

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOLOMIT KÖKENLİ AGREGALARIN
ALKALİ-KARBONAT REAKTİVİTESİNİN
ARAŞTIRILMASI

Giray ALPTUNA

Ağustos, 2009

İZMİR

**DOLOMIT KÖKENLİ AGREGALARIN
ALKALİ-KARBONAT REAKTİVİTESİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı**

Giray ALPTUNA

Ağustos, 2009

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

GİRAY ALPTUNA, tarafından **DOÇ. DR. HALİT YAZICI** yönetiminde hazırlanan “**DOLOMİT KÖKENLİ AGREGALARIN ALKALİ-KARBONAT REAKTİVİTESİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Doç. Dr. Halit YAZICI

Yönetici

.....
.....
Jüri Üyesi

.....
.....
Jüri Üyesi

.....
Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince bana yol gösteren, çalışma hevesini, azmini ve araştırmacı ruhunu kendime örnek aldığım Sn. Doç. Dr. Halit YAZICI'ya her konuda göstermiş olduğu destek, ilgi ve hoşgörü için sonsuz teşekkürü borç bilirim. Ayrıca tez konumu seçmemde bana yol gösteren Sn. Prof Dr. Bülent BARADAN'a ve tezim süresince değerli görüşlerini ve bilgilerini paylaşan Sn. Doç. Dr. Selçuk Türkel'e teşekkür ederim.

Zonguldak agregalarının temin edilmesinde yardımcı olan Modern Beton'dan Sn. Nagehan HALDENBİLEN'e, Kanada agregasının temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen Sn. Teresa Ferreira'ya, yüksek fırın curufunun temin edilmesinde yardımcı olan Karçimsa'dan Sn. Hakan ŞENVARDARLI'ya ve Sn. Selma CESUR'a, uçucu külün temin edilmesinde yardımcı olan Batı Beton'dan Sn. İrfan KADIROĞLU'na, silis dumanının temin edilmesinde yardımcı olan BASF'tan Sn. Okan DUYAR'a teşekkür ederim.

Agrega taraması sırasında ve petrografik incelemelerde benden değerli yardımlarını esirgemeyen Sn. Hakan ELÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Petrografik incelemeler sırasında değerli bilgi ve yorumlarını benimle paylaşan Sn. Yard. Doç. Dr. İbrahim GÜNDOĞAN'a ve Sn. Yard. Doç. Dr. İsmail İŞİNTEK'e, SEM incelemeleri sırasında yardımları için ise Sn. Esra DOKUMACI'ya ve Sn. Aslıhan SÜSLÜ'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, azmine, kişiliğine, zekâsına, ileri görüşlülüğüne, bilgisine ve deneyimine hayran olduğum sevgili babam Doç. Dr. Nejat Erdem ALPTUNA'ya, gösterdiği destek, sevgi, anlayış ve sabır için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Giray ALPTUNA

DOLOMIT KÖKENLİ AGREGALARIN ALKALİ-KARBONAT REAKTİVİTESİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Son yıllarda ülkemizdeki bazı betonarme köprü ayakları, alkali-silika reaksiyonu sonucu hasar görmüştür. Oysaki alkali reaktif agregaların kullanımının betonda hasara yol açabileceği 1940'lı yıllardan beri bilinen bir olgudur. Bu konuda gerek yurtiçinde gerekse yurtdışında geniş çaplı araştırmalar yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir. Alkali silika reaksiyonu (ASR) gibi alkali karbonat reaksiyonu (ACR) da bir alkali agrega reaksiyonu türüdür. ACR'nin betonda hasara yol açabildiği 1950'li yıllardan beri bilinmektedir. Ülkemizde bu konuda yaygın çalışmalar yapılmadığı gibi, henüz hasar da rapor edilmemiştir. Ancak beton üretiminde dolomit kökenli agregaların kullanımının yaygınlaşması ile konunun önem kazandığı düşünülmektedir. Dolomitlerde ACR ile dolomit ve kireçtaşı, kendilerinden daha büyük hacimli olan kalsite ve brusite dönüşür (dedolomitizasyon). Oluşan genleşme betonda harita şeklinde çatlaklara yol açar. Reaksiyonun önlenebilirliği konusunda farklı görüşler mevcuttur. Kimi araştırmacılar mineral katkıların ve lityum tuzlarının reaksiyonu önleme konusunda ASR'de olduğu gibi etkili olduğunu iddia ederken, kimi araştırmacılar ise bu tür önlemlerin reaksiyonu durduramadığı kanısındadır.

Tez kapsamında ilk olarak reaktivite gösteren bir agrega seçilmiştir. Seçilen agrega kullanılarak mineral ve kimyasal katkıların reaksiyonu önlemedeki etkinliği, iki farklı hızlandırılmış deney yöntemi (AAR2 ve AAR5) ile araştırılmıştır. Sonuçları kıyaslamak amacıyla, literatürde Alkali-Karbonat Reaksiyonu için referans agregası olarak kabul edilen Kanada agregası da temin edilmiş ve aynı deneyler yürütülmüştür. Reaksiyonun gelişimi petrografik incelemelerle ve SEM analizleri ile izlenmiştir.

Her iki agregada da ASR ve ACR'nin birlikte geliştiği grlmştr. Mineral ve kimyasal katkıları, reaksiyonu engellemede belli mertebelerde etkili olmaktadır.

Anahtar sözcükler: Alkali karbonat reaksiyonu, katkı, dolomit, iç yapı

INVESTIGATION OF ALKALI-CARBONATE REACTION OF DOLOMITIC AGGREGATES

ABSTRACT

Some reinforced concrete bridges have been deteriorated by alkali-silica reaction (ASR) in our country during the last decades. However, deleterious effects of ASR for concrete structures have been known since 1940. There are a lot of experimental studies denoted on ASR in Turkey and in abroad. Alkali carbonate reaction (ACR) in concrete is a kind of alkali aggregate reactions and detrimental effect of it has been known since 1950. However, the detailed investigations have not been conducted on ACR and damage has not been reported yet due to ACR in our country. Dolomites are now used in the production of concrete and it is expected that this phenomenon will be important for the construction industry in near future. Dolomite and limestone convert to the brucite and calcite due to alkali carbonate reaction which causes expansion in concrete and map cracking. Different investigators suggested different preventing measurements in the literature. According to some resources mineral admixtures and lithium salts are effective for preventing the ACR. However, contradictory test results have also been reported.

Firstly, a reactive aggregate from Turkey was chosen. Then, influence of mineral and chemical admixtures on controlling the reaction was investigated by conducting two accelerated test methods (AAR2 and AAR5). In order to compare those test results, Canada aggregate, which is considered as reference Alkali-Carbonate reactive aggregate, was supplied and the same tests were also conducted on this aggregate. Development of the reaction was observed by petrographic examinations and SEM analysis.

It was seen that both ASR and ACR are available in both of the aggregates. Mineral and chemical admixtures are effective on certain degrees on controlling the reaction.

Keywords: Alkali-Carbonate Reaction, admixture, dolomite

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	vi

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

BÖLÜM İKİ - ALKALİ AGREGA REAKSİYONLARI..... 5

2.1 Giriş.....	5
2.2 Alkali-Silika Reaksiyonu.....	7
2.3 Alkali-Karbonat Reaksiyonu.....	9
2.3.1 ACR Mekanizması.....	14
2.3.2 ACR’de İç Yapı İncelemeleri.....	18
2.3.3 ACR’e Etki Eden Faktörler.....	24
2.3.3.1 Sıcaklığın Etkisi.....	25
2.3.3.2 Nemin Etkisi.....	26
2.3.3.3 Alkali İçeriğinin Etkisi.....	30
2.3.3.4 Agregatürünün Etkisi.....	31
2.3.3.5 Agregatür Boyutunun Etkisi.....	35
2.3.3.6 Örnek Boyutunun Etkisi.....	37
2.3.3.7 Porozitenin ve Su/Çimento Oranının Etkisi.....	39
2.4 ASR-ACR Bilinmezliği.....	39
2.5 ACR’de Katkıların Etkinliği.....	41

BÖLÜM ÜÇ - DENEY YÖNTEMLERİ..... 44

3.1 Uzun Dönemli Deney Yöntemleri.....	46
--	----

3.1.1 ASTM C586: Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates-Rock Cylinder Method (Beton Agregası Olarak Karbonat Kayaçların Potansiyel Alkali Reaktivitesi-Kaya Silindir Yöntemi)	46
3.1.2 ASTM C1105: Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Reaction (Alkali-Karbonat Reaksiyonu Nedeniyle Betonda Boy Değişimi) 46	
3.1.3 RILEM AAR3: Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates - Method For Aggregate Combinations Using Concrete Prisms (Agregaların Alkali-Reaktivitesi Potansiyelinin Saptanması – Beton Prizmaları Kullanılan Agregasyonları için Yöntem)	47
3.1.4 RILEM AAR4: Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates – Ultra Accelerated Concrete Prism Test (Agregaların Alkali-Reaktivitesi Potansiyelinin Saptanması – Ultra Hızlandırılmış Beton Prizma Deneyi) 47	
3.2 Kısa Dönemli Deney Yöntemleri	48
3.2.1 RILEM AAR-5 Yöntemi : Rapid Preliminary Screening Test For Carbonate Aggregates (Karbonat agregaları için hızlı ön gözlem testi) ve RILEM AAR-2 Yöntemi : Ultra Accelerated Mortar Bar Method (Hızlandırılmış harç çubuğu metodu).	48

BÖLÜM DÖRT - ÖN DENEYLER VE KULLANILAN MALZEMELER.....49

4.1 Çimento	49
4.2 Katkılar	49
4.3 Ön Deneyler ve Reaktif Agregaların Seçilmesi	50

BÖLÜM BEŞ - İLERİ DENEYLER 56

5.1 Petrografik İncelemeler	57
5.1.1 Zonguldak Agregasının Petrografik İncelemesi.....	57
5.1.2 Kanada Agregasının Petrografik İncelemesi.....	61

5.2 Katkılarının Etkinliğinin Araştırılması.....	65
5.2.1 Zonguldak Agregası İle Yapılan Deneyler.....	65
5.2.1.1 AAR2 Yöntemine Uygun Yürütülen Deneyler.....	65
5.2.1.1.1 Uçucu Kül İkamesi.....	65
5.2.1.1.2 Yüksek Fırın Curufu İkamesi.....	67
5.2.1.1.3 İri (100µm-400µm Arası) Zeolit İkamesi.....	69
5.2.1.1.4 İnce (100µm Altı) Zeolit İkamesi.....	70
5.2.1.1.5 Metakaolin İkamesi.....	72
5.2.1.1.6 Silis Dumanı İkamesi.....	73
5.2.1.1.7 Lityum Hidroksit İkamesi.....	74
5.2.1.2 AAR5 Yöntemine Uygun Yürütülen Deneyler.....	76
5.2.1.2.1 Uçucu Kül İkamesi.....	76
5.2.1.2.2 Yüksek Fırın Curufu İkamesi.....	78
5.2.1.2.3 İri (100µm-400µm Arası) Zeolit İkamesi.....	79
5.2.1.2.4 İnce (100µm Altı) Zeolit İkamesi.....	81
5.2.1.2.5 Metakaolin İkamesi.....	82
5.2.1.2.6 Silis Dumanı İkamesi.....	84
5.2.1.2.7 Lityum Hidroksit İkamesi.....	85
5.2.2 Kanada Agregası İle Yapılan Deneyler.....	93
5.2.2.1 AAR2 Yöntemine Uygun Yürütülen Deneyler.....	93
5.2.2.1.1 Uçucu Kül İkamesi.....	93
5.2.2.1.2 Yüksek Fırın Curufu İkamesi.....	95
5.2.2.1.3 İri (100µm-400µm Arası) Zeolit İkamesi.....	97
5.2.2.1.4 İnce (100µm Altı) Zeolit İkamesi.....	98
5.2.2.1.5 Metakaolin İkamesi.....	99
5.2.2.1.6 Silis Dumanı İkamesi.....	101
5.2.2.1.7 Lityum Hidroksit İkamesi.....	102
5.2.2.2 Kanada Agregası ile AAR5 Yöntemine Uygun Yürütülen Deneyler.....	104
5.2.2.2.1 Uçucu Kül İkamesi.....	104
5.2.2.2.2 Yüksek Fırın Curufu İkamesi.....	106

5.2.2.2.3 İri (100µm-400µm Arası) Zeolit İkamesi	107
5.2.2.2.4 İnce (100µm Altı) Zeolit İkamesi	109
5.2.2.2.5 Silis Dumanı İkamesi	110
5.2.2.2.6 Metakaolin İkamesi.....	111
5.2.2.2.7 Lityum Hidroksit İkamesi	113
5.3 İç Yapı İncelemeleri.....	123
5.3.1 Zonguldak Agregası ile Hazırlanan Örneklerin İç Yapı İncelemeleri.123	
5.3.1.1 Zonguldak Agregası Üzerinde Yapılan İç Yapı İncelemeleri..	123
5.3.1.2 Zonguldak Agregası ile Hazırlanan Kontrol (Mineral Katkısız) Örneği Üzerinde Yapılan İç Yapı İncelemeleri.....	126
5.3.2 Kanada Agregası ile Hazırlanan Örneklerin İç Yapı İncelemeleri .	139
5.3.1.1 Kanada Agregası Üzerinde Yapılan İç Yapı İncelemeleri	139
5.3.1.2 Kanada Agregası ile Hazırlanan Kontrol (Mineral Katkısız) Örnek Üzerinde Yapılan İç Yapı İncelemeleri.....	141
BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER	157
6.1 Sonuçlar.....	157
6.2 Öneriler.....	158
KAYNAKLAR.....	159
EKLER.....	167

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Genel olarak, beton agregaları atıl (kimyasal etkisi olmayan, inert) malzemeler olarak kabul edilmektedir. Ancak reaktif silika veya reaktif karbonat içeren bazı agregalar, zamanla betonun içerisindeki alkalilerle reaksiyona girebilmekte ve çok büyük genleşmelere yol açabilmektedir (Erdoğan, 2003). Bu reaksiyonların sebep olduğu genleşmeler betonda çatlaklara yol açarak dayanım, elastisite ve durabilite kaybına yol açmaktadır. Betonda böyle reaksiyonlara yol açan reaktif karbonat kayaçlarının en yaygını dolomit kayaçlardır.

Dolomit, yeryüzünün % 75 'ini kaplayan sedimanter kayaçların bir çeşididir. Böylesine geniş bir yayılım gösteren sedimanter kayaç grubunun ne kadarını karbonat kayaçların oluşturduğu bilinmemektedir. Bunun yanında karbonat kayaçlarının oluşumunun Prekambriyen'den başlayıp günümüze kadar devam ettiği düşünülecek olursa bu tip kayaçların, dolayısıyla dolomit varlığının çok büyük oranlarda olduğu ortaya çıkmaktadır. Nitekim dünyada pek çok ülkede dolomit rezervi bulunduğu bilinmesine rağmen rakamsal değerlere ulaşamamıştır. Ticari olarak dünya üzerinde çok geniş ölçekte üretilir ve çok geniş bir kullanım alanına sahiptir (www.dolomit.com.tr, 2006).

Dolomit, kireçtaşında Kalsiyum (Ca) ile beraber Magnezyumun (Mg) yer alması ile oluşan sedimanter bir kayaçtır. Kimyasal formülü $MgCa(CO_3)_2$ olan dolomit; beyaz sarımsı, kalsitten daha sert, dilinim şekliyle kalsitin aynı, kolay kırılır, kırılma yüzeyi midye kabuğu şekilli saydam ve yarı saydam, cam parıltılı bir mineraldir. Özgül ağırlığı Mg oranına bağlı olarak 2,71 ile 2,87 ton/m³, sertlik ise 3,5-4 arasındadır. Dolomitin; ham dolomit, kalsine dolomit ve yanmış dolomit olarak kullanım şekilleri vardır. Dolomit, basta demir-çelik sanayi olmak üzere cam, seramik, boya, gübre, tuğla, çimento ve inşaat sanayilerinde, tarımda toprak ıslahı gibi çok geniş bir alanda kullanılmaktadır (www.uyanlarmadencilik.com,

2009).

Dolomitin 120 milyon ton civarında olan dünya üretiminin yarıya yakını ABD'de gerçekleştirilmektedir. ABD'nin dışında İngiltere, Avusturya, Belçika, Japonya, Polonya, İspanya, Kanada, Brezilya, Almanya ve Avustralya yılda 1 milyon tonun üzerinde dolomit üreten ülkelerdir. Dünya'da 3 milyon tonun üzerindeki ihracatın 2 milyon tonunu Belçika ve Kanada yapmaktadır. 2 milyon ton civarındaki ithalatın ise 1,3 milyon tonu Japonya tarafından yapılmaktadır. Dünya'da dolomit büyük miktarlarda ve çok değişik sektörlerde kullanılmasına rağmen Türkiye'de üretimin çok önemli bölümü sadece demir-çelik ve cam sanayinde kullanılmaktadır. 6. Beş yıllık plan döneminde Türkiye'de ortalama yıllık 550 bin ton dolomit tüketilmiştir. Aynı dönemde üretim ise söz konusu tüketimi karşılayacak miktarlarda olmuştur. 7. Beş yıllık plan döneminde ise toplam ortalama yıllık tüketimin 600.000 ton civarında olması öngörülmektedir. Türkiye'nin bu dönemde dolomit ihracatı veya ithalatı yapması beklenmemektedir (www.uyanlarmadencilik.com, 2009).

Dolomit Türkiye'de Kambriyen'den Tersiyer'e kadar oldukça uzun bir yaş aralığında bulunmaktadır. Coğrafik olarak da oldukça yaygındır. Hemen hemen her yörede az veya çok miktarda dolomit kaynaklarına rastlamak mümkündür. Dolomit, kireçtaşlarında kalsiyumun yerini kısmen magnezyumun alması ile oluşmaktadır. Bu yüzden bu iki kayaç grubu daima beraber buldukları gibi, birinden diğerine de kolaylıkla geçiş göstermektedirler. İyi bir dolomitte MgO miktarı % 20 civarında olmaktadır. Türkiye'de bulunan dolomitler sanayide kullanılabilir nitelikte olup genellikle demir içerikleri de düşüktür. Ülkemizde dolomit coğrafik olarak oldukça geniş bir yayılım göstermektedir. Buna rağmen dolomit etütleri devam ettirildiği sürece ortaya daha çok sayıda dolomit yataklarının çıkacağı açıktır. En azından mevcut yataklar ülke ihtiyacını uzun yıllar rahatlıkla karşılayabilecek durumdadır. Günümüzde üretim yapılan ve yapılmayan değişik büyüklüklerde birçok dolomit yatağı mevcuttur. Tablo 1.1'de Türkiye dolomit yatakları ve rezervleri verilmektedir (www.dolomit.com.tr, 2006).

Tablo 1.1 Türkiye'nin dolomit rezervleri (www.dolomit.com.tr, 2006)

BÖLGE	MgO (%)	Rezerv (x10 ³ Ton)
Kırklareli-Dereli	18-21	10920 (Görünür+ muhtemel)
Malatya-Hekimhan-Zorbehan	20-21	122 (Görünür)
Zonguldak-Alaplı-Ormanlı	16-20	393 (Muhtemel)
Zonguldak-Eflani		95 (Görünür+ muhtemel)
Zonguldak-Devrek		20 (Görünür+ muhtemel)
Marmara Adası	20-21	40 (Görünür+ muhtemel)
Hatay-Harbiye	19	880 (Görünür+ muhtemel)
Gaziantep-Fevzipaşa	18	
İçel-Gülnar-Aydıncık	19-20	
Konya-Yunak-Kocayazı		10 (Muhtemel)
İzmir-Karaburun-Çeşme	20-21	684000 (Görünür+ muhtemel)
İzmir-Torbalı-Cumaovası	17-21	7919 (Görünür+ muhtemel)
Antalya-Akseki	19-20	500 (Görünür+ muhtemel)
İstanbul-Şile		9932 (Görünür+ muhtemel)
Kocaeli-Gebze		621455 (Görünür+ muhtemel)
Çankırı-Eskipazar-Sofular	18-21	236520 (Görünür+ muhtemel)
Bartın-Kurucaşile	15-21	335000 (Görünür+ muhtemel)
Hatay-Payas	20	24500
Antalya (Komdullak)		50000
Aydın-Karataş		200000
Bursa-Köybaşı		5000
Eskişehir-Kaşhöyük		3000
Gümüşhane-Spelea deresi		1000000
Zonguldak-Balıkısık		4000

Türkiye'nin dünya rezervlerindeki payının yaklaşık %0,5 olduğu düşünülürse, dolomit madeni açısından zengin bir ülke olduğumuz söylenebilir (Özkan, 2006). Ülkemizde özellikle son dönemde dolomitin betonda agrega olarak kullanımının artması, alkali-karbonat reaksiyonu tehlikesini doğurmuştur.

Bu çalışmada ACR'nin mineral ve kimyasal katkıları ile önlenabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle ülkemizin değişik yörelerinden dolomit agregası temin edilerek reaktivite potansiyelleri araştırılmıştır. Reaksiyon gösteren bir agrega seçilerek bu agrega ıslah edilmeye çalışılmıştır. Tüm deneysel çalışmalar referans Kanada agregası ile kıyaslamalı olarak yürütülmüştür. İç yapı incelemeleri ve petrografik analizler ile reaksiyon ürünleri tanımlanmaya çalışılmıştır.

Deneysel alışmalar sonucunda ASR ve ACR'nin bir arada görüldüğü sonucuna varılmıştır. Mineral ve kimyasal katkıların reaksiyon gelişimini bir lde önleyebildiği grlmştir.

BÖLÜM İKİ

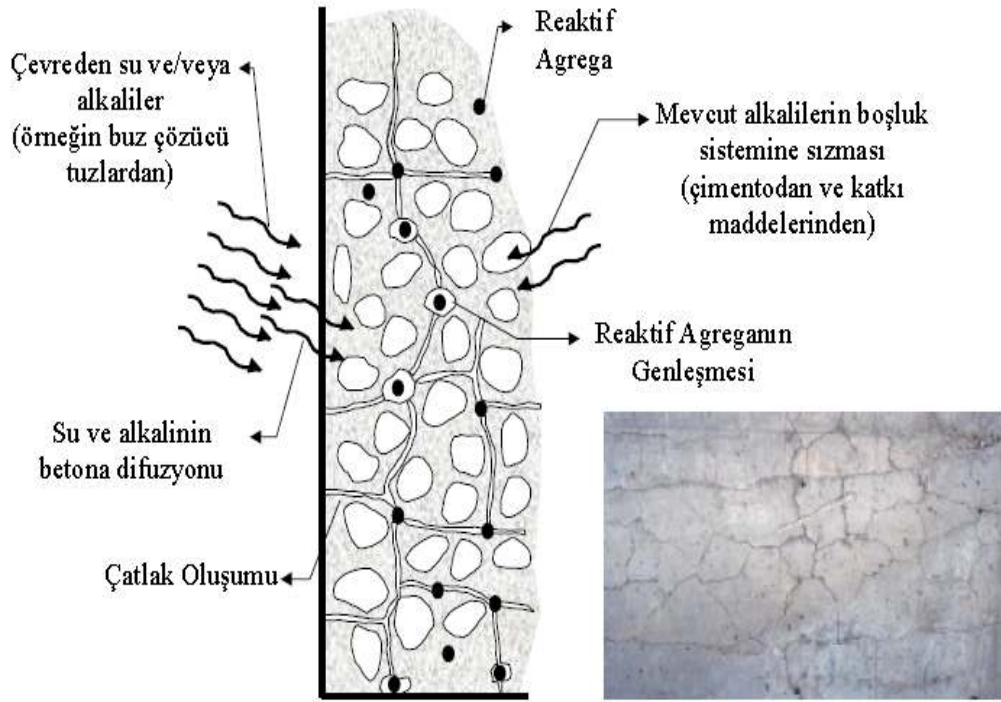
ALKALİ AGREGA REAKSİYONLARI

2.1 Giriş

1920'li ve 1930'lu yıllarda Kaliforniya'da birçok betonarme yapıda ve kaldırımlarda, yapımlarından sonraki birkaç yıl içinde şiddetli çatlaklar gözlenmiştir. Bu çatlakların sebebi ise Stanton tarafından 1940 yılında yapılan çalışmalar sonucunda anlaşılmıştır (Baradan ve diğ., 2002). Çimento ve agregalar arasındaki bir reaksiyonun sertleşmiş betonda çatlaklara yol açtığı ilk kez olarak Stanton (1940a, 1940b) tarafından yürütülen çalışmalarda, alkali içeriği nispeten yüksek olan çimentolar ile, reaktif olan türdeki silis içeren agregalar kullanılarak yapılan betonlarda, zaman içinde alkali-silika jeli oluştuğu ve bu oluşan jelin iç gerilmeler yaratarak betonu çatlattığı belirlenmiştir. Bu çalışmadan sonra, dünyanın çeşitli bölgelerinde nemli bölgelerde bulunan hasar görmüş betonlarda oluşan hasarın sebeplerinden bazılarının Alkali-Silika Reaksiyonu olduğu yönünde sayısız çalışmalar yapılmıştır. Blanks (1941) ve Meissner (1941) tarafından Parker barajında yürütülen çalışmalar da bu çalışmalara örnektir. Bu çalışmalarda, araştırmacılar oluşan çatlakları ve bozulmaları incelemişlerdir. Sonuçta betonda ASR ürünleri bulunduğunu tespit etmişlerdir (Çakır, 2007). Stanton tarafından 1940 yılında yapılan çalışmalardan sonra, Alkali-Agrega Reaksiyonlarının (AAR) dünyada en yaygın olarak iki şekilde görüldüğü belirlenmiştir: Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) ve Alkali-Karbonat Reaksiyonu (ACR) (Hewlett, 2006).

Ülkemizde ise hasar görmüş betonlardaki ASR tespiti 1995 yılında başlamıştır. T.C. Karayolları tarafından yapılan incelemeler sonucunda İzmir ili sınırlarında bulunan köprülerde ASR oluştuğu belirlenmiştir. Japon Jica firması tarafından yürütülen incelemeler sonucunda, İzmir yöresindeki çeşitli agregaların ASR potansiyeli taşıdığı belirlenmiştir (Çakır, 2007, Katayama, 2000).

Alkali-Agrega Reaksiyonlarının en önemli etkileri betonda genleşme yaratarak iç gerilmelere ve böylece hasar yol açmalarıdır. Fakat AAR'nin etkileri sadece bu kadarla sınırlı değildir. Açılan çatlaklar sebebiyle zaman içinde betonunu durabilitesi azalır ve dış etkilere karşı dayanıksız hale gelir. Şekil 2.1'de, AAR'nin oluşum mekanizması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1 AAR'nin şematik oluşum mekanizması ve tipik görünümü (Baradan, 2002)

Ahmed ve diğ. (2003) yaptıkları araştırmalar sonucunda çatlakların üç aşamada oluştuğunu saptamışlardır. İlk aşamada kılcal çatlaklar açılmaktadır fakat bu çatlaklar dışında büyüteç ile bakıldığında çok sayıda çatlak görülebilmektedir. İkinci aşamada büyüteç ile görülebilen çatlaklar büyümüştür ve neredeyse tüm çatlaklar gözle görülebilir hale gelmiştir. Üçüncü aşamada ise çatlakların içine reaksiyon ürünleri dolmuştur.

Çatlakların AAR ilerlemesindeki rolü çok büyüktür. Hacimsel basıncı yüzeye iletirler ve havadaki nemin betonun içine girmesine sebep olurlar. Böylece iç bölgelerde reaksiyonun ilerlemesine zemin hazırlanır. Ayrıca reaksiyon ürünlerinin yüzeye çıkmasına sebep olurlar (Ahmed ve diğ. (2003)).

2.2 Alkali-Silika Reaksiyonu

ASR iki aşamalı bir reaksiyon olarak düşünülebilir. İlk aşamada çoğunlukla çimentodan gelen alkaliler ile agregadan gelen reaktif bileşenler, ortamdaki nemin varlığıyla reaksiyona girer ve ASR jelini oluşturur (Baradan, 2004). İkinci aşamada ise oluşan ASR jeli ortamdaki nemi emerek şişer ve betonda iç gerilemeler oluşturur. Betonun çekme dayanımının az olması sebebiyle, oluşan iç gerilmeler betonda, genellikle harita şeklinde çatlaklara yol açar. Jel nemi emdikçe viskozitesi azalır ve önceden açılan çatlakların içine sızmaya başlar (Newman ve Choo, 2003). Oluşan bu genişleme Diamond ve diğ. (1981) gibi çoğu araştırmacı tarafından jelin su emmesine bağlansa da, Dent-Glasser ve Kataoka (1981) tarafından osmotik basınçla ilişkilendirilmektedir. Çoğunlukla reaktif bileşenlerin betonda homojen olarak dağıldığı düşünülürse, oluşan çatlaklar zaman içinde birbirleriyle bağlantılı hale gelirler.

ASR üzerinde yapılmış çalışmalar göstermiştir ki, ASR beton ve çelik üzerinde geri dönüşü olmayan gerilemeler yaratarak servis ömrünü, dayanımı, aderansı ve stabiliteyi çok kötü yönde etkilemektedir (Haddad ve Qudah, 2005). ASR sebebiyle kayda geçen en büyük eğilme dayanımı kaybı %25 olarak bilinmektedir (Swamy ve Al-Asali (1989), (1990)) Şekil 2.2’de İngiltere’de ASR sonucu hasara uğramış bir beton gösterilmiştir (Hewlett, 2006).



Şekil 2.2 ASR sonucu hasar görmüş bir beton (Hewlett, 2006).

Betonda ASR görülebilmesi için birkaç etkenin bir arada olması gerekmektedir:

- Yeterli nem
- Yeterli alkali içeriği
- Reaktif bileşenler

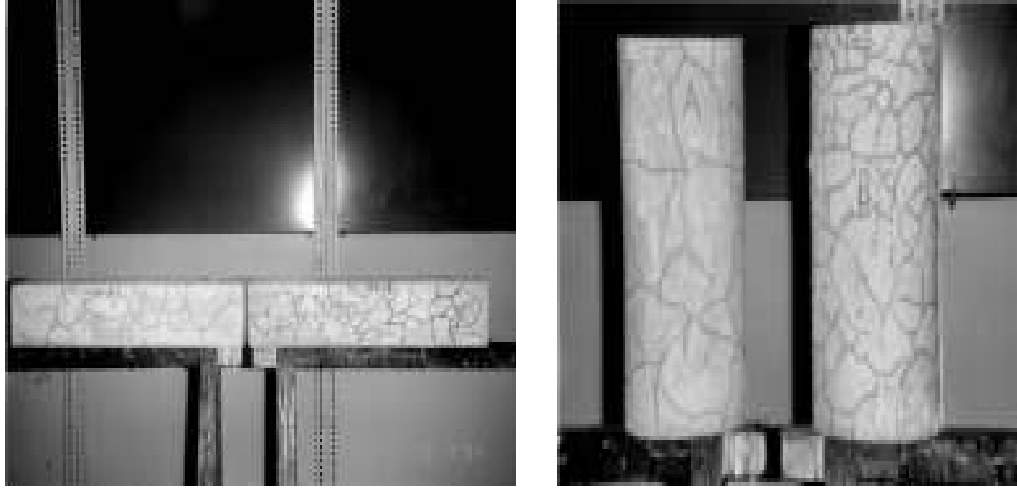
Alkali-Agrega reaksiyonlarını etkileyen faktörler ilerdeki bölümlerde ayrıntılı olarak irdelenecektir.

Çoğu durumda, reaksiyonun başlaması için gerekli olan alkaliler çimentodan gelse de, bazı durumlarda agreganın kendisinden veya betona katılan uçucu kül veya curufdan da alkali gelmesi olasıdır (Barlow ve Jackson, 1998). Bazı durumlarda, reaktif bileşenlerin deniz suyundan veya buz çözücü kimyasallardan da gelmesi mümkündür (Swamy ve Al-Asali, 1988, Chau, 1989).

Silikanın reaktivitesi büyük oranda atomik düzensizlik derecesine ve yüzey alanına bağlıdır (Gutteridge, 1985). Bilinen en reaktif doğal malzemelerden biri opaldir. Bilinen diğer reaktif silika türlerinden bazıları ise kristobalit, tridimit,

kalsedoni, mikro- ve kriptokristalin quartzdır.

Şekil 2.3’de Ahmed ve diğ. (2002) tarafından hazırlanan ve ASR geçirmiş örneklerin resimleri sunulmuştur.



Şekil 2.3 ASR geçirmiş örneklerin görüntüleri (Ahmed ve diğ., 2002)

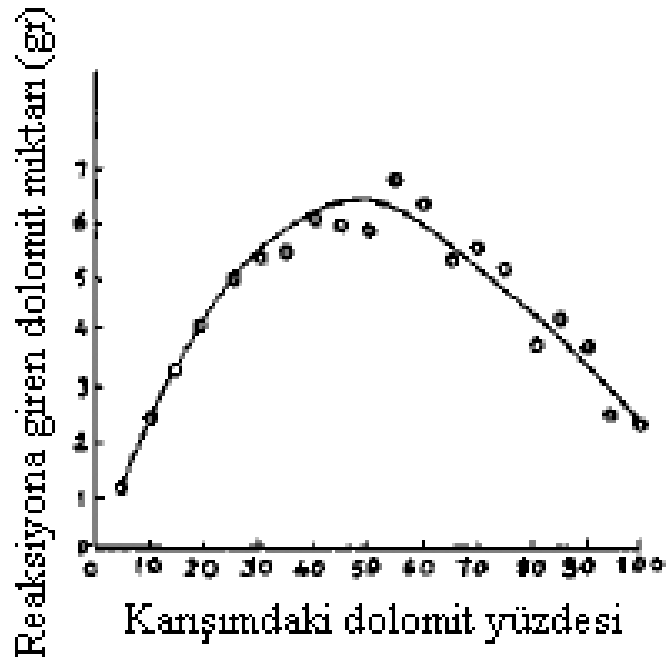
2.3 Alkali-Karbonat Reaksiyonu

Alkali-karbonat reaksiyonu (ACR) ilk olarak Swensson tarafından Kingston, Ontario, Kanada’da 1957 yılında gözlemlenmiş ve araştırılmıştır. O günden bu yana birçok araştırmacı bu konu üzerinde durmuş ve çeşitli bilgiler elde etmiştir. Fakat günümüzde, ACR’nin mekanizması ve zararları halen tam olarak anlaşılmış değildir ve bu konuda çelişkiler vardır. Örneğin Katayama ACR’nin tek başına genişleme ve böylece hasar oluşturmadığını, oluşan hasara sadece ACR ile birlikte gerçekleşebilen ve dolomit taneleri içindeki killerin sebep olduğu ASR’nin sebep olduğunu öne sürmüştür (Katayama, 1992). Karbonat kayaçlardaki mikro- ve kriptokristaline quartz gibi silika içeriği, karbonatlarda ASR için oldukça önemli bir kriter sayılmaktadır (Katayama, 2004). Fakat Xu ve diğ. kil içeriği çok az olan dolomit agregasının da genişlemeye sebep olduğunu belirtmiştir (Xu ve diğ., 2002).

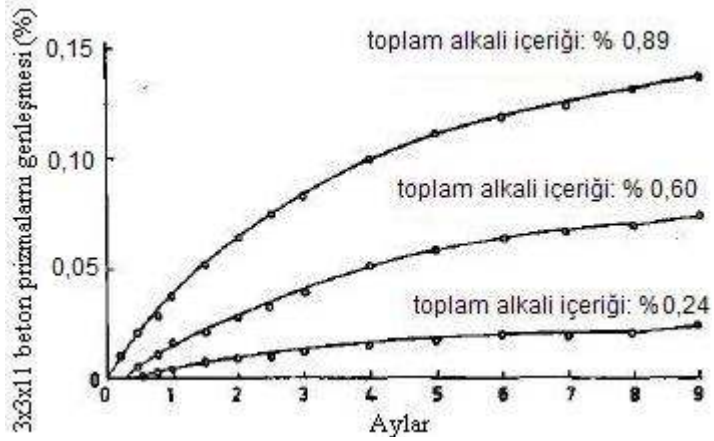
ACR'ye sebep olan karbonat kayaçların belirli bir mineralojik bileşimi vardır. Kısmen büyük dolomit kristalleri, ince taneli kalsit CaCO_3 , kil ve genellikle silt boyutundaki quartzlar oluşan matrisin içinde bulunmaktadır. Alkali- karbonat reaktif kayaçların en önemli belirleyici özelliği dokularıdır. Reaktif kayaçlarda dikdörtgen şekilli dolomit kristalleri merkezde sıkı bir şekilde veya hafifçe dağınık olarak bulunabilir. Dağınık bulunan dolomit kristallerinin kenarları daha sivri iken, merkezde birbirine sürtünen şekilde bulunanlar daha yumuşak biçimlidir. Kristallerin ortalama boyutları 25 μm 'dur, maksimum boyut 50 μm 'dur. Kalsit parçacıklarının boyutları ise 2 ile 6 μm arasında değişmektedir, killer daha ufaktır (ACI, 1998).

Dolomit taneleri ince uzun bir yapıya sahiptirler. Bu şekilleri sebebiyle normal bir betondan %4 - %6 daha fazla boşluk oluşumuna sebep olurlar. Bu agrega ile üretilen betonların çökme değerleri de beklenenden daha düşük çıkmaktadır.

Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'de Hadley ve diğ. (1964) tarafından yürütülen çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 2.4'de görüldüğü üzere reaksiyona giren maksimum dolomit miktarına, betondaki dolomit oranı %50 iken ulaşılmaktadır. Şekil 2.5 ise farklı alkali içerikli çimentolar için 9 aylık bir süreçte genleşmelerin değişimlerini göstermektedir.



Şekil 2.4 Karışımdaki dolomit yüzdesi ile reaksiyona giren dolomit miktarının değişimi (Hadley ve diğ., 1964).



Şekil 2.5 Değişik alkali içerikli beton karışımları için genleşme değerleri (Hadley ve diğ., 1964)

Yapılan çalışmalar betonda üç çeşit alkali-karbonat reaksiyonu oluşabileceğini göstermiştir. Bu üç çeşit reaksiyon şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Dolomit kökenli olmayan karbonatlı kayaçların sebep olduğu reaksiyonlar:
Hiç dolomit içermeyen veya çok az miktarda dolomit içeren kayaçlar reaktif

olabilir. Bu tür reaksiyonlar, agreganın enkesiti boyunca görülebilen reaksiyon hatları ile karakterize edilir. Agreganın enkesiti seyreltik hidroklorik asit ile kazındığında, reaksiyon sınırları reaksiyona girmeyen bölgelerden daha çabuk çözülür. Bu tür reaksiyonlar betona zararlı değildir.

2) Dolomitlerin veya yüksek dolomit içerikli karbonatlı kayaların sebep olduğu reaksiyonlar:

Özellikleri bir önceki reaksiyon türü ile aynıdır fakat bu tür reaksiyonlarda agreganın enkesiti seyreltik hidroklorik asit ile kazındığı takdirde, reaksiyon sınırları ile reaksiyona girmeyen bölgeler aynı anda çözünür. Bu reaksiyonların zararlı olduğuna dair bir kanıt henüz bulunmamıştır.

3) Saf olmayan dolomit kökenli kayaların sebep olduğu reaksiyonlar:

Bu tür kayaların kendilerine özgü bir dokuları ve bileşimleri vardır. Büyük dolomit kristalleri, ince taneli kalsitlerin ve killerin çevrelediği iç kısımda bulunur. Bu kayalar yüksek oranda dolomit ve kalsit ile asitte çözülmemeyen kil içeren atıklar içerir. Bu çeşit kayaların iki türlü reaksiyona yol açtığı görülmüştür:

a) Dedolomitizasyon reaksiyonu: Bu reaksiyonun betona zarar veren genişlemelere yol açtığı bilinmektedir. Bu reaksiyon sonucu brusit ($Mg(OH)_2$) oluşur.

b) Sınır-silisifikasyon reaksiyonu: Bu reaksiyonun betona zarar verdiğine dair kesin bir kanıt yoktur fakat betonun dayanım kazanma hızını yavaşlattığı bilinmektedir. Bu reaksiyon, reaksiyona giren agreganın tanelerinin etrafında silis fazlalığı oluşması ile karakterize edilir. (USA Army, 1994)

Spry ve diğ. (1996), ACR geçirmiş olan Iowa eyaleti otoyollarında yaptıkları incelemeler sonucunda, dayanıksız betonlarda 5 tabaka gözlemlenmiştir.

1- Kaya dolomit fazı.

2- Koyu dolomit hattı: Kısmen kalındır (100-300mm boyutunda), koyu renkli ve kirli görünen hat, agregaların dış yüzeylerinde görülmektedir. Bu tabaka

iç kısımdan daha boşluklu ve koyudur. Dolomitin iç kısımlarıyla kıyaslandığında, bu tabakada çok az dolomit kristali görülmektedir. Bunun sebebinin bu kristallerin çözünmüş olması veya bu hattın oluşumu sırasında genişleyen diğer kristaller tarafından emilmeleri olduğu düşünülebilir. Bu tabakanın çimento matrisi ile yan yana olduğu yerlerde genellikle bu hatta paralel oluşmuş mikro çatlaklar görülmektedir.

- 3- Açık renkli dolomit hattı: Dar (25-50mm boyutunda), temiz görünen, açık renkli, koyu dolomit hattının kenarında ve yine çimento fazı ile bağlantıda bulunan bir hattır. Bu fazın olmadığı bölgelerde çimento matrisi ile koyu dolomit hattı temas etmektedir. Bu tabaka, değişim geçirmemiş dolomitten daha açık bir renge sahiptir. Bu tabaka, koyu dolomit hattından daha az boşlukludur. Bu iki tabaka arasında da çatlaklar görülmüştür.
- 4- Açık renkli çimento pastası: Nispeten kalın ve açık renkli olan bu tabaka, agrega ile matris arayüzeyinde oluşmuştur. Agregalardan uzakta oluşan, değişim geçirmemiş çimento pastasından çok daha açıktır. Bu bölgede çatlaklar nadir olarak gözlemlenmiştir.
- 5- Çimento Pastası

Bu bölgelerde yapılan kimyasal analizlerde şu sonuçlar elde edilmiştir:

- İlk iki tabakada CaO oranı hemen hemen sabittir.
- Üçüncü tabakada CaO miktarı artarken MgO miktarı azalır.
- Bu değişim, dedolomitizasyon sonucu oluşan MgO kaybından dolayıdır.

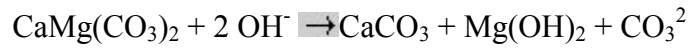
Betonda kullanılan agreganın bileşimi, ne çeşit bir reaksiyon oluşacağını belirler. Örneğin dolomit kökenli olmayan karbonat kayaçlar, seyreltik asitte agregadan daha önce çözülen reaksiyon hatları oluşturabilirler. Buna benzer olarak saf olmayan dolomit kökenli kireçtaşları, bol silikali reaksiyon hatları oluşturabilirler. Fakat her iki durumda da reaksiyon agrega ile çimento matrisi arasında gelişeceğinden, betonu kötü yönde etkileyebilir. Stokowski'e göre ACR'nin betona zarar verdiği bilinen tek türü dedolomitizasyon reaksiyonudur ve kil içeriği bol olan dolomit kökenli kireçtaşları ile pH'ı yüksek olan boşluk suyu arasında oluşur (Stokowski, 1998). Aynı şekilde Tang ve Min (1993) ve Tong ve Tang (1995)'de yaptıkları araştırmalarda aynı sonuca ulaşmışlardır.

2.3.1 ACR Mekanizması

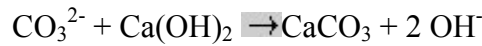
Dedolomitizasyon sırasında dolomit ve kireç, kendilerinden daha büyük hacimli olan kalsite ve brusite dönüşür. Bu reaksiyonun betonun toplam hacmi üzerindeki etkisi küçüktür fakat fazla oranda reaktif agrega taneleri içeren bölgelerde lokal genişmelere, bu sebeple de lokal çatlaklara yol açabilir. Bu sırada da agrega ile çimento arasındaki bağ zayıflar. Diğer taraftan da betonun porozitesini ve geçirimliliğini arttırarak betonun donma-çözünme gibi diğer mekanizmalara karşı dayanıklılığını azaltır (Stokowski, 1998).

Dolomitizasyon reaksiyonu sırasında, stabiliteyi kötü yönde etkileyen brusit oluşmaktadır. Dolomit kristallerinin kalsit içeriği diagenetik işlemlere bağlıdır ve çözülme ve dedolomitizasyon hassaslığını etkiler (Lopez-Buendia ve diğ., 2005).

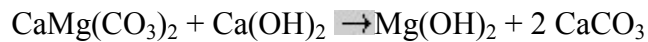
Reaksiyonun ilk ayağında yüksek PH'lı boşluk suyu dolomiti kalsite, brusite ve karbonat iyonlarına parçalar.



Yüksek miktardaki karbonat, kireç ile reaksiyona girerek daha fazla kalsit ve ilk reaksiyona sebep olan hidroksit iyonlarını oluşturur.



Bu reaksiyonlar dolomit ve portlandit tükenene kadar devam eder.



Lopez Buendia ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda ACR genişmesi şu üç ana etkene bağlanmıştır:

- Dolomitin stabilitesine
- Dolomitin dokusuna

- Dedolomitizasyonun görüldüğü yaşa (Lopez Buendia ve diğ. (2008))

Katayama'ya (2004) göre dedolomitizasyon ile ilgili en önemli nokta, ASR olmadığı sürece bu reaksiyonun genleşmeye neden olmamasıdır. Dedolomitizasyon sonucunda brusit ile dolu çatlaklar oluşur ve çimento matrisinde karbonat haleleri görülür. Fakat dedolomitizasyonun yol açtığı genleşme kuvvetlerinin, ASR ile kıyaslandığında ihmal edilebilir olduğu söylenebilir (Katayama, 2004).

Literatürdeki dedolomitizasyon süreçleri incelendiğinde üç farklı sonuç ortaya çıkmaktadır; genleşme, büzülme veya fazla genleşme olmadan hasar. Agreganın mineralojik bileşimi, stabilitesini, böylece de reaktivitesini ve alkali ortamdaki reaksiyonu belirlemektedir. Mikroyapısı ve tane boyutu ise genleşme mi, büzülme mi olacağını belirlemektedir (Lopez-Buendia ve diğ., 2008)

Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de ACR'nin yol açtığı hasarları göstermektedir. Şekil 2.6'de ACR sonucu oluşan harita biçimli çatlaklar görülmektedir. Şekil 2.7'de New Jersey'de ACR'nin ve ASR'nin bir arada oluşması sonucu enine ve boyuna çatlaklar ortaya çıkmıştır. Şekil 2.8'da ise ACR'nin sebep olduğu genleşme sonucu derzler arası boşlukların kapanmasını göstermektedir.



Şekil 2.6 Kanada'da, ACR'nin kaldırım döşemesine etkisi
(<http://www.tfhr.gov/pavement/pccp/petro/chaptr10.htm>, 2006).



Şekil 2.7 New Jersey’de, ASR’nin ve ACR’nin birarada görülmesi (<http://www.tfrc.gov/pavement/pccp/petro/chaptr10.htm>, 2006).



Şekil 2.8 Virginia’da ACR sonucu derzler arasındaki boşlukların kaybolması (<http://www.tfrc.gov/pavement/pccp/petro/chaptr10.htm>, 2006).

ASR ve ACR aynı anda görülebilir. Bunun sebebi karbonat agreganın mikro- ve kriptokristaline kuartz içermesi ve kil içeriğidir. ACR sonucu oluşan hasar alkali içeriğine, tane boyutuna, kayacın heterojenliğine, betonun geçirimsizliğine ve nem ve

sıcaklık gibi iklimatik koşullara bağlıdır (Lopez-Buendia ve diğ., 2005).

ACR betonun birkaç bölgesinde meydana gelebilir.

- 1) Yüzey Reaksiyonu: Bu reaksiyon sonucunda yüksek oranda kalsiyum içeren parçalar, yüksek oranda magnezyum içeren parçaların üzerinde yüzmektedir. Birkaç mikron çapında olan büyük parçalar kalsittir. Brusit taneleri ise kalsitlerden yaklaşık 20 kat daha küçüktür.
- 2) Çimento ile Agregada Arasındaki Arayüzey Reaksiyonları: Bu reaksiyon sonucunda $Ca(OH)_2$ 'nin arayüzeye yakın bölgelerde birikmeye çalıştığı görülmektedir. Dolomit tarafında ise dolomit yüzeyine yapışan brusitler üzerinde yüksek oranda kalsit gözlemlenmiştir. Çimento kısmında ise yüzey çoğunlukla kalsit ile kaplıdır, fakat bu kalsit, agregada kısmındaki kalsit ile birebir aynı değildir.
- 3) Agregada İçindeki Reaksiyonlar: ACR'den kaynaklanan çatlaklar genellikle ilk olarak agreganın içinde başlar ve daha sonra çimento matrisine yayılır. Bu da göstermektedir ki agreganın içinde oluşan reaksiyonlar hasarın temel sorumlusudur (Tong ve Tang, 1997).

Yüksek sıcaklık, yüksek alkali içeriği ve uygun tane boyutu kullanmak, ACR'yi hızlandırır. Genleşme, agregada parçalarının boyutunun büyümesi ile artmaktadır.

Tong ve diğ. (1999) tarafından yürütülen çalışmada betonun ve dolomit örneklerin çeşitli bölgelerinde oluşan ACR incelenmiştir. Dolomit prizmalarda ve beton çubuklarda, ACR sadece agregada yüzeyinde ve reaksiyon sınırlarında gerçekleşmektedir. Ne agregada parçalarının ayrışmasına, ne de agregada ile çimento ara yüzeyinde genleşmeye sebep olacak kuvvete yol açabilecek şekildedir. Bu sebeple belirgin bir genleşme gözlemlenmemiştir. (Tong ve Tang, 1999).

İlgi çekici noktalardan biri de agregada tane boyutunun düşmesiyle toplam genleşmenin azalmasıdır. Tane boyutunun düşmesiyle agregada-çimento ara yüzeyinde daha fazla reaksiyon oluşmasına rağmen toplam genleşme, büyük

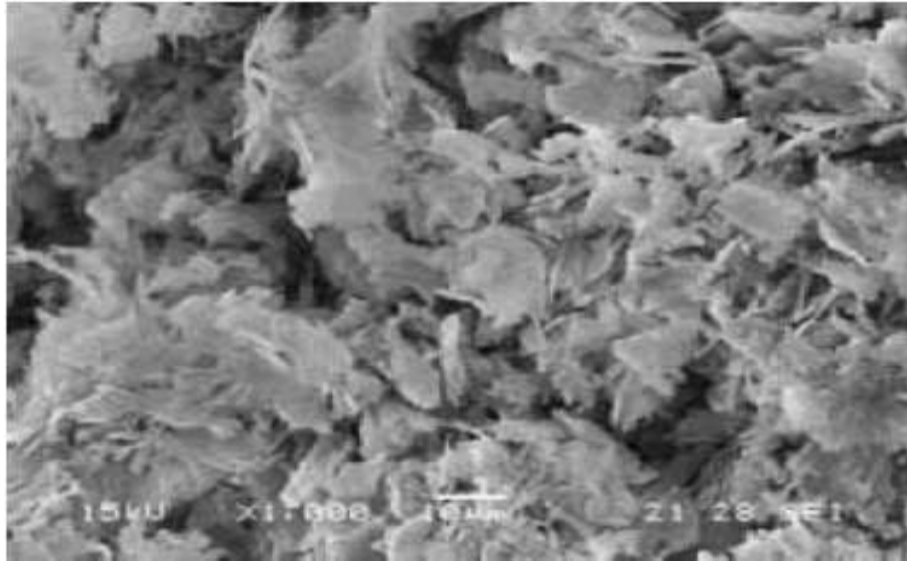
agrega taneli örneklerde olduğu kadar fazla değildir. (Tong ve Tang, 1999).

Yukarıdaki açıklamalar göstermiştir ki, ACR genişmeye yol açabilen, fakat aynı zamanda boşluk hacmini azaltan bir reaksiyondur. Reaksiyona girenlerle kıyaslandığında, ürünler boşlukların içine yayılmış olarak çok daha fazla yer kaplamaktadır.

Ayrıca reaksiyonun nerede oluştuğunun da önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. Agregası ile çimentonun ara yüzeyinde gerçekleşen reaksiyon fazla genişmeye sebep olmaz çünkü ürünler serbest bir bölgeye yayılırlar. Fakat reaksiyon sıkı bir bölgede oluşuyorsa betonda genişmeye bağlı hasara yol açabilir.

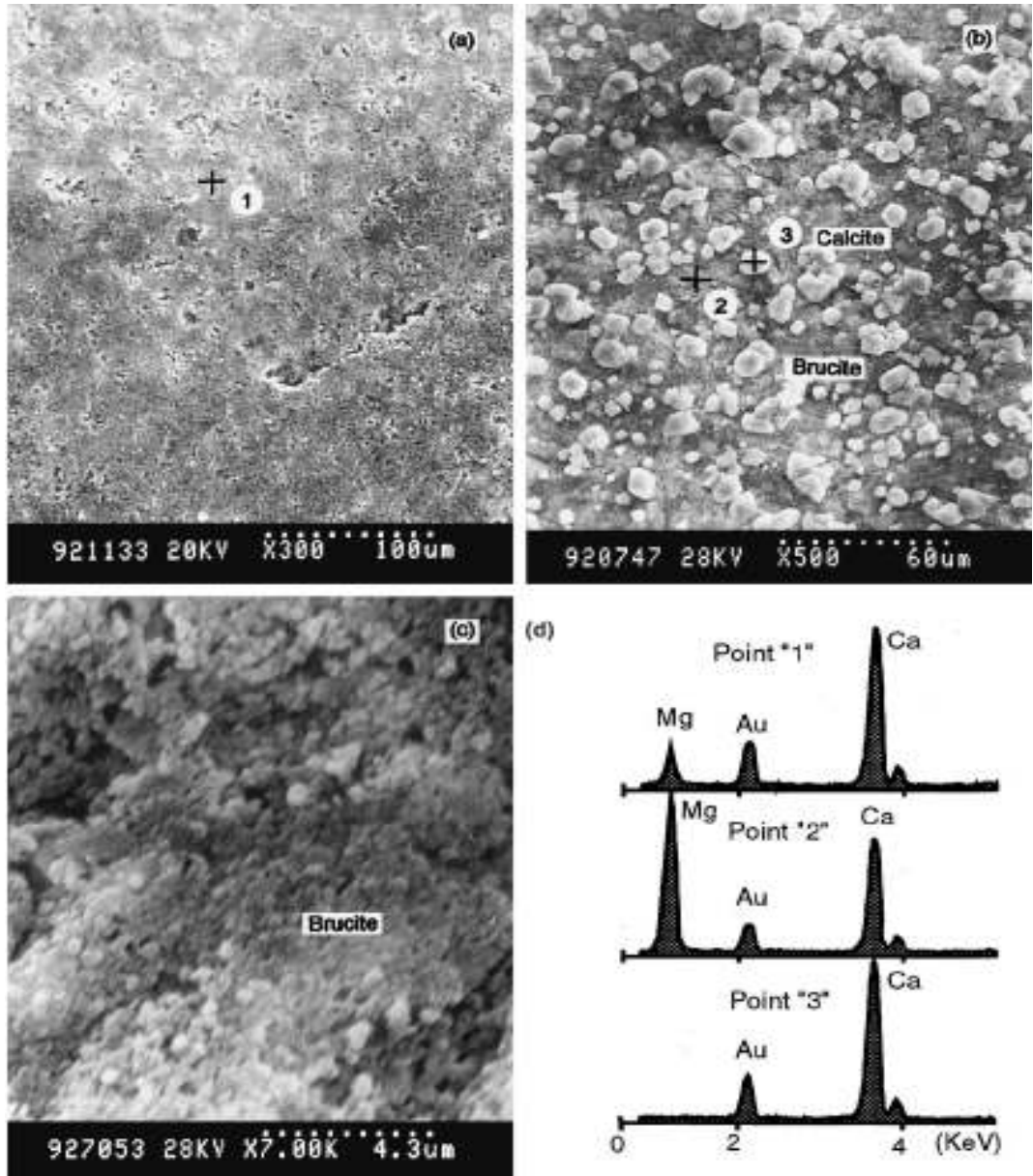
2.3.2 ACR'de İç Yapı İncelemeleri

Şekil 2.9'da, Lu ve diğ. tarafından yapılan deneyler sonucunda, NaOH çözeltisinde otoklavlanmış Pittsburg agregasından alınmış bir SEM fotoğrafı sunulmuştur. Fotoğrafta görülen yapraksı ve iğnemsî yapılar reaksiyon ürünleridir. Bu reaksiyon ürünlerinde yapılan analizler sonucunda, ürünlerin Kalsiyum, Silisyum ve Sodyum ağırlıklı olan ASR jeline benzer yapıda olduğu belirlenmiştir. Ayrıca aynı çalışmalar sonucunda Pittsburg agregasındaki (tez kapsamında kullanılan referans Pittsburg agregası ile aynı agregası) quartz'ın reaksiyona girerek ASR jeli oluşturduğu ve genişmeye katkı sağladığı saptanmıştır (Lu ve diğ., 2006).



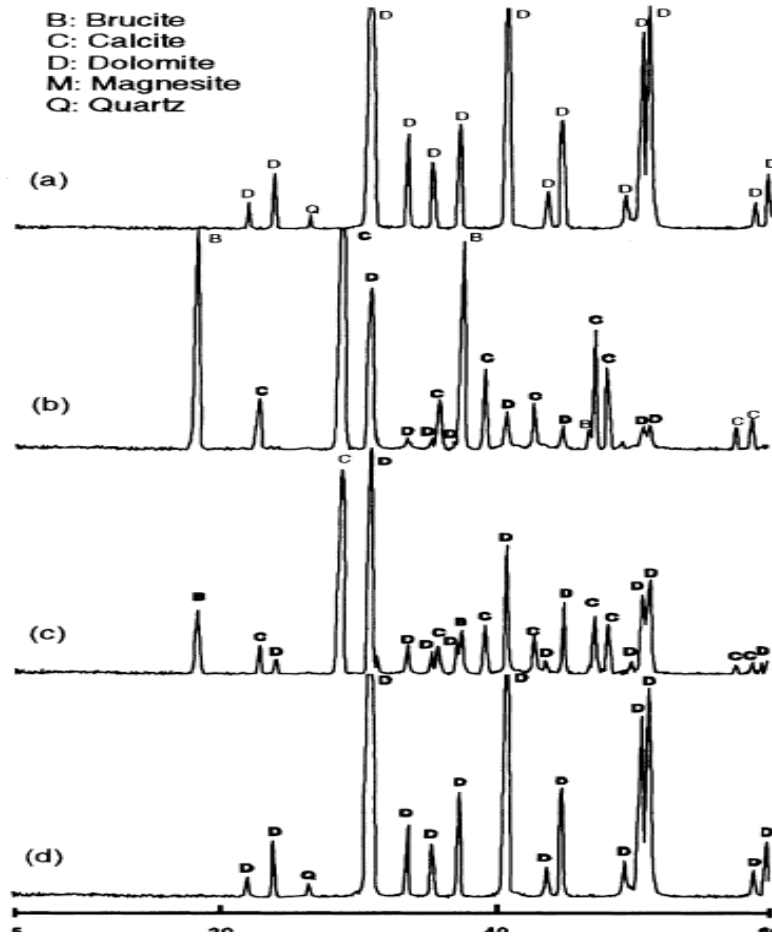
Şekil 2.9 Lu ve diğ. (2006) tarafından çekilmiş bir SEM fotoğrafı

Şekil 2.10'da alkali reaktif bir kayaktan, otoklavlandıktan sonra alınmış SEM ve EDXA sonuçları görülmektedir. Görüldüğü gibi (a) şeklinde kayacın orijinal yüzeyi pürüzsüz iken, otoklav sonrası yüzeyde kalsit ve brusit parçaları birikmiştir. Aynı kayacın EDXA sonuçları da Şekil 2.10'da görülmektedir.



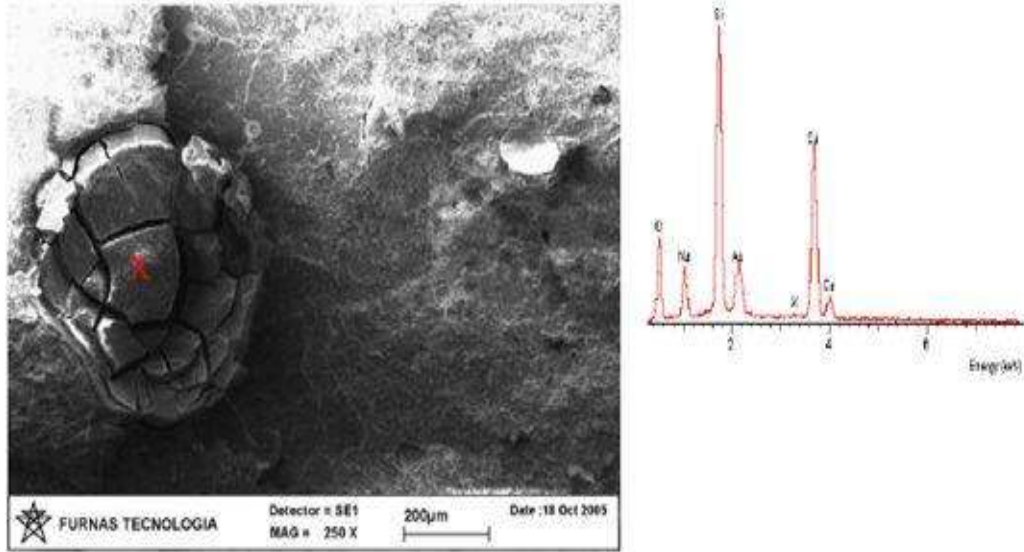
Şekil 2.10 Dolomit yüzeylerinin SEM görüntüsü ve EDXA sonuçları. (a) seyreltik HCl çözeltisi ile hafifçe kazıldıktan sonra dolomitin orijinal düzgün yüzeyi. (b) 150oC’de, %10 KOH çözeltisi otoklavlandıktan sonraki dolomit yüzeyi. Kalsit parçaları bir brusit filmi üzerinde yüzmektedir. (c) b’deki görüntünün orta bölgesinin büyütülmüş şekli. (d) işaretli noktalar için EDXA sonuçları (Tong ve Tang, 1997).

Şekil 2.11’de reaktif kayacın otoklavlanmadan önceki ve otoklavlandıktan sonraki XRD sonuçları görülmektedir.

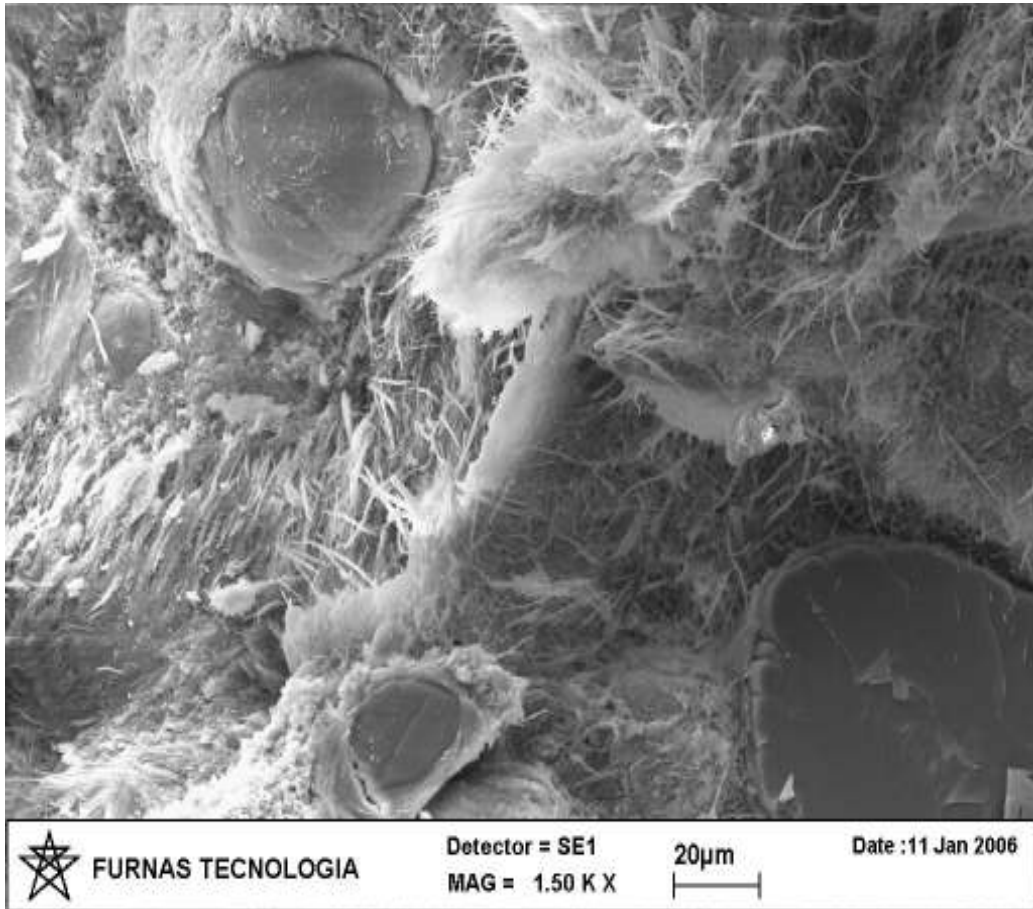


Şekil 2.11. Dolomit agregasının 150°C'de, %10 KOH çözeltisi otoklavlanmadan önceki ve otoklavlandıktan sonraki XRD sonuçları. (a) reaksiyona girmemiş dolomit yüzeyi (b) 10 saat otoklavlandıktan sonraki dolomit yüzeyi (c) dolomit prizmasında 60 saat otoklavlandıktan sonraki bir reaksiyon sınırı (d) 60 saat otoklavlandıktan sonraki dolomit agregasının merkez bölgesi (Tong ve Tang, 1997).

Şekil 2.12'de Silveira ve diğ. tarafından çekilmiş bir SEM fotoğrafı ve yapılan bir EDS analizi görülmektedir. EDS analizinin sonuçlarından, bu ürünün Alkali-Silika Reaksiyonunun yol açtığı bir ASR ürünü olduğu açıktır. Nitekim görüntüsü de ASR ürünlerinin tipik görünüşü olan kurumuş toprak görüntüsündedir. Aynı araştırmacılar tarafından yapılan deneylerde, Alkali-Karbonat Reaksiyonunun yol açtığı iğnemsî yapıdaki reaksiyon ürünlerine rastlanmıştır. Bu ürünlerin SEM fotoğrafları Şekil 2.13'de sunulmuştur.



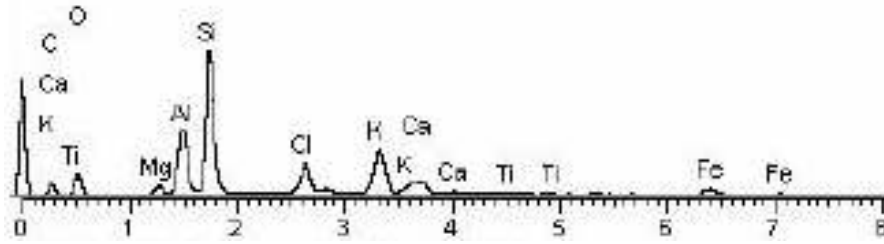
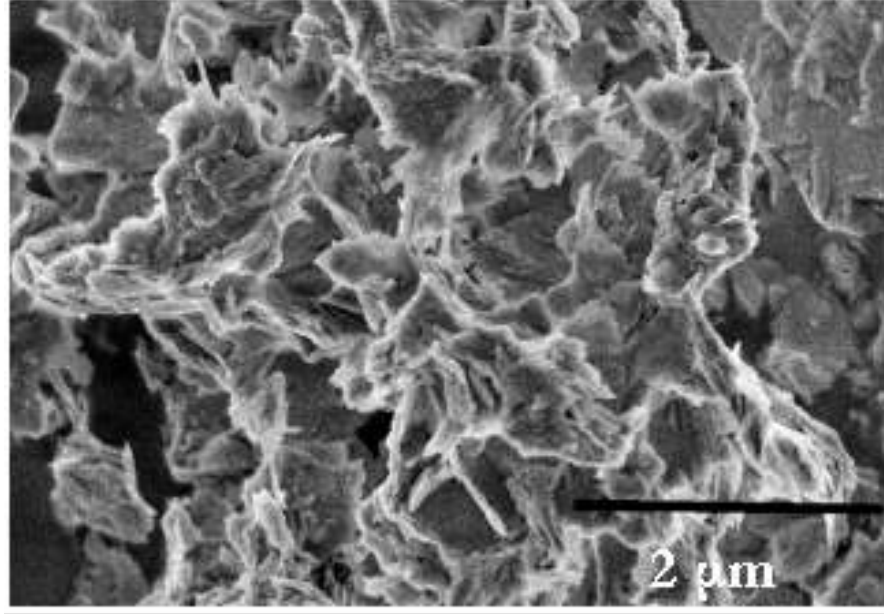
Şekil 2.12 Silveira ve diğ. (2008) tarafından alınmış bir SEM görüntüsü ve EDS analizi



Şekil 2.13 İğnemsî yapıdaki Alkali-Karbonat Reaksiyonu ürünü, Silveira ve diğ. (2008)

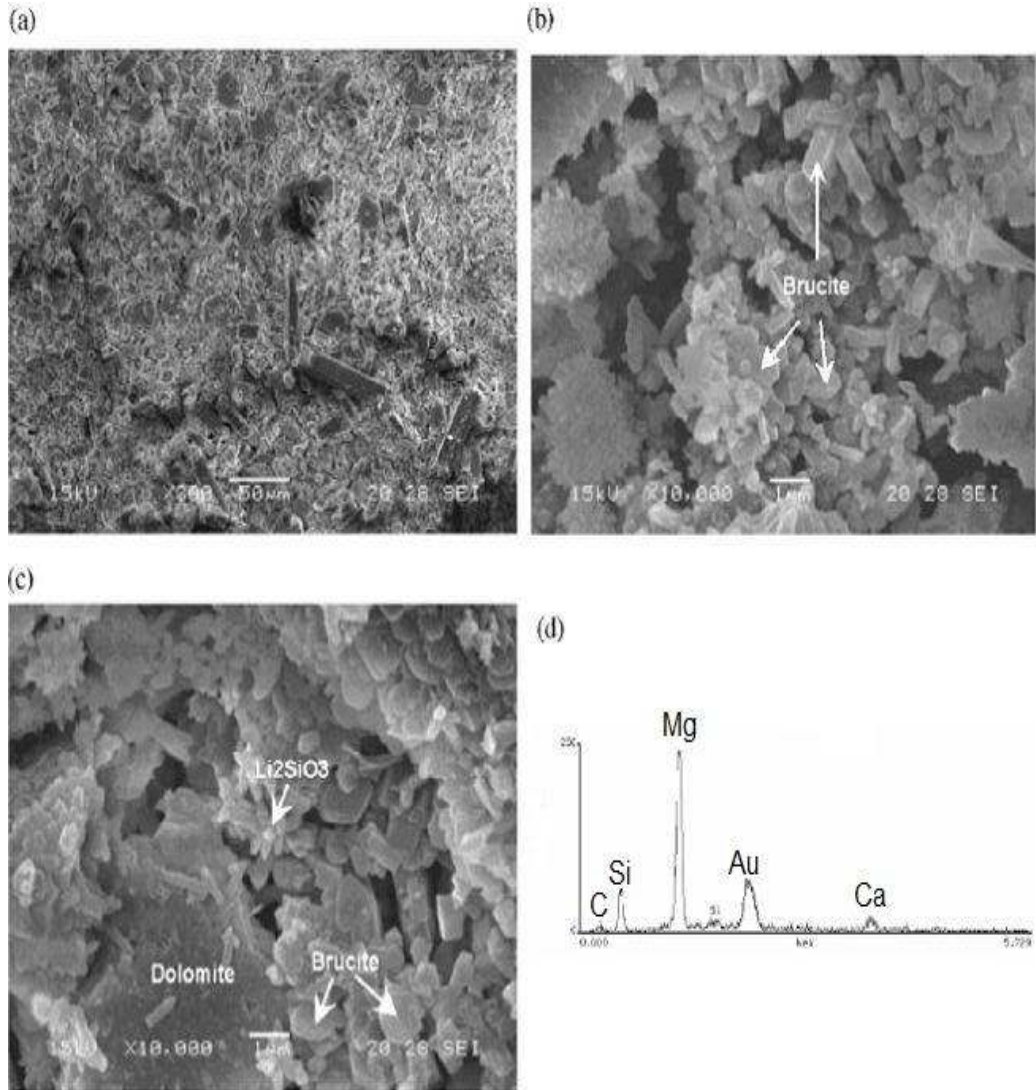
Şekil 2.14'de, Grattan-Bellew ve diğ. tarafından yapılan deneyler sonucunda

çekilmiş bir SEM görüntüsü ve EDS analizi sunulmuştur. SEM fotoğrafında görülen ağsı yapıdaki reaksiyon ürünü, analizinden de anlaşıldığı gibi Alkali-Silika Reaksiyonu ürünüdür.



Şekil 2.14 Ağsı yapıdaki Alkali-Silika Reaksiyonu ürünü (Grattan-Bellew ve diğ., 2008)

Şekil 2.15’de, Lu ve diğ. (2006) tarafından yapılmış bir çalışmada elde edilen SEM görüntüleri ve EDS analizi sunulmuştur. İncelenen örnekler 150°C LiOH çözeltisinde otoklavlandıktan sonra ince kesitler hazırlanarak SEM’de incelenmiştir. Reaksiyon ürünleri şeklin üzerinde işaretlenmiştir.



Şekil 2.15 a) Örneğin genel görüntüsü. b) Reaksiyon sonucu oluşan altıgen brusit kristalleri. c) Dolomitlerin yanında oluşan brusit ve Li₂SO₃ kristalleri. d) İkinci şekilde işaretlenen brusit kristallerinin EDS analizi.

2.3.3 ACR'e Etki Eden Faktörler

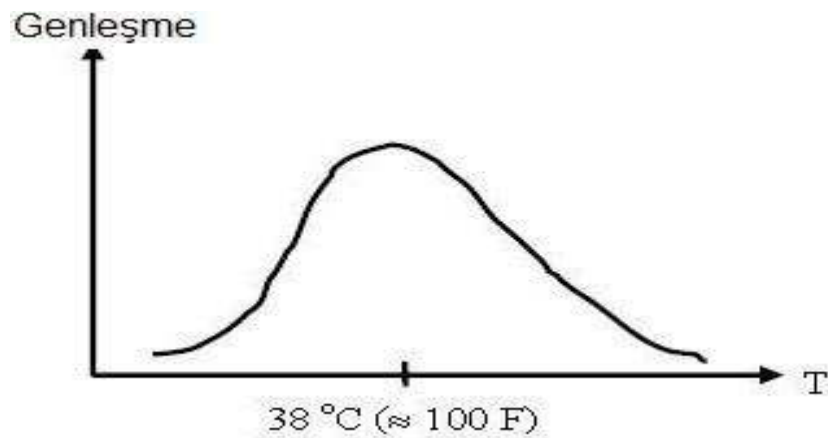
Önceki bölümlerde de değinildiği gibi, ACR'e etki eden pek çok faktör vardır. Bu faktörlerden bazıları, yapıların servis ömrü boyunca maruz kalmadıkları etkilere sebep olduğundan sadece laboratuvar ortamındaki reaktiviteyi etkilerken, diğer faktörler gerçek yapılarda da etkili olmaktadır. Fakat bu faktörler arasında bir önem sıralaması yapmak mümkün değildir. ACR'e etki eden faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sıcaklık
- Nem
- Alkali içeriği
- Reaktif agrega türü
- Agrega boyutu
- Deney örneğinin boyu
- Porozite ve Su/Çimento oranı

2.3.3.1 Sıcaklığın Etkisi

Kimyanın en temel kurallarından biri, sıcaklığın artmasıyla çoğu durumda reaksiyon hızının artmasıdır. ACR'nin de bir kimyasal reaksiyon olduğu düşünülürse, sıcaklığın artmasıyla ACR'nin hızlanması beklenebilir.

Locher (1973) tarafından yapılan çalışmalarda, betonun alkali içeriği sabit tutularak, en büyük genişlemenin oluşacağı sıcaklık araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda bu sıcaklığın 38°C - 40 °C arasında olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.16'da Locher'ın araştırmaları sonucu elde ettiği Genleşme-Sıcaklık grafiği sunulmuştur. Görüldüğü gibi çok düşük ve çok yüksek sıcaklıklarda genişleme düşük değerler gösterirken 38°C - 40 °C civarında en büyük genişleme değeri elde edilmiştir. (Locher, 1973).



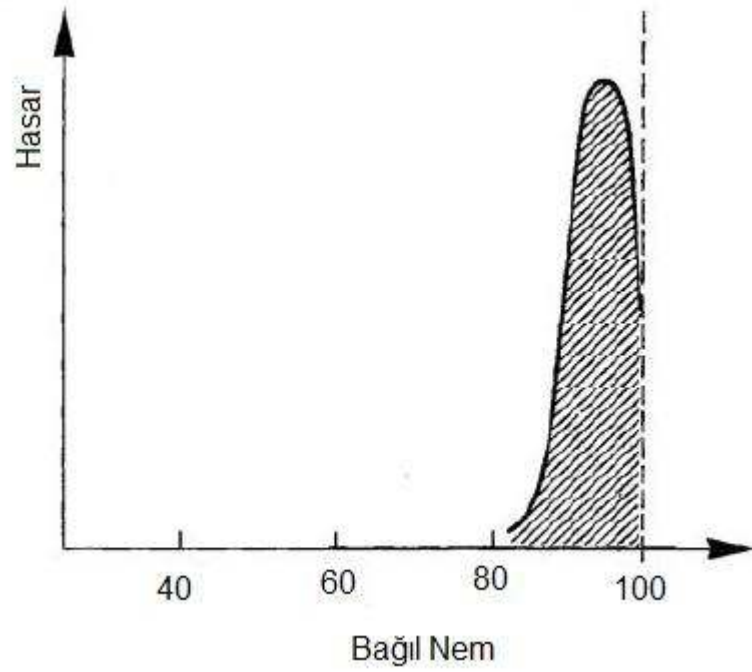
Şekil 2.16 Genleşme-Sıcaklık grafiği (Locher, 1973)

Nitekim pek çok gerçek yapı için sıcaklığın etkisi açıktır. Gerçek yapılarda, sıcaklığın artmasıyla AAR'nin de arttığı gözlemlenmiştir (Nixon ve diğ, 1979). Örneğin Danimarka'daki köprü ayağı kirişlerinde sıcaklığın AAR üzerindeki etkisi belirgindir. Güneyde kalan kirişlerde AAR sebebiyle oluşan çatlaklar görülürken, kuzeydeki kirişlerde AAR'nin zararlı etkilerine rastlanmamıştır. Bunun sebebinin, güneydeki kirişlerin gün boyunca güneş ışığı alarak ısınırken kuzeydekilerin gölgede kalması olduğu düşünülmektedir (SINTEF raporu, 2006)

2.3.3.2 Nemin Etkisi

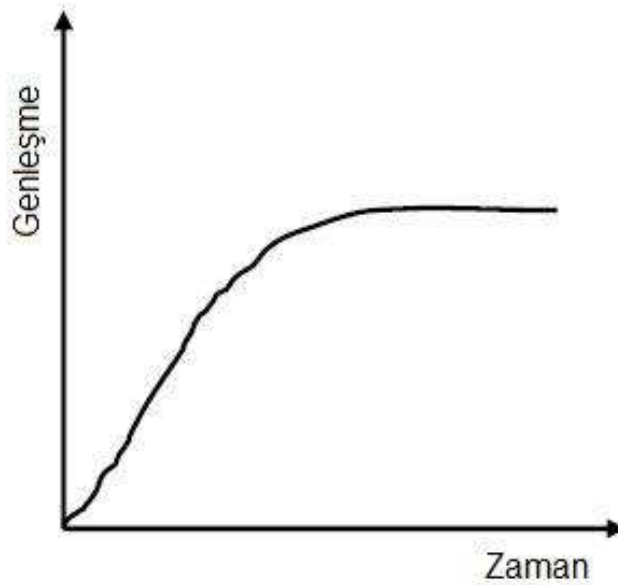
Nem, bozulmanın ve hacim değişikliğinin şiddeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. AAR yalnızca suyun varlığında gerçekleşir. Nem, alkali (Na^+ , K^+) iyonlarının yayılmasına, bu yayılma da reaksiyon bölgelerinde jel oluşumuna, oluşan jel ise su emerek şişip genişlemeye ve betonda içsel çekme gerilmelerinin doğmasına böylece agrega ile onu çevreleyen çimento harcının çatlamasına neden olur. Çatlamadan sonra ortama giren su, jelin emebileceğinden fazla olursa bir miktar jel dışarı sızar, bu durum ileri düzeyde bir hasarın kanıtıdır (Baradan, 2002).

Literatürde yer alan neredeyse tüm deneylerde, bağıl nemin %100 olması uygun görülmüştür. Böylece AAR'nin başlaması için uygun koşulu sağlamak amaçlanmıştır. Fakat nemin AAR'e etkisi üzerinde çeşitli görüşler mevcuttur. Örneğin Nilsson (1983), nem belirli bir değerin üstüne çıkarsa jelin viskozitesinin çok düşeceğinin ve böylece çatlaklara sızan jelin hasara sebep olmayacağını iddia etmiştir (Nilsson, 1983). Nilsson, yaptığı çalışmalar sonucunda Şekil 2.17'de sunulan grafiği elde etmiştir.



Şekil 2.17 Bağıl Nem-Hasar grafiği (Nilsson, 1983)

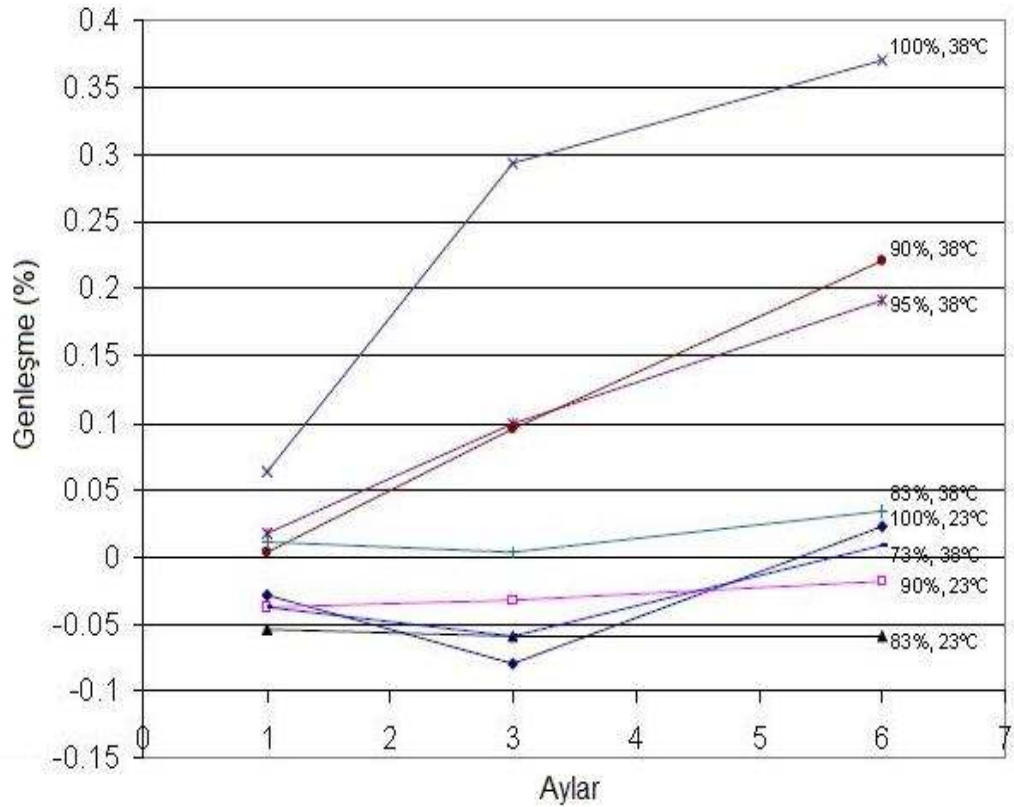
Danimarka standartlarındaki TI-B51 yöntemine göre yürütülen deneylerde ise örnekler NaCl çözeltisinde bekletildikten sonra suya konulmuştur. Bu deney sonucunda, su içindeki örneklerde genişlemenin zamanla arttığı belirlenmiştir (SINTEF Raporu, 2006). Bu deneyler sonucunda elde edilen grafik Şekil 2.18’de sunulmuştur.



Şekil 2.18 Genleşme-Zaman grafiği (SINTEF Raporu, 2006)

Fakat bu iki deney sonucunda farklılık, deney yöntemlerindeki farklılıklardan kaynaklanabilir. Nilsson, yaptığı çalışmalarda örnekleri suya daldırmamıştır. Bunun sonucunda örneğin yüzeyinde biriken fazla nem, çimentodan sızan alkalileri emmiş ve böylece betonun alkali içeriğini azaltarak AAR'i yavaşlatmış olabilir. Danimarka yönteminde ise örnekler ilk olarak doygun NaCl çözeltisine konmuştur ve böylece çözülden betona alkali sızması sağlanmıştır.

Şekil 2.19'da, Gudmundsson ve Asgeirsson (1983) tarafından yapılan bir çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Çalışma kapsamında, hazırlanan harç çubuklarının değişik bağıl nem ve sıcaklıkta genleşmeleri ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde, bağıl nemin artmasıyla genleşmelerin arttığı saptanmıştır (38°C / %90 B.N. dışında). 23°C'de bekletilen harç numunelerinde ise %100 bağıl nemde çok ufak bir genleşme görülürken, %90 ve %83 bağıl nem durumunda büzülme görülmüştür.



Şekil 2.19 Değişik bağıl nem ve sıcaklıklarda genleşme grafiği (Gudmundsson ve Asgeirsson, 1983)

Larive ve diğ. (2000) tarafından yapılan bir araştırmada ise biri reaktif olan diğeri reaktif olmayan iki kireçtaşı ile çalışmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan beton örneklere suda, %100 bağıl nemde, %95 bağıl nemde ve kapalı kapta olmak üzere dört farklı bekletme koşulu uygulanmıştır. Çalışma sonucunda en büyük genleşmenin %95 bağıl nemde bekletilen örneklerde görüldüğü anlaşılmıştır. Fakat kapalı kapta bekletilen örnekler de genleşme sınırı olan %0,1'i geçmişlerdir. Bu durumda, çimentonun hidrasyonundan sonra betonun bünyesinde kalan suyun, AAR'e yol açmak için yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Pedersen (2001) tarafından yayımlanan bir makalede, düşük dayanımlı betonlar için ortamın bağıl neminden ziyade, betonun doygunluk derecesinin ölçmenin daha sağlıklı bir sonuç doğuracağı vurgulanmıştır. Yüksek dayanımlı betonlar için ise betonun bünyesindeki su içeriği önemlidir (Pedersen, 2001)

Sahadaki betonların performansları hakkında kapsamlı bir çalışma yapan Stark (1991), değişik iklimlerdeki betonların AAR performanslarını incelemiştir. Stark, yaptığı çalışmalar sonucunda, çöllerdeki betonların bile AAR için yeterli nem içerdiğini (%80) belirlemiştir. Ayrıca kapalı mekanlarda bulunan betonların da AAR hasarına açık olduğunu ifade etmiştir (Stark, 1991).

Özetlemek gerekirse, yapı nemi yüksek bir bölgede olduğu takdirde, betonun içindeki reaktif mineraller agregadan çimentonun içine daha kolay nüfuz ederek reaksiyonu hızlandırmaktadır.

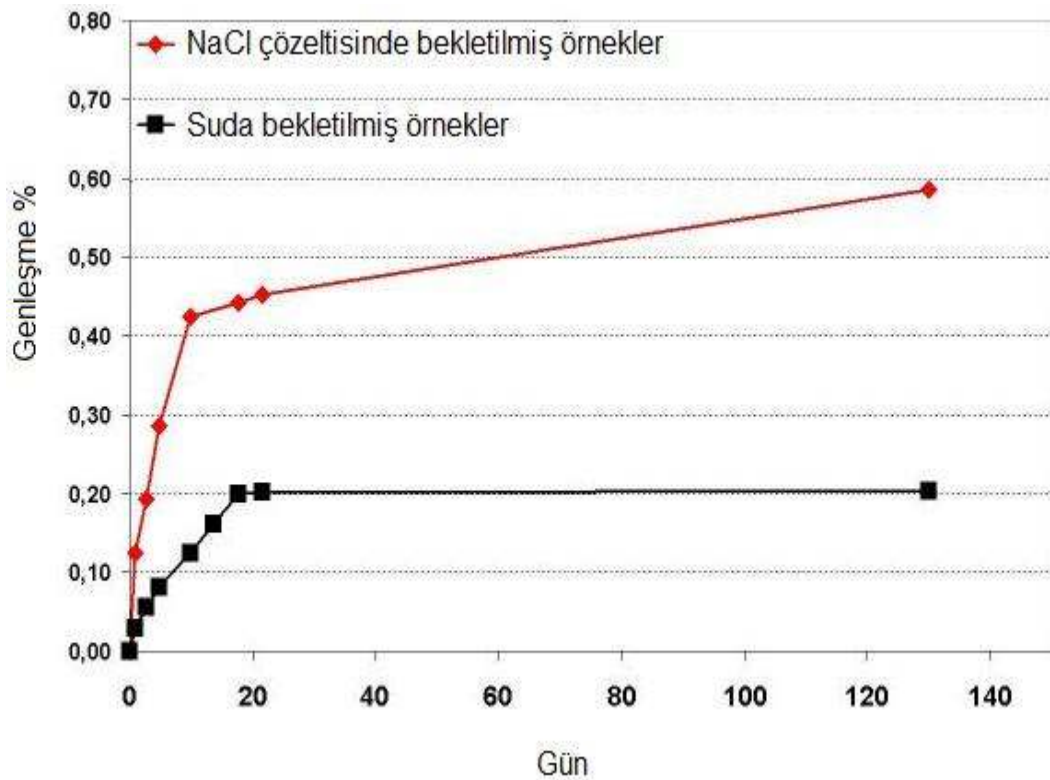
2.3.3.3 Alkali İçeriğinin Etkisi

Her beton belirli bir miktarda alkali içerir. Betondaki alkalilerin büyük çoğunluğu (%99) kullanılan çimentodan gelir. Fakat bazı durumlarda hava sürükleyici, uçucu kül, curuf veya mikro silika gibi katkılardan da alkali gelmesi mümkündür. Ek olarak, bazı agregalar da betona alkali kaynağı olabilir. Fakat uçucu kül veya mikro silika gibi katkıları alkali içeriğini arttırsalar da aynı zamanda betonun pH derecesini düşürdükleri için reaksiyonu tetikleyici etki yapmayabilirler (SINTEF Raporu, 2006).

Boşluk suyunun pH değeri çimentonun alkali içeriğine bağlıdır ve çimentonun alkali miktarı arttıkça artar. Betonun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengesinin kurulduğu her noktada pH değeri en az 12,5'tur. Bu değer yüksek alkalili çimento kullanıldığında 13,5'e ulaşabilmektedir. Yüksek ve düşük alkalili çimentoların pH değerleri arasındaki 1,0 derece fark hidroksit iyonu konsantrasyonunda 10 kat artışa işaret eder. Reaktif agregalarla düşük alkalili çimentoların kullanılması gereğinin temelinde bu neden yatmaktadır. Alkali içeriği %0,6'dan fazla olan çimentolar yüksek alkalili olarak sınıflandırılmaktadır. Çimentonun alkali içeriğini hesaplamak için kullanılan formül aşağıda sunulmuştur (Baradan, 2002).

$$(\text{Na}_2\text{O})_e = \text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$$

Literatürdeki hızlandırılmış deneylerde de hazırlanan örnekleri bir alkali çözeltisi içine koyarak reaksiyonu hızlandırmak amaçlanmıştır. Romboll (2001) tarafından yapılan bir araştırmada NaCl çözeltisinde ve suda bekletilmiş örneklerin genleşmeleri ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda, çözelti içinde bekleyen örneklerin çok daha fazla genleşme yaptıkları ortaya çıkmıştır. Şekil 2.20’de bu çalışmanın sonuçlarını gösteren bir grafik sunulmuştur (Romboll, 2001).



Şekil 2.20 Ortamdan gelen alkalilerin betonun genleşmesine etkisi (Romboll, 2001)

Ayrıca yine Xu ve diğ. yaptığı araştırmada alkali içeriği daha düşük olan, fakat alkaliye doymun hale getirmek için dışarıdan daha fazla çözelti eklenen çimentolu örneklerde genleşme daha fazla olmuştur. Toplam alkali içeriği %1,5 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ iken düşük alkali içerikli çimento daha fazla genleşme göstermiştir (Xu ve diğ., 2002).

2.3.3.4. Agregat Türünün Etkisi

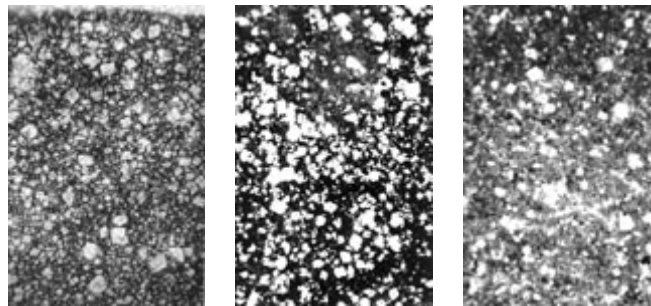
Reaktif agreganın türü, ACR'nin başlayıp başlamayacağını belirlediği gibi,

başlayan reaksiyonun hızına da etki etmektedir. Tablo 2.1’de erken ve geç genleşen karbonat kayaçların karakteristik birleşimleri sunulmuştur.

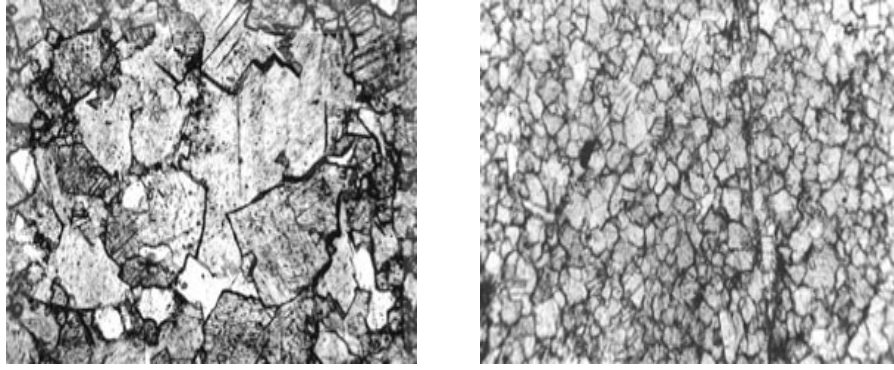
Tablo 2.1. Erken ve geç genleşen karbonat kayaçların karakteristik birleşimleri

	Asitte çözünemeyen atık yüzdesi	Karbonatın toplam dolomit yüzdesi
Pittsburg. Erken genleşen	5 – 15	Yaklaşık 50
Iowa, Illinois ve Indiana. Erken genleşen.	10 – 20	40 – 60
Virginia. Erken genleşen.	13 – 29	46 – 73
Gull nehri, Ontario. Geç genleşen.	21 – 49	75 – 87
Virginia. Geç genleşen.	33	>90

Alkali-reaktif karbonat kayaçların en kolay tespit edilebilen özellikleri mikro dokularıdır. Bu mikro yapıya sahip olan tüm karbonat kayaçların iç kuvvetlere yol açan reaksiyonlara sebep olduğu bilinmektedir. Fakat bütün reaksiyonlar genleşmeye sebep olacak kadar büyük bir gerilmeye sebep olmayabilir (TFHRC, 2006). Şekil 2.21’de ve Şekil 2.22’de reaktif olan ve olmayan kayaçların mikro dokularını göstermektedir.

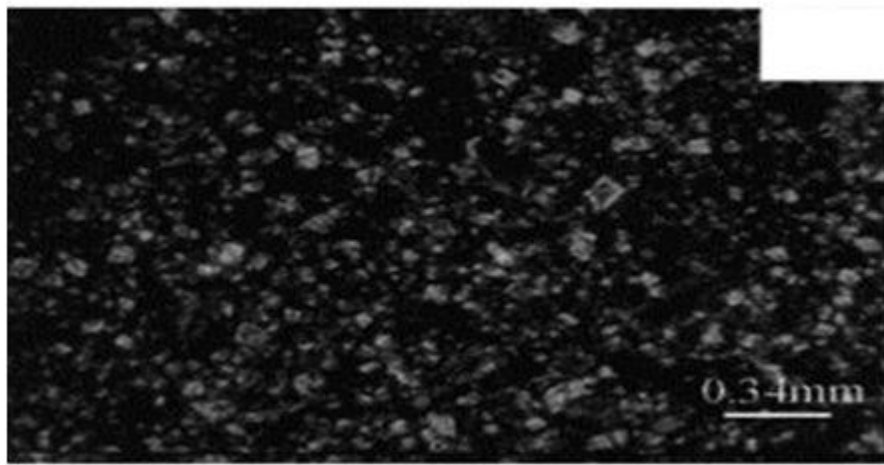
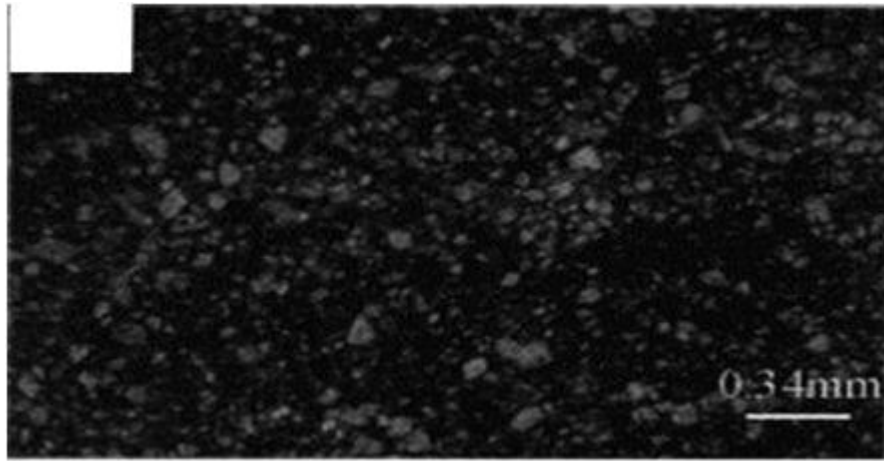


Şekil 2.21 Alkali-reaktif olan 3 farklı kayacın mikrodokuları (<http://www.tfhrc.gov/pavement/pccp/astro/chaptr10.htm>, 2006).

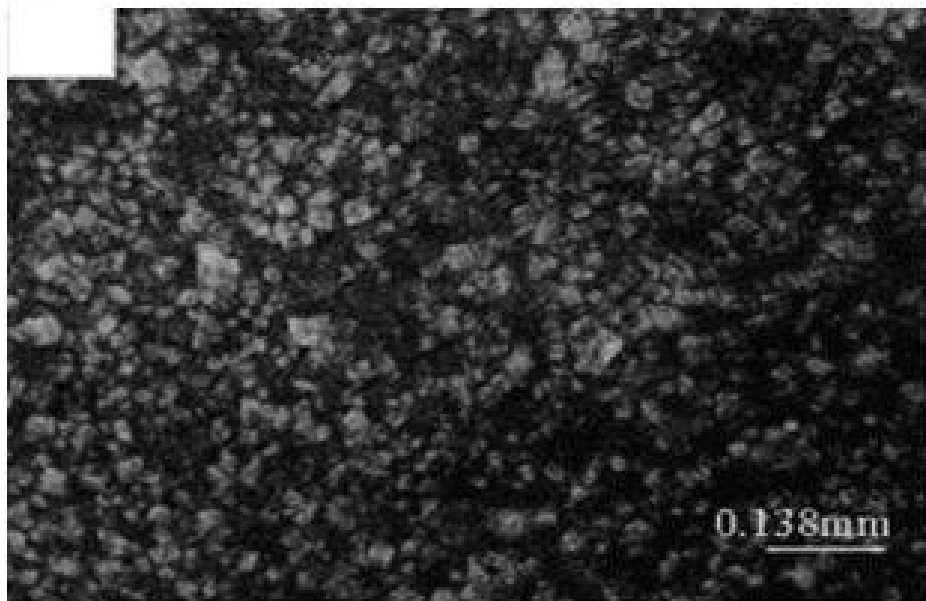


Şekil 2.22 Alkali-reaktif olmayan iki farklı kayacın mikrodokuları
(<http://www.tfrc.gov/pavement/pccp/petro/chaptr10.htm>, 2006).

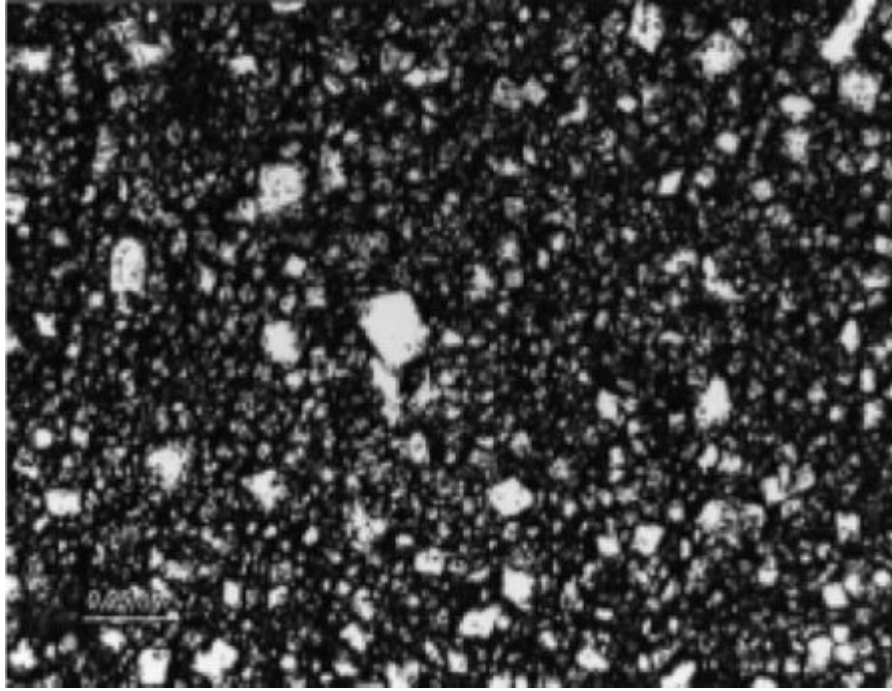
Şekil 2.23’de ve 2.24’de, Qian ve diğ. tarafından yapılan incelemeler sonucunda, Alkali-Karbonat reaktif olduğu belirlenen agregaların tipik mikrodokusu gösterilmiştir (Qian ve diğ., 2002). Şekil 2.25’de ise 2211R_98 numaralı ACI Raporunda sunulan ve Alkali-Karbonat Reaktif agregaların tipik mikrodokusu olarak kabul görmüş mikrodoku görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 2.23 Reaktif olduğu kabul edilen agrega mikrodokusu, Qian ve diğ. (2002)



Şekil 2.24 Reaktif olduğu kabul edilen agrega mikrodokusu, Qian ve diğ. (2002)



Şekil 2.25 Reaktif olduğu kabul edilen agrega mikrodokusu, ACI Raporu 2211R_98

Reaktif karbonat agregaları, %5-25 oranında asitte çözünemeyen atık (illit, klorit ve biraz siltli quartz) ve mikritli kalsit içeren matrisin üstünde, 50 μm 'den küçük köşeli dolomit kristallerinin dağınık olarak yüzdüğü bir dokuya sahiptirler. Yapılan araştırmalardan, kalsit/dolomit oranının 1 olması durumunda maksimum genişlemenin oluştuğu görülmüştür (Qian ve diğ, 2001).

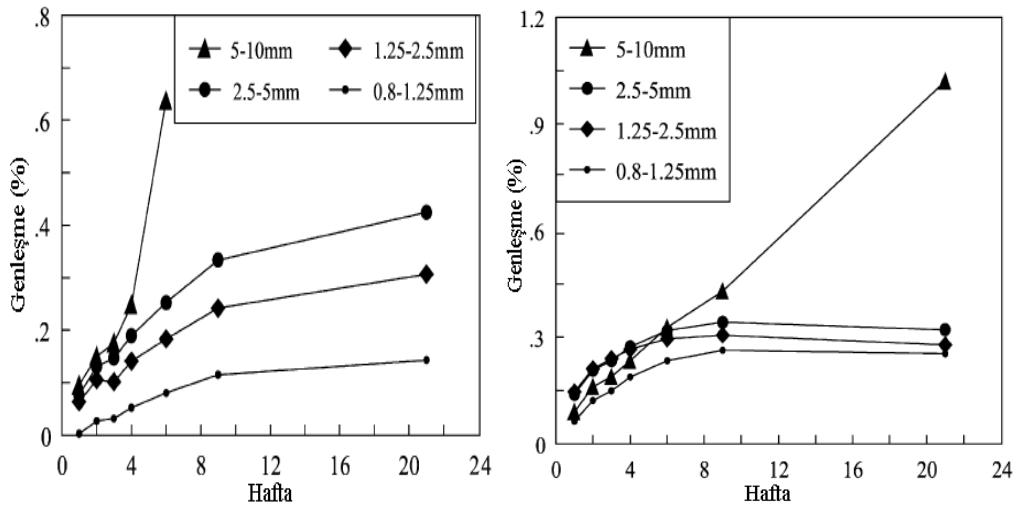
2.3.3.5 *Agrega Boyutunun Etkisi*

Reaktif agrega boyutu ACR'nin hem hızını, hem derecesini, hem genişmeyi hem de hasarı etkiler. Farklı deney yöntemleri ile farklı sonuçlar elde edilmiş olmasına rağmen, agrega tane boyutunun artmasıyla ACR'nin arttığı konusunda literatürde uzlaşmıştır.

Xu ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda 5-10 mm boyutundaki agregalar 6 hafta sonunda en fazla genişmeyi vermiştir. Bu açıdan ACR ASR'den oldukça farklıdır. Tane boyutunun küçülmesi ile genişleme ilk bir ayda artar. Fakat birinci aydan sonra küçük taneli agregalarla yapılan örneklerin genişmesi azalmaya

başlarken büyük taneli agregalar ile yapılan örneklerin genleşmeler oldukça artar (Xu ve diğ., 2002).

Xu ve diğ(2002) tarafından farklı agregalarla yapılan deneylerin sonuçları Şekil 2.26'da sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi ACR deneyi için seçilecek en uygun agrega boyutu 5-10 mm arasındadır.



Şekil 2.26 İki farklı agrega ve agregaların farklı tane boyutları için 24 hafta sonundaki genleşme yüzdeleri (Xu ve diğ., 2002).

Neden kaba agrega kullanarak yapılan örneklerin, ince agrega ile yapılan numunelerden daha fazla genleşme gösterdiği ile ilgili birkaç açıklama olabilir. Agreganın boyutunun küçük olduğu durumda kimyasal reaksiyonlar daha hızlı gelişir. Bu sebeple ASR jeli hızlı karbonatlaşarak alkalileri, dedolomitizasyon sırasında alkali karbonat yapmaları için serbest bırakmış olabilir. Bu da genleşmede azalmaya yol açmış olabilir. Bunların yanında, dedolomitizasyon poroziteye yol açarak, suyun ve alkalilerin, agreganın içinde gizli kalmış kriptokristalin quartza ulaşmalarına ve böylece ASR oluşmasına yol açabilir. Küçük agrega taneli örneklerde bu porozite, ASR jeli sayesinde oluşan genleşme basıncını kaybedebilir. Diğer yandan harç çubukları, beton örneklere kıyasla çok daha fazla boşluk içermektedir. Bu sebeple de ASR jelinin yarattığı genleşme kuvvetini absorblamış olabilirler (Katayama, 2004).

İnce dolomit agregası kullanılan örneklerde, ASR jelinin genleşme yaratmayan

Mg-Silikat jeline dönüşmesi bunun sebebi olabilir. İnce agregada kullanılan harç örneklerinde hem dedolomitizasyon hem de ASR hızla gerçekleşir ve ilerler ve bunun sonucu olarak bütün agregada Mg-Silikat jeli oluşur. Fakat beton mikrobarlarda dedolomitizasyon agreganın yüzeyinde oluşur ve agreganın içindeki ASR jeli etkilenmeden kalır. Bu jel genişleme yaratarak çatlığa sebep olur. Yoğun olarak kil içeren malzemelerde ise Al-Silikat jeli oluşur fakat bu jel de genişleme yaratmaz ve çatlığa sebep olmaz (Katayama ve Sommer, 2008).

2.3.3.6 Örnek Boyutunun Etkisi

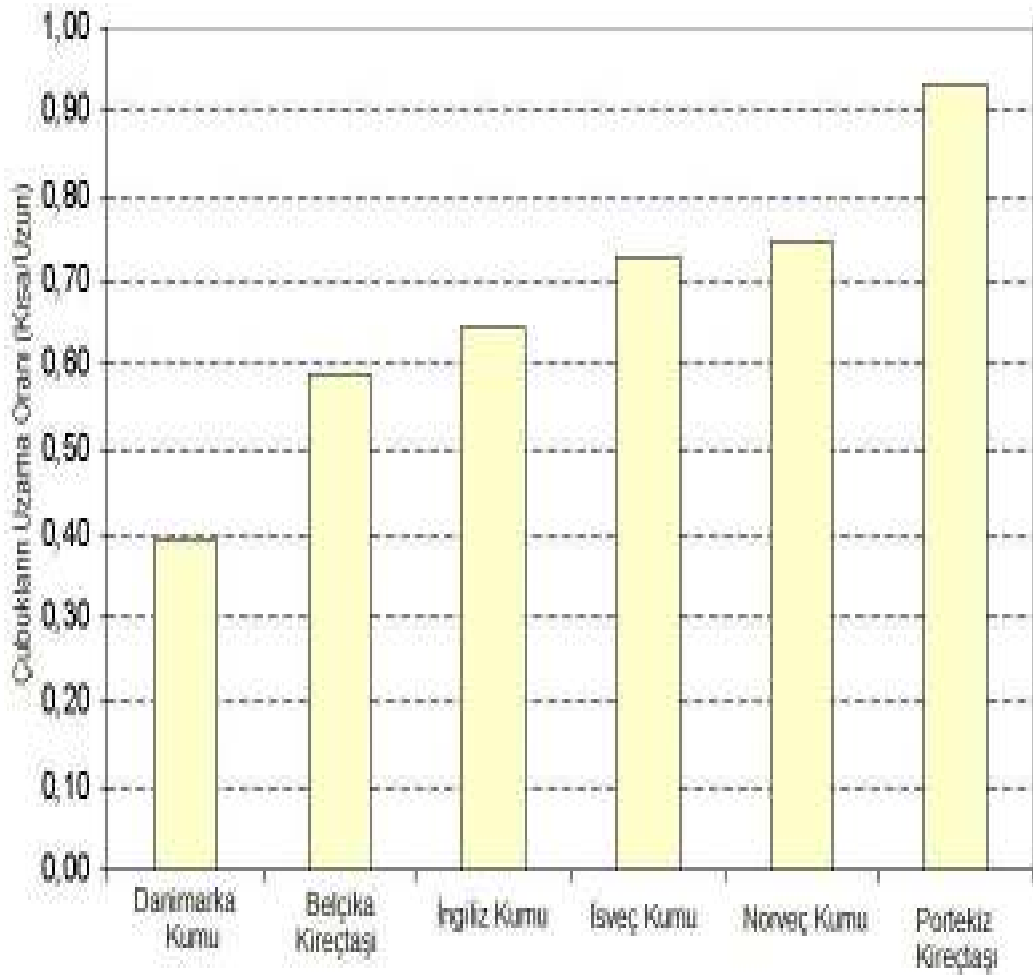
Deneylerde kullanılan örnek boyutunun daha büyük olduğu zaman reaksiyonun oluşma süresini uzatarak deney sonuçlarını etkilediği bir gerçektir. Kullanılan agreganın tamamının reaktif olmadığı durumlarda ise, reaktif agregaların dağılımının dengesiz olması sebebiyle deney sonuçlarında düzensizlik görülebilir.

Harç örneklerinde incelik sebebiyle, örneğin içinden bulunduğu ortama alkali çıkışı olabilmektedir. Fakat beton örneklerinde böyle bir risk yoktur. Bu durumda, içindeki alkali azaldığı için, bekletildiği ortamda alkali yoksa harç örneklerin daha az genişleme göstermesi mümkündür (Sanchez ve diğ., 2008). Gratan-Bellew ve diğ (2008), yaptıkları araştırmalar sonucunda harçta daha az genişleme olmasının sebebini, alkali çözeltisinin ufak agregalara çok çabuk ulaşarak, örnek tam olarak sertleşmeden önce genişlemeye sebep olmasına bağlamışlardır (Gratan-Bellew ve diğ, 2008).

Suzuki ve diğ (2004) tarafından yapılan bir araştırmada ASTM C1260 yöntemine uygun koşullarda bekletilmek üzere ince-uzun (25x25x285 mm) ve kalın-kısa (40x40x160 mm) örnekler hazırlanmıştır. 14 gün sonunda ince-uzun örneklerin diğer örneklere kıyasla 0,9 – 3,1 kat daha fazla genişleme yaptığı anlaşılmıştır. Deney tamamlandıktan sonra ise örneklerin alkali içeriği incelenmiştir ve ince-uzun örneklerin alkali içeriği daha fazla çıkmıştır. Örneklerin ince olmasının, alkali iyonlarının nüfuz etmesini kolaylaştırdığı sonucuna varılmıştır (Suzuki ve diğ, 2004).

Jensen ve Fournier (2001) tarafından yürütülen çalışmalarda ise AAR2 yöntemi hem 40x40x160 mm hem de 25x25x250 mm boyutundaki örneklerle yapılmıştır. Deneysel sonuçlarında, ince uzun örneklerin, diğer örneklere kıyasla yaklaşık iki kat daha fazla genişleme görüldüğü anlaşılmıştır (Jensen ve Fournier, 2001).

Wigum (2004) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı kaynaklardan alınan Alkali reaktif agregalar ile hazırlanan ince ve uzun örneklerin genişlemelerinin oranları tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları Şekil 2.27’de sunulmuştur (Wigum, 2004).



Şekil 2.27 Farklı agregalar için uzun ve kısa örneklerde uzama oranları (Wigum, 2004)

2.3.3.7. Porozitenin ve Su/Çimento Oranının Etkisi

Donma-Çözünme gibi etkilere maruz kalması beklenen betonların, bünyelerine homojen olarak yayılmış boşlukları olması gerektiği bilinen bir olgudur. Böylece betonun bünyesindeki su donduğu zaman, hacmi artan buzlar boşluklara dolarak betonda iç gerilmelere sebep olmazlar. Aynı mekanizmanın AAR ürünleri için de geçerli olması beklenebilir. Nitekim literatürde hava sürükleyici katkıların ASR genişmesi üzerindeki olumlu etkileri ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Fakat hava sürükleyici katkıların ACR üzerindeki etkileri konusunda literatürde henüz bir uzlaşmaya varılamamıştır.

ACR ile ilgili olarak bu konudaki en kapsamlı çalışmayı yapmış olan Wang ve Gillot (1995), hava sürükleyici katkıların ACR üzerinde herhangi bir etki yapmadığı sonucuna ulaşmışlardır (Wang ve Gillot, 1995).

Su/Çimento oranının değişmesi betonun porozitesini etkileyen faktörlerin başında gelir. Gratan-Bellew (1989) tarafından, alkali reaktif agrega içeren betonlar için ideal Su/Çimento oranının 0,4-0,6 arasında değiştiği sonucuna varılmıştır.

2.4 ASR-ACR Bilinmezliği

Geçen yıllar süresince, pek çok araştırmacı ASR ile ACR arasındaki farkları açıklamaya çalışmıştır. Swensson tarafından 1957 yılında ilk olarak fark edildiğinde ACR'e tamamen ASR'den bağımsız bir reaksiyon gözüyle bakılmaktaydı. Fakat yıllar içinde yapılan çalışmalar sonucunda çoğu araştırmacı ACR'nin ASR'nin bir türü olduğu yönünde sonuçlara ulaşmışlardır.

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi tipik dokuya sahip dolomit agregası betonda yüksek alkali içerikli bir çimento ile kaba agrega yerine kullanılırsa, ACR'e yol açarak aşırı genişmelere ve hasara yol açabilir. Dolomit agregasının güçlü alkali-alkalilerle reaksiyona girerek brusit, kalsiyum-karbonat ve çözülebilir alkali-

karbonat oluşturduğu dedolomitizasyon reaksiyonunun ACR genişmesinin temelini oluşturduğu, mekanizmasından bağımsız olarak kabul edilmiştir. Yinede ACR'nin varlığı bazı araştırmacılar tarafından hala kabul edilmemiştir. Aynı zamanda çoğu dolomit agregasında mikro- ve kriptokristalin quartz mevcuttur. Bu sebeple ASR'nin ACR'e katkısını ayırt etmek çok zordur. ACR, ASR'e kıyasla daha farklı bir genişme mekanizması gösterir ve alınan önlemlere de daha farklı cevap verir. ACR ile ASR mekanizmasını birbirinden ayırt etmek şarttır.

Qian ve diğ (2001), ASR ile ACR'i ayırt etmek için, ASR üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu bilinen lityum bileşiklerini kullanmışlardır. Yapılan araştırmalar sonucunda Lityum Hidroksitin, literatürde kabul edildiği gibi ASR'i azaltmasına rağmen, ACR'i tetiklediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca bazı durumlarda ACR'nin ASR'den bağımsız olarak görülebileceğini iddia etmişlerdir (Qian ve diğ., 2001)

Katayama (2004), yaptığı bir araştırmada Avusturya ve Kanada'dan temin ettiği dolomit kökenli kayaçların Alkali-Karbonat reaktivitesini incelemiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan bütün agregalarda kriptokristalin quartz mevcuttur. Bu bileşenin karbonat kayaçlardaki ASR'den sorumlu olduğu düşünülmektedir. Kingston ve Avusturya'dan gelen killi dolomitik kireçtaşları dedolomitizasyon yaratmamıştır fakat agregaların içinde ASR jeli ile dolu çatlaklar gözlenmiştir. İnce kesitlerde yapılan SEM incelemelerinde, agrega matrisinin içinde gizli bulunan ve polarize mikroskopta gözden kaçan kriptokristalin quartz fark edilmiştir. Çalışmaların sonucunda Avusturya ve Kanada karbonat agregaları ile yapılmış tüm numunelerde ASR gözlenmiştir. Reaksiyona giren agregalardan çimento matrisine yayılan dairesel ve çizgisel çatlaklar (genellikle $>10 \mu\text{m}$) çoğunlukla ASR jeli ile doludur. Bu göstermektedir ki çatlakları yaratan genişme kuvvetine ASR sebep olmuştur (Katayama, 2004).

Lu ve diğ. (2006), farklı alkali ortamlarda ASR ve ACR davranışlarını incelemiştir. KOH ile otoklavlanan ACR örneklerinde agreganın içindeki kriptokristalin quartzın ASR'e ve böylece çatlaklara yol açtığı anlaşılmıştır. NaOH ile otoklavlanan ACR örneklerinde yapılan incelemelerde de agrega-çimento

arayüzünde çok miktarda reaksiyon ürününe rastlanmıştır. Bu ürünler incelendiğinde tipik bir ASR ürünü birleşimine sahip oldukları anlaşılmıştır. Fakat sonuçlar değerlendirildiğinde ACR agregaları ile hazırlanan örneklerde ASR görüldüğünün belirlenmesinin yanında, ASR agregaları ile hazırlanan örneklerde de dedolomitizasyon reaksiyonu görüldüğü anlaşılmıştır (Lu ve diğ, 2006).

Lu ve diğ. (2006) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise ACR'e en büyük etkiyi, ASR'den farklı olarak sırasıyla sodyum, potasyum ve lityumun yaptığı sonucuna ulaşmıştır (Lu ve diğ, 2006)

Silveira ve diğ. (2008), karbonat kayaçlarına Alkali-Karbonat reaktivitesini incelemeleri sonucunda, sadece Alkali-Silika reaktif olan kayaçların Alkali-Karbonat reaktif çıktığını fakat Alkali-Silika reaktivitesi göstermeyen kayaçların Alkali-Karbonat reaktivitesi de göstermediğini iddia etmişlerdir (Silveira ve diğ., (2008)).

Gratan-Bellew ve diğ. (2008), araştırmaları sonucunda Pittsburg agregasında bir çeşit ASR görüldüğünü ve genişlemenin bu sebeple oluştuğu fakat ACR için daha fazla araştırmaya gerek olduğu sonucuna varmışlardır (Gratan-Bellew ve diğ. (2008).

2.5 ACR'de Katkıların Etkinliği

ACR'nin beton üzerindeki etkisi, önceki bölümlerde açıklandığı gibi agreganın yapısına, sıcaklık ve nem gibi ortam koşullara, betonun porozitesine ve geçirimsizliğine, ve sertleşmiş betondaki kalsiyumhidroksit içeriğine bağlıdır (Stokowski, 1998). Fakat teknik literatürde ACR'nin katkılarla önlenmesi konusunda çelişkili araştırma sonuçları mevcuttur.

Bellew ve Mitchell'a göre ACR'yi önlemek konusunda ne düşük alkali içerikli çimento kullanmak ne de genişmeyi azaltması için katkı kullanmak, yapısal hasarın önüne geçmekte başarılı olamamaktadır (Bellew ve Mitchell,2002).

Chen ve diğ. tarafından yapılan araştırmada 15 çeşit uçucu kül, curuf, silika tozu ve doğal puzolanlar kullanılmıştır. Çimento olarak alkali içeriği yüksek ve düşük olan normal Portland çimentoları kullanılmıştır ve bunların genleşmeleri karşılaştırılmıştır. Çimentonun yerine kullanılan %15 oranında silika tozu, %20-%30 oranında doğal puzolanlar, %40 oranında uçucu kül veya %50-%65 oranında curuf katkısının genleşmeyi azalttığı saptanmıştır. Araştırma sonunda bulunanlar genleşmeyi azaltmaları açasından şöyle özetlenmiştir:

- Yüksek bir ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) içeriği,
- 45 μm 'den daha küçük taneler,
- Düşük alkali içeriği (Chen ve diğ., 1993).

Fakat yine de genleşmedeki bu azalmalar, düşük alkalili bir çimento kullanılmasından daha fazla avantaj sağlayamamaktadır (ACI, 1995)

Wang tarafından yapılan araştırmada ise katkı olarak çeşitli priz hızlandırıcılar, priz geciktiriciler, süper akışkanlaştırıcılar, hava sürükleyiciler ve lityum ve baryum bileşikleri kullanılmıştır. Priz hızlandırıcılar, priz geciktiriciler, silika tozu, bir çeşit lityum bileşiği ve iki çeşit baryum bileşiği içeren prizmalarda kontrol örneklerinden daha az genleşme gözlenmiştir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, süper akışkanlaştırıcı, bir çeşit lityum ve bir çeşit baryum bileşiği içeren örneklerde ise daha fazla genleşme görölmüştür. Hava sürükleyici katkı içeren örneklerde ise bir değişme olmadığı görölmüştür (Wang, 1995).

Larbi ve Hudec'in 1990 yılında yayımlanan araştırmalarında sıcak ve soğuk doygunlaştırılmış NaCl çözeltilisinin alkali-agrega reaksiyonlarına etkisi incelenmiştir. Araştırma sonucunda sıcak doygunlaştırılmış çözeltilinin reaksiyonu hızlandırdığı, fakat soğuk doygunlaştırılmış çözeltilinin reaksiyonu yavaşlattığı gözlemlenmiştir. Bu yavaşlama ASR için daha fazla iken, ACR için çok fazla bir değerde olmamaktadır (Larbi ve Hudec, 1990).

Perry ve Gillot (1985)'e göre silika tozu ACR sebebiyle oluşan genleşmeyi engellemekte faydalıdır. Rogers ve Hooton (1992)'a göre ise ne düşük alkalili çimento ne de mineral katkılar ACR'nin önüne geçmekte başarılı olamamaktadır.

ACI Raporu 2211R_98'e göre agreganın reaktif olduğu kesin ise en iyi çözüm o agregayı kullanmamaktır. Başka seçenek yok ise agrega iyice ince hale getirilmeli ve ayıklanarak reaktif madde miktarı maksimum %20 olacak şekilde ayarlanmalıdır. Eğer hem iri hem de ince agrega reaktif ise, toplam reaktif malzeme miktarı %15'i geçmemelidir.

ACI 2211 raporuna göre ise, puzolanlar ASR'dekinin aksine ACR'de yok denecek kadar az bir etki yaparlar. Etkileri çok az derecede reaksiyonu yavaşlatmak şeklinde olur. Puzolanların ACR'e etki etmediği Neville tarafından da belirtilmiştir (Neville, 1975).

BÖLÜM ÜÇ

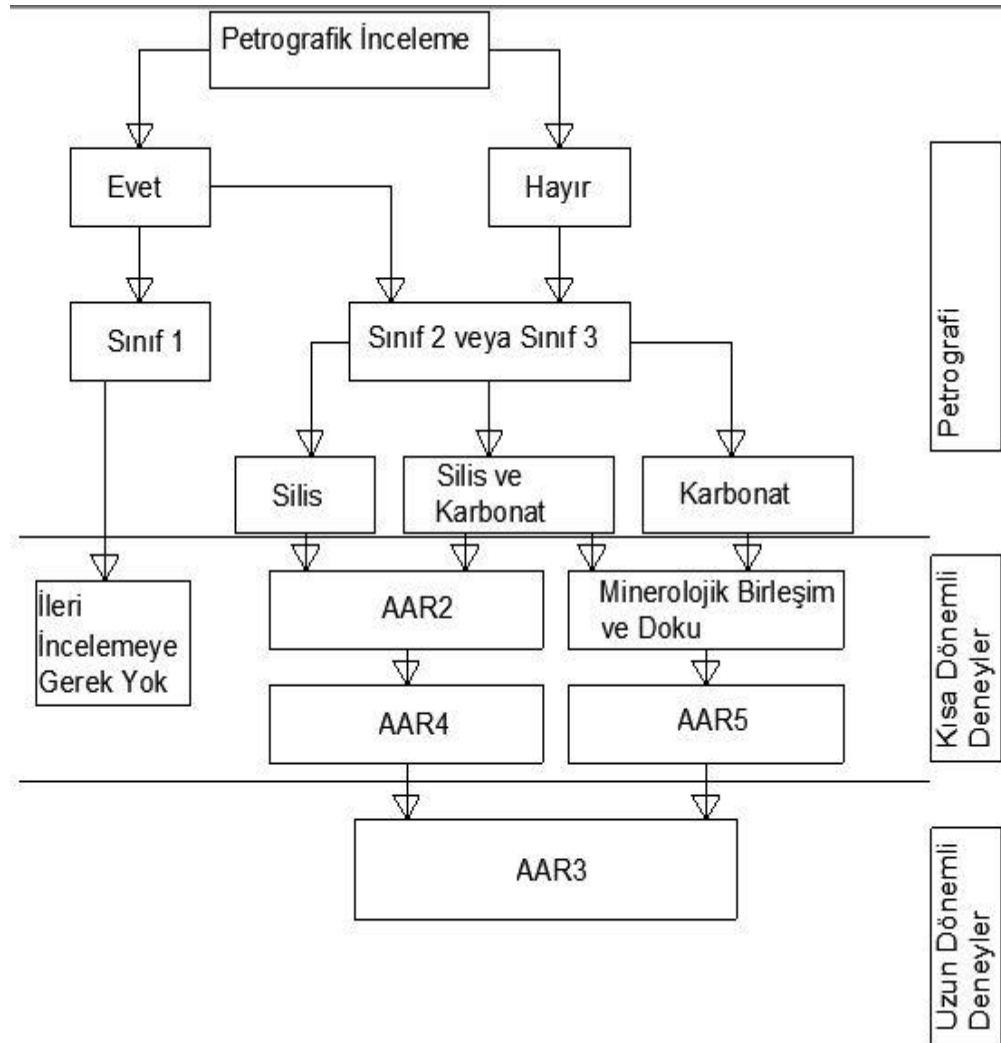
DENEY YÖNTEMLERİ

1940'lı yıllarda Alkali-Agrega Reaksiyonlarının anlaşılmasından sonra geçen yıllar içinde agregaların alkali reaktivitesini belirlemek amacıyla pek çok yöntem geliştirilmiştir. Fakat geliştirilen yöntemlerin büyük çoğunluğu, hem daha önce anlaşıldığı hem de daha yaygın olduğu için Alkali-Silika Reaksiyonuna uygundur.

RILEM tarafından agregalar, Alkali-Reaktivitesi potansiyellerine göre üçe ayrılırlar:

- 1- Sınıf 1: Reaktivite potansiyeli olmayan agregalar
- 2- Sınıf 2: Reaktivite potansiyeli olan agregalar
- 3- Sınıf 3: Büyük ihtimalle reaktif olan agregalar

Şekil 3.1'de, agregaların reaktivite potansiyellerini belirlemek amacıyla RILEM komitesi tarafından önerilen deney akış şeması sunulmuştur. Komiteye göre, eğer öncelikle petrografik inceleme yapılmamış ise, agregalar Sınıf 2 veya Sınıf 3 olarak kabul edilmelidir.



Şekil 3.1 RILEM Komitesi tarafından uygun görülen deney akış şeması

Tez kapsamında temin edilen agregalar ile öncelikle AAR2 ve AAR5 yöntemlerine uygun deneyler yürütülmüştür. Petrografik incelemeler, bu deneyler sonucunda reaktif olduğu belirlenen ve ileri deneyler yapılmak üzere seçilen agregalar üzerinde yürütülmüştür. Petrografik incelemelerden sonra ise mineral katkıların etkinliği, kısa dönemli deney yöntemleri ile araştırılmıştır.

3.1 Uzun Dönemli Deney Yöntemleri

3.1.1 ASTM C586: Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates-Rock Cylinder Method (Beton Agregası Olarak Karbonat Kayaçların Potansiyel Alkali Reaktivitesi-Kaya Silindir Yöntemi)

Bu yöntemde uzunluğu 35±5mm, çapı 9±1mm silindir örnekler kullanılmaktadır. Örnek ilk boyu ölçüldükten sonra oda sıcaklığındaki suyun içinde 24 saat bekletilir ve bu sürenin sonunda boyu ölçülür. Daha sonra 35mL 1N NaOH içeren şişede 12 ay oda sıcaklığında (23 °C) bekletilir. Her altı ayda bir çözeltiyi yenilemek kaydıyla 7. gün, 14. gün, 21. gün, 28. gün, ve daha sonra 4 haftalık aralıklarla boy ölçümleri yapılır. Eğer test bir yıldan fazla sürerse 12 haftalık aralıklarla ölçüm alınır.

Deney süresi sonunda örneklerde genleşme %0,1'den fazla ise ilave testler uygulamakta fayda vardır çünkü agrega büyük ihtimalle reaktiftir.

3.1.2 ASTM C1105: Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Reaction (Alkali-Karbonat Reaksiyonu Nedeniyle Betonda Boy Değişimi)

Bu yöntemde 75x75x285 mm beton örnekler kullanılmaktadır. Örnekler standarda uygun şekilde hazırlanıp kalıplara döküldükten 24 sonra kalıptan çıkarılır. Kalıptan çıkarılan numuneler oda sıcaklığındaki kirece doymuş suya konulur. Örnek boyutuna bağlı olarak 15 veya 30 dakika sonra boy ölçümleri yapılır.

Kür süresi bittikten sonra örnekler neme doymuş ortamda su ile temas etmeden 23 °C sıcaklıkta bekletilir. Bu sırada 7, 28, 56 gün ve 3, 6, 9, 12 aylarda boy ölçümleri yapılır. Eğer 6 adet numunenin genleşmesi 3 ay sonunda %0,015'e, 6 ay sonunda %0,025'e, 1 yıl sonunda %0,03'e eşit veya bunlardan daha büyükse, kombinasyon reaktiftir denilebilir.

3.1.3 RILEM AAR3: Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates - Method For Aggregate Combinations Using Concrete Prisms (Agregaların Alkali-Reaktivitesi Potansiyelinin Saptanması – Beton Prizmaları Kullanılan Agrega Kombinasyonları için Yöntem)

Bu yöntemde 75x75x285 mm beton örnekler kullanılmaktadır. Standarttaki oranlara uygun olarak hazırlanan beton örnekleri, 24 saat kalıpta bekletilir. 24 saat sonunda kalıptan çıkartılan örnekler oda sıcaklığındaki kirece doygun suya konulur. 7 gün kirece doygun suda bekletilen örneklerin ilk boy ölçümleri, kirece doygun suya konduktan 24 saat sonra alınır. 7 günün sonunda örnekler, neme doygun ortamda, suya temas etmeyecek şekilde 38 °C’de bekletilir.

1, 2, 4, 13, 26 ve 52 haftalarda boy ölçümleri yapılır. 12 ay sonundaki genleşme %0,1’den büyükse, kullanılan agrega kombinasyonu kesinlikle reaktiftir. Genleşme değeri %0,05 ile %0,1 arasında ise reaktif olma ihtimali vardır ve ilave deneyler yapılmalıdır. %0,05’den küçükse kullanılan kombinasyon reaktif değildir.

Bu deney ilk olarak Alkali-Silika Reaksiyonu için geliştirilmiştir. Fakat zaman içinde Alkali-Karbonat Reaktivitesini belirlemek amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır.

3.1.4 RILEM AAR4: Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates – Ultra Accelerated Concrete Prism Test (Agregaların Alkali-Reaktivitesi Potansiyelinin Saptanması – Ultra Hızlandırılmış Beton Prizma Deneyi)

Bu yöntemde de 75x75x285 mm boyutundaki örnekler standarda göre hazırlanır ve 24 saat kalıpta bekler. Kalıp çıkışında 30 dakika, oda sıcaklığındaki kirece doygun suda bekledikten sonra ilk boy ölçümü yapılır. 30 dakikanın sonunda 60 °C’de neme doygun ortamda suya değmeden bekletilir. 4, 8, 10, 12, 16, 20 haftalarda boy ölçümleri yapılır. 20. hafta sonundaki genleşme değeri

%0,02'den fazla ise kullanılan agrega reaktiftir denilebilir.

Bu yöntem çok eski ve denenmiş bir yöntem değildir. Nitekim genleşme sınırı için önerilen %0,02 değeri de henüz kesin olarak kabul edilmemiştir.

3.2 Kısa Dönemli Deney Yöntemleri

3.2.1 RILEM AAR-5 Yöntemi : Rapid Preliminary Screening Test For Carbonate Aggregates (Karbonat agregaları için hızlı ön gözlem testi) ve RILEM AAR-2 Yöntemi : Ultra Accelerated Mortar Bar Method (Hızlandırılmış harç çubuğu metodu).

İki yöntem birbirine çok benzemektedir. Numuneler kalıplara dökülüp, 24 saat %90 bağıl nemli oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıptan çıkarılır ve 24 saat süresince 80°C sıcaklığındaki su içinde bekletilir. Daha sonra örnekler 80°C sıcaklıktaki 1 M NaOH çözeltisine batırılır. AAR-5 testinde kullanılan agrega tane boyutu 4-8 mm aralığındadır ve örnek boyutu 40x40x160mm'dir. AAR-2'de ise agrega tane boyutu 0-4 mm'dir ve örnek boyutları 25x25x285mm'dir. Her iki deneyde de ilk ölçüm kalıptan çıkarılma esnasında alınır ve daha sonraki ölçümler sırasıyla 7. 14. 21. ve 28. günlerde ölçümler yapılır. Deney süresi sonunda örneklerin %0,1'den daha fazla uzadığı belirlenirse, örnekler reaktiftir denilebilir.

Bu iki deneyden Alkali-Karbonat Reaksiyonuna daha uygun olanı, AAR5'dir. Bunun sebebi, agrega boyutunun artmasıyla, ASR'den farklı olarak ACR'de genleşmenin artmasıdır.

BÖLÜM DÖRT

ÖN DENEYLER VE KULLANILAN MALZEMELER

4.1 Çimento

Tez süresince alkali içeriği nispeten yüksek olan, Batı Çim'den temin edilen çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal analizi Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Deneylerde kullanılan çimentonun kimyasal analizi.

Bileşen	İçerik (%)
SiO ₂	19,90
Al ₂ O ₃	5,91
Fe ₂ O ₃	2,10
CaO	62,92
MgO	1,25
SO ₃	3,26
K.K.	3,94
Na ₂ O	0,38
K ₂ O	0,90
Alkali İçeriği	0,97
Cl	0,0112

4.2 Katkılar

Tez kapsamında, Alkali-Reaktivitesini önlemek amacıyla kullanılan mineral katkıların kimyasal analizleri Tablo 4.2'de, kimyasal katkı olan lityum hidroksitin analizi ise Tablo 4.3'de gösterilmiştir. Tez kapsamında kullanılan uçucu kül, Batı Beton'dan temin edilen soma külüdür. Kullanılan Yüksek Fırın Curufu Karçimsa

firmasından temin edilmiştir. Metakaolin, OTS İnşaat tarafından temin edilmiştir ve Powerpozz markadır. Silis dumanı BASF tarafından temin edilmiştir. Kullanılan zeolit ise Enli Madencilik tarafından sağlanmıştır.

Tablo 4.2 Kullanılan mineral katkıların kimyasal özellikleri

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Kızdırma Kaybı
Uçucu Kül	42.10	4.6	27.0	1.80	1.10	-	1.30
Yüksek Fırın Curufu	40,20	1,68	35,9	5,88	1.47	0.30	0,88
Zeolit	65,00	0,80	2,50	0,90	2,50	0,30	9,00
Metakaolin	52,00	1,90	0,20	0,10	0,75	0,05	0,88
Silis Dumanı	92,26	1.97	0,49	0.96	1.31	0,42	-

Tablo 4.3 Kullanılan kimyasal katkıların özellikleri

	LiOH	Li ₂ CO ₃	Cl	SO ₄	Ca	K	Na
LiOH	~ 98,00	~2,00	~ 0,05	~ 0,05	~ 0,02	~ 0,02	~ 0,05

4.3. Ön Deneyler ve Reaktif Agregaların Seçilmesi

Tezin deneysel çalışmalarının ilk aşamasında, Türkiye'deki çeşitli agrega ocaklarından dolomit agregaları temin edilmiştir ve bu agregalarla, Alkali-Karbonat Reaktivitesini belirlemeye yönelik ön deneyler yapılmıştır. Bu ilk aşama kapsamında toplam 26 kaynaktan agrega temin edilmiştir. Agrega ocakları tarafından genellikle ince malzeme gönderilmesi sebebiyle, temin edilen agregalar ile ilk olarak çoğunlukla AAR2 yöntemine uygun deneyler yürütülmüştür. Kaba agrega temin edilebilen kaynaklarda ise AAR5 yöntemi de eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Tablo 4.4'de, yapılan ön denemelerin ve alınan sonuçların listesi sunulmuştur. Sunulan sonuçlar kronolojik sıraya göre düzenlenmiştir.

Tablo 4.4 Yapılan Ön Denemelerin ve Sonuçlarının Listesi

Deney Kaynak	RILEM AAR2	RILEM AAR5
Genleşme Sınırı	% 0,1	%0,1
Köyceğiz	%0,069	%0,085
Denizli	%0,041	%0,064
Torbalı	%0,028	%0,028
Muğla	%0,027	%0,025
Kuşadası	%0,026	-
Fethiye	%0,474	%0,078
İzmir – 1	%0,017	-
Dinar	%0,080	%0,036
Akhisar	%0,033	%0,044
Mersin	%0,019	-
Alanya	%0,021	-
İzmir – 2	%0,035	-
İzmir – 3	%0,028	-
Balıkesir	%0,121	%0,025
Eskişehir	%0,047	-
Zonguldak	%0,186	%0,115
Karaburun – 1	%0,046	-
Karaburun – 2	%0,01	-
Aydın – 1	%0,006	-
Aydın – 2	%0,032	-
Konya	%0,046	-
İzmir – 4	%0,035	-
Aydın – 1	%0,006	-
Aydın – 2	%0,032	-
Konya	%0,046	-
İzmir – 5	%0,035	-

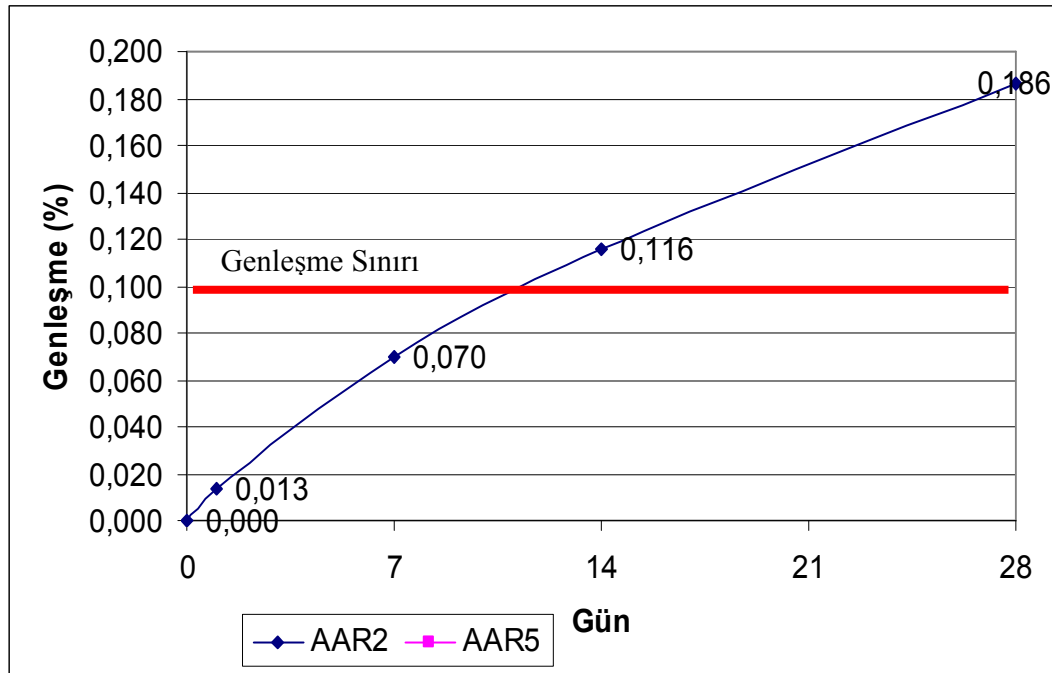
Türkiye’de yapılan agrega taramaları sonucunda hem AAR2 hem de AAR5 yönteminde reaktivite sınırına ulaşan tek agrega Zonguldak’tan temin edilen agrega olmuştur. Tablo 4.5’de Zonguldak agregasının kimyasal analizi sunulmuştur. Fethiye agregası AAR2 yönteminde oldukça genişleme gösterirken AAR5 yönteminde reaktivite sınırının altında kalmıştır. Bu bilgiler ışığında, Zonguldak agregasının kullanıldığı örneklerde ASR ile ACR’nin bir arada görüldüğü düşünülmüştür. Tablo 4.6’da Zonguldak agregası ile yapılmış örneklerin AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre genişleme değerleri sunulmuştur. Bu değerlerin grafiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.5 Zonguldak agregasının kimyasal analizi.

Bileşen	İçerik (%)
SiO ₂	14,04
Al ₂ O ₃	2,49
Fe ₂ O ₃	2,05
CaO	39,00
MgO	3,93
SO ₃	0,22
K.K.	35,43
Na ₂ O	0,25
K ₂ O	1,12
Cl	0,0216

Tablo 4.6 Zonguldak agregası ile AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre genişleme değerleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
AAR2	% 0,013	% 0,070	% 0,116	% 0,186
AAR5	% 0,015	% 0,036	% 0,074	% 0,115



Şekil 4.1. Zonguldak agregası ile AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre genleşme grafiği

Türkiye'den temin edilen dolomit agregaları içinde hem AAR2 hem de AAR5 yönteminde genleşme sınırına ulaştığı için, Zonguldak agregası ile ileri deneyler yapılmasına karar verilmiştir.

Tez kapsamında, Alkali-Karbonat Reaksiyonunu ve katkıların ACR'e etkinliğini tam olarak anlayabilmek amacıyla, Zonguldak agregası ile eş zamanlı olarak aynı deneylerin literatürde ACR için referans agregası olarak kabul edilen Kanada agregası ile de yapılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla Kanada Ulaştırma Bakanlığı ile temasa geçilmiş ve Kanada agregası temin edilmiştir.

Kanada agregasının temin edilmesinden sonra ilk olarak bu agreganın reaktivitesi belirlenmiştir. Tablo 4.7'de Kanada agregasının kimyasal analizi sunulmuştur. Tablo 4.6'dan görüldüğü gibi Kanada agregasının Silisyum içeriği Zonguldak agregasından azdır ve Kalsiyum içeriği daha fazladır. Magnezyum içerikleri ise hemen hemen aynıdır.

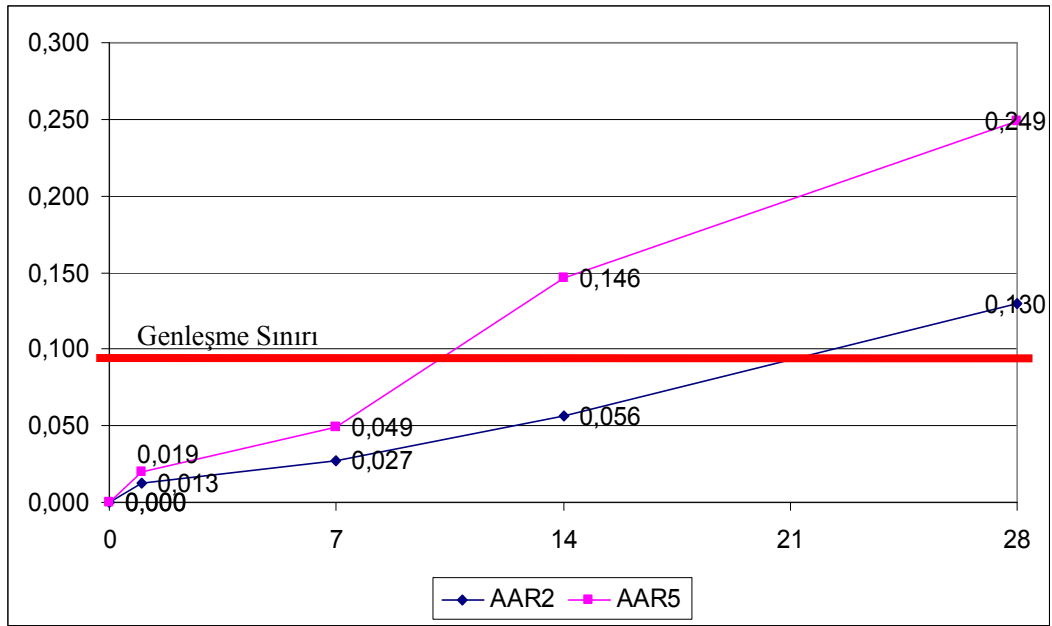
Tablo 4.7 Kanada agregasının kimyasal analizi

Bileşen	İçerik (%)
SiO ₂	5,12
Al ₂ O ₃	1,92
Fe ₂ O ₃	1,94
CaO	43,71
MgO	4,20
SO ₃	0,34
K.K.	38,86
Na ₂ O	0,22
K ₂ O	1,12
Cl	0,0409

Tablo 4.8’de Kanada agregası ile AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre yürütülen deneyler sonucunda elde edilen genleşme değerleri sunulmuştur. Bu değerlerin grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Tablo 4.8’den ve Şekil 4.2’den görüleceği gibi, Zonguldak agregasından farklı olarak, Kanada agregasında AAR5 yöntemindeki genleşme değerleri AAR2 yönteminde elde edilen değerlerden fazladır. Literatürde uzlaşmaya varıldığı gibi, agrega boyutu arttıkça ACR genleşmesinin arttığı düşünülecek olursa, her iki agregada da ASR ve ACR’nin bir arada görüldüğü fakat Zonguldak agregasında ASR daha baskınken, Kanada agregasında ACR’nin daha baskın olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.8 Kanada agregası ile AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre genleşme değerleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
AAR2	% 0,013	% 0,027	% 0,056	% 0,130
AAR5	% 0,019	% 0,049	% 0,146	% 0,249



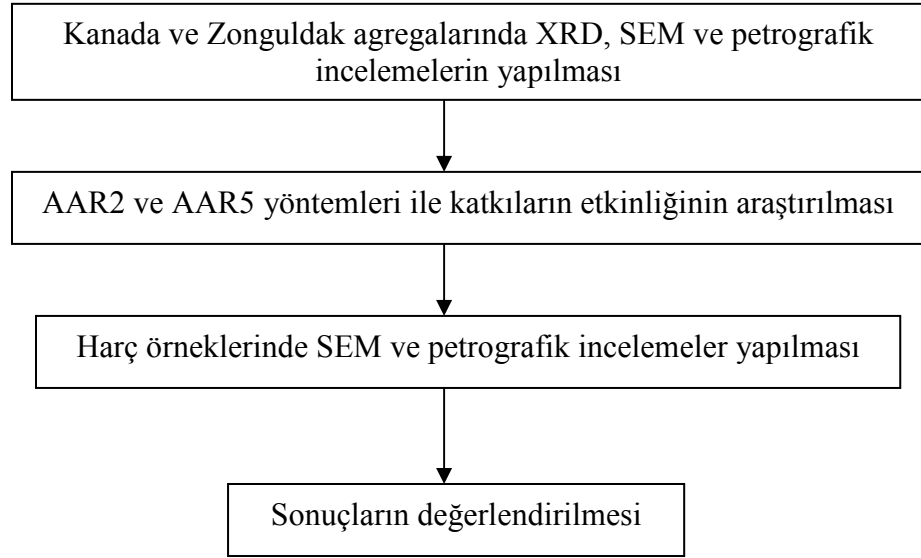
Şekil 4.2 Kanada agregası ile AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre genleşme grafiği

Yapılan ön denemeler sonucunda Alkali-Karbonat Reaktivitesinin araştırılmasına ve katkıların ACR üzerindeki etkilerini belirlemeye yönelik ileri çalışmalarda, Zonguldak ve Kanada agregalarının kullanılmasına karar verilmiştir.

BÖLÜM BEŞ

İLERİ DENEYLER

İleri deneylerde kullanılacak agregalar seçildikten sonra ilk olarak agregalar üzerinde petrografik incelemeler yapılmıştır. Daha sonra kısa dönemli deney yöntemleri ile katkıların etkinliği araştırılmıştır. Kısa dönemli deney yöntemlerinin sonucu elde edildikten sonra Zonguldak ve Kanada agregaları ile hazırlanan mineral katkısız kontrol karışımlarında iç yapı incelemeleri yürütülmüştür. Şekil 5.1’de deneysel çalışmanın akış şeması sunulmuştur.

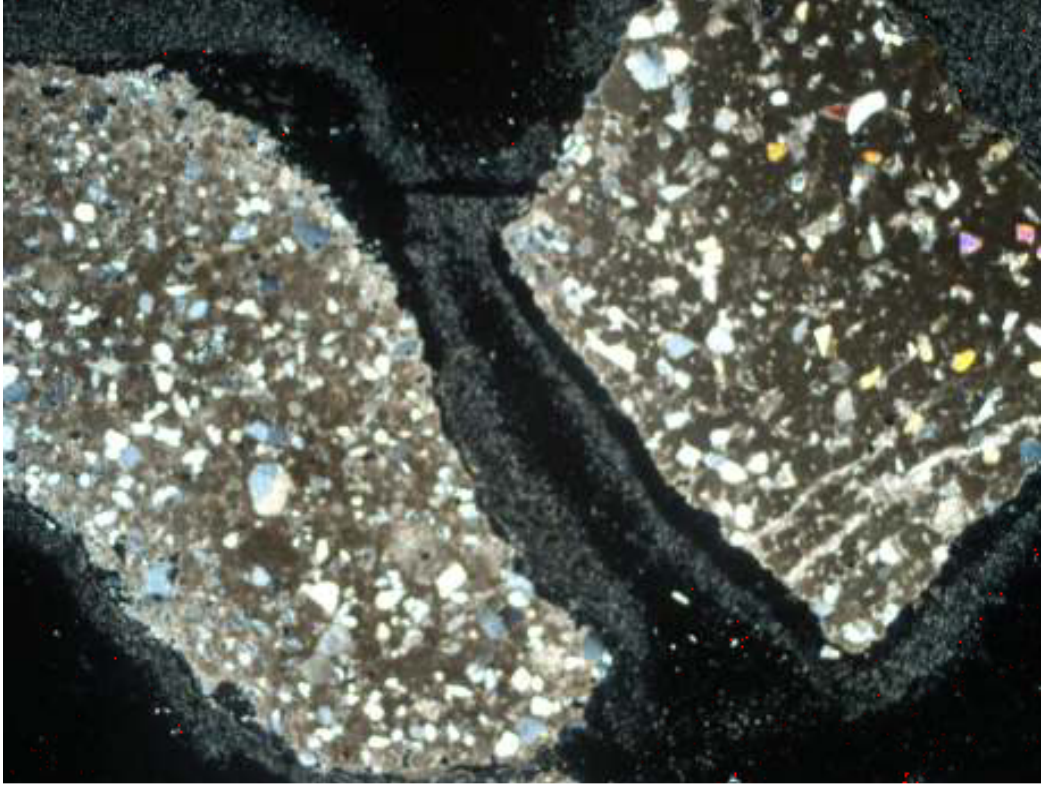


Şekil 5.1 Deneysel çalışmanın akış şeması

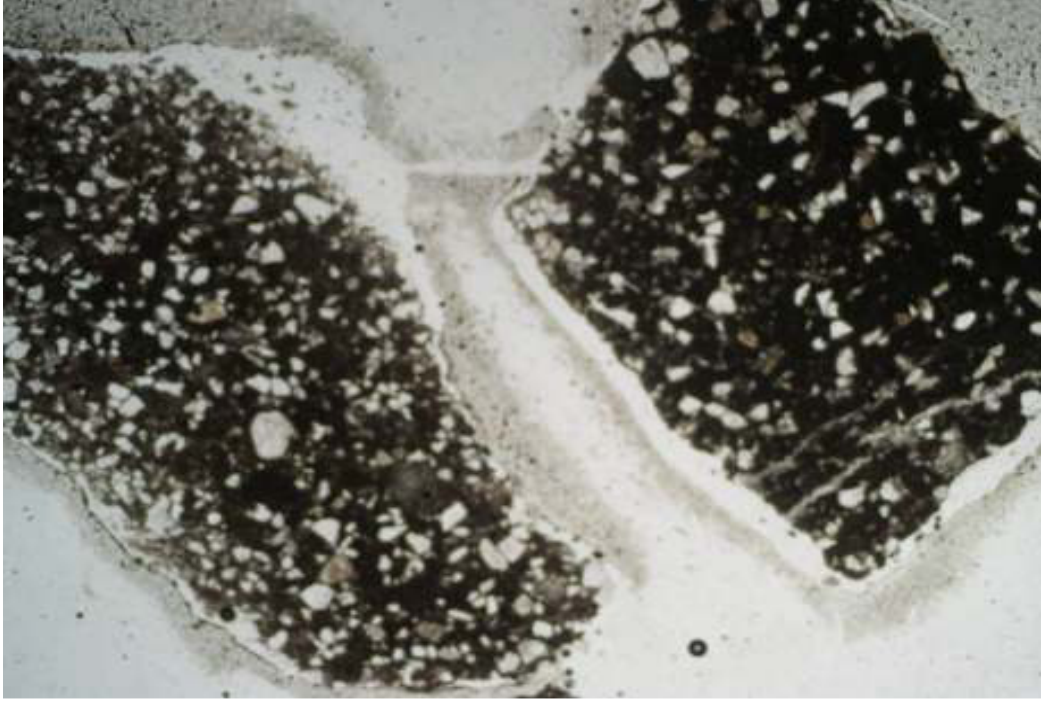
5.1 Petrografik İncelemeler

5.1.1 Zonguldak Agregasının Petrografik İncelemesi

Zonguldak agregasından alınan ve petrografik incelemeye sokulan iki farklı tanenin H-Nikol ve Paralel-Nikol ışıkları altındaki genel görüntüleri sırasıyla Şekil 5.2’de ve 5.3’de verilmiştir.

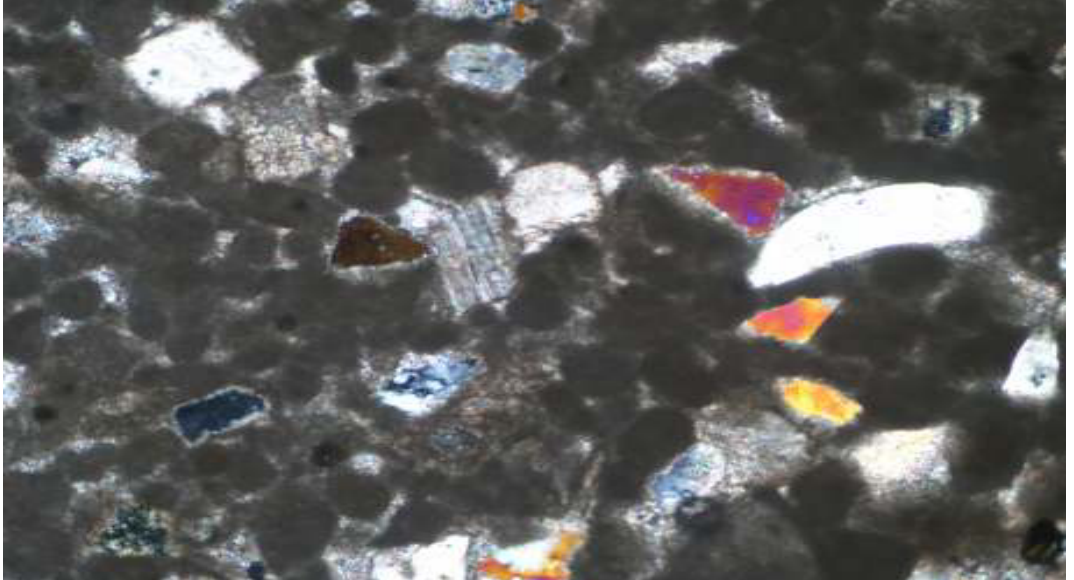


Şekil 5.2 Zonguldak agregasından alınan iki farklı tanenin H-Nikol ışığı altındaki görüntüsü



Şekil 5.3 Zonguldak agregasından alınan iki farklı tanenin Paralel-Nikol ışığı altındaki görüntüsü

Şekil 5.4'de, bir tanenin yakından çekilmiş görüntüsü görülmektedir. Bu şekilde görülen renkli taneler quartzdır. Ortada bulunan çizgili şekil ise feldspatdır.

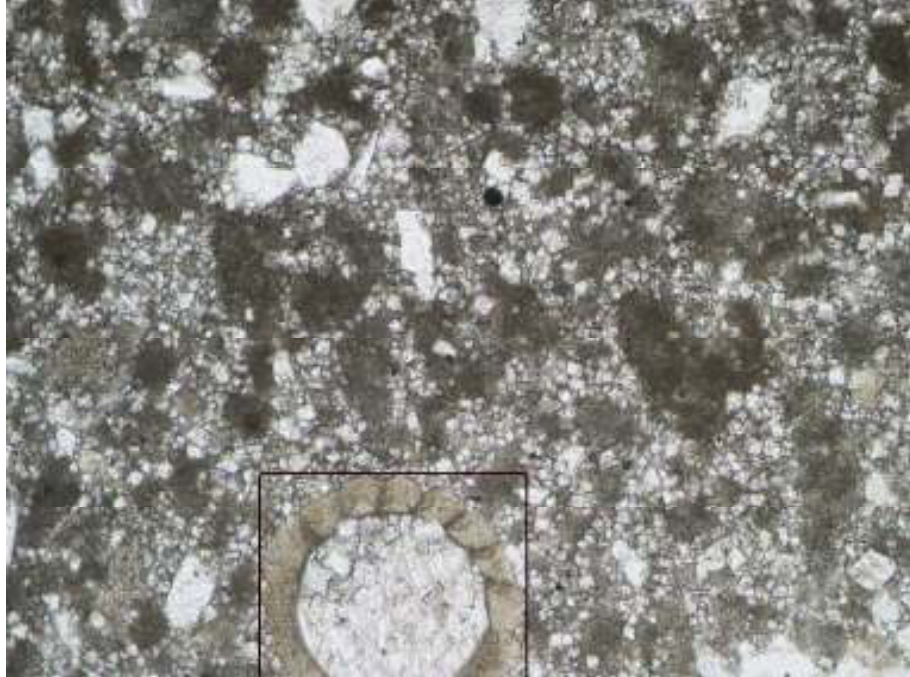


Şekil 5.4 H-Nikol ışığı altında yakın görüntü

Zonguldak agregasının dokusunu gösteren fotoğraflar ise Şekil 5.5’de ve 5.6’da sunulmuştur. Şekil 5.6’da siyah ile işaretlenmiş bölgenin içinde dairesel bir fosil görülmektedir. Fosilin merkezini ise büyük kalsit taneleri doldurmuştur.



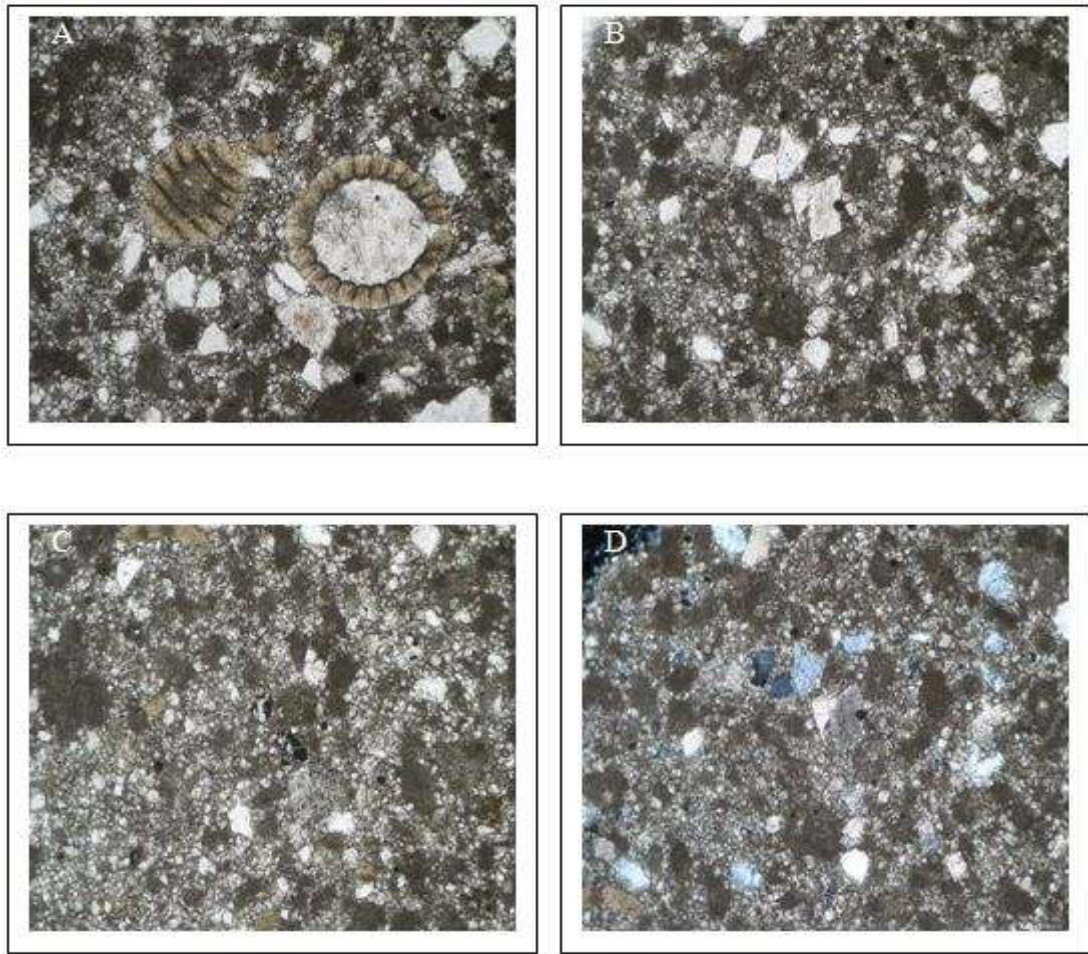
Şekil 5.5 Zonguldak agregasının mikro dokusu



Şekil 5.6 Zonguldak agregasının dokusu

Yapılan petrografik incelemelerden Zonguldak agregasının denizel bir kireçtaşı olduğu anlaşılmıştır. Karaya yakın yerlerde çökeldiği için, bünyesinde karadan taşınan kumsu kırıntı taneler içermektedir. Bünyesinde bulundurduğu quartzların üstüne, akarsuların karadan denize taşıdığı dolomitler çökelmiştir. Petrografik incelemeler sonucunda Zonguldak agregasının siltli kumlu mikritik kireçtaşı olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda silt boyutunda, metamorfik kökenli olması muhtemel quartz taneleri içermektedir. Mikrokristalin dolomitik doku üzerinde karesel dolomit tanelerinin bulunduğu bir dokuya sahiptir. İçerdiği quartz taneleri ise mikrokristalin kalsitler aracılığıyla dokuya bağlamıştır. Az miktarda da feldspat içermektedir. Ayrıca bünyesinde büzülme çatlakları mevcuttur.

Şekil 5.7'de Zonguldak agregasının mikro dokusunu gösteren çeşitli fotoğraflar sunulmuştur.



Şekil 5.7 Zonguldak agregasının mikro dokusunu gösteren çeşitli fotoğraflar

5.1.2 Kanada Agregasının Petrografik İncelemesi

Şekil 5.8'de ve 5.9'da, Alkali-Karbonat Reaksiyonu için referans agregası kabul edilen Kanada agregasının mikro dokusu gösterilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere bu doku, Zonguldak agregasının dokusuyla hemen hemen aynıdır.



Şekil 5.8 Kanada agregasının mikro dokusu

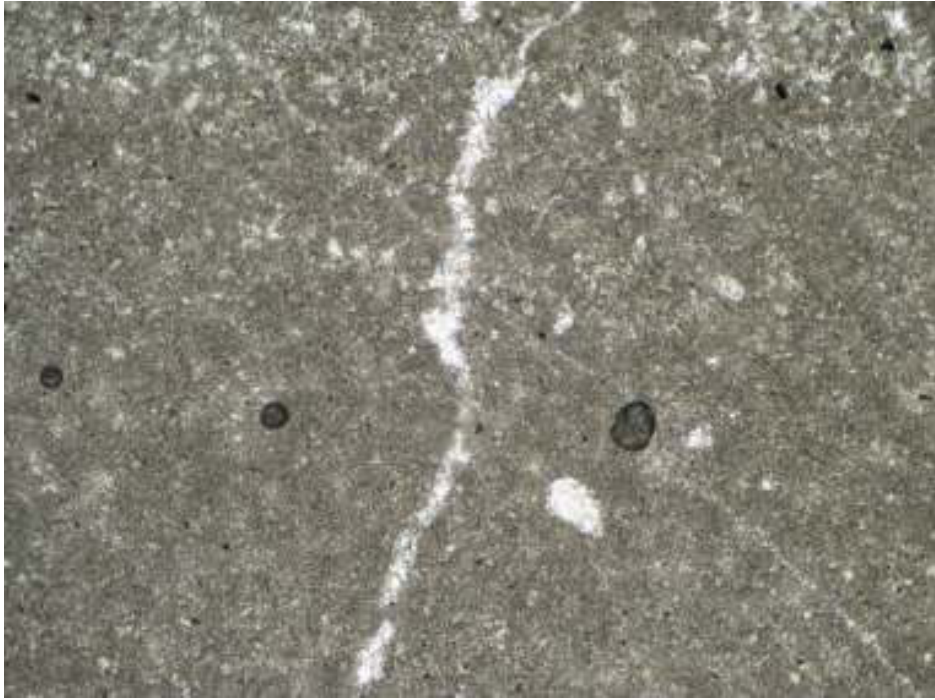


Şekil 5.9 Kanada agregasının mikro dokusu

Şekil 5.10'da Kanada agregasının bir bölümünden çekilmiş bir fotoğraf görülmektedir. Fotoğrafta 1 ile işaretlenmiş bölgede, büzülme boşluğunun ortasında oluşmuş bir dolomit kristali görülmektedir. 2 ile işaretlenmiş bölge ise içi boş kalmış bir büzülme boşluğudur. Benzer biçimde, Şekil 5.11'de da düşey doğrultuda oluşmuş bir büzülme çatlığı görülmektedir.



Şekil 5.10 Bir Kanada agregası tanesinde görülen büzülme boşluğu ve dolomit kristali

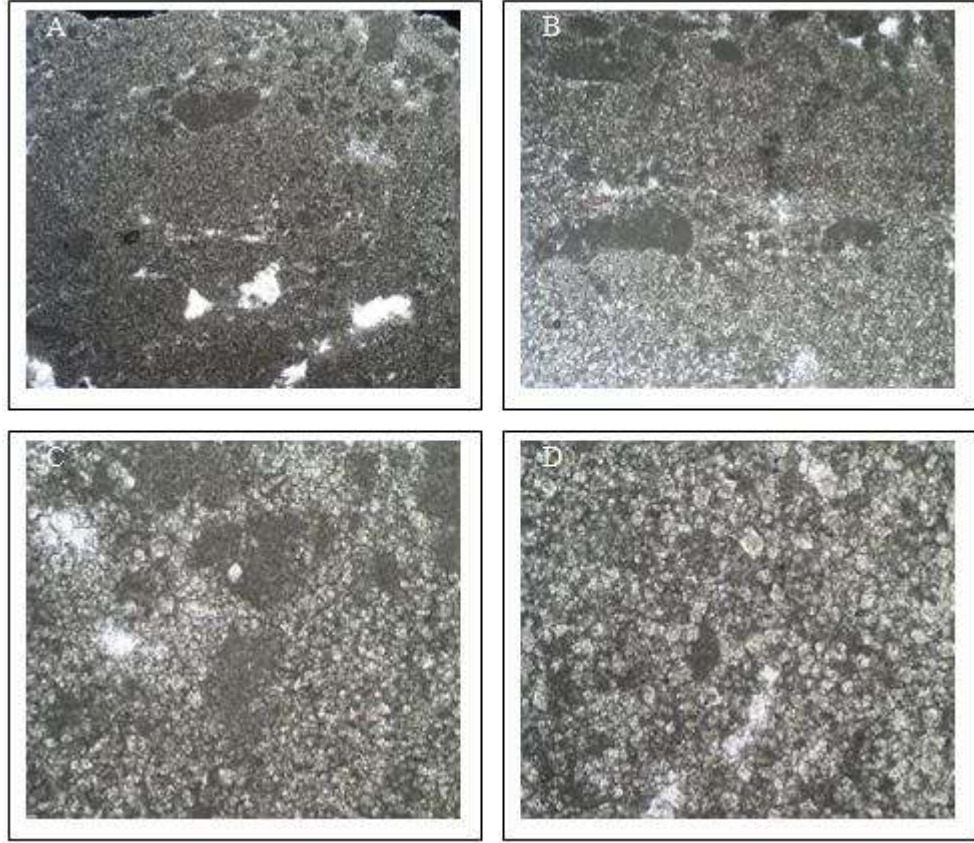


Şekil 5.11 Bir Kanada agregası tanesinde görülen büzülme çatlakı

Yapılan incelemelerden Kanada agregasının dolomitik mikritik kireçtaşı olduğu sonucuna varılmıştır. Dolospar'dan oluşan matris az miktarda kil ve quartz içermektedir. Dokusunda büzülme çatlakları ve canlı dolaşım izleri (biotürbasyon)

mevcuttur. Aynı zamanda intraclastlar ve pelletler de dokusunda mevcuttur.

Şekil 5.12’de Kanada agregasından alınmış çeşitli fotoğraflar sunulmuştur.



Şekil 5.12 Kanada agregasından alınmış çeşitli fotoğraflar

Yapılan petrografik incelemeler sonucunda, her iki agregada da yüksek miktarda quartz bulunduğu saptanmıştır. Literatürde de değinildiği gibi agreganın içeriğinde bulunan quartz, genişlemenin oluşması için belirleyicidir. Nitekim quartz veya kil damarı içermeyen karbonat agregalarının genişlemeye yol açmadığı iddiası, son yıllarda birçok araştırmacı tarafından desteklenmektedir.

Gerek Zonguldak gerekse Kanada agregasının mikrodokuları, literatürde reaktif olduğu kabul edilen agrega mikrodokusuna çok benzerdir. Ayrıca literatürde Alkali-Karbonat Reaktivitesi için referans agregası olarak gösterilen Kanada agregası ile Zonguldak agregasının hemen hemen aynı mikrodokuya sahip oldukları görülmüştür.

İki agreganın bünyesinde de benzer mineraller bulunması, agregalardan kaynaklanan genleşmenin aynı sebeple oluştuğunu işaret etmektedir. Bu bilgiler ışığında Kanada ve Zonguldak agregalarının Alkali-Karbonat Reaksiyonu göstermesi beklenmektedir. Literatürdeki değerlendirmeler de dikkate alındığında, Alkali-Silika ve Alkali-Karbonat Reaksiyonlarının aynı zamanda görüldüğü düşünülebilir.

Her iki agregada da hızlandırılmış deney yöntemleri (AAR2 ve AAR5) kullanılmıştır. Hazırlanan harç çubuklarının zaman bağlı genleşmeleri belirlenmiştir.

5.2 Katkıların Etkinliğinin Araştırılması

Tez kapsamında, seçilen agregalar kullanılarak uçucu kül, yüksek fırın curufu ve 100µm-400µm arası zeolit çimentonun yerine % 10-%50 arasında değişen oranlarda ikame edilmiştir. Silis dumanı, metakaolin, 100µm altı zeolit ise çimento yerine % 5-15 arasında değişen oranlarda ikame edilmiştir.

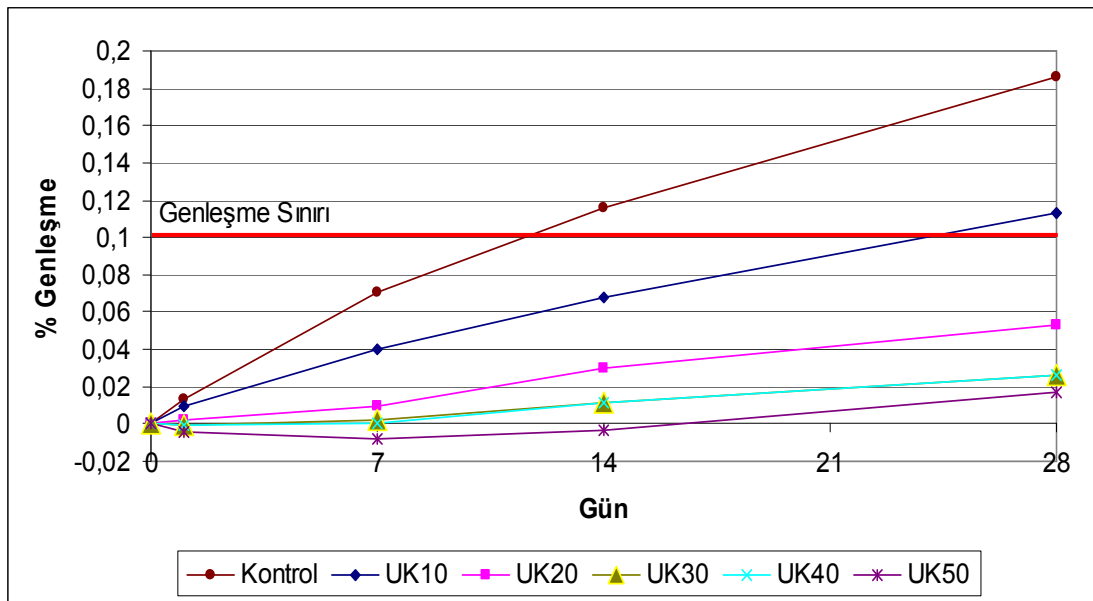
5.2.1 Zonguldak Agregası İle Yapılan Deneyler

5.2.1.1 AAR2 Yöntemine Uygun Yürütülen Deneyler

5.2.1.1.1 Uçucu Kül İkamesi. Çimento yerine uçucu kül ikame edilmesi sonucunda AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir. Şekil 5.13'de AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. %20 uçucu kül ikamesi ile genleşmeler, reaktivite sınırının altına düşmektedir.

Tablo 5.1 Uçucu kül ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,070	% 0,116	% 0,186
%10	% 0,009	% 0,04	% 0,068	% 0,113
%20	% 0,003	% 0,009	% 0,030	% 0,053
%30	% 0,000	% 0,001	% 0,011	% 0,026
%40	% -0,001	% 0,000	% 0,012	% 0,026
%50	% -0,004	% -0,008	% -0,004	% 0,017



Şekil 5.13 Çimento yerine uçucu kül ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Yürütülen deneyler sonucunda Zonguldak agregası kullanılarak hazırlanan örneklerdeki genleşmenin, uçucu kül miktarının artmasıyla azaldığı belirlenmiştir. Tablo 5.2’de, uçucu kül ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

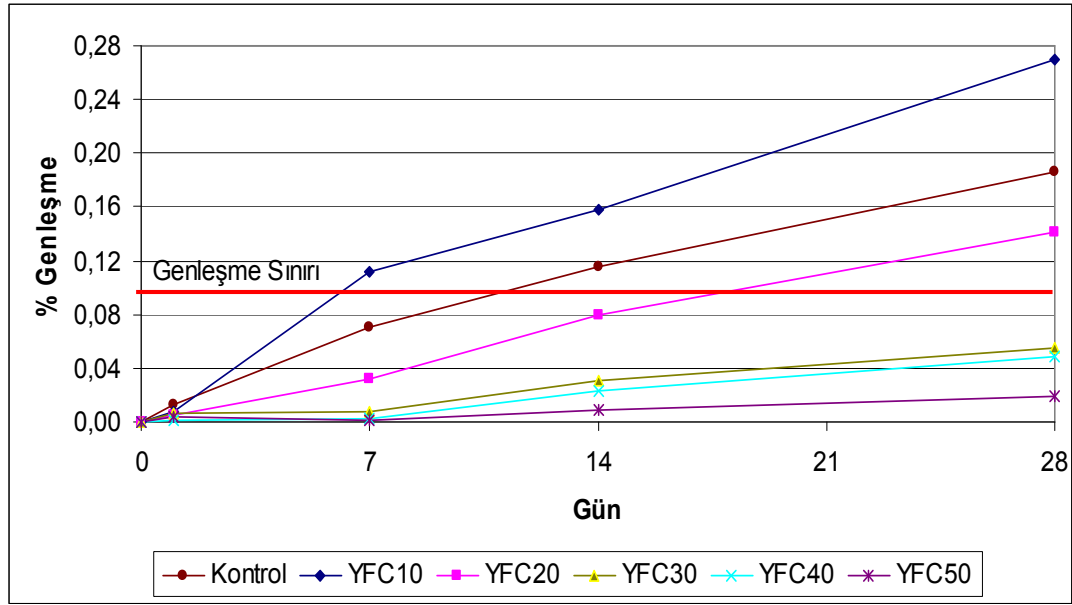
Tablo 5.2 Uçucu Kül ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 39 (Azalma)
%20	% 71 (Azalma)
%30	% 85 (Azalma)
%40	% 85 (Azalma)
%50	% 90 (Azalma)

5.2.1.1.2 *Yüksek Fırın Curufu İkamesi*. Çimento yerine yüksek fırın curufu ikame edilmesi sonucunda AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.3’de gösterilmiştir. Şekil 5.14’de AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Yüksek fırın curufunun %30 ikamesi ile genleşme değerleri limitin altına inmiştir.

Tablo 5.3 Yüksek fırın curufu ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,070	% 0,116	% 0,186
%10	% 0,008	% 0,111	% 0,158	% 0,270
%20	% 0,005	% 0,032	% 0,080	% 0,142
%30	% 0,006	% 0,008	% 0,031	% 0,055
%40	% 0,002	% 0,003	% 0,023	% 0,049
%50	% 0,004	% 0,002	% 0,009	% 0,019



Şekil 5.14 Çimento yerine yüksek fırın curufu ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Şekil 5.14'den de görüleceği üzere %10 oranında yüksek fırın curufu ikamesiyle genleşmeler artmaktadır fakat %20 ve diğer ikame oranları için genleşme azalmıştır. Literatürde uzlaşmaya varılan, curufun optimum kullanım yüzdesi olan %40'da genleşme sınırın çok altına gerilemiştir.

Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan araştırmalarda, betondaki belirli bir reaktif agrega oranı veya alkali içeriği için genleşmelerin en büyük değerine ulaştığı saptanmıştır (Ozol, 1975, Mielenz ve diğ., 1947). En büyük genleşmeyi veren orana kötümser oran adı verilir. Bu agrega ile %10 curuf içeren örneklerde de kötümser oran görülmesi ve bu sebeple genleşmelerin kontrolün önüne geçmesi söz konusu olabilir.

Tablo 5.4'de, yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

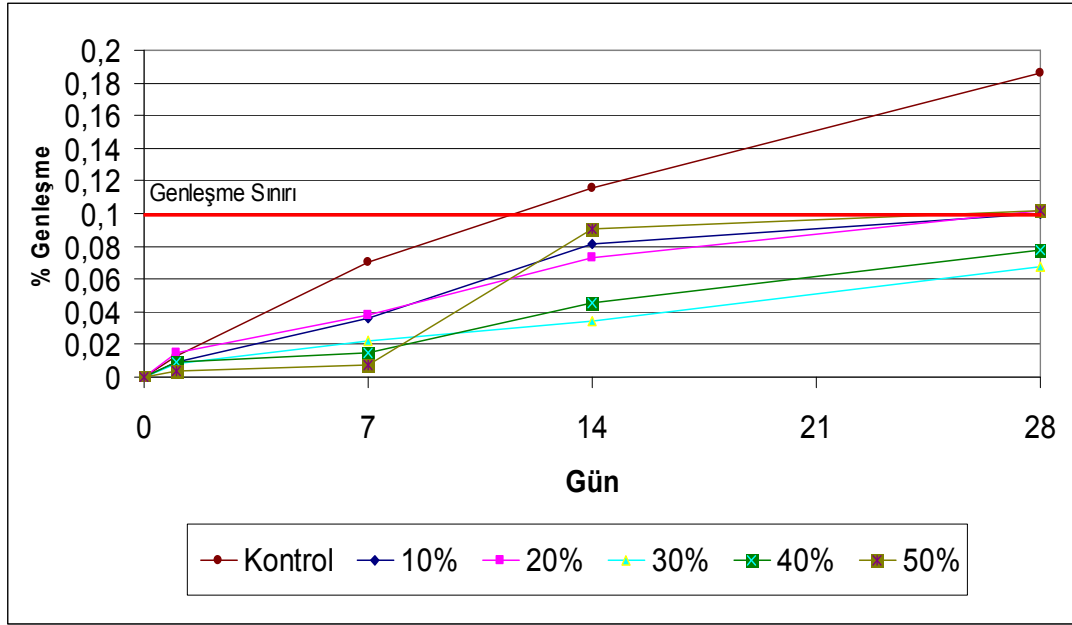
Tablo 5.4 Yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 45 (Artış)
%20	% 23 (Azalma)
%30	% 70 (Azalma)
%40	% 73 (Azalma)
%50	% 89 (Azalma)

5.2.1.1.3 İri (100 μ m-400 μ m Arası) Zeolit İkamesi. Çimento yerine iri zeolit ikame edilmesi sonucunda AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.5’de gösterilmiştir. Şekil 5.15’de AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Çimento yerine %10 - %20 iri zeolit ikame edilmesi durumunda genleşmeler reaktivite sınırına yaklaşmıştır. %30 ve %40 zeolit kullanılması durumunda genleşmeler sınıra yakın olmakla birlikte sınırın altında kalmışlardır. Fakat %50 zeolit kullanılması durumunda genleşme değeri yine sınırın üstüne çıkmıştır.

Tablo 5.5 İri zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,070	% 0,116	% 0,186
%10	% 0,009	% 0,036	% 0,081	% 0,100
%20	% 0,015	% 0,038	% 0,074	% 0,102
%30	% 0,009	% 0,023	% 0,034	% 0,068
%40	% 0,009	% 0,015	% 0,045	% 0,077
%50	% 0,004	% 0,008	% 0,091	% 0,102



Şekil 5.15 Çimento yerine iri zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.6'da, iri zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

Tablo 5.6 İri zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

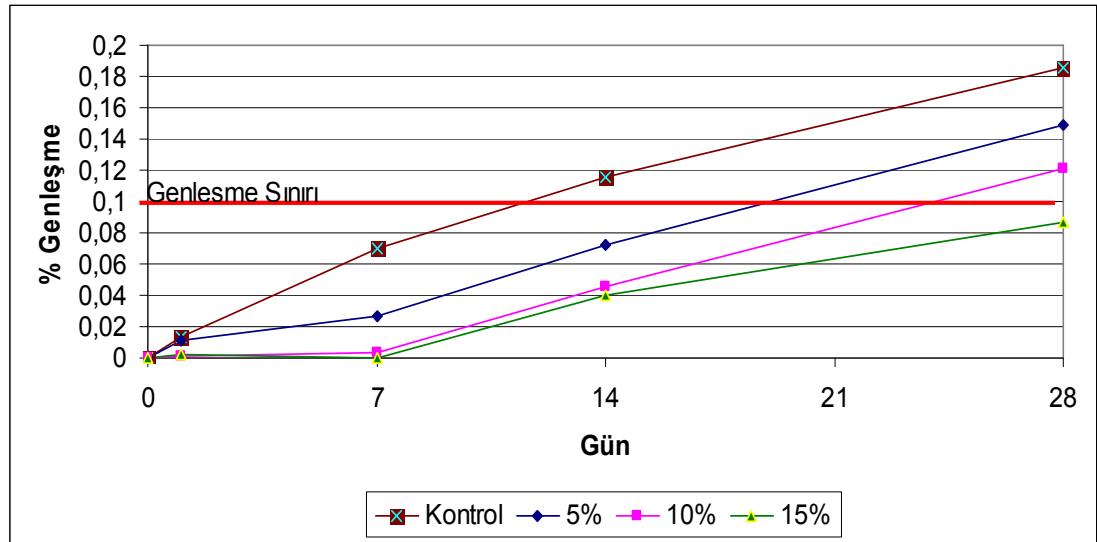
	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 46 (Azalma)
%20	% 45 (Azalma)
%30	% 63 (Azalma)
%40	% 58 (Azalma)
%50	% 45 (Azalma)

5.2.1.1.4 *İnce (100 μ m Altı) Zeolit İkamesi.* Çimento yerine sonucunda AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.7'de gösterilmiştir. Şekil 5.16'da AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Zeolit oranı arttıkça genleşmeler azalmaktadır. İnce zeolit kullanılması durumunda genleşmeler düşmüştür. Fakat %5 ve %10 oranlarında reaktivite sınırının üstünde genleşmeler

görülürken sadece %15 ikame oranında genleşmeler reaktivite sınırının altına gerilemiştir.

Tablo 5.7 İnce zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,070	% 0,116	% 0,186
%5	% 0,011	% 0,026	% 0,072	% 0,149
%10	% 0,002	% 0,004	% 0,046	% 0,121
%15	% 0,002	% 0,000	% 0,040	% 0,087



Şekil 5.16 Çimento yerine ince zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.8'de, ince zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

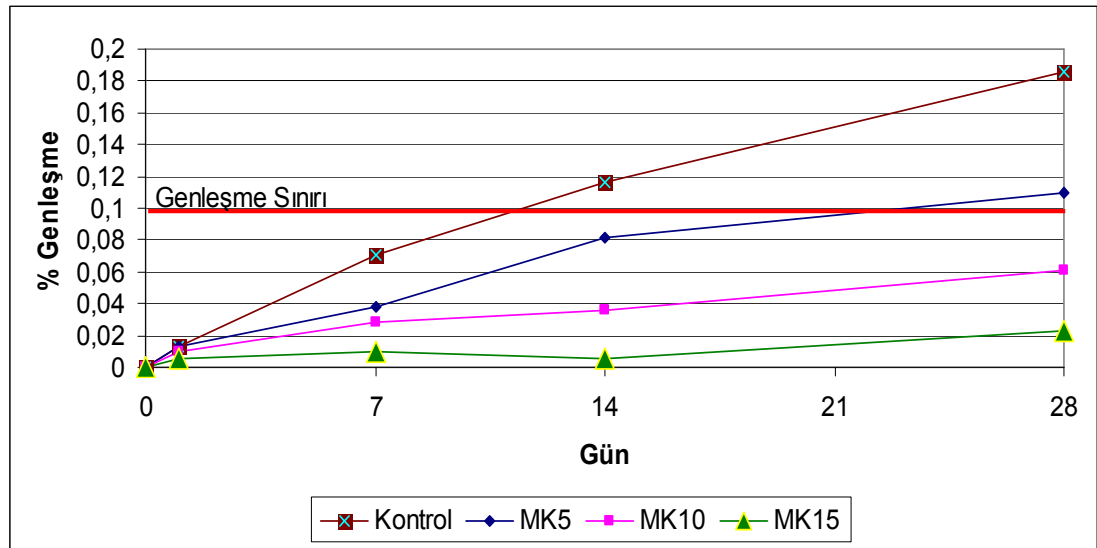
Tablo 5.8 İnce zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 19 (Azalma)
%10	% 35 (Azalma)
%15	% 53 (Azalma)

5.2.1.1.5 *Metakaolin İkamesi*. Çimento yerine metakaolin ikame edilmesi sonucunda AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.9’da gösterilmiştir. Şekil 5.17’de AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Yürütülen deneyler sonucunda da metakaolin ikamesi sonucu genleşmeler oldukça azalmış ve %10-%15 oranlarında metakaolin içeren örneklerde genleşme reaktivite sınırının altına çekilmiştir.

Tablo 5.9 Metakaolin ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,070	% 0,116	% 0,186
%5	% 0,013	% 0,038	% 0,081	% 0,109
%10	% 0,009	% 0,028	% 0,036	% 0,060
%15	% 0,006	% 0,009	% 0,006	% 0,023



Şekil 5.17 Çimento yerine metakaolin ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.10’da, metakaolin ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

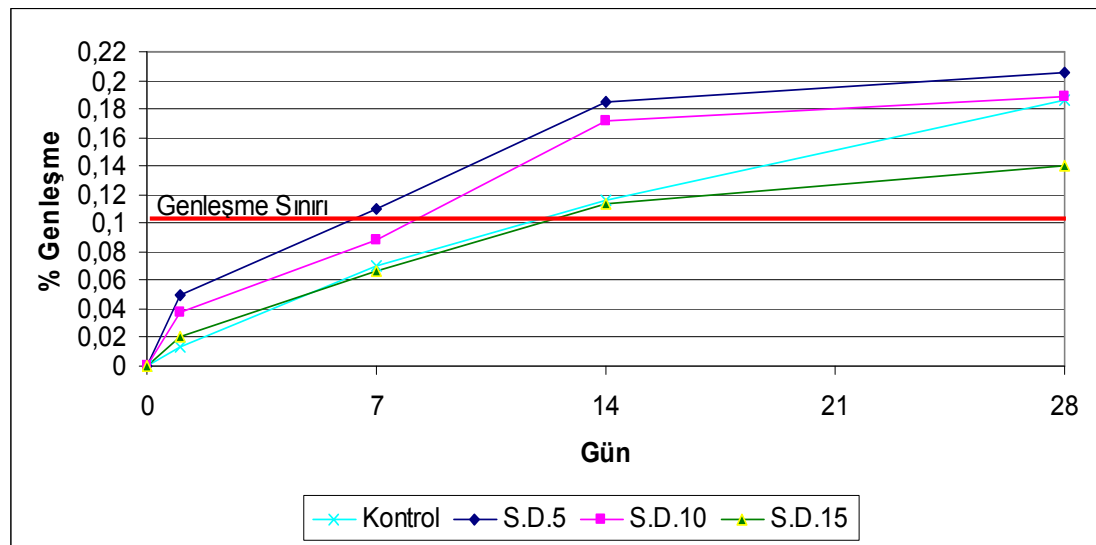
Tablo 5.10 Metakaolin ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 41 (Azalma)
%10	% 67 (Azalma)
%15	% 87 (Azalma)

5.2.1.1.6 Silis Dumanı İkamesi. Çimento yerine silis dumanı ikame edilmesi sonucunda AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.11’de gösterilmiştir. Şekil 5.18’de AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir.

Tablo 5.11 Silis Dumanı ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	0,013	0,070	0,116	0,186
%5	0,049	0,109	0,185	0,206
%10	0,038	0,089	0,172	0,189
%15	0,021	0,066	0,113	0,140



Şekil 5.18 Çimento yerine silis dumanı ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Yüksek dozda kullanılan silis dumanının, çimentodaki alkalilerle reaksiyona girerek kendi başına bir Alkali-Silika reaksiyonuna yol açtığı bilinmektedir (Aitcin ve diğ., 1986). Silis dumanının kendi başına Alkali-Silika Reaksiyonuna yol açmaması için ikame oranı %15 ile sınırlı tutulmuştur. Şekil 5.18'den de görülebileceği gibi genleşmeler azalmasına rağmen reaktivite sınırının altına geçmemişlerdir. Ayrıca %5 Silis dumanı ikame edilmesi durumunda, kontrole kıyasla daha büyük bir genleşme görülmüştür. Bu durum, kötümser oran teorisi ile açıklanabilir.

Tablo 5.12'de, Silis dumanı ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

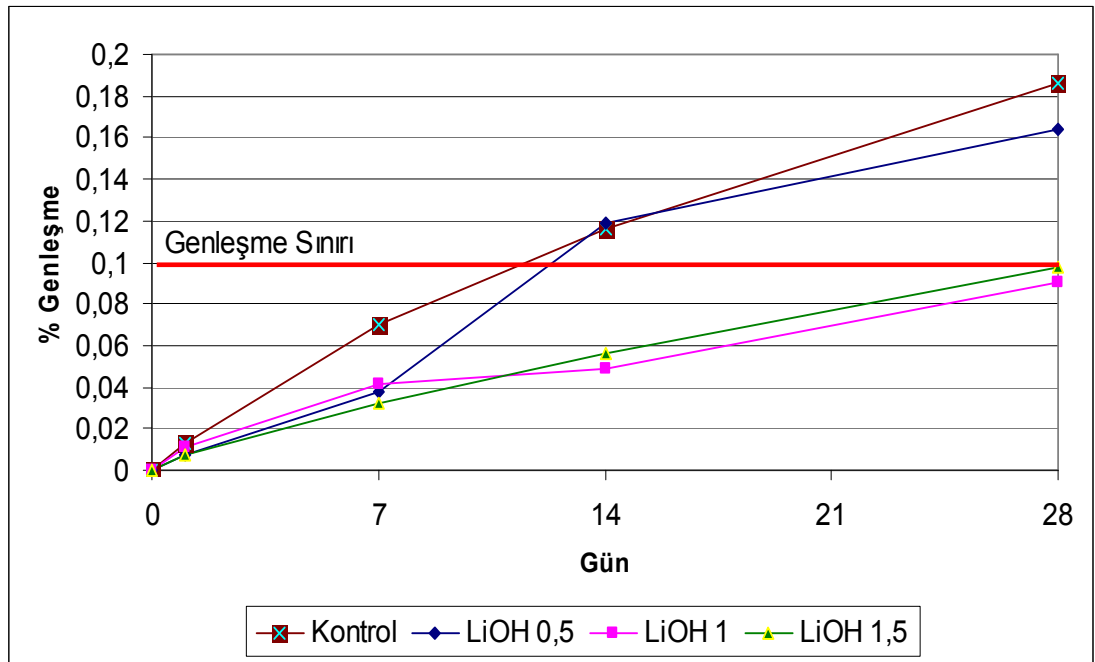
Tablo 5.12 Silis dumanı ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 10 (Artış)
%10	% 1 (Artış)
%15	% 24 (Azalma)

5.2.1.1.7 Lityum Hidroksit İkamesi. Hazırlanan örneklere lityum hidroksit katılması sonucunda AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.13'de gösterilmiştir. Şekil 5.19'da ise AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Lityum hidroksit katılması ile genleşmeler ilk olarak azalmıştır. %1 katılma oranından itibaren genleşmeler sınırın altına inmiştir.

Tablo 5.13 Lityum hidroksit katılması AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	0,013	0,070	0,116	0,186
%0,5	0,008	0,038	0,119	0,164
%1,0	0,011	0,042	0,049	0,091
%1,5	0,008	0,032	0,057	0,098



Şekil 5.19 Lityum hidroksit katılması sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.14’de, lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

Tablo 5.14 Lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

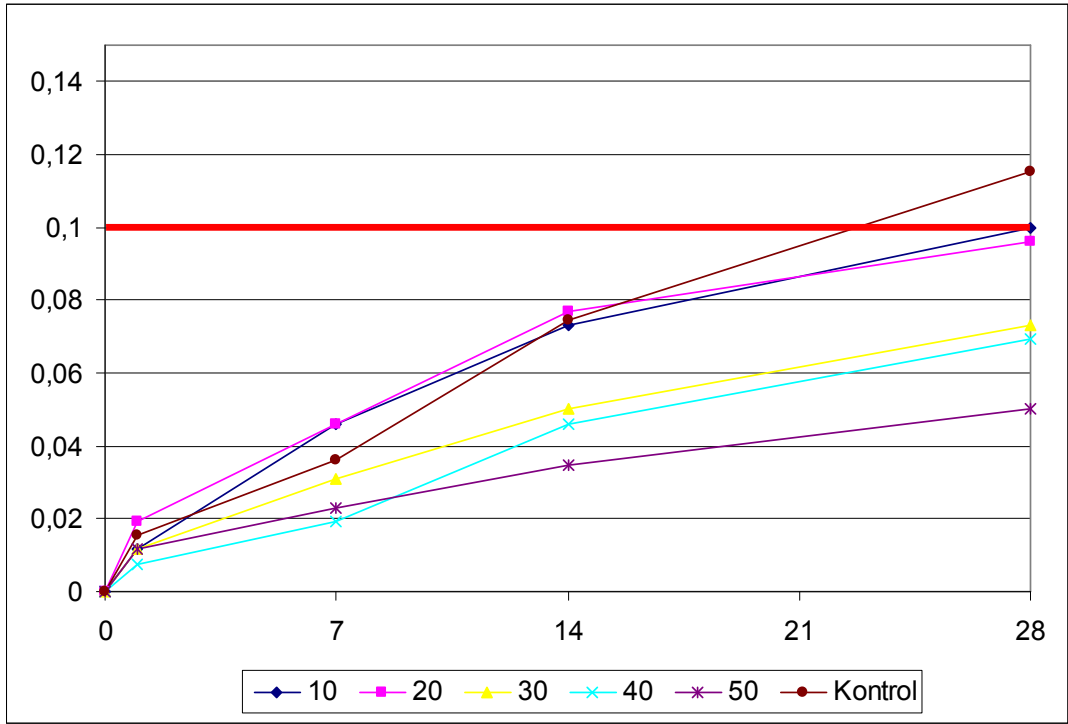
	Genleşmedeki Değişim (%)
% 0,5	% 12 (Azalma)
% 1,0	% 51 (Azalma)
% 1,5	% 47 (Azalma)

5.2.1.2 AAR5 Yöntemine Uygun Yürütülen Deneyler

5.2.1.2.1 Uçucu Kül İkamesi. Çimento yerine uçucu kül ikame edilmesi sonucunda AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.15’de gösterilmiştir. Şekil 5.20’de AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Uçucu kül ikamesi, genleşmeleri önlemede etkili olmuştur. İkame oranının artması ile genleşmeler azalmıştır ve en düşük genleşme değeri %50 ikame oranında elde edilmiştir. %20 uçucu kül ikamesi ile genleşme değerleri sınırın altına düşmüştür.

Tablo 5.15 Uçucu kül ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,015	% 0,036	% 0,074	% 0,115
%10	% 0,012	% 0,046	% 0,073	% 0,100
%20	% 0,019	% 0,046	% 0,077	% 0,096
%30	% 0,012	% 0,031	% 0,050	% 0,073
%40	% 0,008	% 0,019	% 0,046	% 0,069
%50	% 0,012	% 0,023	% 0,035	% 0,050



Şekil 5.20 Çimento yerine uçucu kül ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Yürütülen deneyler sonucunda Zonguldak agregası kullanılarak hazırlanan örneklerdeki genişlemenin, uçucu kül miktarının artmasıyla azaldığı belirlenmiştir. Tablo 5.16'da, uçucu kül ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genişmelerin kontrol karışımının genişmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

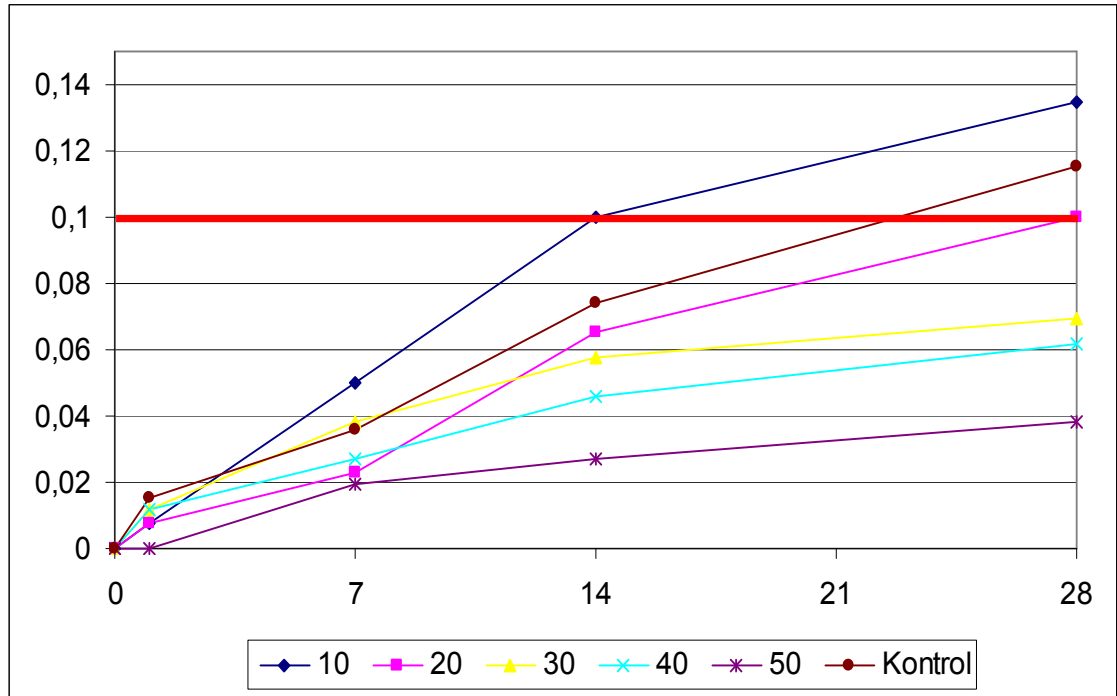
Tablo 5.16 Uçucu Kül ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genişmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 13 (Azalma)
%20	% 16 (Azalma)
%30	% 36 (Azalma)
%40	% 40 (Azalma)
%50	% 56 (Azalma)

5.2.1.2.2 *Yüksek Fırın Curufu İkamesi*. Çimento yerine yüksek fırın curufu ikame edilmesi sonucunda AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.17’de gösterilmiştir. Şekil 5.21’de AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Yüksek fırın curufunun %30 ikame oranında itibaren genleşmeler reaktivite sınırının altına gerilemiştir.

Tablo 5.17 Yüksek fırın curufu ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,015	% 0,036	% 0,074	% 0,115
%10	% 0,008	% 0,050	% 0,100	% 0,135
%20	% 0,008	% 0,023	% 0,065	% 0,100
%30	% 0,012	% 0,038	% 0,058	% 0,069
%40	% 0,012	% 0,027	% 0,046	% 0,062
%50	% 0,000	% 0,019	% 0,027	% 0,038



Şekil 5.21 Çimento yerine yüksek fırın curufu ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

AAR2 yönteminde olduğu gibi, AAR5 yönteminde de %10 yüksek fırın curufu ikamesinde genleşmeler artarken diğer ikame oranları için genleşmeler azalmıştır. En düşük genleşme değeri ise %50 ikame oranında elde edilmiştir.

Tablo 5.18’de, yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

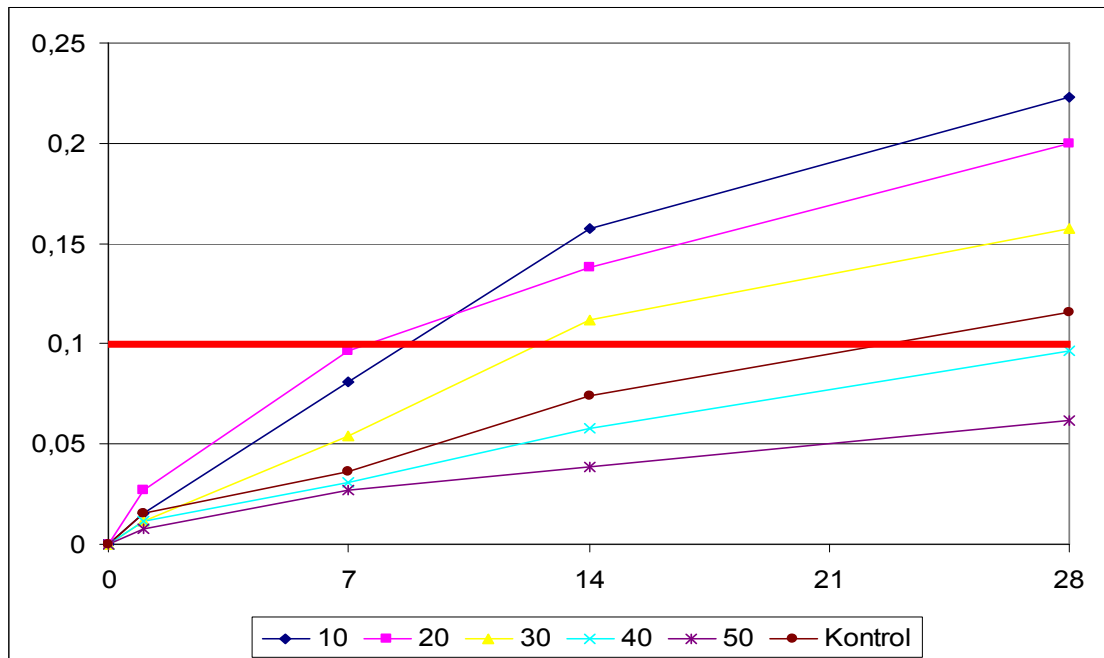
Tablo 5.18 Yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 16 (Artış)
%20	% 13 (Azalma)
%30	% 40 (Azalma)
%40	% 46 (Azalma)
%50	% 66 (Azalma)

5.2.1.2.3 İri (100 μ m-400 μ m Arası) Zeolit İkamesi. Çimento yerine iri zeolit ikame edilmesi sonucunda AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.19’da gösterilmiştir. Şekil 5.22’de AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. iri zeolit ikame edilmesi durumunda genleşmeler önce artmıştır. Sadece %40 ve %50 oranlarında genleşmeler azalmıştır ve sınırın altına düşmüştür.

Tablo 5.19 İri zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,015	% 0,036	% 0,074	% 0,115
%10	% 0,015	% 0,081	% 0,158	% 0,223
%20	% 0,027	% 0,096	% 0,138	% 0,200
%30	% 0,012	% 0,054	% 0,112	% 0,158
%40	% 0,012	% 0,031	% 0,058	% 0,096
%50	% 0,008	% 0,027	% 0,038	% 0,062



Şekil 5.22 Çimento yerine iri zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.20’de, iri zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

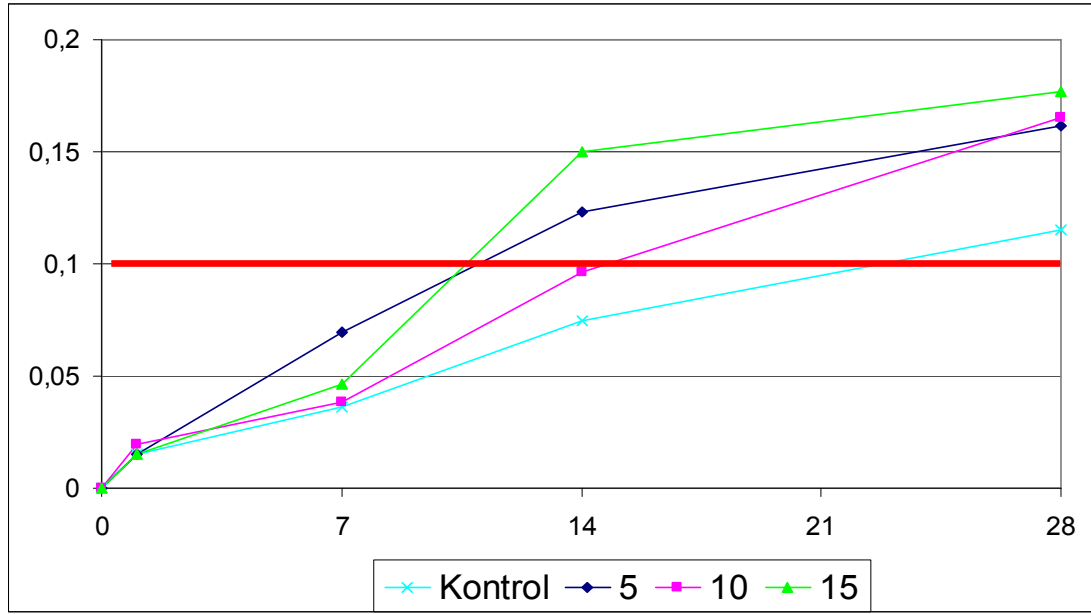
Tablo 5.20 İri zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 93 (Artış)
%20	% 73 (Artış)
%30	% 36 (Artış)
%40	% 16 (Azalma)
%50	% 46 (Azalma)

5.2.1.2.4 *İnce (100 μ m Altı) Zeolit İkamesi.* Çimento yerine ince zeolit ikame edilmesi sonucunda AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.21’de gösterilmiştir. Şekil 5.23’de AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. İnce zeolit ikame edilmesi sonucunda genleşmelerin arttığı gözlenmiştir.

Tablo 5.21 İnce zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,015	% 0,036	% 0,074	% 0,115
%5	% 0,015	% 0,069	% 0,123	% 0,162
%10	% 0,019	% 0,038	% 0,096	% 0,165
%15	% 0,015	% 0,046	% 0,150	% 0,177



Şekil 5.23 Çimento yerine ince zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.22’de, ince zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

Tablo 5.22 İnce zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

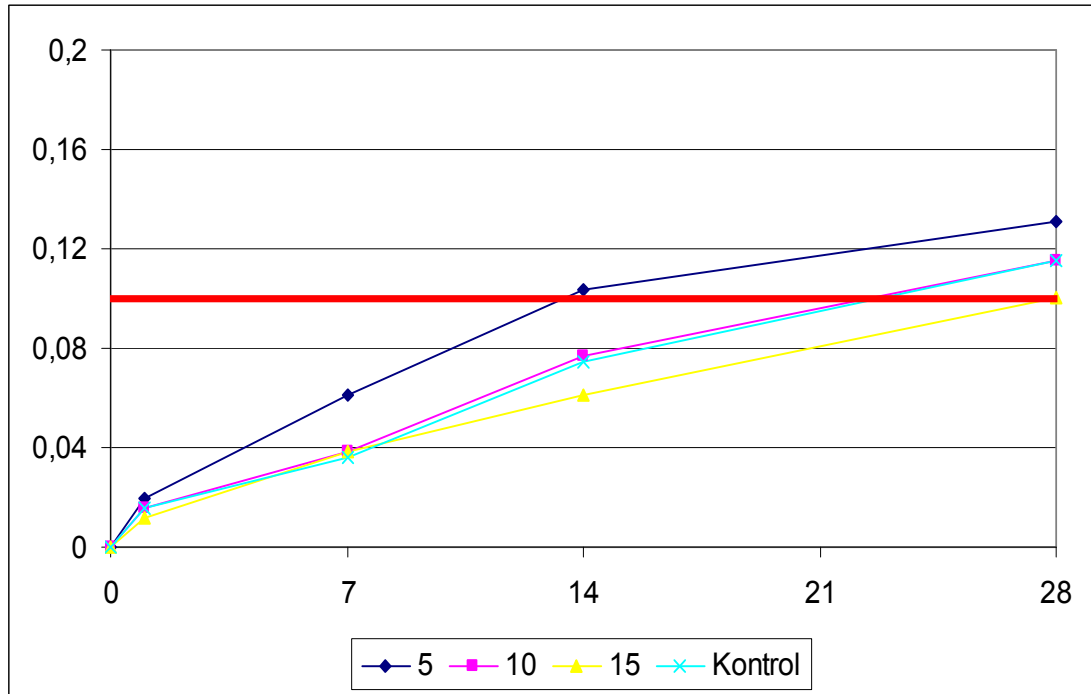
	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 40 (Artış)
%10	% 43 (Artış)
%15	% 53 (Artış)

5.2.1.2.5 *Metakaolin İkamesi.* Çimento yerine metakaolin ikame edilmesi sonucunda AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.23’de gösterilmiştir. Şekil 5.24’de AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Metakaolinin %5 ikame oranında genleşmeler artmıştır. Diğer ikame oranlarında genleşmeler azalmaya başlamıştır ve %15 ikame oranında reaktivite sınırına

gerilemiştir.

Tablo 5.23 Metakaolin ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,015	% 0,036	% 0,074	% 0,115
%5	% 0,019	% 0,062	% 0,104	% 0,131
%10	% 0,015	% 0,038	% 0,077	% 0,115
%15	% 0,012	% 0,038	% 0,062	% 0,100



Şekil 5.24 Çimento yerine metakaolin ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.24’de, Metakaolin ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

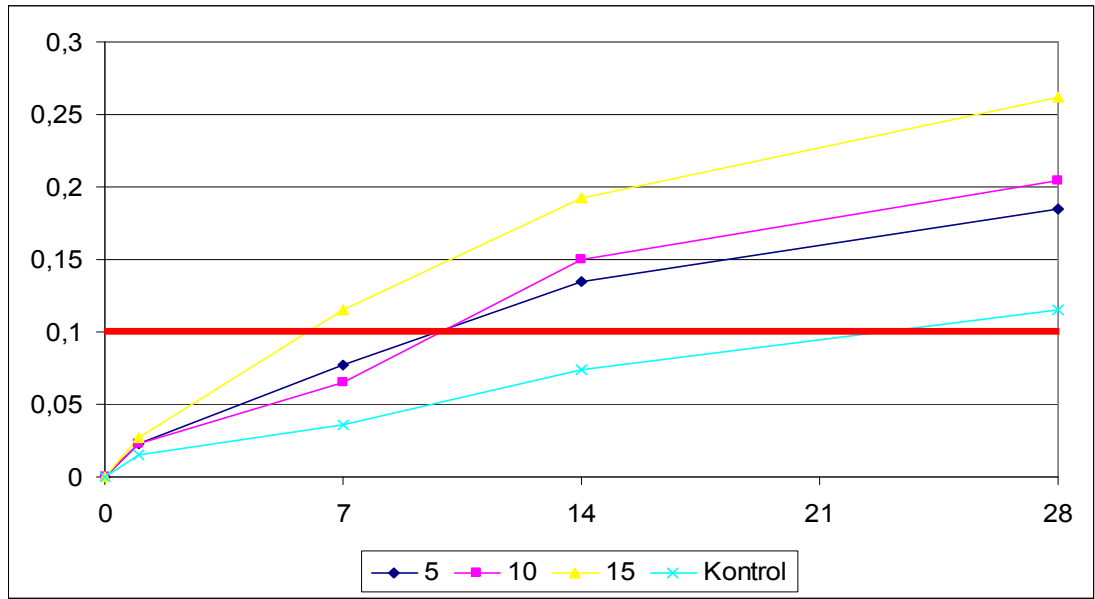
Tablo 5.24 Metakaolin ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 13 (Artış)
%10	% 0
%15	% 13 (Azalma)

5.2.1.2.6 *Silis Dumanı İkamesi*. Çimento yerine silis dumanı ikame edilmesi sonucunda AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.25’de gösterilmiştir. Şekil 5.25’de AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir.

Tablo 5.25 Silis Dumanı ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,015	% 0,036	% 0,074	% 0,115
%5	% 0,023	% 0,077	% 0,135	% 0,185
%10	% 0,023	% 0,065	% 0,150	% 0,204
%15	% 0,027	% 0,115	% 0,192	% 0,262



Şekil 5.25 Çimento yerine silis dumanı ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Silis dumanının kendi başına Alkali-Silika Reaksiyonuna yol açmaması için ikame oranı %15 ile sınırlı tutulmuştur. Buna rağmen Şekil 5.26’dan da görülebileceği gibi silis dumanının ikame oranının artmasıyla genişmeler de artmıştır. En yüksek genişleme değeri ise en yüksek ikame oranında elde edilmiştir.

Tablo 5.26'da, Silis dumanı ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

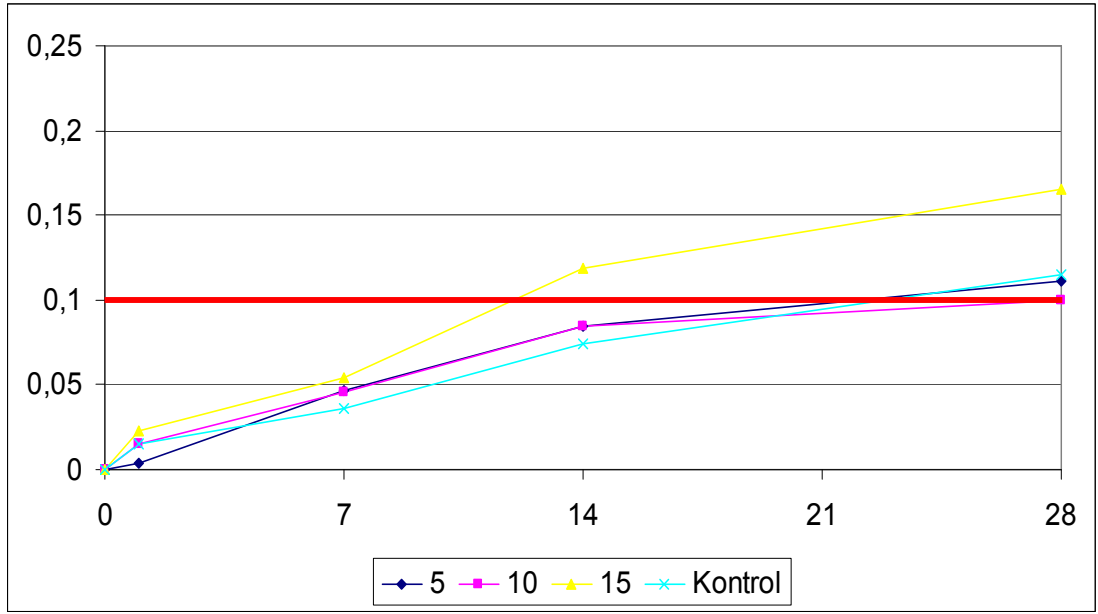
Tablo 5.26 Silis dumanı ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 60 (Artış)
%10	% 76 (Artış)
%15	% 126 (Artış)

5.2.1.2.7 Lityum Hidroksit İkamesi. Hazırlanan örnekler lityum hidroksit katılması sonucunda AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.27'de gösterilmiştir. Şekil 5.26'da ise AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. AAR5 yönteminde hazırlanan örnekler lityum hidroksit katılması ile genleşmeler reaktivite sınırının altına düşmemiştir. En düşük genleşme değeri ise %1 kullanım oranında, reaktivite sınırı olan %0,1 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.27 Lityum hidroksit katılması AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	0,013	0,070	0,116	0,186
%0,5	0,004	0,046	0,085	0,112
%1,0	0,015	0,046	0,085	0,100
%1,5	0,023	0,054	0,119	0,165



Şekil 5.26 Lityum hidroksit katılması sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.28’de, lityum hidroksit katılması ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

Tablo 5.28 Lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

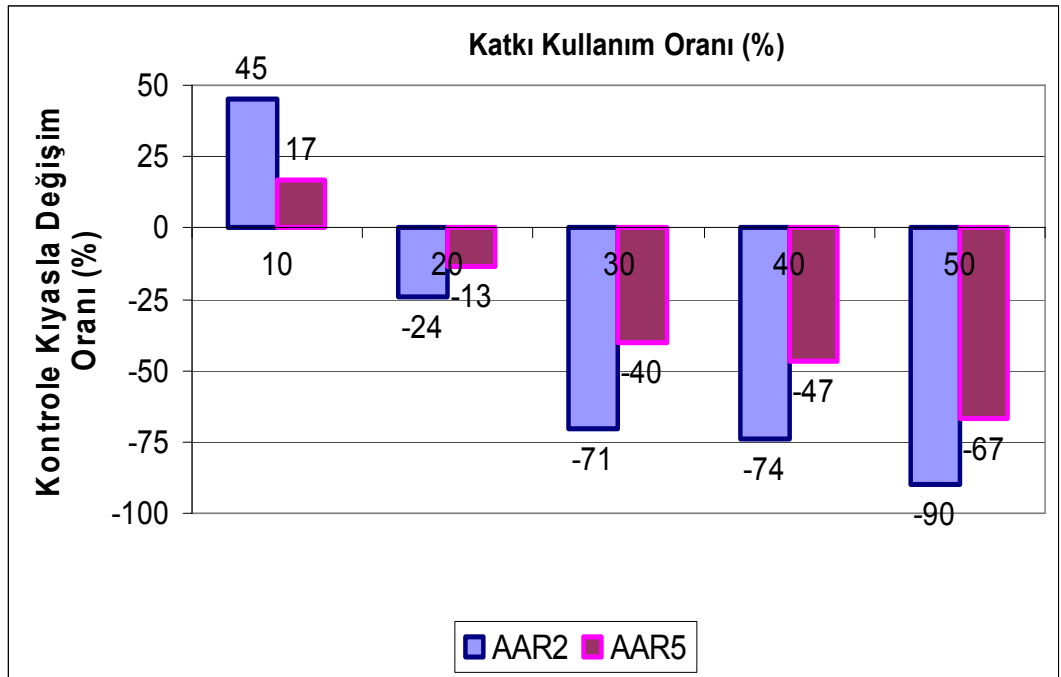
	Genleşmedeki Değişim (%)
% 0,5	% 3 (Azalma)
% 1,0	% 13 (Azalma)
% 1,5	% 43 (Artış)

Günümüzde birçok araştırmacı ACR’nin tek başına gelişmediğini, mutlaka ASR ile birlikte geliştiğini ifade etmektedir (Katayama, 2004, Grattan-Bellew ve diğ., 2008). Silis dumanının ACR üzerindeki etkisi konusunda çelişkili sonuçlar mevcuttur. Örneğin Durand ve diğ tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, dolomitik kireçtaşı içeren örneklere katılan %5, %10 ve %15 oranlarındaki silis dumanı, genleşmeyi sırasıyla %40, %48 ve %54 azalttığı görülmüştür (Durand ve diğ., 1987). Diğer taraftan ise Soles ve diğ., yaptıkları çalışmalar sonucunda, silis dumanının dolomit agregası içeren örnekler üzerinde, %15 ikame oranında bile

belirgin bir etki yapmadığı sonucuna varmışlardır (Soles ve diğ., 1987). Tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda çok ince silisin reaktif karbonat agregasına katılmasının, reaksiyonu önlemek yerine tetiklediği görülmektedir.

Şekil 5.27-5.33'de iki farklı deney yöntemi için, mineral ve kimyasal katkıların genleşmeyi kontrol karışımına kıyasla azaltma yüzdelerinin grafikleri gösterilmiştir.

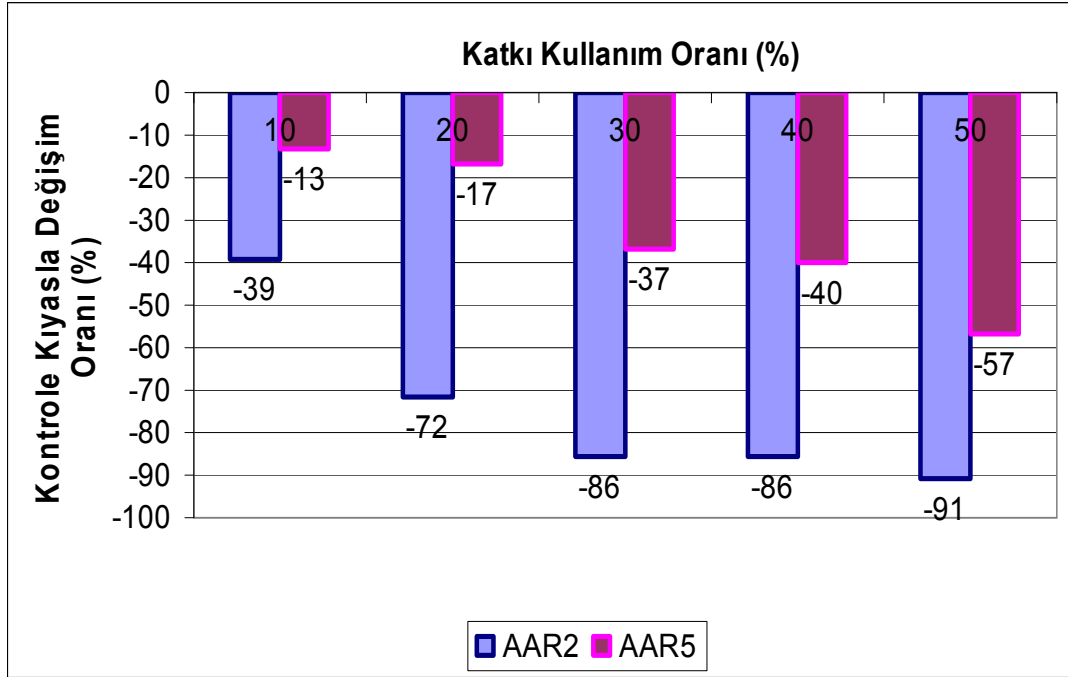
Şekil 5.27'de yüksek fırın curufu içeren örnekler için kontrole kıyasla genleşme değişimleri gösterilmiştir. %10 kullanım oranında genleşmeler iki deneyde de artmıştır. Burada yüksek fırın curufunun kötümser etki yaptığı düşünülebilir. Diğer kullanım oranlarında ise genleşmeler azalmıştır ve en düşük genleşme değeri her iki deney yönteminde de %50 ikame oranında elde edilmiştir.



Şekil 5.27 Yüksek fırın curufu ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi

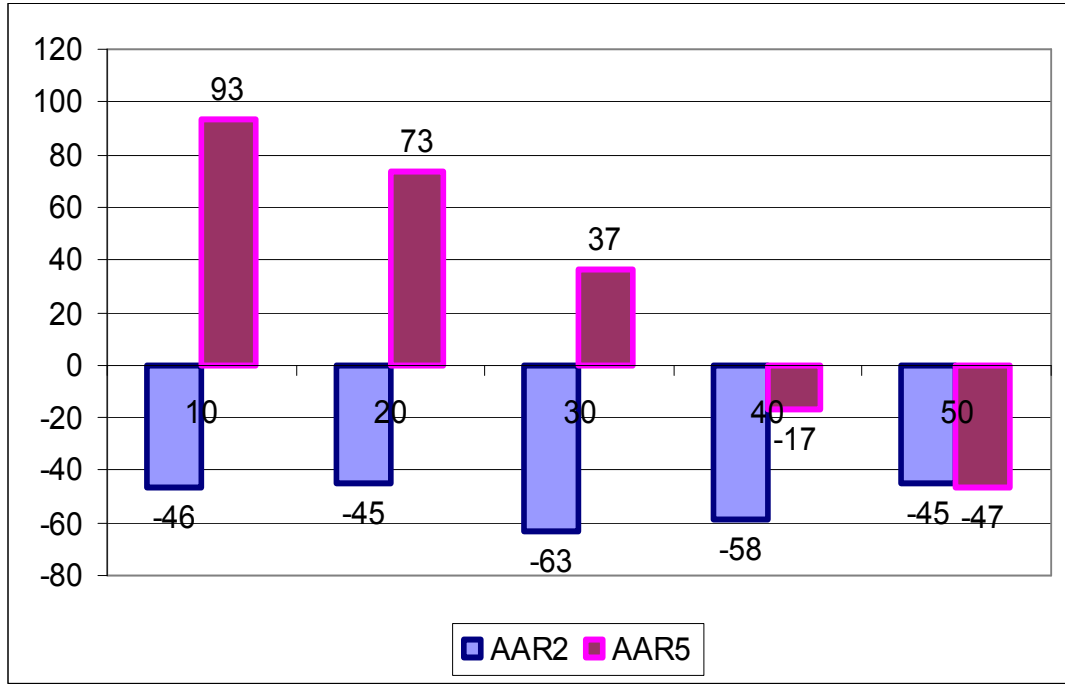
Şekil 5.28'de uçucu kül içeren örnekler için kontrole kıyasla genleşme değişimleri gösterilmiştir. Uçucu kül ikame edilmesi durumunda, ikame oranının artmasıyla genleşmeler azalmıştır. En düşük genleşme değeri genleşme değeri, her iki deney

yönteminde de %50 ikame oranında elde edilmiştir.



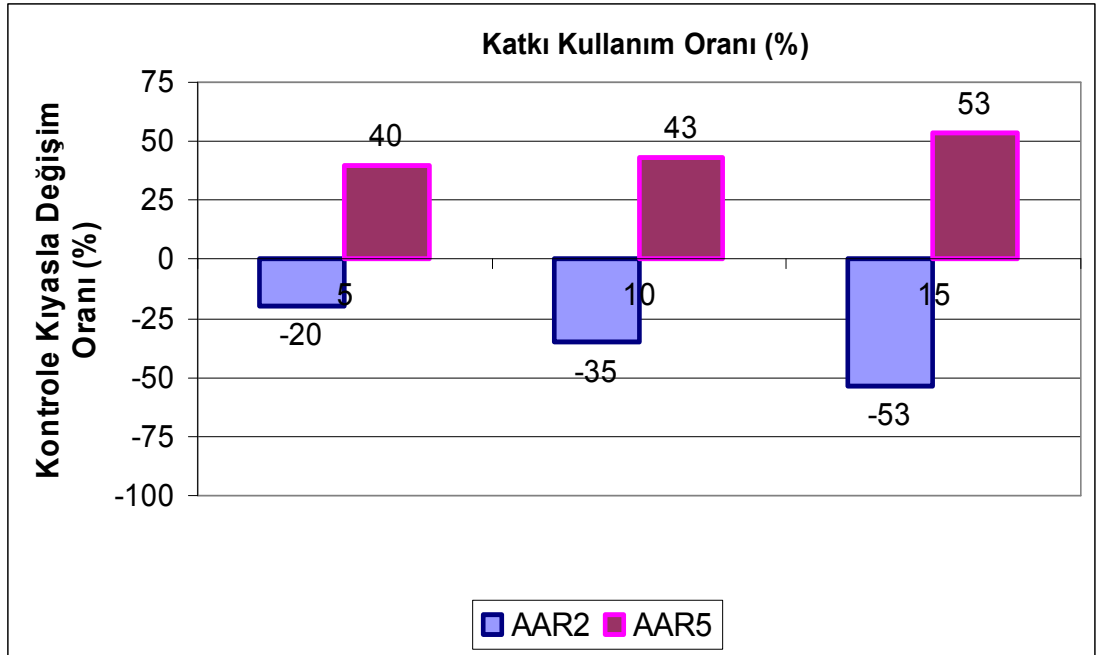
Şekil 5.28 Uçucu kül ikamesi durumunda genişmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genişmesine kıyasla değişimi

Şekil 5.29'da iri zeolit ikame edilmesi durumunda genişmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. AAR2 yönteminde, tüm ikame oranları için genişmeler kontrole kıyasla azalmıştır. AAR5 yönteminde ise genişmeler önce artmıştır ve ilk üç ikame oranında kontrolden daha fazla genişme değerleri görülmüştür. Sadece %40 ve %50 ikame oranları için genişmeler kontrolden daha az çıkmıştır. %30 ikame oranına kadar AAR2 ve AAR5 yöntemleri çelişkili sonuçlar vermiştir. Bu sonuçların, deneyler tekrar yapılarak teyit edilmesi gerektiği düşünülmektedir.



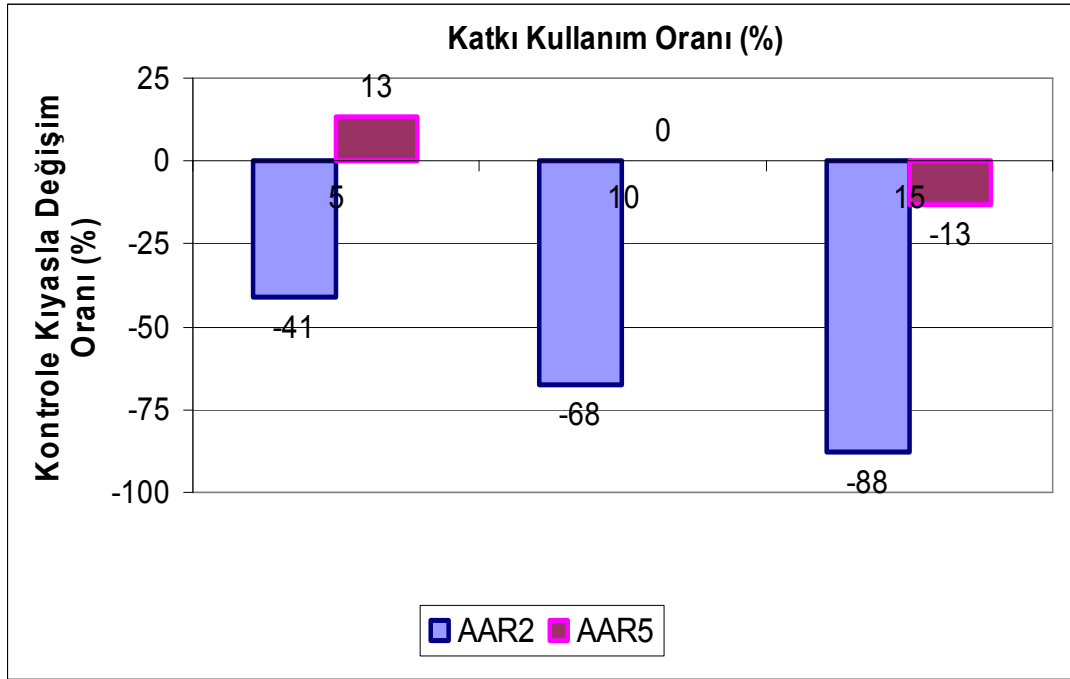
Şekil 5.29 İri zeolit ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi

Şekil 5.30'da ince zeolit ikame edilmesi durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. AAR2 yönteminde genleşmeler kontrolden az çıkmıştır fakat AAR5 yönteminde ince zeolit kullanılması ile genleşmeler kontrolden fazla bulunmuştur. AAR2 ve AAR5 yöntemlerinde çelişkili sonuçlar çıkması durumu, iri zeolit için olduğu gibi ince zeolit için de geçerlidir. Her iki deneyin tekrar edilmesinde fayda vardır.



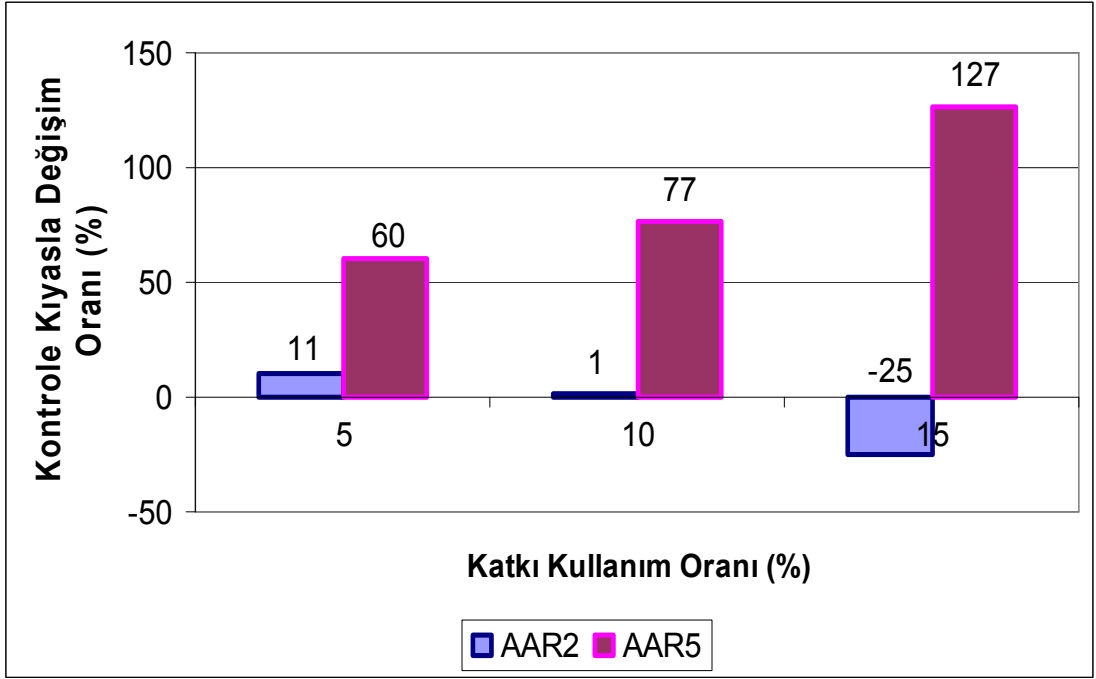
Şekil 5.30 İnce zeolit ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi

Şekil 5.31’de metakaolin ikame edilmesi durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. Metakaolin AAR2 yöntemindeki genleşmeyi engellemede en etkili katkılardan biridir fakat AAR5 yönteminde sadece %15 ikame oranında kontrolden düşük genleşme değerleri elde edilmiştir.



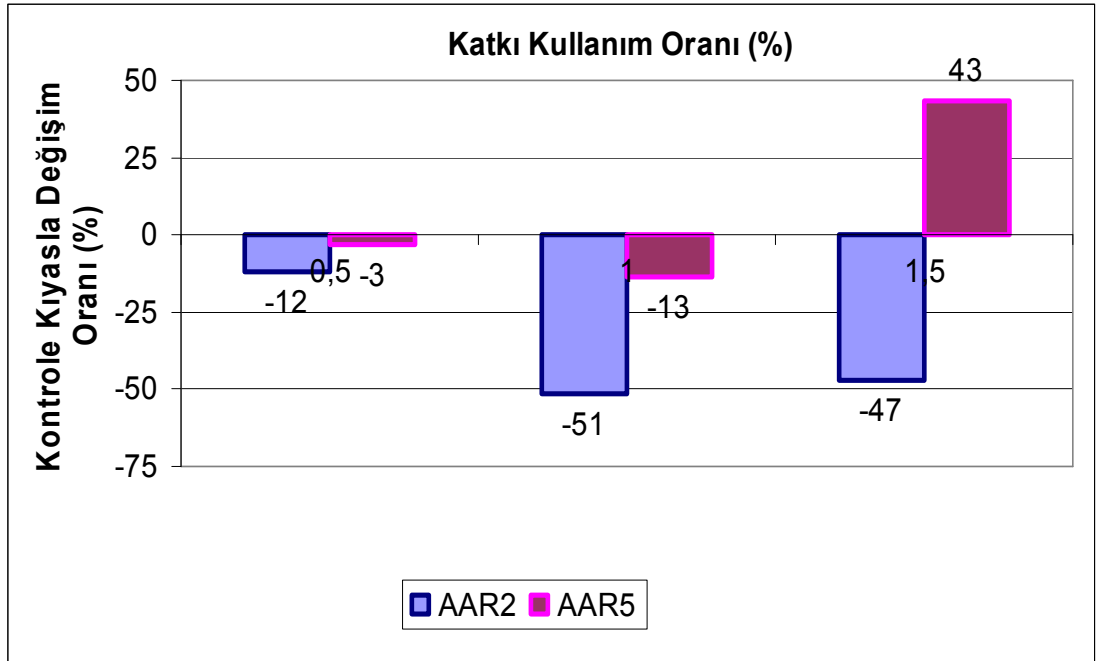
Şekil 5.31 Metakaolin ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi

Şekil 5.32’de silis dumanı ikame edilmesi durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. Silis dumanı, AAR2 yönteminde de AAR5 yönteminde de genleşmeyi önlemede etkili olamamıştır. AAR5 yönteminde ikame oranı arttıkça genleşmelerde artmıştır.



Şekil 5.32 Silis dumanı ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi

Şekil 5.33’de lityum hidroksit kullanılması durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. AAR2 yönteminde bütün kullanım oranlarında genleşmeler kontrolden düşük çıkmıştır ve en düşük genleşme değeri %1 kullanım oranında elde edilmiştir. AAR5 yönteminde ise %1,5 kullanım oranında genleşme değeri kontrolden fazla çıkmıştır.



Şekil 5.33 Lityum hidroksit kullanılması durumunda genişmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi

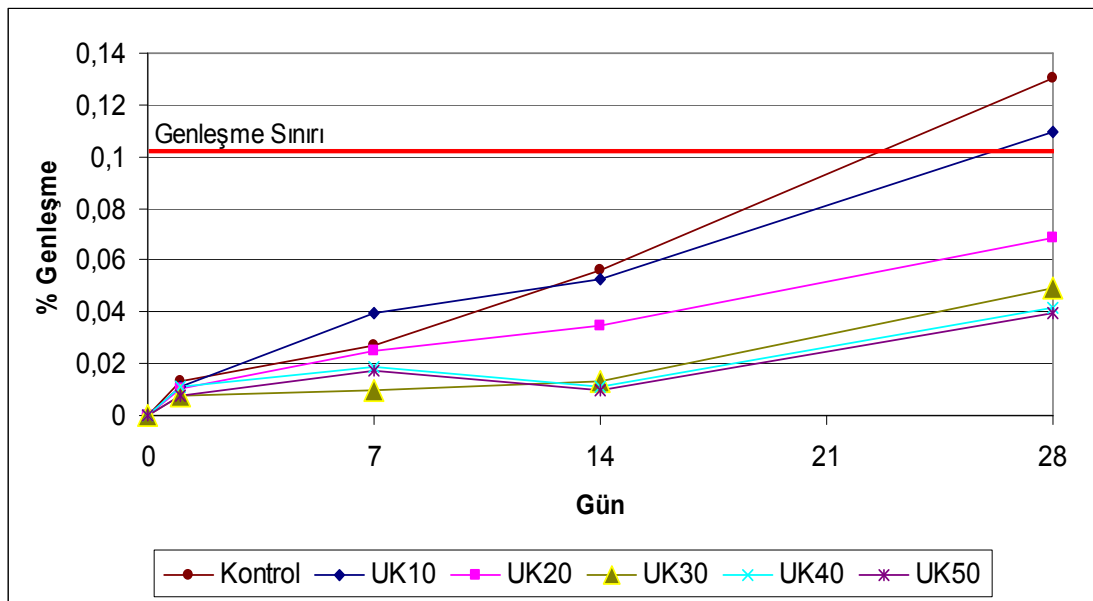
5.2.2 Kanada Agregası İle Yapılan Deneyler

5.2.2.1 AAR2 Yöntemine Uygun Yürütülen Deneyler

5.2.2.1.1 *Uçucu Kül İkamesi.* Uçucu kül, %10 ile %50 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.29’da, uçucu kül ikamesi ile elde edilen genişmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.34’de ise bu genişmelerin zaman göre değişimleri gösterilmiştir. Tablodan görüleceği üzere uçucu kül ikame oranı arttıkça genişmeler azalmaktadır. Çimento yerine %20 uçucu kül kullanımından itibaren genişmeler limitin altına düşmektedir.

Tablo 5.29 Uçucu Kül ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,027	% 0,056	% 0,130
%10	% 0,011	% 0,040	% 0,053	% 0,109
%20	% 0,010	% 0,025	% 0,035	% 0,069
%30	% 0,008	% 0,009	% 0,013	% 0,049
%40	% 0,011	% 0,019	% 0,011	% 0,042
%50	% 0,008	% 0,017	% 0,009	% 0,040



Şekil 5.34 Uçucu Kül ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.30'da, uçucu kül ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

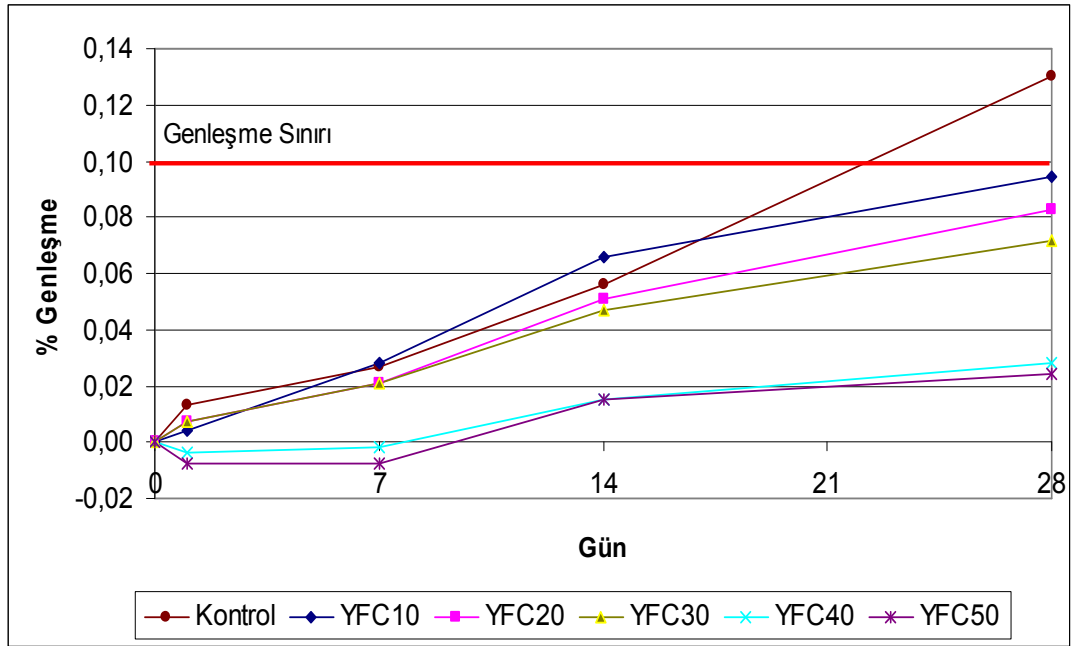
Tablo 5.30 Uçucu kül ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 15 (Azalma)
%20	% 47 (Azalma)
%30	% 62 (Azalma)
%40	% 68 (Azalma)
%50	% 69 (Azalma)

5.2.2.1.2 *Yüksek Fırın Curufu İkamesi*. Yüksek fırın curufu, %10 ile %50 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.31’de, yüksek fırın curufu ikamesi ile elde edilen genleşmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.35’de ise bu genleşmelerin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. Uçucu kül de gözlenen davranış yüksek fırın curufu için de geçerlidir. Tablo 5.31’den de görüleceği gibi ikame oranı arttıkça genleşme azalmaktadır. %10 yüksek fırın curufu kullanımından itibaren genleşmeler sınırın altına düşmektedir.

Tablo 5.31 Yüksek fırın curufu ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,027	% 0,056	% 0,130
%10	% 0,004	% 0,028	% 0,066	% 0,094
%20	% 0,008	% 0,021	% 0,051	% 0,083
%30	% 0,008	% 0,021	% 0,047	% 0,072
%40	% -0,004	% -0,002	% 0,015	% 0,028
%50	% -0,008	% -0,008	% 0,015	% 0,025



Şekil 5.35 Yüksek fırın curufu ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.32’de, yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

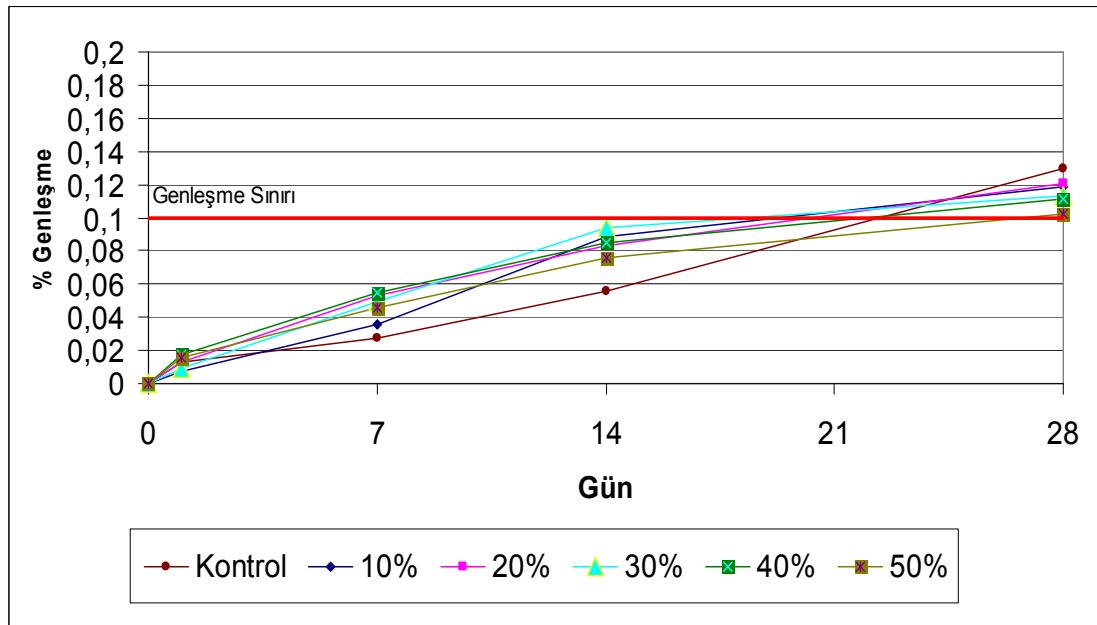
Tablo 5.32 Yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 27 (Azalma)
%20	% 36 (Azalma)
%30	% 44 (Azalma)
%40	% 78 (Azalma)
%50	% 81 (Azalma)

5.2.2.1.3 İri ($100\mu\text{m}-400\mu\text{m}$ Arası) Zeolit İkamesi. Çimento yerine iri zeolit ikame edilmesi sonucunda AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.33’de gösterilmiştir. Şekil 5.36’da AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. İri zeolit ikame edilmesi durumunda genleşmeler önce kontrole kıyasla azalmıştır. %20 ikame oranında biraz artış olsa da tüm değerler kontrol genleşmesinin altındadır. Fakat hiçbir ikame oranında genleşmeler reaktivite sınırının altına gerilememiştir.

Tablo 5.33 İri zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,027	% 0,056	% 0,130
%10	% 0,008	% 0,036	% 0,089	% 0,119
%20	% 0,013	% 0,053	% 0,083	% 0,121
%30	% 0,009	% 0,049	% 0,094	% 0,113
%40	% 0,017	% 0,055	% 0,085	% 0,111
%50	% 0,015	% 0,045	% 0,075	% 0,102



Şekil 5.36 Çimento yerine iri zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.34’de, iri zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

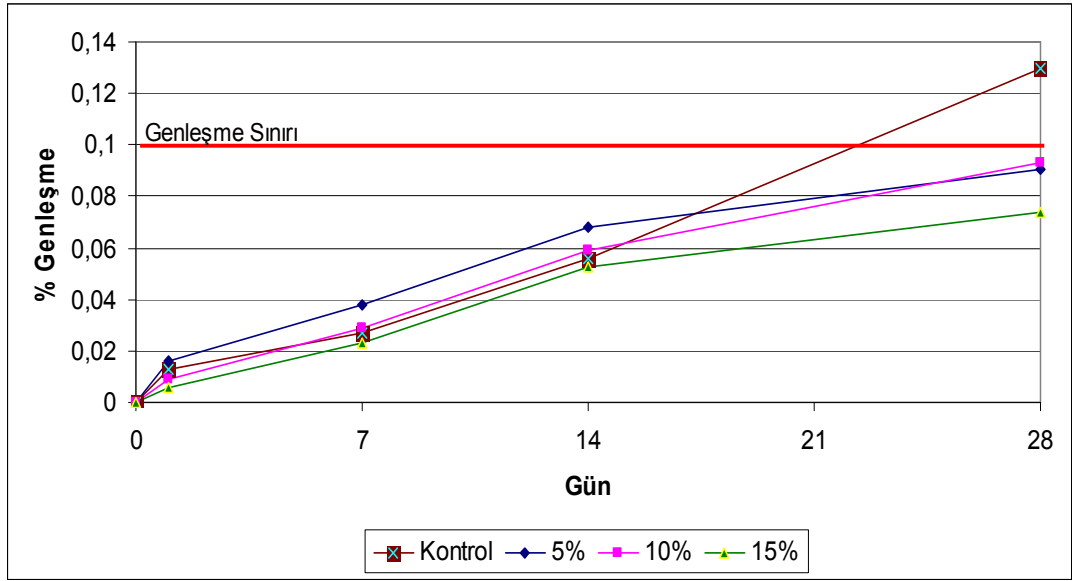
Tablo 5.34 İri zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 93 (Artış)
%20	% 73 (Artış)
%30	% 36 (Artış)
%40	% 16 (Azalma)
%50	% 46 (Azalma)

5.2.2.1.4 *İnce (100 μ m Altı) Zeolit İkamesi.* İnce zeolit, %5 ile %15 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.35’de, ince zeolit ikamesi ile elde edilen genleşmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.37’de ise bu genleşmelerin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. %5 ve %10 ikame oranlarında genleşmeler çok yakın değerlerde kalmıştır. Genleşmedeki en büyük azalma ise %15 ikame oranında elde edilmiştir. Tüm ikame oranlarında genleşme değeri sınırın altında kalmıştır.

Tablo 5.35 İnce zeolit ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,027	% 0,056	% 0,130
%5	% 0,016	% 0,038	% 0,068	% 0,091
%10	% 0,009	% 0,029	% 0,059	% 0,093
%15	% 0,006	% 0,023	% 0,053	% 0,074



Şekil 5.37 İnce zeolit ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.36'da, ince zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

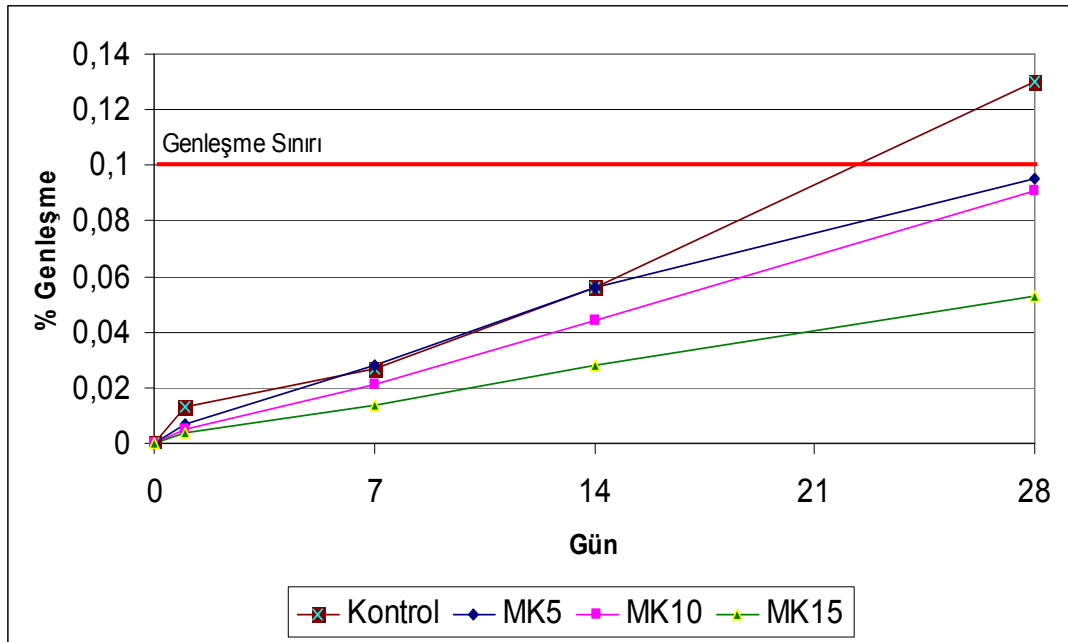
Tablo 5.36 İnce zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 30 (Azalma)
%10	% 28 (Azalma)
%15	% 43 (Azalma)

5.2.2.1.5 *Metakaolin İkamesi*. Metakaolin, %5 ile %15 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.37'de, metakaolin ikamesi ile elde edilen genleşmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.38'de ise bu genleşmelerin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. %5 ve %10 ikame oranlarında genleşmeler azalmakla birlikte sınıra çok yakın değerlerde kalmıştır. %15 ikame oranında ise genleşmede büyük bir düşüş gözlenmiştir.

Tablo 5.37 Metakaolin ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,027	% 0,056	% 0,130
%5	% 0,007	% 0,028	% 0,056	% 0,095
%10	% 0,005	% 0,021	% 0,044	% 0,091
%15	% 0,004	% 0,014	% 0,028	% 0,053



Şekil 5.38 Metakaolin ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.38'de, metakaolin ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

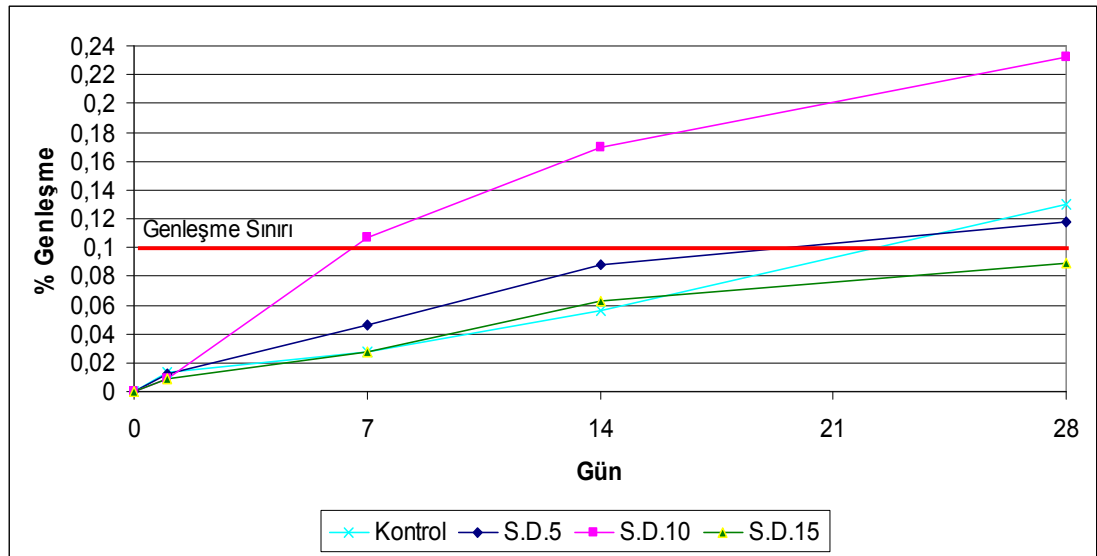
Tablo 5.38 Metakaolin ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 26 (Azalma)
%10	% 30 (Azalma)
%15	% 59 (Azalma)

5.2.2.1.6 *Silis Dumanı İkamesi*. Silis dumanı, %5 ile %15 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.39’da, silis dumanı ikamesi ile elde edilen genleşmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.39’da ise bu genleşmelerin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. Silis dumanının ikame edilmesi durumunda önce azalan genleşmeler, %10 ikame oranında artmıştır ve %15 oranında azalarak sınırın altına çekilmiştir.

Tablo 5.39 Silis Dumanı ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,013	% 0,027	% 0,056	% 0,130
%5	% 0,012	% 0,046	% 0,088	% 0,118
%10	% 0,009	% 0,107	% 0,170	% 0,232
%15	% 0,009	% 0,028	% 0,063	% 0,089



Şekil 5.39 Silis Dumanı ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.40’da, silis dumanı ikamesi ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

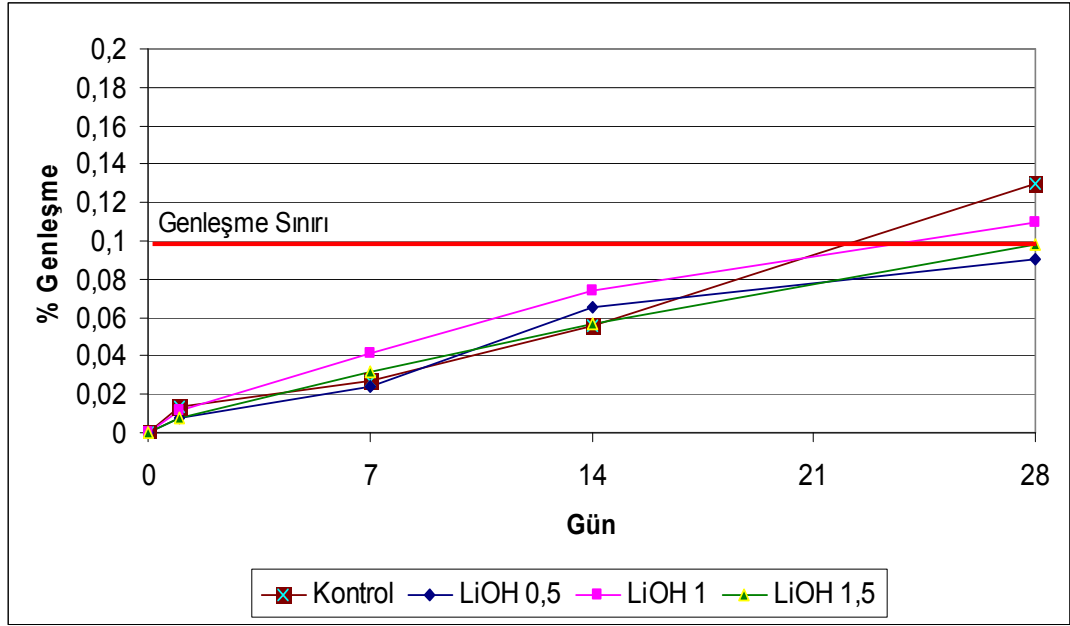
Tablo 5.40 Silis dumanı ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 9 (Azalma)
%10	% 78 (Artış)
%15	% 31 (Azalma)

5.2.2.1.7 *Lityum Hidroksit İkamesi.* Hazırlanan örnekler lityum hidroksit katılması sonucunda AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.41’de gösterilmiştir. Şekil 5.40’da ise AAR2 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Lityum hidroksit katılması ile genleşmeler ilk olarak azalmıştır. %0,5 ve %1,5 kullanım oranlarında genleşmeler sınırın altına düşmüştür fakat %1 kullanım oranında genleşmeler artarak sınırın üstüne çıkmıştır.

Tablo 5.41 Lityum hidroksit katılması AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	0,013	0,070	0,116	0,186
%0,5	0,008	0,024	0,065	0,090
%1,0	0,011	0,042	0,074	0,110
%1,5	0,008	0,032	0,057	0,098



Şekil 5.40 Lityum hidroksit katılması sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.42’de, lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

Tablo 5.42 Lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

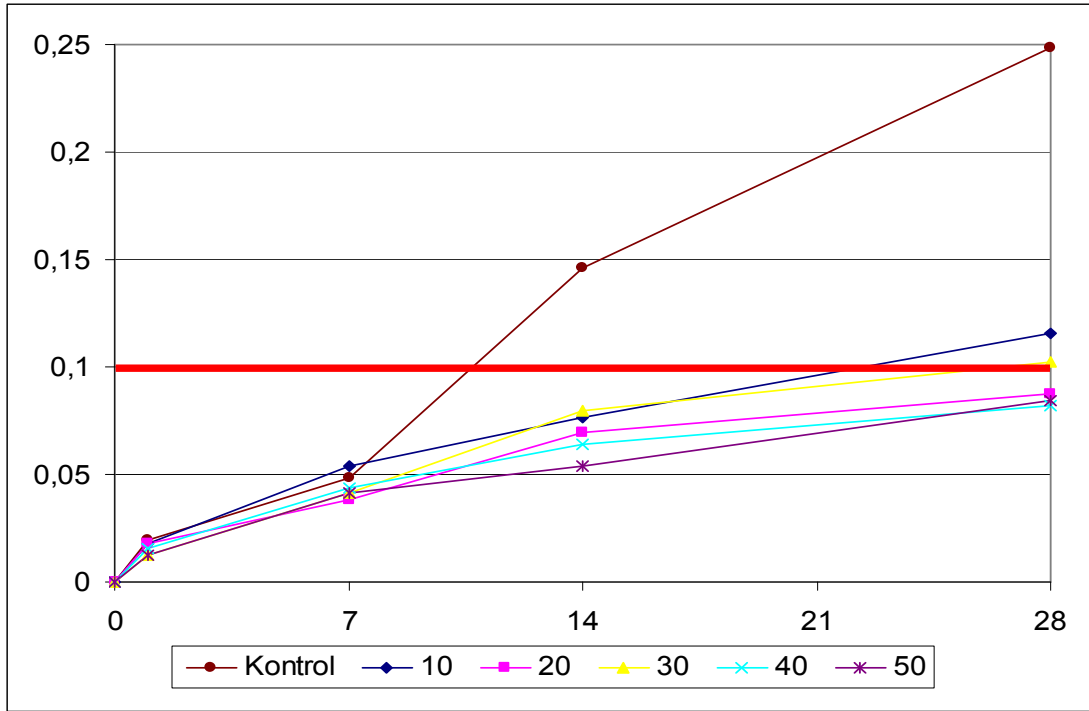
	Genleşmedeki Değişim (%)
% 0,5	% 31 (Azalma)
% 1,0	% 15 (Azalma)
% 1,5	% 25 (Azalma)

5.2.2.2 Kanada Agregası ile AAR5 Yöntemine Uygun Yürütülen Deneyler

5.2.2.2.1 *Uçucu Kül İkamesi.* Uçucu kül, %10 ile %50 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.43’de, uçucu kül ikamesi ile elde edilen genleşmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.41’de ise bu genleşmelerin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. Uçucu kül ikamesi ile birlikte genleşmeler azalmıştır ve genleşme sınırı çevresinde dalgalanmıştır. En yüksek genleşme %10 ikame oranında %0,115, en düşük genleşme ise %40 ikame oranında %0,082 olarak elde edilmiştir. Fakat %20 ve %50 ikame oranlarında da %40 ikame oranında elde edilen genleşme değerine çok yakın genleşme değerleri elde edilmiştir.

Tablo 5.43 Uçucu Kül ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,019	% 0,049	% 0,146	% 0,249
%10	% 0,018	% 0,054	% 0,077	% 0,115
%20	% 0,018	% 0,038	% 0,069	% 0,087
%30	% 0,013	% 0,041	% 0,079	% 0,103
%40	% 0,015	% 0,044	% 0,064	% 0,082
%50	% 0,013	% 0,041	% 0,054	% 0,085



Şekil 5.41 Uçucu Kül ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.44'de, uçucu kül ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

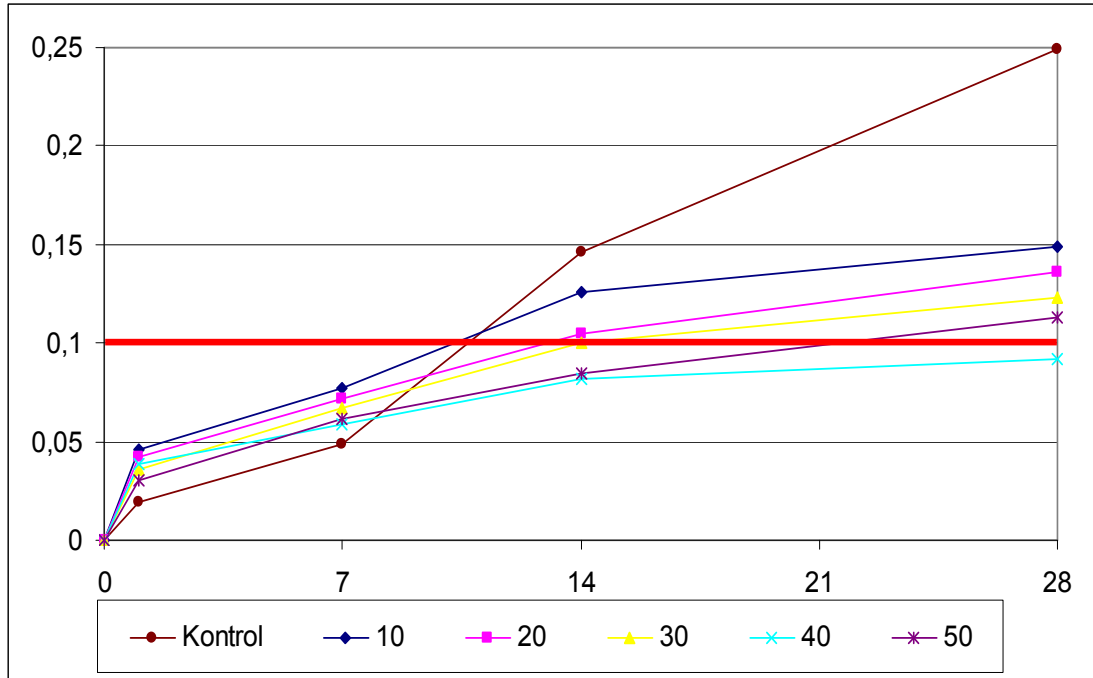
Tablo 5.44 Uçucu kül ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 53 (Azalma)
%20	% 64 (Azalma)
%30	% 58 (Azalma)
%40	% 67 (Azalma)
%50	% 65 (Azalma)

5.2.2.2.2 *Yüksek Fırın Curufu İkamesi.* Yüksek fırın curufu, %10 ile %50 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.45’de, yüksek fırın curufu ikamesi ile elde edilen genleşmelerin zamana göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.42’de ise bu genleşmelerin zaman göre değişimleri gösterilmiştir. Genleşme değerleri, yüksek fırın curufu ikamesinin %40’a kadar artmasıyla azalmıştır. Fakat %40’dan sonraki ikame oranında genleşme değeri artmıştır.

Tablo 5.45 Yüksek fırın curufu ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,019	% 0,049	% 0,146	% 0,249
%10	% 0,046	% 0,077	% 0,126	% 0,149
%20	% 0,043	% 0,072	% 0,105	% 0,136
%30	% 0,036	% 0,067	% 0,100	% 0,123
%40	% 0,038	% 0,059	% 0,082	% 0,092
%50	% 0,031	% 0,062	% 0,085	% 0,113



Şekil 5.42 Yüksek fırın curufu ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.46’da, yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

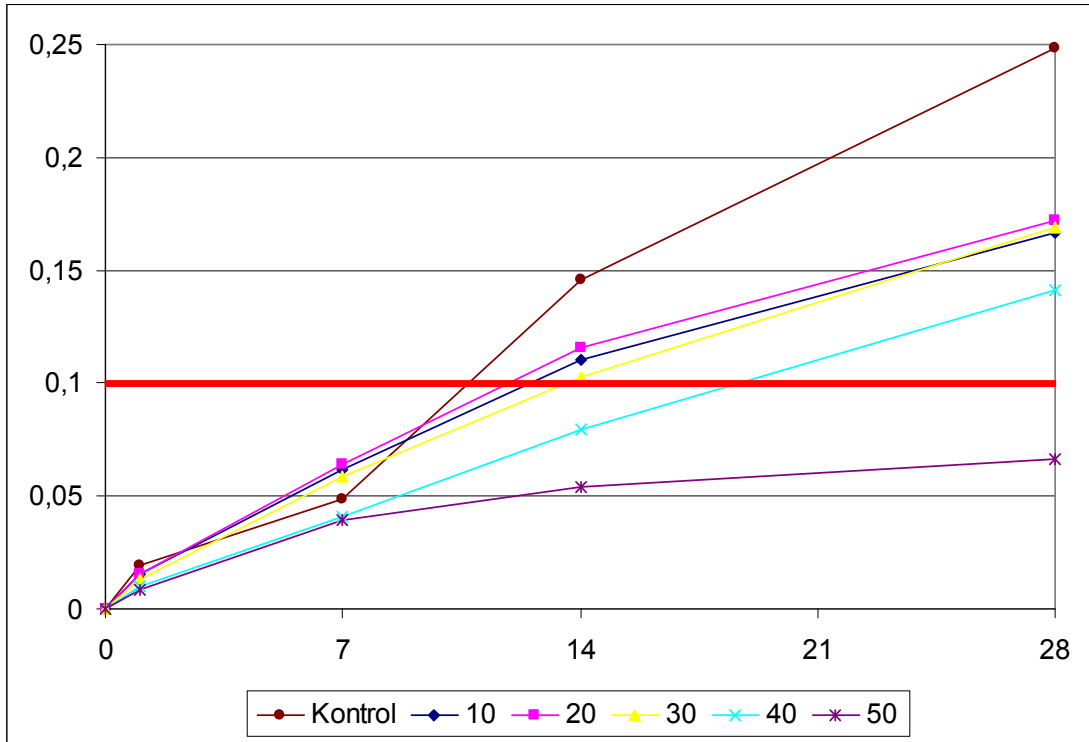
Tablo 5.46 Yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 40 (Azalma)
%20	% 45 (Azalma)
%30	% 50 (Azalma)
%40	% 62 (Azalma)
%50	% 54 (Azalma)

5.2.2.2.3 İri (100 μ m-400 μ m Arası) Zeolit İkamesi. İri zeolit, %10 ile %50 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.47’de, iri zeolit ikamesi ile elde edilen genleşmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.43’de ise bu genleşmelerin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. İri zeolit ikamesi ile genleşme değerleri azalmakla birlikte dalgalanmalar göstermiştir. Fakat %50 ikame oranı dışında genleşmeler sınırın altına inmemiştir.

Tablo 5.47 İri zeolit ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,019	% 0,049	% 0,146	% 0,249
%10	% 0,015	% 0,062	% 0,110	% 0,167
%20	% 0,015	% 0,064	% 0,115	% 0,172
%30	% 0,013	% 0,059	% 0,103	% 0,169
%40	% 0,010	% 0,041	% 0,079	% 0,141
%50	% 0,009	% 0,039	% 0,054	% 0,067



Şekil 5.43 İri zeolit ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.48'de, iri zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

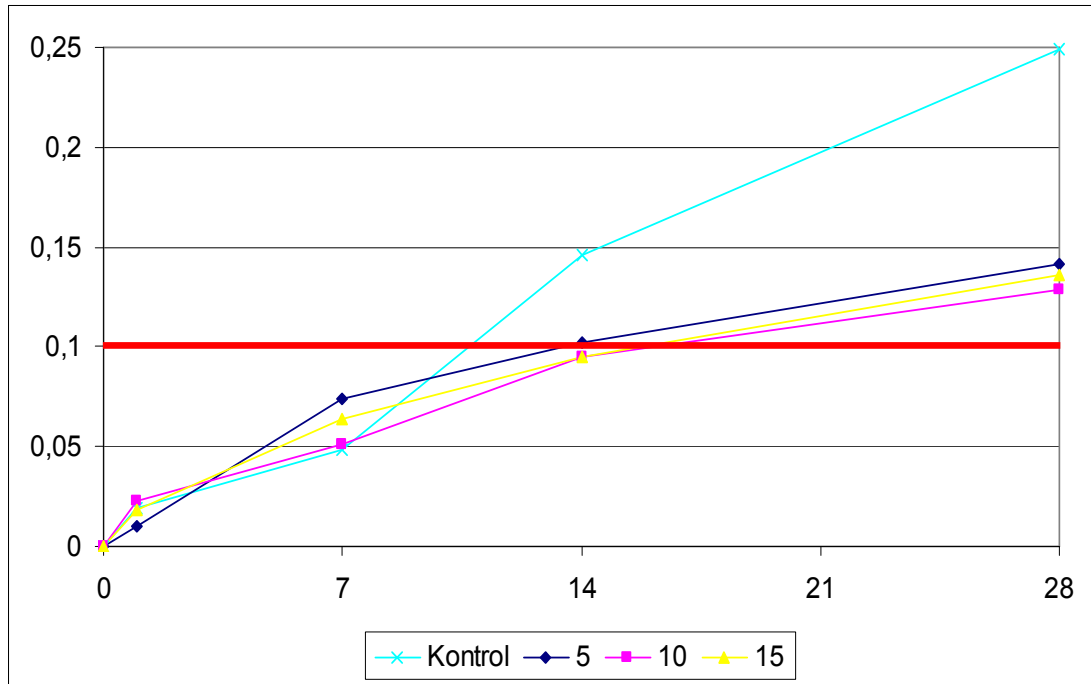
Tablo 5.48 İri zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%10	% 32 (Azalma)
%20	% 30 (Azalma)
%30	% 31 (Azalma)
%40	% 43 (Azalma)
%50	% 73 (Azalma)

5.2.2.2.4 *İnce (100 μ m Altı) Zeolit İkamesi.* İnce zeolit, %5 ile %15 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.49’da, 100 μ m altı zeolit ikamesi ile elde edilen genleşmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.44’de ise bu genleşmelerin zaman göre değişimleri gösterilmiştir. İnce zeolit ikamesi ile genleşmeler azalmakla birlikte sınırın altına çekilmemiştir. En düşük genleşme değeri ise %10 ikame oranında %0,128 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.49 İnce zeolit ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,019	% 0,049	% 0,146	% 0,249
%5	% 0,010	% 0,074	% 0,103	% 0,141
%10	% 0,023	% 0,051	% 0,095	% 0,128
%15	% 0,018	% 0,064	% 0,095	% 0,136



Şekil 5.44 İnce zeolit ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.50’de, ince zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

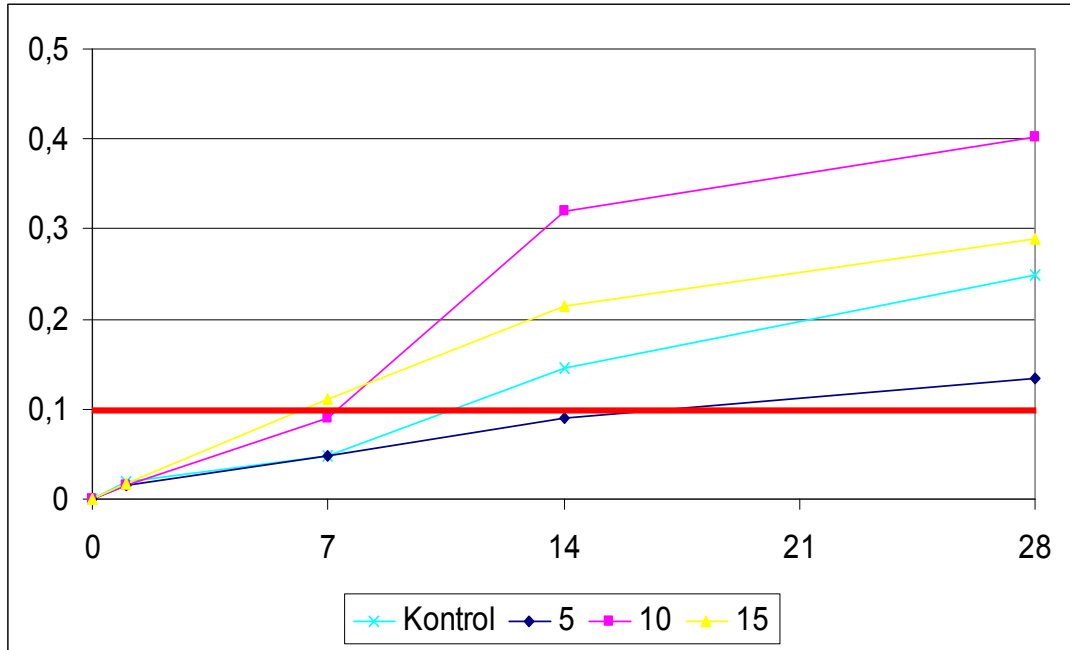
Tablo 5.50 İnce zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 43 (Azalma)
%10	% 48 (Azalma)
%15	% 45 (Azalma)

5.2.2.2.5 *Silis Dumanı İkamesi*. Silis dumanı, %5 ile %15 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.51’de, silis dumanı ikamesi ile elde edilen genleşmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.45’de ise bu genleşmelerin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. AAR5 yönteminde silis dumanı ikame edilmesi durumunda, AAR2 yöntemindekine benzer bir davranış gözlenmiştir. En az genleşme değeri %0,133 ile %5 ikame oranında elde edilirken %10 ikame oranında %0,403 genleşme görülmüştür. %15 ikame oranında genleşmeler yine azalmıştır.

Tablo 5.51 Silis dumanı ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,019	% 0,049	% 0,146	% 0,249
%5	% 0,015	% 0,049	% 0,090	% 0,133
%10	% 0,015	% 0,090	% 0,321	% 0,403
%15	% 0,018	% 0,110	% 0,215	% 0,290



Şekil 5.45 Silis dumanı ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.52’de, silis dumanı ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

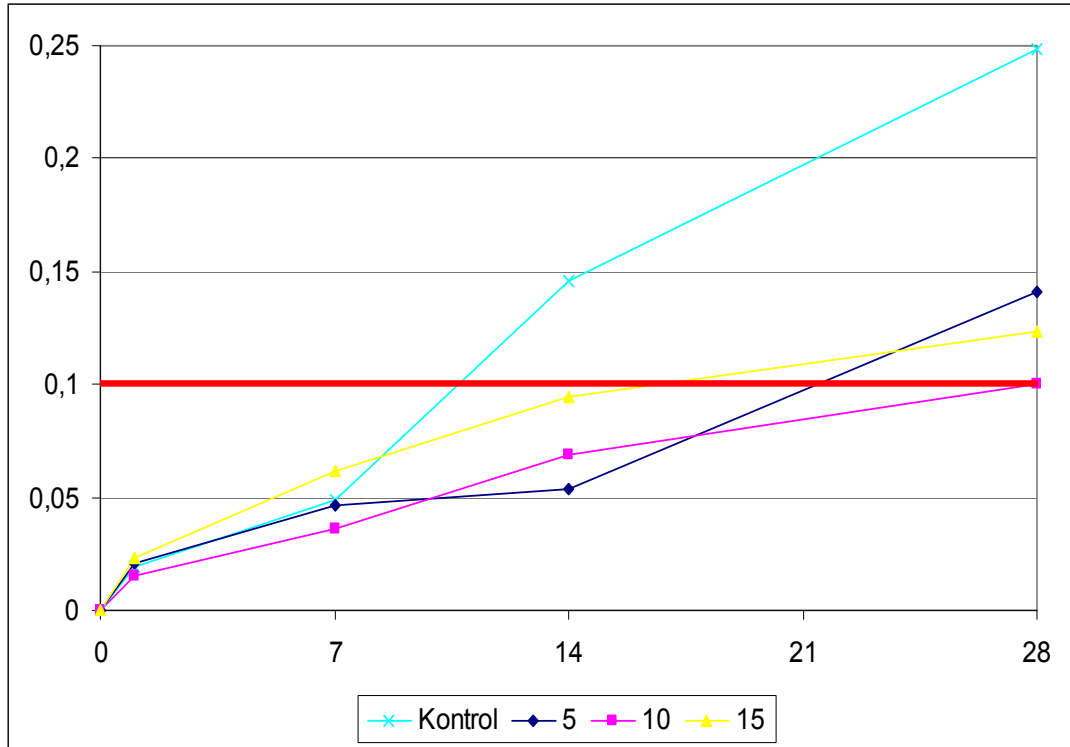
Tablo 5.52 Silis dumanı ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 46 (Azalma)
%10	% 61 (Artış)
%15	% 16 (Artış)

5.2.2.2.6 Metakaolin İkamesi. Metakaolin, %5 ile %15 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Tablo 5.53’de, metakaolin ikamesi ile elde edilen genleşmelerin günlere göre değişimleri sunulmuştur. Şekil 5.46’da ise bu genleşmelerin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. Metakaolin ikamesi ile en düşük genleşme oranı %10 ikame oranında elde edilmiştir. Diğer ikame oranlarında genleşme sınırın üstünde dalgalanmıştır.

Tablo 5.53 Metakaolin ikamesi ile genleşmelerin değişimi

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	% 0,019	% 0,049	% 0,146	% 0,249
%5	% 0,021	% 0,046	% 0,054	% 0,141
%10	% 0,015	% 0,036	% 0,069	% 0,100
%15	% 0,023	% 0,062	% 0,095	% 0,123



Şekil 5.46. Metakaolin ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği

Tablo 5.54’de, metakaolin ikamesi ile AAR5 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

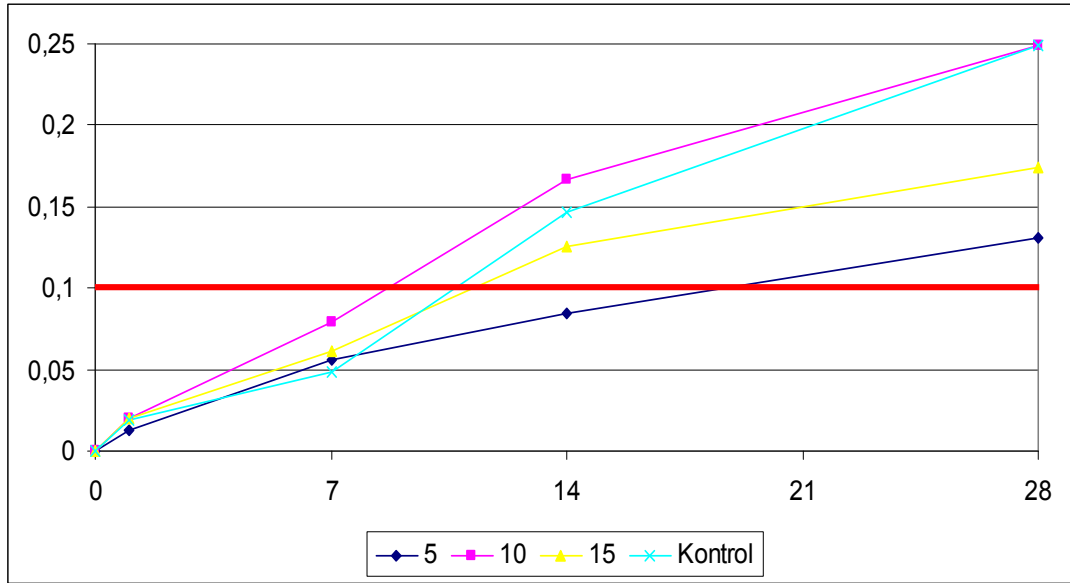
Tablo 5.54 Metakaolin ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

	Genleşmedeki Değişim (%)
%5	% 43 (Azalma)
%10	% 59 (Azalma)
%15	% 50 (Azalma)

5.2.2.2.7 *Lityum Hidroksit İkamesi.* Hazırlanan örneklere lityum hidroksit katılması sonucunda AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince elde edilen ortalama boy değişimleri Tablo 5.55’de gösterilmiştir. Şekil 5.47’de ise AAR5 yöntemine göre 28 gün süresince gözlenen boy değişimlerinin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Lityum hidroksit katılması ile genleşmeler ilk olarak azalmıştır. %0,1 katılma oranından itibaren genleşmeler sınırın altına inmiştir.

Tablo 5.55 Lityum hidroksit katılması AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri

	1. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün
Kontrol	0,013	0,070	0,116	0,186
%0,5	0,013	0,056	0,085	0,131
%1,0	0,021	0,079	0,167	0,249
%1,5	0,021	0,062	0,126	0,174



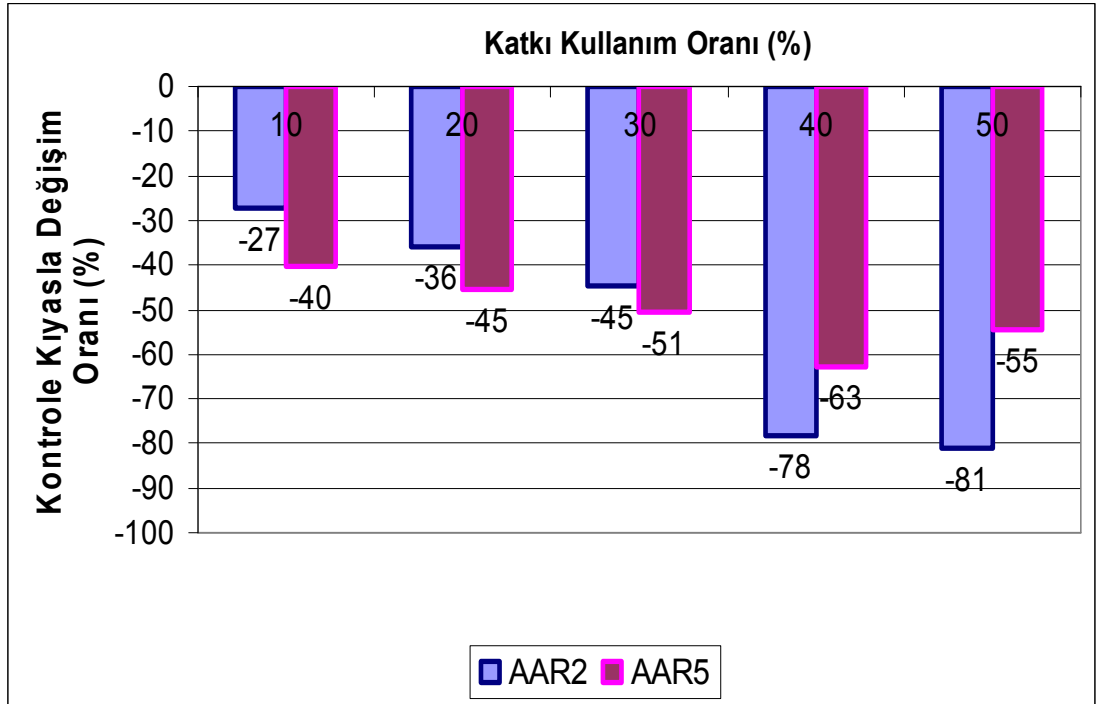
Şekil 5.47 Lityum hidroksit katılması sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi

Tablo 5.56'da, lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre elde edilen genleşmelerin kontrol karışımının genleşmelerine oranla değişimleri gösterilmektedir.

Tablo 5.56 Lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi

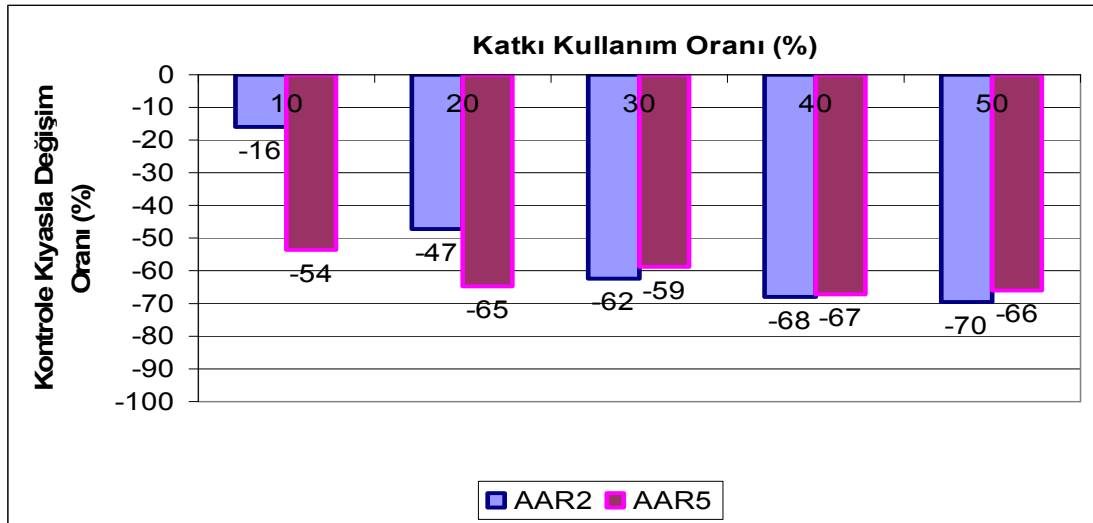
	Genleşmedeki Değişim (%)
% 0,5	% 47 (Azalma)
% 1,0	% 0 (Azalma)
% 1,5	% 30 (Azalma)

Şekil 5.48-5.54'de, değişik deney yöntemleri için, mineral katkıların genleşmeyi kontrol karışımına kıyasla azaltma yüzdelerinin grafikleri gösterilmiştir. Şekil 5.48'de yüksek fırın curufu ikame edilmesi durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi AAR2 yönteminde katkı ikame oranı arttıkça genleşme azalmaktadır. Fakat AAR5 yönteminde %40 ikame oranının en iyi sonucu verdiği söylenebilir. AAR2 yönteminde yüksek fırın curufu ikame edilmesi durumunda genleşmeler kontrole göre %27-%81 azalırken AAR5'de bu oran %40-%63'dür



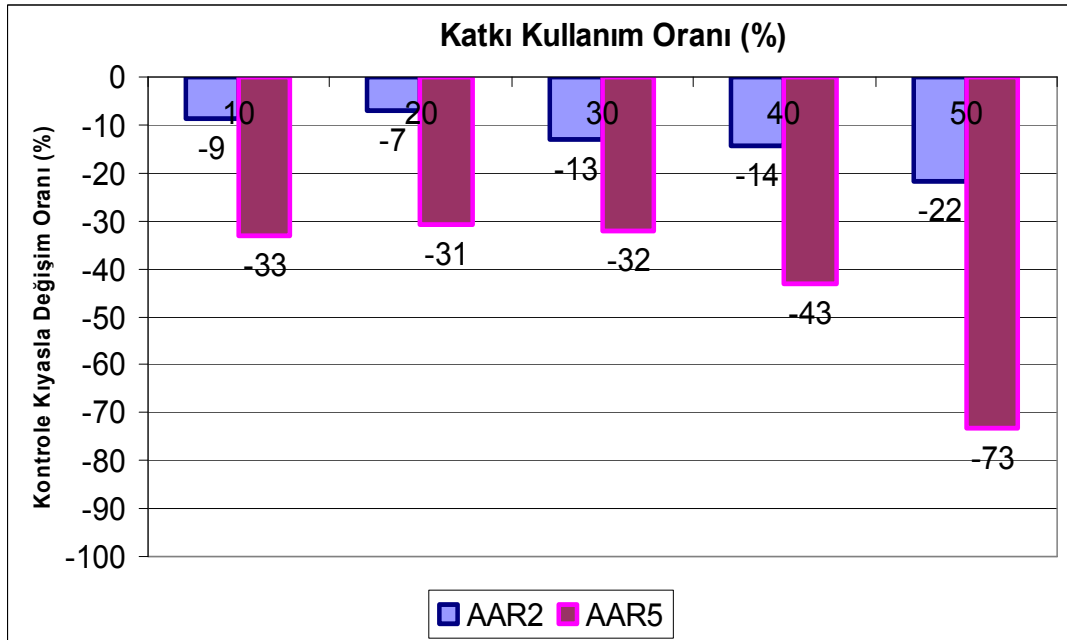
Şekil 5.48 Yüksek Fırın Curufu İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi

Şekil 5.49'de uçucu kül ikame edilmesi durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, yüksek fırın curufu kullanımında olduğu gibi, AAR2 yönteminde katkı ikame oranı arttıkça genleşme azalmaktadır. Bu yöntemde %16-%70 azalma değerleri elde edilmiştir. Fakat AAR5 yönteminde dalgalanma yapan genleşme değerleri elde edilmiştir. Genleşmelerdeki en fazla azalma değeri %40 ikame oranında elde edilmiş olup azalma oranı %67'dir.



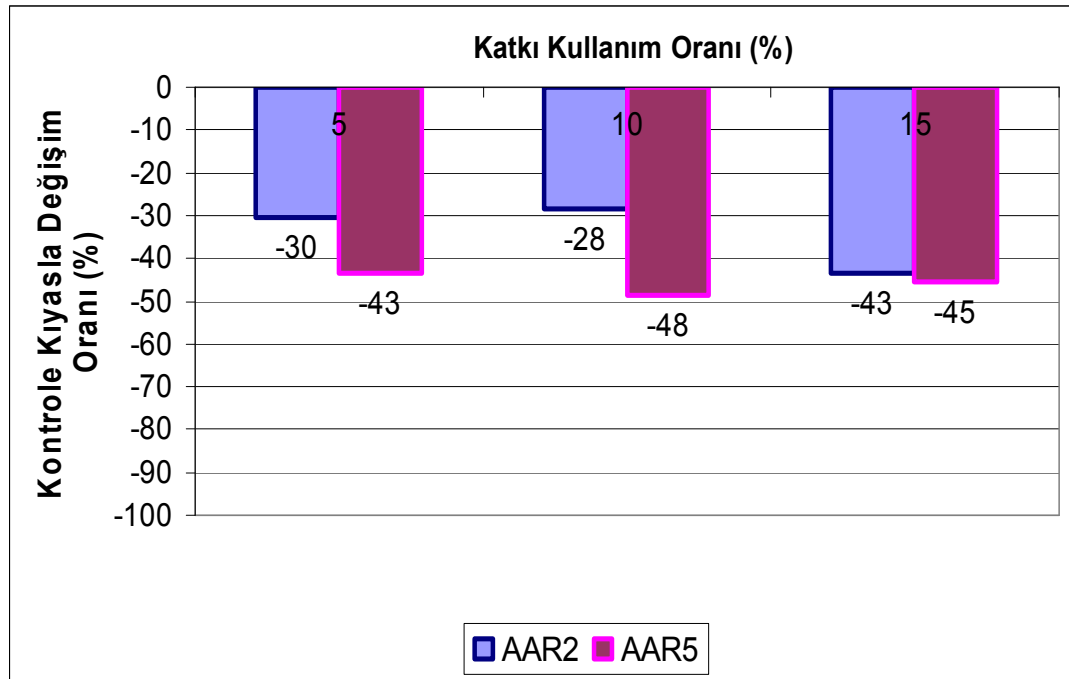
Şekil 5.49 Uçucu Kül İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi

Şekil 5.50’de iri Zeolit ikame edilmesi durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. AAR5 yönteminde genleşmeler kontrole göre %33-%73 arasında değişmiştir. AAR2 yönteminde de aynı davranış görülmüştür fakat genleşmedeki azalmalar daha düşük değerlerdedir.



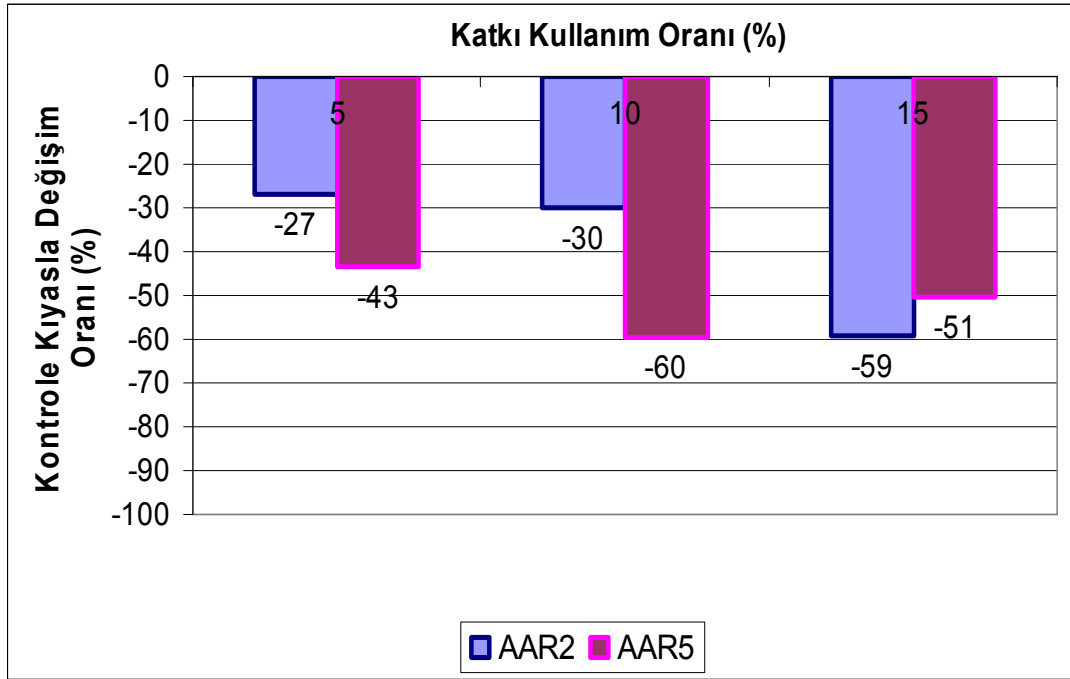
Şekil 5.50 İri Zeolit İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi

Şekil 5.51’de İnce Zeolit ikame edilmesi durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. AAR2 yönteminde %10 kullanım sonucu genleşmede biraz artış olmuştur fakat en düşük genleşme değeri %15 ikame oranında elde edilmiştir. AAR5 yönteminde ise en uygun kullanım oranınının %10 olduğu söylenebilir. AAR2 yönteminde genleşmeler kontrole göre %30 ile %43 arasında değişirken AAR5 yöntemindeki genleşmeler kontrole göre %43 ile %48 arasında dalgalanmıştır.



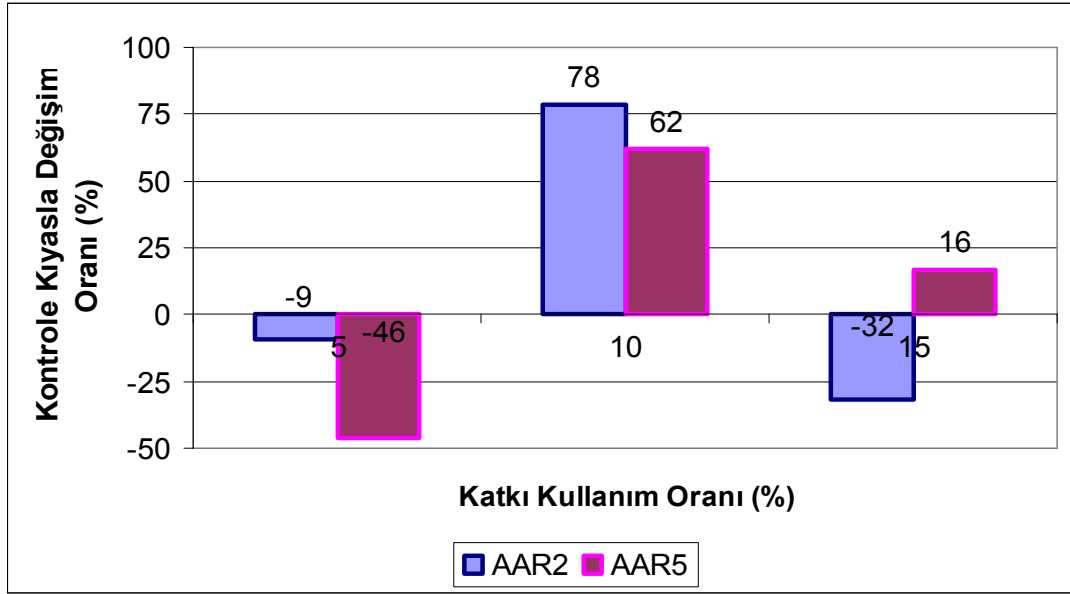
Şekil 5.51 İnce Zeolit İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi

Şekil 5.52’de metakaolin ikame edilmesi durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. AAR2 yönteminde, ikame oranı arttıkça genleşmeler azalmaktadır. AAR5 yönteminde ise en düşük genleşme değeri %10 kullanımda elde edilmiştir. AAR2 yönteminde genleşmeler kontrole göre %27-%59 arasında değişmektedir. Bu oranlar AAR5 yönteminde %43-%60’dır.



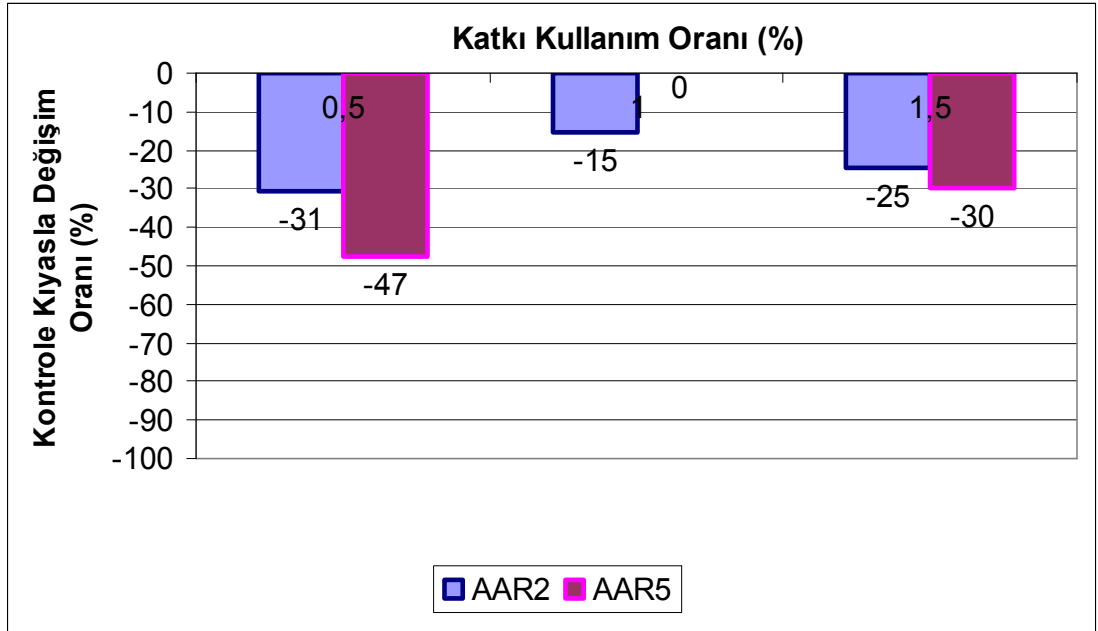
Şekil 5.52 Metakaolin İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi

Şekil 5.53’de silis dumanı ikame edilmesi durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. AAR2 ve AAR5 yöntemlerinde, %5 kullanım ikame oranında genleşme biraz azalmıştır fakat %10 ikame oranında bariz bir artış söz konusudur. %15 ikame oranı için farklı deney yöntemlerinde farklı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.53 Silis Dumanı İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi

Şekil 5.54'de lityum hidroksit durumunda genleşmelerin kontrole kıyasla değişimleri gösterilmiştir. En düşük genleşme değeri her iki yöntemde de %0,5 kullanım oranında elde edilmiştir.



Şekil 5.54 Lityum hidroksit kullanılması durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi

Tablo 5.57’de, Zonguldak ve Kanada agregaları için AAR2 ve AAR5 yöntemlerinde kullanılan katkıların, genleşme değerlerini hangi ikame oranlarında reaktivite sınırının altına çıktığı gösterilmiştir.

Tablo 5.57 Zonguldak ve Kanada agregaları ile değişik deney yöntemlerinde kullanılan katkıların genleşmeyi sınırın altına çektiği oranlar

	Zonguldak		Kanada	
	AAR2	AAR5	AAR2	AAR5
Uçucu Kül	% 20	% 20	% 20	% 20
Yüksek Fırın Curufu	% 30	% 30	% 10	% 40
İri Zeolit	% 30	% 40	-	% 50
İnce Zeolit	% 15	-	% 5	-
Silis Dumanı	-	-	% 15	-
Metakaolin	% 10	% 15	% 5	-
LiOH	%1	-	% 0,5 - % 1,5	-

Zonguldak agregası ile AAR2 yöntemine uygun yürütülen deneyler sonucunda en düşük genleşmenin %50 uçucu kül, %50 yüksek fırın curufu ve %15 metakaolin içeren örneklerde görüldüğü belirlenmiştir. Bu deney yöntemine göre genleşmeyi önlemede en etkili katkıların bu katkıları olduğu söylenebilir. Bu katkılarda kullanım oranı arttıkça genleşmeler azalmıştır. Diğer katkılarda ise bazı kullanım oranları için genleşmelerde artışlar görülmüştür. Yüksek fırın curufu %50 kullanım oranında, 28 gün sonundaki genleşmeyi %90 oranında azaltmasına rağmen %10 oranında kullanıldığında genleşmede artışa yol açmıştır.

Zonguldak agregası ile AAR5 yöntemine göre yapılan deneylerde ise en düşük genleşme değerleri, AAR2 yöntemindekine benzer olarak uçucu kül ve yüksek fırın curufu içeren örneklerde elde edilmiştir. Bu yöntemde de uçucu külü ikame oranının artmasıyla genleşmeler azalmıştır ve %10 yüksek fırın curufu içeren örneklerde kontrolden fazla genleşmeler elde edilmiştir.

Kanada agregası ile AAR2 yöntemine göre yürütülen deneylerde en düşük genleşmeler uçucu külün ve yüksek fırın curufunun %50 ikame edilmesi durumunda elde edilmiştir. AAR2 yöntemine göre genleşmeyi engellemede en etkili katkılar uçucu kül ve yüksek fırın curufu olarak saptanmıştır. AAR5 yönteminde ise en etkili katkılar uçucu kül, yüksek fırın curufu ve metakaolin olarak belirlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda Alkali-Karbonat Reaksiyonunu önlemede en etkili katkıların yüksek fırın curufu ve uçucu kül olduğu belirlenmiştir. Bu katkıların en uygun ikame oranının ise %50 olduğu anlaşılmıştır. Silis dumanının ise Alkali-Karbonat Reaktif agregalar ile birlikte kullanılmaması uygun olacaktır. Nitekim farklı ikame oranları için çok değişik davranışlar göstermekle birlikte çoğu ikame oranında genleşmelerin artmasına sebep olmaktadır.

Puzolanların, düşük kireçli C-S-H jeli oluşturarak alkali-agrega reaksiyonu genleşmelerini önledikleri bilinmektedir. Mineral katkı kullanılmadığı durumlarda oluşan C-S-H jelinin CaO/SiO₂ oranı 1,5 civarında iken, katkı kullanıldığı durumlarda bu oran 1,2'e gerilemektedir. Bu durumda oluşan C-S-H jelinin daha fazla Na₂O ve K₂O tutma kapasitesi olmaktadır. Sonuç olarak puzolanların oluşturduğu hidratlar çimentodan gelen alkalileri tutarak, reaksiyonun oluşmasını geciktirir ve yavaşlatır (Ramachandran, 1998).

Yüksek fırın curufu, uçucu kül ve metakaolin gibi puzolanik katkıların ikame edildiği durumlarda genleşmelerin azalmasının sebebi, oluşan hidratların alkalileri tutması olabilir. Örneklerin deney standardı gereği alkali çözeltisinde beklediği düşünülürse, ikame oranlarının artmasıyla genleşmelerin azalması, bu mekanizmanın doğal bir sonucu olarak görülebilir. İkame oranının artmasıyla oluşa hidratların miktarı ve sonuç olarak hapsolan alkali miktarı artmaktadır.

Zeolitin puzolanik bir katkı olmadığı düşünülürse, genleşmelerin azalması, zeolitin boşluklu yapısından kaynaklanıyor olabilir. Oluşan genleşmeler, zeolitin yol açtığı mikro boşluklara yayıldığı için genleşmelerin düşük değerlerde kalması söz konusu olabilir.

Silis dumanı yoğun bir yapı oluşturarak betonun geçirimsizliğini azaltır, geniş özgül yüzeyi ile alkalileri bağlayarak boşluk çözeltisinin alkali konsantrasyonunu düşürür. Ayrıca silis dumanının amorf halde bulunan silis içeriği, çimento yerine kullanıldığında beton henüz taze haldeyken çimentodaki alkalilerle reaksiyona girer ve bu reaksiyon sonucunda, ortamda bulunan sodyum ve potasyum iyonları betonun hasar görmeyeceği bu evrede tüketilir (Çakır, 2007). Silis dumanı ikame edildiği durumlarda ise genleşmelerin artmasının birkaç sebebi olabilir. İlk olarak silis dumanı kötümser etki yapıyor olabilir. Daha önce de açıklandığı gibi belirli bir alkali içeriği için genleşmeler artmaktadır. Bu durumda silis dumanı kullanılan örneklerde, genleşmeyi bu şekilde arttıracak bir kritik alkali içeriği yakalanmış olabilir. Başka bir sebep ise silis dumanının kendi başına bir reaksiyona yol açması olabilir. Özellikle Zonguldak agregasında, silis dumanı ikame oranının artmasıyla genleşmelerin de artması bu sebeple oluyor olabilir.

Literatürde ACR için referans agregası olarak kabul edilen Kanada agregası ile Zonguldak'tan temin edilen agreganın, AAR2 deneyinde çok benzer davranışlar gösterdiği açıktır. Fakat AAR2 yöntemine uygun yürütülen deneylerde, Zonguldak agregası ile hazırlanan kontrol örneklerinde, Kanada agregası ile hazırlanan kontrol örneklerine kıyasla daha fazla genleşme gözlenmesine rağmen, katkı kullanımı sonucunda elde edilen genleşme değerleri, Kanada agregası ile hazırlanan örneklerden elde edilen genleşme değerlerinden daha düşüktür. Literatürde de kabul edildiği gibi mineral katkıları ASR genleşmesini önlemede, ACR genleşmesini önlemede olduklarından daha başarılıdır. Zonguldak agregasının içerdiği kil ve SiO₂ miktarının Kanada agregasından daha fazla olduğu düşünülürse, Zonguldak agregasında ASR'nin ACR'den baskın olduğu sonucuna varılabilir.

Genel bir değerlendirme yapılırsa, Zonguldak agregasında, AAR2 yönteminde mineral katkıların AAR5 yöntemine kıyasla daha etkili olduğu görülmektedir. Literatüre göre ACR'nin iri agregada daha baskın olduğu, ASR'nin ise ince agregada daha etkili olduğu bilinmektedir (Tong ve Tang, 1999, Xu ve diğ., 2002). Bu bilgiler ışığında, Zonguldak agregasında literatüre uygun olarak hem ACR'nin hem de ASR'nin geliştiği düşünülebilir. Mineral katkıların AAR2'de daha etkili olması ise bu

agregada ASR'nin ACR'den baskın olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Kontrol karışımları incelendiğinde de Zonguldak agregasının AAR2'de daha fazla genleşme gösterdiği, Kanada agregasında ise AAR5 yöntemindeki genleşmenin AAR2 yöntemindekinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle iki agregada da hem ASR hem de ACR görülmektedir. Ancak birinde ASR'nin diğerinde ise ACR'nin daha baskın olduğu anlaşılmaktadır.

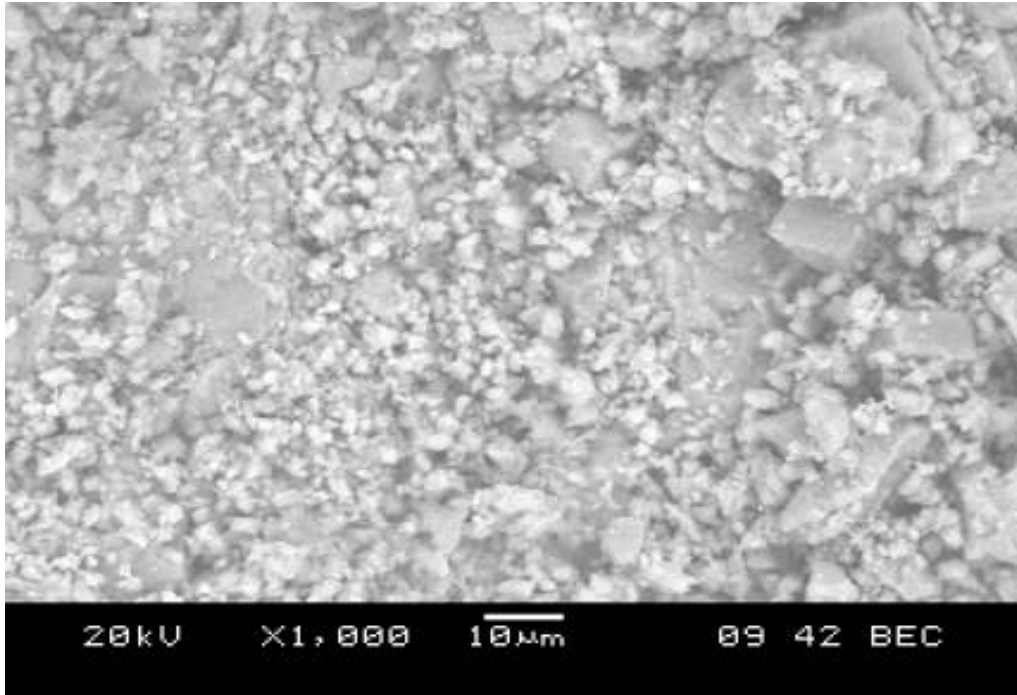
5.3 İç Yapı İncelemeleri

5.3.1 Zonguldak Agregası ile Hazırlanan Örneklerin İç Yapı İncelemeleri

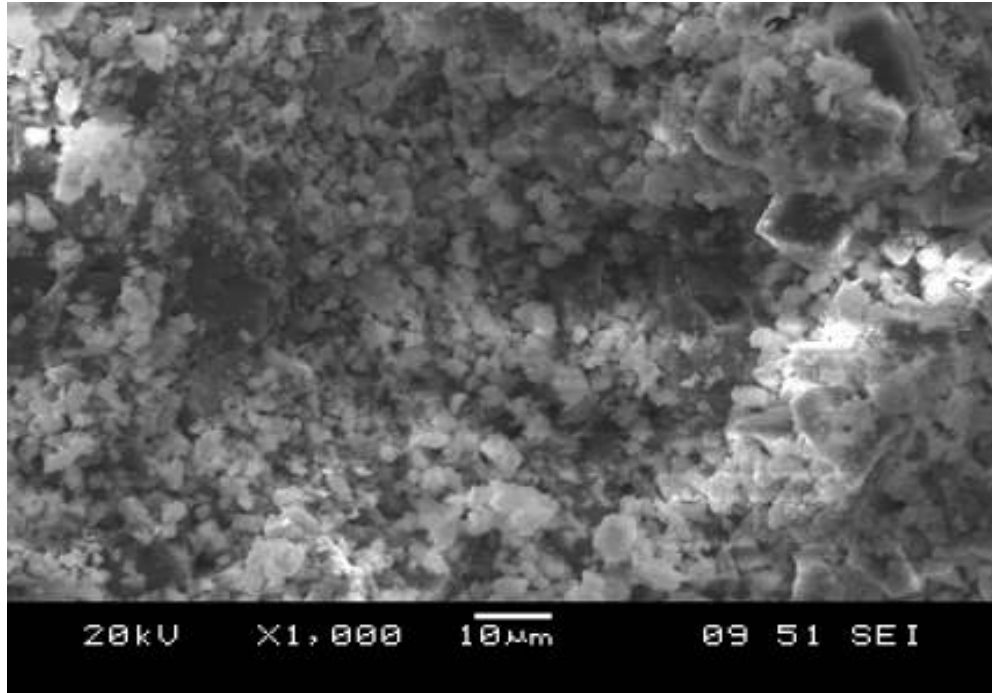
5.3.1.1 Zonguldak Agregası Üzerinde Yapılan İç Yapı İncelemeleri

Şekil 5.55'de ve 5.56'da, sırasıyla BEC (Backscattered Electron Imaging) modunda ve SEI (Secondary Electron Imaging) modunda çekilmiş görüntüler sunulmaktadır. Petrografik inceleme sırasında gözlenen dolomit taneleri bu fotoğraflarda da açıkça seçilebilmektedir. Bu fotoğraflarda gözlemlenen doku da yine Alkali-Karbonat Reaktif agrega dokusu ile oldukça benzerdir.

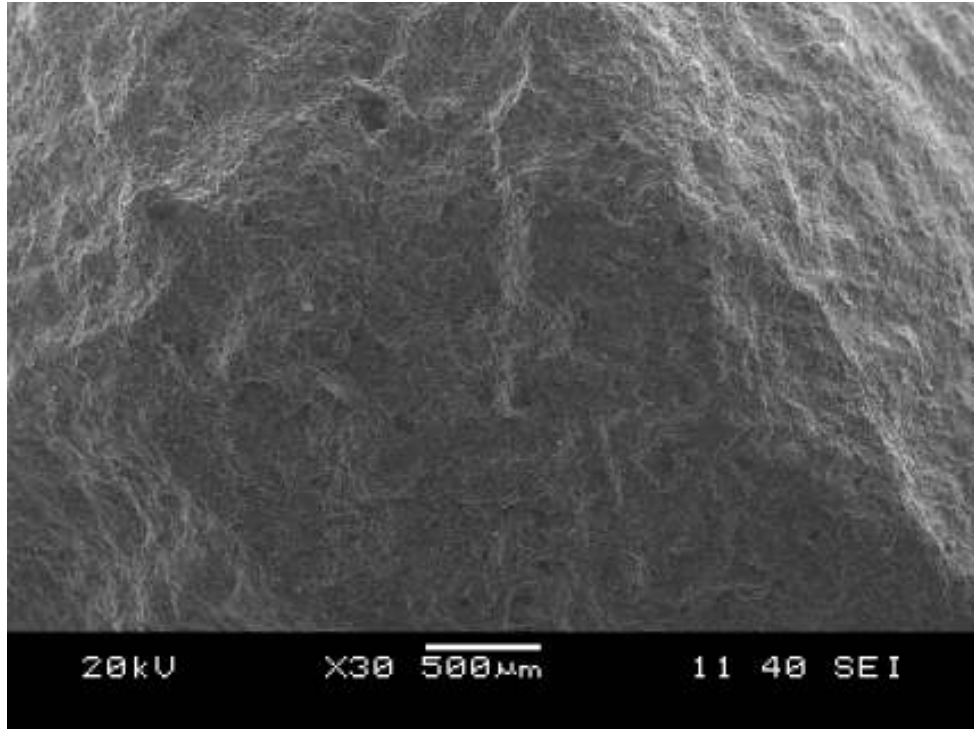
Şekil 5.57'de ise Zonguldak agregasında yapılan genel EDS analizi yapılmış olduğu bölge gösterilmektedir. Yapılan EDS analizinin sonuçları Tablo 5.58'de, grafiği Şekil 5.58'de sunulmuştur. Analiz sonuçlarından görüleceği üzere Magnezyum ve Silisyum oranı az iken, Kalsiyum miktarı %44 civarındadır. Bu genel EDS analizi, agregada yaptırılan kimyasal analizin sonuçları ile uyumluluk göstermektedir.



Şekil 5.55 BEC modunda çekilmiş fotoğraf



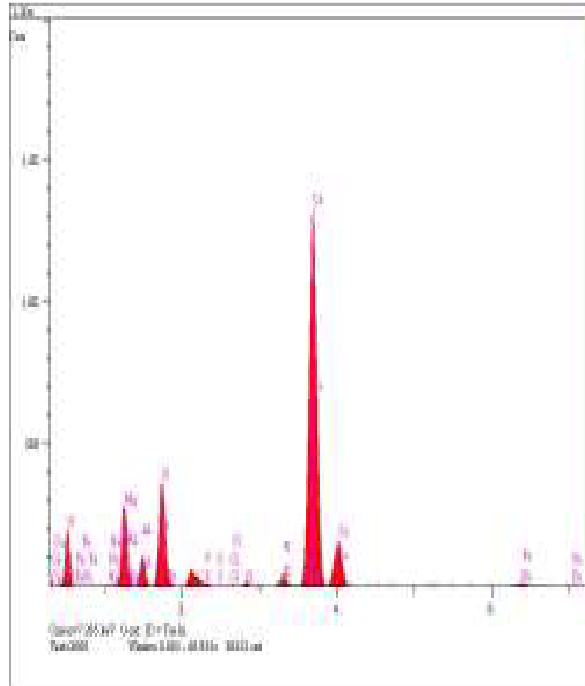
Şekil 5.56 SEI modunda çekilmiş fotoğraf



Şekil 5.57 Genel EDS analizinin yapıldığı bölge

Tablo 5.58 Şekil 5.57’de gösterilen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
O	31,41
Na	0,22
Mg	8,11
Al	2,85
Si	9,66
S	0,48
Cl	0,13
K	1,04
Ca	44,46
Fe	1,67

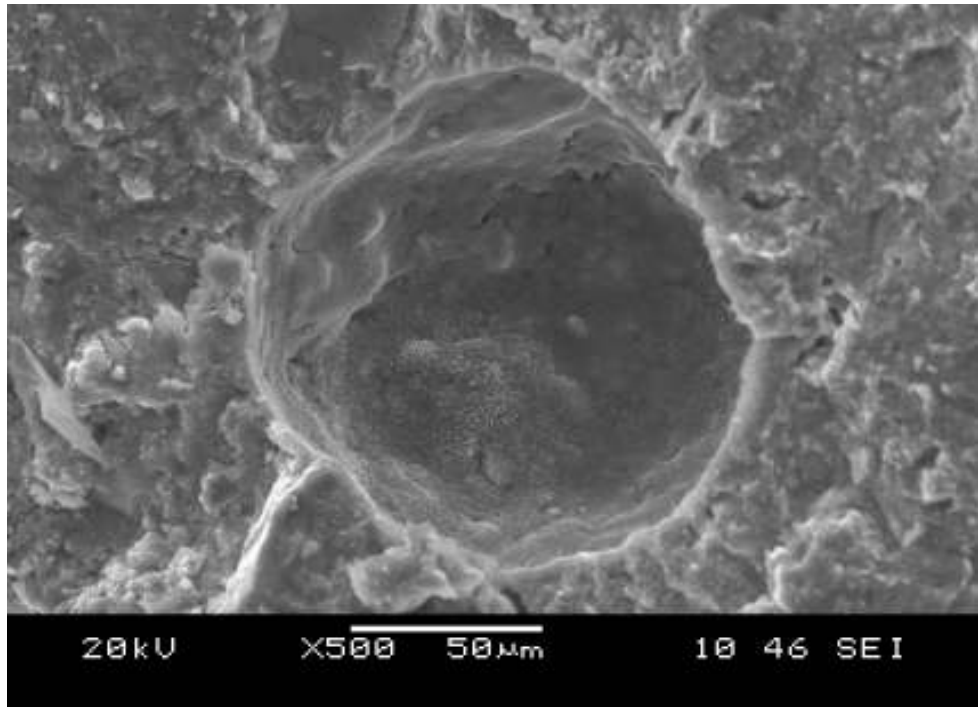


Şekil 5.58 Tablo 5.58’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

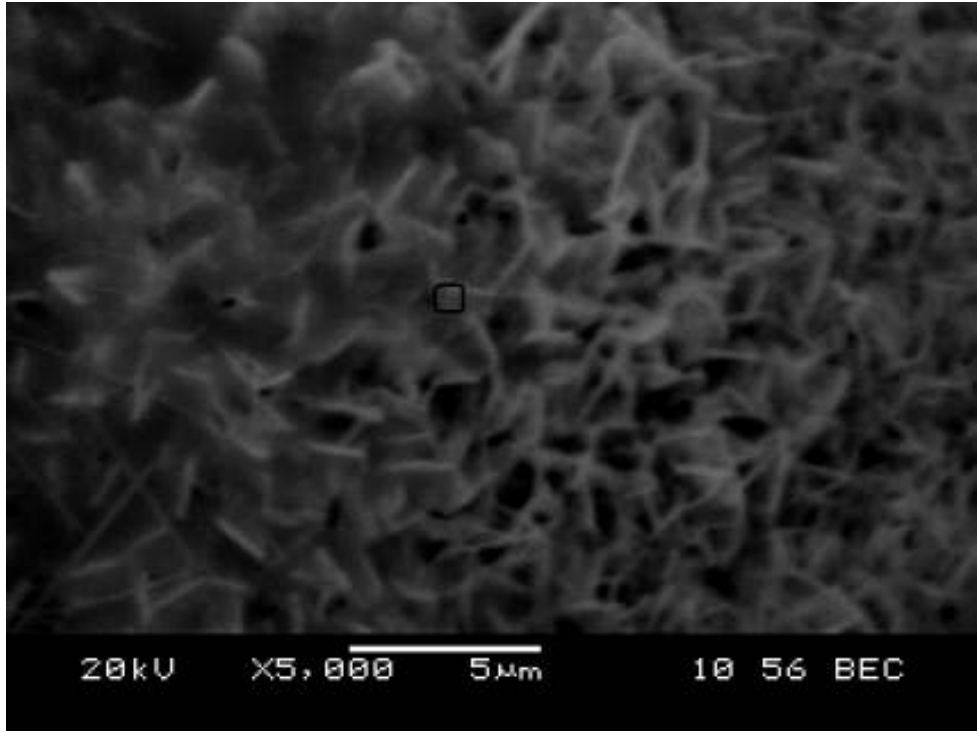
5.3.1.2 Zonguldak Agregası ile Hazırlanan Kontrol (Mineral Katkısız) Örneği Üzerinde Yapılan İç Yapı İncelemeleri

Zonguldak agregası kullanılarak RILEM AAR2 yöntemine göre hazırlanmış ve 56 gün boyunca NaOH çözeltisinde bekletilmiş örnekler üzerinde SEM incelemeleri yapılmıştır.

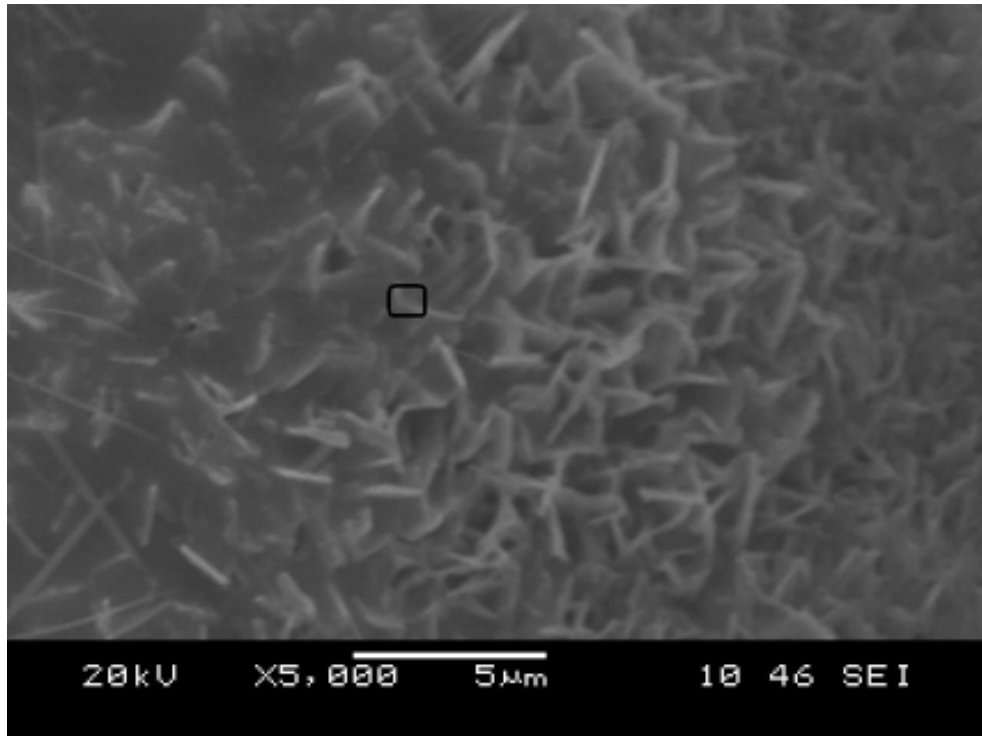
Şekil 5.59'da harcın içinde oluşmuş bir boşluk görülmektedir. Bu boşluğun bir kısmı reaksiyon ürünü ile dolmuştur. Şekil 5.60'da ve 5.61'de bu reaksiyon ürününün yakın görüntüsü ve EDS analizinin yapıldığı bölge gösterilmiştir. Bu EDS analizinin sonuçları Tablo 5.59'da, grafiği Şekil 5.61'de sunulmuştur.



Şekil 5.59 Bir kısmı reaksiyon ürünü ile dolmuş boşluk (Zonguldak, mineral katkısız örnek)



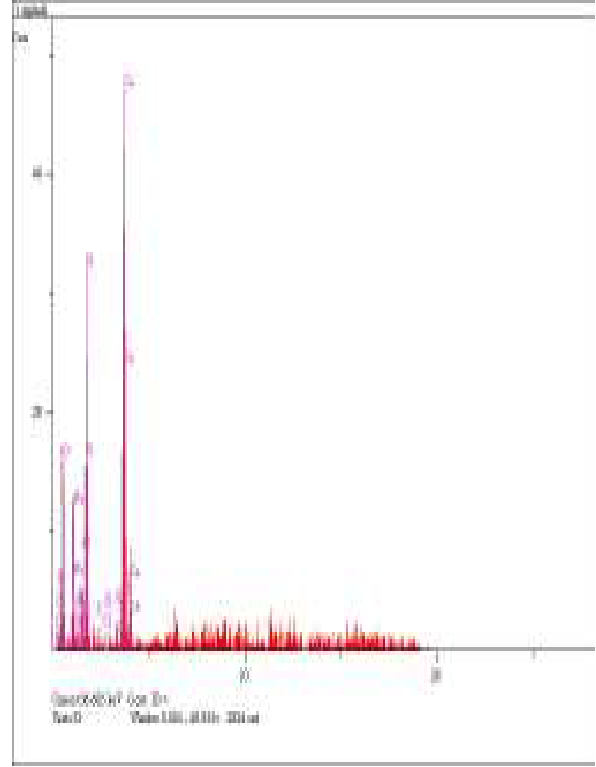
Şekil 5.60 Reaksiyon ürününün yakın görüntüsü (Zonguldak, mineral katkısız örnek)



Şekil 5.61 Reaksiyon ürününün yakın görüntüsü (Zonguldak, mineral katkısız örnek)

Tablo 5.59 Şekil 8.60-8.61’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

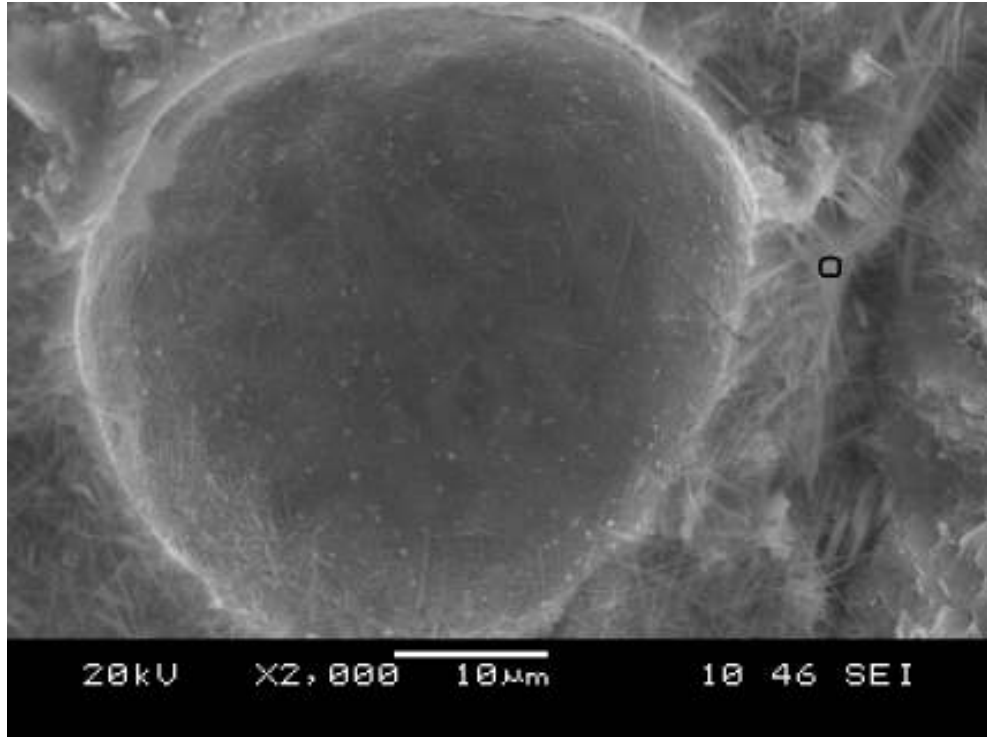
Element	%
C	4,21
O	42,69
Na	8,89
Mg	0,48
Al	2,78
Si	11,60
S	0,61
Cl	0,27
K	0,86
Ca	27,61
C	4,21
Ca/Na	3,11
Si/Na	1,30
Si/Ca	0,42



Şekil 5.62 Tablo 5.59’da sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

Tablo 5.59’deki EDS analizinin sonuçlarından görüleceği gibi bu reaksiyon ürünü çoğunlukla kalsiyumdan oluşmaktadır. Yapıda önemli miktarda Na^+ bulunmaktadır. Aynı zamanda önemli miktarda da silisyum içermektedir. Bu durumda bu reaksiyon ürününün Alkali-Silika ve Alkali-Karbonat Reaksiyonlarının sonucunda oluştuğu düşünülebilir.

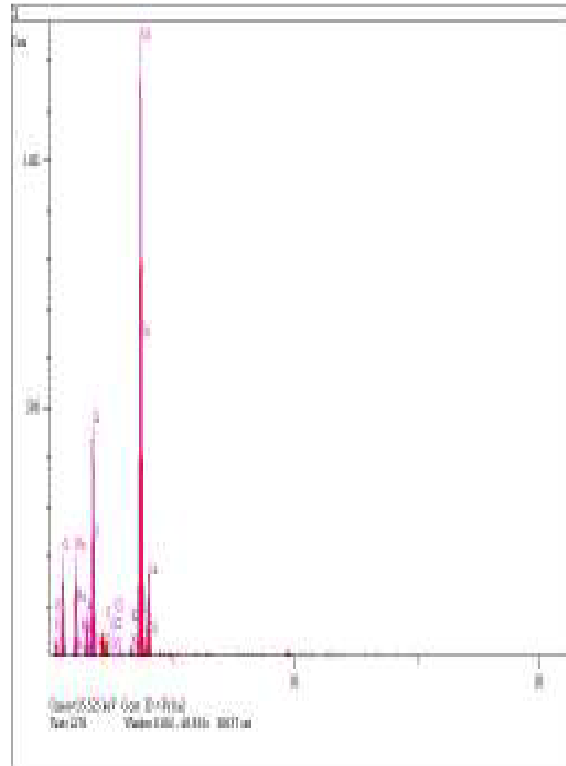
Şekil 5.63’de, örneğin başka bir bölgesinden alınmış görüntü ve yapılan başka bir EDS analizinin yeri görülmektedir. Bu analiz sonuçları Tablo 5.60’da, grafiği Şekil 5.64’de sunulmuştur. Bu sonuçlardan görüleceği üzere, reaksiyon ürünü yüksek miktarda kalsiyum içermektedir.



Şekil 5.63 Zonguldak agregası kullanılarak hazırlanmış mineral katkısız örneğin SEM görüntüsü

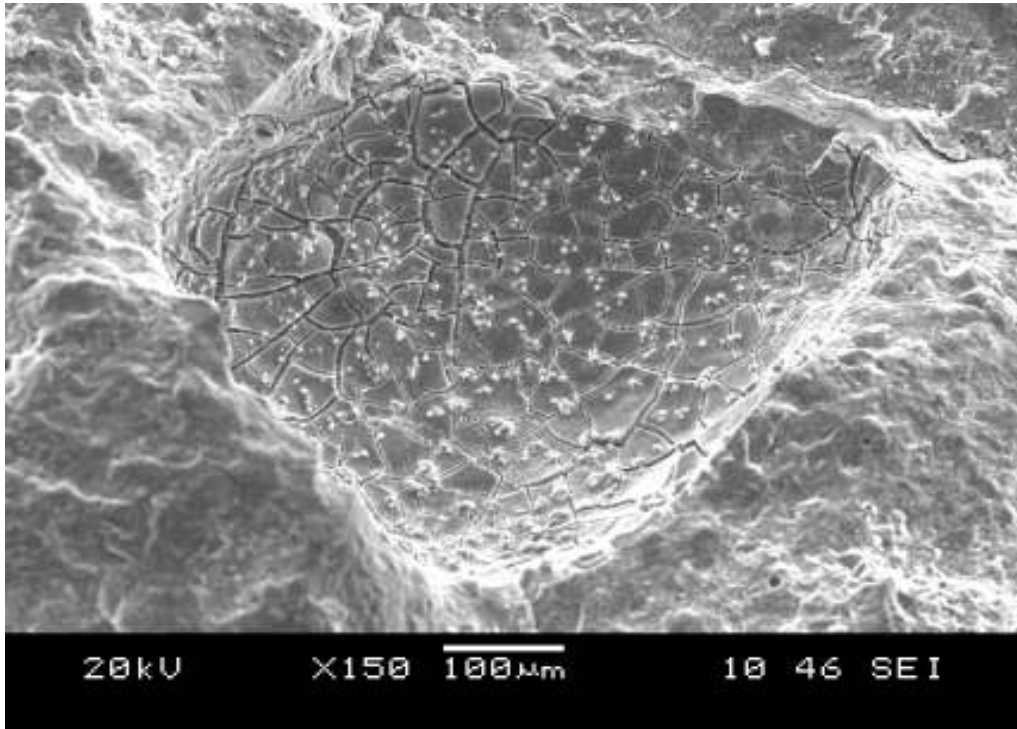
Tablo 5.60 Şekil 5.63’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
C	4,35
O	31,98
Na	7,12
Mg	0,04
Al	2,15
Si	11,00
S	0,88
Cl	0,13
K	0,59
Ca	41,75
C	4,35
Ca/Na	5,86
Si/Na	1,54
Si/Ca	0,26

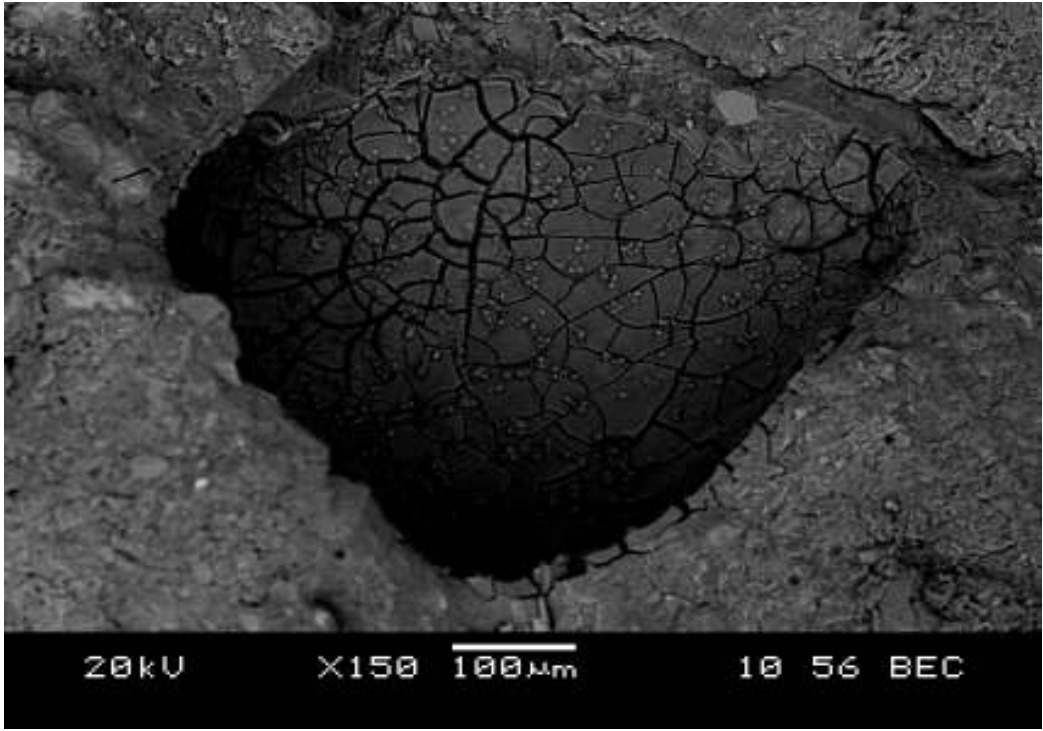


Şekil 5.64 Tablo 5.60’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

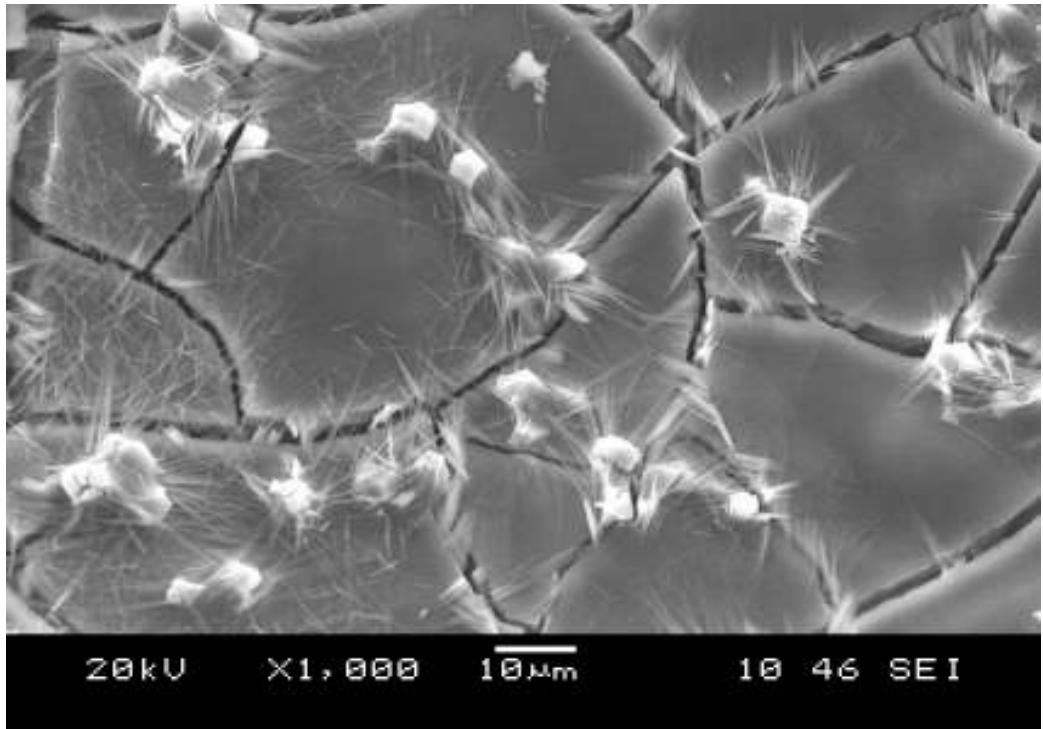
Şekil 5.65’de ve 5.66’da aynı boşluğun sırasıyla SEI modunda ve BEC modunda görüntüleri görülmektedir. Boşluğun içinde oluşan reaksiyon ürünleri açıkça seçilmektedir. Şekil 5.67’de ve 5.68’de ise boşluğun içindeki reaksiyon ürününün yakın görüntüsü sırasıyla SEI modunda ve BEC modunda gösterilmiştir. Çatlamış kil görünümündeki bu yapı, ASR ürünlerinin tipik görünümülerinden biridir. Ancak ürünün çukurda kalması, EDS analizinin yapılamamasına yol açmıştır.



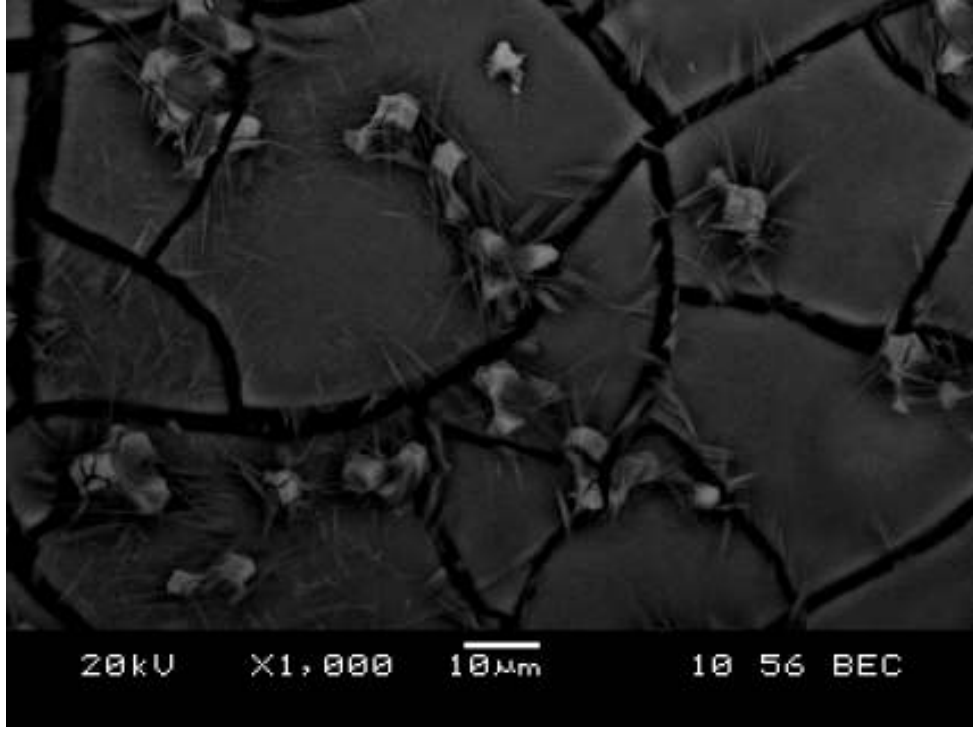
Şekil 5.65 Boşluğun içinde oluşmuş reaksiyon ürünleri (Zonguldak, mineral katkısız örnek)



Şekil 5.66 Boşluğun içinde oluşmuş reaksiyon ürünleri (Zonguldak, mineral katkısız örnek)

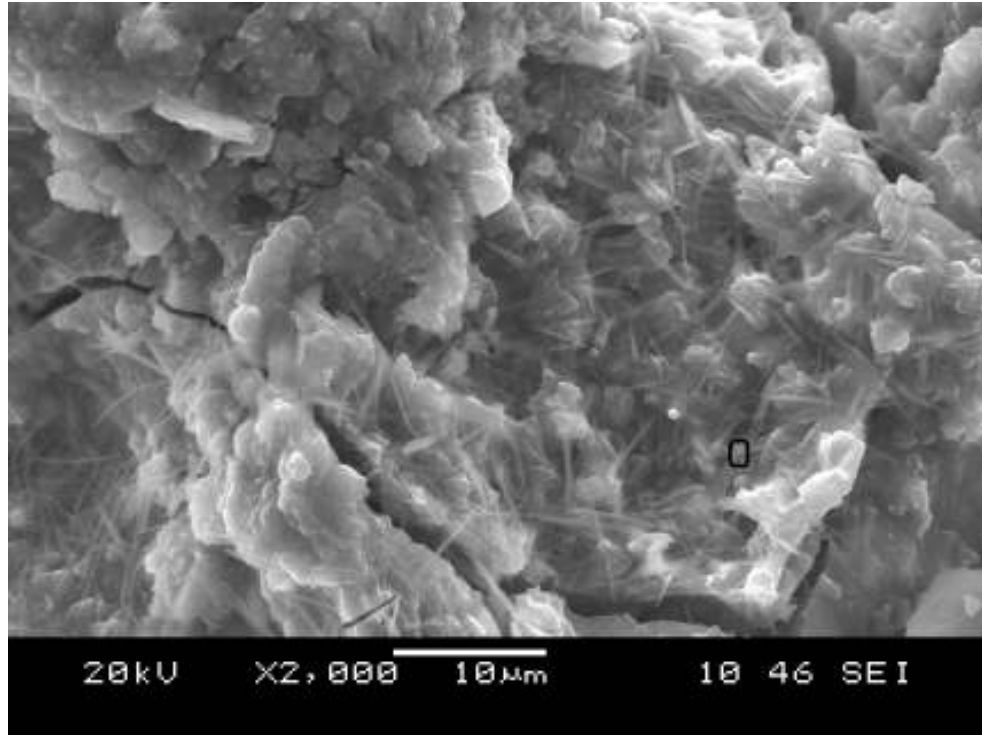


Şekil 5.67 Boşluğun içinde oluşmuş reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüsü



Şekil 5.68 Boşluğun içinde oluşmuş reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüsü

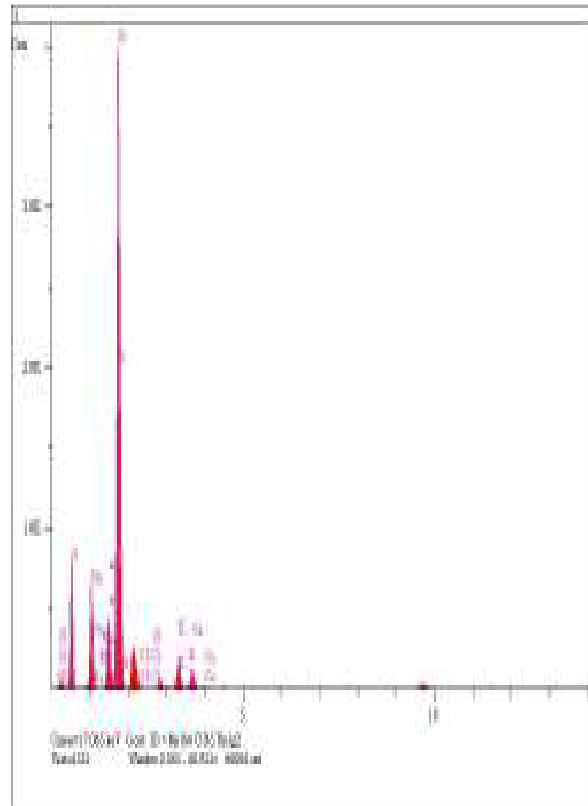
Şekil 5.69'da yine reaksiyon ürünlerinin görüntüsü ve EDS analizinin yapıldığı yer gösterilmiştir. EDS analizinin sonuç değerleri Tablo 5.61'de, grafiği Şekil 5.70'de sunulmuştur. Tablodan görüleceği gibi bu reaksiyon ürününde kalsiyum miktarı çok az iken silis miktarı yüksektir. Bu reaksiyon ürününün, agreganın yol açtığı Alkali-Silika Reaksiyonundan kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 5.69 Reaksiyon ürünleri ve genleşme çatlağı (Zonguldak, mineral katkısız örnek)

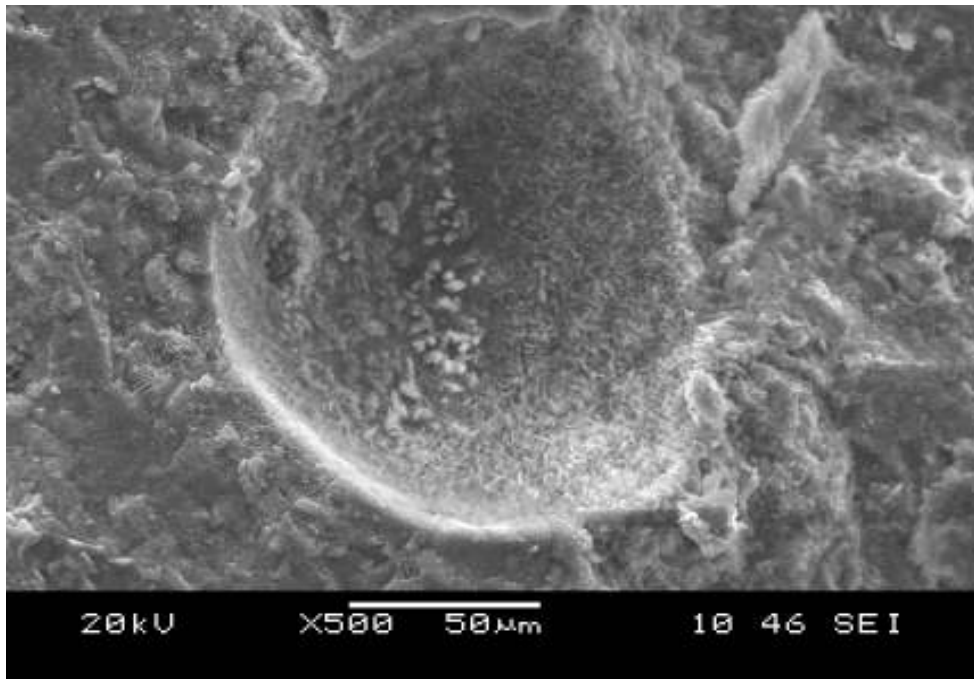
Tablo 5.61 Şekil 5.69'da işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
C	8,45
O	30,19
Na	8,46
Mg	0,02
Al	4,74
Si	42,87
S	0,42
Cl	0,03
K	3,02
Ca	1,80
C	8,45
Ca/Na	0,21
Si/Na	5,07
Si/Ca	23,82

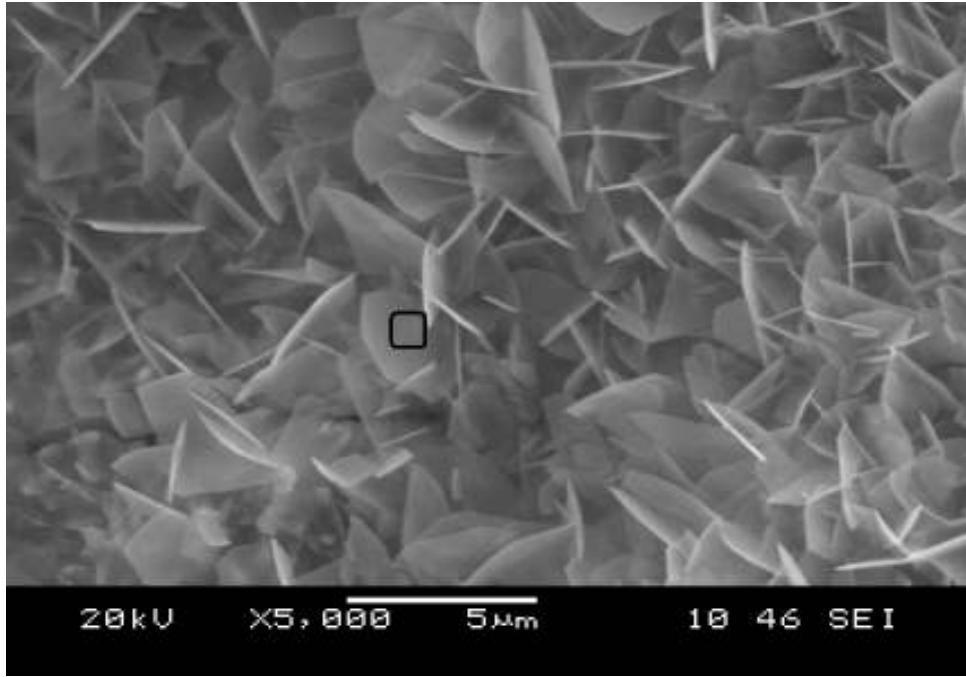


Şekil 5.70 Tablo 5.61'de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

Şekil 5.71’de, harç numunesinde gözlenen başka bir boşluğun uzaktan görüntüsü sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi boşluğun içi reaksiyon ürünleriyle dolmuştur. Bu reaksiyon ürünlerinden birinin üzerinde yapılan EDS analizinin yeri Şekil 5.72’de, sonuçları Tablo 5.62’de, grafiği Şekil 5.73’de sunulmuştur. Tablodaki sonuçlardan da görüleceği gibi, reaksiyon ürünleri yine kalsiyum ağırlıklı olmakla birlikte, silisyum da içeren bir yapıya sahiptir. Si/Ca oranı ve Na içeriğinin azlığı dikkate alındığında bu yapı, tobermorit olarak düşünülebilir.



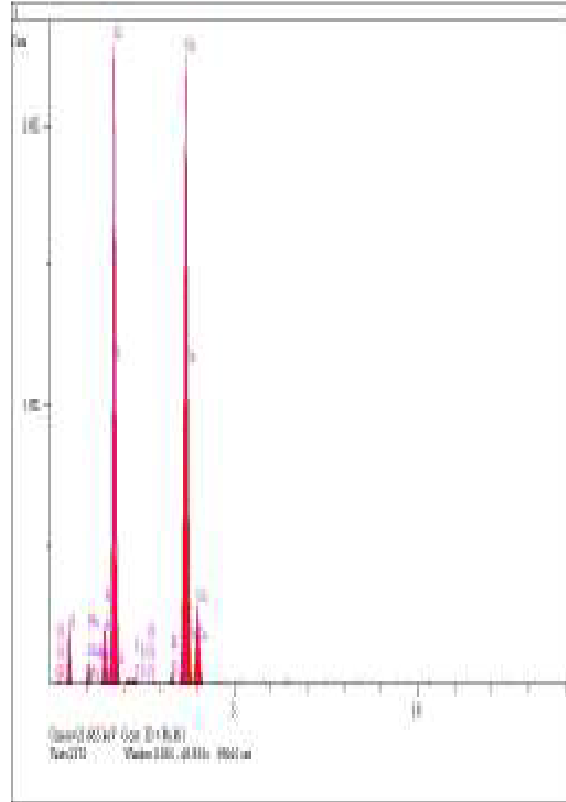
Şekil 5.71 İçi reaksiyon ürünleri ile dolmuş bir boşluğun uzaktan görüntüsü



Şekil 5.72 Boşluğun içindeki reaksiyon ürünlerinin yakından görüntüsü ve yapılan EDS analizinin yeri.

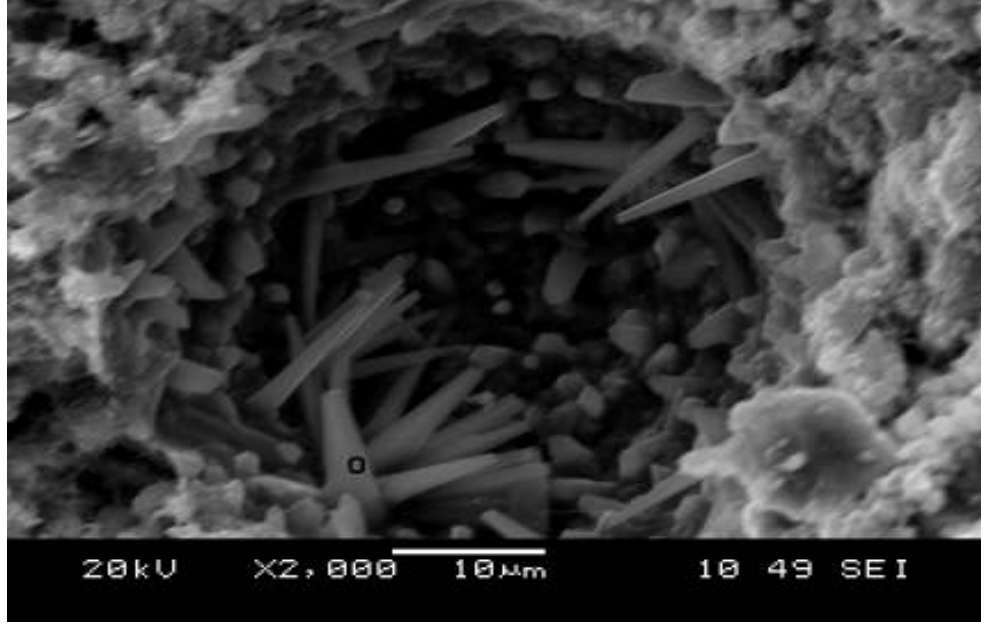
Tablo 5.62 Şekil 5.72’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
C	1,42
O	19,93
Na	1,56
Mg	0,04
Al	2,74
Si	29,16
S	0,42
Cl	0,08
K	0,53
Ca	44,14
C	1,42
Ca/Na	28,29
Si/Na	18,69
Si/Ca	0,66



Şekil 5.73 Tablo 5.62’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

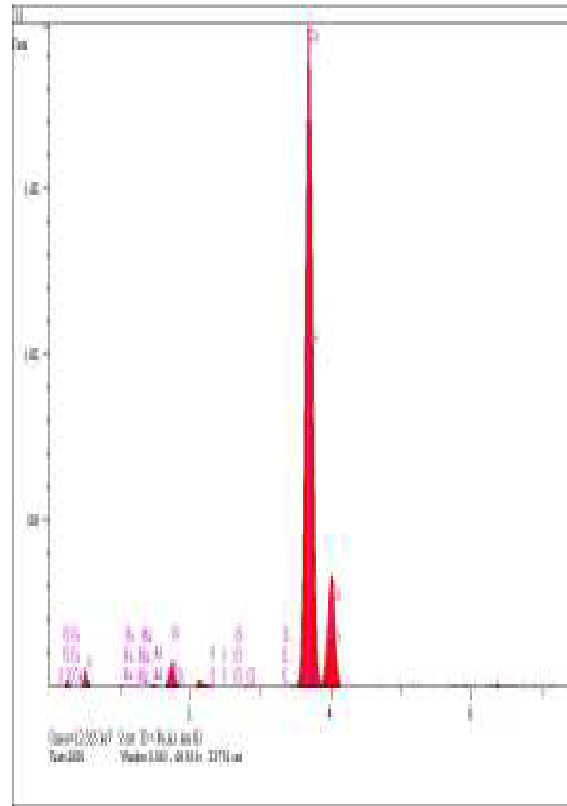
Şekil 5.74’de içi reaksiyon ürünü ile dolu bir boşluk görülmektedir. Bu bürünlerden biri üzerinde yapılan EDS analizinin sonuçları Tablo 5.63’de, grafiği Şekil 5.75’de sunulmuştur.



Şekil 5.74 Reaksiyon ürünü ile dolu boşluk ve EDS analizinin yeri

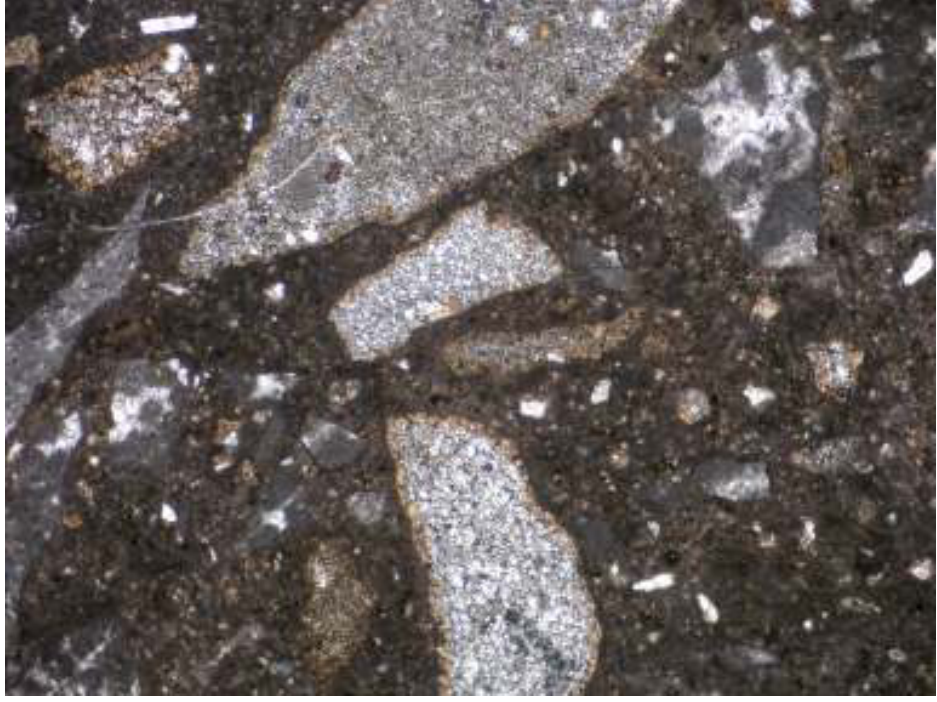
Tablo 5.63 Şekil 5.74’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
C	1,33
O	14,56
Na	0,33
Mg	0,09
Al	0,30
Si	2,12
S	0,17
Cl	0,02
K	0,02
Ca	81,07
C	1,33
Ca/Na	245,67
Si/Na	6,42
Si/Ca	0,03



Şekil 5.75 Tablo 5.63’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

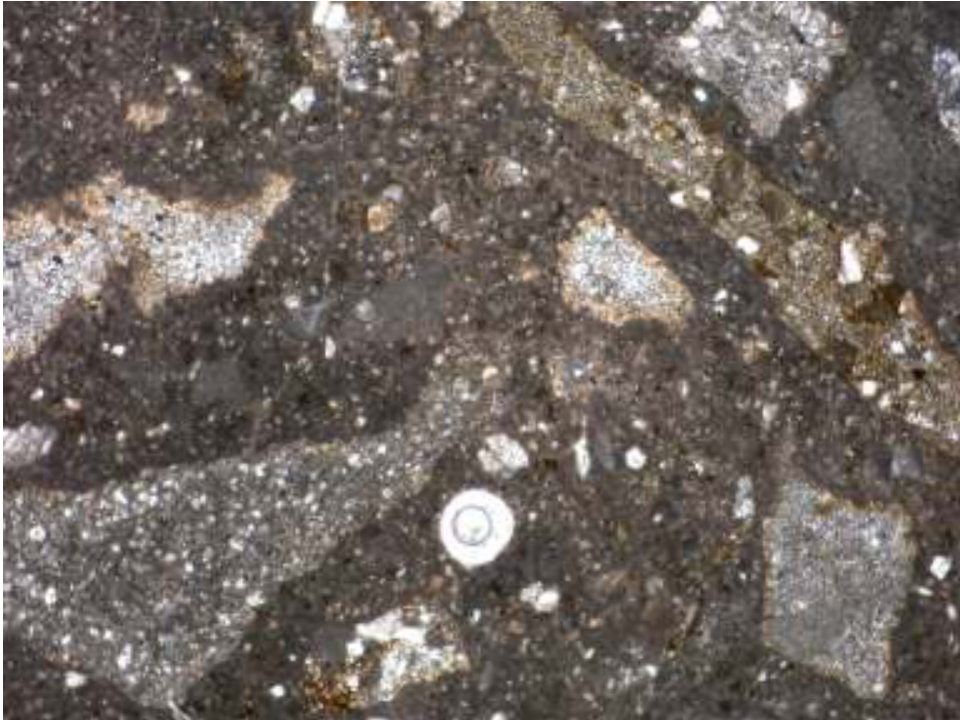
Şekil 5.76-5.79'da Zonguldak agregası kullanılarak hazırlanan mineral katkısız kontrol örneklerinden hazırlanan ince kesitlerden alınmış fotoğraflar sunulmuştur. Optik mikroskop altında çekilen fotoğraflarda, agregaların çevresindeki koyu renkli reaksiyon sınırları rahatlıkla seçilebilmektedir.



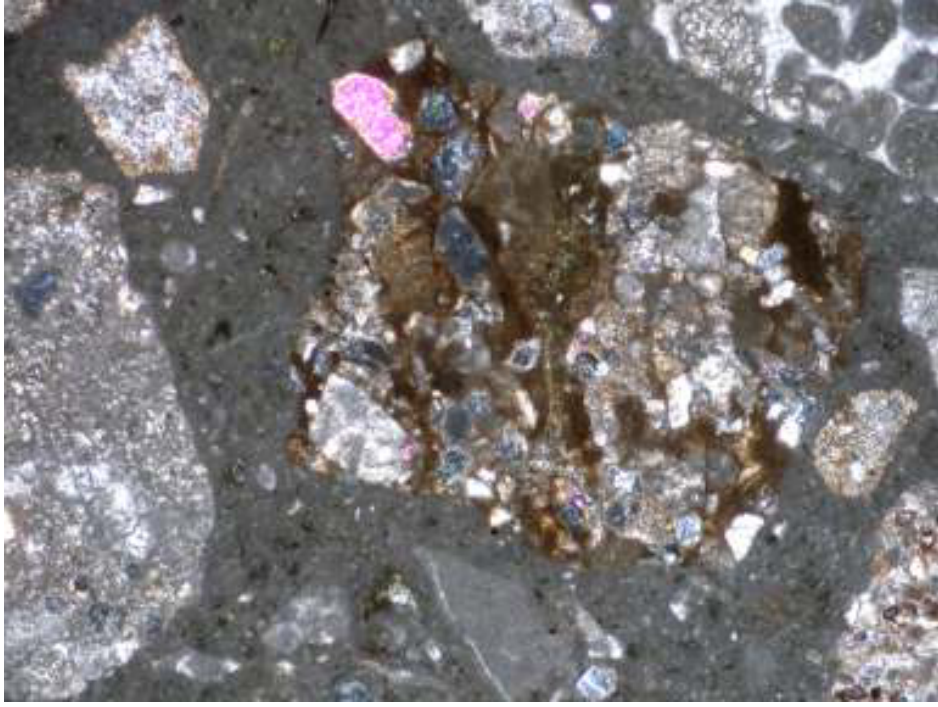
Şekil 5.76 Zonguldak agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü



Şekil 5.77 Zonguldak agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü



Şekil 5.78 Zonguldak agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü

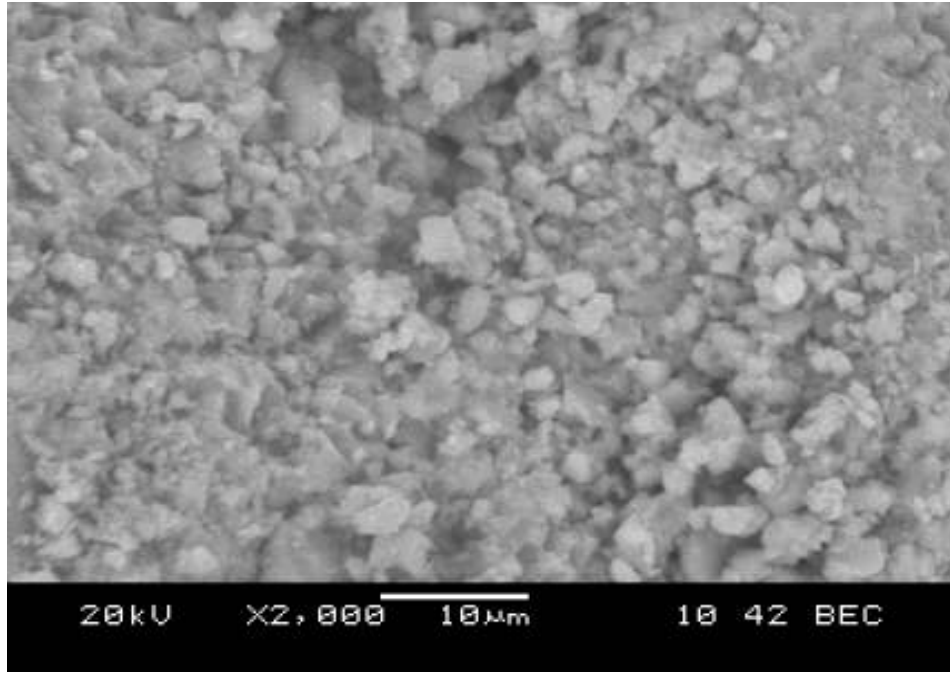


Şekil 5.79 Zonguldak agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü

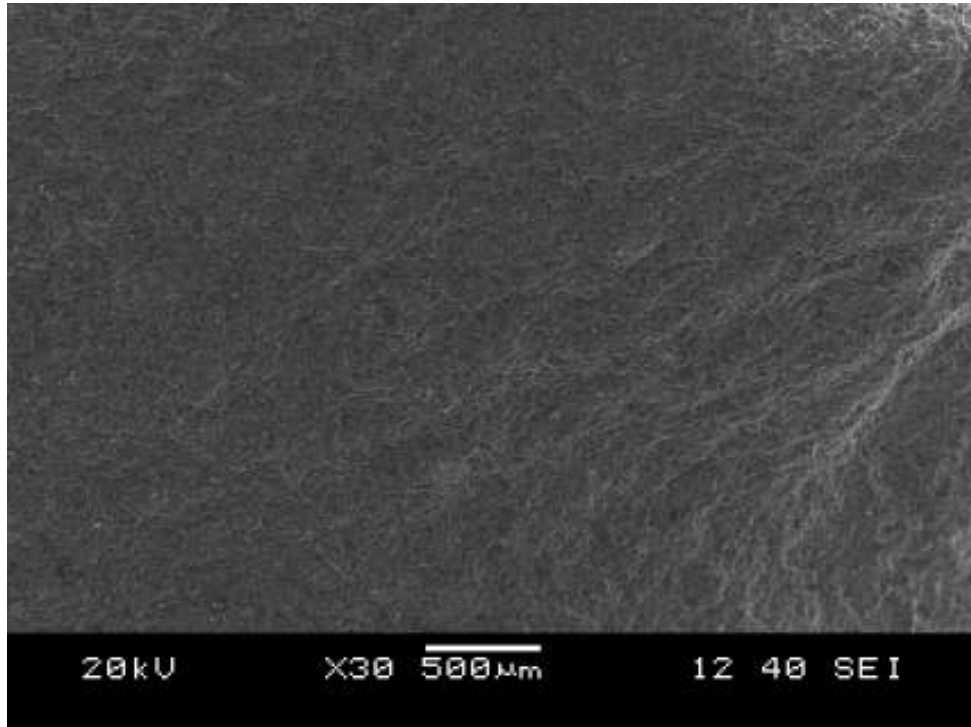
5.3.2 Kanada Agregası ile Hazırlanan Örneklerin İç Yapı İncelemeleri

5.3.1.1 Kanada Agregası Üzerinde Yapılan İç Yapı İncelemeleri

Şekil 5.80’de ve 5.81’de, Kanada agregasında çekilmiş fotoğraflar sunulmuştur. Fotoğraflarda, petrografik incelemeler sırasında görülen dolomit taneleri açıkça seçilebilmektedir. Aynı zamanda Şekil 5.81’de, Kanada agregası üzerinde yapılan genel EDS analizinin yapıldığı bölge gösterilmiştir. Bu analizin sonuçları Tablo 5.64’de, grafiği Şekil 5.82’de sunulmuştur.



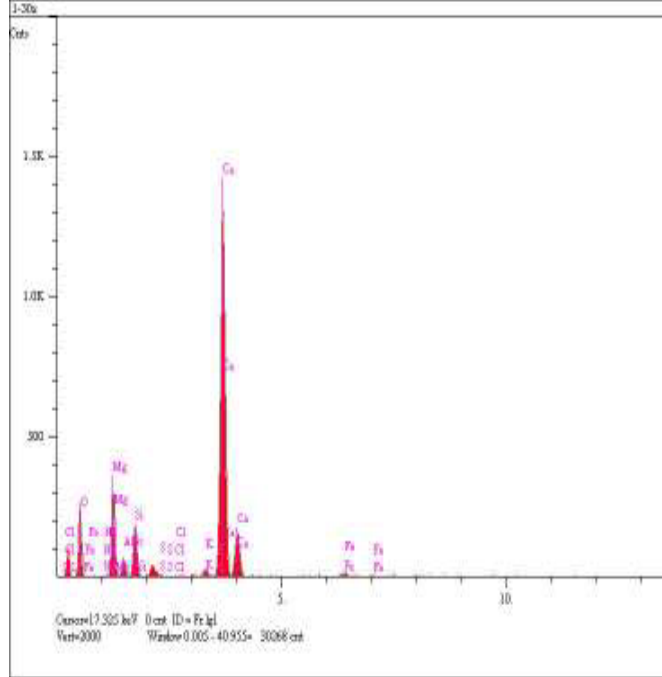
Şekil 5.80 Kanada agregasından alınmış bir SEM görüntüsü



Şekil 5.81 Kanada agregasında yapılan genel EDS analizinin yapıldığı bölge

Tablo 5.64 Şekil 5.81’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
O	37,46
Na	0,19
Mg	9,33
Al	1,78
Si	4,76
S	0,24
Cl	0,06
K	0,75
Ca	41,03
Fe	1,44

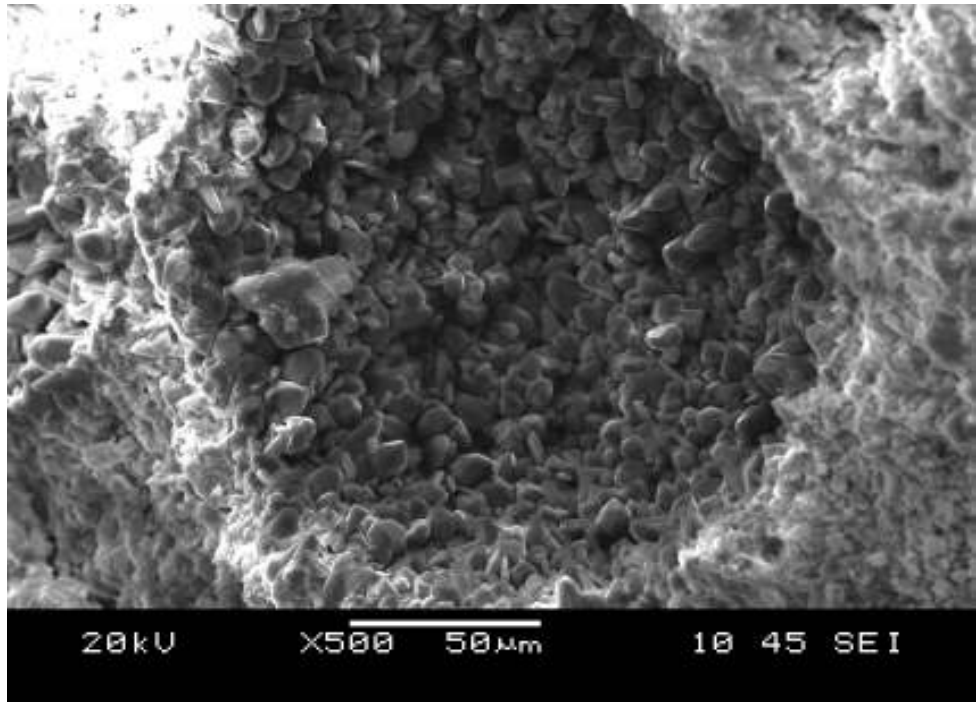


Şekil 5.82 Tablo 5.64’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

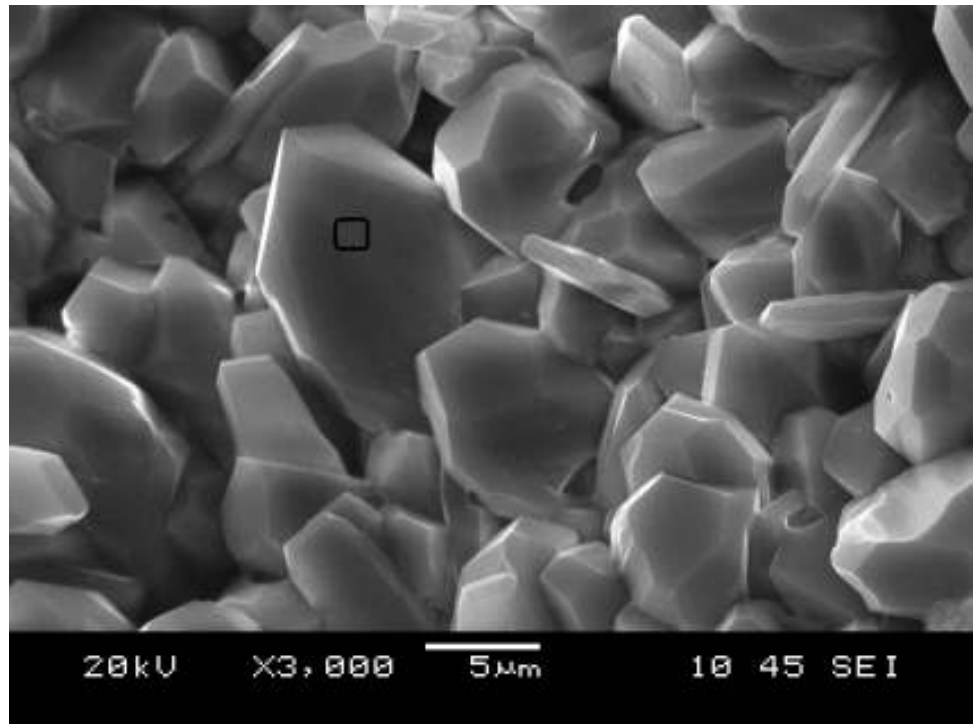
Tablo 5.64’den görüleceği gibi, yapılan EDS analizi sonucunda yüksek miktarda Kalsiyum bulunmuştur. Yapılan EDS analizi XRD analizi ile paralellik göstermektedir.

5.3.1.2 Kanada Agregası ile Hazırlanan Kontrol (Mineral Katkısız) Örnek Üzerinde Yapılan İç Yapı İncelemeleri

Şekil 5.83’de kanada agregası ile hazırlanan harç örneğindeki bir boşluk görülmektedir. Boşluğun içi tamamen reaksiyon ürünleri ile doludur. Bu reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüsü ve birinden yapılan EDS analizinin yeri Şekil 5.84’de gösterilmiştir. Bu analizin sonuçları Tablo 5.65’de, grafiği Şekil 5.85’de sunulmuştur. Bu şekillerde görülen ürünler ACR ürünü olarak tanımlanmıştır.



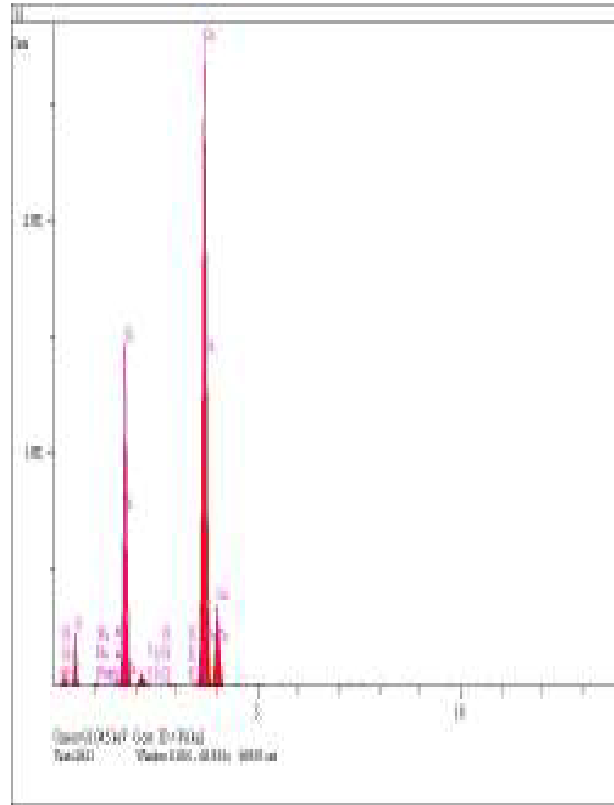
Şekil 5.83 Reaksiyon ürünü ile dolu boşluk



Şekil 5.84 Reaksiyon ürünlerinin yakından görüntüsü ve EDS analizinin yeri

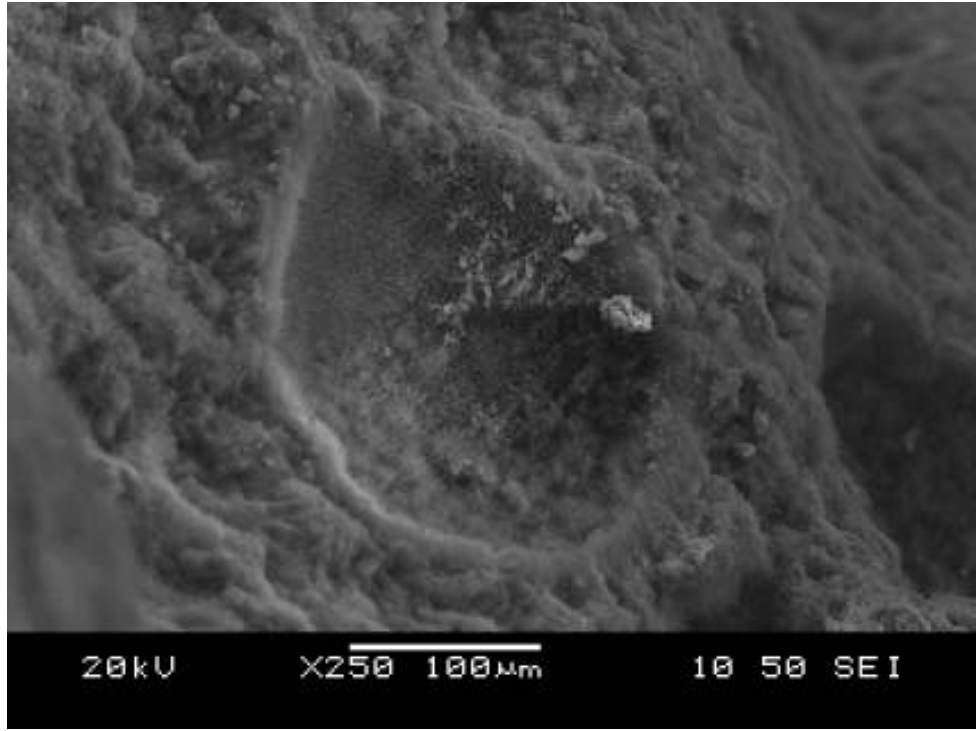
Tablo 5.65 Şekil 5.84’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
C	3,99
O	24,60
Na	0,44
Mg	0,14
Al	0,17
Si	18,17
S	0,22
Cl	0,11
K	0,00
Ca	52,14
C	3,99
Ca/Na	118,50
Si/Na	41,30
Si/Ca	0,35

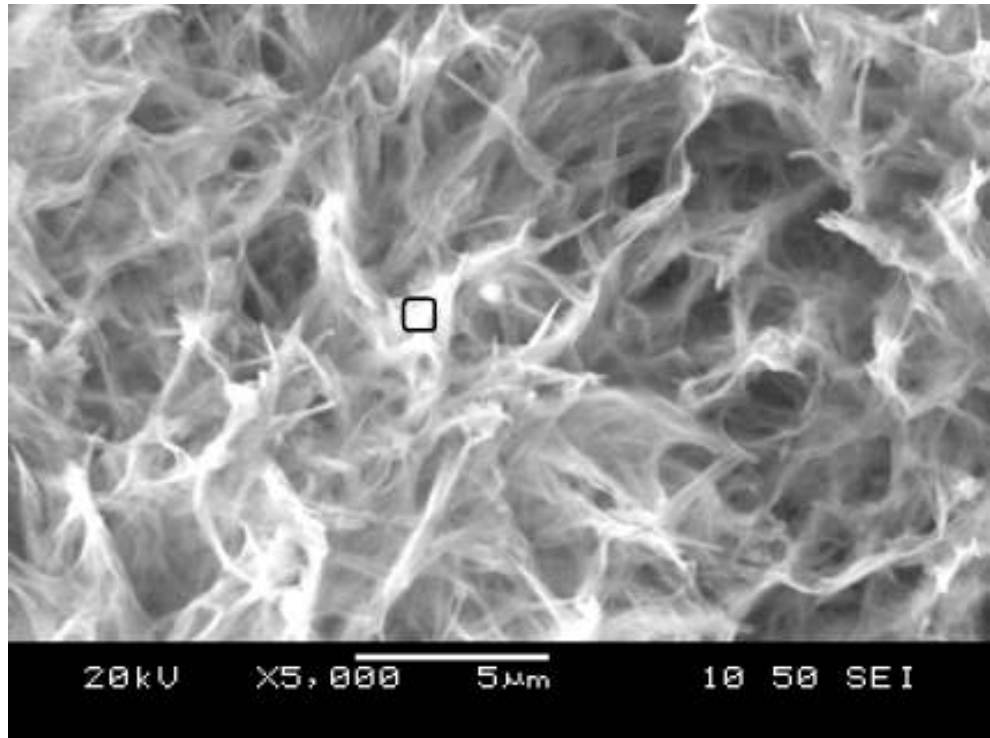


Şekil 5.85 Tablo 5.65’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

Şekil 5.86’da örneğin genel bir görüntüsü verilmiştir. Görüntünün ortasındaki boşluğun yakın görüntüsü ve EDS analizinin yeri Şekil 5.87’de sunulmuştur. Bu analiz sonuçları Tablo 5.66’da, grafiği ise Şekil 5.88’de sunulmuştur. Bu boşluğun içindeki reaksiyon ürününün ASR sonucu olduğu düşünülmektedir.



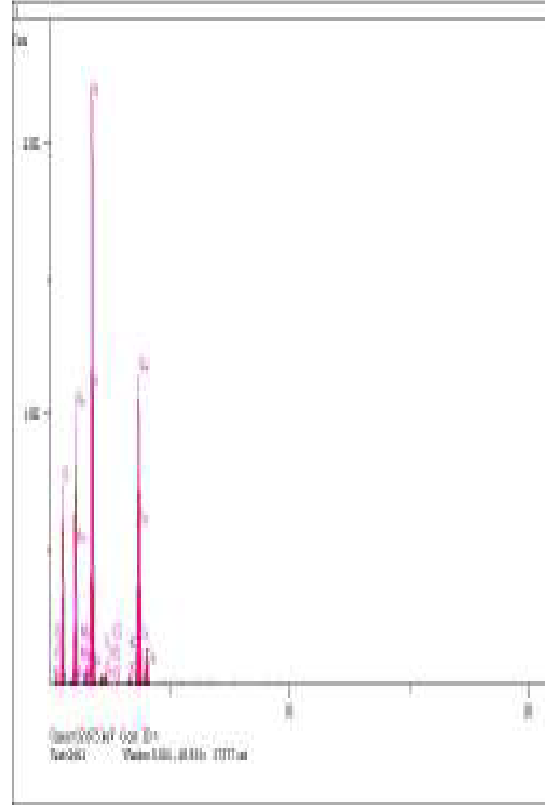
Şekil 5.86 Reaksiyon ürünü içeren küresel boşluk



Şekil 5.87 Reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüsü ve EDS analizinin yeri

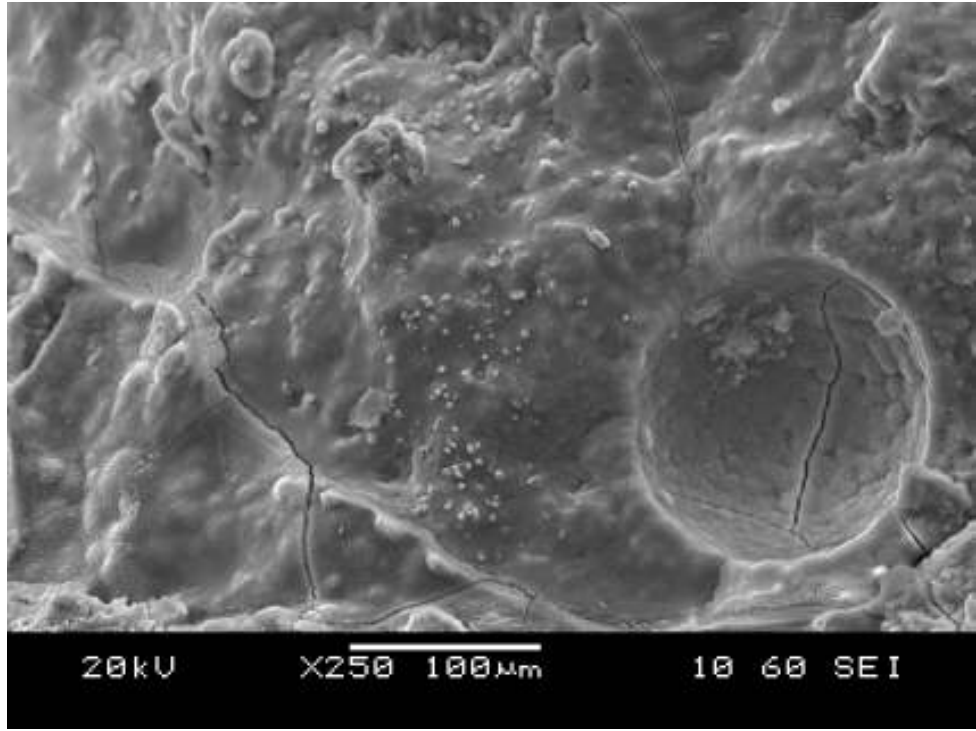
Tablo 5.66 Şekil 5.87’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
C	4,18
O	35,03
Na	14,59
Mg	0,01
Al	2,88
Si	25,41
S	0,71
Cl	0,04
K	0,54
Ca	18,58
Ca/Na	1,27
Si/Na	1,74
Si/Ca	1,37

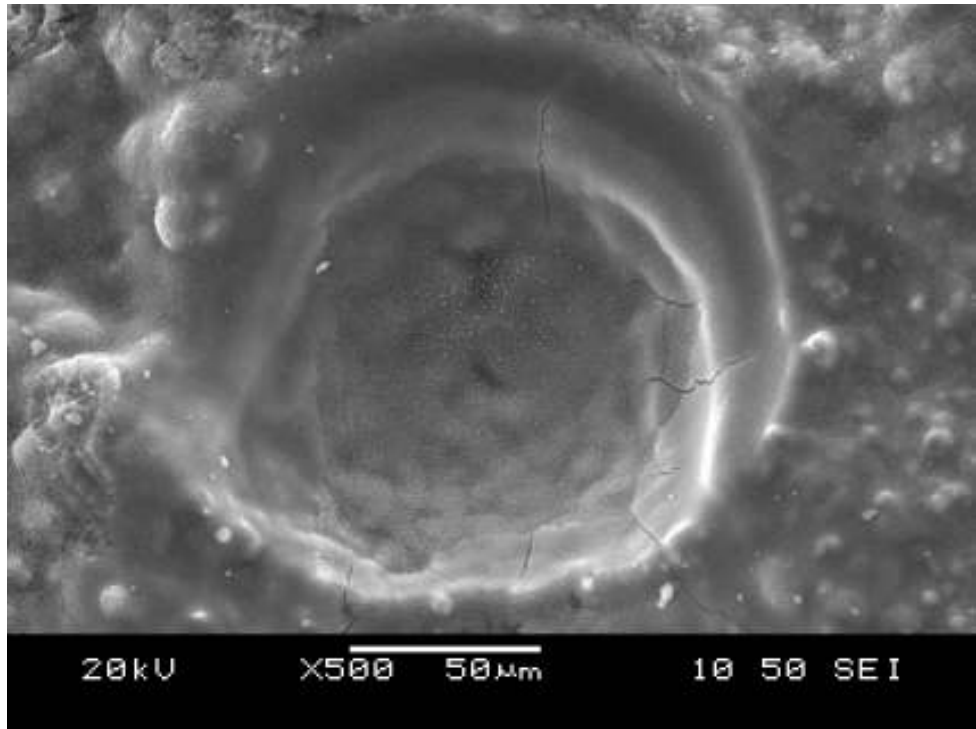


Şekil 5.88 Tablo 5.66’da sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

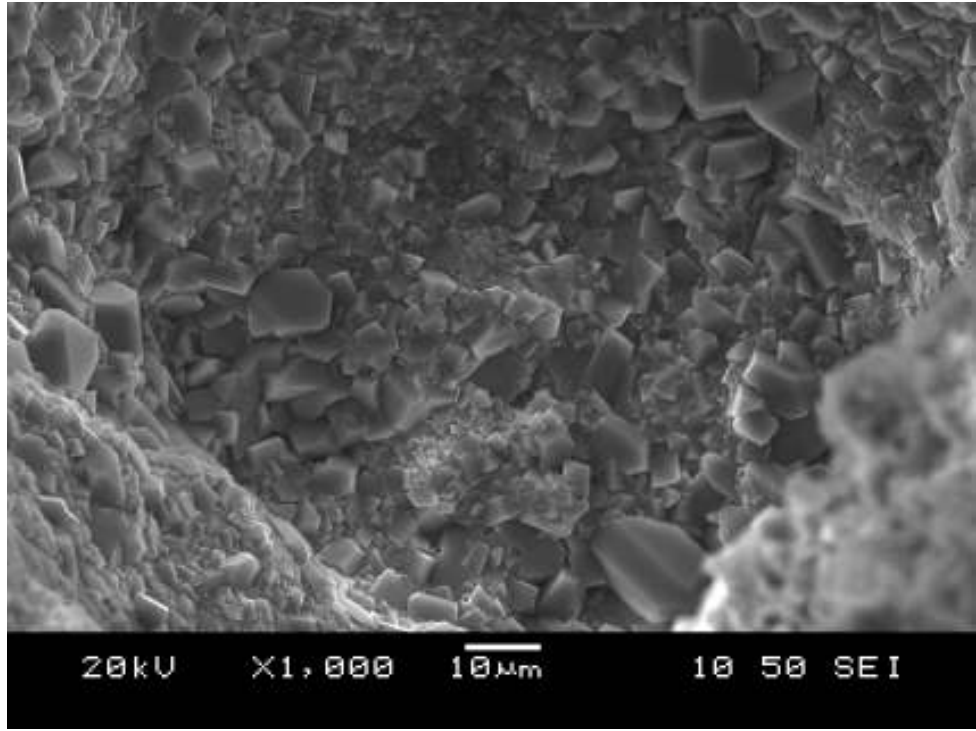
Şekil 5.89-5.94’de, örneğin çeşitli bölgelerinden alınmış görüntüler verilmiştir.



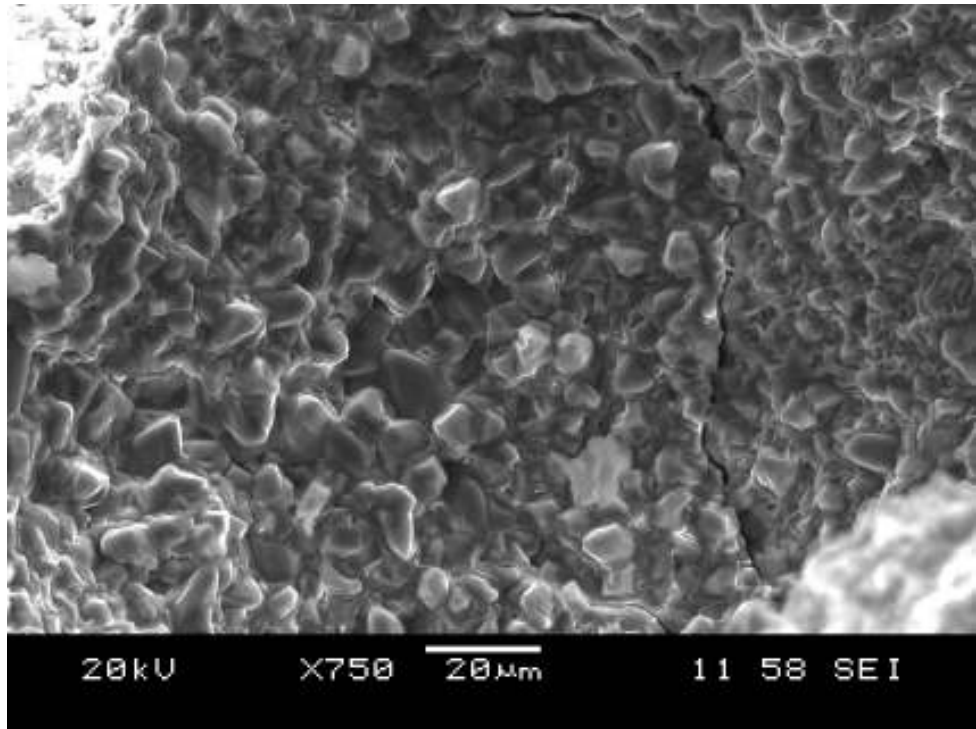
Şekil 5.89 Küresel bir boşluktaki reaksiyon ürünleri



Şekil 5.90 Küresel bir boşluktaki reaksiyon ürünleri

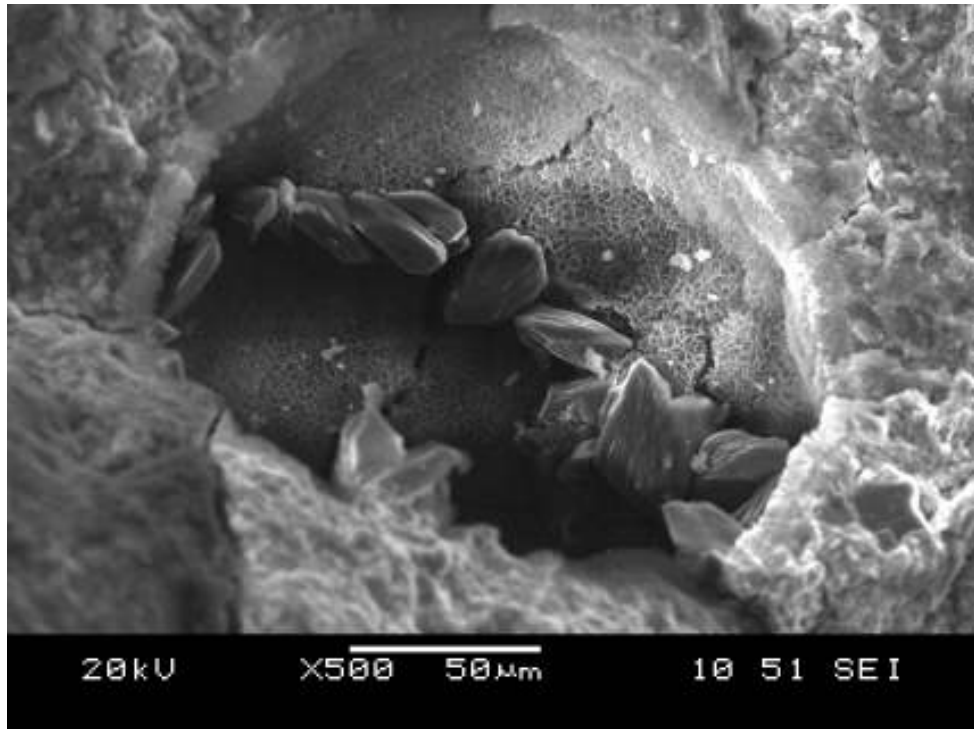


Şekil 5.91 Küresel bir boşluktaki reaksiyon ürünleri

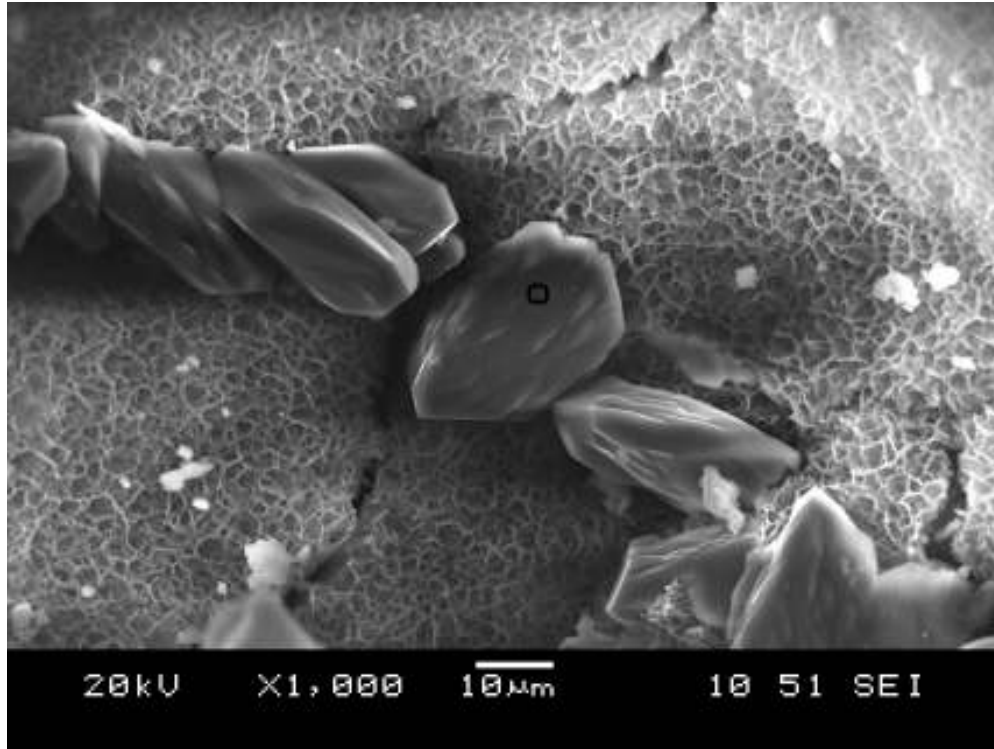


Şekil 5.92 Alkali-Karbonat Reaksiyonu ürünleri

Şekil 5.93’de bir çukurun içinde oluşan değişik şekillerdeki reaksiyon ürünleri görülmektedir. Bu ürünlerin yakın bir görüntüsü ve yapılan EDS analizinin yeri Şekil 5.94’de sunulmuştur. Analizin sonuçları Tablo 5.67’de, grafiği Şekil 5.95’de gösterilmiştir. Bu ağsı yapı tipik bir ASR ürünüdür. Büyük taneli yapıların ise, yapılan EDS analizleri sonucunda kalsit taneleri oldukları anlaşılmıştır. Farklı analizlere sahip ve farklı şekillerdeki iki reaksiyon ürününün bir arada görülmesi, Alkali-Karbonat ve Alkali-Silika Reaksiyonlarının bir arada oluştuğuna işaretir.



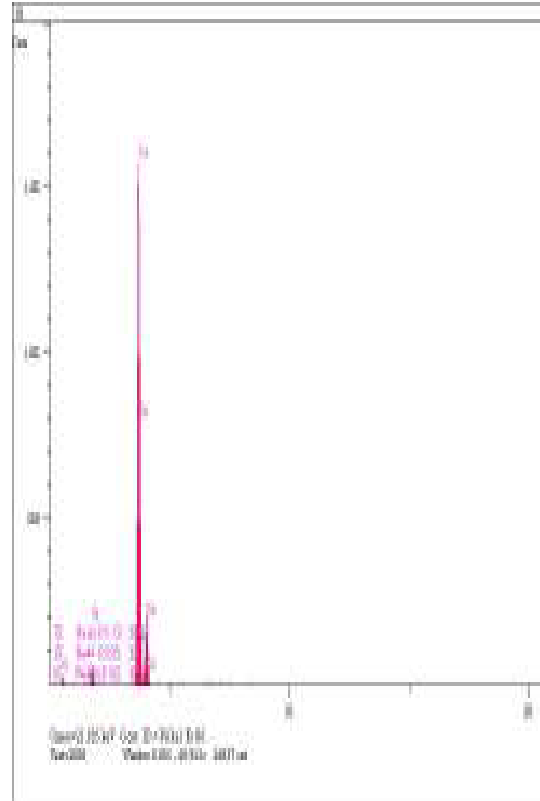
Şekil 5.93 Çukurun içinde oluşan değişik reaksiyon ürünlerinin genel görüntüleri



Şekil 5.94 Reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüleri ve EDS analizinin yeri

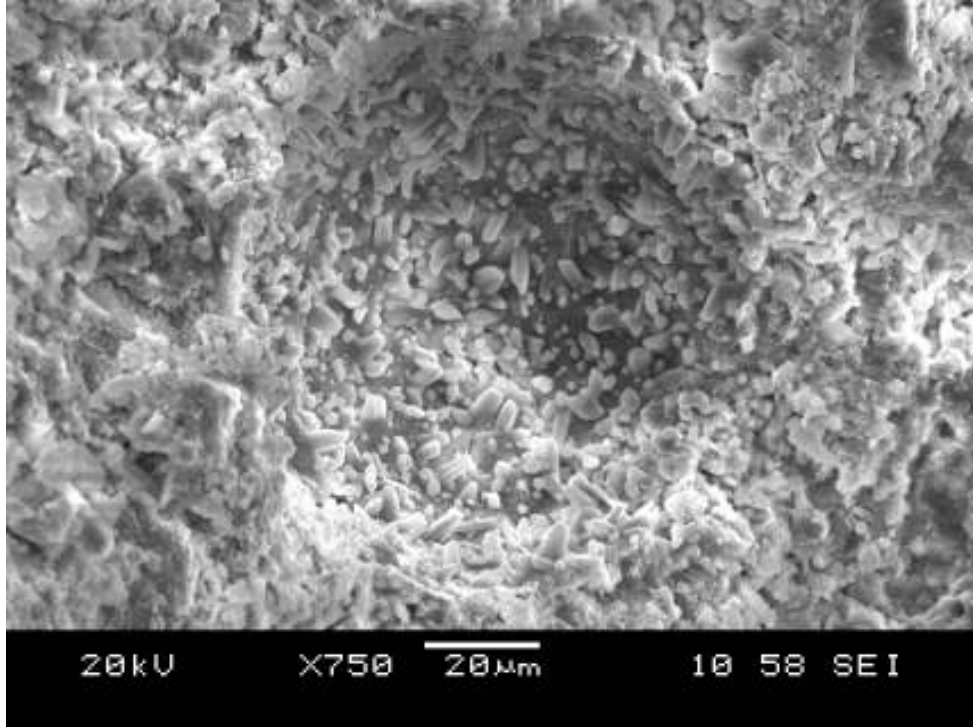
Tablo 5.67 Şekil 5.94’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
C	0,14
O	12,99
Na	0,29
Mg	0,05
Al	0,18
Si	2,52
S	0,02
Cl	0,10
K	0,03
Ca	83,65
Ca/Na	288,45
Si/Na	8,69
Si/Ca	0,03

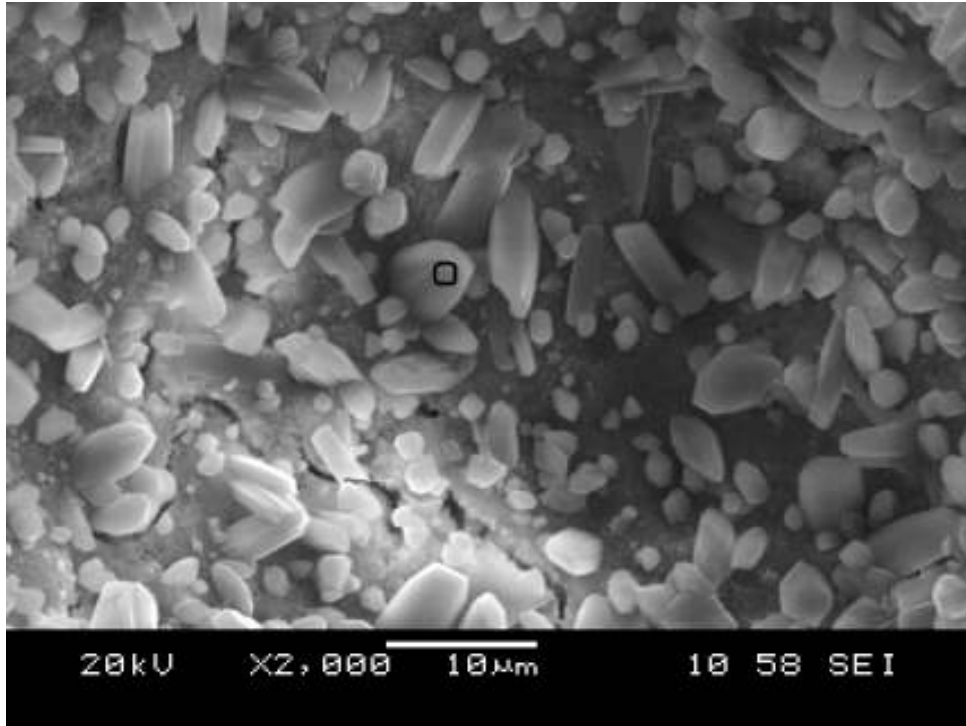


Şekil 5.95 Tablo 5.67’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

Şekil 5.96'da, bir boşluğun içinde oluşan kalsit taneleri görülmektedir. Bu kalsit tanelerinin yakından alınmış görüntüleri ve yapılan EDS analizinin yeri Şekil 5.97'de sunulmuştur. Bu analizin sonuçları Tablo 5.68'de, grafiği Şekil 5.98'de gösterilmiştir.



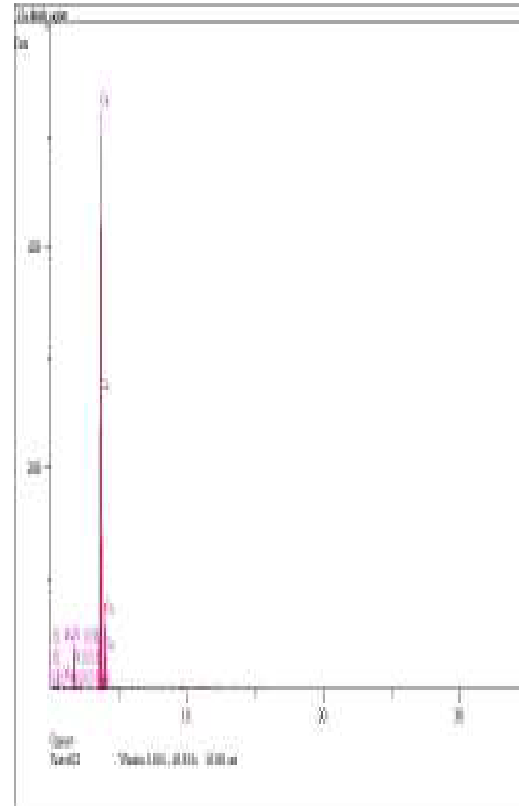
Şekil 5.96 Boşluğun içinde oluşan kalsit tanelerinin genel görüntüsü



Şekil 5.97 Kalsit tanelerinin yakın görüntüsü ve EDS analizinin yeri

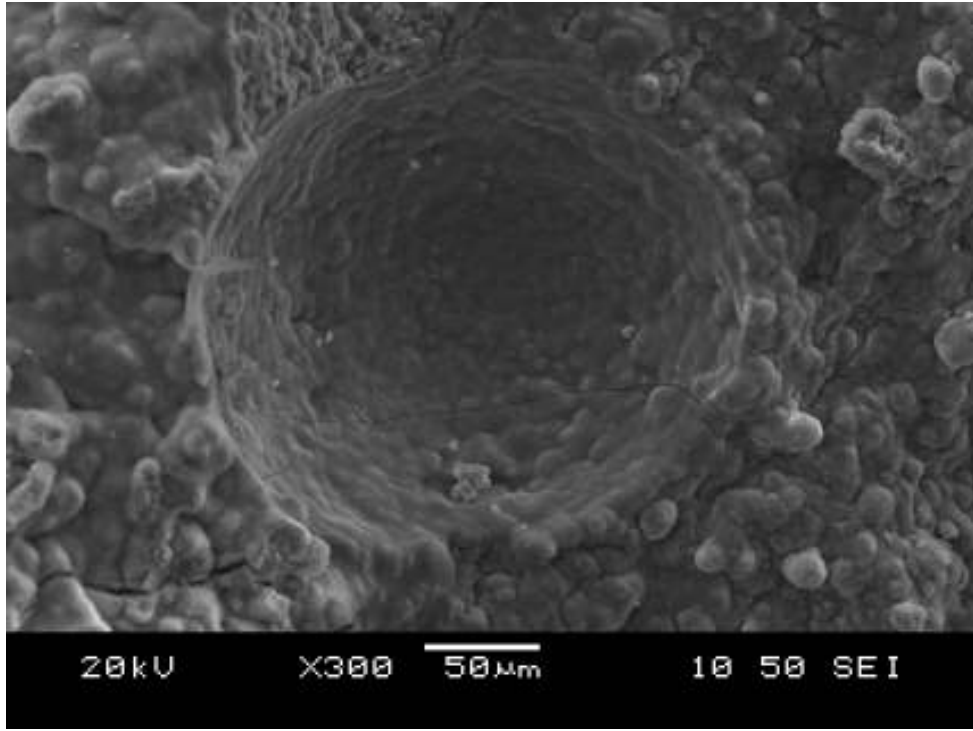
Tablo 5.68 Şekil 5.97'de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
C	1,27
O	18,90
Na	0,81
Mg	0,15
Al	0,17
Si	4,38
S	0,11
Cl	0,07
K	0,00
Ca	74,14
Ca/Na	91,53
Si/Na	5,41
Si/Ca	0,06

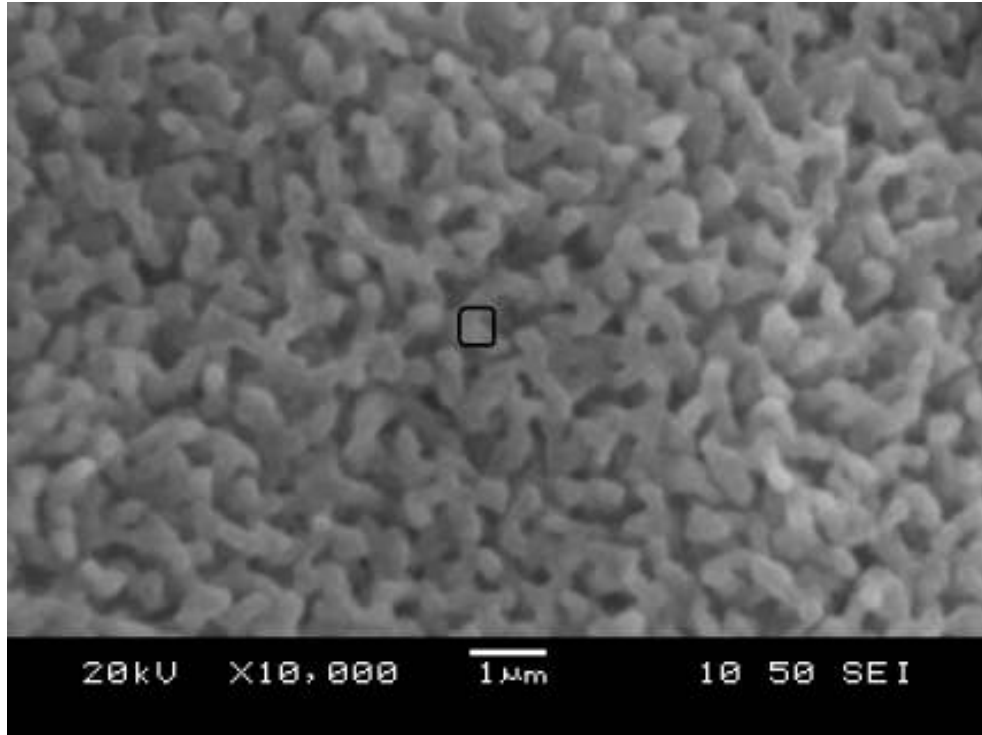


Şekil 5.98 Tablo 5.68'de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

Şekil 5.99'da, içinde reaksiyon ürünü oluşmuş bir boşluğun genel bir görüntüsü verilmiştir. Bu boşluğun yakın bir görüntüsü ve reaksiyon ürünü üzerinde yapılan EDS analizinin yeri Şekil 5.100'de gösterilmiştir. Bu analizin sonuçları Tablo 5.69'da, grafiği Şekil 5.101'de gösterilmiştir.



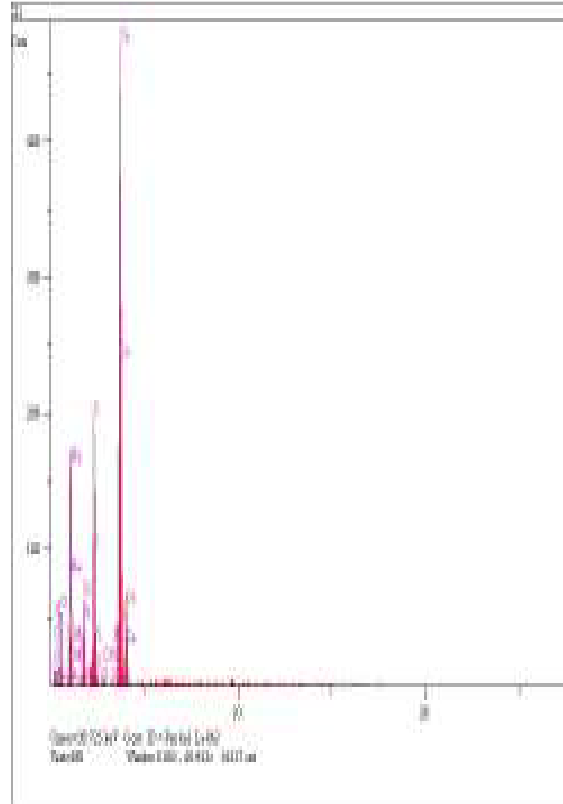
Şekil 5.99 Reaksiyon ürünün ile dolmuş bir boşluğun genel bir görüntüsü



Şekil 5.100 Reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüsü ve EDS analizinin yeri

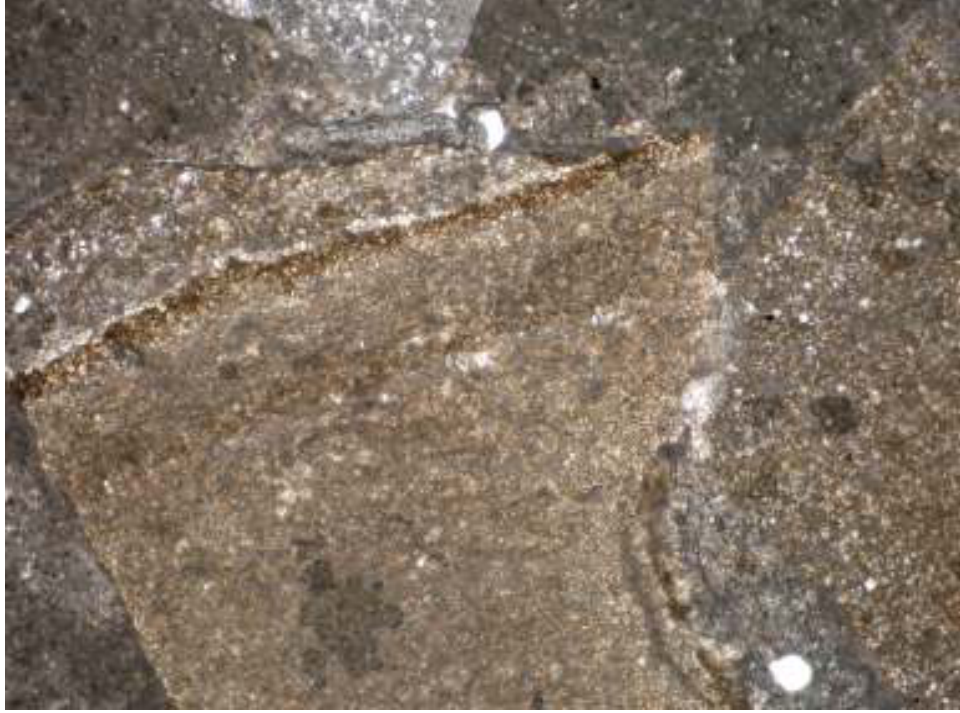
Tablo 5.69 Şekil 5.100’da işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları

Element	%
C	7,21
O	27,52
Na	14,62
Mg	0,00
Al	0,08
Si	3,19
S	10,74
Cl	0,00
K	0,18
Ca	36,48
Ca/Na	2,50
Si/Na	0,22
Si/Ca	0,09



Şekil 5.101 Tablo 5.69’da sonuçları verilen EDS analizinin grafiği

Şekil 5.102-5.104’de Kanada agregası kullanılarak hazırlanan mineral katkısız kontrol örneklerinden hazırlanan ince kesitlerden alınmış fotoğraflar sunulmuştur. Tıpkı Zonguldak agregasından alınan fotoğraflarda olduğu gibi, bu fotoğraflarda da agregaların çevresindeki koyu renkli reaksiyon sınırları rahatlıkla seçilebilmektedir.



Şekil 5.102 Kanada agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü



Şekil 5.103 Kanada agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü



Şekil 5.104 Kanada agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü

Yapılan iç yapı incelemeleri sonucunda hem Kanada hem de Zonguldak agregalarıyla hazırlanan örneklerde reaksiyon ürünlerine ve çatlaklara rastlanmıştır. Optik mikroskop fotoğraflarında da, agrega ve çimento arayüzünde benzer şekilli reaksiyon ürünlerine rastlanmıştır.

Zonguldak agregası kullanılarak hazırlanan mineral katkısız harç örneklerinde görülen reaksiyon ürünleri üzerinde yapılan EDS analizleri göstermiştir ki bazı ürünler Silisyum ağırlıklı iken bazı ürünler Kalsiyum ağırlıklıdır. Ayrıca örneklerin bazı bölgelerinde, literatürde tipik ASR ürünü olarak kabul görmüş çatlamış kilimsi yapılar gözlenirken bazı bölgelerde ise Kalsiyum ağırlıklı, yapraksı ürünler gözlenmiştir. Bu bulgular Zonguldak agregasında hem ACR hem de ASR görüldüğünü işaret etmektedir.

Kanada agregası ile hazırlanan mineral katkısız örneklerde de Zonguldak agregası ile hazırlanan örneklerde elde edilenlere benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örnekler arasındaki en büyük farkın, Kanada agregası ile hazırlanan örneklerde, daha fazla ACR ürünü bulunması ve Zonguldak agregasında görülen reaksiyon ürünlerinin, Kanada agregasına kıyasla daha fazla silisyum ağırlıklı olması olduğu söylenebilir. Zonguldak agregasında ASR'nin ACR'den baskın olması, bunun sebebi olabilir.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Yapılan ön denemeler sonucunda, agregadaki Kalsiyum ve Magnezyum miktarı ne kadar fazla olursa olsun, silis içermediği sürece tehlikeli genişmeye sebep olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca Alkali-Silika Reaksiyonundan farklı olarak, Alkali-Karbonat Reaksiyonunda agreganın dokusu da çok önemlidir. Yüksek miktarda Silisyum içeren fakat mikro dokusu reaktif agrega dokusuna uymayan bazı agregalarda dahi tehlikeli genişme gözlenmemiştir. Ayrıca hem Zonguldak agregasında hem de Kanada agregasında bol miktarda quartz vardır. Bu durumda agreganın bünyesindeki quartzın da genişmede etkili olduğu düşünülebilir.

Kısacası karbonat kayaçlardaki reaktivite aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Agreganın silis içeriği
- Agregada bünyesindeki quartz
- Agreganın mikro dokusu

Deneysel çalışmalardan elde edilen başlıca bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Türkiye genelinde, 26 farklı kaynaktan temin edilen dolomitik kireçtaşlarında yapılan taramada alkali-karbonat reaksiyonunun sadece Zonguldak agregasında olduğu görülmüştür. Bu bulgu, literatürdeki ACR'nin ASR ile birlikte olduğu, dolayısıyla dolomit agregasında ACR oluşması için bünyesinde SiO_2 bulunması gerektiği tezini doğrulamaktadır.
- 2) Hem Zonguldak hem de referans Kanada agregasında ACR ile ASR'nin birlikte geliştiği görülmüştür.
- 3) Zonguldak agregasının yüzey dokusu ve petrografik analizi referans Kanada agregası ile örtüşmektedir.

- 4) Zonguldak agregasının 0-4 mm tane boyutu ile çalışılan AAR2 yönteminde, 4-8 mm tane boyutu ile çalışılan AAR5 yöntemine kıyasla daha fazla genleşmeler görülmüştür.
- 5) Uçucu kül ve yüksek fırın curufu her iki agregada ve her iki yöntemde genleşmeyi reaktivite sınırı olarak kabul edilen %0,1 değerinin altına çekmişlerdir.
- 6) Mineral katkıların; Zonguldak agregasında AAR2 yönteminde, referans Kanada agregasında ise AAR5 yönteminde genleşmeyi azaltmada daha etkili oldukları anlaşılmıştır.
- 7) Tüm bu bulgular dikkate alındığında Zonguldak agregasında ASR'nin, referans Kanada agregasında ise ACR'nin daha baskın olduğu düşünülmektedir.
- 8) SEM incelemeleri her iki agregada da hem ASR hem de ACR ürünleri bulunduğunu göstermiştir.
- 9) Reaksiyon ürünleri, harçlar üzerinde yapılan petrografik incelemelerde de tespit edilmiştir.

6.2 Öneriler

Elde edilen sonuçların uzun dönemli yöntemlerle ve beton karışımları üzerinde yapılacak deneylerle kıyaslanması faydalı olabilir. Ayrıca katkı kullanılarak hazırlanan harç örnekleri üzerinde SEM incelemeleri yapılması, mineral ve kimyasal katkıların reaksiyonu önleme mekanizması hakkında daha sağlıklı sonuçlar verebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S. ve Abu-Tair, A.I. (2003). The Effect Of Alkali Reactivity On The Mechanical Properties Of Concrete. *Construction and Building Materials*, V17, s123-144.
- American Concrete Institute (ACI) (1987). "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete." *ACI Manual Practice—Part 1*. ACI 226.1R-87. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- American Concrete Institute (ACI) (1992a). "Guide to Durable Concrete." *ACI Manual of Concrete Practice—Part 1*. ACI 201.2R-92. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- American Concrete Institute (ACI) (1998). "State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity." *ACI Manual of Concrete Practice—Part 1*. ACI 221.1R-98. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Baradan, B., Yazıcı, H., ve Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No. 298.
- Baradan, B. (2004). *Yapı Malzemesi II*. D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No. 207, 221.
- Barlow, D.F. ve Jackson, P.J. (1988). The release of alkalis from pulverised-fuel ashes and ground granulated blastfurnace slags in the presence- of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, V18, sf 235-248.
- Blanks, R.F. (1941). Concrete Deterioration at Parker Dam, *Engineering News Record*, V126, sf462-465.
- Blanks, R.F. ve Meissner, H.S. (1941). The expansion test as a measure of alkali aggregate reaction. *Journal of the American Concrete Institute* V17, sf 517–539.

- Chau, L. (1989). Effect of external alkalis on alkali-silica reaction. *Proceedings of the 3rd CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway.
- Chen H., Soles J.A. ve Malhotra V.M. (1993). Investigations on Supplementary Cementing Materials for Reducing Alkali-Aggregate Reactions, *Cement and Concrete Composites*, *V15*, sf 75-84.
- Çakır, Ö.A. (2007). Alkali Agrega Reaktivitesinin Tespitinde Kullanılan Deney Metotlarının İncelenmesi. Ege Üniversitesi Matbaası.
- Dent-Glasser, L.S.D. ve Kataoka, N. (1981a). The Chemistry of "Alkali Aggregate Reactions". *Proc. 5th Int. Conf. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Cape Town.
- Dent-Glasser, L.S.D. ve Kataoka, N. (1981b). The Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction. *Cement and Concrete Research*, *VII*, Pergamon Press Ltd. 1-9.
- Durand, B., Berard, J. ve Soles, J.A. (1987). Comparison of the effectiveness of mineral admixtures to counteract alkali aggregate reaction. *Concrete Aggregate Reaction*. Noyes Publications, New Jersey.
- Erdoğan, T.Y. (2003). *Beton*. Semih Offset Matbaacılık Yayıncılık ve Ambalaj San. Tic. LTD. ŞTİ., Ankara.
- Grattan-Bellew P.E., Mitchell L. (2002). Preventing Concrete Deterioration Due to Alkali-Aggregate Reaction, *Construction Technology*, No:52.
- Grattan-Bellew, P.E., Margeson, J., Mitchell, L.D. ve Min, D. (2008). Is ACR Just Another Variant of ASR? Comparison of Acid Insoluble Residues of Alkali-Silica and Alkali-Carbonate Reactive Limestones and its Significance for the ASR/ACR Debate. *Proceeding of the 13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Trondheim.

- Grattan-Bellew, P.E. ve Danay, A. (1992). Comparison of laboratory and field evaluation of alkali silica reaction in large dam. *Proceedings of the International Conference on Concrete AAR in Hydroelectric Plants and Dams*, Canadian Electrical Association in association with Canadian National Committee of ICOLD, Fredericton, Canada.
- Gutteridge, W.A., (1985). The alkali-silica reaction in structural concrete. *Conference on Concrete in Construction*, Stoneleigh, Warwickshire, UK.
- Güngör Madencilik LTD ŞTİ, (2006), <http://www.dolomit.com.tr/rezerv.html>, 2006.
- Haddad, R.H. ve Qudah, A. (2005). Alkali-Silica Reaction Expansions In High-Performance And Normal-Strength Cement Grouts Reinforced With Steel And Synthetic Fibers. *Mechanics Of Composite Materials*, V41, No:1.
- Hadley, D.W. (1964). Symposium on Alkali-Carbonate Rock Reactions, *American Highway Research Record*, No:45, Washington.
- Hewlett, P.C. (2006). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier LTD.
- Jensen, V. ve Fournier, B. (2000). Influence of different procedures on accelerated mortar bar and concrete prism tests: Assessment of seven Norwegian Alkali-Reactive Aggregates. *Proceeding of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Quebec, Kanada.
- Katayama, T. (1992). A critical review of carbonate rock reaction, is their reactivity useful or harmful, *Proceedings of 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Concrete Society, London, UK, sf 508-518.
- Katayama, T. (2000). Alkali Aggregate Reaction In The Vicinity Of Izmir, Western Turkey, Alkali Aggregate Reaction In Concrete. *Proceedings of 11th International Conference*, Canada.

- Katayama, T. (2004). How to Identify Carbonate Rock Reactions in Concrete. *Materials Characterization*. V53, sf85-104.
- Katayama, T. ve Sommer, H. (2008) Further Investigation Of The Mechanisms Of So- Called Alkali-Carbonate Reaction Based On Modern Petrographic Techniques. *Proceeding of the 13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Trondheim.
- Larbi, A.J. ve Hudec, P.P. (1990). Study of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Measurement and Prevention. Part II. AR in Saturated Hot and Cold NaCl Solutions, *Cement and Concrete Research*, V20, sf 73-78.
- Larive, C., Laplaud, A. ve Coussy, O. (2000). The role of water in alkali-silica reaction. *Proceedings 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Quebec, Canada.
- Liang, T. ve Mingshu, T. (1995). Correlation between reaction and expansion of alkali-carbonate reaction. *Cement and Concrete Research*, V25 sf 470-476.
- Locher, F.W. (1973). Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion. Vorbeugende Massnahmen gegen Alkalireaktion im Beton, VDZ, *Schriftenreihe der Zementindustrie Heft*.
- Lopez-Buendia, A.M., Climent V. ve Verdu P. (2006). Lithological Influence of Aggregate in the Alkali-Carbonate Reaction, *Cement and Concrete Research*, V36, sf 1490-1500.
- Lopez-Buendia, A.M., Climent, V., Urquiola, M.M. ve Bastida, J. (2008). Influence Of Dolomite Stability On Alkali-Carbonate Reaction. *Proceeding of the 13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Trondheim.

- Lu, D., Mei, L., Xu, Z., Tang, M. ve Fournier, B. (2006). Alteration of Alkali Reactive Aggregates Autoclaved in Different Alkali Solutions and Application to Alkali–Aggregate Reaction in Concrete (I) Alteration of Alkali Reactive Aggregates in Alkali Solutions. *Cement and Concrete Research*, V36 sf1176-1190.
- Lu, D., Mei, L., Xu, Z., Tang, M. ve Fournier, B. (2006). Alteration of Alkali Reactive Aggregates Autoclaved in Different Alkali Solutions and Application to Alkali–Aggregate Reaction in Concrete (II) Expansion and Microstructure of Concrete Microbar. *Cement and Concrete Research*, V36, sf 1191-1200.
- Meissner, H.S. (1941). Cracking In Concrete Due To Expansion Reaction Between Aggregate And High Alkali Cement as Evidenced At Parker Dam. *Proceedings of American Concrete Institute*.
- Mielenz, R.C., Green, K.T. ve Benton, E.J. (1947). Chemical test for the reactivity of aggregate with cement alkalis: chemical processes in cement aggregate reaction. *American Concrete Institute*, Pr. 44, 193–224.
- Min, D. ve Mingshu, T. (1993). Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks. *Cement and Concrete Research*, V23, sf 1397-1408.
- Mindess S., Young J.F. ve Darwin D. (2002). *Concrete*, Pearson Education, New Jersey, U.S.A.
- Neville, A.M. (1975). *Properties of Concrete*. Pitmen Publishing LTD., London, U.K.
- Newman, J. ve Choo, B.S. (2003) *Advanced Concrete Technology*. Elsevier LTD. ŞTİ.
- Nilsson, L.O. (1983). “Moisture Effects on the Alkali-Silica Reaction”. *Proceedings of the 6th International conference on alkalis in concrete: Research and practice*. Technical University of Denmark, Copenhagen.

- Nixon, Collins ve Rayment, (1979). The concentration of alkalis by moisture migration in concrete – a factor influencing alkali aggregate reaction”, *Cement and Concrete Research*, V9, pp. 417-423.
- Ozol, M.A. (1975). The pessimum proportion as a reference point in modulating alkali-silica reaction. *Proceedings of a Symposium on Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures*, pp. 113–130.
- Özkan, Y.Z. (2006). <http://web.mta.gov.tr/forum/madenpot.html>
- Pedersen, B.M. (2001). Moisture as the driving force for deleterious alkali-aggregate reactions in concrete. *NorBetong A.Ş. ve Norwegian University of Science and Technology için yapılmış bir araştırma.*
- Qian, G., Deng, M. ve Thang, M. (2001). Expansion Of Siliceous And Dolomitic Aggregates In Lithium Hydroxide Solution, *Cement and Concrete Research*, V32, sf 763-768.
- Qian, G., Deng, M., Lan, X., Xu, Z. ve Tang, M. (2001). Alkali Carbonate Reaction Expansion Of Dolomitic Limestone Aggregates With Porphyrotopic Texture. *Engineering Geology*, V63, Sf 17-29.
- RAMBOLL (2001). *Undersøgelse af 3 betonkerner fra betondæk.*
- Sanchez, L., Kuperman, S.C., Helene, P. ve Kihara, Y. (2008). Trials To Correlate The Accelerated Mortar Bar Test, The Standart And The Accelerated Concrete Prism Test. *Proceeding of the 13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Trondheim.
- Sibbick. R.G. ve West. G. (1989). Examination of concrete from the M4 motorway. Crowthorne, UK: *Transport and Road Research Laboratory, Research No:197.*

- Silveira, A., Hasparyk, N.P., Chiossi, W.C., Farias, L.A. ve Lenharo, S. (2008). Investigation Of Alkali-Aggregate Reaction in Brazilian Carbonate Rocks, *Proceeding of the 13th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Trondheim.
- Soles, J.A., Malhotra, V.M. ve Suderman, R.W. (1987). The role of supplementary cementing materials in reducing the effects of alkali-aggregate reactivity: *CANMET investigations*. Concrete Alkali-Aggregate Reactions. Noyes, New Jersey.
- Spry, P.G., Gan, G.L., Cody, R.D. ve Cody, A.M. (1996). The Formation Of Rims On Dolomite Aggregate In Iowa Highway Concrete. *Semisequicentennial Transportation Conference Proceedings*, Iowa State University. Ames, Iowa.
- Stanton, T.E. (1940a). Influence of cement and aggregate on concrete expansion, *Eng. News Rec.*, *V124*, sf 59-61.
- Stanton, T.E. (1940b). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *American Society of Civil Engineering Pap*, December 1781-1811.
- Suzuki, H., Nakayama K., Miyanaga, K., Takagi, N. ve Kojima, T. (2004). Study on Evaluation method for alkali-silica reactivity of aggregates. *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete*, October *VI*, pp 413-420.
- Swamy, R.N. ve Al-Asali, M.M. (1988). Alkali-silica reaction - sources of damage. *Journal of the Institution of Highways and Transportation*, *V35*, sf 24-29.
- Tong L. ve Tang M. (1999). Expansion Mechanism of Alkali-Dolomite and Alkali-Magnesite Reactions, *Cement and Concrete Composites*, *V21*, sf 361-373.

- Tong L., Min D., Xianhui L. ve Mingshu T. (1997). A Case Study of Two Airport Runways Affected by the Alkali-Carbonate Reaction Part One: Evidence of Deterioration and Evaluation of Aggregates, *Cement and Concrete Research*, V27, sf 321-328.
- Tong L. ve Mingshu T. (1997). A Case Study of Two Airport Runways Affected by the Alkali-Carbonate Reaction Part Two, Microstructural Investigations, *Cement and Concrete Research*, V27, sf 329-336.
- Uyanlar Madencilik San ve Tic LTD ŞTİ, (2009) <http://www.uyanlarmadencilik.com>, 2009.
- Wang, H. ve Gillot, J.E. (1995). Alkali-Carbonate Reaction: Significance of Chemical and Mineral Admixtures, *Magazine of Concrete Research*, V47, sf 69-75.
- Wigum, B.J. ve Lindgård, J. (2003). Alkali aggregate reactions – Field experience. *SINTEF Raporu No:2*, Trondheim, Norveç.
- Wigum, B.J., Pedersen, L.T., Grek, B., Ramboll ve Lindgard, J. (2006). State Of The Art Report: Key Parameters Influencing The Alkali-Aggregate Reaction. *SINTEF Raporu No:1*.
- Xhang, X., Blackwell, B.Q. ve Groves, G.W. (1990). The microstructure of reactive aggregates. *British Ceramic Transactions and Journal*, V89, sf 89-92.
- Xu, Z., Lan, X., Deng, M. Ve Tang, M. (2002). A new accelerated method for determining the potential alkali-carbonate reactivity, *Cement and Concrete Research*, V32, sf 851-857.

EKLER

TABLO LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.1 Türkiye'nin dolomit rezervleri (www.dolomit.com.tr, 2006).....	3
Tablo 2.1. Erken ve geç genişleyen karbonat kayaların karakteristik birleşimleri....	32
Tablo 4.1 Deneylerde kullanılan çimentonun kimyasal analizi.....	49
Tablo 4.2 Kullanılan mineral katkıların kimyasal özellikleri.....	50
Tablo 4.3 Kullanılan kimyasal katkıların özellikleri.....	50
Tablo 4.4 Yapılan Ön Denemelerin ve Sonuçlarının Listesi.....	51
Tablo 4.5 Zonguldak agregasının kimyasal analizi.....	52
Tablo 4.6 Zonguldak agregası ile AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre genişleme değerleri.....	52
Tablo 4.7 Kanada agregasının kimyasal analizi.....	54
Tablo 4.8 Kanada agregası ile AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre genişleme değerleri.....	54
Tablo 5.1 Uçucu kül ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	66
Tablo 5.2 Uçucu Kül ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genişmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	67
Tablo 5.3 Yüksek fırın curufu ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	67
Tablo 5.4 Yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genişmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	69
Tablo 5.5 İri zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	69
Tablo 5.6 İri zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genişmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	70
Tablo 5.7 İnce zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	71

Tablo 5.8 İnce zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	71
Tablo 5.9 Metakaolin ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	72
Tablo 5.10 Metakaolin ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	73
Tablo 5.11 Silis Dumanı ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	73
Tablo 5.12 Silis dumanı ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	74
Tablo 5.13 Lityum hidroksit katılması AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	75
Tablo 5.14 Lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	76
Tablo 5.15 Uçucu kül ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	76
Tablo 5.16 Uçucu Kül ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	77
Tablo 5.17 Yüksek fırın curufu ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	78
Tablo 5.18 Yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	79
Tablo 5.19 İri zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	80
Tablo 5.20 İri zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	81
Tablo 5.21 İnce zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	81
Tablo 5.22 İnce zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	82
Tablo 5.23 Metakaolin ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	83
Tablo 5.24 Metakaolin ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla.....	83

Tablo 5.25 Silis Dumanı ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	84
Tablo 5.26 Silis dumanı ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	85
Tablo 5.27 Lityum hidroksit katılması AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	85
Tablo 5.28 Lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	86
Tablo 5.29 Uçucu Kül ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	94
Tablo 5.30 Uçucu kül ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	95
Tablo 5.31 Yüksek fırın curufu ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	95
Tablo 5.32 Yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	96
Tablo 5.33 İri zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	97
Tablo 5.34 İri zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	98
Tablo 5.35 İnce zeolit ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	98
Tablo 5.36 İnce zeolit ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	99
Tablo 5.37 Metakaolin ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	100
Tablo 5.38 Metakaolin ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	100
Tablo 5.39 Silis Dumanı ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	101
Tablo 5.40 Silis dumanı ikamesi ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	102
Tablo 5.41 Lityum hidroksit katılması AAR2 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	102
Tablo 5.42 Lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	103
Tablo 5.43 Uçucu Kül ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	104
Tablo 5.44 Uçucu kül ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	105

Tablo 5.45 Yüksek fırın curufu ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	106
Tablo 5.46 Yüksek fırın curufu ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	107
Tablo 5.47 İri zeolit ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	107
Tablo 5.48 İri zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	108
Tablo 5.49 İnce zeolit ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	109
Tablo 5.50 İnce zeolit ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	110
Tablo 5.51 Silis dumanı ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	110
Tablo 5.52 Silis dumanı ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	111
Tablo 5.53 Metakaolin ikamesi ile genleşmelerin değişimi.....	112
Tablo 5.54 Metakaolin ikamesi ile AAR5 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	113
Tablo 5.55 Lityum hidroksit katılması AAR5 yöntemine göre elde edilen boy değişimleri.....	113
Tablo 5.56 Lityum hidroksit katılması ile AAR2 yöntemine göre genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla değişimi.....	114
Tablo 5.57 Zonguldak ve Kanada agregaları ile değişik deney yöntemlerinde kullanılan katkıların genleşmeyi sınırın altına çektiği oranlar.....	120
Tablo 5.58 Şekil 5.57’de gösterilen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	125
Tablo 5.59 Şekil 8.60-8.61’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	128
Tablo 5.60 Şekil 5.63’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	129
Tablo 5.61 Şekil 5.69’da işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	133
Tablo 5.62 Şekil 5.72’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	135
Tablo 5.63 Şekil 5.74’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	136
Tablo 5.64 Şekil 5.81’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	141
Tablo 5.65 Şekil 5.84’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	143
Tablo 5.66 Şekil 5.87’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	145
Tablo 5.67 Şekil 5.94’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	149
Tablo 5.68 Şekil 5.97’de işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	151
Tablo 5.69 Şekil 5.100’da işaretlenen bölgenin EDS analizinin sonuçları.....	153

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 AAR'nin şematik oluşum mekanizması ve tipik görünümü (Baradan, 2002).....	6
Şekil 2.2 ASR sonucu hasar görmüş bir beton (Hewlett, 2006).....	8
Şekil 2.3 ASR geçirmiş örneklerin görüntüleri (Ahmed ve diğ., 2002).....	9
Şekil 2.4 Karışımdaki dolomit yüzdesi ile reaksiyona giren dolomit miktarının değişimi (Hadley ve diğ., 1964).....	11
Şekil 2.5 Değişik alkali içerikli beton karışımları için genleşme değerleri (Hadley ve diğ., 1964).....	11
Şekil 2.6 Kanada'da, ACR'nin kaldırım döşemesine etkisi (http://www.tfrc.gov/pavement/pccp/petro/chaptr10.htm , 2006).....	15
Şekil 2.7 New Jersey'de, ASR'nin ve ACR'nin birarada görülmesi (http://www.tfrc.gov/pavement/pccp/petro/chaptr10.htm , 2006).....	16
Şekil 2.8 Virginia'da ACR sonucu derzler arasındaki boşlukların kaybolması (http://www.tfrc.gov/pavement/pccp/petro/chaptr10.htm , 2006).....	16
Şekil 2.9 Lu ve diğ. (2006) tarafından çekilmiş bir SEM fotoğrafı.....	19
Şekil 2.10 Dolomit yüzeylerinin SEM görüntüsü ve EDXA sonuçları. (a) seyreltik HCl çözeltisi ile hafifçe kazıdıktan sonra dolomitin orijinal düzgün yüzeyi. (b) 150oC'de, %10 KOH çözeltisi otoklavlandıktan sonraki dolomit yüzeyi. Kalsit parçaları bir brusit filmi üzerinde yüzmektedir. (c) b'deki görüntünün orta bölgesinin büyütülmüş şekli. (d) işaretli noktalar için EDXA sonuçları (Tong ve Tang, 1997).....	20
Şekil 2.11. Dolomit agregasının 150oC'de, %10 KOH çözeltisi otoklavlanmadan önceki ve otoklavlandıktan sonraki XRD sonuçları. (a) reaksiyona girmemiş dolomit yüzeyi (b) 10 saat otoklavlandıktan sonraki dolomit yüzeyi (c) dolomit prizmasında 60 saat otoklavlandıktan sonraki bir reaksiyon sınırı (d) 60 saat otoklavlandıktan sonraki dolomit agregasının merkez bölgesi (Tong ve Tang, 1997).....	21
Şekil 2.12 Silveira ve diğ. (2008) tarafından alınmış bir SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	22
Şekil 2.13 İğnemsî yapıdaki Alkali-Karbonat Reaksiyonu ürünü, Silveira ve diğ.	

(2008).....	22
Şekil 2.14 Ağsı yapıdaki Alkali-Silika Reaksiyonu ürünü (Grattan-Bellew ve diğ., 2008).....	23
Şekil 2.15 a) Örneğin genel görüntüsü. b) Reaksiyon sonucu oluşan altıgen brusit kristalleri. c) Dolomitlerin yanında oluşan brusit ve Li ₂ SO ₃ kristalleri. d) İkinci şekilde işaretlenen brusit kristallerinin EDS analizi.....	24
Şekil 2.16 Genleşme-Sıcaklık grafiği (Locher, 1973).....	25
Şekil 2.17 Bağlı Nem-Hasar grafiği (Nilsson, 1983).....	27
Şekil 2.18 Genleşme-Zaman grafiği (SINTEF Raporu, 2006).....	27
Şekil 2.19 Değişik bağlı nem ve sıcaklıklarda genleşme grafiği (Gudmundsson ve Asgeirsson, 1983).....	29
Şekil 2.20 Ortamdan gelen alkalilerin betonun genleşmesine etkisi (Romboll, 2001).....	31
Şekil 2.21 Alkali-reaktif olan 3 farklı kayacın mikrodokuları (http://www.tfrc.gov/pavement/pccp/petro/chaptr10.htm , 2006).....	32
Şekil 2.22 Alkali-reaktif olmayan iki farklı kayacın mikrodokuları (http://www.tfrc.gov/pavement/pccp/petro/chaptr10.htm , 2006).....	33
Şekil 2.23 Reaktif olduğu kabul edilen agregası mikrodokusu, Qian ve diğ. (2002).....	34
Şekil 2.24 Reaktif olduğu kabul edilen agregası mikrodokusu, Qian ve diğ. (2002).....	34
Şekil 2.25 Reaktif olduğu kabul edilen agregası mikrodokusu, ACI Raporu 2211R_98.....	35
Şekil 2.26 İki farklı agregası ve agregaların farklı tane boyutları için 24 hafta sonundaki genleşme yüzdeleri (Xu ve diğ., 2002).....	36
Şekil 2.27 Farklı agregaları için uzun ve kısa örneklerde uzama oranları (Wigum, 2004).....	38
Şekil 3.1 RILEM Komitesi tarafından uygun görülen deney akış şeması.....	45
Şekil 4.1. Zonguldak agregası ile AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre genleşme grafiği.....	53
Şekil 4.2 Kanada agregası ile AAR2 ve AAR5 yöntemlerine göre genleşme grafiği.....	55
Şekil 5.1 Deneysel çalışmanın akış şeması.....	56
Şekil 5.2 Zonguldak agregasından alınan iki farklı tanenin H-Nikol ışığı altındaki	

görüntüsü.....	57
Şekil 5.3 Zonguldak agregasından alınan iki farklı tanenin Paralel-Nikol ışığı altındaki görüntüsü.....	58
Şekil 5.4 H-Nikol ışığı altında yakın görüntü.....	58
Şekil 5.5 Zonguldak agregasının mikro dokusu.....	59
Şekil 5.6 Zonguldak agregasının dokusu.....	59
Şekil 5.7 Zonguldak agregasının mikro dokusunu gösteren çeşitli fotoğraflar.....	61
Şekil 5.8 Kanada agregasının mikro dokusu.....	62
Şekil 5.9 Kanada agregasının mikro dokusu.....	62
Şekil 5.10 Bir Kanada agregası tanesinde görülen büzülme boşluğu ve dolomit kristali.....	63
Şekil 5.11 Bir Kanada agregası tanesinde görülen büzülme çatlakları.....	63
Şekil 5.12 Kanada agregasından alınmış çeşitli fotoğraflar.....	64
Şekil 5.13 Çimento yerine uçucu kül ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	66
Şekil 5.14 Çimento yerine yüksek fırın curufu ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	68
Şekil 5.15 Çimento yerine iri zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	70
Şekil 5.16 Çimento yerine ince zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	71
Şekil 5.17 Çimento yerine metakaolin ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	72
Şekil 5.18 Çimento yerine silis dumanı ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	74
Şekil 5.19 Lityum hidroksit katılması sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	75
Şekil 5.20 Çimento yerine uçucu kül ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	77
Şekil 5.21 Çimento yerine yüksek fırın curufu ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	78
Şekil 5.22 Çimento yerine iri zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	80
Şekil 5.23 Çimento yerine ince zeolit ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre	

zamana bağlı boy değişimi.....	82
şekil 5.24 imento yerine metakaolin ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	83
şekil 5.25 imento yerine silis dumanı ikamesi sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	84
şekil 5.26 Lityum hidroksit katılması sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	86
şekil 5.27 Yüksek fırın curufu ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi.....	87
şekil 5.28 Uçucu kül ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi.....	88
şekil 5.29 İri zeolit ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi.....	89
şekil 5.30 İnce zeolit ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi.....	90
şekil 5.31 Metakaolin ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi.....	91
şekil 5.32 Silis dumanı ikamesi durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) genleşmesine kıyasla değişimi.....	92
şekil 5.33 Lityum hidroksit kullanılması durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi.....	93
şekil 5.34 Uçucu Kül ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	94
şekil 5.35 Yüksek fırın curufu ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	96
şekil 5.36 imento yerine iri zeolit ikamesi sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	97
şekil 5.37 İnce zeolit ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	99
şekil 5.38 Metakaolin ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	100
şekil 5.39 Silis Dumanı ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	101
şekil 5.40 Lityum hidroksit katılması sonucu AAR2 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	103
şekil 5.41 Uçucu Kül ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	105
şekil 5.42 Yüksek fırın curufu ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	106
şekil 5.43 İri zeolit ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	108
şekil 5.44 İnce zeolit ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	109

Şekil 5.45 Silis dumanı ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	111
Şekil 5.46. Metakaolin ikamesi ile Genleşme-Zaman değişimi grafiği.....	112
Şekil 5.47 Lityum hidroksit katılması sonucu AAR5 yöntemine göre zamana bağlı boy değişimi.....	114
Şekil 5.48 Yüksek Fırın Curufu İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi.....	115
Şekil 5.49 Uçucu Kül İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi.....	116
Şekil 5.50 İri Zeolit İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi.....	116
Şekil 5.51 İnce Zeolit İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi.....	117
Şekil 5.52 Metakaolin İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi.....	118
Şekil 5.53 Silis Dumanı İkamesi Durumunda Genleşmelerin Kontrol Karışımı (Mineral Katkısız) Genleşmesine Kıyasla Değişimi.....	119
Şekil 5.54 Lityum hidroksit kullanılması durumunda genleşmelerin kontrol karışımı (mineral katkısız).....	119
Şekil 5.55 BEC modunda çekilmiş fotoğraf.....	124
Şekil 5.56 SEI modunda çekilmiş fotoğraf.....	124
Şekil 5.57. Genel EDS analizinin yapıldığı bölge.....	125
Şekil 5.58 Tablo 5.59’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	125
Şekil 5.59 Bir kısmı reaksiyon ürünü ile dolmuş boşluk (Zonguldak, mineral katkısız örnek).....	126
Şekil 5.60 Reaksiyon ürününün yakın görüntüsü (Zonguldak, mineral katkısız örnek).....	127
Şekil 5.61 Reaksiyon ürününün yakın görüntüsü (Zonguldak, mineral katkısız örnek).....	127
Şekil 5.62 Tablo 5.60’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	128
Şekil 5.63 Zonguldak agregası kullanılarak hazırlanmış mineral katkısız örneğin SEM görüntüsü.....	129
Şekil 5.64 Tablo 5.61’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	129
Şekil 5.65 Boşluğun içinde oluşmuş reaksiyon ürünleri (Zonguldak, mineral katkısız örnek).....	130

Şekil 5.66 Boşluğun içinde oluşmuş reaksiyon ürünleri (Zonguldak, mineral katkısız örnek).....	131
Şekil 5.67 Boşluğun içinde oluşmuş reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüsü.....	131
Şekil 5.68 Boşluğun içinde oluşmuş reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüsü.....	132
Şekil 5.69 Reaksiyon ürünleri ve genleşme çatlakları (Zonguldak, mineral katkısız örnek).....	133
Şekil 5.70 Tablo 5.62’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	133
Şekil 5.71 İçi reaksiyon ürünleri ile dolmuş bir boşluğun uzaktan görüntüsü.....	134
Şekil 5.72 Boşluğun içindeki reaksiyon ürünlerinin yakından görüntüsü ve yapılan EDS analizinin yeri.....	135
Şekil 5.73 Tablo 5.63’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	135
Şekil 5.74 Reaksiyon ürünü ile dolu boşluk ve EDS analizinin yeri.....	136
Şekil 5.75 Tablo 5.64’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	136
Şekil 5.76 Zonguldak agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü.....	137
Şekil 5.77 Zonguldak agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü.....	138
Şekil 5.78 Zonguldak agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü.....	138
Şekil 5.79 Zonguldak agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü.....	139
Şekil 5.80 Kanada agregasından alınmış bir SEM görüntüsü.....	140
Şekil 5.81 Kanada agregasında yapılan genel EDS analizinin yapıldığı bölge.....	140
Şekil 5.82 Tablo 5.65’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	141
Şekil 5.83 Reaksiyon ürünü ile dolu boşluk.....	142
Şekil 5.84 Reaksiyon ürünlerinin yakından görüntüsü ve EDS analizinin yeri.....	142
Şekil 5.85 Tablo 5.66’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	143
Şekil 5.86 Reaksiyon ürünü içeren küresel boşluk.....	144
Şekil 5.87 Reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüsü ve EDS analizinin yeri.....	144
Şekil 5.88 Tablo 5.67’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	145
Şekil 5.89 Küresel bir boşluktaki reaksiyon ürünleri.....	146
Şekil 5.90 Küresel bir boşluktaki reaksiyon ürünleri.....	146
Şekil 5.91 Küresel bir boşluktaki reaksiyon ürünleri.....	147
Şekil 5.92 Alkali-Karbonat Reaksiyonu ürünleri.....	147

Şekil 5.93 Çukurun içinde oluşan değişik reaksiyon ürünlerinin genel görüntüleri.....	148
Şekil 5.94 Reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüleri ve EDS analizinin yeri.....	149
Şekil 5.95 Tablo 5.69’da sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	149
Şekil 5.96 Boşluğun içinde oluşan kalsit tanelerinin genel görüntüsü.....	150
Şekil 5.97 Kalsit tanelerinin yakın görüntüsü ve EDS analizinin yeri.....	151
Şekil 5.98 Tablo 5.71’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	151
Şekil 5.99 Reaksiyon ürününün ile dolmuş bir boşluğun genel bir görüntüsü.....	152
Şekil 5.100 Reaksiyon ürünlerinin yakın görüntüsü ve EDS analizinin yeri.....	153
Şekil 5.101 Tablo 5.70’de sonuçları verilen EDS analizinin grafiği.....	153
Şekil 5.102 Kanada agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü.....	154
Şekil 5.103 Kanada agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü.....	155
Şekil 5.104 Kanada agregası ile hazırlanan kontrol (mineral katkısız) örnekten çıkarılan ince kesitten, optik mikroskop altında alınmış bir görüntü.....	155