

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORCID : - - -**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**ORCID : - - -**

**Trabzon**

## ÖNSÖZ

‘Metakaolin İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonunun Deneysel Olarak Değerlendirilmesi’ adlı bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmalarım süresince ilgisini ve desteğini esirgemeyen, değerli bilgi ve birikimleriyle bana yol gösteren, çalışmanın yürütülmesinde ve malzeme temininde yardımcı olan, değerli vaktini ayıran saygıdeğer hocam, danışmanım, sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’ya ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması boyunca bilgilerini benimle paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Şirin KURBETCİ, Arş. Gör Safa NAYIR, Arş. Gör. Memduh NAS ve diğer hocalarıma teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme çok teşekkür ederim. Ailem gibi olan, her zorlukta benimle yürüyen çok değerli arkadaşlarıma ve özellikle çalışmalar süresince birbirimize hep destek olduğumuz, beraber birçok şeyi başardığımız, başarılarımızı hatırlanacak anılarla süslediğimiz dostum Çiğdem ERDOĞAN’a teşekkürlerimi sunarım.

İrem ÖZDEMİR

Trabzon 2023

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Metakaolin İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonunun Deneysel Olarak Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/03/2023

İrem ÖZDEMİR

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	2
1.3. Literatür Taraması .....	2
1.4. Alkali-Silika Reaksiyonu .....	5
1.4.1. Alkali-Silika Reaksiyonu Kimyası.....	7
1.4.1.1. Boşluk Çözeltilisi Kimyası.....	7
1.4.1.2. Alkali-Silika Reaksiyonu Oluşum Mekanizması .....	8
1.4.1.3. Pesimum Oran .....	10
1.4.2. Alkali-Silika Reaksiyonu Ürünleri.....	11
1.4.3. Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkiyen Faktörler.....	12
1.4.3.1. Agreganın Reaktifliği ve Tane Büyüklüğü .....	12
1.4.3.2. Betondaki Alkali Miktarı.....	14
1.4.3.3. Nem .....	14
1.4.3.4. Sıcaklık.....	15
1.4.3.5. Karışım Oranlarının Etkisi .....	16

1.4.3.6. Sürüklenmiş Havanın Etkisi .....	16
1.4.4. Alkali Silika Reaksiyonu Belirtileri .....	16
1.4.4.1. Genleşme ve Çatlama.....	16
1.4.4.2. Yüzey Birikintileri.....	17
1.4.4.3. Parça Atma .....	18
1.4.4.4. Renk Değişimi.....	19
1.5. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirlemede Kullanılan Deney Yöntemleri .....	19
1.5.1. Harç Çubuk Deneyi (ASTM C227).....	20
1.5.2. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C1260) .....	21
1.5.3. Beton Prizma Deneyi (ASTM C1293) .....	22
1.5.4. Kimyasal Yöntem (ASTM C289) .....	24
1.5.5. Kullanılan Diğer Deney Yöntemleri .....	25
1.5.5.1. Jel-Pat Metodu.....	25
1.5.5.2. Alman Çözünme Metodu .....	26
1.5.5.3. Ozmotik Hücre Metodu.....	26
1.5.5.4. Otoklav Metodu.....	26
1.5.5.5. Agregaların petrografik analizi (ASTM C295).....	27
1.6. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi .....	27
1.6.1. Uçucu Külün Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi .....	28
1.6.2. Silis Dumanının Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi .....	29
1.6.3. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi .....	30
1.6.4. Metakaolinin Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi .....	30
1.7. Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi.....	32
2. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	34
2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri .....	34
2.1.1. Çimento .....	34
2.1.2. Agrega .....	35

2.1.3.	Metakaolin.....	35
2.1.4.	Sodyum Hidroksit (NaOH) Çözeltisi .....	36
2.2.	Harç Çubuk Numunelerinin Üretimi.....	37
2.3.	Agrega Reaktifliğini Belirlemek İçin Yapılan Ön Çalışma .....	41
3.	DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME .....	44
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER .....	49
5.	KAYNAKLAR.....	51
6.	EKLER.....	56
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

METAKAOLİN İÇEREN HARÇLARDA ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNUN  
DENEYSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

İrem ÖZDEMİR

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU  
2023, 66 Sayfa, 1 Sayfa Ek

Beton hizmet verdiği ortamlarda çeşitli fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kalmaktadır. Bu nedenle betonun bünyesinde zamanla ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir. Hasara neden olan bu etkiler arasında ilk sırada alkali-silika reaksiyonu gelmektedir. Alkali-silika reaksiyonu reaktif silis içeren agregaya ile çimentoda mevcut alkali oksitler arasında gerçekleşen kimyasal bir süreçtir. Bu reaksiyon nedeniyle meydana gelen alkali-silika jeli ortamda mevcut suyun etkisiyle şişer ve betonun genişmesine neden olur, neticede beton çatlar.

Bu çalışmada alkali-silika reaksiyonu nedeniyle betonda meydana gelen genişmeyi azaltmada metakaolin kullanımının etkinliği araştırılmıştır. Bu amaçla değerlendirmede ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemi kullanılmıştır. Doğu Karadeniz Bölgesinde bazı lokasyonlardan temin edilen agregaların öncelikle alkali-silika reaktiflikleri belirlenmiştir. Bu agregalardan Artvin-Şavşat yöresinden temin edilen agregaya reaktiflik itibarıyla en zararlısı olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla deneysel çalışmada bu agreganın kullanımına karar verilmiştir. Metakaolinin alkali-silika reaktifliğini bastırmada etkinliğini belirlemek amacıyla metakaolin çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilerek hazırlanan harç karışımlar üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışma neticesinde %10 oranında metakaolin kullanımı alkali-silika kaynaklı genişmeyi ilgili standardın verdiği sınır değerinin altına çekmiş ve metakaolin ikame oranı arttıkça genişmeyi azaltmadaki etkisi belirginleşmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alkali-silika reaksiyonu, Metakaolin, ASTM C1260

Master Thesis

## SUMMARY

### EXPERIMENTAL EVALUATION OF ALKALI-SILICA REACTION IN MORTARS CONTAINING METAKAOLIN

İrem ÖZDEMİR

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU  
2023, 66 Pages, 1 Page Appendix

Concrete is exposed to various physical and chemical effects in the environments it serves. For this reason, serious damage may occur in the concrete over time. The alkali-silica reaction comes first among these damaging effects. The alkali-silica reaction is a chemical process that takes place between the aggregate containing reactive silica and the alkali oxides present in the cement. The alkali-silica gel formed due to this reaction swells with the effect of the water present in the environment and causes the concrete to expand, as a result, the concrete cracks.

In this study, the effectiveness of using metakaolin in reducing the expansion in concrete due to ASR was investigated. For this purpose, ASTM C 1260 accelerated mortar bar test method was used in the evaluation. First of all, alkali-silica reactivity of the aggregates derived from some locations in the Eastern Black Sea Region were determined. Of these aggregates, the aggregate obtained from the Artvin-Şavşat region was determined as the most harmful in terms of reactivity. Therefore, it was decided to use this aggregate in the experimental study. In order to determine the effectiveness of metakaolin in suppressing alkali-silica reactivity, measurements were carried out on mortar mixtures prepared by replacing metakaolin with cement at 5%, 10%, 15% and 20% by weight.

As a result of the experimental study, the use of 10% metakaolin reduced the alkali-silica-induced expansion below the limit value given by the relevant standard, and the effect of reducing the expansion became evident as the metakaolin substitution rate increased.

**Keywords:** Alkali-silica reaction, Metakaolin, ASTM C1260

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İy yapıda iyon taşınımı ve taşınım yönü.....	7
Şekil 2. Agregaya yüzeyi ile temas eden boşluk çözeltisi.....	8
Şekil 3. Pesimum Davranış.....	10
Şekil 4. Agregadaki reaktif silis bileşeni büyüklüğünün genleşmeye etkisi .....	13
Şekil 5. Bağlı nemin ASR nedeniyle betonda oluşan genleşmeye etkisi .....	15
Şekil 6. Alkali-silika reaksiyonu sebebiyle oluşan çatlaklara ait görünüşler .....	17
Şekil 7. Alkali-silika reaksiyonu mikro ve makro çatlak modeli .....	17
Şekil 8. Çatlaklardan sızan yüzeysel tortular.....	18
Şekil 9. Parça atma evreleri .....	18
Şekil 10. Parça atma örneği .....	19
Şekil 11. %100 bağlı nemin sağlandığı kap .....	23
Şekil 12. Alkalideki azalma (Rc)-çözünmüş silis (Sc) ilişkisi .....	25
Şekil 13. Deneysel çalışmada kullanılan metakaolin örneği .....	36
Şekil 14. Çözeltiyi hazırlamada kullanılan sodyum hidroksit.....	36
Şekil 15. Bir karışım için kullanılan malzemeler .....	38
Şekil 16. Prizmatik numune kalıpları .....	38
Şekil 17. Harç karıştırıcısı .....	39
Şekil 18. Prizmatik metal kalıplarda harç çubuk numuneler.....	39
Şekil 19. Prizmatik harç numuneler .....	40
Şekil 20. Prizmatik numunelerin boy ölçme aparatı.....	40
Şekil 21. Alkali-silika deney tankına yerleştirilen numuneler .....	41
Şekil 22. Agregaya ait genleşme-zaman ilişkisi.....	43
Şekil 23. %5 metakaolin ikameli numunelere ilişkin genleşme-zaman ilişkisi .....	44

Şekil 24. %10 metakaolin ikameli numunelere ilişkin genişleme-zaman ilişkisi .....	45
Şekil 25. %15 metakaolin ikameli numunelere ilişkin genişleme-zaman ilişkisi .....	46
Şekil 26. %20 metakaolin ikameli numunelere ilişkin genişleme-zaman ilişkisi .....	47
Şekil 27. Metakaolin ikameli numunelerin 14 günlük genişleme-katkı oranı ilişkisi .....	48



## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1. Reaktiflikte azalmaya göre mineraller ve kayalar .....	12
Tablo 2. Harç çubuk ve hızlandırılmış harç çubuk yöntemi için agrega karışım oranları ..	20
Tablo 3. Harç çubukları için karışım miktarları .....	20
Tablo 4. Çimentoya ilişkin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri .....	34
Tablo 5. Agreganın fiziksel özellikleri .....	35
Tablo 6. Metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler .....	35
Tablo 7. ASTM C 1260'a göre granülometrik bileşim .....	37
Tablo 8. Harç karışımlarının üretiminde kullanılan malzeme miktarları .....	37
Tablo 9. ASTM C1260 standardı uyarınca alkali-silika reaktiflik değerlendirilmesi .....	41
Tablo 10. Farklı ocaklardan temin edilen agregaların genleşme yüzdeleri .....	42
Tablo 11. Agregaya ait genleşme değerleri .....	42
Tablo 12. %5 metakaolin ikameli numunelere ait genleşme değerleri .....	44
Tablo 13. %10 metakaolin ikameli numunelere ait genleşme değerleri .....	45
Tablo 14. %15 metakaolin ikameli numunelere ait genleşme değerleri .....	46
Tablo 15. %20 metakaolin ikameli numunelere ait genleşme değerleri .....	47
Ek Tablo 1. Trabzon-Yomra (A1) agregasına ait deney sonuçları .....	55
Ek Tablo 2. Harşit Çayı Vadisi- Tirebolu (A2) agregasına ait deney sonuçları .....	55
Ek Tablo 3. Artvin-Murgul (A3) agregasına ait deney sonuçları .....	55

## SEMBOLLER DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	: Amerikan Standart
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
(Na <sub>2</sub> O) <sub>e</sub>	: Sodyum oksit eşdeğeri
R <sub>c</sub>	: Alkali azalması
S <sub>c</sub>	: Çözünmüş silis
S/Ç	: Su/Çimento
TS	: Türk Standartları

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Beton; çimento, su ve agreganın homojen olarak karıştırılmasıyla oluşan bir yapı malzemesidir ve dünyada geniş kullanım alanına sahiptir. Beton kimyasal ve fiziksel dış etkilere karşı dayanıklı ve ekonomik olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton kullanım alanlarına bağlı olarak farklı tehlikelere maruz kalmaktadır. Betonun maruz kaldığı tehlikelerden biri de kimyasal yapısının bozulması neticesinde oluşan ve fiziksel bütünlüğüne zarar veren alkali-silika reaksiyonudur.

ABD, Kaliforniya'da 1930'lu yıllarda bazı beton yapıların betonu oluşturan malzemelerin standartlara uygun olmasına rağmen yapımdan sonraki yıllar içerisinde yapı elemanlarında çatlak oluşumları gözlemlenmiş ve rapor edilmiştir. Çatlak oluşumları çoğunlukla harita çatlakları şeklinde gözlemlenmiş olup bu oluşumlar çatlaklardan sızan jel ve betonda parça atma gibi belirtilerle de kendini göstermiştir. Stanson 1940 yılında çatlak oluşumuna kimyasal bir reaksiyonun yol açtığını ifade etmiştir. Blanks ve Meissner 1941 yılında yaptıkları bir çalışmada Parker barajında meydana gelen çatlak ve deformasyonları incelemiş, incelemeler sonucunda elde edilen veriler sayesinde betonda alkali-silika reaksiyonu ürünlerinin var olduğunu ve reaksiyona agregada %2 oranında bulunan riyolit ve andezit parçacıklarının neden olduğunu belirtmişlerdir. (Bektaş, 2002).

Türkiye'de ilk olarak 1955 yılında İzmir'de bazı köprü ayaklarından gözlemlenen çatlak oluşumlarını Karayolları Genel Müdürlüğü ile Japon Jica firması incelemiş, incelemeler neticesinde özellikle Gediz Nehri ve Nif Nehri kumlarının içerdiği reaktif silisin alkali-silika reaksiyonuna yol açtığı belirtilmiştir (Katayama, 1996).

Alkali-agrega reaksiyonu, betonda kullanılan agreganın reaktif bileşenleri ile çimentodaki alkali oksitlerin reaksiyonu şeklinde tanımlanır. Bu reaksiyon neticesinde meydana gelen ürünler nem etkisiyle genişler ve betonun mekanik özelliklerini aksi yönde etkileyerek betonun bütünlüğüne zarar vermektedir (Binal, 2004).

Alkali-agrega reaksiyonunun oluşumu üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar Alkali-karbonat reaksiyonu (ACR), alkali-silika reaksiyonu (ASR) ve alkali-silikat reaksiyonudur. Gerçekleşen reaksiyonlar arasında en sık gözlenen alkali-silika reaksiyonudur (Binal, 2004).

## **1.2. Amaç ve Kapsam**

Bu çalışmanın amacı metakaolin kullanımının harçta meydana gelen alkali-silika reaksiyonu kaynaklı genleşmeyi azaltma etkisini tespit etmektir. Bu bağlamda öncelikle Doğu Karadeniz Bölgesinde belli yörelerden temin edilen agregaların reaktiflikleri tespit edilmiştir. Alkali-silika reaksiyonu itibarıyla zararlı olduğu tespit edilen agrega kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunun için metakaolin çimento yerine farklı oranlarda ikame edilerek harç numuneler hazırlanmıştır. Bu şekilde ikame oranına bağlı olarak metakaolinin alkali-silika kaynaklı genleşmeyi önlemedeki etkinliği ASTM C 1260 standardı uyarınca belirlenmiştir.

## **1.3. Literatür Taraması**

Alkali-silika reaksiyonu genleşmesini azaltmada mineral katkı olarak metakaolin kullanımına ilişkin yapılan çalışmalardan bir kısmı değerlendirilmiştir.

Ramlochan ve diğerleri (2000), metakaolinin betonda alkali-silika reaksiyonu genleşmesini azaltmadaki etkilerini araştırmışlardır. Deneyler ASTM C 1293 beton prizma deneyi ve ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemi standardına uygun gerçekleştirilmiştir. Çalışmada biri yüksek reaktifliğe sahip, diğeri daha az reaktif iki farklı agrega kullanılmıştır. Çimento yerine %0, %10, %15 ve %20 oranında metakaolin ikame edilmiştir. Her iki deney yöntemi için %10 ve %15 oranında metakaolin ikamesinin alkali-silika reaksiyonu genleşmesini kontrol altına almakta yeterli olduğu belirtilmiştir. Beton prizma deney sonuçlarına göre %15 ve %20 oranında metakaolin ikamesinin genleşmeyi neredeyse aynı oranda azalttığı gözlemlenmiştir. %20 oranında yüksek reaktifliğe sahip metakaolin ikamesinin boşluk suyu alkali konsantrasyonunu etkili şekilde azalttığı vurgulanmıştır. Metakaolin kullanımını boşluk suyu pH'ını düşürerek alkali-silika reaksiyonu genleşmesini kontrol altına almada etkili olduğu belirtilmektedir.

Aquino ve diğerkleri (2001), yaptıkları çalışmada mineral katkı olarak ayrı ayrı yüksek reaktifliğe sahip metakaolin ve silis dumanı kullanımının alkali-silika reaksiyon üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemi kullanılmıştır. Mineral katkı ikamesinin, harç çubuk genleşmelerini tüm ölçüm periyotlarında önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Deney sonunda %10 oranında metakaolin ikameli numune referans numuneye kıyasla %60, aynı oranda silis dumanı ikameli numune referans numuneye göre %50 daha az genleşme göstermiştir. Silis dumanı ve metakaolin ikameli numunelere ait genleşme değerlerinin birbirine oldukça yakın sonuçlar gösterdiği belirtilmiştir.

Yıldırım (2013), yaptığı çalışmada doğal agregayı alkali-silika reaktifliği açısından incelemiş ve alkali-silika reaksiyonu etkilerini azaltmada mineral katkıları kullanarak zararlı genleşmeleri önlemede en uygun karışım miktarlarını araştırmıştır. Çalışmada ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk deneyi, ASTM C 227 harç çubuk deneyi ve otoklav deney metodu uygulanmıştır. Metakaolin ikameli tüm numunelerin referans numuneye göre alkali-silika reaksiyonu genleşme değerlerini azaltmada etkili olduğu görülmüştür. %5 metakaolin ikamesinin genleşmeyi %84,1 azaltarak standartta belirtilen sınır değer altına indirmekte başarılı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca %10 ile %20 oranında metakaolin ikameli numunelerin genleşme değerlerinin birbirine yakın olduğu ifade edilmektedir.

Yazıcı ve diğerkleri (2014), çimento yerine metakaolin kullanımının alkali-silika reaksiyonu, sülfat direnci, yüksek sıcaklık ve geçirimsizlik üzerinde etkilerini araştırmışlardır. Alkali-silika reaksiyonu genleşme etkilerini gözlemlemek amacıyla ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada çimento ile ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 olmak suretiyle farklı oranlarda metakaolin ikame edilmiştir. %5 oranında metakaolin ikamesi referans numuneye yakın genleşme sağlamış ve alkali-silika reaksiyonu genleşmesini azaltmada etkili olmadığı gözlemlenmiştir. %10 ile %20 arasında metakaolin kullanımı alkali-silika reaksiyonu genleşmesini önemli ölçüde azalttığı belirtilmektedir. Özellikle %15 ve %20 oranında metakaolin kullanımı genleşmeyi sınır değer olan %0,1 altına indirmekte başarılı olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca metakaolin kullanımının harçların mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği, su emme kapasitesini ve sülfat etkilerinin neden olduğu genleşmeleri azaltmada etkili olduğu tespit edilmiştir.

Türkel ve Tevriçci (2015), yaptıkları çalışmada çimento yerine farklı oranlarda metakaolin ikame ederek harç örneklerinin mekanik ve bazı durabilite özelliklerini

incelemişlerdir. Deneysel çalışma ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemine uygun gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çimento yerine ağırlıkça %0, %2,5, %5, %7,5, %10, %12,5, %15 ve %20 oranında metakaolin ikame edilmiştir. Metakaolin ikameli tüm numuneler Kanada Standardına göre tehlike sınırı olan %0,15 değeri altında genleşme göstermiştir. %20 oranında metakaolin ikameli numunenin en düşük genleşme değeri gösterdiği ifade edilmiştir. Çalışmada ikame edilen metakaolin oranı arttıkça alkali-silika genleşmesinin azaldığı, özellikle %15-%20 oranında genleşme değeri sınır değer oldukça altında kaldığı vurgulanmıştır. Bu durumun sebebi olarak metakaolin ikame oranı arttıkça geçirimsizliğin azalmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Dinçdemir (2015), çalışmasında mineral katkıların ve kimyasal katkıların alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneysel çalışmalar ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemine uygun gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çimento yerine %5, %10 ve %15 oranında metakaolin ikame edilmiştir. %5 oranında ikame edilen metakaolinin alkali-silika reaksiyonu genleşmesinde önemli azalmalar sağlamadığı buna karşın %15 oranında metakaolin ikamesi genleşmeyi sınır değer oldukça altına indirdiğini belirtmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan mineral katkıların ve kimyasal katkıların alkali-silika reaksiyonu genleşmesinde etkili olduğu ve kullanılan katkıların ikame oranı arttıkça genleşmeyi azaltmada daha etkili olduklarını ifade etmektedir.

Nayır (2015), yaptığı çalışmada iki farklı agrega kullanarak farklı oranlarda çimentoya ikame edilen mineral katkıların alkali-silika reaksiyonu genleşmesi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneysel çalışmalar ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemine uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan agregaların alkali-silika reaktifliği açısından taş ocağı agregası zararlı, dere agregası potansiyel zararlı olarak belirlenmiştir. Taş ocağı agregası kullanarak çimentoya %5, %10 ve %15 oranında, dere agregası kullanarak %5, %7,5 ve %10 oranında metakaolin ikame edilmiştir. Metakaolin katkı kullanımı taş ocağı agregasında genleşme yüzdeleri %5 oranında %0,1589, %10 oranında %0,0884 ve %15 oranında %0,0390 olarak hesaplanmıştır. Dere agregasında %5 oranında genleşme %0,0945, %7,5 oranında %0,0806 ve %10 oranında %0,0691 olarak hesaplanmıştır. Kullanılan her iki agrega için metakaolin ikame oranındaki artışın alkali-silika reaksiyonuna ait genleşme değerini azalttığı belirtilmiştir.

Erdoğdu ve diğeri (2016), yaptıkları çalışmada mineral katkı olarak metakaolin ve silis dumanı kullanarak ikili ve üçlü karışımların alkali-silika reaksiyonu genleşme

değerlerini azaltmadaki etkinliğini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemine uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Çimentoya %5 ve %10 oranında metakaolin ikame edilmiştir. Çalışmalar sonucunda %5 oranında metakaolin ikamesi genleşmeyi %27, %10 metakaolin ikamesi genleşme değerini %60 azalttığı gözlemlenmiştir. %5 metakaolin ikamesinin alkali-silika reaksiyon genleşme değerini ilgili standartta belirtilen sınır değer altına indirmekte başarılı değilken %10 oranında metakaolin kullanımının genleşmeyi sınır değer altına indirmekte başarılı olduğu belirtilmiştir.

Çalışmada çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranında ikame edilen metakaolinin alkali-silika reaksiyonu kaynaklı genleşmeyi kontrol altına almadaki etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında Doğu Karadeniz Bölgesinde dört farklı yöreden (Trabzon-Yomra, Giresun-Tirebolu, Artvin-Murgul ve Artvin-Şavşat) temin edilen agregaların reaktiflikleri belirlenmiştir. Bu agregalardan en reaktif olan Artvin-Şavşat yöresi agregası belirlenen amaç kapsamında değerlendirilmiştir.

#### 1.4. Alkali-Silika Reaksiyonu

Alkali-silika reaksiyonu özellikle nemli ortamlara maruz betonarme yapılarda hasara neden olan oldukça karmaşık kimyasal bir süreçtir. Çimento bünyesinde bulunan alkali oksitlerin ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) reaktif silis içeren agregalarla reaksiyona girmesi sonucu bir jel oluşur. Oluşan jel ortamda nem olması durumunda bu nemi alarak şişer ve beton genişir. Genleşmeye bağlı olarak meydana gelen çekme gerilmeleri betonun çekme dayanımı aşması sonucu beton çatlar. Başlangıçta agreganın etrafında başlayan çatlaklar zamanla beton içerisine doğru ilerler.

Alkali-silika sürecinin gerçekleşebilmesi için ilk olarak agreganın reaktif silis içermesi, ortamın yeterli düzeyde alkali içermesi, ortamda nemin bulunması gerekir. Bu unsurlardan herhangi birinin olmaması halinde betonda alkali-silika reaksiyonu sebebiyle genleşme oluşmaz. Alkali-silika reaksiyonu sebebiyle oluşan genleşme iki aşamada meydana gelmektedir (Baradan vd., 2012).

1. Alkali + Reaktif silika  $\rightarrow$  Alkali-silika jeli
2. Alkali-silika jeli + Nem  $\rightarrow$  Genleşme

Beton içerisinde çekme gerilmelerinin meydana gelmesi alkali-silika jeli oluşumu ile aynı anda gerçekleşmez. Bu nedenle jel oluşumu kesinlikle alkali-silika reaksiyonu hasar oluşturacağı anlamına gelmez (Aşık vd., 2004).

Alkali-silika reaksiyonunun ilk aşamasında meydana gelen jelin ilerleyen aşamada ortamdaki su emmek suretiyle hacmini attırarak, çimento hamuru ve agregada mikro çatlak oluşumuna yol açabileceği ifade edilmektedir. Mikro çatlaklarda ilerleyen jelin zamanla arttığı ve betonda çatlak oluşumuna, mukavemet kaybına sebebiyet verdiği belirtilmektedir. Alkali-silika reaksiyonunun ağır ilerleyen bir reaksiyon olması sebebiyle, genişlemenin neden olduğu, beton içerisinde oluşan çatlakların belirginleşmesi uzun zaman almaktadır (Neville, 1981).

Alkali-silika reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için gerekli alkali miktarı Denklem 1'de eşdeğer alkali miktarı olarak hesaplanan %0,60'ın üzerinde olması gerekir. Portland çimentosu için toplam eşdeğer alkali miktarı sodyum oksit eşdeğeri cinsinden Denklem 1'deki gibi hesaplanmaktadır.



Çimentoda mevcut sodyum oksit ve potasyum oksit gibi alkaliler çimentonun hammaddelerinden kaynaklanır. Betonda bulunan alkaliler çimento haricinde agrega, karışım suyu, zemin suyu, mineral katkıları, kimyasal katkıları ve endüstriyel atıklarından kaynaklanabilir (Nayır, 2015)

Genellikle çimento ve çimentomsu malzemelerin alkaliliği dikkate alınmaktadır. Fakat beton içerisine eklenen kimyasal ve mineral katkıları mevcutsa eklenen alkali miktarı da dikkate alınır. Betondaki alkali yalnızca çimentodan kaynaklanıyor ise alkali miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Nayır, 2015).

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

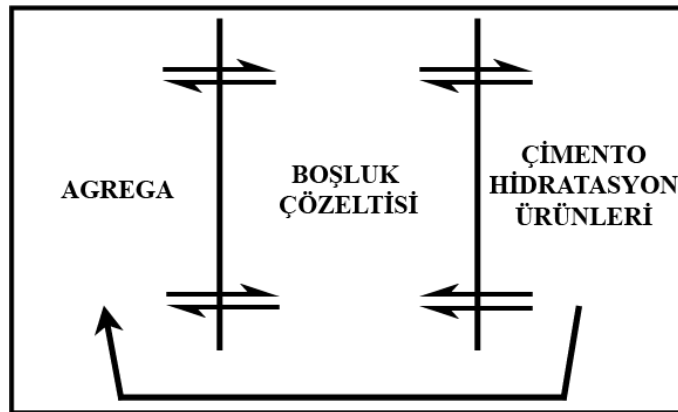
Kanada standardında betonun toplam alkali miktarı 1.7 ila 3 kg/m<sup>3</sup> olarak sınırlandırılırken, Amerika Birleşik Devletleri standardı alkali miktarını sınırlandırmak yerine düşük alkali içerikli çimento kullanmayı önermektedir.

## 1.4.1. Alkali-Silika Reaksiyonu Kimyası

### 1.4.1.1. Boşluk Çözeltisi Kimyası

Çimento hidratasyonunun ilk aşamasında sıvı faz, katı faz etrafında sürekliliğe sahiptir ve katı faza göre daha baskındır. Başka bir ifade ile sıvı fazın katı fazı ıslattığı söylenebilir. Ancak hidratasyon ilerledikçe hidratasyon ürünleri meydana gelmeye başlar; sıvı faz azalarak yerini C-H ve C-S-H gibi hidratasyon ürünlerine bırakır. Bunun neticesinde sıvı faz sürekliliği azalmış olur. Çimento hamurunun boşluklu bir yapıda olması sıvı fazın boşluk çözeltisi içerisinde kendine yer bulmasını sağlar. Portland çimentosunun hidratasyonu neticesinde meydana gelen boşluk çözeltisinde kalsiyum ( $\text{Ca}^+$ ), potasyum ( $\text{K}^+$ ), sodyum ( $\text{Na}^+$ ) ve hidroksil ( $\text{OH}^-$ ) iyonları mevcuttur. Potasyum, sodyum ve hidroksil iyonlarının boşluk suyu içerisindeki konsantrasyonunu hidrate olmamış çimento miktarı etkiler. Boşluk suyu pH değeri alkali içeriği düşük çimentoyla üretilen betonda 12,7 ila 13,1 arasında, alkali içeriği yüksek çimentoyla üretilen betonda ise 13,5 ila 13,9 arasında değişmektedir. Alkali içeriği düşük ve yüksek olan çimentoların pH değerleri arasında bulunan 1,0 birimlik fark hidroksil iyonu konsantrasyonunun 10 kat artmasına neden olur. Betonun boşluk suyunda bulunan yüksek hidroksil iyonu konsantrasyonu reaktif agrega üzerinde zararlı etki gösterir (Hobbs, 1988).

Alkali-silika reaksiyonunda hidratasyon ürünleri ve agrega taneleri ile yakın temasta olması ve iyon taşınımında asıl etken olarak bulunması sebebiyle boşluk çözeltisi önemlidir. Şekil 1'de iyon taşınımı ve taşınım yönü verilmektedir (Glasser, 1992).

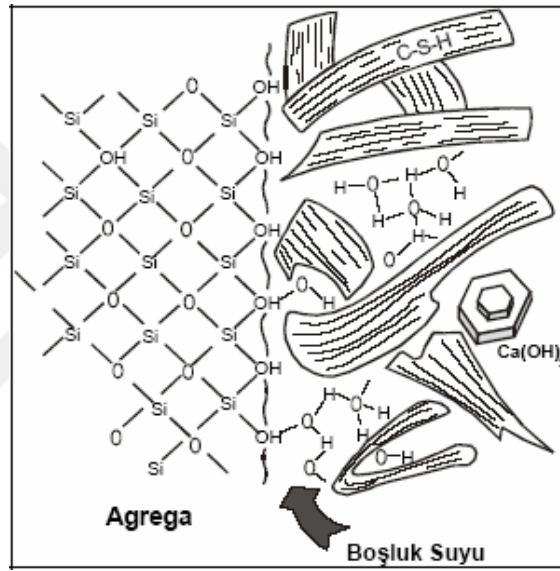


Şekil 1. İyapıda iyon taşınımı ve taşınım yönü (Glasser, 1992).

### 1.4.1.2. Alkali-Silika Reaksiyonu Oluşum Mekanizması

Çimentonun hidratasyonu sonucunda meydana gelen katı ürünler C-S-H ve C-H yapısındadır. Hidratasyon ürünleri çimento hamurunda bulunan bütün boşlukları dolduramamaktadır. Mezo ve mikro boşluklar gibi çimento hamurunda büyük boşluk hacmi kalmaktadır. Mezo boşluklar su moleküller ile (H-O-H) doludur fakat mikro boşluklar görülmemektedir (Glasser, 1992).

Agrega yüzeyiyle temas eden boşluk çözeltisi Şekil 2’de şematik olarak verilmektedir.



Şekil 2. Agreganın yüzeyiyle temas eden boşluk çözeltisi (Glasser, 1992).

Alkali-silika reaksiyonu sırasıyla reaktif silisin çözünmesi, alkali-silika jelinin meydana gelmesi ve alkali-silika jelinin su emerek genişmesi şeklinde gerçekleşmektedir.

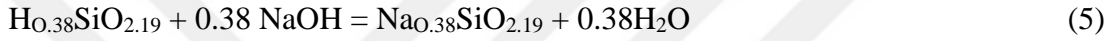
Reaktif silisin çözünmesi hidroksil iyonlarının (OH<sup>-</sup>) etkisiyle iki aşamada gerçekleşir. Betonda mevcut hidroksil iyonları sadece Ca(OH)<sub>2</sub> ile değil, KOH ve NaOH aracılığıyla da sağlanır. İlk aşamada silisin hidrolizi neticesinde uç kısımları OH iyonlarına dönüşür ve çözünür hale gelir. Bu aşamada silisin yapısı değişerek Si’ler birbirlerine OH iyonları vasıtasıyla bağlanır. Bu yapı silanol (≡ Si-OH) olarak bilinir ve Denklem 3’te verilmektedir.



Opal gibi su içeren silisli agregaların yapısında hali hazırda çokça silanol bağı bulunur. Silanol bağları asidik karakterlidir ve bazik olan boşluk çözeltisiyle reaksiyon yapmaya hazırdır. Denklem 4'te verildiği gibi silanol grupları OH<sup>-</sup> iyonlarının ikinci saldırısıyla tekrar çözülmeye uğrar; silanol grubu ortama H<sub>2</sub>O molekülü verir. Silanol ≡SiO yapısına dönüşerek su içerisinde dağılır.



Negatif yüklü SiO<sup>-</sup> iyonları, pozitif yüklü kalsiyum, potasyum ve sodyum iyonlarını jel içerisine çekerek dengeyi kurmasını sağlar.



Denklem 5'teki reaksiyonun iyon dengesi Na<sub>2</sub>O yardımıyla kurulur. Bu reaksiyona diğer katyonların da katılmasıyla Denklem 6'da verildiği üzere daha fazla siloksan Si-O-Si yapısı zarar görür (Glasser, 1992).

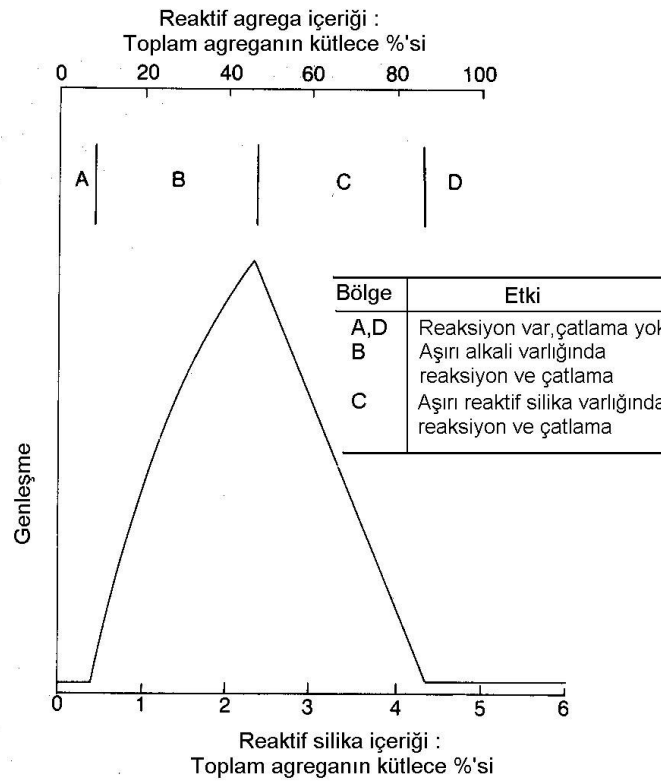


Son aşamada oluşan jelin su emmesi sonucunda genişleme meydana gelir. Alkali-silika jelinin genişmesi reaksiyon bölgesi etrafında mikro çatlakların oluşmasına neden olur. Mikro çatlaklar zamanla birleşerek çoğalır ve beton yapısını bozarak hasara neden olur. Bazı durumlarda oluşan bu çatlaklardan beton içerisine giren tehlikeli maddeler mevcut hasarı artırır. Hidrate olmuş alkali-silika jeline ilerleyen su vasıtasıyla taşınan sülfat iyonlarının etrenjit oluşum ve gelişimini etkilediği düşünülmektedir (Swamy, 1992).

Çatlaklarda var olan alkali çözeltinin difüzyonu, silikanın çözünme hızını etkiler. İyon türü ve iyonik yoğunluk çözünme hızını yönetir. Çünkü taneciklerin içine nüfus eden sıvı hidroksil iyonlu katyonları taşır ve taşınan katyonların iyonik yarıçapları difüzyonu kısıtlayabilir. Bu sebeple iyonik yarıçapı küçük olan potasyum katyonlarının difüzyon hızı fazla olur. Benzer nedenle daha büyük iyonik yarıçaplı lityum tuzları hidroksil difüzyonunun bazı yerlerde oluşmasını engellemesi sayesinde alkali-silika reaksiyonunu önleyici karışım olarak kullanılmaktadır (Akman, 2000).

### 1.4.1.3. Pesimum Oran

Alkali-silika reaksiyonu sonucunda betonda maksimum genişleme ve hasar meydana getiren reaktif agrega oranına “pesimum oran” denir. Agregadaki reaktif bileşenlerin bu orandan daha az ya da daha fazla olması halinde genişleme azalır. Reaktif bileşen olarak %5 opal içeren agregaya ait pesimum davranış Şekil 3’te verilmektedir. Pesimum davranış, grafikte A, B, C ve D şeklinde dört bölge ile açıklanmaktadır (Hobbs, 1988).



Şekil 3. Pesimum Davranış (Hobbs, 1988)

**A Bölgesi:** Reaktif silis miktarı bu bölgede düşüktür. Betonun sertleşmesinden sonra meydana gelen alkali-silika jeli genişmesi çatlama sebepleri olacak yoğunlukta değildir.

**B Bölgesi:** Reaksiyon betonun sertleşmesinden sonra da sürmektedir. Reaksiyon şiddeti çatlama sebepleri olacak büyüklüktedir. Reaktif silisin tümü tükendiğinde ya da reaksiyon düzeyi yeteri kadar azaldığında genişleme durur. Bölgenin alkali miktarı çok fazladır. Reaksiyon ürünlerinin bileşimi büyük olasılıkla alkali/reaktif silis değerinden bağımsız gerçekleşir.

**C Bölgesi:** Reaksiyon betonun sertleşmesinden sonra da devam eder ve çatlaklar meydana gelir. Boşluk suyunda bulunan alkali miktarı çok azaldığında veya alkalilerin hepsi tükendiğinden reaksiyon durur. Bu bölgede mevcut reaktif silis miktarı oldukça yüksektir. Alkali/silis oranının azalmasıyla reaksiyon ürünlerinin alkali/silis oranı ve su emme yüzdesi azalır.

**D Bölgesi:** Reaktif silis miktarı bu bölgede çok yüksektir ve reaksiyon hızlı şekilde gerçekleşir. Bu sebeple beton sertleştikten sonra meydana gelen jel miktarı çatlama neden olmayacak kadar azdır. Betonda hasar meydana getirmeyen çok miktarda jel oluşabilir.

Maksimum genişleme durumunda mevcut reaktif silis tüm alkalileri tüketebilir ya da alkali konsantrasyonunu çok düşük seviyelere indirebilir (Tosun, 2001).

Pesimum oranı grafiğindeki eğrinin şekli çimento türünden, bileşiminden ve miktarından, alkali miktarından ve agrega özelliklerinden etkilenmektedir (Binal, 2004).

#### **1.4.2. Alkali-Silika Reaksiyonu Ürünleri**

Alkali-silika reaksiyonu ürünleri, reaktif silisin türüne, reaksiyon sıcaklığına, reaksiyon ürünlerin konsantrasyonuna ve boşluk çözeltisinin bileşimine göre farklılık göstermektedir. Alkali-silika reaksiyonu ürünleriyle ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen veriler yardımıyla reaksiyon ürünleri jeller ve kristaller olarak iki grupta tanımlanmaktadır. Jeller masif ya da süngerimsi şeklinde tanımlanır. Kuruma anındaki büzülme tipi veya miktarına bağlı olarak ya da farklı bileşimdeki jeller, jelin görünümünü etkilemektedir. Kristal ürünler katmanlı, çubuksu ve yapraksı şekilde özgün morfolojilere sahiptir. Hızlandırılmış harç çubuk deneyine göre kür gören harçlarda meydana gelen reaksiyon ürünleri ile gerçek yapılarda oluşan alkali-silika reaksiyonu ürünleri kimyasal ve morfolojik açıdan birbirlerine benzemektedir (Moranville-Regourd, 1989).

### 1.4.3. Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkiyen Faktörler

#### 1.4.3.1. Agreganın Reaktifliği ve Tane Büyüklüğü

Alkali-silika reaksiyonunun oluşabilmesi için betonda reaktif silisin herhangi bir formunun mevcut olması gerekir. Silisli bir agreganın reaktifliğini silisin morfolojisi belirler. Reaktif silis, farklı doku ve kristal yapı özellikleri gösterir. Soğuma hızına bağlı olarak kayaç oluşum sürecinde silisin dokusu farklılaşır. Agregada mevcut silisli mineraller soğuma hızına bağlı olarak kayaçlaşma sürecinde amorf veya camsı (kristalleşmemiş) yapıdan kripto kristal, mikro kristal ve kristal yapıya kadar büyük bir aralıktadır. Bazı hallerde kuvars kristallerinin oluşumunda içsel gerilmeler meydana gelir. Bu tarz kuvars mineralleri barındıran agregalar reaktif sınıfta yer almaktadır. Tablo 1’de reaktivlik düzeylerine göre mineraller ve kayaçlar verilmektedir (Ramyar vd., 2002).

Tablo 1. Reaktivlikte azalmaya göre mineraller ve kayaçlar

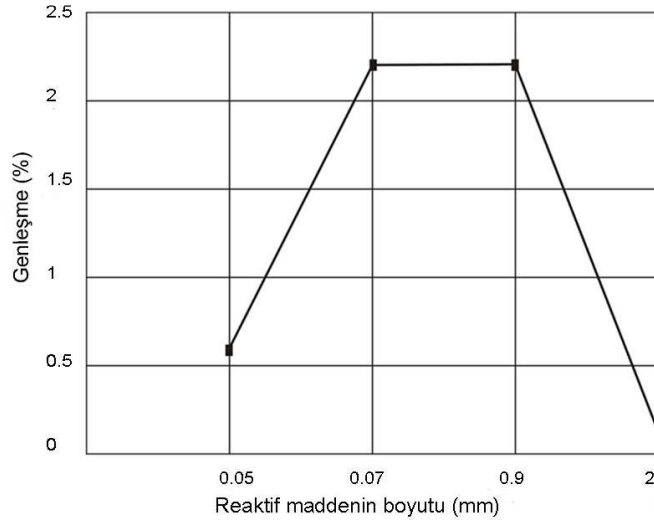
<b>Silis mineralleri</b>	<b>Kayaçlar</b>
Amorf silis	Tüfler dâhil volkanik camlar
Opal	Metakuvarsit, metamorfize kumtaşları
Stabil olmayan kristalin silis	Granitik gnayslar
Çört	Deforme olmuş granitik gnayslar
Kalsedon	Diğer silis içeren metamorfik kayaçlar
Silisin diğer kriptokristalin formları	Silisli 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 içerisinde bulunan reaktif madde miktarı beton genişmesini hangi değerlerde tehlikeli seviyede etkileyeceğini belirlemek amacıyla farklı çalışmalar yapılmıştır. Agregada

içindeki opalin %3-5 oranında değişmesi durumunda beton genişmesinin azami değere ulaştığı ancak %20 den fazla opal bulunması durumunda agregada genişme olmadığı gözlemlenmiştir. Yüksek miktarlarda silis içeren ortamlarda reaksiyon genişmesinin az olması, mevcut alkalinin, fazla miktarda bulunan reaktif silis ile reaksiyon yapmaya yetmediği şeklinde ifade edilmektedir. Ortamda bulunan alkali, yüksek miktarda olan silisin tamamı ile reaksiyon yapmaya yetmemektedir (Yalçın ve Özalp, 1974).

Tane büyüklüğü de reaktif agreganın alkali-silika reaksiyonu zararları üzerinde etkilidir. Agreganın maksimum genişme yapabilmesi için uygun boyutta olması gerekmektedir. Büyüklüğü 0,075 ila 1 mm arasında değişen boyutlarda reaktif agreganın kullanılması halinde maksimum genişme görülmektedir. Reaktif agreganın tane boyutu etkisi, agreganın fiziksel ve mineralojik özelliklerine bağlıdır. Bununla birlikte gözeneklilik de alkali-silika reaksiyonu açısından önemlidir. Gözenekliliği fazla olan agreganın içerisinde boşluk çözeltisinin girişi kolaylaşır. Ayrıca gözeneklilik reaksiyon alanını arttırmaktadır (Ramyar vd., 2002).

Agregada mevcut reaktif silis bileşeni boyutunun alkali-agrega genişmesine etkisi Şekil 4'te verilmektedir (Mindness ve Young, 1981).



Şekil 4. Reaktif silis bileşeni büyüklüğünün genişmeye etkisi

Maksimum genişmeye neden olan çimento/agrega oranı agreganın tane boyutu arttıkça azalmaktadır. Agreganın tane boyutu büyüdükçe genişmeler yavaşladığı için tek boyutlu agreganın gradasyonu kullanımının alkali-silika reaksiyonu genişmesini azaltması açısından faydalıdır (Andiç, 2002).

### 1.4.3.2. Betondaki Alkali Miktarı

Alkali-silika reaksiyonunun etkisinin görüldüğü yapıların çoğunda yüksek alkali içerikli çimento kullanıldığı bilinmektedir. Çimento içerisinde çok küçük yüzdeleri olmasına karşın alkalilerin çimento ve beton üzerinde zararlı etkileri vardır. Alkalilerin genellikle hammadde kaynaklı olması sebebiyle uzaklaştırılmaları zordur. Bu nedenle etkilerini iyi bilerek gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir (Hobbs, 1988).

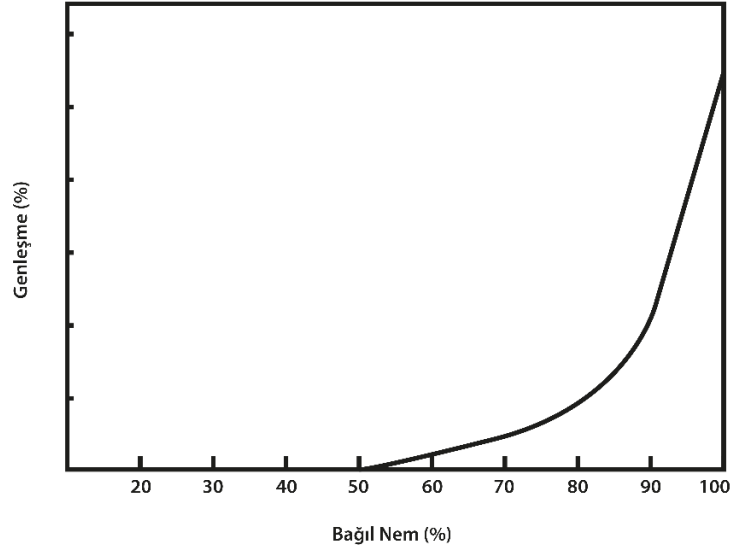
Betonun alkali içeriği arttıkça alkali-silika reaksiyonu potansiyeli de yükselmektedir. Betonun hidroksil iyon konsantrasyonu alkali-silika reaksiyonu için önemli olması sebebiyle çimentonun mevcut alkali içeriği de önemlidir. Kullanılan çimentonun alkaliliğinin değişmesiyle birlikte betonun pH derecesi, hidroksil iyonu konsantrasyonu ve reaktif silis/alkali oranı değişir. Alkali miktarına katkıda bulunan diğer etkenlerin yüzdeleri çok düşük olduğundan genellikle sadece çimento ve çimento özelliği bulunan malzemelerin alkaliliği değerlendirilir (Engin, 2013).

ASTM C 150 standardına göre “eşdeğer  $\text{Na}_2\text{O}$ ” değeri %0,6’dan az olan çimento düşük alkalili çimento olarak adlandırılır. Düşük alkali içerikli çimento kullanılsa bile bazı durumlarda alkali-silika reaksiyonu oluşabilir. Beton içerisinde su veya nemin hareketi neticesinde bazı yerlerde alkali konsantrasyonunun değişmesi, agreganın çok fazla reaktif olması, mineral katkıları, kimyasal katkıları, karışım suyu, agregadan gelen alkaliler ve kullanılan çimento miktarının fazla olması durumunda betonun alkaliliği artabilir (Farny ve Kosmatka, 1997).

### 1.4.3.3. Nem

Alkali-silika reaksiyonunun başlaması ve reaksiyonun devam edebilmesi için ortamda neme ihtiyaç vardır. Nem, silisin çözünmesine, alkali iyonlarının taşınmasına ve reaksiyon ürünü jelin oluşmasına sebep olur. Oluşan jel su emerek şişer ve genişler betonda içsel gerilmelere sebep olur. Buna bağlı olarak alkali-silika reaksiyonu nedeniyle betonda önemli ölçüde hasar meydana gelir. Araştırmalar bağıl nem %80’in üzerinde olan betonlarda alkali-silika reaksiyonu gelişmesinin oluştuğunu göstermektedir (Gillott ve Rogers, 1994).

Şekil 5 bağıl nem ile genleşme arasındaki ilişkiyi vermektedir. Bağıl nem %70'in altına düştüğü durumlarda genleşmeler ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Bağıl nem %80'in üzerine çıktığında genleşme önemli bir artış göstermektedir (Swamy R. N., 1994).



Şekil 5. Bağıl nemin ASR nedeniyle betonda oluşan genleşmeye etkisi

Düşük su/çimento oranı, çimento ilavesi, mineral katkı ya da farklı bir yöntemle beton geçirimsizliği azaltılırsa, betona nem girişi ve nemin beton içerisinde yayılması önlenir.

#### 1.4.3.4.Sıcaklık

Alkali-silika reaksiyonu kimyasal bir reaksiyon olduğu için sıcaklıktan etkilenir. Sıcak iklim koşulları soğuk iklim koşullarına kıyasla alkali-silika reaksiyonu üzerinde daha etkilidir. Sıcaklığın artışı reaksiyon hızını artırmaktadır. Sıcaklık artışı çoğu agregada ısıl gerilmelere sebep olur. Bazı agregalarla gerçekleştirilen deneylerde, 13-20°C aralığında gözlenen genleşme değerlerinin, 38°C'deki genleşmelerden daha küçük olduğu görülmüştür. Düşük ve yüksek sıcaklığın genleşme üzerindeki etkisi agreganın yapısıyla da ilişkilidir. Çoğu agrega sıcaklık arttıkça daha fazla reaktivite göstermektedir (Swamy R. N., 1992).

### **1.4.3.5.Karışım Oranlarının Etkisi**

Karışım oranlarının değiştirilmesi reaktif agrega içeren betonun birçok özelliğini etkiler. Betonda karışım oranlarının değiştirilmesiyle hidroksil iyonu konsantrasyonu, alkali içeriği, reaktif agrega miktarı, betonun dayanımı ve dayanıklılığı değiştirilebilir. Su/çimento oranını düşük tutmak suretiyle beton daha boşluksuz ve daha geçirimsiz üretilebilir. Bu durumda dışarıdan beton içerisine su ve alkali girişi ve hidroksil iyonlarının beton içerisindeki hareketi sınırlandırılarak alkali-silika reaksiyonu gelişimi önlenebilir (Baradan vd., 2010).

### **1.4.3.6.Sürüklenmiş Havanın Etkisi**

Reaktif agrega içermesine rağmen alkali-silika reaksiyonu nedeniyle hasara uğramamış yapılar incelendiğinde alkali-silika jelinin hava boşluklarının bir kısmını ya da tamamını doldurduğu görülmüştür. Bu sebeple alkali-silika jelinin zarar görmemiş beton içerisinde hava boşluklarında ilerlediği ve hava sürükleyici kimyasal katkıların alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşan hasarı engelleyebildiği söylenir (Ramyar vd., 2002).

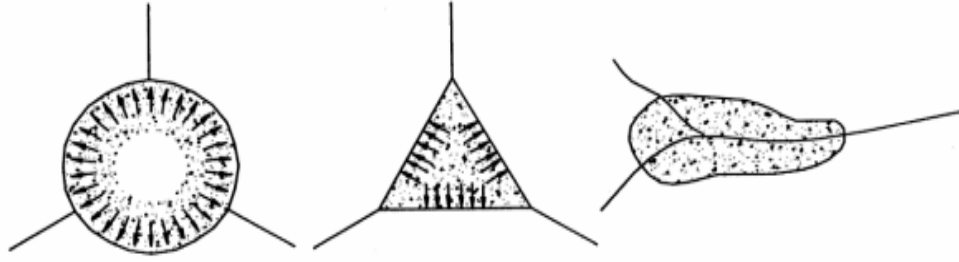
## **1.4.4. Alkali Silika Reaksiyonu Belirtileri**

Alkali-silika ürünleri oluşmadıkça reaksiyonun hasarından söz edilemez. Alkali-silika reaksiyonu sonucu genleşme ve çatlama, parça atma, yüzeysel tortu, yer değiştirmeler ve renk değişimi gibi belirtiler görülür. Alkali-silika reaksiyonu varlığının en bilindik örneği genleşme sonucu meydana gelen çatlak gelişimidir.

### **1.4.4.1.Genleşme ve Çatlama**

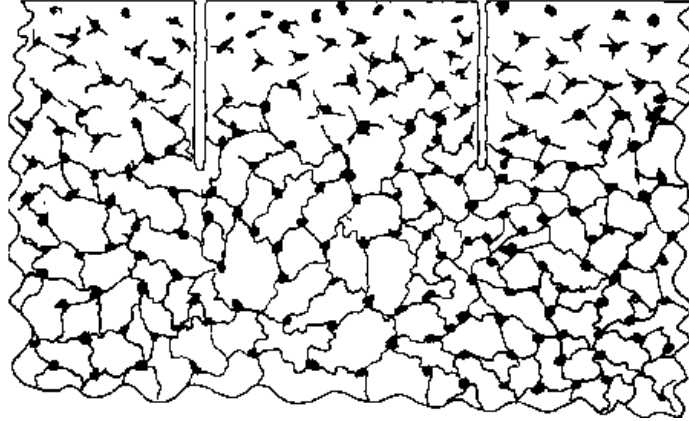
Alkali-silika reaksiyonu kaynaklı genleşme reaktif agreganın içinde veya çevresinde oluşan jelin su emmesiyle başlar. Su emen alkali-silika jeli her yönde basınç gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmeler sonucunda agrega etrafında bulunan çimento hamurunda meydana gelen çatlak sayısı en az üçtür ve çoğunlukla bu çatlaklar birbirleriyle 120° açı yapar. Agreganın çevresinden başlayarak yayılan bu çatlaklar üç-dört kollu yıldız şeklindedir (Şekil 6).

Çatlakların birleşmesiyle zorlanmamış ve donatısız betonda klasik harita çatlağı oluşur, zorlanmanın söz konusu olduğu yapılarda çatlaklar gerilme yönünde ilerler. Betonarme yapıda donatılar ana gerilmeye paralel olduğundan alkali-silika reaksiyonu çatlakları da bu yönde oluşur (Karakaş, 2013; Baradan vd., 2012).



Şekil 6. Alkali-silika reaksiyonu sebebiyle oluşan çatlaklara ait görünüşler

Alkali-silika reaksiyonu neticesinde beton yüzeyinde 0,1 ila 10 mm genişlikte makro çatlaklar oluşabilir ve bu çatlakların derinliği 25-50 mm olabilir. Mikro ve makro çatlak modeli Şekil 7’de gösterilmektedir (Hobbs, 1988).



Şekil 7. Alkali-silika reaksiyonu mikro ve makro çatlak modeli

#### 1.4.4.2. Yüzey Birikintileri

Alkali-silika jeli ya da kalsiyum karbonat tortuları betonda çatlaklar boyunca beyaz ve gri gibi farklı renklerde görülebilir. Birikintiler yüzey tortuları veya salgıları olarak bilinir.

Çatlaklardan dışarıya çıkan bu maddeler renksiz, sarımtırak ya da beyaz, akışkan, mumsu, viskoz, elastik yapışkan veya sert olabilirler. Şekil 8’de çatlaklardan dışarı çıkan yüzey tortular gösterilmektedir (Farny ve Kosmatka, 1997).

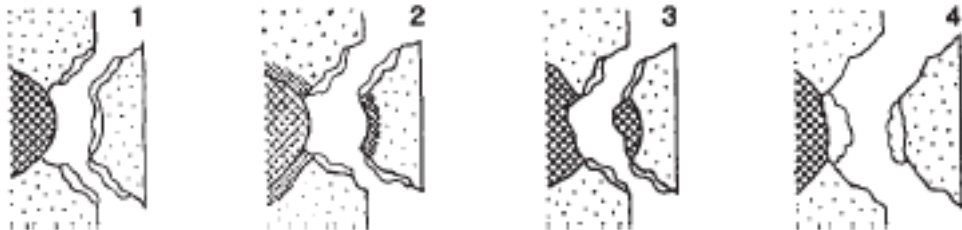


Şekil 8. Çatlaklardan sızan yüzeyel tortular

#### 1.4.4.3. Parça Atma

Parça atma, betonda yüzeye yakın jelin genişmesiyle ya da agrega tanesinin genişmesi neticesinde yüzeyden konik şeklindeki parçanın atılması olayıdır.

Şekil 9’da parça atma oluşumu görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere parça atma 4 farklı evrede oluşmaktadır: (1) agrega ve agregaya bitişik harç arasında aderans azalması, (2) agreganın harçtan ayrılması, (3) reaksiyon halkası oluşmadan agregada kırılmanın gerçekleşmesi ve (4) agrega yüzeyinde oluşan jelin şişerek üst taraftaki harç katmanını itmesiyle parça atmanın gerçekleşmesi (Poole, 1992).



Şekil 9. Parça atma evreleri

Beton yüzeyinde ya da yüzeye oldukça yakın kısımlarda meydana gelen parçalanmalar yüzeyde küçük çukurlar oluşturur (Şekil 10). Bu tür çukurların varlığı kullanılan agrega hakkında önemli bilgiler verir. Bu tipteki kopmalar ya da parçalanmalar, çoğunlukla yüzey düzgünlük sorunudur ve ciddi sorun yaratmazlar (Farny ve Kosmatka, 1997).



Şekil 10. Parça atma örneği

#### 1.4.4.4. Renk Değişimi

Yüzeyde meydana gelen renklemeler ya da renk kayıpları çoğunlukla harita çatlağı şeklindedir. Koyu renkli ya da kararmış bölgeler çoğunlukla alkali-silika reaksiyonu sebebiyle oluşmaktadır. Bu bölgelerde 2 ila 3 mm genişliğinde renk açılmaları, beyazlaşmalar, pembeleşme ve kahveleşme gözlenebilir (Farny ve Kosmatka, 1997).

### 1.5. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirlemede Kullanılan Deney Yöntemleri

Alkali-silika reaksiyonunu belirlemek amacıyla çeşitli deney yöntemleri kullanılmaktadır. Kullanılan deneysel yöntemler alkali-silika reaksiyonu genişleme özelliğinden faydalanarak yapılanlar ve kimyasal yolla yapılanlar olarak ikiye ayrılır.

ASTM C227 harç çubuk deneyi, ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk deneyi, ASTM C1293 beton prizma deneyi ve ASTM C289 kimyasal yöntem alkali-silika reaksiyonunu belirlemek amacıyla kullanılan en yaygın yöntemlerdir.

### 1.5.1. Harç Çubuk Deneyi (ASTM C227)

Bu metot belli koşullar altında kür gören harç çubuklarının belirli süre sonundaki boy değişimleri ölçülerek çimento-agrega birleşiminin alkaliden kaynaklı genişleme etkilerini tespit etmek amacıyla kullanılır.

Harç çubuk yöntemi ve hızlandırılmış harç çubuk yönteminde aynı şekilde hazırlanan harç çubuk numuneleri kullanılmaktadır.

Harç çubuk deneyinde 8-16, 16-30, 30-50 ve 50-100 No'lu elek serisinden elenen agregalar Tablo 2`de belirtilen oranlarda kullanılır.

Tablo 2. Harç çubuk ve hızlandırılmış harç çubuk yöntemi için agrega karışım oranları

Elek açıklığı, mm		Ağırlıkça, %
Geçen	Kalan	
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

Harç için su/çimento oranı dere agregası ve kırma taş agregaya göre ASTM C 109 standardında uygun şekilde belirlenir. Buna göre harç karışımları için kullanılan karışım miktarları aşağıda Tablo 3`te verilmektedir.

Tablo 3. Harç çubukları için karışım miktarları

Malzeme Türü	Elek Serisi					S/Ç	Su (g)	Çimento (g)
	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100			
	10%	25%	25%	25%	15%			
Dere agregası	100	250	250	250	150	0,45	199,8	444
Kırmetaş agregası	100	250	250	250	150	0,5	222	444

Harç çubuk yönteminde 25×25×285 mm boyutunda kalıplar kullanılarak en az 4 numune üretilir. Harç çubukları su içinde 37.8°C`de küre bırakılır. 14. günden itibaren belirlenen zamanlarda 12 ay ya da daha uzun sürelerde numunelerin boy ölçümü yapılır. ASTM C33 standardı uyarınca reaktif olmayan agregalar için genleşme değeri 6 ay için %0.10 ya da üç ay için %0.05'in altında kalmalıdır. Agreganın reaktifliğindeki farklılıkları değerlendirebilmek amacıyla daha uzun sürelerde genleşme değerleri kaydedilir (Farny ve Kosmatka, 1997).

Harç çubuk yöntemi çimento-agrega bileşimlerinin alkali-silika reaksiyonuna uygun koşullar sağlayıp sağlamadıklarının ölçümünde kullanılır. Agreganın çok yüksek reaktiflikte olmadığı hallerde güvenilir sonuçların alınması bir yıl ya da daha fazla sürebilir. Deney süresinin uzunluğu ve tüm tehlikeli agregaların genleşme değerinin zamanla azalması yöntemin dezavantajıdır (Stark, 1991).

### **1.5.2. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C1260)**

Bu deney yöntemi reaktifliği saptanacak agregalar kullanılarak üretilen harç çubukların yüksek alkalilikte bir çözelti içerisinde yüksek sıcaklıkta boy değişimlerinin ölçümüne dayanır.

İlgili standartta belirtilen gradasyondaki agreganın çimentonun kütleye 2,25 katı kadar kullanılarak S/Ç oranı 0,47 olan bir karışım hazırlanır. Hazırlanan karışım 25×25×285 mm boyutunda kalıplara dökülerek her üretimde üç adet harç çubuğu üretilir. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler numaralandırılır ve başlangıç okumaları alınır. Ardından numuneler saf su içine konularak 80°C sabit sıcaklıkta 24 saat bekletilir. 24 saatin sonra numunelerin boy ölçümleri ( $L_0$ ) alınır. Harç çubukların içine konulacak alkali çözeltisi 900 ml saf suya 40 g sodyum hidroksit eklenerek hazır hale getirilir. Harç çubukları 80°C sabit sıcaklıkta tutulan bu çözelti içine yerleştirilir.

Harç çubuklarının boyca değişimi 3, 7 ve 14. günlerde ölçülerek birim boy değişimleri yüzde olarak hesaplanır. Bu hesaplama için Denklem 7'de verilen bağıntı kullanılmaktadır.

$$\%L = \frac{L_i - L_0}{285} * 100 \quad (7)$$

%L = Yüzde boy değişimi

$L_i$  = Prizmatik çubuğun deney sonundaki boyu (mm)

$L_0$  = Prizmatik çubuğun sıfır okuması (mm)

ASTM C 1260 standardı uyarınca prizmatik çubukların yüzde olarak boy değişimleri değerlendirilmesi:

- 14 gün sonunda boy değişimi %0,10'den küçük olması halinde agrega alkali-silika reaktifliği itibariyle zararsızdır.
- 14 gün sonunda boy değişimi %0,10 ila %0,20 arasındaysa deney süresi artırılarak prizmatik çubukları 28 günlük boy değişimleri belirlenir.
- 14 gün sonunda boy değişimi %0,20'den büyük olması durumunda agrega alkali-silika reaktifliği itibariyle potansiyel zararlıdır.

Hızlandırılmış harç çubuk yönteminde kullanılan yüksek alkali ve yüksek sıcak ortam nedeniyle alkali-silika reaksiyonu geçmişi olmayan agregaların test sonuçlarına göre reaktif oldukları gözlenebilir. Bu sebeple agreganın potansiyel reaktifliğinin belirlenmesinde diğer testlerle birlikte kullanılmalıdır. Hızlandırılmış harç çubuk deneyi reaksiyon hızı düşük olan ve harç çubuk deneyi ile reaktiflikleri belirlenemeyen agregaların tespit edilmesinde kullanılır (Tosun, 2001).

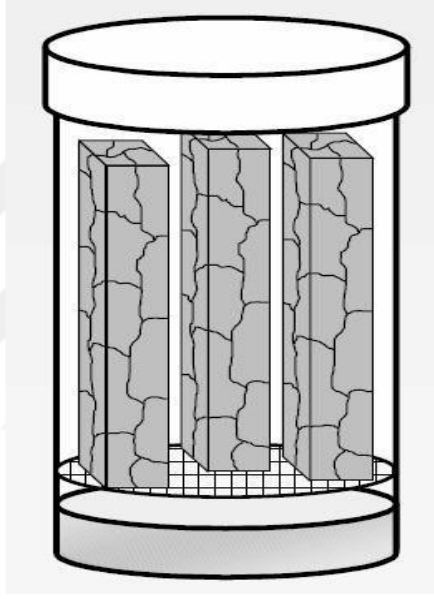
### 1.5.3. Beton Prizma Deneyi (ASTM C1293)

Bu deney yöntemi harç çubukların zamana bağlı genleşmelerinin ölçülmesi ile agrega-çimento bileşiminin alkalilerden kaynaklanan genleşmelere açık olup olmadığını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir.

Beton prizma deneyini harç çubuk deneyinden ayıran en belirgin özellik harç çubuk boyutları ve harç çubuklarını hazırlama aşamasında karma suyuna eklenen NaOH ile karışım alkaliliğinin arttırılmasıdır.

Deney ince agrega için uygulanacaksa reaktif olmayan iri agrega ile karıştırılarak kullanılır. Deney iri agrega için uygulanacaksa reaktif olmayan ince agrega ile karıştırılarak

belirli bir granülometriye getirilir. Üretimde kullanılan çimento miktarı  $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$  olup S/Ç oranı 0,42 ila 0,45 arasında değişir. Çimentonun eşdeğer  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriği karma suyuna eklenen NaOH ile çimentonun kütlece %1.25'ine yükseltilir. Hazırlanan harç karışımı  $75 \times 75 \times 285 \text{ mm}$  boyutundaki prizmatik kalıplara dökülerek üç adet numune üretilir. 24 saat sonunda kalıptan çıkarılan numunelerin boyu ölçülür. Şekil 11'de görüldüğü üzere numuneler alt kısmında yarıya kadar su ile dolu bir haznesi bulunan bir kabın üst kısmına yerleştirilir. Numuneler suya temas etmeyecek şekilde ve %100 bağıl nemin sağlandığı kapalı kap  $38^\circ\text{C}$  sabit sıcaklıktaki etüve yerleştirilir.



Şekil 11. %100 bağıl nemin sağlandığı kap

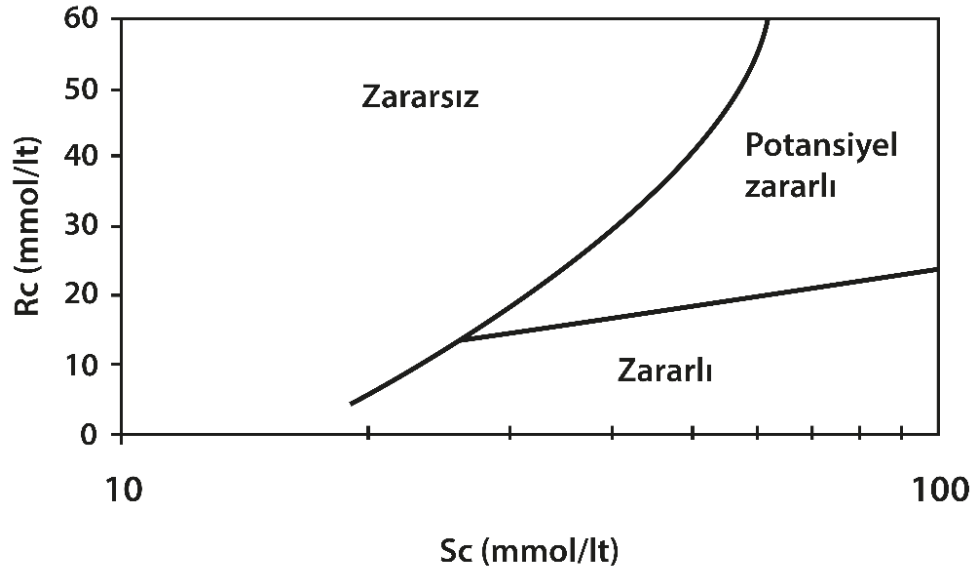
Boy ölçümleri alınmadan önce numuneler 16 saat kapalı saklama kaplarında  $23 \pm 1,7^\circ\text{C}$ 'de kür odasında soğutulur. Soğuma işleminin ardından numunelerin boyu dijital komparatörle 7, 28 ve 56 gün sonunda ve 3, 6, 9, 12. ayın sonunda ölçülür. Gerekli olması halinde her 6 ayda bir numunelerin boyu ölçülerek boy değişimleri kaydedilir. İlgili standarda göre beton prizmaların genişmesi bir yılsonunda %0,04 veya daha fazlaysa agreganın alkali-silika itibariyle potansiyel tehlike arz ettiği kabul edilir.

#### 1.5.4. Kimyasal Yöntem (ASTM C289)

Bu yöntem agregaların potansiyel alkali-silika reaktivliğinin belirlenmesinde kullanılır. Kimyasal yöntem, hızlandırılmış harç çubuk deneyi ile benzerlik gösterir. Her iki deney yönteminde 1 N NaOH alkali ortam hazırlanır. Kimyasal yöntemin farkı agrega reaktivliğini ölçmek için harç çubuğu üretilmeden agreganın doğrudan alkali ortama maruz bırakılmasıdır.

Bu deneyde 300 µm elekten geçen ve 150 µm elek üzerinde kalan agregalar kullanılır. Reaktivliği belirlenecek agrega örneği 150 µm elek üzerinde yıkanarak elenir. Bu şekilde agrega daha küçük boyuttaki parçacıklardan arındırılır. Yıkanan agrega 105±5°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutulur. Hazırlanan agregadan 3 adet 25 gramlık örnek alınarak reaksiyon kabına konur. Her bir kap içerisine 25 ml 1 N NaOH çözeltisi eklenir. İçerisinde yalnızca çözelti bulunan dördüncü kap referans kabı olarak adlandırılır.

Reaksiyon kapları 80±1°C sabit sıcaklıkta 24 saat su banyosunda bekletilir. Banyodan çıkarılan örnekler 30°C sıcaklığa kadar soğutulur ve süzülerek çözelti agrega kalıntılarında arındırılır. Süzüntü homojenliğinin sağlanması amacıyla karıştırılır ve pipet yardımıyla 10 ml çekilerek süzüntü ölçülü bir kaba alınır. Kap içerisindeki süzüntü damıtılmış su ile 200 ml'ye tamamlanır. Elde edilen bu seyreltilmiş çözümden çözünmüş silis (Sc) ve alkalilikteki azalma (Rc) tayin edilir. Deney üç kez tekrarlanır; sonuçlar analiz edilir. Sonuçlar şekil 12'de çizilen eğri üzerinde işaretlenerek çıkarım yapılır. Elde edilen sonuçların tamamı eğrinin sol tarafında yer alıyorsa agrega zararsızdır. Yapılan işaretlemelerden biri dahi eğrinin sağ tarafında bulunuyorsa agrega zararlı kabul edilir. Bununla birlikte sonuçların eğri üzerinde toplanması halinde agregalar potansiyel olarak zararlı olmalarına rağmen alkaliler harç veya betonda nispeten daha düşük genleşmeye sebep olur (TS 2517).



Şekil 12. Alkalideki azalma (Rc)-çözünmüş silis (Sc) ilişkisi

Bu yöntem kullanılarak yüksek reaktifliğe sahip agregalar yeterli doğrulukta saptanırken düşük reaktifliğe sahip agregaların saptanmasında başarısızdır. Ayrıca bazı agregalarda fazla miktarda çözünebilir silis mevcut olmasına rağmen kullanım esnasında sadece küçük genişlemelere neden olur. Bu sebeple bu yöntem her zaman doğru sonuçlar vermemektedir (Stark vd., 1993).

### 1.5.5. Kullanılan Diğer Deney Yöntemleri

#### 1.5.5.1. Jel-Pat Metodu

Bu metot petrografik mikroskop ile incelenmesi mümkün olmayan ince taneli yapıya sahip reaktif silisin gözlemlenmesine imkân sağlar. Reaktifliği ölçülecek agregaya koyu kıvamlı hazırlanmış çimento hamuru içerisine gömülür ve hamur yüzeyi tıraşlanarak agreganın tanelerinin görünür hale getirilir. Hamur alkali çözeltisine batırılır ve belirli aralıklarla stereoskopik mikroskop yardımıyla incelenir. Agregada opal silis bileşenlerinin mevcut olması durumunda birkaç gün içerisinde alkali-silika jeli oluşumları gözlemlenebilir. Deney sonucunda reaktif olabileceği düşünülen agregaya hakkında yeterli kullanım bilgisi bulunmaması halinde beton veya harç çubuk yöntemlerinden birinin yapılması önerilmektedir (Çullu vd., 2010).

### 1.5.5.2. Alman Çözünme Metodu

Bu metot opal ve flint içeren agregaların potansiyel alkali reaktifliklerini belirlemeyi amaçlar. Belirlenen boyuttaki agregalar (1-2 ve 2-4 mm) 90°C’de 4N NaOH çözeltisi içinde 1 saat bekletilir. Daha sonra çözeltiden çıkarılıp kurutulan agrega tartılır. Agreganın kütlesinde meydana gelen kayıp “alkalide çözünebilir” olarak adlandırılır. Metot agreganın alkali ortamda kimyasal kararsızlığını açığa çıkarmakta ancak farklı çimento bileşimleriyle davranışını ve genişleme etkisini belirtmemektedir. Metot 1 mm’den küçük boyutlardaki agreganın potansiyel reaktifliğe etkisini göz ardı etmektedir (Berube ve Fournier, 1992).

### 1.5.5.3. Ozmotik Hücre Metodu

Bu metot agreganın tanesi ile çimento arayüzeyinin modellenmesi esasına dayanmaktadır. Ozmotik hücre iki odacıktan oluşur ve her bir odacıkta 1N NaOH çözeltisi bulunur. Odacıkları S/Ç oranı 0,55 olarak hazırlanan çimento hamuru ayırır. İçinde boyutları 150 ila 300 mm olan 12.40 g agreganın bulunan odacık reaksiyon odası olarak adlandırılır. Diğer odacık havza odacığı olarak adlandırılır ve alkali-silika reaksiyonu oluştuğunda çözelti bu odacıktan reaksiyon odasına doğru akar. Her iki odacığın üst kısmında bulunan ince borulardaki çözelti miktarı değişimi akış miktarının ve hızının ölçülmesine olanak sağlar. Günde 1.5 ila 2.0 mm’lik akış agreganın potansiyel reaktif olduğunu gösterir. Akışın ters yönde olması agreganın reaktif olmadığını gösterir. Deney normal reaktif agreganın için 30 ila 40 gün arasında, hızlı reaktif agreganın için ise 2 ile 3 gün arasında sonuçlanır. Ozmotik hücre metodu agreganın reaktifliğinin hızlı bir şekilde belirlenmesine olanak sağlar. Genleşme deneyleriyle birlikte kullanılması faydalıdır (Varol, 2018).

### 1.5.5.4. Otoklav Metodu

Bazı araştırmacılar beton ya da harç örneklerini yüksek sıcaklık ve basınç altında alkali çözeltisi içerisinde ya da suda kaynatarak veya buhar küresine tabi tutarak agreganın reaktifliğini belirlemek amacıyla yöntemler sunmuşlardır. Bu konuyla ilgili standart bir yöntem bulunmamaktadır. Kullanılan malzeme miktarı, numune boyutu ve kür koşulları gibi

birçok etken değişkenlik göstermektedir. Metodun amacı boydaki değişim ve çatlakları inceleyerek agrega reaktifliğini belirlemektir (Andiç, 2002).

#### **1.5.5.5. Agregaların petrografik analizi (ASTM C295)**

Petrografik analiz kayaçların mineral türü ve yüzdelerine göre sınıflandırılması yöntemidir. Agregadan alınan ince kesitlerin optik mikroskop ile incelenerek agrega içindeki potansiyel reaktif minerallerin belirlenmesi mümkündür. Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını yayılımı (XRD) da reaktif silisin tespit edilmesinde kullanılan yöntemlerdir. Agregalar dışında hasar gören harç ve beton numunelerinden alınan kesitler üzerinden yapılan çalışmalarla da etkinin alkali-silika reaksiyonu sebebiyle olup olmadığı belirlenebilir (Hobbs, 1988).

#### **1.6. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi**

Mineral katkıları kendiliğinden bağlayıcılık özelliği bulunmayan ancak ince öğütüldüklerinde nem etkisinde çimentonun hidratasyonu sonucunda meydana gelen  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyona oluşturularak bağlayıcılık özelliği kazanan, silisli veya silisli alüminli malzemelerdir. Silis dumanı, uçucu kül, metakaolin, yüksek fırın cürufu ve zeolit en çok kullanılan mineral katkı malzemeleridir (Andiç, 2002).

Beton dayanımını ve durabilitesini arttırmak için oldukça etkili olan mineral katkıları alkali-silika reaksiyonu nedeniyle meydana gelebilecek tehlikeli genleşmeleri önlemek amacıyla da kullanılmaktadır. Beton üretiminde mineral katkıların kullanımı ekonomik, teknik ve çevresel birçok fayda sağlamaktadır (Swamy ve Al-Asali, 1989).

Mineral katkıların alkali-silika reaksiyonuna bağlı genleşmeyi azaltma mekanizması hakkında farklı teoriler bulunmaktadır. Ana teorilerden bazıları (Glasser, 1992):

- a. Çimento ile mineral katkı arasında meydana gelen puzolanik reaksiyon çimento harcının daha kesif bir yapıda olmasını sağlar ve harcın geçirimsizliğini azaltır. Geçirimsizliğin azalmasıyla iyon hareketliliği ile dışarıdan betona alkali ve nem girişi azalır. Bu da reaksiyonun oluşum hızını oldukça yavaşlatmaktadır.

- b. Mineral katkıları çimento hamurunda bulunan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  miktarını azaltarak pH değerinin düşmesine neden olmaktadır.
- c. Mineral katkı maddeleri boşluk suyu alkaliliğini azaltır. Meydana gelen C-S-H jeli bünyesinde fazlaca alkali tutma özelliğine sahiptir ve serbest kalan alkali miktarını azaltır.
- d. Mineral katkıları betonun dayanımını artırarak alkali-silika reaksiyonu genişlemeleri sonucu oluşan gerilmelere karşı direnç kazandırır.
- e. Çimentodan daha az reaktif olan mineral katkıları daha yavaş ve daha az alkali açığa çıkarmaları sebebiyle çimento yerine kullanıldıklarında seyreltici görevi yaparlar. Mineral katkılı karışımlar sadece çimentolu karışımlara göre daha yüksek S/Ç oranına sahiptir. Bu durum mineral katkılı karışımların alkali konsantrasyonunun daha da seyrelmesi anlamına gelir.

#### **1.6.1. Uçucu Külün Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi**

Yakıt olarak ya da ısınma amacıyla kullanılmayan düşük kalorili kömür elektrik enerjisi elde etmek amacıyla termik santrallerde yakılarak kullanılır. Ögütülerek inceltelen kömür tozunun santralde yanmasıyla açığa çıkan kül baca filtreleriyle tutularak depolanır. Yanma sonucu depolanan çok ince yapıdaki bu malzeme “uçucu kül” olarak bilinir (Baradan vd., 2012).

Kömürle çalışan termik santrallerin artmasıyla beraber uçucu kül üretimi artmaktadır. Kül üretimi artışının ekonomik, teknik ve ekolojik açıdan birçok olumsuz etkisi bulursa da uçucu külün inşaat sektöründe birçok kullanım alanına sahip olması ekonomik olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır (Baradan B. , 2000).

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller, kimyasal bileşim ve elde edildikleri kömürün cinsine bağlı olarak F ve C sınıfı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu kül %70’den fazla  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriğine sahiptir ve yalnızca puzolanik özellik gösterir. C sınıfı uçucu kül ise %50’den fazla  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriğine sahiptir. Puzolanik ve bağlayıcı özellik gösterir. Kireç miktarı %10’dan fazla olabilir (ASTM C618).

Uçucu külün alkali-silika reaksiyonu genişlemesine etkisi kül ve çimentonun mineralojik ve kimyasal özelliklerine ve agrega reaktifliğine bağlıdır. Bununla ilgili bir

çalışmada reaksiyon hızı düşük agregalar için çimento ile kütlece %20-30 oranında uçucu kül ikame edilerek alkali-silika reaksiyonu genişmesinin azaldığı belirlenmiştir (Karakaş, 2013).

Uçucu kül kullanımının alkali-silika reaksiyonu genişmesini azaltması aşağıdaki gibi açıklanabilir (Tosun, 2001).

- Uçucu kül eklemesiyle beton içindeki suda çözünebilir alkali yoğunluğu azalır.
- Uçucu külün  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyonu boşluk çözeltisi pH değerini düşürerek, silis ve alkaliler arasındaki reaktifliği azaltır.
- Uçucu kül beton geçirimliliğini azaltarak nemin betona girmesini engeller.

### **1.6.2. Silis Dumanının Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi**

Silisyum metalinin ya da ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde kullanılan elektrikli ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin odun ve kömür parçacıklarıyla indirgenmesi neticesinde yan ürün olarak elde edilen ince yapıdaki bu maddeye “silis dumanı” denir. Silis dumanı küresel şekilli kristal olmayan tanelerden oluşan çok ince yapıda ve yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir. Portland çimentosuna göre silis dumanı çok büyük yüzey alanına sahip olup ortalama 100 kat daha incedir (Baradan B. , 2000).

Silis dumanı alkali-silika reaksiyonu genişmesini önlemede etkili bir puzolanik malzemedir. Yoğun ve geçirimsiz bir malzeme oluşturarak betonun geçirimliliğini azaltır. Beton henüz tazeyken silis dumanı alkali-silika reaksiyonunu hızlandırır. Silis dumanı yüzey alanı çok geniş olması sebebiyle alkalilerle hızla reaksiyona girer. Yeterli miktarda silis dumanı kullanılması durumunda beton gereken dayanıma ulaşmadan önce silis dumanı alkaliler ile reaksiyona girerek tükenir. Boşluk suyunda bulunan alkalilerin çoğu ya da tüme beton gereken dayanıma ulaşmadan önce reaksiyonda tüketilirse agregadaki reaktif bileşenler zararlı genişmelere veya çatlamaya neden olmaz (Bobby vd., 2000).

Silis dumanı belirli oranlarda kullanıldığında alkali-silika reaksiyonunun neden olduğu genişmelerde önemli azalmalar gözlemlenmiştir. Yapılan bir çalışmada çimento ile %5 oranında ikame edilen silis dumanının reaksiyon genişmelerini azalttığı ancak yine de genişmelerin tehlikeli kabul edilen değerin üzerinde kaldığı ancak çimento yerine %10 ve

daha fazla oranda silis dumanı kullanıldığında genleşmelerin sınır değerinin altına düşerek tehlikesiz bölgede kaldığı gözlemlenmiştir (Tosun, 2001).

### **1.6.3. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi**

Metal endüstrisinde bir yan ürünü olarak açığa çıkan maddelere “cüruf” denir. Cüruflar metal endüstrisinde kullanılan ana ürünün türüne ve üretim yöntemlerine göre çeşitli özelliklere ve kimyasal içeriğe sahiptirler. Örneğin, bakır ve nikel cürufları sadece puzolanik özelliklere gösterirken, demir-çelik üretiminde açığa çıkan yüksek fırın cürufu kendiliğinden bağlayıcı özelliğe sahiptir (Ün, 2007).

Demir üretimi sırasında yüksek fırınlarda kireçtaşı ya da dolomit mevcudiyetinde erimiş cüruf oluşur. Ergimiş demir potanın dibinde daha az yoğun olan cürufun ise üstte yer alması ayrı ayrı depolanmalarına olanak sağlar. 1500-1600°C sıcaklığında eriyik cürufun %30 ila %40'ını CaO ve %40'ını SiO<sub>2</sub> oluşturur. Bu cürufun içeriği Portland çimentosuna oldukça benzerdir. Yüksek sıcaklıktaki cüruf hızlıca soğutularak camsı bir yapıya dönüşür. Bu camsı yapı öğütüldüğünde puzolanik özellik kazanır. Yüksek fırın cürufu çimento üretimi esnasında kil yerine, beton içerisinde agrega yerine ve kireçtaşı, alçı ve çimento gibi bağlayıcılarla karıştırılarak kullanılmaktadır (Hooton, 2000).

Yüksek fırın cürufunun kullanıldığı betonlarda cürufun inceliği, hapsolan hava oranı, priz süresi ve dayanım kazanma hızı gibi değişkenler alkali-silika reaksiyonu sebebiyle oluşan genleşmeyi etkilemektedir. Yüksek fırın cürufunun hidroksil iyonu konsantrasyonunu azaltmadaki etkisi en önemli özelliğidir (Hobbs, 1988).

### **1.6.4. Metakaolinin Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi**

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin kilinin belirli sıcaklıkta yakılması ve ardından öğütülmesiyle elde edilen yüksek inceliğe sahip reaktif alümino-silikat puzolanıdır (Vu, 2002).

1960'lı yıllarda çimento harcında metakaolinin puzolan olarak kullanımına başlanmıştır. 1990'lı yıllarda sağladığı yüksek dayanım ve durabilite özellikleri sayesinde betonda kullanımı yaygınlaşmıştır. Günümüzde ise Portland çimentosu ve betonda

kullanımına ilaveten yüksek performanslı beton üretiminde de sıklıkla kullanılmaktadır (Siddique, 2008).

Metakaolin saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle elde edilir. Metakaolin beyaz renkli, amorf yapıda bir alümina silikattır. 100-200°C aralığında kil minerallerinde adsorbe edilen su buharlaşmaya başlar. Kaolin kili 500-800°C aralığında suyunun %14'ünü kaybederek metakaoline dönüşür. Bu dönüşüm neticesinde kaolin, alümina ve silika tabakalarındaki kristal yapı düzenini kaybeder. Kaolin yapısı amorf ve kimyasal reaktif hale gelir. Kaolin kilinin 900°C üzerinde sıcaklıkta yakılmasıyla mullit faz oluşur ve reaktiflik özelliği yok olur. Isıl işlemin başarılı şekilde uygulanmasıyla yüksek puzolanik aktiviteye sahip amorf yapılu metakaolin elde edilir (Sun vd., 2005).

Metakaolinin %50-55'ini  $\text{SiO}_2$  ve %40-45'ini  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oluşturur. Bu ek olarak metakaolin eser miktarlarda  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{TiO}_2$  içerir. Metakaolinin çimento ve betonda katkı olarak kullanılması  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriğine bağlıdır. Metakaolin taneleri genellikle 1,5 ila 5,0  $\mu\text{m}$  yarıçapında olup çimento tanelerinden küçüktür (Vu, 2002; Rashad, 2013).

Metakaolin yapısında mevcut silis ve alümin çimento hidratasyonu sonucunda oluşan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girerek C-S-H yapıları ve alümina içeren ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ,  $\text{C}_3\text{AH}_6$ ) ürünler meydana getirir. Puzolanik reaksiyon sonucu ürünlerin oluşması  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  içeriğini azaltarak betonun içyapısını geliştirir. Metakaolinin reaksiyon oluşturma kapasitesi ham kaolinin kaynağına, mineral içeriğine ve üretim koşullarına bağlıdır (Vu, 2002).

Metakaolin katkılı çimentoların kıvamı Portland çimentosuna kıyasla daha katıdır. Metakaolinin inceliği ve yapısı kıvam üzerinde etkilidir. Metakaolinin üretimi esnasında uygulama sıcaklığı ve uygulama süresi metakaolin katkılı çimento harçlarındaki normal kıvam farklılaşmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte metakaolin katkılı çimentoların su ihtiyacı artmaktadır (Li ve Ding, 2003).

Metakaolin kullanımı taze ve sertleşmiş harç ile beton özelliklerinin çoğunu etkiler. Yapılan çalışmalarda uygun oranlarda çimento yerine metakaolin kullanımının betonun mekanik özelliklerini pozitif şekilde etkilediği; permeabilite, kılcal su emme ve klor geçirimsizliğini azaltarak durabilite özelliklerini arttırdığı, çiçeklenmeyi kontrol altına aldığı ve özellikle alkali-silika reaksiyonu üzerinde etkili olduğu rapor edilmektedir. Ayrıca

betonda kuruma rötresi ve sünmeyi azaltıcı etki gösterdiği belirtilmektedir (Brooks ve Johari, 2001; Tosun vd., 2007).

Sabir ve diğerleri, metakaolinin beton dayanımına etkilerini filler etkisi, hidratasyonu hızlandırma ve puzolanik reaksiyon yapması şeklinde değişkenlere bağlamıştır (Sabir vd., 2001).

Metakaolinin mevcudiyeti harçta ve beton içindeki kalsiyum hidroksil yoğunluğunu düşürerek alkali-silika reaksiyonunu azaltır. Metakaolin katkı kullanımının alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisiyle ilgili yapılan bir araştırmada %20 oranında metakaolin ikamesinin boşluk suyu alkali konsantrasyonunu etkili şekilde azalttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte %10-15 oranında metakaolin kullanımının alkali-silika reaksiyonun sebep olduğu genleşmeyi kontrol altına almada yeterli olduğu fakat %5 oranında metakaolin kullanımının genleşmeyi kontrol altında almakta yetersiz olduğu belirtilmiştir (Ramlochan vd., 2000).

### **1.7. Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi**

Alkali-silika reaksiyonunun zararlı etkilerini engellemek amacıyla kimyasal katkıları da kullanılabilir. Kimyasal katkıları silisin çözünmesini azaltabilir ya da durdurabilir, alkali-silika jelinin oluşmasına engel olabilir ve jelin genleşmesini azaltabilirler (Abit, 1998).

McCoy ve Caldwell 1951'de kimyasal katkıları ilgili ilk çalışmaları başlatmışlardır. ASTM C 441 standardı uyarınca lityum tuzları, demir klorid, çinko, laktik asit ve bitkisel yağları birlikte reaktif agrega yerine pyrex camı kullanarak genleşme deneyleri yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçları ışığında genleşmede en iyi azalmanın lityum tuzları ile sağlandığı rapor edilmiştir (Mc Joy ve Caldwell, 1951).

Betonda lityum hidroksit (LiOH) kullanımını OH<sup>-</sup> iyonu konsantrasyonunu yükseltmektedir. Lityum hidroksitin alkali-silika reaksiyonu genleşmelerini azaltıcı etkisinin oluşabilmesi için Li<sup>+</sup> iyonlarının alkali-silika jeli ile yeteri kadar birleşmesi ve bu ters etkisinin karşılanması gerekmektedir. Bu sebeple oluşan alkali-silika reaksiyonu jeli yapısına katılarak tehlikeli genleşmeleri önleyen lityum miktarı pH değerinin yükselmesi nedeniyle oluşan zararlı etkiyi engelleyecek şekilde düzenlenmelidir. Buna ek olarak lityum

iyonlarının bir kısım çimentonun hidratasyonu sırasında hidratasyon ürünleri yapısına katılır. Bu nedenle gereken miktardan daha az LiOH kullanımı ters etki yaratarak genleşmelerin artmasına neden olur (Andiç, 2002; Diamond, 1999).

Kimyasal katkıların etkinliğiyle ilgili yapılan başka bir çalışmada çimento yerine %2 ila %7 oranında baryum tuzlarının kullanılması alkali-silika reaksiyonu genleşmesini azaltmada etkili olduğu belirtilmiştir (Abit, 1998).



## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma kapsamında alkali-silika reaksiyonu nedeniyle betonda meydana gelen genleşmeyi azaltmak amacıyla çimento yerine farklı oranlarda metakaolin ikamesinin etkisi araştırılmıştır. Değerlendirme ASTM C 1260 Hızlandırılmış Harç Çubuk Deney Yöntemi kullanılmıştır.

### 2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

#### 2.1.1. Çimento

Deneysel çalışmada Aşkale Çimento'dan temin edilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ilişkin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Çimentoya ilişkin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	%	32 mikron elekte kalıntı (%)	9,8	
SiO <sub>2</sub>	20,13	90 mikron elekte kalıntı (%)	--	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,77	Özgül yüzey (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	3402	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2	Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3,09	
CaO	63,24	Priz süresi (Vicat) (dk)	Başlangıç	180
MgO	1,69		Bitiş	210
SO <sub>3</sub>	2,78	Su İhtiyacı (%)		28
Na <sub>2</sub> O	0,26	Hacim Genleşmesi (mm)		0
K <sub>2</sub> O	0,91	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	26,5
Cl <sup>-</sup>	0,0113		28 gün	51,7
Çözünmeyen Kalıntı	1,38			
Kızdırma Kaybı	2,87			

### 2.1.2. Agregaya

Çalışmada Artvin-Şavşat yöresinden temin edilen bir agregaya kullanılmıştır. Agregaya ait fiziksel özellikler Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Agreganın fiziksel özellikleri

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

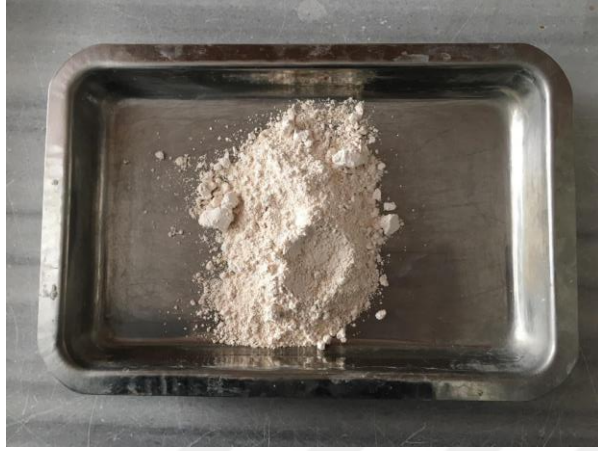
### 2.1.3. Metakaolin

Deneysel çalışmada Aryum Makine Kimya ve Ticaret Limited Şirketinden temin edilen metakaolin kullanılmıştır. Metakaoline ilişkin fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6. Metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler

SiO <sub>2</sub> (%)	54,93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	41,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,0
CaO (%)	0,04
MgO (%)	0,06
Na <sub>2</sub> O (%)	0,0
K <sub>2</sub> O (%)	0,21
SO <sub>3</sub> (%)	0,03
Nem içeriği	0,21
Yanma kaybı	0,08
Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	23,965
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,79

Çalışmada kullanılan metakaolin örneği Şekil 13`te verilmektedir.



Şekil 13. Deneysel çalışmada kullanılan metakaolin örneği

#### 2.1.4. Sodyum Hidroksit (NaOH) Çözeltisi

Hızlandırılmış harç çubuk deneyinde sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Çözelti 900 ml suya 40 g toz halinde sodyum hidroksit eklenerek hazırlanmıştır. Sodyum hidroksit Akçay Kimya Sanayi Medikal Laboratuvarı'ndan temin edilmiş (Şekil 14).



Şekil 14. Çözeltiyi hazırlamada kullanılan sodyum hidroksit

## 2.2. Harç Çubuk Numunelerinin Üretimi

Harç çubuk numuneleri üretimi için agrega No.4, No.8, No.16, No.30, No.50 ve No.100 eleklerden elenmiştir. ASTM C1260 standardınca agrega için öngörülen granülometrik bileşim Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 7. ASTM C 1260’a göre granülometrik bileşim

Elekler	Kullanılan agrega	
	Ağırlıkça (%)	Miktar (gram)
2,36 (No.8)	10	99,0
1,18 (No.16)	25	247,5
0,60 (No.30)	25	247,5
0,30 (No.50)	25	247,5
0,15 (No.100)	15	148,5

Metakaolin içermeyen referans karışımı ilgili standart uyarınca 440 g çimento, 990 g agrega ve S/Ç oranı 0,47 olacak şekilde 206,8 g su kullanılarak hazırlanmıştır. Metakaolin katkılı karışımları için kullanılan malzeme miktarları Tablo 8’de ve malzemelere ait fotoğraf Şekil 15’te verilmektedir. Metakaolin katkılı karışımlar için agrega 990 g ve su 206,8 g olacak şekilde sabit tutulmuştur.

Tablo 8. Harç karışımlarının üretiminde kullanılan malzeme miktarları

Üretimler	Malzeme Miktarları (g)			
	Metakaolin	Çimento	Agrega	Su
Referans üretim	0	440	990	206,8
%5 Metakaolin (%5 M)	22	418		
%10 Metakaolin (%10 M)	44	396		
%15 Metakaolin (%15 M)	66	374		
%20 Metakaolin (%20 M)	88	352		



Şekil 15. Bir karışım için kullanılan malzemeler

Harç çubukları için 25×25×285 mm boyutunda metal prizmatik kalıplar kullanılmıştır. Harç çubuk numunelerin boy değişimini ölçmek için Şekil 16'da görüldüğü üzere kalıplara metal pimler yerleştirilmiştir.



Şekil 16. Prizmatik numune kalıpları

Karıştırma işlemi ASTM C305 standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemi için kullanılan karıştırıcı Şekil 17'de verilmektedir.

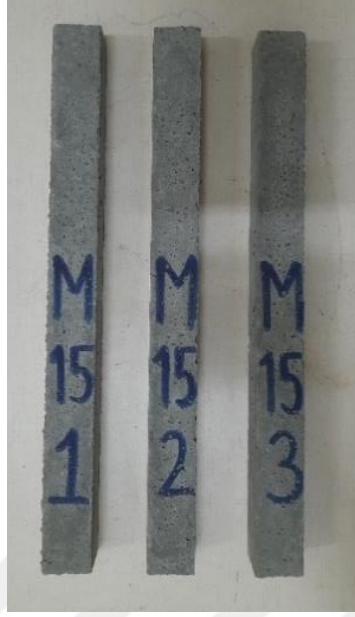


Şekil 17. Harç karıştırıcısı

Şekil 18`de görüldüğü üzere hazırlanan harç karışımlar metal kalıplara iki aşamada doldurulmuş ve sıkıştırılmıştır. Şekil 19`da kalıplarından çıkarılmış numune örnekleri görülmektedir. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler numaralandırılmış ve başlangıç okumaları yapılarak 80°C sıcaklıkta su tankına yerleştirilmiştir. Su tankında 24 saat bekletilen numuneler çıkarılarak ilk boy ölçümleri yapılmıştır. Boy ölçümü için kullanılan aparat Şekil 20`de verilmektedir. Daha sonra harç çubuk numuneler içerisinde 1 N NaOH (900 ml saf su + 40 gram NaOH) çözeltisi bulunan kapalı kaplara konulmuş ve bu kaplar 80°C sıcaklıktaki alkali-silika tankına yerleştirilmiştir (Şekil 21).



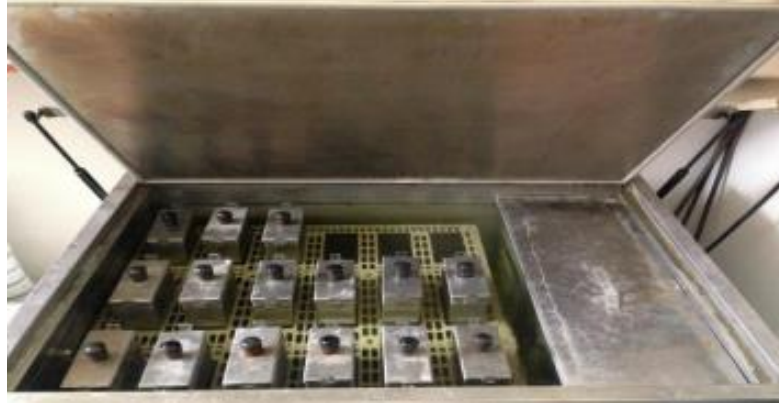
Şekil 18. Prizmatik metal kalıplarda harç çubuk numuneler



Şekil 19. Prizmatik harç numuneler



Şekil 20. Prizmatik numunelerin boy ölçme aparatı



Şekil 21. Alkali-silika deney tankına yerleştirilen numuneler

Alkali-silika tankında tutulan numunelerin boyu 3, 7 ve 14 gün sonunda ölçülmüştür. Bu süreler sonunda prizmatik numunelerin boylarındaki değişim yüzde olarak hesaplanmış ve alkali-silika reaktifliği ilgili standart uyarınca değerlendirilmiştir. İlgili standart ASTM C 1260 uyarınca alkali-silika reaktifliği için yapılan değerlendirme aşağıda Tablo 9 halinde verilmektedir.

Tablo 9. ASTM C1260 standardı uyarınca alkali-silika reaktiflik değerlendirmesi

Genleşme (%)	Yorumlama
< 0.10	Agrega reaktif değildir.
0.10 ila 0.20 arası	Agrega potansiyel olarak reaktiftir.
> 0.20	Agrega reaktiftir.

### 2.3. Agregada Reaktifliğini Belirlemek İçin Yapılan Ön Çalışma

Yapılan çalışmada alkali-silika reaktifliği itibariyle potansiyel zararlı olarak değerlendirilen bir agregaya kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla Doğu Karadeniz Bölgesinde farklı yörelerden dört agregaya temin edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanıma en uygun agregayı tespit etmek amacıyla temin edilen agregalar üzerinde hızlandırılmış harç çubuk deneyi gerçekleştirilmiştir. Agregalara ilişkin ölçülen genleşmeler yüzde olarak Tablo 10'da verilmektedir.

Tablo 10. Farklı ocaklardan temin edilen agregaların genleşme değerleri

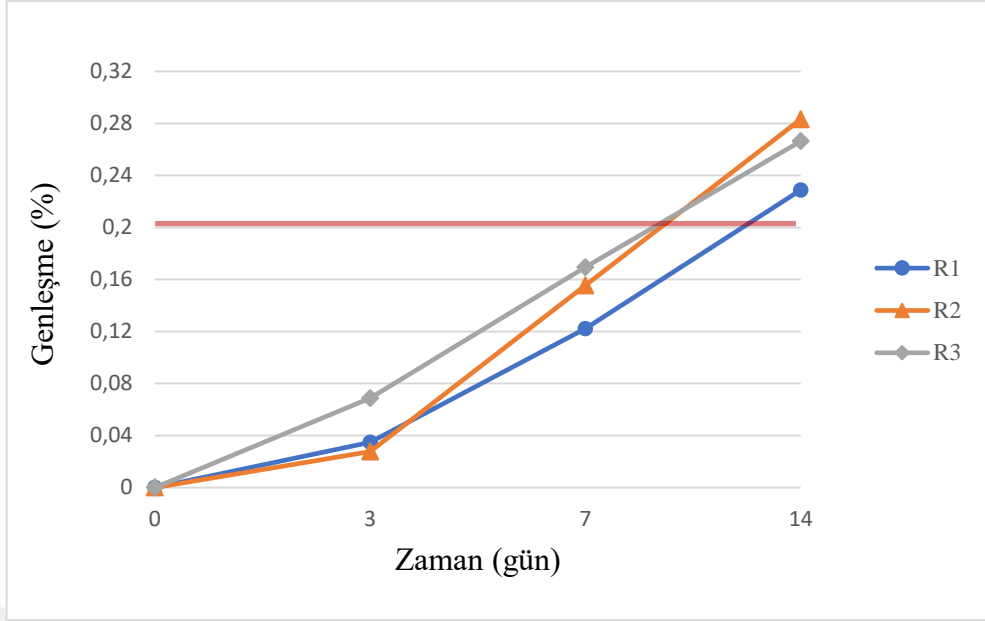
Numune Kodu	Temin Edilen Yöre	14 günlük genleşme (%)
A1	Yomra	0,0786
A2	Harşit Çayı Vadisi-Tirebolu	0,1373
A3	Artvin-Murgul	0,1523
A4	Artvin-Şavşat	0,2594

Agregalar için 14 gün sonunda ölçülen genleşmeler ASTM C 1260 standardı uyarınca değerlendirilmiştir. A1 kodlu agreganın genleşme değeri %0,1'in altında olması sebebiyle zararsız bölgede değerlendirilmektedir. A2 ve A3 kodlu agregaların genleşme değeri %0,1 ila %0,2 arasındadır. İlgili standarda göre bu agregalar ortam koşullarına bağlı olarak hem zararsız hem de zararlı davranış gösterebilir olarak değerlendirilmektedir. A4 kodlu agreganın genleşme değeri sınır değeri olan %0,2'nin üzerinde olması sebebiyle zararlı bölgededir ve reaktif agreganın genleşme değeri olarak değerlendirilmektedir. Yapılan deneyler sonucunda alkali-silika reaktifliği itibarıyla en zararlı agreganın Artvin-Şavşat yöresinden temin edilen A4 kodlu agreganın olduğu tespit edilmiş ve değerlendirmek üzere çalışmada kullanılmasına karar verilmiştir.

A4 kodlu agregaya ait 3, 7 ve 14 günlük genleşme ölçümleri Tablo 11'de ve genleşme-zaman ilişkisi Şekil 22'de verilmektedir. Diğer agregalara ait alkali-silika ölçümleri tezrin ekler bölümünde yer almaktadır.

Tablo 11. A4 kodlu agregaya ait genleşme değerleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3. Gün	7. Gün	14. Gün
1	0,0347	0,1221	0,2288
2	0,0277	0,1554	0,2832
3	0,0688	0,1695	0,2663
Ortalama	0,0437	0,1490	0,2594



Şekil 22. Agregaya ilişkin genleşme-zaman ilişkisi

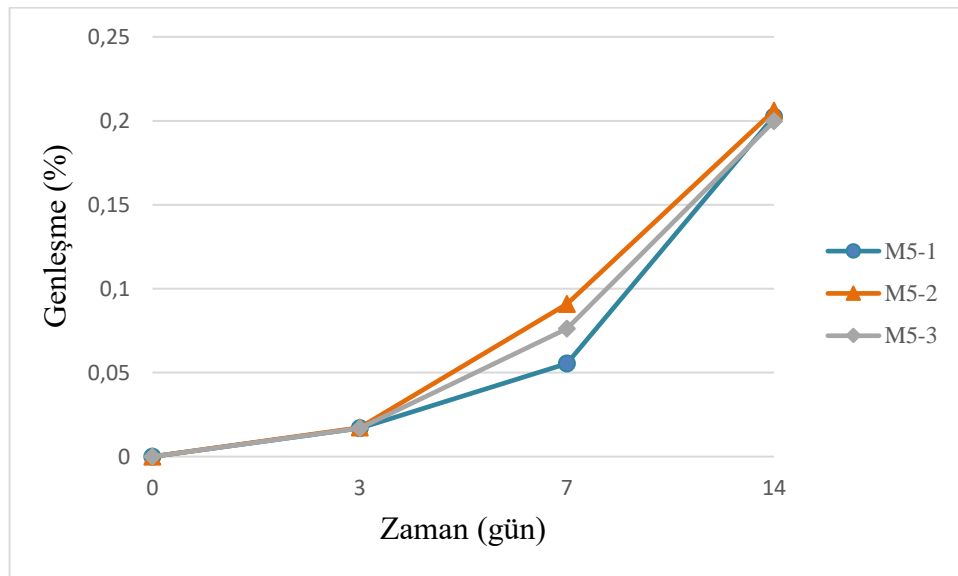
### 3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME

Alkali-silika reaktifliği itibariyle zararlı olarak değerlendirilen Artvin-Şavşat yöresine ait agrega kullanılarak farklı oranlarda metakaolin ikameli harç çubukları üretilmiştir. %5, %10, %15 ve %20 oranında metakaolin ikameli harç çubuk numunelere ilişkin 3, 7 ve 14 gün sonunda belirlenen genleşmeler yüzde olarak hesaplanarak tablolar halinde verilmiştir. Bu ölçümlere ilişkin genleşme-zaman ilişkileri de aşağıda verilmektedir.

%5 metakaolin ikame edilen harç numunelere ilişkin zamana bağlı ölçülen alkali-silika kaynaklı genleşme değerleri Tablo 12'de verilmektedir.

Tablo 12. %5 metakaolin ikameli numunelere ait genleşme değerleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3. Gün	7. Gün	14. Gün
1	0,0168	0,0554	0,2025
2	0,0172	0,0909	0,2060
3	0,0168	0,0761	0,1996
Ortalama	0,0170	0,0742	0,2027



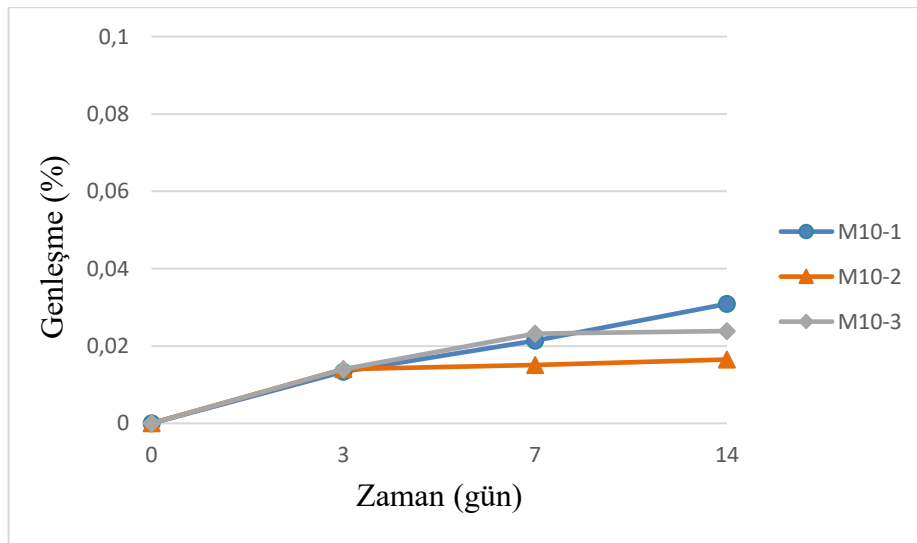
Şekil 23. %5 metakaolin ikameli numunelere ilişkin genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 23'ten görüleceği üzere %5 oranında metakaolin ikameli harç çubukları için 14 gün sonunda üç numune üzerinden ölçülen ortalama genleşme değeri %0,20 mertebesindedir. Buradan görüleceği üzere %5 metakaolin ikamesi genleşmeyi referans harç çubukları için ölçülen değere kıyasla %21,86 oranında azaltmıştır. Ancak %5 metakaolin ikamesi için elde edilen bu değer ASTM C 1260 standardınca zararsız bölge için öngörülen sınır değer %0,1'in üstünde kalmıştır. Başka bir ifade ile %5 metakaolin ikamesi söz konusu agreganın alkali-silika kaynaklı genleşmesini bastırmak için yeterli olmamıştır. Yazıcı ve diğerleri (2014), yaptıkları çalışmada %5 oranında çimento yerine metakaolin ikamesinin alkali-silika reaksiyonu genleşmesini bastırmada çok etkili olmadığını ve referans numuneye yakın sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

%10 metakaolin ikame edilen harç numunelere ilişkin zamana bağlı ölçülen alkali-silika kaynaklı genleşme değerleri Tablo 13'te verilmektedir.

Tablo 13. %10 metakaolin ikameli numunelere ait genleşme değerleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3. Gün	7. Gün	14. Gün
1	0,0133	0,0214	0,0309
2	0,0140	0,0151	0,0165
3	0,0140	0,0232	0,0239
Ortalama	0,0138	0,0199	0,0237



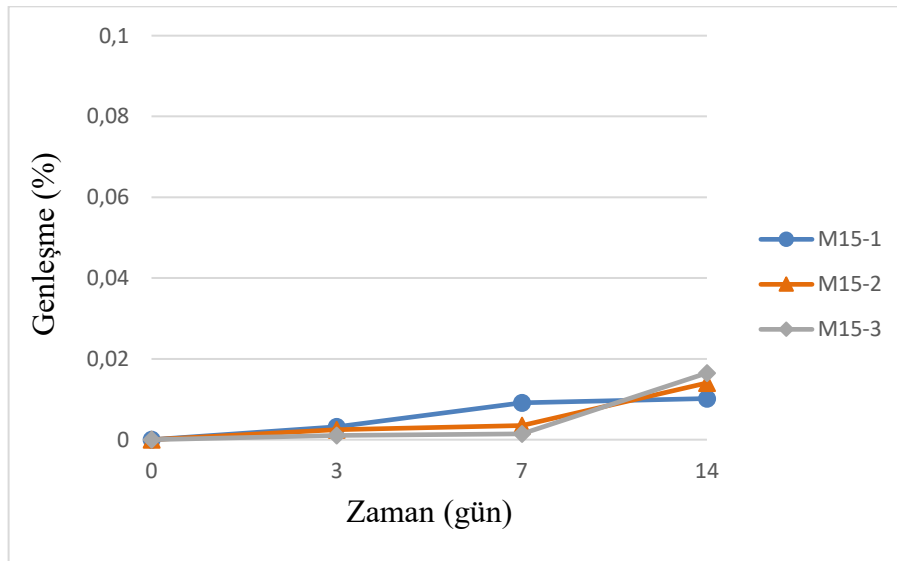
Şekil 24. %10 metakaolin ikameli numunelere ilişkin genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 24'ten görüldüğü üzere %10 oranında metakaolin ikameli harç çubukları için 14 gün sonunda üç numune üzerinden ölçülen ortalama genleşme değeri %0,02 mertebesindedir. Buradan görüleceği üzere %10 metakaolin ikamesi genleşmeyi referans harç çubukları için ölçülen değere kıyasla %90,86 oranında azaltmıştır. %10 metakaolin ikamesi için elde edilen bu değer ASTM C 1260 standardınca zararsız bölge için öngörülen sınır değer %0,1'in altıdadır. Dolayısıyla, %10 metakaolin ikamesi söz konusu agreganın alkali-silika kaynaklı genleşmesini bastırmak için yeterli olduğu görülmektedir. Nayır ve diğerleri (2017), yaptıkları çalışmada %10 oranında çimento yerine metakaolin ikamesinin alkali-silika reaksiyonu genleşmesini kontrol altına almada yeterli olduğunu belirtmişlerdir.

%15 metakaolin ikame edilen harç numunelere ilişkin zamana bağlı ölçülen alkali-silika kaynaklı genleşme değerleri Tablo 14'te verilmektedir.

Tablo 14. %15 metakaolin ikameli numunelere ait genleşme değerleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3. Gün	7. Gün	14. Gün
1	0,0032	0,0091	0,0102
2	0,0025	0,0035	0,0140
3	0,0011	0,0014	0,0165
Ortalama	0,0022	0,0047	0,0136



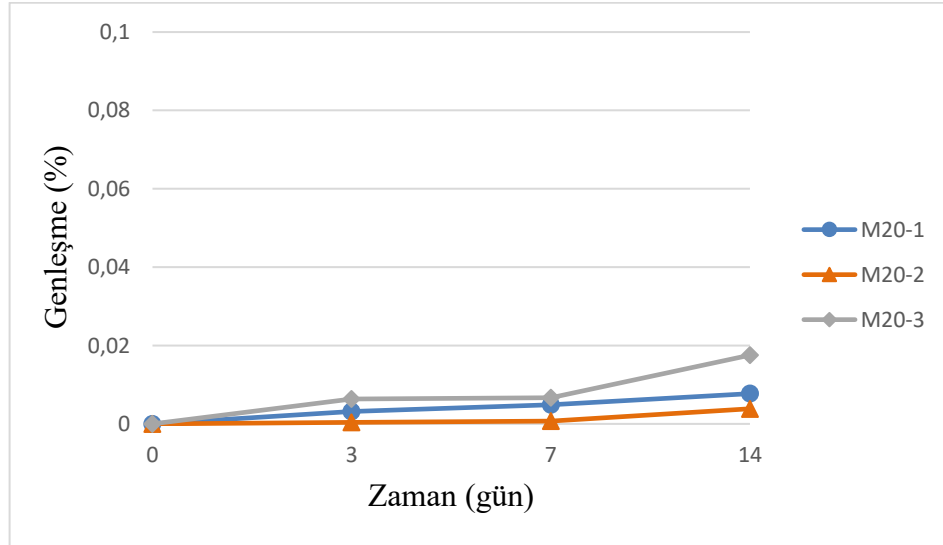
Şekil 25. %15 metakaolin ikameli numunelere ilişkin genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 25'ten görüldüğü üzere %15 oranında metakaolin ikameli harç çubukları için 14 gün sonunda üç numune için belirlenen ortalama genleşme %0,013 mertebesindedir. Buradan görüleceği üzere %15 metakaolin ikamesi genleşmeyi referans harç çubukları için ölçülen değere kıyasla %94,76 oranında azaltmıştır. Burada açıkça görüleceği gibi %15 metakaolin ikamesi için elde edilen bu değer ASTM C 1260 standardınca zararsız bölge için verilen sınır değer %0,1'in altıdadır.

%20 metakaolin ikame edilen harç numunelere ilişkin zamana bağlı ölçülen alkali-silika kaynaklı genleşme değerleri Tablo 15'te verilmektedir.

Tablo 15. %20 metakaolin ikameli numunelere ait genleşme değerleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3. Gün	7. Gün	14. Gün
1	0,0032	0,0049	0,0077
2	0,0004	0,0007	0,0039
3	0,0063	0,0067	0,0175
Ortalama	0,0033	0,0041	0,0097

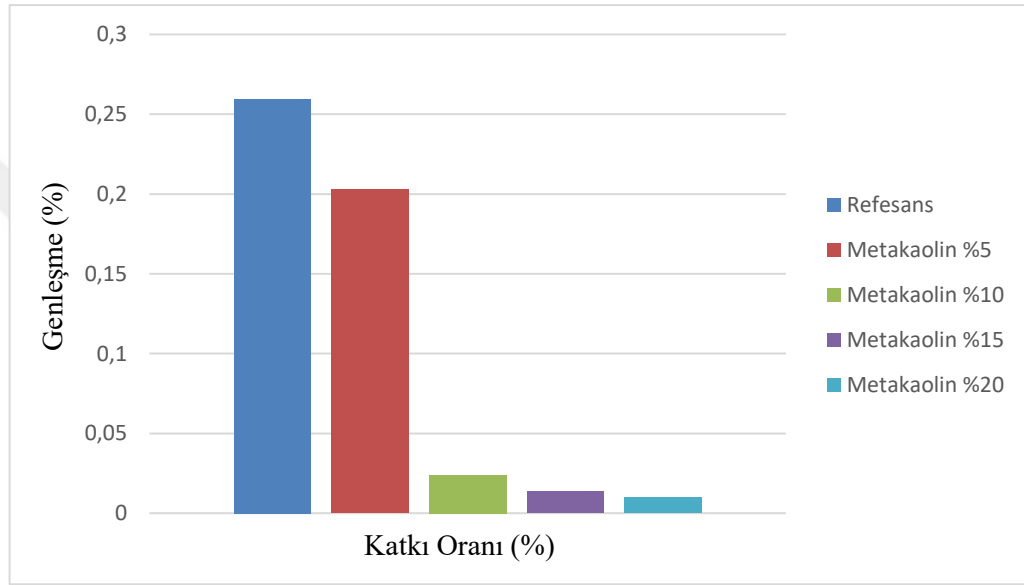


Şekil 26. %20 metakaolin ikameli numunelere ilişkin genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 26'dan görüldüğü üzere %20 oranında metakaolin ikameli harç çubukları için 14 gün sonunda üç numune üzerinden ölçülen ortalama genleşme %0,01 mertebesindedir.

Buradan görüleceği üzere %20 metakaolin ikamesi genişmeyi referans harç çubukları için ölçülen değere kıyasla %96,26 oranında azaltmıştır. Burada açıkça görüleceği gibi %20 metakaolin ikamesi için elde edilen bu değer ASTM C 1260 standardınca zararsız bölge için öngörülen sınır değer %0,1'in oldukça altıdadır.

Metakaolin ikameli harçlar için 14 gün sonunda ölçülen ortalama genişme değerleri referans harç için ölçülenle kıyaslamalı olarak Şekil 27`de verilmektedir.



Şekil 27. Metakaolin ikameli numunelerin 14 günlük genişme-katkı oranı ilişkisi

Şekil 27`den görüleceği üzere metakaolin ikame oranı arttıkça alkali-silika kaynaklı genişme hızla azalmaktadır. Çalışmada kullanılan agrega ve deney koşulları için geçerli olmak kaydıyla %5 metakaolin ikamesi alkali-silika kaynaklı genişmeyi bastırmada yeterli olmadığı ancak %10 ve üstü oranlarda metakaolin ikamesinin bu anlamda fazlasıyla yeterli olduğu görülmektedir. Buna ek olarak %15 ve %20 oranında metakaolin ikameli numunelerin genişme değerleri sınır değerinin oldukça altında ve birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Ramlochan ve diğerleri (2000), yaptıkları çalışmada %10 ve %15 oranında metakaolin ikamesinin alkali-silika kaynaklı genişmeyi kontrol altına almada yeterli olabileceğini belirtmektedirler. Yazıcı ve diğerleri (2014), yaptıkları çalışmada %10 ila %20 oranında metakaolin kullanımını alkali-silika reaksiyonu direncini önemli ölçüde artırdığını ve genişme değerlerini sınır değerinin altına çekmede başarılı olduğunu belirtmektedirler.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada Artvin-Şavşat yöresinden temin edilen bir agregaya kullanılmıştır. ASTM C 1260 standardı uyarınca alkali-silika reaktifliği %0,2594 olarak ölçülen ve reaktif olarak değerlendirilen agregaya ilişkin gerçekleştirilen deneysel çalışma ile metakaolin kullanımının alkali-silika reaktifliğini bastırmadaki etkinliği araştırılmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. Alkali-silika reaktifliği %0,2594 olan bir agregaya kullanılarak ağırlıkça çimento ile %5 oranında ikame edilen harç numunelerin ortalama genleşme değeri %0,2027 olarak belirlenmiştir. Bu değer ilgili standartta sınır değer olarak belirtilen %0,1'in üzerinde olması dolayısıyla %5 metakaolin ikamesi alkali-silika reaktifliğini bastırmada yeterli olmadığı belirlenmiştir.
2. Çimento ile ağırlıkça %10 oranında metakaolin ikame edildiğinde ölçülen genleşme değeri %0,0237 mertebesindedir. Buradan görüleceği üzere alkali-silika kaynaklı genleşmeyi ASTM C 1260 standardında sınır değer olarak belirtilen %0,1'in altına çektiğinden %10 metakaolin ikamesinin yeterli olduğu tespit edilmiştir.
3. %15 ve %20 oranında metakaolin ikameli numunelerin genleşme değerleri sırasıyla %0,0136 ve 0,0097 olarak belirlenmiştir. Her iki oran için metakaolin ikamesi yakın sonuçlar vermiş ve genleşmeyi sınır değer altına çekmiştir.
4. Çalışmanın gerçekleştirildiği koşullar itibarıyla %10 ve üzeri oranlarda metakaolin ikamesinin genleşmeyi azaltmada etkili olduğu açıkça görülmektedir. Ancak %15 ve %20 oranında metakaolin ikamesi işlenebilirlik açısından yaratacağı soruna bağlı olarak beton/harç karışımını yerleştirme ve sıkılaştırmada ciddi zorluklara sebep olması söz konusudur. Bu nedenle alkali-silika reaktifliğini bastırmak amacıyla metakaolin ikamesinin %10'dan fazla kullanımının anlamsız olduğu açıkça görülmektedir.
5. Sonuç itibarıyla gerçekleştirilen deneysel çalışma koşulları için geçerli olmak kaydıyla %10 metakaolin ikamesi alkali-silika reaktifliğini bastırmada yeterli görülmektedir.
6. Çalışmada kullanılan ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemi yanı sıra diğer bazı yöntemlerin de kullanılması elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir.

7. Çalışmada metakaolinin yalnızca alkali-silika kaynaklı genişmeyi bastırmadaki etkinliği değerlendirilmiştir. Metakaolin ikamesinin mekanik özellikler itibariyle değerlendirmesi farklı bir çalışmada değerlendirilebilir.
8. Metakaolin katkılı numunelerin genişme değerleri dikkate alındığında %5 ila %10 arası bir değer, örneğin %7,5 oranında metakaolin ikamesi denebilir.



## 5. KAYNAKLAR

- Abit, Ö. 1998. Alkali Silis Reaksiyonunun Kimyasal Katkılar ile Önlenmesi, Azaltılması veya Onarılması, TC Karayolları Kurs Programı, Ankara.
- Akman, M. S. 2000. Effects of the Content and Kind of Soluble Alkalis in Cements on Different Properties of Concrete, Cement and Concrete Technology in the 2000's Second International Symposium, İstanbul.
- American Society for Testing and Materials, 2012. ASTM C295 Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete.
- American Society for Testing and Materials, 2017. ASTM C289 Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method).
- American Society for Testing and Materials, 2017. ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete.
- American Society for Testing and Materials, 2018. ASTM C227 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method).
- American Society for Testing and Materials, 2020. ASTM C1293 Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction.
- American Society for Testing and Materials, 2021. ASTM C1260 Standard Test Method for Potential Reactivity of Aggregates.
- Andiç, Ö. 2002. Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması, Yüksek Lisans Tezi.
- Aquino, W., Lange, D., ve Olek, J. 2001. The Influence of Metakaolin and Silica Fume on the Chemistry of Alkali-Silica Reaction Products, Cement and Concrete Composites 23, 485-493.
- Arslan, M. 2001. Beton (Dökümü, Kalıpları, Kusurları, Dayanıklılığı), Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Aşık, İ., Şen, H., Ergintay, Y., Ünsal, A., Şentürk, E., ve Bayrak, E. 2003. Alkali-Agrega Reaksiyonu Yönünden Zararlı Olan Bir Ocağın İyileştirilmesi, Beton Kongresi, İstanbul.
- Baradan, B. 2000. Yapı Malzemesi II, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.

- Baradan, B., Yazıcı, H., ve Aydın, S. 2012. Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Baradan, B., Yazıcı, H., ve Ün, H. 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık, Hazır Beton Birliği, Türkiye, İstanbul.
- Bektaş, F. 2002. Preventive Measures Against Alkali-Silica Reaction, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Berube, M. A., ve Fournier, B. 1992. Accelerated Test Methods for Alkali-Aggregate Reactivity, Advances in Concrete Technology, Ottawa, Canada.
- Binal, A. 2004. Pesimum Reaktif Agregası İçeriğinin Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisinin Deneysel Yöntemlerle Araştırılması, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 17, 2, 119-128.
- Bobby, A. M., Hooton, R. D., ve Thoman, M. A. 2000. The Effects of Product Form of Silica Fume on Its Ability to Control Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research, 30, 1139-1150.
- Brooks, J. J., ve Johari, M. A. 2001. Structure and Performance of Cements, Second Edition, 584, CRC Press, London.
- Çullu, M., Subaşı, S., ve Bolat, H. 2010. Beton Kanseri-Alkali Silika Reaksiyonu, e-Journal of New World Sciences Academy, 5, 3, 526-540.
- Diamond, S. 1999. Unique Response of LiNO<sub>3</sub> as an Alkali-Silica Reaction Preventive Admixture, Cement and Concrete Research, 29, 1271-1275.
- Diñçdemir, İ. 2015, Aralık. Alkali-Silika Reaksiyonunun İyileştirilmesinde Mineral ve Kimyasal Katkıların Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Engin, G. 2013. Nevşehir Acıgöl Bölgesinden Elde Edilen Perlit Agregasının Alkali-Silika Reaksiyonunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Erdoğdu, Ş., Nayır, S., Nas, M., ve Kandil, U. 2016, Eylül 21-23. Effects of Binary and Ternary Blends of Silica Fume and Metakaolin on the Mitigation of Alkali-Silica Reaction in Concrete, 12. International Congress on Advances in Civil Engineering, 1-7, İstanbul.
- Farny, J. A., ve Kosmatka, S. H. 1997. Diagnosis and Control of Alkali Aggregate Reactions in Concrete, American Concrete Pavement Association (ACPA).
- Gillott, J. E., ve Rogers, C. A. 1994. Alkali-Aggregate Reaction and Internal Release of Alkalis, Magazine of Concrete Research, 167, 99-102.
- Glasser, F. 1992. Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, 30-53, Van Nostrand Reinhold, New York.

- Hobbs, D. 1988. Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford, London.
- Hooton, R. D. 2000. Canadian use of Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Supplement Cementing Material for Enhanced Performance of Concrete, Canadian Journal of Civil Engineering, 754-760,.
- Karakaş, S. 2013. Harşit Çayı Vadisi Agregalarının Alkali Silika Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Katayama, T. 1996. Characteristics on Alkali Aggregate Reaction, The Study on the Maintenance and Rehabilitation of the Highway Bridges in the Republic of Turkey.
- Li, Z., ve Ding, Z. 2003. Property Improvement of Portland Cement by Incorporating with Metakaolin and Slag. Cement and Concrete Research, 579-584.
- Mc Joy, W. J., ve Caldwell, A. J. 1951. New Approach to Inhibiting Alkali Aggregate Expansion, Journal of American Concrete Institute, 22, 693-706.
- Mindness, S., ve Young, J. F. 1981. Concrete, Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
- Moranville-Regourd, M. 1989. Products of Reaction and Petrographic Examination. S. Okada, S. Nishibayashi, ve M. Kawamura (Dü.), Proc. 8th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction, 445-456, Kyoto, Japan.
- Nayır, S. 2015, Haziran. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonunu İyileştirmede Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Nayır, S., Erdoğan, Ş., ve Kurbetçi, Ş. 2017. Effectiveness of Mineral Additives in Mitigating Alkali-Silica Reaction in Mortar, Computers and Concrete, 705-710.
- Neville, A. M. 1981 Properties of Concrete, Longman Scientific and Technical, England.
- Poole, A. B. 1992. Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ed. R. N. Swamy The Alkali-Silica Reaction in Concrete, 30-53, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Ramlochan, T., Thomas, M., ve Gruber, K. A. 2000. The Effect of Metakaolin on Alkali-Silica Reaction in Concrete, Cement and Concrete Research, 30, 339-344.
- Ramyar, K., Dönmez, H., ve Andiç, Ö. 2002. Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkıları Yardımı İle Kontrol Altına Alınması, TÇMB, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Rashad, M. A. 2013. Metakaolin as a Cementitious Material: History, Scours, Production and Composition - A Comprehensive Overview, Construction and Building Materials, 303-318.

- Sabir, B. B., Wild, S., ve Bai, J. 2001. Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete: A Review, *Cement and Concrete Composites*, 441-454.
- Siddique, R. 2008. *Waste Materials and by-products in Concrete*, Berlin, Almanya.
- Stark, D. 1991. *Handbook for The Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures*, Strategic Highway Research Program, Washington.
- Stark, D., Morgan, B., ve Okamoto, P. 1993. *Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity*, Strategic Highway Research Program, Washington.
- Sun, S. H., Ma, J. T., Pang, X. M., Sun, Y. T., ve Wang, S. L. 2005. Sulfur Reduction Additive Prepared from Acid-Modified Kaolin, 4, 72-78. *Bulletin of the Catalysis Society of India*.
- Swamy, R. N. 1992. *Testing for Alkali Silica Reaction, The Alkali- Silica Reaction in Concrete*, 54-95, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Swamy, R. N. 1992. *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete; Material and Structural Implications*, Sciences in Concrete Technology, Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.
- Swamy, R. N. 1994. *Alkali-Aggregate Reaction- The Bogeyman of Concrete*, American Concrete Institute Special Publication, 144, 105-139, American Concrete Institute.
- Swamy, R. N., ve Al-Asali. 1989. Effects of Alkali-Silica Reaction on the Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, 86, 451-459.
- Tosun, K. 2001. Uçucu Kül ve Silika Tozunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Tosun, K., Felekoğlu, B., ve Baradan, B. 2007. 3rd International Symposium on Sustainability in Cement and Concrete, TCMA, İstanbul, Türkiye.
- Türk Standardları Enstitüsü, 2010. TS 2517, Agregaların Potansiyel Alkali Silis Reaktivliğinin Tayini - Kimyasal Yöntem, Ankara.
- Türkel, S., ve Tevrizei, M. M. 2015. Metakaolin ve Akışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Harçların Mekanik Performansına ve Bazı Durabilite Özelliklerine Etkileri, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19, 40-46. Isparta.
- Ün, H. 2007. *Yapay Puzolanlar, PAÜ Ders Notları, Yapı Malzemesi/Yapay Puzolanlar*.
- Varol, O. O. 2018. Van İli Kuzeyinde Yer Alan Ortaç Volkanik Agregalarda ASR Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vu, D. D. 2002. *Strength Properties of Metakaolen Blended Paste, Mortar and Concrete*, Delft University Press, Netherlands.

- Yalçın , H., ve Özalp, R. 1974. Betonlarda Alkali-Agrega Reaksiyonu ve Türkiye Çimentolarının Alkalinite Değerleri, Devlet Su İşleri Yayını, Ankara.
- Yazıcı, Ş., Arel , H., ve Anuk, D. 2014. Influences of Metakaolin on the Durability and Mechanical Properties of Mortars, Arabian Journal for Science and Engineering, 39, 8585–8592, Saudi Arabia.
- Yıldırım, K. 2013, Aralık. Betonda Alkali Silika Reaksiyonunun Azaltılmasında Mineral Katkı Kombinasyonlarının Optimizasyonu, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.



## 6. EKLER

### Ek 1. Farklı yörelerden temin edilen agregalara ait alkali-silika ölçümleri

Ek Tablo 1. Trabzon-Yomra (A1) agregasına ait deney sonuçları

Numune No	Genleşme (%)		
	3. Gün	7. Gün	14. Gün
1	0,0372	0,0512	0,0652
2	0,0435	0,0522	0,0536
3	0,0947	0,1010	0,1168
Ortalama	0,0584	0,0681	0,0786

Ek Tablo 2. Harşit Çayı Vadisi- Tirebolu (A2) agregasına ait deney sonuçları

Numune No	Genleşme (%)		
	3. Gün	7. Gün	14. Gün
1	0,0109	0,0818	0,1161
2	0,0207	0,0923	0,1330
3	0,0081	0,1049	0,1628
Ortalama	0,0132	0,0930	0,1373

Ek Tablo 3. Artvin-Murgul (A3) agregasına ait deney sonuçları

Numune No	Genleşme (%)		
	3. Gün	7. Gün	14. Gün
1	0,0017	0,0701	0,1329
2	0,0189	0,0863	0,1596
3	0,0193	0,0859	0,1642
Ortalama	0,0133	0,0808	0,1523

## ÖZGEÇMİŞ

İrem ÖZDEMİR, İlköğretimini İbrahim Hoşver İlkokulunda, liseyi Arsal Anadolu Lisesinde tamamladı. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. İngilizce bilmektedir.

