

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MİNERAL KATKILARIN ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNU
İYİLEŞTİRMEDE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Safa NAYIR

**HAZİRAN 2015
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmada mineral katkıların alkali-silika reaksiyonunu iyileştirmesine etkisi araştırılmıştır.

Saygıdeğer hocam, danışmanım, sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU, tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için gerekli cihaz ve malzemelerin temininde, çalışmanın yürütülmesinde ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında yol gösterici olmuştur. Her zaman değerli vaktini ayıran kendisine sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmanın en kritik anlarında bilgileriyle çalışmaya ışık tutan ve değerli zamanını benimle paylaşmaktan çekinmeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETCİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca, öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme; yardımlarından dolayı Arş. Gör. Ufuk KANDİL, Arş. Gör. Memduh NAS ve diğer asistan arkadaşlarıma ve ilgi ve yardımlarından dolayı tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Safa NAYIR
Trabzon 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonunu İyileştirmede Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/05/2015

Safa NAYIR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	2
1.3. Literatür Taraması	3
1.4. Betonda Durabilite	9
1.4.1. Betonun Bozulma Mekanizmaları.....	9
1.4.4.1. Fiziksel ve Mekanik Etkenler	10
1.4.4.2. Kimyasal ve Biyolojik Etkenler	11
1.5. Alkali-Silika Reaksiyonu	12
1.5.1. Alkali-Silika Reaksiyonunun Belirtileri.....	15
1.5.2 Alkali-Silika Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler	16
1.5.2.1 Agreganın Reaktifliği.....	17
1.5.2.2 Betonun Alkali İçeriği.....	19
1.5.2.3. Nem	22
1.5.2.4. Sıcaklık.....	23
1.5.2.5. Agreganın Tane Büyüklüğü	24
1.5.2.6. Su/Çimento Oranı.....	25
1.6. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi	26

1.6.1.	Uçucu Külün Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi.....	27
1.6.2.	Silis Dumanının Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi	28
1.6.3.	Yüksek Fırın Cürufunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi	29
1.6.4	Doğal Puzolanların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi	30
1.7.	Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi.....	32
1.8.	Alkali-Silika Reaksiyonunun Belirlenmesinde Kullanılan Deneysel Yöntemler	33
1.8.1.	Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 227).....	33
1.8.2.	Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 1260)	35
1.8.3.	Beton Prizma Deneyi (ASTM C 1293)	37
1.8.4.	Kimyasal Yöntem (ASTM C 289, TS 2517).....	38
1.8.5.	Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirmek Amacıyla Kullanılan Diğer Yöntemler	39
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME	41
2.1.	Kullanılan Malzemeler	41
2.2.	Malzemelerin Özellikleri.....	41
2.2.1.	Çimentonun Özellikleri	42
2.2.2.	Agreganın Özellikleri	42
2.2.3.	Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Metakaolinin Özellikleri	43
2.3.	Harç Çubuklarının Hazırlanmasında Kullanılan Cihazlar.....	44
2.4..	Alkali-Silika Reaksiyonu İçin Gerçekleştirilen Deney	46
2.4.1.	Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C1260)	46
2.4.2.	Agregaların Reaktifliğini Belirlemek İçin Yapılan Ön Çalışma	47
2.4.3.	Harç Çubuğu Numunelerinin Üretimi	49
2.5.	Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi Sonuçları ve İrdeleme	52
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
4.	KAYNAKLAR.....	65
5.	EKLER	69

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MİNERAL KATKILARIN ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNU İYİLEŞTİRMEDE
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Safa NAYIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2015, 68 Sayfa, 5 Sayfa Ek

Bu çalışmada alkali-silika reaksiyonunu iyileştirmede mineral katkıların etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan ön deney ile ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemine göre alkali-silika reaktivitesi itibariyle zararlı olarak değerlendirilen bir taş ocağı agregası ile potansiyel zararlı olarak değerlendirilen bir dere agregası incelenmiştir.

Deneyssel gerçeplemede herbir agrega için çimento ile farklı oranlarda ikame etmek suretiyle uçucu kül, silis dumanı ve metakaolin kullanılmıştır. Uçucu kül taş ocağı agregası ile %20, %40 ve %60 oranlarında çimento ile ikame edilirken silis dumanı %5, %10 ve %15 oranlarında ve metakaolin %5, %10 ve %15 oranlarında ikame edilmiştir. Dere agregası ile gerçekleştirilen üretimlerde uçucu kül %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ile ikame edilirken silis dumanı %5, %7.5 ve %10 oranlarında ve metakaolin %5, %7.5 ve %10 oranlarında ikame edilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla ayrıca mineral katkı içermeyen üretimler de gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak gerçekleştirilen tüm deneylerde, artan uçucu kül oranlarında daha belirgin olmak üzere, mineral katkı türünden bağımsız olarak ikame oranları arttıkça alkali-silika reaksiyonunu iyileştirme yönündeki olumlu etki açıkça görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Agrega, Alkali-Silika Reaksiyonu, ASTM C1260 Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi, Mineral Katkılar

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF MINERAL ADDITIVES IN MITIGATING
OF ALKALI-SILICA REACTION

Safa NAYIR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2015, 68 Pages, 5 Pages Appendix

In this study the effects of mineral additives in mitigating of alkali-silica reaction has been investigated. To perform this investigation, a quarry aggregate and a river aggregate was tested. The aggregate obtained from a quarry was reactive while the river aggregate was potentially reactive according to the measurements obtained in accordance with ASTM C 1260 accelerated mortar bar method.

In the experimental program, mortar bars were produced using fly ash, silica fume and metakaolin at different ratios replaced by cement for both aggregates to determine the effectiveness in mitigating alkali-silica reactivity in relation with the mineral replacement. Cement was replaced at ratios of 20%, 40%, and 60% by fly ash in the mortars incorporating quarry aggregate while it was replaced at ratios of 5%, 10%, and 15% by silica fume and it was replaced at ratios of 5%, 10%, and 15% by metakaolin. In mortars produced with river aggregate, cement was replaced at 10%, 20%, and 30% by fly ash while it was replaced at 5%, 7.5%, and 10% by silica fume and it was replaced at 5%, 7.5%, and 10% by metakaolin. For comparison, mortars were also produced without mineral additives.

Consequently, the mitigating effect of using mineral additives, being more pronounced for increased replacement ratios for fly ash; is a clear indication in improving the alkali-silica reactivity as replacement ratios increase regardless of the type of mineral additives used.

Keywords: Aggregate, Alkali-Silica Reaction, ASTM C 1260 Accelerated Mortar Bar Test, Mitigating Alkali-Silica Reaction, Mineral Additives

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Matris içinde ASR nedenli agrega çatlağının SEM mikrogramı	2
Şekil 2. Kontrol numunesi ve ikili karışımların hızlandırılmış harç çubuk deneyi genişleme yüzdeleri	7
Şekil 3. Kontrol numunesi ve üçlü karışımların hızlandırılmış harç çubuk deneyi genişleme yüzdeleri	8
Şekil 4. Kontrol numunesi ve ikili karışımların beton prizma deneyi genişleme yüzdeleri	8
Şekil 5. Kontrol numunesi ve üçlü karışımların beton prizma deneyi genişleme yüzdeleri	9
Şekil 6. Agrega yüzeyi ile temas halinde olan boşluk çözültisi ve çimento hidratasyon ürünleri.....	15
Şekil 7. Alkali-silika reaksiyonu sonucu meydana gelen çatlaklara ilişkin örnek görünüşler	16
Şekil 8. Farklı tür agregaların genişleme davranışı	18
Şekil 9. Çimentodaki alkali miktarının alkali-silika genişlemesine etkisi.....	20
Şekil 10. Çimento dozajı ve çimentonun sodyum eşdeğeri yüzdesine bağlı olarak betondaki alkali miktarları.....	21
Şekil 11. Nemin ASR nedeniyle betonda oluşan genişleme üzerindeki etkisi.....	22
Şekil 12. Zamana bağlı genişleme-sıcaklık ilişkisi.....	23
Şekil 13. Reaktif tane boyutunun genişleme-yaş ilişkisi üzerindeki etkisi.....	24
Şekil 14. Su/çimento oranı ile ASR sonucu oluşan genişleme arasındaki ilişki.....	25
Şekil 15. Yüksek fırın cürufunun (OH) iyonu konsantrasyonu üzerindeki etkisi.....	29
Şekil 16. Farklı oranlarda kullanılan zeolitın zamana genişleme üzerindeki etkisi	31
Şekil 17. Alkali-silika deney tankı.....	35
Şekil 18. %100 bağıl nemi sağlayacak şekilde tasarlanmış kap	37
Şekil 19. Alkalitedeki azalma-çözünmüş silis ilişkisi	39
Şekil 20. Çözültiyi hazırlamak için kullanılan sodyum hidroksit.....	41
Şekil 21. Deneysel çalışmada kullanılan mineral katkıları	43
Şekil 22. Deneyde kullanılan harç çubuğu kalıpları	45

Şekil 23.	Çubuk boy ölçüm ünitesi	45
Şekil 24.	Alkali-silika deney tankı.....	46
Şekil 25.	Taş ocağı agregası örneğine genişleme-zaman ilişkisi	48
Şekil 26.	Dere agregası örneğine genişleme-zaman ilişkisi	48
Şekil 27.	Üretim için gerekli malzemelerin hazırlanması.....	50
Şekil 28.	Karıştırma kabında malzemelerin karıştırılması.....	50
Şekil 29.	Hazırlanan harcın kalıplara yerleştirilmesi (Birinci tabaka).....	50
Şekil 30.	Hazırlanan harcın kalıplara yerleştirilmesi (İkinci tabaka)	51
Şekil 31.	Harç çubukların kalıptan çıkarılmadan önceki durumu.....	51
Şekil 32.	Çubukların başlangıç okuması sonrası numaralanması	52
Şekil 33.	Çubukların gruplandırılıp numaralanması	53
Şekil 34.	Uçucu kül ikameli taş ocağı agregası örneklerine ait genişleme-zaman ilişkisi	53
Şekil 35.	Silis dumanı ikameli taş ocağı agregası örneklerine ait genişleme-zaman ilişkisi.....	54
Şekil 36.	Metakaolin ikameli taş ocağı agregası örneklerine ait genişleme-zaman ilişkisi	55
Şekil 37.	Uçucu kül ikameli dere agregası örneklerine ait genişleme-zaman ilişkisi.....	56
Şekil 38.	Silis dumanı ikameli dere agregası örneklerine ait genişleme-zaman ilişkisi ...	57
Şekil 39.	Metakaolin ikameli dere agregası örneklerine ait genişleme-zaman ilişkisi	58
Şekil 40.	Taş ocağı agregalı katkısız ve uçucu kül ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genişleme-katkı oranı ilişkisi	59
Şekil 41.	Taş ocağı agregalı katkısız ve silis dumanı ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genişleme-katkı oranı ilişkisi	59
Şekil 42.	Taş ocağı agregalı katkısız ve metakaolin ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genişleme-katkı oranı ilişkisi	60
Şekil 43.	Dere agregalı katkısız ve uçucu kül ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genişleme-katkı oranı ilişkisi.....	60
Şekil 44.	Dere agregalı katkısız ve silis dumanı ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genişleme-katkı oranı ilişkisi.....	61
Şekil 45.	Dere agregalı katkısız ve metakaolin ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genişleme-katkı oranı ilişkisi.....	61

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Reaktivite seviyelerine göre mineral ve kayalar	19
Tablo 2.	Harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu yöntemleri için agrega karışım oranları	34
Tablo 3	Harç çubukları karışım miktarları	34
Tablo 4.	Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	42
Tablo 5.	Agregaların fiziksel özellikleri	43
Tablo 6.	Uçucu kül ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler	43
Tablo 7.	Metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler	44
Tablo 8.	Silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler	44
Tablo 9.	Taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	47
Tablo 10.	Dere agregasına ilişkin deney sonuçları	47
Tablo 11.	ASTM C1260`a göre granülometrik bileşim	49
Tablo 12.	Harç çubuklarının üretimde kullanılan karışım miktarları	49
Tablo 13.	Taş ocağı agregası üzerinde yapılan çalışmalarda katılan katkı oranları	53
Tablo 14.	Dere agregası üzerinde yapılan çalışmalarda katılan katkı oranları	53
Ek Tablo 1.	%20 Uçucu kül ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	69
Ek Tablo 2.	%40 Uçucu kül ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	69
Ek Tablo 3.	%60 Uçucu kül ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	69
Ek Tablo 4.	%5 Silis dumanı ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	69
Ek Tablo 5.	%10 Silis dumanı ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	70
Ek Tablo 6.	%15 Silis dumanı ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	70
Ek Tablo 7.	%5 Metakaolin ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	70
Ek Tablo 8.	%10 Metakaolin ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	70
Ek Tablo 9.	%15 Metakaolin ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları	71
Ek Tablo 10.	%10 Uçucu kül ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları	71
Ek Tablo 11.	%20 Uçucu kül ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları	71
Ek Tablo 12.	%30 Uçucu kül ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları	71
Ek Tablo 13.	%5 Silis dumanı ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları	71
Ek Tablo 14.	%7.5 Silis dumanı ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları	72
Ek Tablo 15.	%10 Silis dumanı ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları	72
Ek Tablo 16.	%5 Metakaolin ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları	72

Ek Tablo 17. %7.5 Metakaolin ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları.....	72
Ek Tablo 18. %10 Metakaolin ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları.....	73

SEMBOLLER DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AAR	: Alkali-Agrega Reaksiyonu
ACR	: Alkali-Karbonat Reaksiyonu
ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	: Amerikan standart
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
GEO	: Gecikmiş Etrenjit Oluşumu
(Na ₂ O) _e	: Sodyum oksit eşdeğeri
PÇ	: Portland çimenntosu
R _c	: Alkali azalması
S _c	: Çözünmüş silis
S/Ç	: Su/Çimento

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton; agrega, çimento ve su karışımından meydana gelen bir yapı malzemesi olup inşaat sektöründe yaygın kullanım alanına sahiptir. Beton, dayanıklı, yangına karşı direnci, geçirimsizliği yanı sıra ekonomik ve az enerji ile üretilebilen bir malzeme olması tercih nedenleri arasındadır. Bunun yanında betonun yapısı gereği hizmet verdiği ortamlarda çeşitli risklere maruz kalmaktadır. Maruz kaldığı risklerden bir tanesi betonun kimyasal olarak bozulmasının bir sonucu olan alkali-silika reaksiyonudur.

1920'li ve 1930'lu yıllarda ABD, Kaliforniya'daki beton yapılarda nedeni belirsiz çatlak oluşumları rapor edilmiştir. Betonun oluşturan malzemeler ilgili standartlara uygun olmasına karşın yapım yılından birkaç yıl sonra yapı elemanlarında çatlaklar meydana gelmiştir. Genellikle harita çatlağı şeklinde görülen sorun bazen de çatlaklardan jel çıkışı, betonun parça atması gibi belirtiler de gözlemlenmiştir [1].

1940 yılında Stanson, çatlamanın (daha sonra Alkali-Silika Reaksiyonu olarak adlandırılan) kimyasal bir reaksiyon sonucu oluştuğunu rapor etmiştir. 1941 yılında Blanks ve Meissner, Parker barajının betonunda oluşan çatlak ve bozulmaları incelemiştir. Araştırmalar sonunda betonda alkali-silika reaksiyonu ürünü bulunduğu ve reaktif bileşenlerin toplam agreganın %2'sini oluşturan altere andezit ve riyolit parçaları olduğu belirtilmiştir [1].

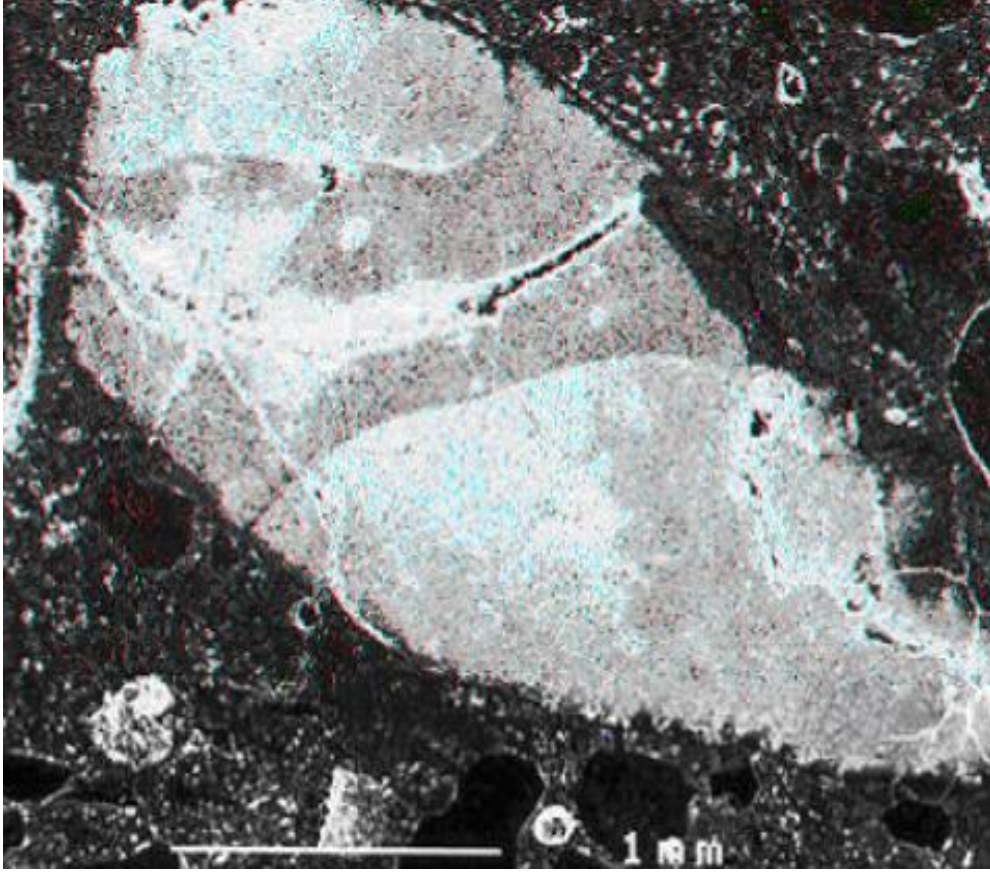
Alkali-agrega reaksiyonu, betondaki agreganın çeşitli bileşenlerinin çimentodaki alkalilerle olan reaksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu reaksiyon sonucunda oluşan ürünler su emerek genişmekte ve betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir [2].

Alkali-agrega reaksiyonu üç farklı formasyonda oluştuğu bilinmektedir. Bunlardan biri Alkali-silika reaksiyonu (ASR) diğerleri ise alkali-karbonat reaksiyonu (ACR) ve alkali-silikat reaksiyonudur.

Alkali-silika reaksiyonu sonucu meydana gelen jelin su emme özelliği nedeniyle şişerek genişlemektedir. Bundan dolayı beton bünyesinde 0,1-11 MPa arasında çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Beton içerisinde meydana gelen hacimsel büyüme çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur ve betonda çatlamlar meydana gelir.

Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının yaklaşık %10'u olduğundan, %0,04-0,05 gibi genişleme betonu çatlatmaya yeterli olacaktır [3].

Harita biçiminde çatlaklar başlangıçta agregayı çevreleyerek başlar ve harç matrisi içerisine doğru yayılır [4].



Şekil 1. Matris içinde ASR nedenli agrega çatlağının SEM mikrogramı [4].

1995 yılında İzmir`de bazı köprü ayaklarında görülen çatlaklar Karayolları Genel Müdürlüğü ve Japon Jica firması tarafından incelenmiş; araştırmalar sonucunda özellikle Gediz ve Nif nehri yatak ve teraslarındaki doğal kumların içerdiği reaktif silislerin ASR`ye yol açtığı belirtilmiştir [5].

1.2. Amaç ve Kapsam

Beton ve betonarme elemanların zamanla bozulmalarına çeşitli iç ve dış etkenler neden olur. Bu etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik kökenli olabilir. Dış

etkenler arasında; sülfat etkisi, aşınma, karbonatlaşma ve bazı asit ve tuz etkileri sayılabilir. Beton ve betonarme elemanlarda meydana gelen hasarın derecesi, dış etkilerin büyüklüğü ve betonun kalitesine bağlı olarak değişir. İç etkiler arasında alkali-silika reaksiyonu (ASR), gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO), agrega ve çimento harcının ısı özellikleri arasındaki farklılıklar gibi faktörler sayılabilir.

Bu bağlamda bu araştırmada betonun kimyasal nedenlerle bozulmasının bir etkeni olan alkali-silika reaksiyonu üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Doğu Karadeniz Bölgesinin farklı yörelerinden iki agrega temin edildi. Agregalar üzerinde ASTM C1260 standardına uygun olarak hızlandırılmış harç çubuğu deneyi yapıldı. Gerçekleştirilen ön deneylerle agregaların biri zararlı, diğeri potansiyel zararlı bölgede olduğu tespit edildi. Bu bağlamda her iki agrega için çimento yerine farklı oranlarda ikame edilen uçucu kül, silis dumanı ve metakaolinin alkali-silika reaksiyonu üzerindeki önleyici/azaltıcı etkileri araştırılmıştır.

1.3. Literatür Taraması

Bu kısımda alkali-silika reaksiyonu konusu üzerinde gerçekleştirilen çalışmalardan bir kısmı değerlendirilmiştir.

Alkali-silika reaksiyonunun varlığı ilk kez 1940 yılında Stanton tarafından betonun bileşenleri arasında içsel bir mekanizma olarak açıklanmıştır. 1974 yılında alkali-agrega reaktivitesi konusunda faaliyet gösteren bazı araştırmacıların katıldığı birçok toplantı yapılmıştır. Bunların ilki Danimarka'da gerçekleştirilmiştir. İlerleyen yıllarda sırasıyla İzlanda (1975), İngiltere (1976), Amerika (1978), Güney Afrika (1981), Danimarka (1983) ve Kanada'da (1986) da benzer toplantılar yapılmıştır. Ayrıca Japonya (1989), Londra (1992), Avustralya (1996), Kanada (2000) ve Çin'de de konferanslar düzenlenmiştir [6].

Aşık vd. [7], alkali-silika yönünden zararlı çıkan bir agregaya dört farklı puzolanı farklı oranlarda kullanarak alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Hızlandırılmış harç çubuk deneyi yapılarak araştırılan çalışma sonucu 14 gün sonucunda ölçülen uzama esas alındığında %10 uçucu kül ve pomza kullanımı ASR'yi azaltıcı yönde etki göstermiş ve uzama değerlerini sınır değerinin altına düşürmüş olduğu görülmüştür. Cüruf ve trasın %20-%30 arasında kullanılmasının faydalı sonuçlar vereceği kanaatine varılmıştır. Mineral katkı kullanımında kullanım yüzdesinin artması alkali-silika reaksiyonunu olumlu yönde etkileyebileceği belirtilmiştir. Katkılı çimentoların tek başına

kullanılmasının uzama değerini sınır değer altına çekmek için yeterli olmadığı ifade edilmiştir.

Arslan vd.[8], Ankara bölgesinde bazı agrega ocaklarının alkali-silika reaktivitesine ilişkin özellikleri belirlemiştir. Çalışmada agrega örnekleri üzerinde ASTM C289 Kimyasal metot, ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk deneyi ve ASTM C227 uzun süreli harç çubuğu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üç yöntemde de kullanılan agregaların alkali-silika açısından zararsız olduğu belirlenmiştir.

Uygunoğlu [9], yüksek oranda silis dumanı içeren harçlarda alkali-silika reaksiyonun gelişimini incelemiştir. Harçların üretiminde doğal kum, kırma kum, beton atığı kum ve mermer atığı kum kullanmıştır. Silis dumanı harçlara çimentoyla %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Alkali silika deneyi ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk standardına göre gerçekleştirmiştir. Doğal kumlu %0 silis dumanlı harçlar, genleşme değeri açısından şüpheli bölgede yer aldıkları belirtilmiştir. Silis dumanının ilavesiyle ortamın boşluk suyundaki pH değeri azaltılarak, tüm silis dumanı içeren ve doğal kumla üretilen harçların genleşme değeri açısından güvenli bölgede kaldığı ifade edilmiştir. Kırma kum ve mermer atığı agregalar reaktif silis içermediği için tüm harçların genleşme değeri açısından güvenli bölgede kaldığı ifade edilmiştir. Beton atığı agregada beton üretimi sırasında bir miktar doğal kum kullanılmış olması ve bu doğal kumun bir miktar reaktif silis içermesinden dolayı %0 silis dumanı içeren harçların genleşme değeri şüpheli bölge içerisinde yer almıştır. Tüm agrega tipleriyle üretilen harçlarda %10-%30 oranında silis dumanı kullanılmasıyla ASR etkisi önemli derecede azaltılarak ve yapı elemanlarında meydana gelebilecek hasar oluşma riskinin de önemli derecede azaltacağı ifade edilmektedir.

Arslan vd. [10] yaptıkları çalışmada, Ermenek Havzası Çetinkalesi Tepe bölgesine ait kırmataşların alkali-silika reaksiyonuna ilişkin özelliklerini belirlemişlerdir. Alkali-silika reaksiyonunu belirlemek için kimyasal analiz ve hızlandırılmış harç çubuk deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kimyasal analiz sonuçları dikkate alındığında agreganın ilgili standarda göre zararsız bölgede yer aldığı belirtilmiştir. Hızlandırılmış harç çubuk deneyinden elde edilen 14 günlük boy değişimi değerlerinin standartta öngörülen %0,1 genleşme sınırının altında olduğu belirtilmiştir. Bölgede yapılan araştırma ile bölgedeki agregaların alkali-silika reaksiyonu bakımından zararsız olduğu ifade edilmiştir.

Tapan vd. [11], Van yöresinde beton üretiminde kullanılan agregaların alkali-silika reaktivitelerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Agregaların alkali-silika

reaktivitesini belirlemek için kimyasal metot ve hızlandırılmış harç çubuk yöntemlerini kullanmışlardır. Bölgede kullanılan mevcut agrega ocaklarından alınan malzemelerde alkali-silika reaktivitesi bakımından her iki yöntemle de olumsuz bir duruma rastlanmadığı ifade edilmiştir. Ocaklardaki ayrışma zonlarına göre elde edilen hammaddelerin ASR`si sürekli takip edilmeli, ocak işletilirken zararlı veya zararsız agregalar ocaktaki değişime göre yeniden değerlendirilmesinin gerekliliğinin altı çizilmiştir.

Ramlochan vd. [12], doğal bir puzolan olan metakaolinin betondaki alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmada çimentonun yerine %0, %10 ve %20 oranında metakaolin kullanmışlardır. %20 oranında yüksek reaktiviteli metakaolin kullanımı boşluk suyundaki alkali konsantrasyonunu önemli derecede düşürdüğü vurgusu yapılmıştır. Kullanılan agregaya da bağlı olarak %10 ve %15 metakaolin kullanımı zararlı genleşmeleri kontrol altına almak için yeterli olduğu ifade edilmiştir. Bu, metakaolinin boşluk suyundaki pH değerini düşürerek alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan zararlı genleşmelerin kontrol altına alınabileceği belirtilmektedir.

İpek vd. [13], Sakarya bölgesindeki bazı agrega taş ocaklarından alınan kırmataş ve kırma kum agregaları üzerinde alkali-silika reaktivitesine ilişkin özellikleri araştırdılar. Bu amaçla bu ocaklardan alınan agregalar üzerinde ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemi, ASTM C227 harç çubuk deneyi, ASTM C1293 beton prizma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Ocaklardan alınan numuneler ile yapılan deneyler sonucunda agregaların alkali-silika reaktivitesi açısından sakıncalı olmadığı belirtilmektedir. Kimyasal metoda göre zararsız olması muhtemel sonucu elde edilen ve diğer iki yöntemle göre zararsız çıkan agrega tiplerinden biri yoğun alkalili ortamda kullanılacaksa ortamın alkalitesine göre test edilmeli ve zararsız olduğu görüldüğü takdirde kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Araştırmada bu agreganın kullanılması halinde beton içerisindeki alkali miktarının uçucu kül, silis dumanı ve puzolan katkılı çimentolar kullanılarak azaltılmasının gerekliliği vurgulanmaktadır.

Kılınç vd. [14], yaptıkları çalışmada alkali silika üzerinde farklı mineral katkıları ile reaktif ve reaktif olmayan agrega içeren agrega kombinasyonlarının etkisi incelemişlerdir. Araştırmada çimento tipi olarak CEM I 42,5R ve farklı oranlarda (%0, %20, %30, %40 ve %50) ağırlıkça azaltılarak, çimento yerine uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Karşımda ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemine göre reaktif bir agrega seçilmiştir. Bunun yanı sıra CEM II B-M 32,5R tipi çimento kullanılarak %50 reaktif ve %50 reaktif olmayan agrega kombinasyonları içeren harç prizma numuneleri

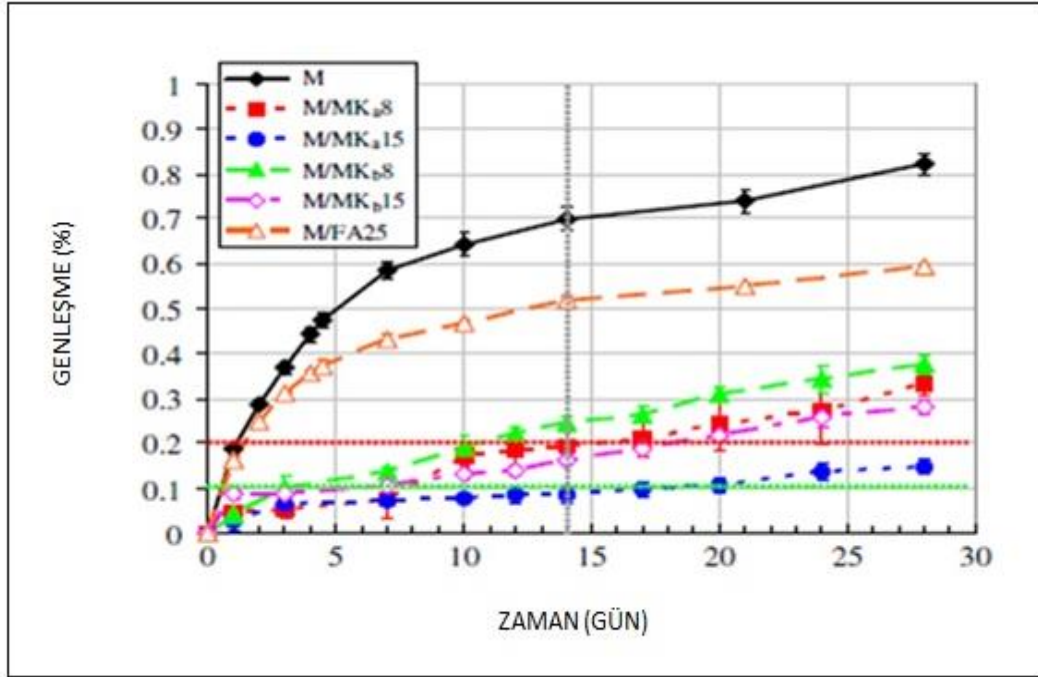
hazırlanmıştır. Reaktif agrega kullanılarak yapılan deneylerle %20 ve üzerinde uçucu kül ile %30 ve üzerinde yüksek fırın cürufu kullanımının alkali-silika reaksiyonunu önleyebileceği belirtilmiştir. Reaktif ve reaktif olmayan agrega karşımı ve CEM II 32,5R tip çimento ile üretilen numunelerden elde edilen verilere göre alkali-silika reaksiyonunun azaltılmış olduğu ifade edilmektedir. Kullanılan reaktif agrega için mineral katkı kullanımını ASR'yi azalttığı belirtilmektedir. Araştırmada uçucu külün reaksiyon üzerindeki etkisinin yüksek fırın cürufuna göre daha etkin olduğu ifade edilmektedir.

Ramyar vd. [15], uçucu kül kullanım oranının ve inceliğinin ASR genleşmeleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. ASR üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla bir tip agrega, iki tip uçucu kül ve bir tip çimento kullanarak harç çubukları hazırlamışlardır. Uçucu küller üç farklı Blaine inceliğinde üretilmiş ve beş farklı oranda çimento yerine kullanılmıştır. Hazırlanan harç numuneleri ASTM C1260'a göre yorumlanmıştır. Uçucu külün kullanım oranı arttıkça genleşmelerin azaldığı belirtilmiştir. Genleşmeler, uçucu külün kullanım oranı %20 ve daha fazla olduğunda önemli derecede azalmakta ve standart limitin altına indiği ifade edilmektedir. Uçucu kül %5 ve %10 oranında kullanıldığı zaman standart limit değerinin üzerinde genleşmelerin meydana geldiği belirtilmektedir. Özellikle inceliği düşük olan numunelerde %5 oranında kullanımda, kontrol numunesinde genleşmelerin meydana geldiği ifade edilmektedir. İncelik arttıkça genleşmelerin azaldığı belirtilmektedir. Uçucu külün inceliğinin etkisinin %20'nin altındaki kullanım oranlarında önemli derecede göze çarptığı ifade edilmektedir.

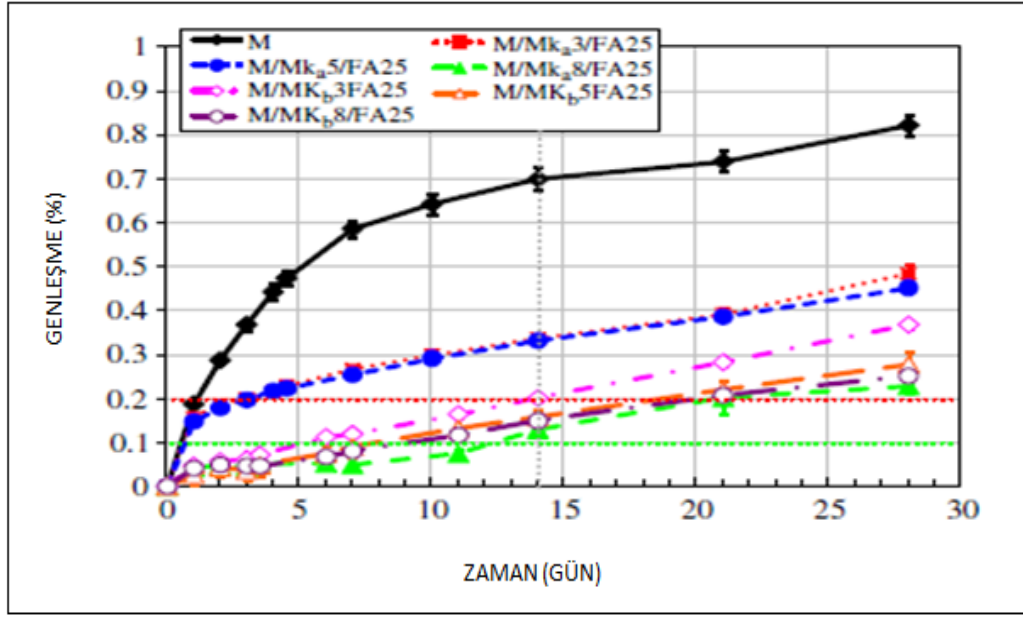
Demir [16], yaptığı çalışmada çimento yerine aynı oranlarda silis dumanı ve uçucu kül içeren harçların alkali-silika reaksiyonu etkisini araştırmıştır. ASR nedeniyle oluşan genleşmenin kontrol altına alınabilmesi için kullanılan silis dumanı ve uçucu külün genleşme ve mekanik etkileri üzerine etkisi belirlenmiştir. Yapılan deneylerde uçucu kül ve silis dumanı %0, %5, %10, %15 ve %20 oralarında çimento yerine ikame edilmiştir. Çalışmada ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk deneyi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, ASR etkisinde bırakılan örneklerin morfolojisi ve kimyasal kompozisyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji yayıcı X-ışını analizörü (EDX) kullanılarak inceleme yapıldığı belirtilmiştir. %10 oranında uçucu kül ve silis dumanı kullanımının genleşmeyi sınır değerinin altına düşürdüğü belirtilmiştir. En düşük boy uzamasının %20 oranında silis dumanı kullanıldığında meydana geldiği ifade edilmiştir. ASR etkisinde %20'ye kadar silis dumanı ikame oranının artırılması harçların mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir. Silis dumanının ve uçucu külün oranı arttıkça boy

uzamalarının azaldığı ifade edilmiştir. ASR çatlaklarının yoğun ve geniş olduğu bölgelerde kalsiyum oranının yüksek silis oranının düşük olduğu belirtilmiştir. ASR için optimum ikame miktarı sadece boy uzamasına göre değil mekanik dayanımların da göz önüne alınmasının gerektiği ifade edilmektedir.

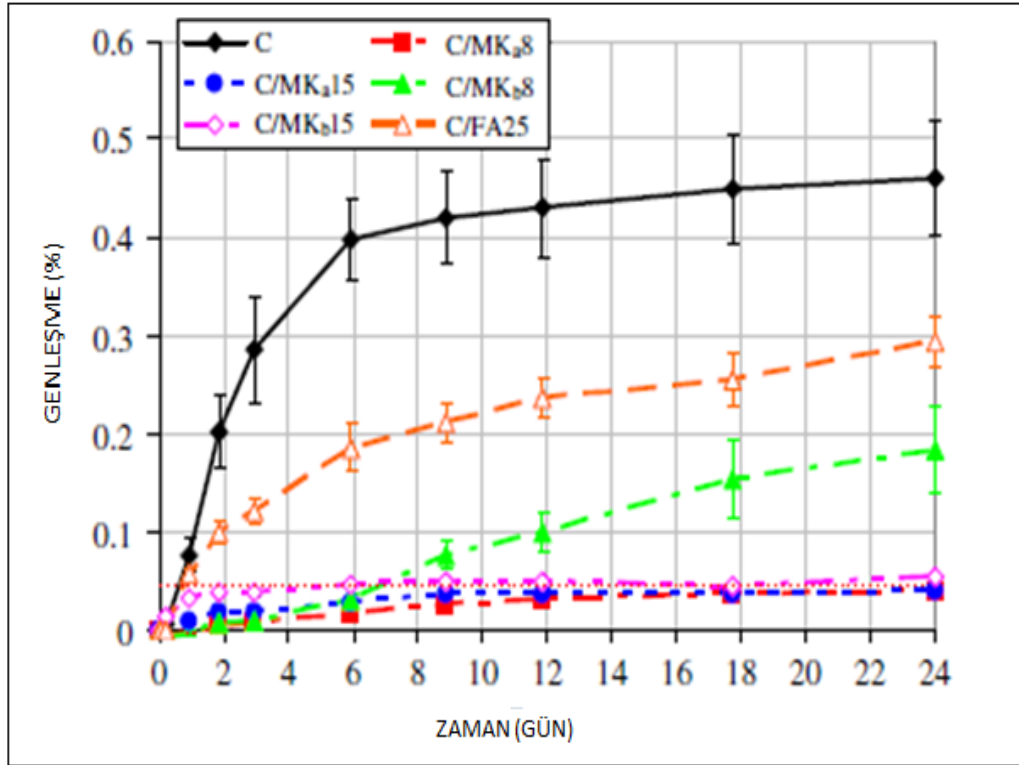
Moser vd. [17], yaptıkları çalışmada metakaolin ve C sınıfı uçucu kül kullanarak hazırlanan ikili ve üçlü karışımların alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu araştırmada ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk metodu ve ASTM C1293 beton prizma metodu kullanılmıştır. Metakaolin kullanımının C sınıfı uçucu kül kullanımından daha etkili olduğu belirtilmiştir. Metakaolinin etkinliği kimyasal bileşimi ve ince tane yapılı olması ile ilgilidir. Metakaolin ve C sınıfı uçucu kül ile hazırlanan ikili karışımların genleşmeyi %55 oranlarında azalttığı belirtilmiştir. Metakaolinin %8 oranında kullanımının genleşmeyi sınır değerinin altına indirmek için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Hazırlanan üçlü karışımların hiçbiri sınır limit değer olan %0,1'in altında değildir. Beton prizma deneyinde hazırlanan üçlü karışımlar genleşmeyi önemli ölçüde azaltmıştır. İkili ve üçlü karışımların hızlandırılmış harç çubuk deneyi ve beton prizma deneyleri sonucu genleşme yüzdeleri Şekil 2-5'te verilmektedir.



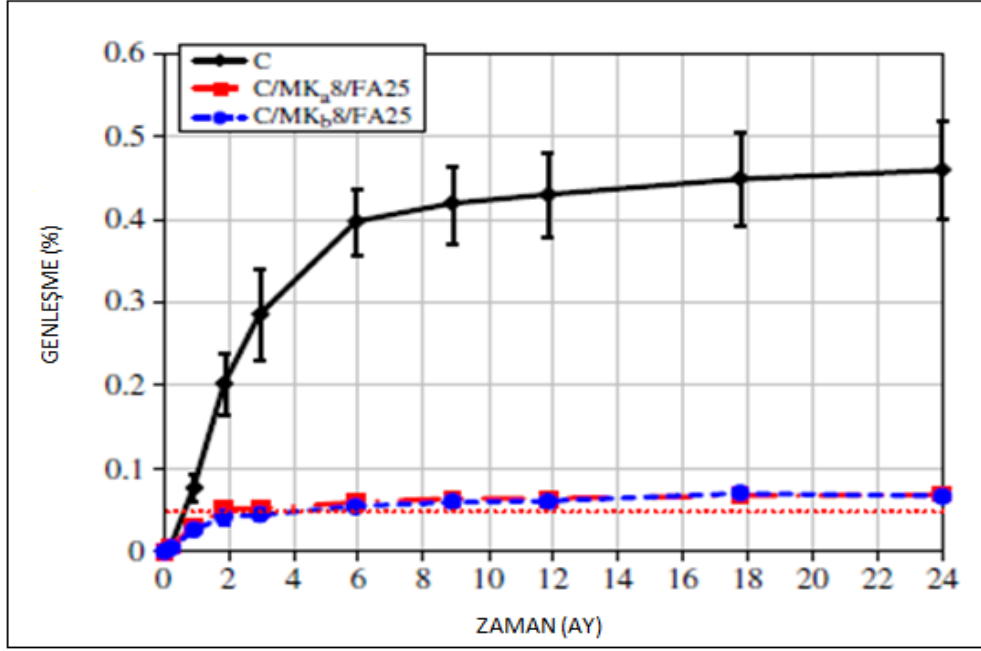
Şekil 2. Kontrol numunesi ve ikili karışımların hızlandırılmış harç çubuk deneyi genleşme yüzdeleri [17].



Şekil 3. Kontrol numunesi ve üçlü karışımların hızlandırılmış harç çubuk deneyi genişleme yüzdeleri [17].



Şekil 4. Kontrol numunesi ve ikili karışımların beton prizma deneyi genişleme yüzdeleri [17].



Şekil 5. Kontrol numunesi ve üçlü karışımların beton prizma deneyi genleşme yüzdeleri [17].

1.4. Betonda Durabilite

Betonun uygulanan yükleri taşımasının yanı sıra durabil (dayanıklı) olması zorunludur. Betonun durabilitesi, iç veya dış nedenler sonucunda oluşan bozulmalara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir.

Betonun bozulması genellikle tek bir nedene bağlanamaz. Birkaç etkinin ardı sıra birbirini tetikleyerek etkimesiyle beton ve betonarme yapılarda hasarlar görmek mümkündür. Hem beton bünyesinde hem de betonun bulunduğu ortam ile olan etkileşimlerde sıcaklığın, nemin ve kimyasalların birlikte taşınımı ve bu taşınım mekanizmalarını kontrol eden parametreler durabilitenin temel unsurunu oluştururlar.

Yapının hasar görmesine neden olan etkenler fiziksel, mekanik, kimyasal ve biyolojik kökenli olabilir [18].

1.4. Betonun Bozulma Mekanizmaları

Beton ve/veya betonarme elemanların zamanla bozulması iç ve dış etkenler sonucu meydana gelir. Dış etkiler arasında, sülfat etkisi, donma-çözünme, aşınma, karbonatlaşma

etkileri sayılabilir. Meydana gelen hasarın boyutu bu dış etkilerin şiddetine ve betonun kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Ancak beton çok şiddetli dış etkiler altında korunmazsa, çok kaliteli beton elemanlar da hasar görebilir. Betonun hasar görmesine yol açan iç etkenler fiziksel ve mekanik, dış etkenler ise kimyasal ve biyolojik olarak ele alınmıştır [18].

1.4.1. Fiziksel ve Mekanik Etkenler

Betonda bozulmaya yol açan fiziksel ve mekanik etkenler iki ana grupta toplanabilir. Bunlardan bir tanesi yüzey aşınması nedeniyle kütle kaybına yol açanlar diğeri ise betonda çatlama gibi hasar verenlerdir. Aşınma, erozyon ve oyulma kütle kaybına yol açanlar grubuna girerken, ıslanma-kuruma, boy ve hacim değişimleri, yüksek sıcaklıklar ve yangın, donma-çözünme, aşırı yükleme vb. çatlama yol açan etkenler grubunda yer alır. Fiziksel ve kimyasal etkenler birbirini tetikler özelliindedir. Beton uygulama halinde, fiziksel ve kimyasal birçok etkiye maruz kalabilmekte ve bu etkiler bir diğerrinin gelişimini hızlandırabilmektedir. Betonun fiziksel etkenlerle çatlama sonucu geçirimsizliğin artması ve buna bağlı olarak betonun kimyasal nedenlerle bozulmasının kolaylaşması bu durumuma bir örnektir.

Aşınma, döşeme ve zemin betonu gibi beton yüzeylerinin kuru sürtünme etkisi ile zamanla oluşan ve gittikçe artan kütle kaybıdır. Aşındırıcı etki; yaya trafiğinden, araç tekerleklerinden, iş makinesi paletlerinden ve/veya ağır cisimlerin sürüklenmesi gibi etkenlerden kaynaklanır.

Donma-çözünme etkisi betonun durabilitesini tehdit eden en önemli etkenler arasındadır. Donma-çözünme etkisi taze betonda suya doymuş toprak üzerindeki don etkisine benzer. Beton karıştırıldıktan hemen sonra don etkisine maruz kalırsa, su donduğu için hacmi %9 oranında artar. Bu hacim artışı da buzun boşluklara hareketine engel olmaz. Buz oluşumu sonucunda taze beton bünyesinde katı tanecikleri hareketi ile kütle transferi meydana gelir. Taze beton donduğunda da ara yüzey bağları kütle transferi nedeniyle bozulmuş olur. Sertleşmiş betonda ise, çimento harcının içindeki kapiler boşluklardaki su donar ve genişir. Genleşme sonucu oluşan gerilmeler betonun çekme dayanımının aşması halinde betonda çatlama ve ufalanma şeklinde hasarlar görülür.

Yüksek sıcaklık ve yangında betonda fiziksel etkenler arasına girmektedir. Yüksek sıcaklık altında beton belirli bir zaman önemli zarar görmez. Genelde beton belirli sıcaklık

derecelerine (250°C) belirli bir süre için dayanabilmektedir. Betonarme yapı elemanının yüksek sıcaklığa dayanıklılığını etkileyen parametreler arasında pas payı tabakasının kalınlığı, ısı transferine karşı direnç yer almaktadır. Bunun yanında çimento türüne, betonun geçirimsizliğine ve ortam koşullarına bağlı olarak serbest su beton içerisinde büyük mertebelere ulaşabilmektedir. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak beton içerisindeki serbest suyun kaybı ile oluşabilecek büzülme ve beton içinde oluşabilecek buhar basıncı, pas payı tabakasının çatlamasına ve ufalanarak dökülmesine yol açabilir. Farklı sıcaklıkların beton üzerinde oluşturduğu etkilere bakıldığında, sıcaklık 100-150°C civarlarında iken kılcal boşluklardaki ve jel boşluklarındaki suyun buharlaşması olayı gerçekleşirken, bir aşama ileri sıcaklık 150-200°C civarlarında betonda büzülme, kılcal çatlakların oluşumu, çekme dayanımında düşüş gerçekleşir. Sıcaklığın 250-300°C civarında olması basınç dayanımında düşüş meydana getirir. Sıcaklığın 400°C civarlarına çıkması sonucunda hacimde yaklaşık %33 civarında azalma görülür. Betonun daha yüksek sıcaklıklara (400-600°C) çıkarılması durumunda ise %80'lere varan dayanım azalması ve tobermorit jelinin yapısının bozulması şeklinde hasarlar meydana gelmektedir [18].

1.4.2. Kimyasal ve Biyolojik Etkenler

Betonda ortaya çıkan zararlı kimyasal reaksiyonlar, betonun geçirimsizliğinin ve gözenekliliğinin artması, çatlamlar, dökülmeler, kapak atmalar ve betonun yumuşaması, dayanımını ve rijitliğini kaybetmesi şeklinde kendini gösterebilir. Beton birçok kimyasal etkiye maruz kalabilir ve bu etkenler bir diğerinin ortaya çıkmasını tetikleyebilir.

Betonun kimyasal reaksiyonlar sonucu zamanla bozulması sürecinde çevreden iyon ve molekül gibi zararlı maddelerin beton içine taşınımı söz konusudur. Bazı durumlarda zararlı maddeler betonun kendi bünyesinden de kaynaklanabilir. Madde taşınımı olmazsa betonda zararlı reaksiyonlar da gelişemez. Bu yüzden kimyasal reaksiyonların oluşabilmesi için ön koşul, taşınımı sağlayan su ve su buharının varlığıdır.

Kimyasal reaksiyonların gelişimi, zararlı maddelerin beton bünyesine taşınım hızına bağlıdır. Bu da doğrudan betonun geçirimsizliğine ile ilgilidir.

Betonun bozulmasına yol açan kimyasal etkenler üç grupta toplanabilir. I. Grup reaksiyonlar düşük sertlikteki suların çimento hidrate bileşenlerini çözmesi ve yıkayarak beton bünyesinden uzaklaştırması şeklinde gerçekleşir. II. Grup reaksiyonlar agresif sıvıların hidrate çimento bileşenlerini çözmesidir. Reaksiyon sonucu oluşan ürünler ya

yıkanarak uzaklaşır veya suda çözünmeyen yeni bir yapı oluşturur. III. Grup reaksiyonlar ise genişleyen ürünler oluşturarak betonda hasara yol açan reaksiyonlardır. Sülfat etkisi, gecikmiş etrenjit oluşumu, tomasit oluşumu, alkali-silika reaksiyonu, alkali-karbonat reaksiyonu, kalsiyum ve magnezyum oksidin gecikmiş hidratasyonu genişleyen ürünler oluşturan reaksiyonlar grubuna girer.

Alkali-silika reaksiyonu agregalar ile çimento harcı arasında zararlı kimyasal reaksiyonların oluşması sonucu betonun çatlamasına ve bozulmasına neden olan reaksiyondur.

Biyolojik etkenler de genişleme etkisi sonucu betonarme elemanların hasar görmesine neden olur. Bitki ve ağaç kökleri betonun çatlak veya boşluklu bölgelerinden beton içine sızarak, büyüyüp genişlerler ve betonda çatlamalara neden olurlar. Suya doğru ilerleyen köklerin de özellikle beton künklerin içine sızıp boruları tıkadığı görülmüştür.

Biyolojik oluşumlar nedeniyle su içeriği artmaktadır. Su içeriğinin artması da betonun donma-çözünme ve diğer yıpratıcı etkilere karşı dayanıklılığı azalmaktadır.

1.5. Alkali-Silika Reaksiyonu

Evrensel bir problem olan alkali-silika reaksiyonu birçok betonarme yapıda hasarlar meydana getiren oldukça karışık kimyasal bir reaksiyondur. Çimentoların bünyesinde bulunan Na_2O ve K_2O gibi alkali oksitler, aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerek, zamanla betonda hasara yol açan bir jel oluşumuna sebep olurlar. Bu jel de nem ortamında su alarak genişler. ASR'den kaynaklanan bu genişleme belli bir sınır değeri aştığında beton için potansiyel bir tehlike oluşturur.

Genleşmeye neden olan alkali-silika reaksiyonunun oluşabilmesi için agreganın reaktif silis içermesi, yeterli miktarda alkali (sodyum ve potasyum) ve ortamda nem bulunmalıdır. Bu üç unsurdan herhangi birinin olmayışı alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşacak genişleme de meydana gelmeyecektir. Alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşan genişleme iki aşamada gerçekleşmektedir [18].

1.) Alkali + Reaktif Silika \rightarrow Alkali-Silika jel ürünleri

2.) Alkali-Silika jeli + Nem \rightarrow Genleşme

Reaksiyon sonucu oluşan jelin yüksek oranda su tutabilme özelliği vardır ve bu jelin genleşmesi sonucu basınç içsel gerilmelerinin oluşmasına sebebiyet verdiği ifade edilmektedir. Betonda içsel gerilmelerin oluşumu, birinci aşamadaki jel oluşumu ile aynı zamanda değildir. Bu sebeple ortamdaki jelin varlığı mutlak ciddi boyutta ASR hasarı oluşması anlamı taşımaz. Fakat birinci aşama gerçekleşmeden genleşme oluşmamaktadır.

Alkali-silika reaksiyonunun birinci aşamasında oluşan jelin ilerleyen safhalarında çimento hamurundan su emmek suretiyle hacmini attıran jel agregası ve çimento hamurunda mikro çatlakların oluşmasına sebep olabileceği belirtilmektedir. Mikro çatlaklarda yayılan jelin giderek artması ile betonda çatlakların oluşmasına ve mukavemet kaybına yol açtığı belirtilmektedir [19].

Jel üzerinde yapılan bir çalışmada, ASR'nin belli viskozite ve özelliklere sahip jeli şişme ve hacimsel olarak büyüme özelliği taşıırken bu jellerin karakteristik özellikleri tam olarak belirlenmediği vurgulanmaktadır [20].

Yapılan çalışmalarda bazı jellerin çok az bazıları ise hemen hemen hiç genleşme özelliği göstermedikleri belirtilmektedir. Jellerin su emme özelliğine göre genleşmelerin betonda yarattığı içsel gerilmeler betonun çekme dayanımını aşınca betonda çatlakların oluştuğu belirtilmiştir.

Alkali-silika reaksiyonu da alkali-agrega ve diğer reaksiyonlar gibi birçok faktörün etkisi altındadır. Alkali-silika reaksiyonu yavaş ilerleyen bir reaksiyon olduğu için genleşme nedeniyle betonun içyapısında oluşan çatlaklar uzun süre sonra belirginleşir [19].

Alkali-silika reaksiyonunun oluşabilmesi için çimento alkali içeriğinin “eşdeğer Na_2O ” değeri olarak %0,6 değerini aşması gerekmektedir. Portland çimentosunun toplam alkali içeriği sodyum oksit eşdeğeri olarak aşağıda formül ile hesaplanmaktadır:

$$(\text{Na}_2\text{O})_e = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O} \quad (1.1)$$

Hidrolik bağlayıcıların büyük çoğunluğunun hammaddelerinde alkalin mineraller bulunmaktadır. Bu, çimentoların içinde sodyum ve potasyum elementlerinin çoğu zaman

bulunacağı anlamına gelmektedir. Alkali içeriğinin çimento içindeki oranları %1,3'ü geçmediği halde çimento ve betonun özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu maddeleri üretim sırasında elimine etmek güç ve ekonomik açıdan imkânsızdır. Bundan dolayı bunların zararlı etkileri iyice bilinmeli ve önlem alınmalıdır.

Çimentoda bulunan sodyum ve potasyum oksitler çimentonun hammaddeleri olan kil ve kireçtaşından kaynaklanır. Ayrıca alkaliler çimento dışında agrega, karışım ve zemin suyu, kimyasal ve mineral katkılar, buz çözücü tuzlar ve endüstriyel atık suları aracılığıyla betonun bünyesine girebilir.

Genelde, sadece çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalitesi dikkate alınmaktadır. Bunun dışında betona ilave edilen kimyasal ve mineral katkı maddeleri de varsa ilave edilen alkali miktarı dikkate alınır. Beton içine alkali girişi yalnızca çimentodan kaynaklanıyorsa alkali içeriği şu eşitlikle hesaplanır.

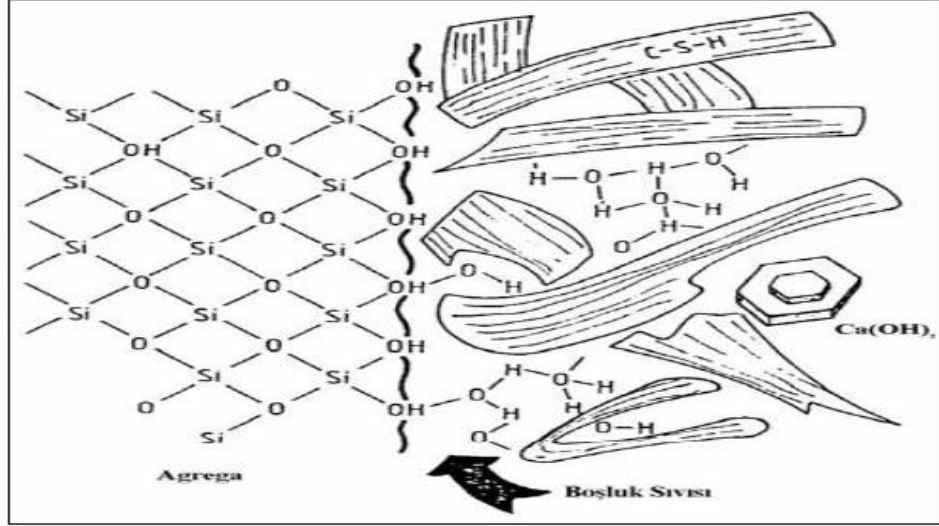
$$\begin{aligned} [\text{Çimentonun Alkali Oranı}] \times [\text{Çimento Dozajı (kg/m}^3\text{)}] &= \text{Betondaki Alkali Miktarı} \\ \text{Miktarı (kg/m}^3\text{)} & \quad \quad \quad \text{(kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

Alkali-silika reaksiyonunun kimyasına bakıldığında çimento hidratasyonu ilk aşamalarında sıvı faz katı faza göre daha baskındır. Fakat hidratasyon devam ettikçe sıvı faz azalmakta ve yerini C-S-H ve C-H gibi hidratasyon ürünlerine bırakmaktadır. Böylece sıvı fazın devamlılığı azalır.

Portland çimentonun hidratasyonu sonucu gerçekleşen betonun boşluk çözültisi, sodyum (Na⁺), potasyum (K⁺), kalsiyum (Ca⁺) ve hidroksil (OH⁻) iyonları içermektedir. Hidrate olmamış portland çimentosunun miktarı sodyum, potasyum ve hidroksil iyonlarının boşluk suyundaki konsantrasyonunu etkiler. Düşük alkali içerikli çimento ile üretilen betonun boşluk suyu pH değeri 12,7 ile 13,1 arasında değişirken yüksek alkali içerikli çimento ile üretilen betonlarda boşluk suyunun pH değeri 13,5 ile 13,9 arasında değişebilmektedir. Aradaki bu farktan yüksek alkali içerikli çimento ile üretilen betonun boşluk suyundaki hidroksil iyonu konsantrasyonu düşük alkali içerikli çimento ile üretilen betonun 10 katı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır [21].

Agregalar hidroksilce zengin bir ortamda hidroksile olma potansiyeli artar. Kuvars için de böyle bir potansiyel söz konusu olabilir. Sıcaklık, reaksiyonu belirgin bir şekilde hızlandırır; hidrotermal koşullarda ince öğütülmüş kristalin kuvars oldukça reaktiftir. Fakat

reaktif agregalar normal ortam koşullarında bile kristalin kuvarsa kıyasla oldukça hızlı hidroksile olur [6].



Şekil 6. Agregaya yüzeyi ile temas halinde olan boşluk çözeltisi ve çimento hidratasyon ürünleri [6].

1.5.1. Alkali-Silika Reaksiyonunun Belirtileri

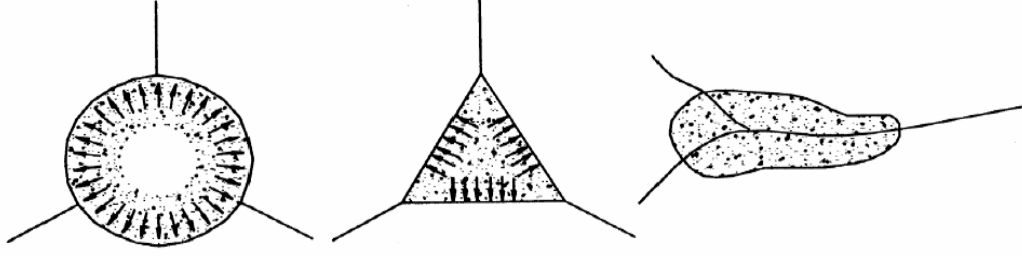
Betonda alkali-silika reaksiyonu ürünleri meydana gelmedikçe reaksiyon sonucu oluşacak hasarlardan bahsetmek söz konusu değildir. Alkali-silika reaksiyonu sonucunda genleşme, deformasyon, çatlaklar, jel sızması ve renk değişimi gibi çeşitli hasarlar meydana gelebilir. ASR varlığının en yaygın örneği genleşme sonucu ortaya çıkan harita çatlakları şeklindeki çatlak desenleridir. ASR sonucu oluşan çatlakların zemin ve diğer yüklerin neden olduğu çatlak düzenlerinden oldukça farklıdır.

Alkali-silika reaksiyonu sonucu yüzeye çok yakın bölgelerdeki parçalanmalar betonda küçük çukurlar oluşturur. Çoğunlukla nemli ve ıslak zeminler üzerinde bulunan beton kaplamalarda, rutubetin artması patlama türü parçalanmaları artırır.

ASR'nin oluşturduğu jelleşme, agregaya taneciği iç kısmında veya agreganın çevresinde reaksiyon halkası şeklinde gerçekleşebilir. Olabildiğince su emerek enerjisini boşaltan bu jel, su emdikçe hacimsel olarak şişer. Hacimsel artış beton içerisinde yaklaşık 10 MPa veya daha büyük çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Betonun çekme dayanımı basınç dayanımına kıyasla çok düşük olması nedeniyle alkali-silika reaksiyonu

sonucu meydana gelen genleşmenin C40/50 sınıfı beton için bile risk oluşturabileceği açıktır [18].

ASR sonucu meydana gelen çekme gerilmelerinin neden olduğu çatlama biçimi genellikle üç veya dört kollu yıldız şeklindedir [18].



Şekil 7. Alkali-silika reaksiyonu sonucu meydana gelen çatlaklara ilişkin örnek görünüşler [18].

Alkali-silika sonucu meydana gelen renk kaybı ve renklenmeler çoğunlukla harita çatlağı ile birlikte ortaya çıkar. Koyu renkli ve kararmış bölgeler çoğunlukla alkali-silika reaksiyonu sonucu meydana gelmez. Renk değişimi çatlak boyunca renk açılması, beyazlaşma, pembeleşme veya kahverengileşme olarak görülebilir.

Alkali-silika sonucu ortaya çıkan belirtiler birçok betonarme yapıda ortaya çıkmaktadır. Ülkemizin İzmir bölgesinde de son 15-20 yılda inşa edilmiş betonarme köprü ve viyadüklerde ASR sonucu oluşan tipik harita şeklindeki çatlaklara benzer hasarlar tespit edilmiştir [18].

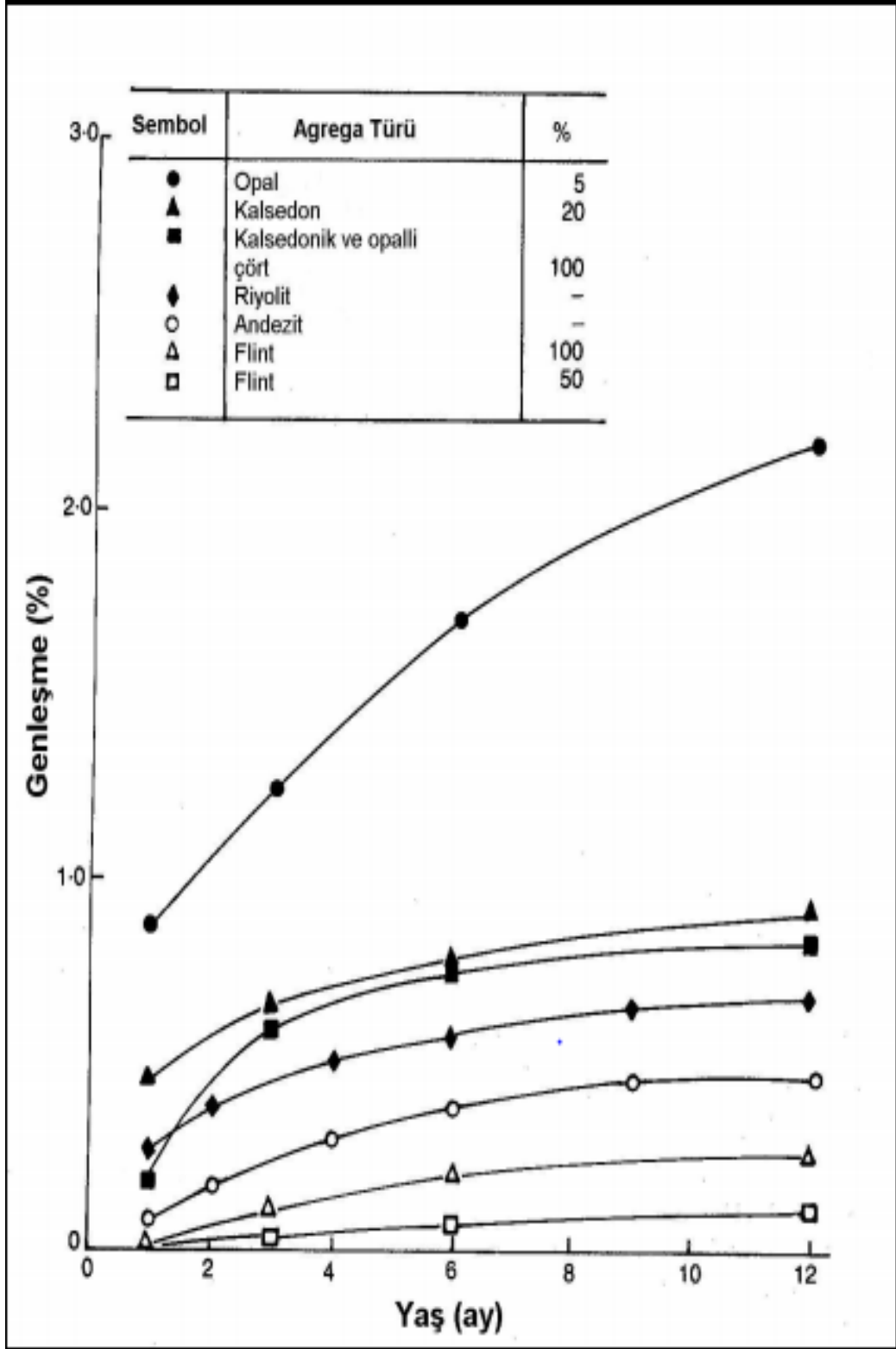
1.5.2. Alkali-Silika Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler

Alkali-silika reaksiyonunun oluşumu için üç temel koşul olan yüksek pH, reaktif silika ve yeterli nemin bir arada bulunması gerekir. Aşağıda bu üç temel faktörün yanı sıra alkali-silika reaksiyonuna etkiyen su/çimento oranı, reaksiyon hızı gibi etkenlerden bahsedilecektir.

1.5.2.1. Agreganın Reaktifliği

Japonya`da 40 yılı aşkın süredir beton yapılar üzerinde alkali-silika reaksiyonu araştırılmaktadır. Reaksiyona neden olan agregaları, kayalardaki reaktiviteyi ve reaktif kayaların dağılımını belirlemek için çalışılmaktadır. Beton içerisinde alkali-silika reaksiyonundan etkilenen veya etkilenmesi mümkün olan porfirit, andezit, dasit, riyolit, kumtaşı, şeyl ve çört gibi bozunmuş veya bozulma eğilimli kayalar kimyasal metotlar aracılığıyla tanımlanmıştır.

Betonda ASR`nin oluşabilmesi için yukarıda ifade edildiği gibi herhangi bir formda reaktif silisin bulunması gerekmektedir. Agregadaki reaktif silis oldukça farklı kristal yapı gösterir. Ayrıca kayaç oluşma sürecindeki azalan soğuma hızına bağlı olarak da reaktif silis farklı doku gösterebilir. Agregadaki silisli mineraller kayaç oluşum sürecinde amorf ve kristalleşmemiş yapıdan kripto kristal, mikro kristal ve kristal yapıya kadar geniş bir aralıkta dağım gösterir. Kuvars kristallerinin oluşumu sırasında içsel gerilmeler meydana gelmektedir. Bu tür kuvars mineralleri içeren agregalar reaktifdir. Şekil 8`de agrega türüne bağlı olarak genişleme-zaman arasındaki ilişki verilmektedir. Tablo 1`de mineral ve kayaların reaktivite seviyelerine göre sıralaması verilmektedir [22].



Şekil 8. Farklı tür agregaların genleşme davranışı [21].

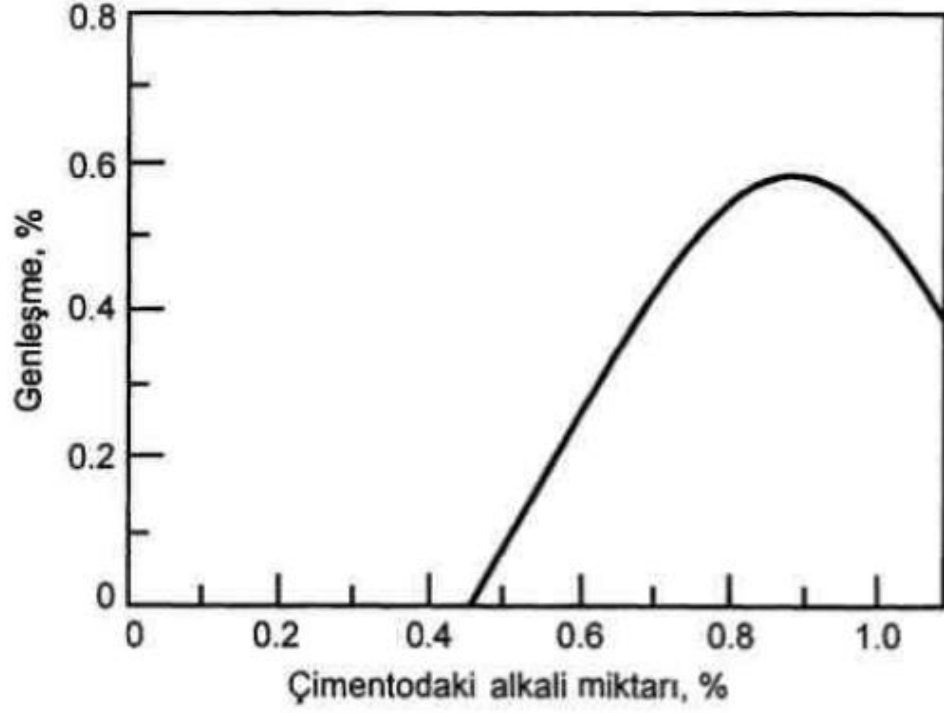
Tablo 1. Reaktivite seviyelerine göre mineral ve kayaçlar [22].

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

1.5.2.2. Betonun Alkali İçeriği

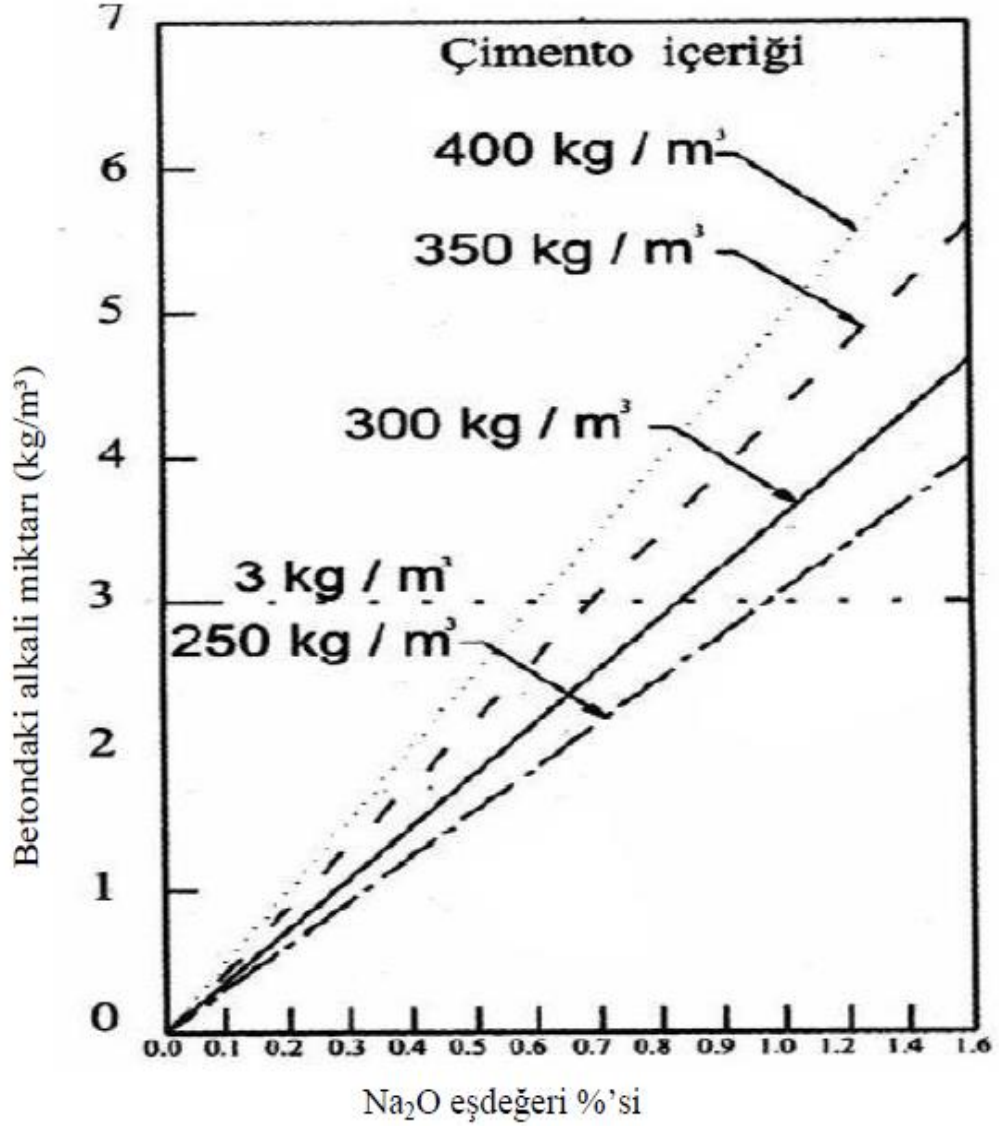
Alkali mineraller hidrolik bağlayıcıların büyük çoğunluğunun hammaddeleri içinde bulunmaktadır. Bu çimentonun içindeki sodyum ve potasyum elementlerinin alt bileşenlerinin çoğu zaman bulanacağı anlamını taşımaktadır. Alkalilerin çimento içindeki yüzdeleri çok küçük olmasına rağmen çimento ve beton özelliklerini olumsuz yönde etkilerler. Bu yüzden bu alkalileri bertaraf etmek zor olduğu için beton üretenlerin zararlı etkilerini iyice öğrenmeleri ve buna göre önlem almaları gerekmektedir [21].

Şekil 9'da görüldüğü gibi çimentonun alkali miktarı yaklaşık %0.5'den başlayarak %0.9'a kadar yükselmesi durumunda genleşme sürekli artmaktadır.



Şekil 9. Çimentodaki alkali miktarının alkali-silika genleşmesine etkisi [24].

Betonun alkaliliği arttıkça ASR potansiyeli de artmaktadır. Betonun hidroksil iyonu konsantrasyonu ASR için önemli olduğundan çimentonun alkali içeriği de önem kazanır. Betonda kullanılan çimentonun alkali içeriğinin değişmesi betonun pH derecesini, hidroksil iyon konsantrasyonunu, alkali içeriğini ve reaktif silis/alkali oranını değiştirir. Genelde yalnızca çimento ve çimento özelliği olan malzemelerin alkalilik derecesi göz önüne alınmaktadır. Çünkü alkali miktarına katkıda bulunan diğer etkenlerin yüzdesi oldukça düşüktür. Şekil 10'da çimento dozajı ve çimentonun sodyum oksit (Na_2O) eşdeğeri yüzdesine bağlı olarak 1 m^3 betondaki alkali miktarı verilmektedir [25].



Şekil 10. Çimento dozajı ve çimentonun sodyum eşdeğeri yüzdesine bağlı olarak betondaki alkali miktarları [25].

Beton üretiminde kullanılacak agregada alkali-silika reaksiyonu tehlikesi söz konusu olduğunda Kanada ve Avrupa ülkelerinde betonda alkali miktarı 3 kg/m³ ile sınırlandırılmaktadır. Betona kimyasal ve mineral katkıları ilave edilmesi halinde bunlardan gelen ilave alkali miktarı da dikkate alınmalıdır. Beton alkaliliğini kontrol etmek için çimento alkaliliğinin düşük düzeyde tutulması gerekmektedir. ASR'nin neden olduğu genişlemenin azaltılması için düşük alkali içerikli çimento kullanımı kabul gören bir yöntemdir. ASTM C150'e göre düşük alkalili çimento sodyum oksit eşdeğeri (Na₂O) %0.60'dan az olan çimentodur [25].

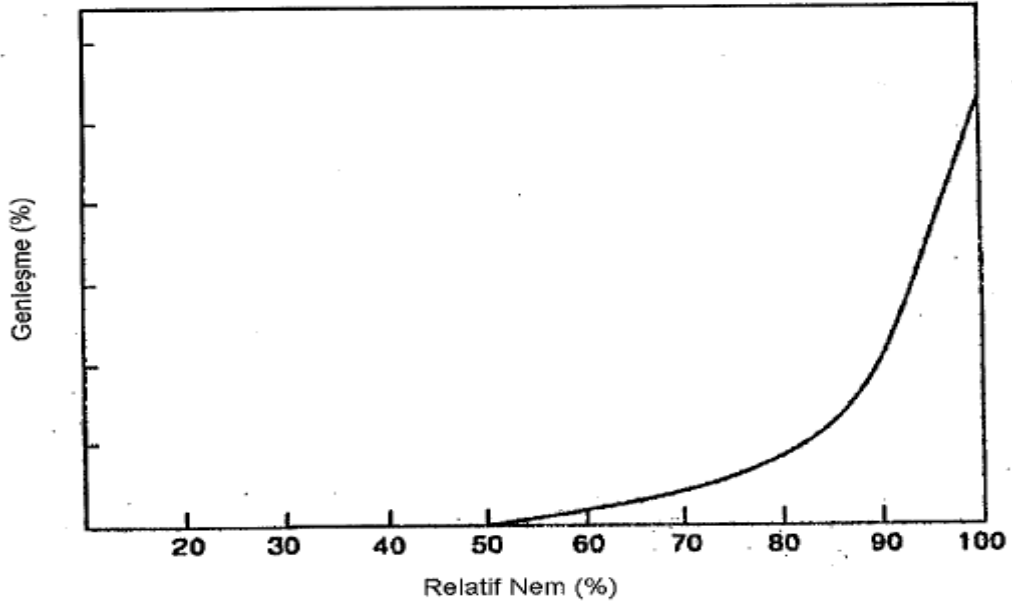
Düşük alkali içerikli çimento kullanılsa bile bazen ASR tehlikesi söz konusu olabilir. Betonda su veya bağıl nemin hareketi sonucu belli noktalarda alkali konsantrasyonunun

oluşması, agreganın ileri derecede reaktif olması, betonda kullanılan kimyasal ve mineral katkılardan, karma suyu ve agregadan ilave alkali gelmesi durumunda ve çimento miktarının yüksek olması halinde betonun alkali içeriği de yüksek çıkabilir [26].

1.5.2.3. Nem

Ortamda yeterli miktarda nem bulunması durumunda alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşan alkali-silika jeli bünyesine su emerek genişleme basıncı oluşturur ve bunun sonucunda çekme gerilmeleri meydana gelir. Buna bağlı olarak ASR nedeniyle betonda önemli ölçüde hasar meydana gelebilir.

Beton kuru bir ortamda bulursa dahi boşluk suyu içerir ve 10-20 cm üst tabakanın dışında beton içinde bağıl nem %80-90 mertebesine ulaşabilir. ASR'nin reaktiflik derecesi betonun bağıl nemine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. %70 bağıl nemin altındaki durumlarda genişleme ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak bu değer %80'in üzerine çıktığında genişlemede belirgin bir artış görülebilir [27].

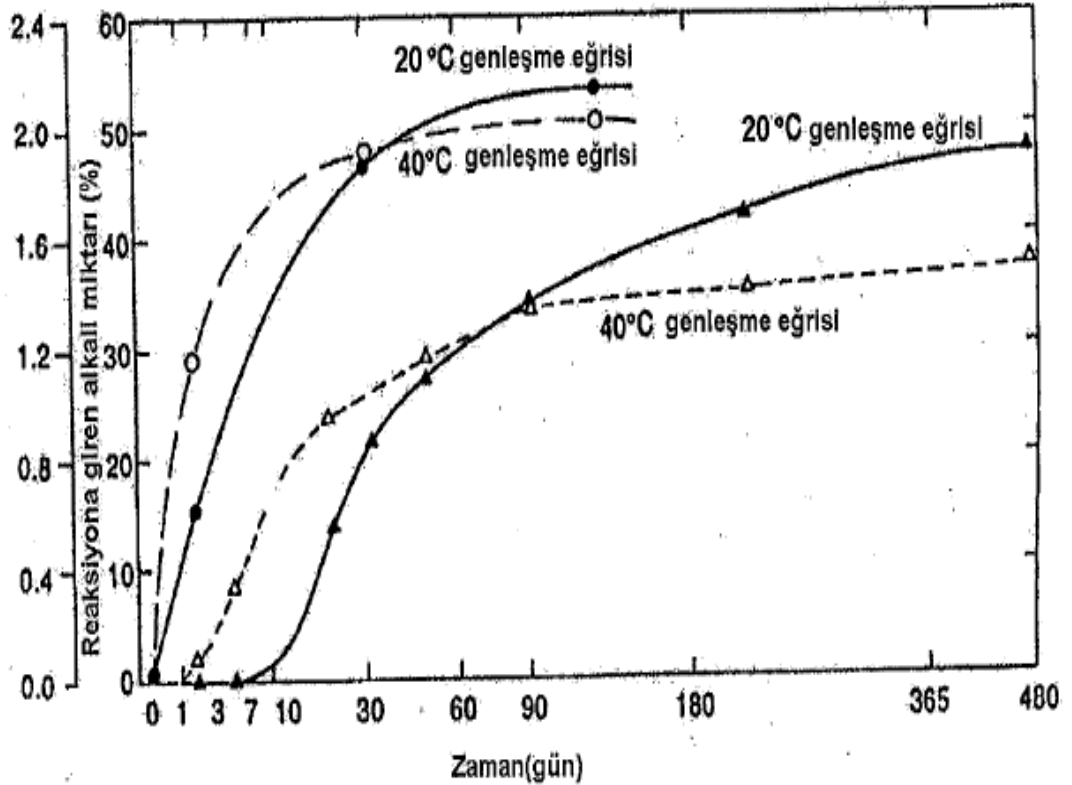


Şekil 11. Nemin ASR nedeniyle betonda oluşan genişleme üzerindeki etkisi [27].

1.5.2.4. Sıcaklık

Sıcak iklim koşullarındaki yapılar soğuk iklim koşullarındakine göre ASR`ye karşı daha duyarlıdır. Çünkü sıcaklık arttıkça reaksiyonda hızlanmaktadır. Sıcaklık artışıyla birlikte ASR`nin gelişimi de hızlanmaktadır. Sıcaklık artışı agregalarda aşırı ısıl gerilmelere neden olur. Bazı agregalar üzerinde yapılan çalışmalarda 13-20°C arasında ASR genleşme ölçümlerinin 38°C`deki ölçümlere göre önemli derecede fark ettiği belirtilmektedir [28].

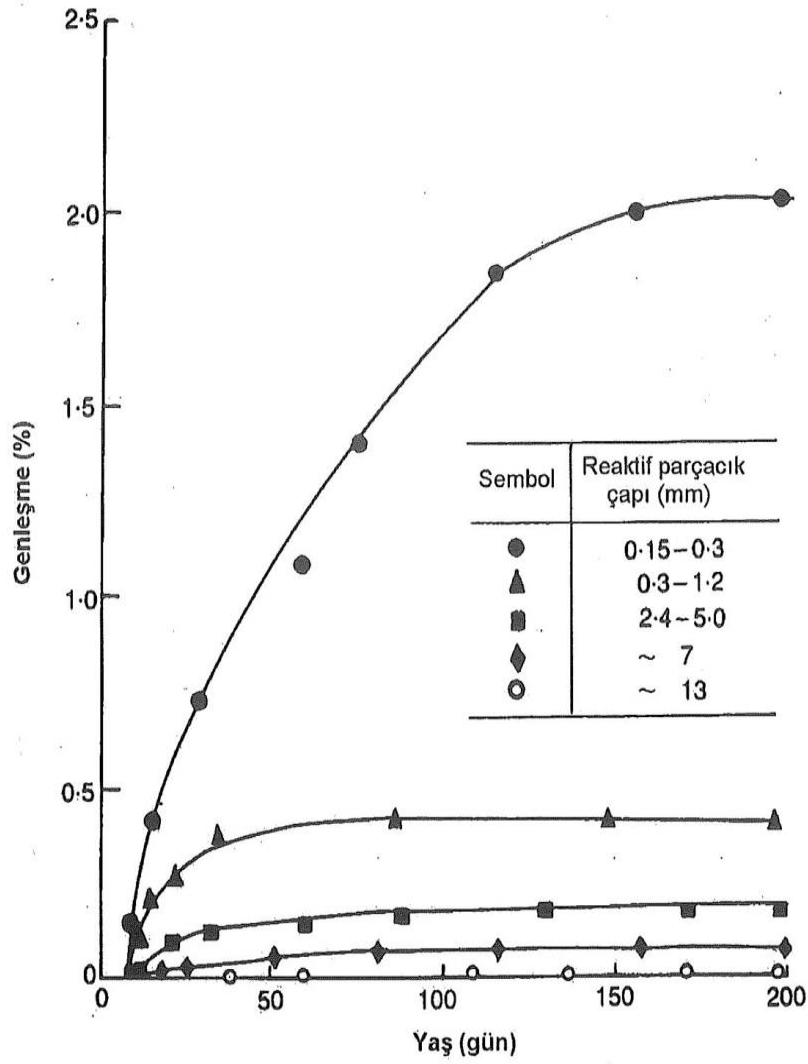
Alkali-silika jelinin akışkanlığının artmasıyla birlikte çatlakların içine önemli bir basınç yaratmaksızın girmesinden sonra jelin su içeriğinin maksimum şişme basıncını veren bir seviyeye ulaştığı bir safha vardır. Düşük sıcaklıklarda bu periyot daha uzundur ve bu yüzden bir miktar daha genleşme görülebilir. Bununla ilgili davranış opal içerikli harç örnekleri üzerinde gösterilmiştir [28].



Şekil 12. Zamana bağlı genleşme-sıcaklık ilişkisi [28].

1.5.2.5. Agreganın Tane Büyüklüğü

Reaktif agreganın tane büyüklüğü ASR nedeniyle meydana gelebilecek hasarlar üzerinde etkilidir. Yapılan birçok çalışmaya göre reaktif tane boyu azaldıkça genişlemede artışlar tespit edilmiştir. Fakat ASR çatlaklarının başlangıç zamanı tane boyutundan bağımsızdır [21].

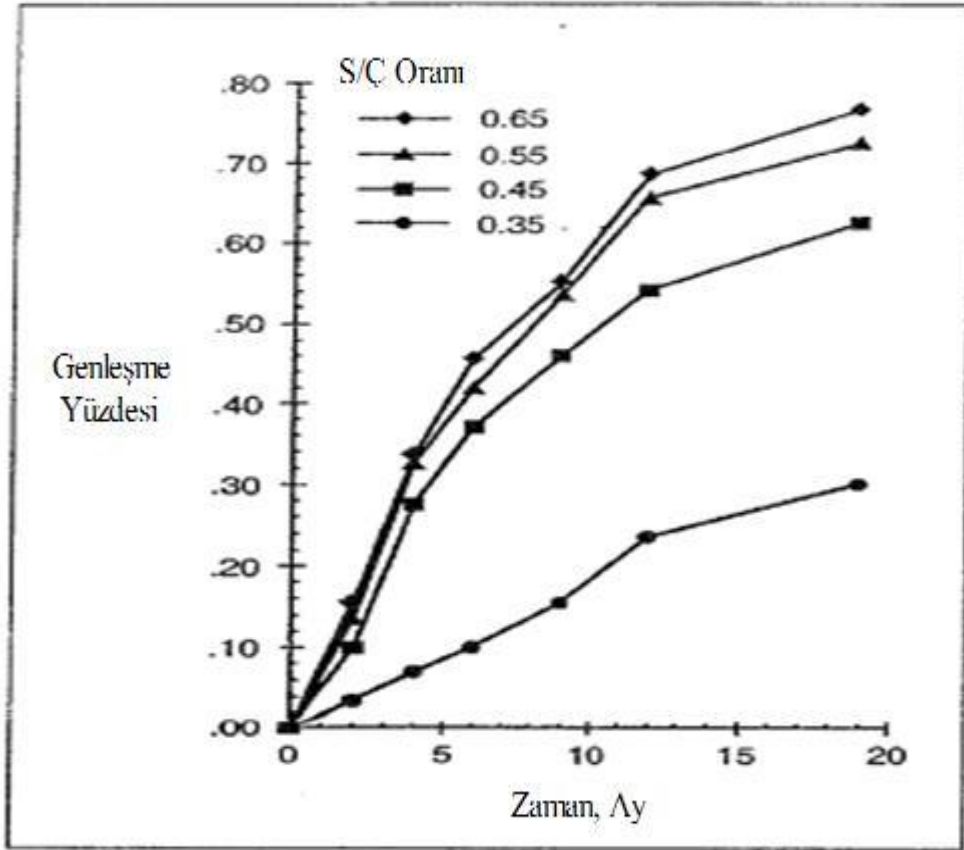


Şekil 13. Reaktif tane boyutunun genişleme-yaş ilişkisi üzerindeki etkisi [21].

1.5.2.6. Su/Çimento Oranı

Reaktif agrega içeren bir betonda karışım oranlarının değiştirilmesi betonun birçok özelliğini etkiler. Bunların içinde reaktif agrega içeriği, alkali içeriği, hidroksil iyonu konsantrasyonu, betonun dayanım ve dayanıklılığı sayılabilir. Düşük su/çimento oranlarının beton üzerinde olumlu etkileri vardır. Beton daha boşluksuz ve daha geçirimsiz bir yapıya sahip olur. Düşük su/çimento oranlarında betonun dayanımı daha yüksektir.

Düşük su/çimento oranının beton üzerinde olumlu etkileri olduğu gibi ASR üzerinde de olumlu etkisi vardır. Alkali-silika reaksiyonun zararlı etkilerine karşı düşük su/çimento oranları daha güvenlidir. Şekil 14'de su/çimento oranı arttıkça genleşmenin arttığı görülmektedir [29].



Şekil 14. Su/çimento oranı ile ASR sonucu oluşan genleşme arasındaki ilişki [29].

1.6. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Mineral katkıları, yalnız başına bağlayıcı özelliği olmayan ince öğütüldüğünde ve nemli ortamda çimento hidrasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğine sahip bileşenleri oluşturan silisli veya silisli alüminli malzemelerdir. Mineral katkı olarak uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve zeolit sıklıkla kullanılan malzemelerdir [30].

Betonun dayanımı ve durabilitesini arttırması açısından önemli olan mineral katkıları alkali-silika reaksiyonundan oluşabilecek zararlı genleşmeleri önlemek için de kullanılır. Mineral katkı kullanımı, ekonomik, teknik, enerji tasarrufu ve çevrenin korunması açısından birçok avantajı vardır [31].

Mineral katkıların ASR genleşmelerini azaltma konusunda farklı teoriler önerilmektedir [32].

- a) Mineral katkı maddeleri ile çimento arasında oluşan puzolanik reaksiyon sonucu daha yoğun bir yapıya sahip çimento harcı oluşur ve bunun sonucunda çimento harcının geçirimsizliği azalır. Geçirimsizliğin azalmasıyla iyonların hareketliliği, dışarıdan alkali ve nemin girişi de azalmış olur. Dolayısıyla reaksiyonun oluşum hızı büyük oranda yavaşlatılmış olur.
- b) Mineral katkı maddeleri, çimento hamurunun Ca(OH)_2 içeriğini azaltır ve pH değerini düşürür.
- c) Mineral katkıları boşluk suyunun alkaliliğini azaltır. Oluşan C-S-H jeli daha fazla alkaliyi bünyesinde tutabilme özelliğine sahiptir ve daha az alkali açığa çıkar.
- d) Mineral katkı maddeleri ile daha yüksek değerlere ulaşan betonun dayanımı, ASR genleşmesi nedeniyle oluşan gerilmelere karşı mukavemetin artmasını sağlar.
- e) Mineral katkıları ortama hızlı alkali veren portland çimentosu yerine kullanıldığında seyreltici olarak görev yapar. Örneğin, çimentonun yerine %50 oranında cüruf kullanıldığında cürufun bünyesindeki alkalilerin ancak yarısı bir yıl içerisinde reaksiyona girer. Buna bağlı olarak, su/çimento oranı aynı olan katkı olmaksızın sadece çimentodan üretilmiş bir kontrol numunesine kıyasla cüruf lu karışımın boşluk çözeltisindeki alkali miktarı da daha düşük olmaktadır.

1.6.1. Uçucu Külün Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Düşük kalorili olmaları nedeniyle başka yerlerde kullanılmayan kömür ve artıkları öğütülüp yakılarak termik yoldan elektrik enerjisi elde etmek için kullanılır. Termik santrallerde toz halindeki kömürün yanmasından sonra baca filtrelerinde tutulan uçucu kül, enerji ihtiyaçlarının artmasıyla birlikte birikimi de çok fazla olmaktadır. Uçucu küller önemli yer işgal etmekte ve çevreyi olumsuz etkilemektedir. İnşaat sektöründe uçucu kül, kontrollü olarak kullanımı ile ekonomik bir şekilde değerlendirebilmektedir [33].

Uçucu küller, bileşimine bağlı olarak ASTM C 618'e göre F sınıfı ve C sınıfı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu külün genleşmeyi kontrol etmede etkinliği kabul edilmiştir. C sınıfı uçucu külün ise F sınıfı uçucu kül kadar etkili olmadığı görülmüştür.

Yapılan çalışmaların birinde farklı uçucu kül ve farklı tip agregalarla yapılan deneyler sonucunda F sınıfı uçucu kül için tavsiye edilen minimum kullanım yüzdeleri 15 ile 25 arasında değişmektedir. C sınıfı uçucu kül için ise %60'ın üzerinde kullanımı gerekmektedir [34].

Uçucu külün kullanım oranının etkisinin incelenmesi üzerine yapılan farklı bir çalışmada ise ASTM F sınıfı uçucu küller için minimum kullanım oranları %15 ile 25 arasında değişmektedir. ASTM C sınıfı uçucu kül için ise %60'ın üzerinde kullanılması gerektiği belirlenmiştir [15].

Uçucu küllerin ASR genleşmeleri üzerindeki etkileri, çimentonun ve uçucu külün kimyasal ve mineralojik özellikleri agreganın reaktivite derecesine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu bağlamda yapılan bir çalışmada yavaş reaksiyona giren agregalar için çimentonun kütlece %20-30 oranında uçucu küle yer değiştirilmesi halinde ASR sebebiyle oluşabilecek genleşmelerin azaldığı belirlenmiştir [6].

Uçucu külün alkali içeriği alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkinliği bakımından oldukça önemlidir. Yapılan bir çalışmada, düşük, orta ve yüksek alkali içerikli portland çimentosu ile %6 oranında uçucu kül yer değişikliği yapıldığında alkali-silika reaksiyonun oluşturduğu genleşmeyi ve çatlak riskini arttırmaktadır. Uçucu külün %25 oranında kullanılması halinde yüksek ve orta alkali içerikli çimentoda genleşmeyi azaltmıştır. Düşük alkali içerikli çimentoda ise yer değişiminin uzun dönemde genleşme üzerinde çok etkili olmadığı görülmüştür [35].

1.6.2. Silis Dumanının Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Silis dumanı, silisyum metalinin veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi aşamasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin, kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilir. Silikon metali veya ferrosilikon üretimin bir yan ürünü olan silis dumanı portland çimentosundan 100 kat daha ince, küresel şekilli, kristal olmayan tanelerden oluşan oldukça ince yapıya sahip bir puzolandır. Portland çimentosuyla karşılaştırıldığında silis dumanı çok yüksek yüzey alanına ($200000 \text{ cm}^2/\text{g}$) sahiptir. Silis dumanı yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir [33].

Silis dumanı alkali-silika reaksiyonunu kontrol etmede oldukça etkili bir puzolanik malzemedir. Geçirimsiz ve yoğun bir yapı oluşturarak boşluk suyunun hidroksil iyonu konsantrasyonunu düşürür. Silis dumanı alkali-silika reaksiyonunu beton taze halde iken hızlandırır. Silis dumanının alkalilerle hızlı reaksiyona girebilme yeteneği özgül yüzeyinin çok geniş olmasına dayanır. Yeterli miktarda silis dumanının kullanılması durumunda çimentodaki alkaliler beton dayanım kazanmadan önce erken yaşlarda silis dumanı ile reaksiyona girerler ve tükenirler. Boşluk suyundaki alkalilerin tümü veya çoğu beton dayanım kazanmadan önce tüketilirse agregadaki reaktif bileşenler ya reaksiyon oluşturamaz ya da oluşabilecek reaksiyon ürünü sertleşmiş betonda genleşmeye yeterli olacak kadar yeterlikte değildir [36].

Silis dumanı puzolanik aktivitesinden dolayı harç veya beton, yeni oluşan C-S-H jelleri ile daha yoğun yapıya sahip olacak ve böylece yapı elemanı içerisine nem girişi daha zor olacaktır. Alkali-silika reaksiyonuna etki eden faktörlerden nemin yapı elemanına girişi önlenerek alkali ve reaktif silisin oluşturduğu jellerin şişmesi önlenmiş olacaktır [37].

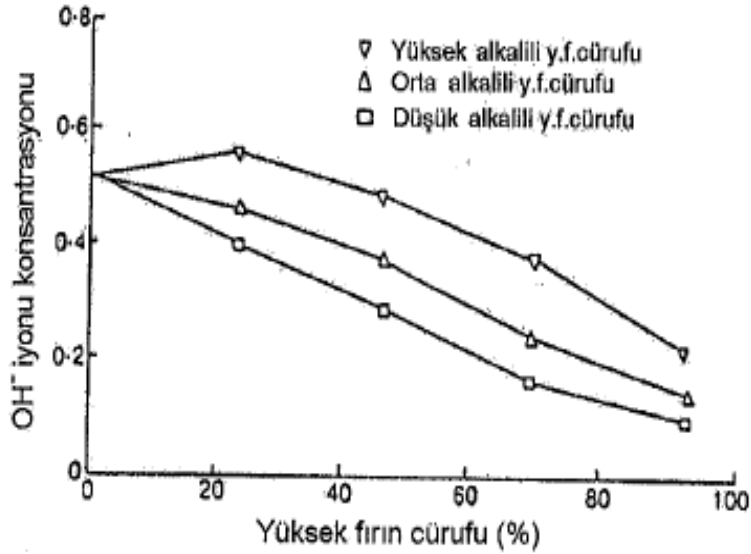
Silis dumanının harç veya betondaki kullanım oranı alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisi bakımından oldukça önemlidir. Silis dumanının belli oranlarda kullanıldığı zaman genleşmede belirgin şekilde azalmalar meydana geldiği belirtilmektedir. Yapılan bir çalışmada çimento yerine %5 gibi az bir oranında silis dumanı kullanıldığı zaman harç çubuklarda ASR etkisinden dolayı genleşmenin azaldığı fakat tehlikeli kabul edilen genleşme değerini yine de aştığı, çimento yerine %10 ve daha yüksek oranda silis dumanı kullanıldığı zaman ise genleşme sınır değeri olan %0.1'in altına çekmek için yeterli olduğu belirtilmektedir. [38].

1.6.3. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Çeşitli metal endüstrilerinin yan ürünü olarak elde edilen atık maddelere cüruf adı verilmektedir. Cürufun içinde alümin, silis ve kireç bulunmaktadır. Cüruf çimento üretiminde özel işlemlerle kil yerine, beton üretimde agrega yerine ve portland çimentosu, kireç ve alçı gibi bağlayıcı maddelerle karıştırılarak da kullanılabilir.

Yüksek fırın cürufunun inceliği, karışımın priz süresi, kötü sıkılaştırma nedeniyle hapsolan hava miktarı ve dayanım kazanma hızı gibi diğer parametreler de yüksek fırın cürufunun kullanıldığı betonlarda ASR genleşmesini etkilemektedir.

Yüksek fırın cürufunda bulunan alkaliler, camsı fazda bağlıdır ve portland çimentosundaki alkalilere göre daha yavaş bir hızla açığa çıkarlar. Cürufun aktivitesi ve alkali içeriğine bağlı olarak hidroksil iyonu konsantrasyonu üzerindeki etkileri farklılık göstermektedir. Yüksek fırın cürufu yüzdesi arttıkça hidroksil iyonu konsantrasyonu azalmaktadır [39].



Şekil 15. Yüksek fırın cürufunun (OH) iyonu konsantrasyonu üzerindeki etkisi [39].

ASR genleşmesini azaltmak ve önlemek için yüksek oranlarda yüksek fırın cürufu kullanmak gerekmektedir. Yüksek fırın cürufunun harç veya betonda kullanım oranı üzerine yapılan bir çalışmada çimento ağırlığının en az %35 oranında kullanımının etkili olduğu belirtilmiştir [40].

1.6.4. Doğal Puzolanların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Doğal puzolanlar, doğal olarak oluşan amorf yapıda silika içerir ve ASTM C 618'e göre N sınıfı olarak tanımlanan amorf silikayı elde etmek üzere işlem görmüş malzemelerdir. Kendi başına çok az ya da hiç bağlayıcı özelliği olmayan puzolanlar, kireç veya çimento gibi başka bir bağlayıcı ile karıştırılınca bu özelliği kazanırlar. Puzolanların betonda genleşme meydana getiren reaksiyonlara karşı etkili oldukları bilinmektedir. Puzolanlar çimento harcının kirecini tutarak ortamın pH derecesini indirger ve reaktif silisin çözünürlüğünü azaltarak alkali-silika reaksiyonu sonucu meydana gelebilecek hasarı kısmen veya tamamen engeller ve alkali-silika jel yapısındaki CaO'ı bağladığı için jel oluşumunu da engeller [33].

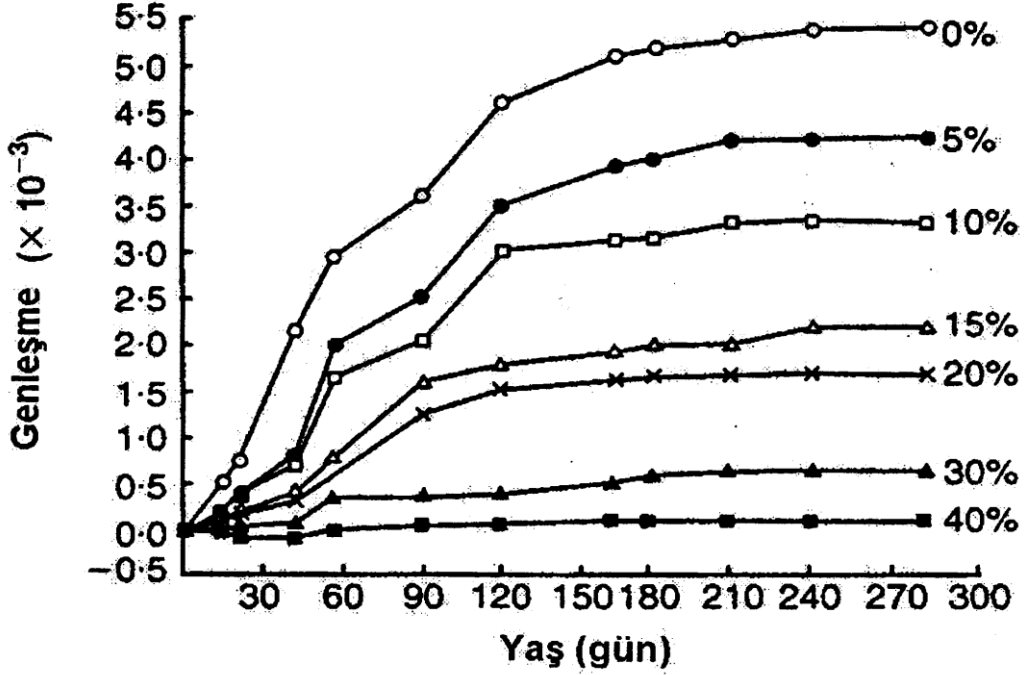
Doğal bir puzolan olan metakaolin inşaat endüstrisinde betonun durabilitesini geliştirmek üzere kullanılan bir mineral katkı maddesidir. Metakaolin termal aktiviteye sahip, saflaştırılmış kaolinit kilinin 650-800°C sıcaklıkta işlem görmesi ile elde edilen amorf bir malzemedir. Metakaolin ile portland çimentosunun kısmi yer değiştirmesiyle portlandit ile reaksiyona girerek portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum-silikat-hidrat yapısına benzer ürünler oluşmaktadır [12].

Metakaolin çimento ile ikame edilerek kullanıldığında betonun boşluk suyundaki hidroksil iyonlarının konsantrasyonunu azaltarak pH değerini düşürür ve geçirimsizliği azaltır. Bu özellikleriyle metakaolin ASR'nin oluşturduğu genleşmeyi kontrol etmek üzere kullanılabilir.

Metakaolinin alkali-silika reaksiyonuna etkisi üzerinde yapılan bir çalışmada %20 oranında metakaolin kullanımının boşluk suyundaki alkali konsantrasyonunu önemli derecede azalttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra %10-15 oranında metakaolin kullanımı alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan genleşmeleri kontrol altına aldığı belirlenmiştir. Ancak %5 oranında metakaolin kullanımı genleşmeleri kontrol altına almak için yeterli olmadığı belirlenmiştir [12].

Doğal puzolanlardan olan zeolit, alkali ve toprak alkali metallerin bünyesinde su içeren alümino silikatlar olarak tanımlanmaktadır. Zeolitler oldukça gözenekli, düşük ağırlıklı, homojen, sıkı ve sağlam yapıdadır. Zeolitin sahip olduğu puzolanik reaktivitesi iyon yer değiştirmesi ve adsorpsiyonu ile betonun boşluk suyunun alkalitesini düşürmektedir ve bu sayede alkali-silika jelinin oluşumunu da engellemektedir. Ayrıca agrega ile çimento ara yüzeyini iyileştirerek aderansı arttırmaktadır. Zeolitin alkali-silika

reaksiyonunu önlemedeki etkinliği kullanım oranına göre değişkenlik göstermektedir. Zeolitin kullanım oranı arttıkça alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşan genleşmeyi azaltmadaki etkinliği Şekil 5`de gösterilmektedir [41].



Şekil 16. Farklı oranlarda kullanılan zeolitin zamana bağlı genleşme üzerindeki etkisi [41].

Doğal bir puzolan olan pomza, volkanik faaliyetler sırasında ani soğuma ve gazların bünyeyi ani terk etmesi sonucu oluşan, oldukça gözenekli bir yapı içeren camsı yapıda volkanik bir kayaç türüdür. Ülkemizde süngertaşı, köpük taşı olarak da bilinmektedir [33].

Yapılan araştırmalarda ponzada alkali-silika reaksiyonunu önlemek için kullanılan mineral katkılarından biridir. Yapılan bir çalışmada pomza kullanım oranı arttıkça ASR genleşmelerini azalttığı belirlenmiştir. Çimento yerine %5,10, 15, 20 ve 25 oranlarında ponzanın kullanımı genleşmeleri azalttığı fakat genleşmeyi sınır genleşme değerinin altına inmediği görülmüştür. Fakat ponzanın çimentonun yerine ağırlıkça %30 oranında kullanımı ile genleşmenin sınır genleşme değerinin altında kaldığı görülmüştür [42].

1.7. Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Kimyasal katkıları da ciddi hasarlara yol açabilen alkali-silika reaksiyonunu engellemek için kullanılabilir. Kimyasal katkıları ilgili ilk çalışmalar 1951 yılında McCoy ve Caldwell tarafından başlatılmıştır. Çinko, laktik asit, demir klorid, lityum tuzları ve bitkisel yağlar ile reaktif agrega olarak pyrex camı kullanılarak ASTM C 441 standardına göre genişleme deneyleri yapılmış ve yapılan çalışmalar sonucunda en iyi genişleme azalmasının lityum tuzlarıyla elde edildiği belirtilmiştir [37].

Betonda lityum-hidroksit kullanıldığında yüksek olan (OH) iyonu konsantrasyonunu yükseltmektedir. Lityum hidroksit kullanımının ASR genişmesini azaltıcı etkisi vardır fakat bunun ortaya çıkabilmesi için ASR jelinin genişleme potansiyelini azaltan Li iyonlarının jel ile yeterince birleşebilmesi ve bu ters etkinin karşılanması gerekmektedir. Bunun gerçekleşebilmesi için de LiOH dozunun oluşan ASR jelinin yapısına katılan ve zararlı genişmeleri engelleyen lityum miktarının pH değerindeki yükselme sebebiyle oluşan zararlı etkiyi yenebilmesine imkân verecek düzeyde olması gerekmektedir [26].

Kimyasal katkıların etkinliği üzerine yapılan bir çalışmada lityum, magnezyum ve kalsiyum katyonları ile fosfat ve nitrat anyonlarının ASR`yi önlemede yararlı olduğu tespit edilmiştir. Fosfat ve nitrat tuzları silisin çözünürlüğünü azalttığı belirlenmiştir [43].

Kimyasal katkıların kullanım oranı üzerinde yapılan bir çalışmada, eşdeğer Na₂O değeri %1 olan çimento kullanarak reaktif agrega ile ASTM C 227 harç çubuğu metodu uygulanmış ve 36 genişleme ölçümleri alınmıştır. LiF ve Li₂CO₃ tuzları çimentonun kütlece %0.25, %0.50 ve %1.00 oranlarında kullanılmış ve araştırmanın devamında LiOH etkisi harç çubuklarını 80°C`de beklettiği çözeltinin içine farklı oranlarda NaOH ve LiOH ekleyerek devam ettirmiştir. Alkali-silika reaksiyonunu zararsız seviyelere düşüren Na/Li oranının 1.49 seviyelerinde olması gerektiği ifade edilmiştir [44].

Kimyasal katkıların etkinliği üzerine yapılan farklı bir çalışmada ise çimentonun yerine %2-7 oranlarında kullanılan baryum tuzlarının alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan genişmeleri azaltmada etkili olduğu belirtilmiştir [43].

1.8. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirlemek Amacıyla Kullanılan Deneysel Yöntemler

ASR tespitinde kullanılan deney yöntemleri ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Bunun nedeni ASR'nin lokal bir problem olması ve kullanılan agregaların petrografik özelliklerinin bölgeden bölgeye farklılık göstermesidir. Bundan dolayı, ülkeler kendilerine özgün deney yöntemleri geliştirmiştir [45].

ASR'yi belirlemede çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu deney yöntemleri ASR'nin genleşme özelliğinden yararlanılarak yapılan deneyler ile kimyasal yolla yapılan deneyler olarak ikiye ayrılabilir [45].

Deneysel yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanı harç çubuk yöntemi (ASTM C 227), hızlandırılmış harç çubuk yöntemi (ASTM C 1260), beton prizma yöntemi (ASTM C 1293) ve kimyasal yöntemdir (ASTM C 2899). Bu yöntemler ayrı başlıklar altında aşağıda incelenmektedir.

1.8.1. Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 227)

Harç çubuk metodu Amerikan standartlarında çimento-agrega kombinasyonlarının potansiyel alkali reaktivitesi biçimde deneysel metot olarak isimlendirilmiştir.

Bu metot belirli şartlarda kür gören 25x25x285 mm boyutlarında hazırlanan harç çubuklarının belirtilen süre sonucundaki boy değişimlerinin (genleşme yüzdesi) ölçülerek çimento-agrega kombinasyonlarının alkali kaynaklı genleşmelere neden olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılır [22].

Harç çubuk yöntemi (ASTM C227) ile hızlandırılmış harç çubuk yöntemlerinde (ASTM C1260) kullanılan harç çubukları aynı şekilde hazırlanmaktadır [22].

Harç çubuk yönteminde kullanılacak agregalar 8-16, 16-30, 30-50 ve 50-100 nolu elek serilerinden elenerek Tablo 6`da verilen karışım oranlarında ve miktarlarında kullanılır.

Tablo 2. Harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu yöntemleri için agrega karışım oranları

Elek göz 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

Harcın agrega türüne göre su/çimento oranı ASTM C 109 “Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars” da belirtilen esaslara uygun olarak belirlenir. Bu bağlamda dere agregası ve kırmataş harç çubuğu dökümleri için gerekli karışım miktarları Tablo 3`de verilmiştir.

Tablo 3. Harç çubukları karışım miktarları

Malzeme Türü	Elek Serisi					S/Ç	Su	Çimento (gr)
	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100			
	%10	%25	%25	%25	%15			
Doğal agrega	100	250	250	250	150	0,45	199,8	444
Kırma taş	100	250	250	250	150	0,50	222	444

Harç çubuklarının üretiminde kullanılan çimentonun alkali içeriği en az %0,6 Na₂O eşdeğeri olmalıdır. Harç çubuklarının üretiminde üç adet numune dökümüne imkân veren 25x25x285 mm boyutlarında kalıplar kullanılmaktadır.

Harç çubuk yönteminde en az 4 numune hazırlanır. Harç çubukları su içerisinde %100 bağıl nemde, 37.8°C`de küre tabii tutulurlar. 14 günden başlanarak belirli sürelerle 12 ay veya daha uzun süre boyunca boy ölçümleri alınır. ASTM C33 standardına göre reaktif olmayan agrega için genleşmeler 6 ayda %0.10 ve üç ayda %0.05`in altında olmalıdır.

Reaktif agregada farklılıkların anlaşılabilmesi için daha uzun süreli genleşmeler de kaydedilebilir [46].

Bu yöntemin avantajlı tarafı, çimento-agrega bileşimlerinin ASR'ye uygun ortam sağlayıp sağlamadıklarının ölçmesidir. Test edilen malzemeler çok yüksek reaktivitede olmadığı sürece anlamlı sonuçların alınması bir yıl veya daha fazla sürebilir. Harç çubuk yönteminin dezavantajı ise deney süresinin oldukça uzun olması ve zararlı agregaların tümünde genleşme miktarının azalıyor olmasıdır.

1.8.2. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 1260)

Hızlandırılmış harç çubuk deneyi ASTM C1260'da belirtildiği gibi yapılır. Alkali reaktivitesi belirlenecek agregalar ile üretilen harç çubukların alkaliliği yüksek çözelti içinde, yüksek sıcaklıkta ve uzunluk değişimlerinin ölçülmesine dayanmaktadır [47].

Bu deneyde her bir üretimde üçer adet harç çubuğu üretilir. Kalıplardan çıkarılan numunelerin başlangıç okumaları yapılır ve numuneler numaralandırılır. Daha sonra harç çubukları saf su içerisine konarak $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ sabit sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletildikten sonra ilk boy ölçümleri (L_0) alınır. Harç çubuklarının içerisine konacak alkali çözeltisi, 1 N NaOH çözeltisi, 900 ml suya 40 gr sodyum hidroksit konularak hazırlanır ve bu çözeltiliye sodyum hidroksit çözeltisi denir. Bu çözelti 80°C sabit sıcaklıkta tutularak, harç çubukları bu çözelti içerisine yerleştirilir.



Şekil 17. Alkali-silika deney tankı

Harç çubuklarının boy uzamalarını belirlemek için 3, 7 ve 14. günlerde ölçümler alınır. Bunun için boydaki değişim çubuğun orijinal boyuna göre hesaplanır. Bunun için aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$\Delta L = \frac{L_i - L_o}{285} \times 100$$

Burada; ΔL = Yüzde olarak boy değişimi

L_i = Çubuğun ilgili deney süresi sonundaki uzunluğu (mm)

L_o = Çubuğun sıfır okuması (mm)

ASTM C1260`ya göre yüzde olarak boydaki değişim aşağıdaki değerlendirmeye göre yapılmaktadır.

- 14 gün sonra ölçülen boy değişimi %0.10`den küçükse “Agrega zararsız bölgede”
- 14 gün sonra ölçülen boy değişimi %0.10-%0.20 arasında ise deney süresi uzatılarak örneklerin 28 günlük boy değişimleri ölçülür.
- 14 gün sonra ölçülen boy değişimi %0.20`den büyükse “Agrega potansiyel olarak zararlıdır” sonucuna varılır.

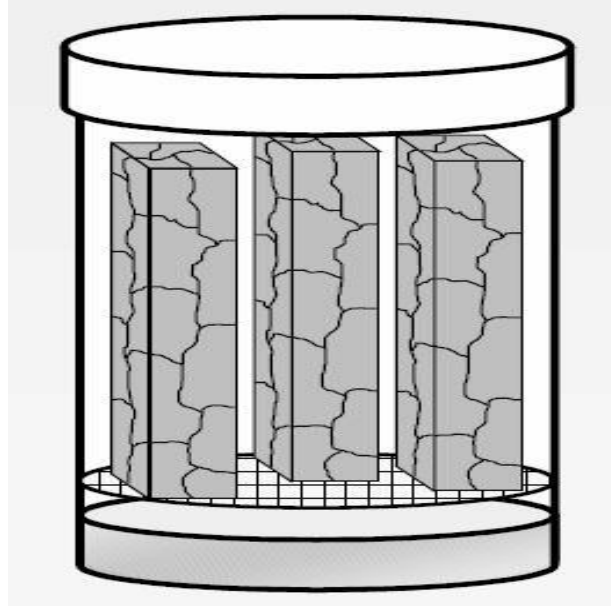
Bir agreganın potansiyel reaktivitesinin saptanmasında ASTM C 1260 bir eleme testi olarak diğer testlerle bir arada kullanılmalıdır. Bazen sert test koşullarından dolayı ASR geçmişi bulunmayan ve yüksek saha performansı gösteren agregaların test sonucuna göre reaktif oldukları ortaya çıkabilir. Bu sahada kullanılan agreganın ağır alkali ve sıcaklık koşullarına maruz kalma olasılığının daha düşük olmasından meydana gelebilir. Bu yüzden hızlandırılmış harç çubuk deneyleri sonucunda reaktif olduğu saptanan agregalar daha makul alkali seviyelerine maruz kaldıklarında iyi sonuçlar verebilir. Hızlandırılmış harç çubuk deneyi yavaş reaksiyon gösteren ve harç çubuk deneyi ile saptanamayan agregaların saptanmasında yararlıdır [38].

1.8.3. Beton Prizma Deneyi (ASTM C 1293)

Beton prizma testi, 75x75x285 mm boyutlarında hazırlanan harç çubuklarının zamana bağlı olarak genişmesinin ölçülmesi ile çimento-agrega bileşimlerinin alkaliden kaynaklanan genişmelere açık olup olmadığını belirler.

Bu deney yöntemini uzun süreli harç çubuğu metodundan ayıran en önemli özellik harç çubuk boyutları ve harç çubuklarının hazırlanmasında karışım suyuna NaOH ilave edilerek karışımın alkali miktarının artırılmasıdır.

Deney uygulanacak agregaya, ince agregaya ise reaktif olmayan kaba agregaya ile karıştırılarak kullanılır. Kaba agreganın reaktivitesi ölçülecek ise reaktif olmayan ince agregaya ile karıştırılıp belli gradasyona getirilen malzeme kalıplara dökülür. Numunelerin çimento içeriği $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ olup su/çimento oranı 0,42 ile 0,45 arasında değişebilir. Toplam alkali içeriği %0,9 Na_2O eşdeğerinde olmalıdır. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numunelerin ilk boy ölçümleri alındıktan sonra 38°C sıcaklıkta ve nemli ortamda standartta belirtilen şekilde saklanır.



Şekil 18. %100 bağıl nemi sağlayacak şekilde tasarlanmış kap

Örneklerin boy ölçümleri alınmadan 16 saat önce saklama kapları kapalı kalacak bir şekilde $23 \pm 1,7^\circ\text{C}$ 'de kür odasına konarak soğumaya bırakılır. Bu işlemin ardından dijital

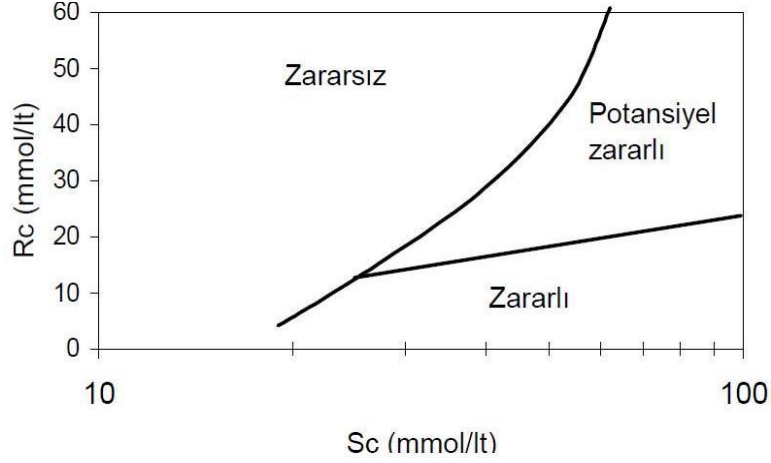
kompatörle harç çubukları üzerindeki ölçümler ilk olarak 7, 28 ve 56. günlerde ve 3, 6, 9, 12. aylarda yapılır ve daha sonra gerekirse her 6 ayda bir uzunluk değişimi ölçülür. Bu metot mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir. Mineral katkıların etkinliği değerlendirilirken 2 yıllık genleşme değerinin %0.04 olarak alınması ve karışımın alkali içeriğinin çimentonun kütlece %1.25'i değerine arttırılması önerilmektedir [48].

Standarda göre harç çubuklarının genleşmesi bir yıl sonra %0.04 veya daha fazla ise agrega için potansiyel tehlike söz konusudur. Bu yöntemde ölçülen genleşmeleri etkileyen çimento içeriği, su/çimento oranı, sıcaklık ve saklama kaplarının nem durumudur [45].

1.8.4. Kimyasal Yöntem (ASTM C 289, TS 2517)

Alkali-Agrega Reaktivite Potansiyeli Test yöntemi genellikle hızlı kimyasal test olarak adlandırılır ve silisli agregaların reaktivite potansiyelinin tahmin edilmesinde kullanılır. Agregada 150 µm'lik elekten geçen malzemeyi tamamen uzaklaştırmak için numune 150 µm elek üzerinde yıkanarak elenir, toz ve ince parçalardan arınması sağlanır. Yıkanan malzeme 24 saat süreyle 105±5°C sıcaklıkta etüvde kurutulur. Elenen, yıkanan ve kurutulmuş örneklerden elektronik tartı ile 25 gramlık 3 adet örnek alınarak reaksiyon kabı içerisine konur. Bu kapların her birine 25 ml 1N NaOH çözeltisi ilave edilir. Bunun yanında içerisine örnek konulmayan dördüncü kaba sadece 25 ml 1 N NaOH çözelti konularak bu kap referans kabı olarak kullanılır.

Hazırlanan kaplar 80°C sıcaklıkta sabit tutulan su banyosuna konularak 24 saat bekletilir. Bu süre sonunda örnekler su banyosundan çıkarılarak 30°C sıcaklığa kadar soğutulup kuru bir kap içerisine süzülür. Homojenliğin sağlanabilmesi için karıştırıldıktan sonra bir pipet yardımıyla 10 ml çekilerek 200 ml'lik balon jöjeye alınır ve üzeri damıtık su ile 200 ml'ye tamamlanır. Bu çözelti çözünmüş silisin ve alkali azalmasının tayini için kullanılır. Bu çözelti daha sonra filtre edilir ve çözünmüş silis ile alkalideki azalma analiz edilir. Deney üç kere tekrarlanır ve Şekil 3'deki egride işaretlenerek çıkarım yapılır. Sonuçların tümü eğrinin sol tarafındaki bölgede ise zararsız olarak söylenebilir. Fakat sonuçlardan bir tanesi bile eğrinin sağındaki bölgede yer alırsa agreganın yüksek alkali içerikli betonda kullanımının zararlı genleşmelere yol açabileceği kabul edilir [49].



Şekil 19. Alkalitedeki azalma-çözünmüş silis ilişkisi

Kimyasal yöntem ile yüksek reaktivitedeki agregalar yeterli güvenilirlikte saptanır; fakat yavaş reaksiyona giren agregaların saptanmasında bu test başarısızdır. Bunun yanında belli agregalarda yüksek miktarda çözünebilir silis mevcuttur fakat kullanım sırasında yalnızca küçük miktarlarda genişlemeye yol açar. Bu yüzden bu yöntem her zaman güvenilir sonuçlar sunmamaktadır. Bu yöntem karbonat agregalarının test edilmesine uygun değildir. Kimyasal yöntem yararlı bir araştırma gerecidir ve agreganın ilk aşamada teşhisine yarayabilir ama hangi agregalarda reaktivite potansiyelinin bulunduğu daha belirgin saptanması için başka güvenilir testlere ihtiyaç vardır.

1.8.5. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirlemek Amacıyla Kullanılan Diğer Yöntemler

Alkali-silika reaksiyonunu belirleyen temel deneyler dışında çeşitli deneyler de yapılmaktadır. Bu deneylerin içinde jel pat metodu, alman çözünme metodu, ozmotik hücre metodu, otoklav metodu bunlardan birkaçıdır.

Jel pat metodunda agrega örneği koyu kıvamda çimento hamurunun içine gömülür ve yüzeyi bilerek agrega parçalarının açığa çıkması sağlanır. Alkalin çözeltiliye batırılan hamur, stereoskopik mikroskop ile periyodik aralıklarla incelenir. Deney, 20°C sıcaklıkta veya yükseltilmiş sıcaklıklarda uygulanabilmektedir. Bu metod, petrografik mikroskop altında incelenemeyecek kadar ince dağılımlı reaktif silisin ortaya çıkarılmasına olanak sağlar. Bu yöntem sonucunda reaktif olabileceği izlenimi veren agrega hakkında beton veya harç prizma yöntemlerinden birinin uygulanması önerilmektedir [22].

Ozmotik hücre metodu agrega parçacığı ile çimento ara yüzeyinin modellenmesidir. Ozmotik hücre, her biri 1 N NaOH çözeltisi içeren iki adet odacıktan oluşmaktadır. Odacıklar, su/çimento oranı 0.55 olan çimento hamuru zarı ile birbirinden ayrılırlar. Reaksiyon odası adı verilen odacıkta 150-300 mm boyutlarında 12.40 gr ağırlığında agrega parçacıkları bulunmaktadır. ASR oluştuğunda çözelti, çimento hamuru havza odacığında reaksiyon odacığına doğru akar. Odacıkların üst tarafında bulunan ince borucuklardaki çözeltideki değişim akış miktarını ve hızını ölçmeye imkân tanımaktadır. Günde ortalama 1.5-2.0 mm gibi bir akış hızı, agreganın potansiyel olarak reaktif olduğunun göstergesidir. Ters akış gözlemi ise agreganın reaktif olmadığına bir göstergesidir. Bu yöntem reaktivitenin hızlı değerlendirilmesine imkân vermektedir. Diğer yöntemlerle birlikte değerlendirme yapılması tercih edilmektedir [22].

Alkali-silika reaktivitesini belirlemede kullanılan yöntemlerden biri otoklav hücre metodudur. Bu yöntemde amaç boy değişimi ve çatlaklar incelenerek agregaların alkali-silika reaktivitesinin belirlenmesidir [22].

Mikrobar deneyi, alkali-agrega reaksiyonunu belirlemede henüz standartlaşmamış hızlandırılmış bir deney metodu önerisidir. Deneyin kür esası, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ile aynıdır. Farklı olan kısımlar kalıpların boyutu, agrega gradasyonu, su/çimento oranı ve deney süresidir. Mikrobar yönteminde numune boyutları 40x40x160 mm ve su/çimento oranı 0.33'tür. Agregada gradasyonu 12.5 mm eleği geçen ve 4.75 mm elek üzerinde kalan agrega olarak seçilir. Deney süresi 30 gün olarak belirlenmiştir. Mikrobar deney sonuçları alkali-karbonat ve alkali-silis reaktif agregaları için uygulanabilir olduğunu göstermektedir [50].

Agregaların petrografik analizi, kayacın minerallerinin cinsi ve yüzdelere göre adlandırılması işlemidir. Agregadan alınan ince kesitlerin optik mikroskop aracılığıyla incelenmesi sonucu içeriklerinde bulunan potansiyel reaktif mineral fazların tespiti mümkündür. ASR üzerinde kimyasal metotlar, beton veya harç numuneleri ile testler uygulanmadan önce bu yöntemin uygulanması zaman kazandırmak ve yöntemin agrega tipine göre seçimini kolaylaştırmak bakımından önemlidir [6].

2. DENEYSEL ÇALIŞMA, BULGULAR VE İRDELEME

2.1. Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesi iki farklı yöreden temin iki agrega kullanılmıştır. Agregaların biri dere agregası olup diğeri ise taş ocağından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan çimento CEM I 42.5 R tipi çimento olup Trabzon Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilmiştir.

Deneysel çalışmada silis dumanı, uçucu kül ve metakaolin olmak üzere üç farklı tip puzolan kullanılmıştır. Bunlardan metakaolin, Aryum Makine Kimya ve Ticaret Limited Şirketinden sağlanmıştır. Uçucu kül Zonguldak-Çatalağzı termik santralinden, silis dumanı ise İKSA İnşaat Katkıları Sanayi Ticaret Limited Şirketinden temin edilmiştir. Çözelti hazırlamada kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) Akçay Kimya Sanayi Medikal Laboratuvar şirketinden temin edilmiştir.



Şekil 20. Çözeltiyi hazırlamak için kullanılan sodyum hidroksit

2.2. Malzemelerin Özellikleri

Agregalar ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk yönteminde belirtilen granulometrik bileşimde olacak şekilde hazırlanmıştır. Hızlandırılmış harç çubuk deneyleri

Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Çimentonun Özellikleri

Deneysel çalışmada kullanılan CEM I 42,5 R tipi çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 15`de verilmiştir.

Tablo 4. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	(%)	45 µm elek üstünde kalan (%)	9.8	
SiO ₂	19.46	90 µm elek üstünde kalan (%)	1.0	
Al ₂ O ₃	5.11	Özgül Yüzey (Blaine) (m ² /kg)	412.6	
Fe ₂ O ₃	3.31	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.12	
CaO	60.23	Priz Süresi (Vicat) (dak)	Başlangıç	140
MgO	2.08		Bitiş	200
SO ₃	3.05	Su İhtiyacı (%)	29.2	
Na ₂ O	0.27	Hacim Genleşmesi (mm)	1.0	
K ₂ O	0.69	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	28.0
Cl ⁻	0.02		7 gün	40.4
Kızdırma Kaybı	3.00		28 gün	51.5

2.2.2. Agreganın Özellikleri

Doğu Karadeniz Bölgesinin iki farklı yöresinden temin edilen agregalardan biri taş ocağı diğeri dere yatağı agregasıdır. Agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 4`de verilmektedir.

Tablo 5. Agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Taş ocağı agregası	Dere yatağı agregası
Kuru özgül ağırlık (g/cm^3)	2.79	2.59
Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (g/cm^3)	2.91	2.63
Görünen özgül ağırlık (g/cm^3)	3.17	2.71
Ağırlıkça su emme (%)	4.24	1.66

2.2.3. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Metakaolinin Özellikleri

Deneysel çalışmada mineral katkı olarak kullanılan uçucu kül, silis dumanı ve metakaoline ait özellikler Tablo 5-6`da verilmektedir.



Şekil 21. Deneysel çalışmada kullanılan mineral katkıları

Tablo 6. Uçucu küle ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler

SiO_2 (%)	61.57
Al_2O_3 (%)	20.25
Fe_2O_3 (%)	7.0
CaO (%)	1.54
Yoğunluk, gr/cm^3	2.34
45 μm elek üstü kalan, %	16.5

Tablo 7. Metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler

325 No'lu elek üzerinde kalan (%)	7.8
Özgül yüzey (cm ² /g)	23.965
Yoğunluk (g/cm ³)	2.79
SiO ₂ (%)	54.93
Al ₂ O ₃ (%)	41.0
Fe ₂ O ₃ (%)	2.0
CaO (%)	0.04
MgO (%)	0,06
Na ₂ O (%)	0.0
K ₂ O (%)	0.21
SO ₃ (%)	0.03
Nem içeriği	0.21
Yanma kaybı	0.08

Tablo 8. Silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler

SiO ₂ (%)	91.0
Al ₂ O ₃	0.58
Fe ₂ O ₃ (%)	2.79
CaO (%)	54.93
MgO (%)	41.0
SO ₃ (%)	2.0
Klorür	-
Kızdırma kaybı	1.84
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.2
Özgül yüzey (cm ² /g)	<45μ

2.3. Harç Çubukların Hazırlanmasında Kullanılan Cihazlar

Hızlandırılmış harç çubuk deneyi gerçekleştirilirken kullanılan cihazlar aşağıda verilmektedir.

- Alkali-silika deney tankı (içerisindeki suyu 80°C sıcaklığa çıkarabilen ve bu sıcaklıkta suyun sıcaklığını sabit tutabilen cihaz)
- Ölçüm ünitesi

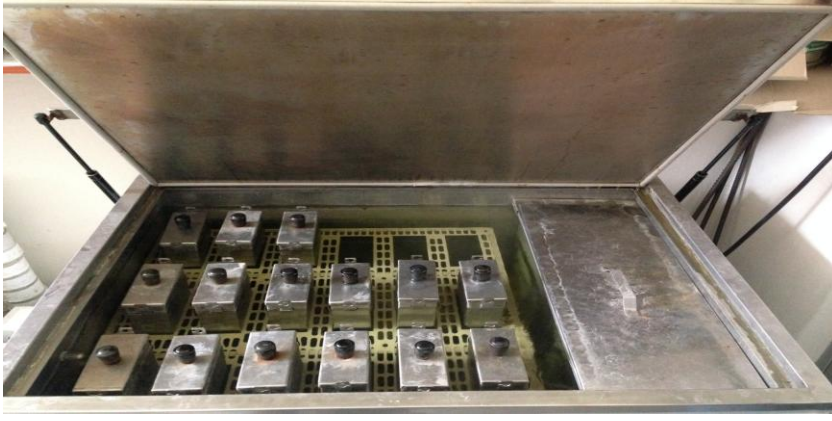
- Harç çubukları kalıbı
- Harç çubuklarının su banyosunda sabit ve dengede durmasını sağlayacak aparatlar



Şekil 22. Deneyde kullanılan harç çubuğu kalıpları



Şekil 23. Çubuk boy ölçüm ünitesi



Şekil 24. Alkali-silika deney tankı

2.4. Alkali-Silika Reaksiyonu İçin Gerçekleştirilen Deney

Alkali-silika reaksiyonunun belirlenmesinde kullanılan birçok yöntem vardır. Bunların başında harç çubuk deneyi, hızlandırılmış harç çubuk deneyi, beton prizma deneyi ve kimyasal yöntem gelir. Bunların dışında jel pat metodu, otoklav metodu, ozmotik hücre metodu, mikrobar deneyi gibi yöntemlerde bulunmaktadır. Çalışmada alkali-silika reaksiyonunun belirlenmesinde ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemi kullanılmıştır.

2.4.1. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C1260)

Bu deney, 80°C sıcaklıkta NaOH çözeltisinde saklanan harç çubuklarının genleşme yüzdelерinin değerlendirilmesi suretiyle alkalilerle reaksiyona girmesi muhtemel olan agregaların hızlı bir şekilde reaktifliğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Hızlandırılmış harç çubuk metodu klasik harç çubuk metoduna alternatif bir metod olup granit, kuvars, kumtaşı, andezit, volkanik tüf, grovak, gnays gibi yavaş reaksiyon gösteren veya genişleyen agregalar için uygundur.

Bu deneyde her bir üretimde üçer adet harç çubuğu üretilir. Kalıplardan çıkarılan numunelerin başlangıç okumaları yapılır ve numuneler numaralandırılır. Daha sonra harç çubukları saf su içerisine konarak $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ sabit sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletildikten sonra ilk boy ölçümleri (L_0) alınır. Harç çubuklarının içerisine konacak alkali çözeltisi, 1 N NaOH çözeltisi, 900 ml suya 40 gr sodyum hidroksit konularak hazırlanır ve bu çözeltiye

sodyum hidroksit çözeltisi denir. Bu çözelti 80°C sabit sıcaklıkta tutularak, harç çubukları bu çözelti içerisine yerleştirilir.

İlk boy ölçümleri alındıktan sonra 3, 7 ve 14 gün sonunda boy ölçümleri alınarak birim boy değişim yüzdeleri harç çubuğu deney yönteminde verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır. 14 gün sonunda ölçülen boy değişimi %0.10'dan küçükse agregalar zararsız, %0,20'den büyükse agregalar zararlı, %0.10 ile %0.20 arasında ise deney süresi uzatılarak çubukların 28 günlük boy değişimleri ölçülerek gerekli değerlendirmeler yapılır.

2.4.2. Agregaların Reaktifliğini Belirlemek İçin Yapılan Ön Çalışma

Deneysel çalışmada kullanılan iki farklı agreganın reaktifliğini belirlemek için hızlandırılmış harç çubuk deneyleri gerçekleştirilmiştir. Taş ocağı ve dere agregasına ilişkin deney sonuçları Tablo 8-9'da verilmektedir.

Tablo 9. Taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

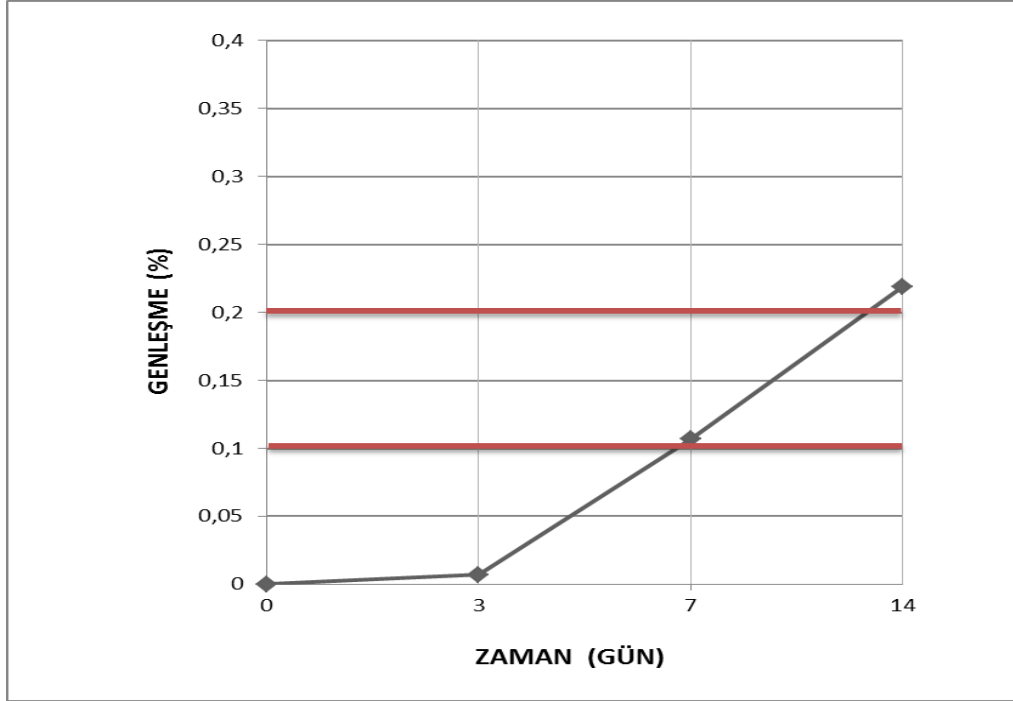
	Genleşme Yüzdesi (%)		
	3 gün	7 gün	14 gün
1 No'lu numune	0.0109	0.1200	0.2309
2 No'lu numune	0.0067	0.0888	0.2032
3 No'lu numune	0.0028	0.1116	0.2225
Ortalama (%)	0.0068	0.1068	0.2189

Tablo 10. Dere agregasına ilişkin deney sonuçları

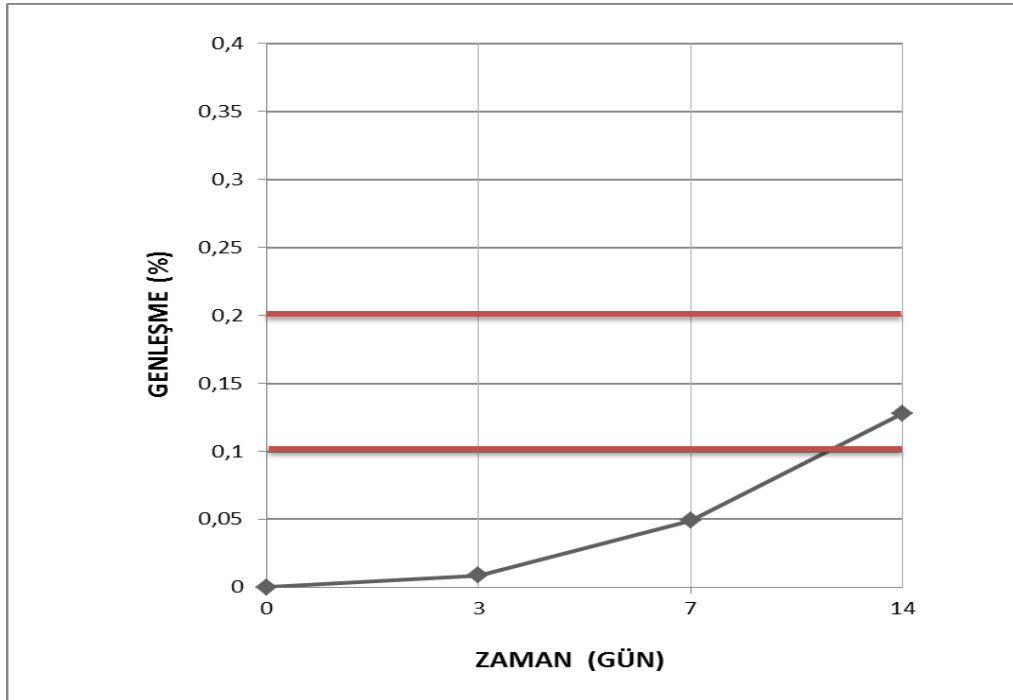
	Genleşme Yüzdesi (%)		
	3 gün	7 gün	14 gün
1 No'lu numune	0.0063	0.0509	0.1337
2 No'lu numune	0.0095	0.0512	0.1421
3 No'lu numune	0.0105	0.0453	0.1081
Ortalama (%)	0.0088	0.0491	0.1280

Taş ocağından alınan agreganın 14 günlük genleşme yüzdesi ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemine göre sınır değer olan %0.2'yi aştığı için reaktif agrega sınıfına girmektedir. Dere agregasına ilişkin 14 günlük genleşme yüzdesi ise % 0.1 ile % 0.2 arasında kalmıştır ve standartta göre bu aralıkta kalan agregalar şantiye koşullarında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir nitelikte kabul edilmektedir.

Agregalar üzerinde yapılan ön çalışmaya ait grafiksel gösterimler Şekil 25-26'da verilmektedir.



Şekil 25. Taş ocağı agregası örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi



Şekil 26. Dere agregası örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi

2.4.3. Harç Çubuğu Numunelerinin Üretimi

Deney numunelerin üretimi için alınan agregalar 0-5 mm 0-8mm arasında olup bu agregalar No.4-No.8-No.16-No.30-No.50-No.100 eleklerden ASTM C1260'daki standartta göre elenmiştir. ASTM C1260 standardına uygun granülometrik dağılımı Tablo 19'da verilmiştir.

Tablo 11. ASTM C1260'a göre granülometrik bileşim

Elek Boyutu		Ağırlık (%)
Geçen	Kalan	
4 mm	2 mm	10
2 mm	1 mm	25
1 mm	500 µm	25
500 µm	250 µm	25
250 µm	125 µm	15

Puzolanik malzeme kullanılmadığında her çimento-agrega kombinasyonu için 990 g agregaya, 440 g çimento ve 206.8 g su kullanılmıştır. Harç karıştırma işlemi ASTM C305'e uygun karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin hazırlandığı ve malzemelerin depolandığı oda sıcaklığı ASTM C1260 standardına uygun olarak ayarlanmıştır. Puzolanik malzeme kullanıldığında puzolanik malzeme farklı oranlarda çimento ile ikame edilerek harç çubukları üretilmiştir.

Harç çubukları için kullanılan kalıplar, ASTM C 490'a uygun olacak şekilde 25x25x285 mm boyutlu ve uçlarında boy ölçmeyi sağlayan pimleri olan kalıplardır.

Tablo 12. Harç çubuklarının üretimde kullanılan karışım miktarları

	Elek Serisi					S/Ç	Su	Çimento (gr)
	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100			
	%10	%25	%25	%25	%15			
Agrega	99	247.5	247.5	247.5	148.5	0.47	206.8	440



Şekil 27. Üretim için gerekli malzemelerin hazırlanması



Şekil 28. Karıştırma kabında malzemelerin karıştırılması



Şekil 29. Hazırlanan harcın kalıplara yerleştirilmesi (Birinci tabaka)



Şekil 30. Hazırlanan harcın kalıplara yerleştirilmesi (İkinci tabaka)



Şekil 31. Harç çubukların kalıptan çıkarılmadan önceki durumu

Hazırlanan numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, numuneler numaralanarak kodlanmıştır. Daha sonra numuneler başlangıç boy ölçümü sonrası 80°C sıcaklıkta saf suya yerleştirilmiştir. Saf su banyosunda 24 saat bekletilen numuneler sıfır ölçümleri alındıktan sonra hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisine yerleştirilmiştir. Daha sonra harç çubukların 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda boyları ölçülerek aşağıdaki bağıntı yardımıyla çubukların boyca genleşmeleri yüzde olarak hesaplanmıştır.

$$\Delta L = \frac{L_i - L_o}{285} \times 100 \quad (2.1)$$



Şekil 32. Çubukların başlangıç okuması sonrası numaralanması



Şekil 33. Çubukların gruplandırılıp numaralanması

2.5. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi Sonuçları ve İrdeleme

Deneyisel çalışmada ilk olarak kullanılan agregaların reaktiflikleri belirlendikten sonra farklı oranlarda uçucu kül, silis dumanı ve metakaolin kullanılarak 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda genleşmeleri yüzde olarak hesaplanmıştır. İki agrega ve üç farklı mineral katkı ile gerçekleştirilen üretime ait yüzde olarak genleşme-zaman ilişkileri tablo ve şekillerle verilmiştir.

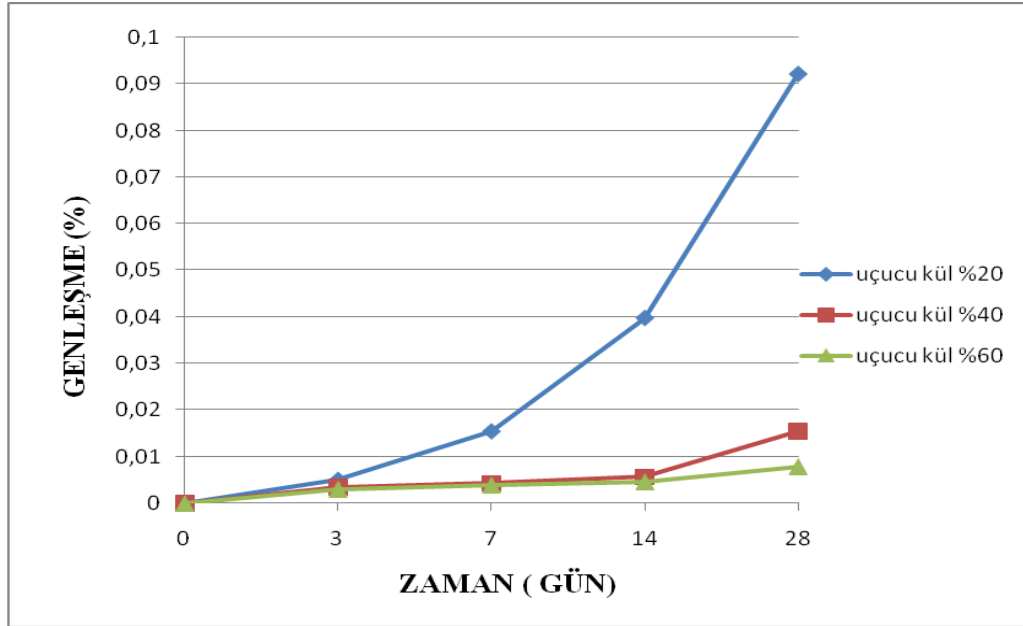
Tablo 13. Taş ocağı agregası üzerinde yapılan çalışmalarda katılan katkı oranları

	1. Üretim	2. Üretim	3. Üretim
Uçucu Kül (%)	20	40	60
	4. Üretim	5. Üretim	6. Üretim
Silis Dumanı (%)	5	10	15
	7. Üretim	8. Üretim	9. Üretim
Metakaolin (%)	5	10	15

Tablo 14. Dere agregası üzerinde yapılan çalışmalarda katılan katkı oranları

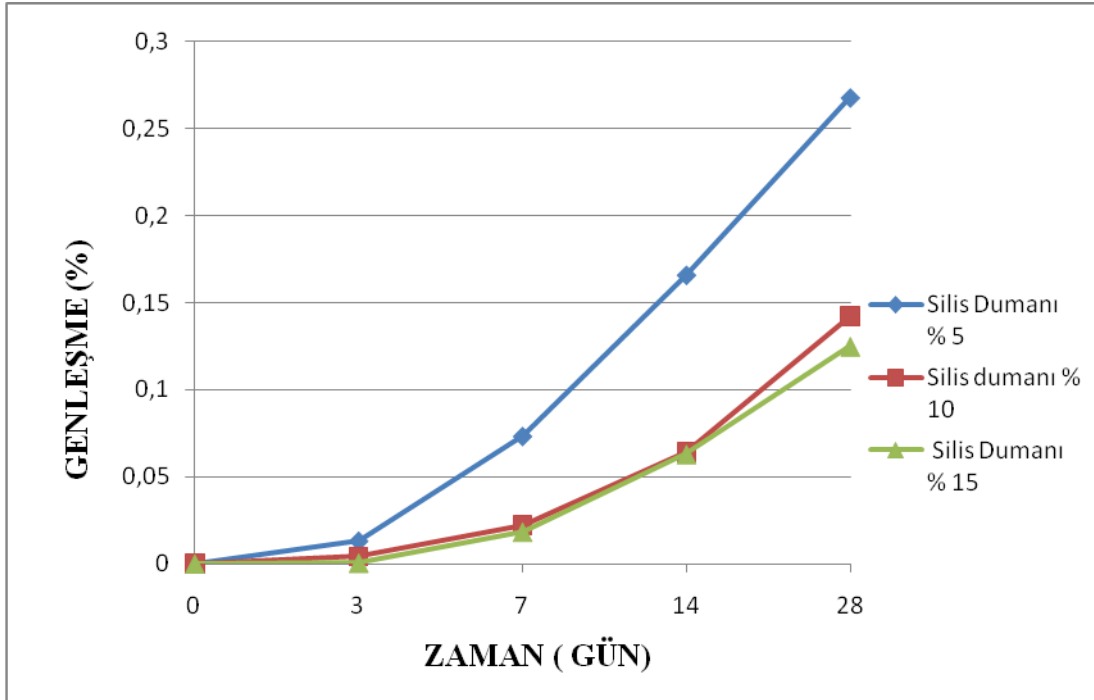
	1. Üretim	2. Üretim	3. Üretim
Uçucu Kül (%)	10	20	30
	4. Üretim	5. Üretim	6. Üretim
Silis Dumanı (%)	5	7.5	10
	7. Üretim	8. Üretim	9. Üretim
Metakaolin (%)	5	7.5	10

Deneyisel çalışmada farklı mineral katkıları farklı oranlarda çimento ile ikame edilerek üretilen harç çubuklarına ait deney sonuçları tez çalışmasının ekler kısmında verilmektedir. Deneyisel çalışmalarda kullanılan agregaların deney sonuçlarına ait grafiksel ve çubuk diyagramları aşağıda verilmektedir.

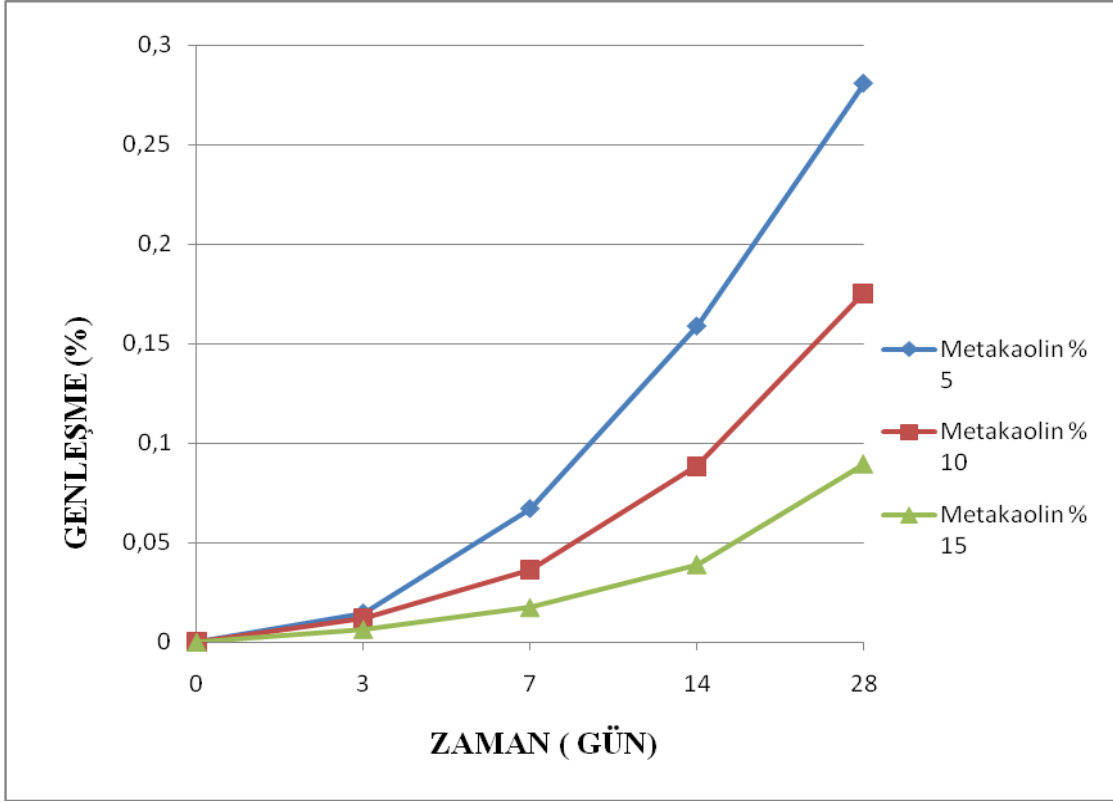


Şekil 34. Uçucu kül ikameli taş ocağı agregası örneklerine ait genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 34'de uçucu kül oranına bağlı olarak genişleme yüzdesi arasındaki ilişki verilmektedir. Uçucu külün alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisi uçucu kül oranı ile orantılı olduğu görülmektedir. Uçucu kül ikame oranı arttıkça genişleme yüzdesi azalmaktadır. %20 uçucu kül ikameli harç çubuklarda genişleme yüzdesi yaklaşık %82 oranında azalmıştır. %40 uçucu kül kullanılarak üretilen harç çubuk örneklerde genişleme yüzdesi %97 azalırken bu azalma %60 uçucu kül kullanılarak üretilen harç çubuk örneklerinde yaklaşık %98 olmuştur.



Şekil 35. Silis dumanı ikameli taş ocağı agregası örneklerine ait genişleme-zaman ilişkisi



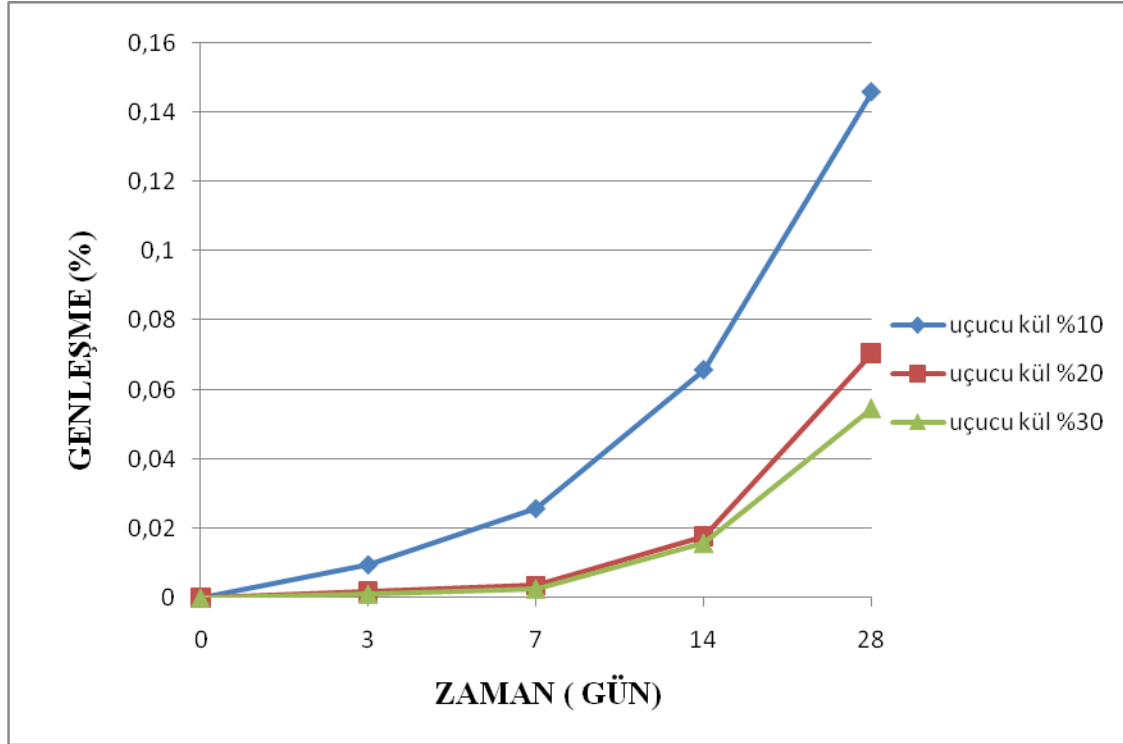
Şekil 36. Metakaolin ikameli taşocağı agregası örneklerine ait genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 35’de silis dumanı oranına bağlı olarak harç çubukların genleşme yüzdesine ilişki değişim verilmektedir. Bu grafikte silis dumanının alkali-silika reaksiyonu üzerindeki olumlu etkisi açık olarak görülmektedir. %5 silis dumanı ikameli harç çubukların 14 gün sonunda ölçülen genleşme yüzdesi yaklaşık %0.16 düzeyindedir. Bu silis dumanı ikame oranında genleşme yüzdesi katkısız harç çubuklarına kıyasla yaklaşık %25 oranında azalmıştır. Ancak %5 silis dumanı ikame oranı taş ocağı agregasının hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemine göre zararsız agrega sınıfı için sınır değer olan % 0.1’in altına indirmesi için yeterli olmamıştır. %10 ve %15 oranında silis dumanı ikame ile üretilen örneklerde genleşme yüzdesindeki azalma oldukça belirgindir. Silis dumanının bu oranları için agrega hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemine göre zararsız agrega sınıfında yer aldığı görülmektedir.

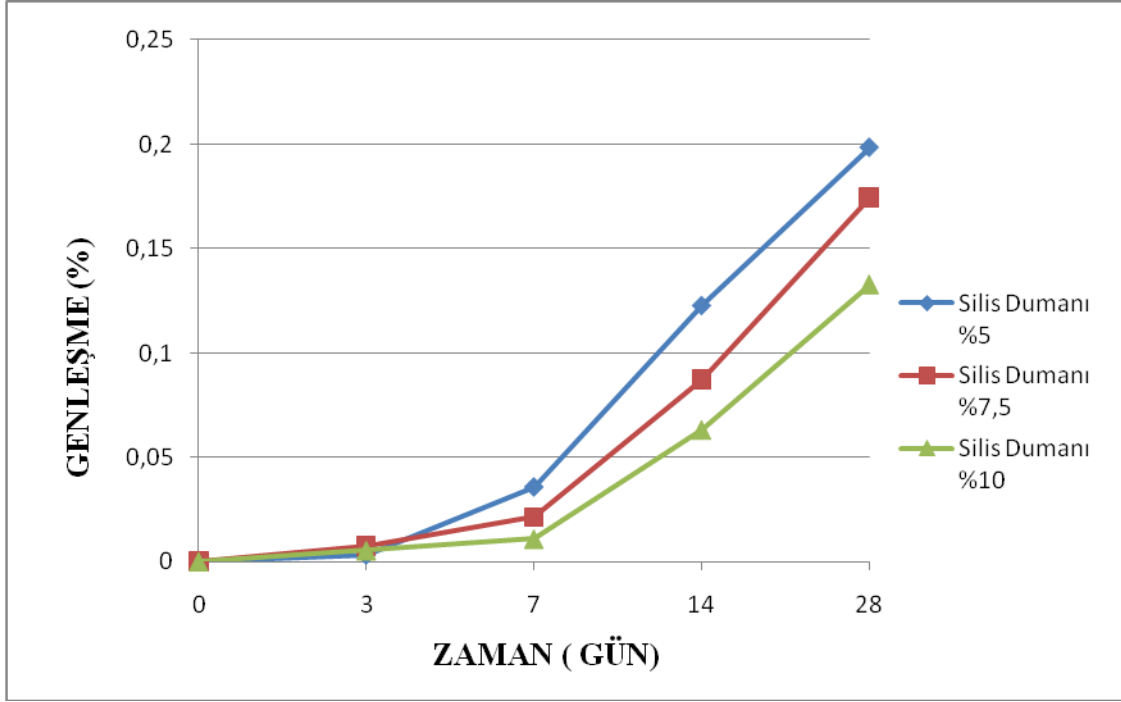
Şekil 36’de metakaolin ikamesi artışına bağlı olarak genleşme yüzdesindeki değişim görülmektedir. Metakaolinin de uçucu kül ve silis dumanı gibi alkali-silika reaksiyonu sonucu meydana gelen genleşmeyi azalttığı görülmektedir. %5 metakaolin ikame ile üretilen harç çubuklarının 14 gün sonunda genleşme yüzdesi yaklaşık %0.16 düzeyindedir.

%5 metakaolin ikamesi ile genişleme yüzdesi yaklaşık %27 oranında düşmüştür. Fakat silis dumanı gibi metakaolinin de %5 oranında kullanımı hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemine göre zararsız agrega sınıfı için sınır değer olan % 0.1'in altına indirmesi için yeterli olmamıştır. %10 ve %15 metakaolin kullanımı durumunda genişleme yüzdesindeki azalma sırasıyla yaklaşık %60 ve %83 olduğu görülmektedir. Silis dumanına benzer şekilde metakaolinin de %10 ve %15 oranlarında kullanımı genişlemeye önemli derecede azalttığı görülmektedir.

Şekil 35 ve Şekil 36 birlikte incelendiğinde silis dumanı ve metakaolin aynı oranlarda kullanıldığında alkali-silika reaktivitesi itibariyle birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



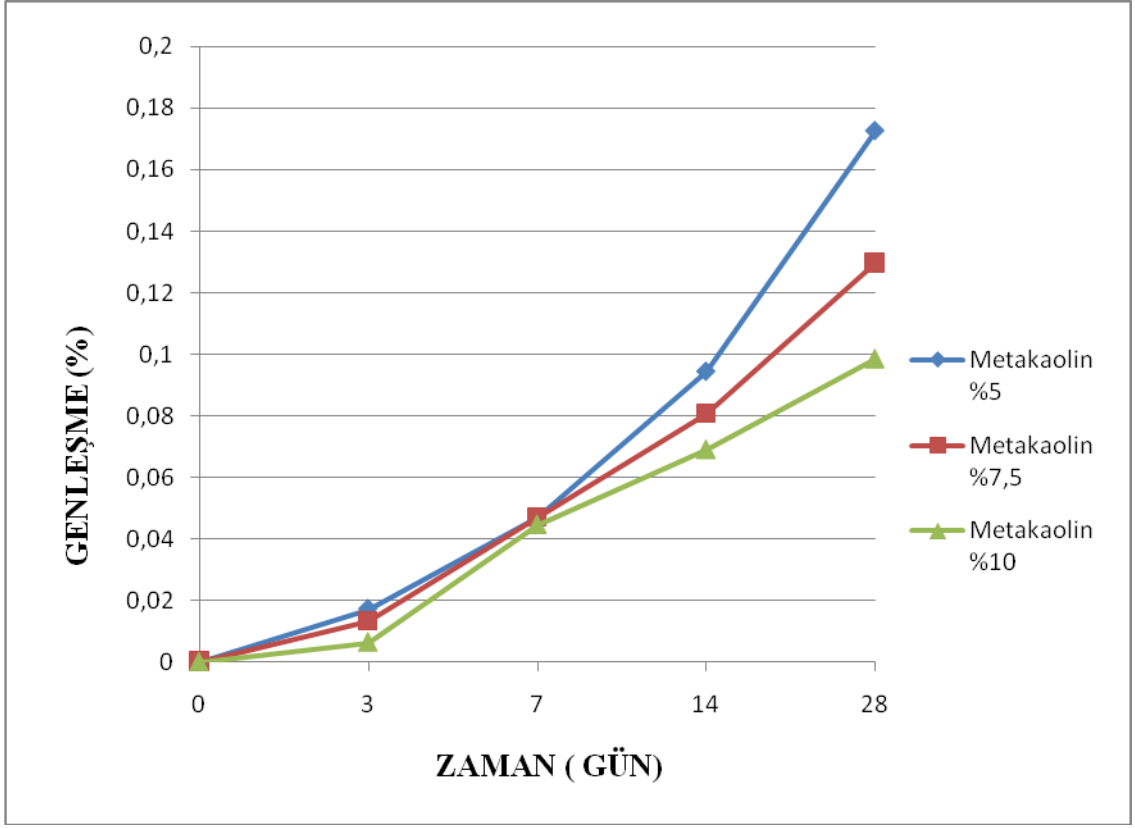
Şekil 37. Uçucu kül ikameli dere agregası örneklerine ait genişleme-zaman ilişkisi



Şekil 38. Silis dumanı ikameli dere agregası örneklerine ait genleşme-zaman ilişkisi

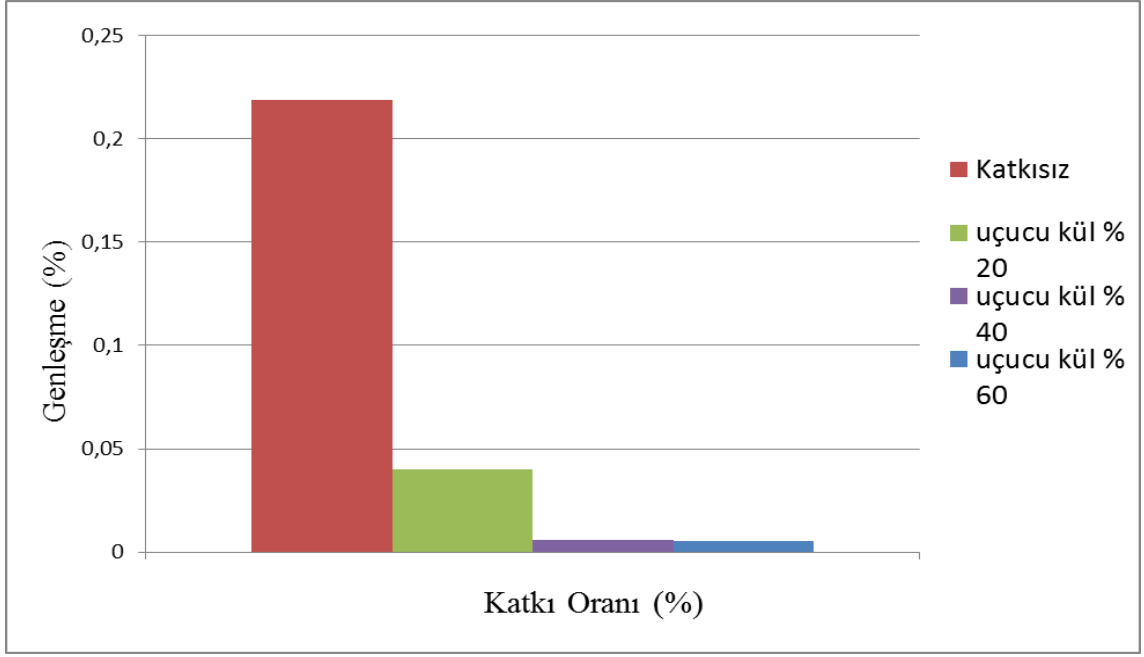
Şekil 37’de dere agregası kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde uçucu kül ikamesi artışına bağlı olarak genleşme yüzdesindeki değişim görülmektedir. Bu üretimlerde kullanılan uçucu kül oranları taş ocağı agregasıyla üretilen örneklerde kullanılan oranlardan daha düşüktür. %10 uçucu kül ikameli üretimlerdeki genleşme yüzdesi %0.06 olarak belirlenmiştir ve genleşme yüzdesindeki azalma katkısız harç çubukları için ölçülen değerden yaklaşık %49 az olmuştur. %20 ve %30 oranında uçucu kül kullanımında genleşme yüzdelerindeki azalma sırasıyla yaklaşık %86 ve %87 olmuştur.

Şekil 38’da dere agregası kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde silis dumanı ikamesi artışına bağlı olarak genleşme yüzdesindeki değişim görülmektedir. %5 oranında silis dumanı kullanımı genleşmeyi yaklaşık %0.11’lere kadar düşürmüştür. Silis dumanı %7.5 ve %10 oranlarında kullanıldığında harç çubukların alkali-silika nedeniyle genleşme yüzdesindeki azalma belirginleşmektedir. Bu oranların hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemine göre zararsız agrega sınıfı için belirtilen sınır değer %0.1’in altına çekmesi için yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

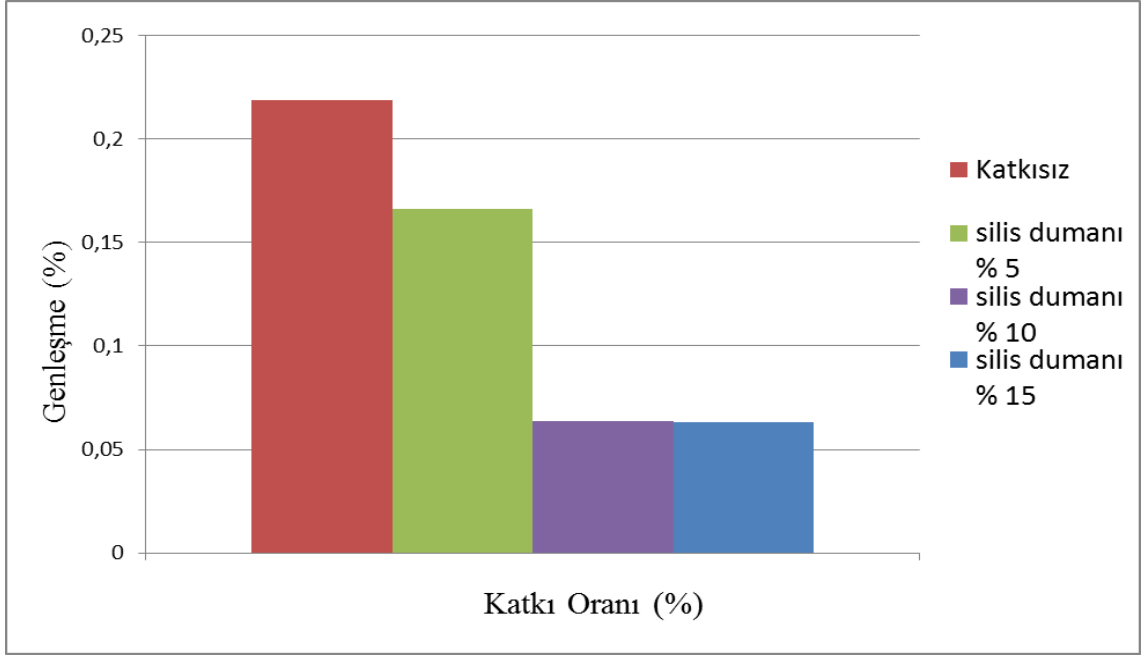


Şekil 39. Metakaolin ikameli dere agregası örneklerine ait genişleme-zaman ilişkisi

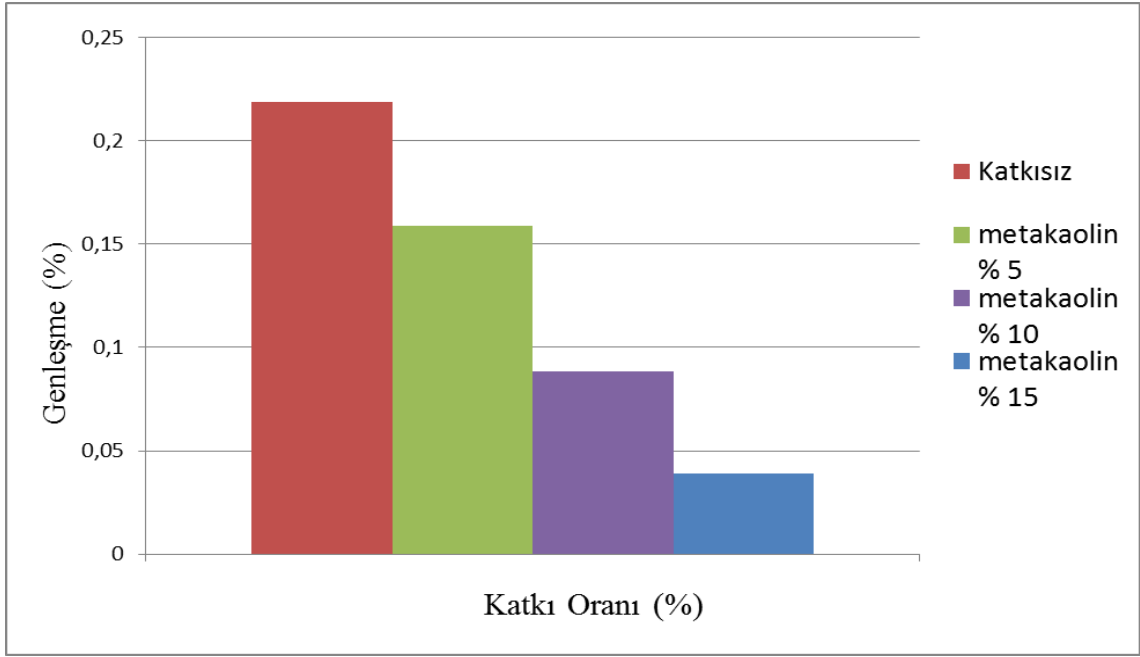
Şekil 39’de metakaolin ikamesi artışına bağlı olarak genişleme yüzdesindeki değişim görülmektedir. Metakaolin %7.5 ve %10 oranlarında kullanıldığında hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemine göre zararsız agrega sınıfı için belirtilen sınır değer %0.1’in altına çekmesi için yeterli olduğu görülmektedir. %5 oranında metakaolin kullanımında genişleme yüzdesi %0.09 olduğu görülmektedir. %5 metakaolin ikamesi dahi agreganın alkali-silika itibariyle zararsız davranış göstermesi için yeterli olduğu görülmektedir.



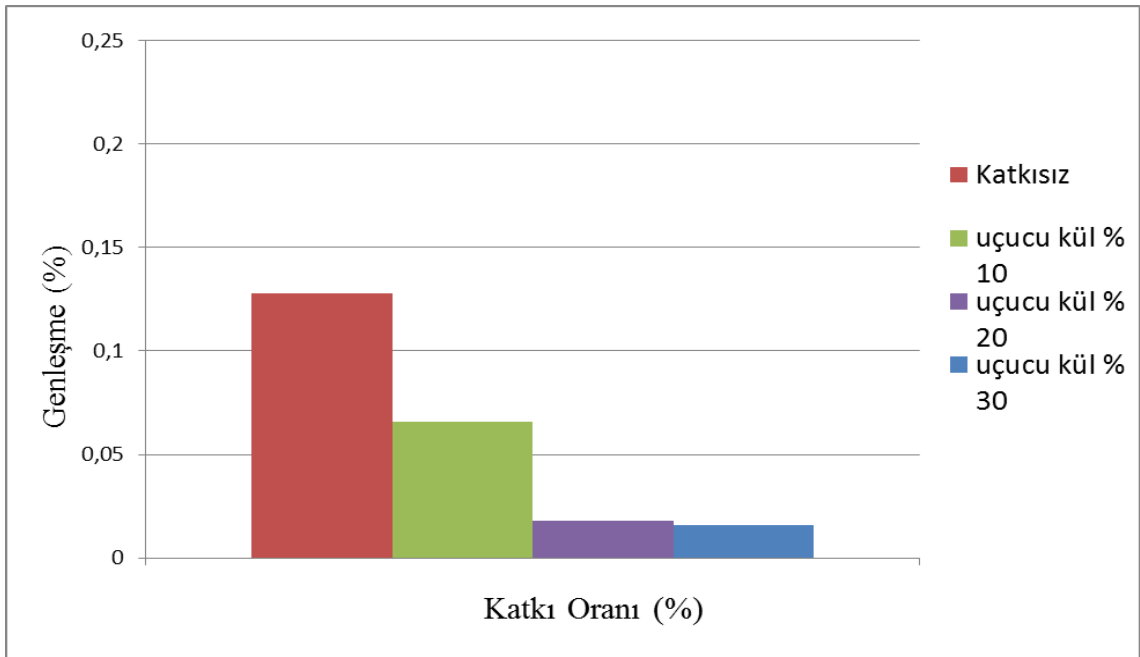
Şekil 40. Taş ocağı agregalı katkısız ve uçucu kül ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genleşme-katkı oranı ilişkisi



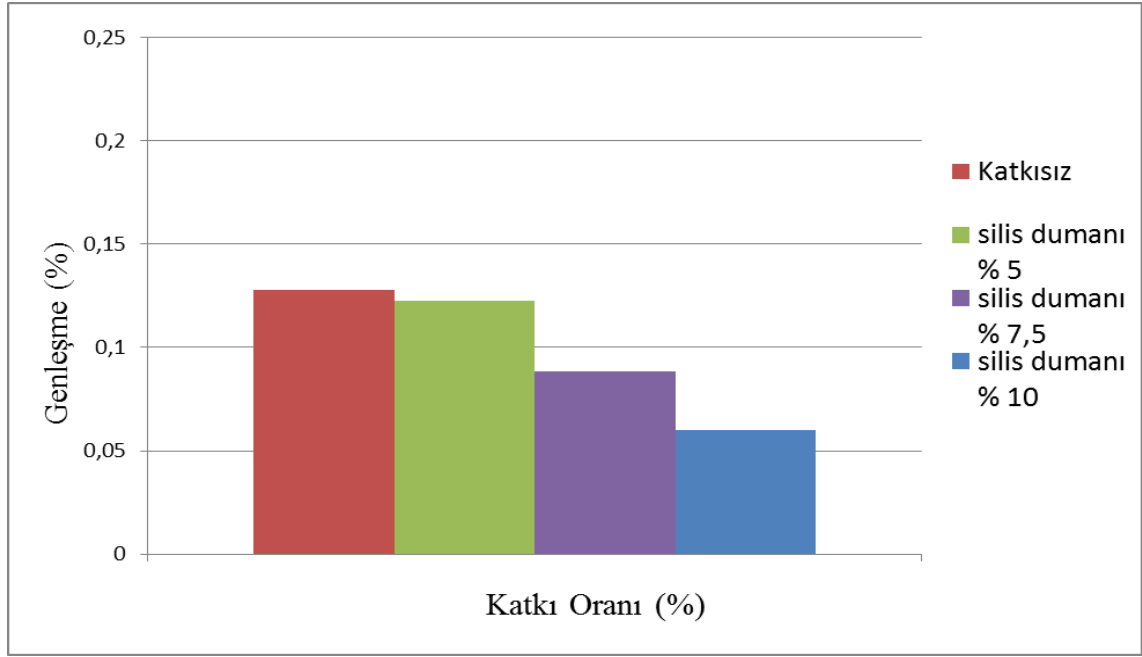
Şekil 41. Taş ocağı agregalı katkısız ve silis dumanı ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genleşme-katkı oranı ilişkisi



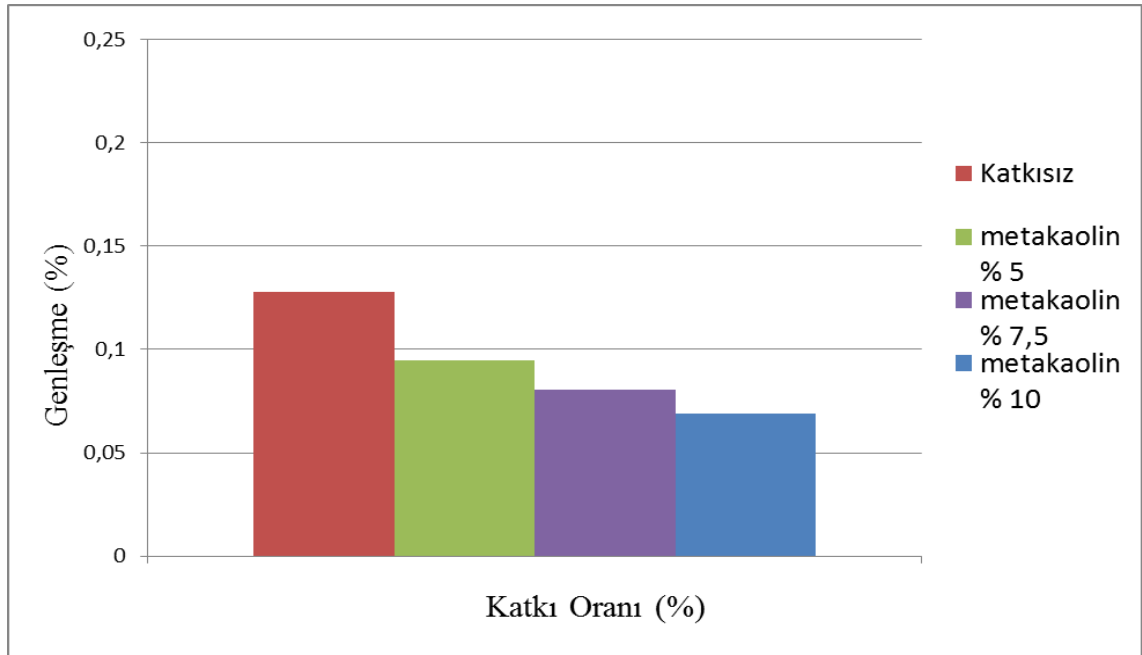
Şekil 42. Taş ocağı agregalı katkısız ve metakaolin ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genleşme-katkı oranı ilişkisi



Şekil 43. Dere agregalı katkısız ve uçucu kül ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genleşme-katkı oranı ilişkisi



Şekil 44. Dere agregalı katkısız ve silis dumanı ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genleşme-katkı oranı ilişkisi



Şekil 45. Dere agregalı katkısız ve metakaolin ikameli harç çubuk örneklerinin 14 günlük genleşme-katkı oranı ilişkisi

ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk metoduna göre 14 gün sonunda elde edilen ölçümlere göre yüzde olarak genleşme değerlerinin irdelenmesi aşağıdaki gibi yapılır.

- 14 gün sonundaki genleşme yüzde olarak %0.10 değerinin altında ise agregalar alkali-silika reaktivitesi itibariyle zararsızdır.
- 14 gün sonundaki genleşme yüzde olarak %0.20 değerinin üstünde ise agregalar alkali-silika reaktivitesi itibariyle zararlıdır.
- 14 gün sonundaki genleşme yüzde olarak %0.10 ile %0.20 arasında olması halinde agregalar alkali-silika reaktivitesi itibariyle şantiye koşullarında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir. Bu sebeple agregalar hakkında karara varmadan önce ek deneyler yardımıyla genleşmenin sebebi araştırılmalı ve ölçümlerin 28 güne kadar uzatılmalıdır.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada alkali-silika reaktiflik itibariyle zararlı olarak değerlendirilen taş ocağı agregası ile potansiyel zararlı olarak değerlendirilen dere agregasının alkali-silika reaktiflik itibariyle iyileştirilmesinde uçucu kül, silis dumanı ve metakaolinin etkisi araştırılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

1. Yapılan ön çalışmada taş ocağı agregası üzerinde gerçekleştirilen hızlandırılmış harç çubuk deneyi ile 14 günlük genişmesi %0.2189 olarak ölçülmüştür. ASTM C1260'a göre alkali-silika reaksiyonu nedeniyle 14 günlük genişmesi %0.2 değeri üzerinde olduğu için taş ocağı agregası zararlı agregası sınıfı olarak değerlendirilmiştir. Dere agregası üzerinde gerçekleştirilen ön çalışmada ise 14 günlük genişme %0.1280 olarak belirlenmiştir. Dere agregası ASTM C1260'a göre potansiyel olarak hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir nitelikte olduğu belirlenmiştir.
2. Taş ocağı agregası ile çimentonun %20 uçucu kül ikame edilerek gerçekleştirilen deneyde genişme yüzdesi %0.0398 olarak belirlenirken, genişme %40 ikame oranı için %0.0057, %60 ikame için %0.0051 olarak belirlenmiştir. Uçucu külün çimento ile ikame oranı arttıkça alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan genişme belirgin bir biçimde azalmaktadır.
3. Taş ocağı agregası üzerinde gerçekleştirilen deneyde silis dumanının çimento ile %5 oranında ikame edilmesi durumunda genişme yüzdesi %0.1660 olarak belirlenirken, genişme %10 ikame oranı için %0.0639, %15 ikame için %0.0633 dür. Silis dumanının çimento ile ikame oranı arttıkça alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan genişme hatırı sayılır bir biçimde azalmak göstermektedir.
4. Taş ocağı agregası üzerinde gerçekleştirilen deneyde metakaolinin çimento ile %5 oranında ikame edilmesi durumunda genişme yüzdesi %0.1589 iken, %10 ikame oranı için %0.0884 ve %15 ikame için %0.0390 olarak belirlenmiştir. Metakaolinin çimento ile ikame oranı arttıkça alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan genişmede önemli azalma meydana gelmektedir.

5. Dere agregası üzerinde gerçekleştirilen deneyde uçucu külün çimento ile %10 oranında ikame edilmesi durumunda genleşme yüzdesi %0.0658 düzeyinde iken, %20 ikame oranı için %0.0178 ve %30 ikame oranı için %0.0158 olarak belirlenmiştir. Uçucu kül ikamesinin artan oranlarında genleşme yüzdesindeki azalış belirginleşmektedir.
6. Dere agregası üzerinde gerçekleştirilen deneyde silis dumanının çimento ile %5 oranında ikamesi durumunda genleşme %0.1226 olarak belirlenirken, %7.5 ikame oranı için %0.0884 ve %10 ikame için %0.0600 ölçülmüştür. Silis dumanı ikame oranı arttıkça dere agregası için alkali-silika reaksiyonu nedeniyle ölçülen genleşmede önemli azalma gözlemlenmektedir.
7. Dere agregası üzerinde gerçekleştirilen deneyde metakaolinin çimento ile %5 oranında ikame edilmesi durumunda genleşme yüzdesi %0.0945 olarak belirlenirken, %7.5 ikame oranı için %0.0806 ve %10 ikame oranı için %0.0691 olarak ölçülmüştür. Dere agregası için metakaolin ikame oranı arttıkça alkali-silika reaksiyonuna ilişkin genleşme azalmaktadır.
8. Farklı mineral katkıların alkali-silika reaktifliğine etkisine ilişkin yapılan çalışmada silis dumanı ve metakaolinin benzer oranlarda iyileştirmeler sağladığı görülmektedir. Uçucu külün iyileştirme yönündeki etkisi, kullanım oranı arttıkça, silis dumanı ve metakaoline göre daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.
9. Gerçekleştirilen deneysel çalışma ile farklı mineral katkıların alkali-silika reaksiyonunu iyileştirmeleri yönündeki olumlu etkileri açıkça görülmektedir.
10. Uçucu kül, silis dumanı ve metakaolinin ikili ve/veya üçlü karışımların alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkilerinin belirlenmesine ilişkin çalışma yararlı olabilir.
11. Çalışmada bahis konusu agregaların alkali-silika reaktifliğini belirlemede hızlandırılmış harç çubuk deneyi kullanılmıştır. Daha gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek ve karşılaştırma yapmak amacıyla beton prizma deneyi veya alternatif yöntemler denenebilir.

4. KAYNAKLAR

1. Bektaş, F., Preventive Measures Against Alkali-Silika Reaction, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
2. Munzni, B.K., Agarwal, R., Sharma, P ve Vidyarthi, U.S., Comparative Study of the Effect of using Different types of Portland Cement and other Additives on Alkali-Silica Reaction of Concrete Aggregates, International Journal of Recent development in Engineering and Technology, 2 (2014).
3. Swamy,R.N., Testing for Alkali-Silika Reaction, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, R.N. Swamy(Ed), Van Nostrand Reinhold, 54-95, New York, 1992.
4. Bektaş, F., Turanlı, L. ve Monterio, P.J.M., Use of Perlite Powder to Suppress the Alkali Silica Reaction, Cement and Concrete Research, 10 (2005) 2014-2017.
5. Katayama, T., Characteristics on Alkali Aggregate Reaction, The Study on the Maintenance and Rehabilitation of the Highway Bridges in the Republic of Turkey, 1996.
6. Karakaş, S. Harşit Çayı Vadisi Agregalarının Alkali Silika Reaksiyonu bakımından incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
7. Aşık, İ., Şen, H., Ergintav, Y., Ünsal, A., Şentürk, E. ve Bayrak, E., Alkali-Agrega Reaksiyonu Yönünden Zararlı Olan Bir Ocağın İyileştirilmesi, Beton Kongresi, 2004, Ankara Bildiriler Kitabı, 1-10.
8. Arslan, M. ve Çullu, M., Ankara Yöresindeki Bazı Agrega Ocaklarının Alkali-Silika Reaktivitesi Açısından İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (2006) 613-620.
9. Uygunoğlu, T., Yüksek Oranda Silis Dumanı İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonu Gelişiminin İncelenmesi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5 (2009) 9-16.
10. Arslan M. ve Taban, S., Ermenek Havzası Çetinkalesi Tepe Civarı Kırmataşlarının Alkali Silika Reaksiyonu Açısından İncelenmesi, Politeknik Dergisi, 12 (2009) 185-193.
11. Tapan, M., Özvan, A., Oyan, M. ve Direk, Y., Van Yöresinde Beton Üretiminde Kullanılan Agregaların Alkali-Silika Reaktivitesinin Belirlenmesi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17 (2012) 13-19.
12. Ramlochan, T., Thomas, M., ve Gruber, K.A., The Effect of Metakaolin on Alkali Silica Reaction in Concrete, Cement and Concrete Research, 30 (2000) 339-344.

13. İpek, M., Yılmaz, K. ve Sert, G., Sakarya Bölgesinde Üretilen Kırmataş Agregaların Alkali-Agrega Reaksiyonunun İncelenmesi, 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Bildiriler Kitabı, 1-6.
14. Kılınç, C., Satılmış, S. ve Akakın, T., Farklı Oranlarda Mineral Katkı ve Agreganın Alkali-Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi, Hazır Beton Kongresi, 2011, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 501-510.
15. Ramyar, K., Andiç, Ö., Uçucu Kül İnceliği ve Kullanım Oranının Alkali-Silis Reaksiyonuna Etkisi, 17. Teknik Kongre, 2004, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 487-494.
16. Demir İ., Alkali-Silika Reaksiyonu Etkisine Maruz Aynı Oranda Silis Dumanı ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Özellikleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25 (2010) 749-758.
17. Moser, R.D., Jayapalan A.R., Garas, V.Y. ve Kurtis, K.E., Assesment of Binary and Ternary Blends of Metakaolin and Class C Fy Ash for Alkali-Silica Reaction Mitigation in Concrete, Cement and Concrete Research, 40 (2010) 1664-1672.
18. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S., Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2012.
19. Neville, A.M., Properties of Cocrete, Longman Scientific and Technical, England, 1981.
20. Diamonds, S., Barneyback, R.S. ve Stuble, L.J., On the Physics and Chemistry of Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of the Fifth Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Preetonia, South Africa, National Building Research Institute, 1981.
21. Hobbs, D.W., Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford, London, 183.
22. Ramyar, K., Dönmez, H., Andiç, Ö., Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento ve Beton Araştırma-Geliştirme Enstitüsü, 2002, 3-15.
23. Bağdiken, M.Y., Betondaki Alkali-Silika Reaksiyonunu Önlemek İçin Kireçtaşı Tozu ve Uçucu Kül İçeren İkili ve Üçlü Karışımların Kullanılması, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2013.
24. Wodds, H., , Durability of Concrete Construction, Detroit Michigan, American Concrete Institute, 28-44, 1968.
25. Engin, G., Nevşehir Acıgöl Bölgesinden Elde Edilen Perlit Agregasının Alkali-Silika Reaksiyonunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
26. Baradan, B., Yazıcı, H. ve ÜN, H., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 2010.

27. Swamy, R.N., Alkali Aggregate Reaction the Bogeyman of Concrete, American Concrete Institute Special Report 144, Metha, P.K.(Ed.), American Concrete Institute, 1994.
28. Poole, A. B., Introduction Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 30-53, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, R.N. Swamy (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
29. Stark, D., Effects of Water-Cement Ratio on Expansion Due to ASR, Concrete Technology Today, (1995) 1-26.
30. Andıç, Ö., Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2002.
31. Swamy, R.N. ve Al-Asali, M.M., Effects of Alkali-Silica Reaction on the Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, 86 (1989) 451-459.
32. Glasser, F. P., Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, New York, 1992.
33. Baradan B. Yapı Malzemesi II, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 207, İzmir, 2000.
34. Shayan, A., Diggins, R. ve Ivanusec, I., Effectiveness of Fly Ash in Preventing Deleterious Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction in Normal and Steam-Cured Concrete, Cement and Concrete Research, 26 (1996) 153-164.
35. Shayan, A., Diggins, R. ve Ivanusec, I., Effectiveness of Fly Ash in Preventing Deleterious Expansion due to Alkali-Aggregate Reaction in Normal and Steam-Cured Concrete, Cement and Concrete Research, 26,1 (1996) 153-164.
36. Boddy, A.M., Hooton, R.D. ve Thomas, M.D.A., The Effect of product form of silica fume on Its Ability to Control Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research, 30 (2000) 1139-1150.
37. Aquino, W., Lange, D.A. ve Olek, J., The Influence of Metakaolin and Silica Fume on the Chemistry of Alkali-Silica Reaction Products, Cement and Concrete Composites, 23 (2001) 485-493.
38. Tosun, K., Uçucu Kül ve Silika Tozunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2001.
39. Hobbs, D.W., Influence of Pulverized-Fuel Ash and Granulated Blastfurnace Slag upon Expansion Caused by the Alkali-Silica Reaction, Magazine of Concrete Research, 34 (1982) 83-94.

40. Lane, D.S., Ozyıldırım, C., Preventive Measures for Alkali-Silica Reactions, Cement and Concrete Reserach, 29 (1999) 1281-1288.
41. Naiqian, F. ve Tingyu, H., Mechanism of Natural Zeolite Powder in Preventing Alkali-Silica Reaction in Concrete, Advances in Cement Research, 10 (1988) 101-108.
42. Gürkan, A., Pomza ve Zeolit Alkali-Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
43. Abit, Ö., Alkali Silis Reaksiyonunun Kimyasal Katkılar ile Önlenmesi, Azaltılması veya Onarılması, T.C. Karayolları Kurs Programı, Ankara, 1998.
44. Stark, D., Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structure, Washington, Strategic Highway Research Program, 1993.
45. Gün, M., Adapazarı Bölgesindeki Agregaların Alkali-Agrega Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
46. Farny, J. A. ve Kosmatka, S.H., Betonda Alkali-Agrega Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü, American Concrete Pavement Association, 1997.
47. ASTM C1260, Standart Test Method for Potential Reactivity of Aggregates, ASTM, 2007.
48. Berube, M.A. ve Duchesne, J., Evaluation of Test Methods Used for Assesing the Effectiveness of Mineral Admixtures in Suppresssing Expansion due to Alkali Aggregate Reaction, Proceedings, 4th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 1992, Istanbul, Bildiriler Kitabı, 549-575.
49. TS 2517, Alkali-Agrega Reaktivitesinin Kimyasal Yolla Tayini, T.S.E., Ankara, 1977.
50. Grattan, P.E., Cybanski, C., Fournier, B. ve Mitchell, L., Proposed Universal Accelerated Test for Alkali-Aggregate Reaction, 25, 29-34.

5. EKLER

Ek 1. Üretilen harç çubuk numunelere ait deney sonuçları

Ek Tablo 1. %20 Uçucu kül ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0032	0.0144	0.0403	0.0916
2 No'lu numune	0.0070	0.0165	0.0393	0.0926
Ortalama (%)	0.0051	0.0155	0.0398	0.0921

Ek Tablo 2. %40 Uçucu kül ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0046	0.0056	0.0081	0.0147
2 No'lu numune	0.0035	0.0045	0.0056	0.0147
3 No'lu numune	0.0025	0.0028	0.0035	0.0172
Ortalama (%)	0.0035	0.0043	0.0057	0.0155

Ek Tablo 3. %60 Uçucu kül ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0025	0.0035	0.0039	0.0046
2 No'lu numune	0.0017	0.0028	0.0038	0.0071
3 No'lu numune	0.0049	0.0053	0.0077	0.0123
Ortalama (%)	0.0030	0.0039	0.0051	0.0080

Ek Tablo 4. %5 Silis dumanı ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0126	0.0810	0.1709	0.2726
2 No'lu numune	0.0091	0.0674	0.1600	0.2646
3 No'lu numune	0.0175	0.0716	0.1670	0.2656
Ortalama (%)	0.0131	0.0733	0.1660	0.2676

Ek Tablo 5. % 10 Silis dumanı ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0035	0.0263	0.0646	0.1519
2 No'lu numune	0.0017	0.0200	0.0653	0.1358
3 No'lu numune	0.0007	0.0200	0.0617	0.1386
Ortalama (%)	0.0020	0.0221	0.0639	0.1421

Ek Tablo 6. % 15 Silis dumanı ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0010	0.0246	0.0635	0.1210
2 No'lu numune	0.0003	0.0161	0.0663	0.1330
3 No'lu numune	0.0003	0.0144	0.0600	0.1210
Ortalama (%)	0.0005	0.0184	0.0633	0.1250

Ek Tablo 7. % 5 Metakaolin ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0102	0.0617	0.1495	0.2719
2 No'lu numune	0.0168	0.0691	0.1596	0.2835
3 No'lu numune	0.0172	0.0709	0.1677	0.2874
Ortalama (%)	0.0147	0.0672	0.1589	0.2809

Ek Tablo 8. % 10 Metakaolin ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0133	0.0309	0.0888	0.1803
2 No'lu numune	0.0137	0.0375	0.0874	0.1670
3 No'lu numune	0.0091	0.0407	0.0891	0.1793
Ortalama (%)	0.0120	0.0364	0.0884	0.1755

Ek Tablo 9. %15 Metakaolin ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0017	0.0144	0.0358	0.0919
2 No'lu numune	0.0056	0.0109	0.0309	0.0758
3 No'lu numune	0.0119	0.0270	0.0502	0.1007
Ortalama (%)	0.0064	0.0174	0.0390	0.0895

Ek Tablo 10. %10 Uçucu kül ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0109	0.0400	0.0579	0.1368
2 No'lu numune	0.0004	0.0186	0.0621	0.1421
3 No'lu numune	0.0144	0.0189	0.0775	0.1589
Ortalama (%)	0.0086	0.0258	0.0658	0.1459

Ek Tablo 11. %20 Uçucu kül ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0042	0.0049	0.0225	0.0761
2 No'lu numune	0.0007	0.0035	0.0207	0.0684
3 No'lu numune	0.0007	0.0025	0.0102	0.0670
Ortalama (%)	0.0019	0.0036	0.0178	0.0705

Ek Tablo 12. %30 Uçucu kül ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0014	0.0038	0.0158	0.0533
2 No'lu numune	0.0017	0.0035	0.0116	0.0505
3 No'lu numune	0.0004	0.0007	0.0200	0.0600
Ortalama (%)	0.0012	0.0027	0.0158	0.0546

Ek Tablo 13. %5 Silis dumanı ikameli taş ocağı agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0084	0.0344	0.1249	0.1965
2 No'lu numune	0.0074	0.0372	0.1203	0.2000
Ortalama (%)	0.0079	0.0358	0.1226	0.1983

Ek Tablo 14. %7.5 Silis dumanı ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0046	0.0193	0.0895	0.1793
2 No'lu numune	0.0151	0.0288	0.0926	0.1870
3 No'lu numune	0.0032	0.0186	0.0832	0.1603
Ortalama (%)	0.0076	0.0222	0.0884	0.1755

Ek Tablo 15. %10 Silis dumanı ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0014	0.0032	0.0516	0.1235
2 No'lu numune	0.0063	0.0119	0.0670	0.1326
3 No'lu numune	0.0081	0.0172	0.0614	0.1428
Ortalama (%)	0.0053	0.0108	0.0600	0.1330

Ek Tablo 16. %5 Metakaolin ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0189	0.0267	0.0719	0.1540
2 No'lu numune	0.0165	0.0537	0.1060	0.1874
3 No'lu numune	0.0161	0.0607	0.1056	0.1768
Ortalama (%)	0.0172	0.0470	0.0945	0.1727

Ek Tablo 17. %7.5 Metakaolin ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0109	0.0446	0.0782	0.1295
2 No'lu numune	0.0123	0.0505	0.0797	0.1284
3 No'lu numune	0.0165	0.0456	0.0839	0.1312
Ortalama (%)	0.0132	0.0469	0.0806	0.1297

Ek Tablo 18. %10 Metakaolin ikameli dere agregasına ilişkin deney sonuçları

	Genleşme Yüzdesi (%)			
	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün
1 No'lu numune	0.0106	0.0495	0.0702	0.1014
2 No'lu numune	0.0056	0.0389	0.0642	0.0933
3 No'lu numune	0.0175	0.0456	0.0730	0.1010
Ortalama (%)	0.0116	0.0447	0.0691	0.0986

ÖZGEÇMİŞ

Safa NAYIR, 03.07.1990'da Trabzon'da doğdu. İlköğretimini Yavuz Selim İlköğretim okulunda, liseyi Trabzon Lisesinde tamamladı. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesini İnşaat Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisansa başladı. İngilizce bilmektedir.