćkienė, D., Rutkauskas, A., Pundienė, I., & Girnienė, I. (2019). The Effect of Silica Fume Addition on the Resistance of Concrete to Alkali Silica Reaction. *In Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Naik, T. R. (2008). Sustainability of Concrete Construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(2), 98-103.
- Naiqian, F., & Tingyu, H. (1998). Mechanism of Natural Zeolite Powder in Preventing Alkali-Silica Reaction in Concrete. *Advances in cement research*, 10(3), 101-108.
- Nayır, S., (2015). *Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonunu İyileştirmede Etkilerinin Araştırılması*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Nayır, S., Erdoğan, Ş., & Kurbetçi, Ş. (2017). Effectiveness of Mineral Additives in Mitigating Alkali-Silica Reaction in Mortar. *Comput. Concr., Article*, 20(6), 705-710.
- Neville, A. M. (1981). *Properties of Concrete*, Longman Scientific and Technical, England.
- Nyathi, M. A., Bai, J., & Wilson, I. D. (2023). Concrete Crack width Measurement Using a Laser Beam and Image Processing Algorithms. *Applied Sciences*, 13(8), 4981.
- Olağide, O. D., Nokken, M. R., & Sanchez, L. F. (2023). Alkali-Silica Reactions: Literature Review on the Influence of Moisture and Temperature and the Knowledge Gap. *Materials*, 17(1), 10.
- Otsu, N. (1975). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *Automatica*, 11(285-296), 23-27.
- Özdemir, İ. (2023). *Metakaolin İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonunun Deneysel Olarak Değerlendirilmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Park, S. E., Eem, S. H., & Jeon, H. (2020). Concrete Crack Detection and Quantification Using Deep Learning and Structured Light. *Construction and Building Materials*, 252, 119096.
- Poole, A. B. (1991). *Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete*. In *The alkali-silica reaction in concrete*. London: CRC Press.
- Quan, Y., Sun, J., Zhang, Y., & Zhang, H. (2019). The method of the road surface crack detection by the improved Otsu threshold. In *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, s. 1615–1620.
- Ramlochan, T., Thomas, M., & Gruber, K. A. (2000). The Effect of Metakaolin on Alkali-Silica Reaction in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(3), 339-344.

- Ramyar, K., Dönmez, H., & Andiç, Ö. (2002). Alkali Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento ve Beton Araştırma-Geliştirme Enstitüsü*, 3-15.
- Rashad, A. M. (2013). Metakaolin as Cementitious Material: History, Scours, Production and Composition—A Comprehensive Overview. *Construction and Building Materials*, 41, 303-318.
- Saha, A. K., Khan, M. N. N., Sarker, P. K., Shaikh, F. A., & Pramanik, A. (2018). The ASR Mechanism of Reactive Aggregates in Concrete and its Mitigation by Fly Ash: A Critical Review. *Construction and Building Materials*, 171, 743-758.
- Salim, M. U., & Mosaberpanah, M. A. (2022). The Mechanism of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete/Mortar and its Mitigation by using Geopolymer Materials and Mineral admixtures: A Comprehensive Review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(14), 6766-6806.
- Shafaatian, S. M., Akhavan, A., Maraghechi, H., & Rajabipour, F. (2013). How does Fly Ash Mitigate Alkali–Silica Reaction (ASR) in Accelerated Mortar Bar Test (ASTM C1567)? *Cement and Concrete Composites*, 37, 143-153.
- Shayan, A., Diggins, R., & Ivanusec, I. (1996). Effectiveness of Fly Ash in Preventing Deleterious Expansion due to Alkali-Aggregate Reaction in Normal and Steam-Cured Concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(1), 153-164.
- SHRP (2003). Alkali Silica Reactivity Library Handbook for Identification ASR <http://leadstates.tamu.edu/asr/>.
- Sinno, N., & Shehata, M. H. (2021). Role of Temperature on Alkali-Silica Reaction and the Efficacy of Supplementary Cementitious Materials. *Construction and Building Materials*, 313, 125427.
- Stark, B. Morgan, P. Okamoto, S. Diamond, Eliminating or Minimizing Alkali–Silica Reactivity, Strategic Highway Research Program, SHRP-P-343, Washington, DC, 1992. Delft University Press, Netherlands.
- Swamy, R. N., & AIL-Asali, M. M. (1989). Effect of Alkali-Silica Reaction on the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams. *Structural Journal*, 86(4), 451-459.
- Talab, A. M. A., Huang, Z., Xi, F., & HaiMing, L. (2016). Detection Crack in Image using Otsu Method and Multiple Filtering in Image Processing Techniques. *Optik*, 127(3), 1030-1033.
- Thomas, M. (2011). The effect of Supplementary Cementing Materials on Alkali-Silica Reaction: A Review. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1224-1231.
- Tomczak, K., Jakubowski, J., & Fiołek, P. (2017). Method for Assessment of Changes in the width of Cracks in Cement Composites with use of Computer Image Processing and Analysis. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 39(2), 73-80.

- Tosun, K. (2001). *Uçucu Kül ve Silika Tozunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Tosun, K., Felekoğlu, B. & Baradan, B. (2007) Metakaolin ve Silika Dumanı Kullanımının Çimento Harcının Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri. *3rd International Symposium on Sustainability in Cement and Concrete, TCMA*, s. 83-94, İstanbul.
- Vidal, M., Ostra, M., Imaz, N., García-Lecina, E., & Ubide, C. (2016). Analysis of SEM Digital Images to Quantify Crack Network Pattern Area in Chromium Electrodeposits. *Surface and Coatings Technology*, 285, 289-297.
- Vivian, H. E. (1951). The effect on Mortar Expansion of Particle Size of the Reactive Component in Aggregate. *Australian Journal of Applied Science*, 2(4), 488-94.
- Vivian, H. (1950). Studies in Cement Aggregate Reaction the Effect on Mortar Expansion of Amount of Reactive Component.
- Vu, D. D. (2002). Strength Properties of Metakaolin–Blended Paste, Mortar and Concrete, Delft: Delft University Press.
- Wei, J., Gencturk, B., Jain, A., & Hanifehzadeh, M. (2019). Mitigating Alkali-Silica Reaction Induced Concrete Degradation through Cement Substitution by Metakaolin and Bentonite. *Applied Clay Science*, 182, 105257.
- Woods, H. (1968). *Durability of Concrete Construction*. Detroit, Michigan, ACI Monograph American Concrete Institute.
- Xu, X. J., & Zhang, X. N. (2013). Crack Detection of Reinforced Concrete Bridge using Video Image. *Journal of Central South University*, 20(9), 2605-2613.
- Yazıcı, H., Beglarigale, A., Felekoğlu, K. T., & Türkel, S. (2019). Comparing the Alkali-Silica Reaction Mitigation Potential of Admixtures by using Different Accelerated Test Methods. *Construction and Building Materials*, 197, 597-614.
- Yiyang, Z. (2014). The Design of Glass Crack Detection System Based on Image Preprocessing Technology. *IEEE 7th joint international information technology and artificial intelligence conference*, s. 39-42. Tangshan.

ÖZGEÇMİŞ

İbrahim SELİM, İlköğretimini Ata İlköğretim Okulunda, liseyi Yomra Anadolu Lisesinde tamamladı. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü bitirdi. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. İngilizce bilmektedir.

