

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ISPARTA KEÇİBORLU YÖRESİ DOĞAL AMORF SİLİKA
OLUŞUMLARININ GELENEKSEL VE HAFİF BETON
ENDÜSTRİLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

METİN DAVRAZ

**DOKTORA TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. LÜTFULLAH GÜNDÜZ**

ISPARTA, 2004

**ISPARTA KEÇİBORLU YÖRESİ
DOĞAL AMORF SİLİKA OLUŞUMLARININ
GELENEKSEL VE HAFİF BETON ENDÜSTRİLERİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

METİN DAVRAZ

**DOKTORA TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA, 2004**

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda
DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

Üye :

Üye :

ONAY

Bu tez/...../2004 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri
üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

....../...../2004

Prof Dr. Remzi KARAGÜZEL
S.D.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER (KISALTMALAR) DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konu ve Amaç.....	2
1.2. İnceleme Alanı Hakkında Genel Bilgiler.....	3
1.2.1. İnceleme Alanının Yeri.....	3
1.2.2. Sahanın Hukuki Durumu ve Tarihçesi.....	5
1.3. Amorf Silikanın Tanımı ve Kullanım Alanları.....	6
1.3.1. Amorf Silikanın Dünya ve Ülkemiz İnşaat Sektöründeki Yeri.....	9
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	11
2.1. Yöre ve Kükürt Yatakları Jeolojisini Konu Alan Çalışmalar.....	11
2.2. Çözünmüş Silikanın Kimyası.....	12
2.3. Tikitere Amorf Silikası ve Teknolojik Özellikleri.....	16
2.3.1. Tikitere Amorf Silikasının Kökeni, Kayaç ve Ürün Özellikleri.....	17
2.3.2. Amorf (Mikro) Silikanın İnşaat Sektöründeki Yeri ve Kullanım Avantajları.....	19
2.3.3. Amorf Silikanın Beton İçerisindeki Davranışı ve Performansı.....	22
2.4. İnşaat Endüstrisinde Kullanılan Diğer Mineral Katkılar ve Performansları.....	30
2.4.1. Silis Dumanı.....	30
2.4.2. Uçucu Küller.....	33
2.4.3. Diyatomit.....	40
2.4.4. Kalsine Killer – Metakaolin.....	25
2.5. Betonda Gelişen Zararlı Reaksiyonlar.....	49
2.5.1. Alkali Silika Reaksiyonu (ASR).....	49
2.5.2. Çiçeklenme (Efflorescence).....	55
2.6. Hafif Agregata, Hafif Beton ve Pomzadan Mamul Hafif Yapı Elemanlarının Tanımı, Sınıflandırılması ve Teknolojik Özellikleri.....	57
2.6.1. Hafif Agregalar.....	57
2.6.2. Hafif Beton.....	61
2.6.3. Pomzadan Mamul Hafif Yapı Elemanlarının Tanımı, Sınıflandırılması ve Teknolojik Özellikleri.....	62
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	65
3.1. Materyal.....	65
3.1.1. Arazi Çalışmaları.....	65
3.1.2. Laboratuvar Çalışmaları.....	66
3.1.2.1. Hammadde Fiziksel, Kimyasal, Mineralojik ve Petrografik İncelemeleri.....	66
3.1.2.2. Ürün Teknolojik İncelemeleri.....	67
3.2. Yöntem.....	67
3.2.1. Arazi Çalışmaları ve Numune Alımında Kullanılan Yöntemler.....	67
3.2.2. Hammadde Analizlerinde Kullanılan Yöntemler.....	71
3.2.2.1. Fiziksel Analiz Yöntemleri.....	71
3.2.2.2. Kimyasal Analiz Yöntemleri.....	72
3.2.2.3. Mineralojik ve Petrografik Analiz Yöntemleri.....	72

3.2.3. Ürün Analizlerinde Kullanılan Yöntemler.....	73
3.2.3.1. Mineral Katkı Maddesi ve Geleneksel Beton Standartları.....	73
3.2.3.2. Hafif Beton ve Yapı Elemanları Standartları.....	77
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	78
4.1. İnceleme Alanının Jeolojisi.....	78
4.1.1. Stratigrafi.....	80
4.1.1.1. Kayıköy formasyonu (Tka).....	80
4.1.1.2. Gönen konglomerası (Tg).....	81
4.1.1.3. Burdur formasyonu (Tb).....	81
4.1.1.4. Gölcük volkanitleri (Tv).....	82
4.1.1.5. Alüvyon (Kal) ve eski alüvyon (Ke).....	82
4.1.1.6. Gökçebağ karmaşığı (To).....	82
4.1.1.7. Akdağ kireçtaşı (Tea).....	83
4.1.2. Keçiborlu Amorf Silika Yatağının Jeolojisi.....	85
4.1.2.1. Alterasyon Zonunun İncelenmesi.....	85
4.1.2.2. Alterasyona Uğrayan Serpantin ve Tüf Numunelerinin Kimyasal Analizlerinin Yorumlanması.....	89
4.1.2.3. Amorf Silika Yataklarının Oluşumu.....	90
4.1.3. Amorf Silika Yataklarının Ekonomik Açısından Değerlendirilmesi.....	91
4.1.3.1. Rezerv Bilgileri.....	91
4.1.3.2. İşletme Durumu.....	99
4.2. Keçiborlu Amorf Silika Kayacının Teknolojik Özellikleri.....	101
4.2.1. Fiziksel Analiz Bulguları.....	101
4.2.1.1. Tane Boyut Dağılımı.....	101
4.2.1.2. Gevşek ve Sıkışık Kuru Birim Hacim Ağırlığı.....	104
4.2.1.3. İnce Madde Miktarı.....	106
4.2.1.4. Birim Hacim Ağırlık (Dh), Doygun Yüzey Birim Hacim Ağırlık (Dhd), Görünür Birim Hacim Ağırlık (Dhg) ve Özgül Ağırlık (Do).....	107
4.2.1.5. Su Emme Miktarı.....	109
4.2.1.6. Porozite, Kompasite ve Doyma Derecesi.....	112
4.2.1.7. Kızdırma Kaybı.....	113
4.2.1.8. Partikül Boyut Dağılımı.....	116
4.2.2. Kimyasal Analiz Bulguları.....	118
4.2.2.1. Kayaç Kimyasal Analizleri.....	118
4.2.2.2. Puzolanik Aktivitesi.....	120
4.2.2.3. Organik Madde İçeriği.....	121
4.2.3. Mineralojik ve Petrografik Analiz Bulguları.....	121
4.3. Amorf Silikanın Mineral Katkı Maddesi ve Hafif Agregası Olarak Kullanılabilirliği.....	130
4.3.1. Amorf Silika Katkısının Beton Performans Özelliklerine Etkisi.....	130
4.3.1.1. Kontrol ve Amorf Silika Katkılı Beton Karışım Tasarımları.....	131
4.3.1.2. Muhtelif Çimento Dozajlardaki Betonların Basınç Dayanımlarına Amorf Silikanın Etkisi.....	137
4.3.1.3. Muhtelif Çimento Dozajlardaki Betonların Aşınma Dayanımlarına Amorf Silikanın Etkisi.....	153
4.3.1.4. Reaktif Agregalı Betonlarda Gelişen Alkali- Agregası Reaksiyonuna Amorf Silikanın Etkisi.....	158

4.3.1.5. Muhtelif Çimento Dozajlardaki Betonların Kimyasal Maddelere Karşı Direncinde Amorf Silikanın Rolü.....	178
4.3.2. Hafif Yapı Elemanları Üretiminde Amorf Silikanın Mikronize veya Agregada Olarak Kullanılabilirlik Analizleri.....	212
4.3.2.1. Mikronize Amorf Silikanın Hafif Yapı Elemanı Üretiminde Katkı Malzemesi Olarak Kullanımı.....	212
4.3.2.2. Amorf Silikanın Hafif Yapı Elemanı Üretiminde Agregada Olarak Kullanımı.....	218
5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR.....	234
6. KAYNAKLAR.....	238
ÖZGEÇMİŞ.....	244

ÖZET

Beton günümüzde sudan sonra en fazla tüketilen malzemedir. Bu durum beton teknolojisinin hızlı bir gelişim sürecine girmesine, farklı beton tür ve sınıflarının oluşmasına, betonu oluşturan hammadde alanlarında sürekli yeni araştırmaların yapılmasına neden olmaktadır.

Bu tez kapsamında da, ülkemiz inşaat endüstrisi için farklı bir hammaddenin betonda değerlendirilebilirliği ele alınmış olup, Isparta Keçiborlu yöresi amorf silika oluşumlarının mineral katkı maddesi olarak geleneksel beton özelliklerine etkisi ve pomza gibi doğal-hafif agregalara alternatif agrega olarak değerlendirilebilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, Isparta Keçiborlu yöresinde bulunan amorf silika yataklarının jeolojisi, rezerv durumu, kayaç teknolojik özellikleri, mineral katkı olarak beton performans özelliklerine etkisi, karışım–kullanım kriter tanımlamaları ile hafif agrega olarak yapı elemanları üretiminde kullanılabilirlik analizleri, deneysel çalışmalar yürütülerek irdelenmiştir.

Yapılan analizlerden elde edilen bulgular ve değerlendirmeler ışığında, Isparta-Keçiborlu yöresinde teknolojik özellikleri farklılık gösteren amorf silika oluşumlarından, I. lokasyon kayacının geleneksel betonda mineral katkı maddesi ve II. lokasyon kayacının yapı elemanları eldesinde hafif agrega olarak kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Amorf silika, Beton, Hafif agrega, Hafif yapı elemanı, Mineral katkı maddesi.

ABSTRACT

Concrete, nowadays, is the most consuming material after water. This phenomenon causes the rapid increase of concrete technology, development of different concrete types and classes, and new researches on the concrete raw materials.

In this thesis, a different raw material for civil industry of our country was mainly analysed in order to use in concrete making. A comprehensive experimental research work was carried out to determine the effectiveness of a new amorphous silica formation in the Keçiborlu region of Turkey as a mineral additive in traditional concrete properties. Further, its use as an alternative aggregate compared to natural lightweight aggregates like pumice was also analysed and evaluated. In this research work, the geology of amorphous silica formation in the Keçiborlu region, reserve amount, technological properties of the rock, the effects on concrete performance properties as a mineral additive, mixture and usage criteria and its use in lightweight masonry block making as lightweight aggregates were experimentally analysed and evaluated.

According to the research findings and the evaluations, I. location of amorphous silica formation in the Keçiborlu region is able to use in traditional concrete technology as a mineral additive, and II. location of amorphous silica formation in the Keçiborlu region is also able to use in lightweight masonry block making as a lightweight aggregate.

KEY WORDS: Amorphous silica, concrete, lightweight aggregate, lightweight masonry unit, mineral additive material.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde gösterdikleri katkılardan dolayı aşağıda adı geçen kişi ve kuruluşlara içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Prof. Dr. Lütfullah Gündüz (Tez Danışmanı), doktora eğitimim boyunca, karşılaştığım her türlü zorluğu aşmamda yardımlarını esirgememiş, bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için gerekli ortamı hazırlayarak yön gösterici olmuştur.

Laboratuvar çalışmalarım esnasında Isbaş A.Ş. Kalite Kontrol laboratuvarı ve imalat görevlileri yardımlarını esirgememişlerdir.

Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde yürüttüğüm deneysel çalışmalarında Sayın Nükhet Şapçı önemli katkılar sağlamıştır.

Malzeme kimyasal ve fiziksel analizlerinin yapılmasında Göltaş A.Ş. Kalite Kontrol Şefi Kimya Yüksek Mühendisi Sayın Gülay Selçuk gereken özeni ve kolaylığı göstermiştir.

Silver & Baryte Ores Mining Co. S.A. jeoloji mühendisi Sayın Ulrich Lutat, kurumu adına teknik imkanlarından faydalanmamı sağlamıştır.

Başer Madencilik Ltd. Şti. Kalite Kontrol Laboratuvarları imkanlarından yararlanmamı sağlamıştır.

Eşim Yrd. Doç.Dr. Ayşen Davraz'a da katkılarından dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Ağustos 2004

Metin Davraz

Simgeler (Kısaltmalar) Dizini

A	Kızdırma kaybı oranı , %
A ₁	Numunenin kızdırmadan önceki kütlesi, g
A ₂	Numunenin kızdırmadan sonraki kütlesi, g
AAR	Alkali agrega reaksiyonu
AB	Asmolen blok
A.S.	Amorf silika
AS ₂	Alüminyum silikat bileşiği
ASB	Amorf silika katkılı blok
ASR	Alkali silika reaksiyonu
ASTM	Amerikan Standardı
A.Z.	Ateş zaiyatı (%)
BDB	Boşluklu duvar bloğu
BRANZ	Yeni Zelanda İnşaat Araştırma Birliği
c	Özgül Isı Değeri, kcal / kg °C
C20	20 Mpa dayanıma sahip beton sınıfı
C30	30 Mpa dayanıma sahip beton sınıfı
CAN/CSA	Kanada Standardı
CH	Kalsiyum hidroksit bileşiği
CSH	Kalsiyum silikat (çimentolaşma) jeli
ç	Karışıma gire çimento miktarı, kg
ÇP	Çatı plağı
d	Yerinde kayaç yoğunluğu, kg/m ³
D	Doyma derecesi, %
DB	Duvar bloğu
DD	Düşey duvar elemanı
DDB	Dolu duvar bloğu
Dh	Agrega birim hacim ağırlığı, gr
Dh _d	Agrega doymun yüzey birim hacim ağırlığı, gr
Dh _g	Agrega görünür birim hacim ağırlığı, gr
d _{ince}	İnce agrega özgül ağırlığı, gr/cm ³

D_o	Agrega özgül ağırlığı, gr/cm^3
DP	Döşeme plağı
D_{max}	Maksimum agreg çapı, mm
DTA	Diferansiyel analiz
E	Betona karışımına giren su miktarı, kg
E5	İkame (eksiltme) yöntemine göre % 5 amorf silika katkısı
E10	İkame (eksiltme) yöntemine göre % 10 amorf silika katkısı
E15	İkame (eksiltme) yöntemine göre % 15 amorf silika katkısı
EN	Avrupa Birliği normu
F	Karışıma giren uçucu külün ağırlığı, kg
f_c	Yapısal etkinlik faktörü
GPS	Konum belirleme aygıtı
h	Damar kalınlığı, m
h_{gk}	Görünür damar kalınlığı, m
h_{gr}	Gerçek damar kalınlığı, m
IR	Çözünmez kalıntı miktarı, %
İ5	İlave yöntemine göre % 5 amorf silika katkısı
İ10	İlave yöntemine göre % 10 amorf silika katkısı
İ15	İlave yöntemine göre % 15 amorf silika katkısı
k	Bağlayıcı etkinlik faktörü, %
K	Kontrol betonu
KAB	Statik çalışmaya katılan asmolen blok
Kal	Alüvyon birim
k_{AS}	Amorf silika etkinlik faktörü, %
KB	Kontrol bloğu
K_B	Bolomey katsayısı
k/ç	Agrega (kum) / çimento oranı
k_e	Genel etkinlik faktörü, %
Ke	Eski alüvyon birim
k_p	Yüzdesel etkinlik faktörü, %
k_o	Görünür komposite oranı, %

k_1	Gerçek komposite oranı, %
L	Lento
L_o	Harç çubuğu ilk boyu, mm
L_n	Harç çubuğu efektif ölçüm boyu, mm
LI	I.lokasyon
LII	II.lokasyon
M	Kayaç kütlesi, gr
M_{ince}	İnce agrega miktarı, gr
M_{pn}	Piknometre + deney numunesi ağırlığı, gr
M_{pn}	Piknometre + deney numunesi ağırlığı, gr
M_{pns}	Piknometre + su + deney numunesi ağırlığı, gr
M_s	Su ile dolu piknometre ağırlığı, gr
MS	Mikro silika
M_t	Agrega zamana bağlı su emme oranı, %
MTA	Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü
M_0	Numunenin ilk ağırlığı, gr
M_1	Numunenin son ağırlığı, gr
n_g	Numunenin ağırlıkça nem değeri, %
n_v	Numunenin hacimce nem değeri, %
n_o	Görünür porozite oranı, %
n_1	Gerçek porozite oranı, %
PÇ	Portland çimentosu
r	Alkali silika reaksiyonu genleşme derecesi, %
RH	Ortam bağıl nemi, %
RS	Reaktif silika
R_2	Regrasyon katsayısı
ρ	Amorf silika yerinde yoğunluğu, kg/m^3
$\rho_{ort.}$	Amorf silika özgül ağırlığı, gr/cm^3
S	Gauss yöntemine göre alan hesabı, m^2
s/b	Beton karışımındaki su/bağlayıcı oranı

s/c	Beton karışımındaki su/çimento oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SFC	Silika dumanı çimentosu
SW	Özel yarıklı duvar bloğu
Tb	Burdur formasyonu
t_c	Soğuk oda ortam sıcaklığı, °C
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
Tea	Akdağ kireçtaşı
t_h	Sıcak oda ortam sıcaklığı, °C
Tg	Gönen konglomerası
TG	Termo-gravimetrik analiz
Tka	Kayıköy formasyonu
To	Gökçebağ karmaşığı
T_{ort}	Numune blok ortalama sıcaklık değeri, °C
TS	Türk standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TS - EN	Avrupa Birliği normlarına uygun Türk Standartları
Tv	Gölcük volkanitleri
U.K.	Uçucu kül
V	Cevher görünür hacmi, dm ³
$V_{çim}$	Karışımındaki çimento hacmi, dm ³
V_{hava}	Karışımındaki hava hacmi, dm ³
V_{ince}	İnce agrega hacmi, dm ³
V_{iri}	İri agrega hacmi, dm ³
V_{su}	Karışımındaki su hacmi, dm ³
V_{toplam}	Toplam agrega hacmi, dm ³
w/c	Su / çimento oranı
W_1	Numune kuru ağırlığı, gr
W_2	Numune doygun kuru yüzey ağırlığı, gr
W_3	Ölçü kabı + su + numune toplam ağırlığı, gr

W_4	500 ml çizgisine kadar su dolu ölçü kabı ağırlığı, gr
X	Harita (yukarı) koordinat değeri
XI	Toplam kuvars içeriği, %
XRD	X-ray ışını difraksiyonu
Y	Harita (sağa) koordinat değeri
YD	Yatay duvar elemanı
YP	Yalıtım Plağı
Z	Arazi kot değeri, m
z	Kuru duvarda ısı iletkenlik değerine ilave edilen katsayı
ΔM	Çözelti ile etkileşimde numune kütle kaybı, %
Δt	Kalorimetrik sıcaklık farkı, °C
α	Cevher katmanı açısı değeri
λ	Isı iletkenlik katsayısı, kcal / mh°C
λ_h	Numunenin ısı iletkenlik hesap değeri, kcal / mh°C
$1/\Lambda$	Numunenin ısı geçirgenlik değeri, m ² h°C/ kcal

Şekiller Dizini

Şekil 1.1. İnceleme alanının yer bulduru haritası	5
Şekil. 2.1. Silisyum dioksit (SiO ₂)n formundaki silika modeli kimyasal bağ yapısının şematik gösterimi	13
Şekil 2.2. Orto-silisik asit modeli	14
Şekil 2.3. Nötr ortamda orto-silisik asit iyonizasyonu	15
Şekil 2.4. Alkali ortamda orto-silisik asit iyonizasyonu	15
Şekil 2.5. Polimerik silika (H ₂ SiO ₃)n	16
Şekil 2.6. Tikitere amorf silika ocağından bir kesit	18
Şekil 2.7. Amorf silika katkılı betonda dayanım gelişimi	23
Şekil 2.8. Amorf silika katkılı betonda çekme-basınç dayanım oranı artışı	24
Şekil 2.9. Farklı türde katkılı betonların AAR dirençleri	25
Şekil 2.10. Farklı amorf silika dozajlarıyla ASTM C1260-94'e göre yapılan AAR deney sonuçları	25
Şekil 2.11. Kontrol betonu ve muhtelif mineral katkılı betonların sülfat korumalarına etkisi	28
Şekil 2.12. kp'nin yer değiştirme oranı ile değişimi	39
Şekil 2.13. Etkinlik faktörünün (k) yer değiştirme oranı ile değişimi	39
Şekil 2.14. Yunanistan - Zakynthos Adası diatomitine ait SEM fotoğrafı	43
Şekil 2.15. İyi kristallenmiş kuvars ve agrega bileşimindeki reaktif silikanın bağ yapısı	51
Şekil 2. 16. Beton gözenek suyununun alkalilerce zenginleşerek, oluşan hidroksit iyonları ve alkali katyonların reaktif silika ile etkileşimi	52
Şekil 2.17. Alkali silika reaksiyon jelinin oluşumu ve çevreden su emerek genleşmesi	53
Şekil 2.18. ASR jelinin şişme evreleri ve çatlak oluşumu	54
Şekil 4.1. Keçiborlu yöresinin jeoloji haritası	79
Şekil 4.2. İnceleme alanının tektono-stratigrafik sütun kesiti	84
Şekil 4.3. Keçiborlu kükürt sahası jeoloji haritası	86
Şekil 4.4. Etibank Keçiborlu kükürt sahası jeoloji kesiti	90

Şekil 4.5. Kumludere amorf silika yatağına ait ekonomik rezerv alanı sınır haritası	92
Şekil 4.6. Kumludere amorf silika yatağı kesit görünümleri	93
Şekil 4.7. Kumludere amorf silika oluşumu 3 boyutlu modellemesi	94
Şekil 4.8. Değirmenderesi-Asartepe amorf silika yatağına ait rezerv alanı sınır haritası	96
Şekil 4.9. İrepdere (II.lokasyon) amorf silika yatağına ait rezerv alanı sınır haritası	98
Şekil 4.10. Isbaş A.Ş.'nce (diyatomit olarak adlandırılan) amorf silikanın üretim ve kullanımı	100
Şekil 4.11. Amorf silika (-32 mm kırılmış) agrega granülometri eğrileri	103
Şekil 4.12. I. ve II. lokasyon kırılmış amorf silika agregalarının tane boyut sınıfına ve zamana bağlı ağırlıkça su emme oranları	112
Şekil 4.13. I. lokasyon Amorf silikasının sıcaklık artışı-kızdırma kaybı ilişkisi	115
Şekil 4.14. II. lokasyon Amorf silikanın sıcaklık artışı-kızdırma kaybı ilişkisi	115
Şekil 4.15. Mikronize amorf silika partiküllerinin boyutsal analiz grafiği	118
Şekil 4.16. (LI/5) Amorf silika numunesine ait XRD analiz diyagramı	122
Şekil 4.17. (LI/28) Amorf silika numunesine ait XRD analiz diyagramı	122
Şekil 4.18a. İrepdere formasyonunun ince kesit görüntüsü	124
Şekil 4.18b. İrepdere formasyonunun ince kesit görüntüsü	124
Şekil 4.18c. İrepdere formasyonunun ince kesit görüntüsü	125
Şekil 4.18d. İrepdere formasyonunun ince kesit görüntüsü	125
Şekil 4.19a. Kumludere formasyonunun ince kesit görüntüsü	126
Şekil 4.19b. Kumludere formasyonunun ince kesit görüntüsü	126
Şekil 4.19c. Kumludere formasyonunun ince kesit görüntüsü	127
Şekil 4.20. I.lokasyon numunesinin mikroyapısı	128
Şekil 4.21. I.lokasyon numunesinde gözenek dağılımı	128
Şekil 4.22. I. lokasyon numunesinde camsı fazın görünümü	128
Şekil 4.23. II. lokasyon numunesinin mikroyapısı	129
Şekil 4.24. II.lokasyon numunesinde gözenek dağılımı	129
Şekil 4.25. II. lokasyon numunesi boşluklarında kuvars kristalleri	130

Şekil 4.26. Arzu edilen basınç dayanım ve işlenebilirliğe göre 28 günlük silindir numune karışımındaki su/çimento oranı	133
Şekil 4.27. İlave yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C20) beton numunelerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması	142
Şekil 4.28. İlave yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C30) beton numunelerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması	142
Şekil 4.29. İlave yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C40) beton numunelerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması	143
Şekil 4.30. C20 betonunda ilave kullanım için amorf silika oranı - basınç dayanım değişimi ilişkisi	144
Şekil 4.31. C30 betonunda ilave kullanım için amorf silika oranı - basınç dayanım değişimi ilişkisi	144
Şekil 4.32. C40 betonunda ilave kullanım için amorf silika oranı - basınç dayanım değişimi ilişkisi	145
Şekil 4.33. Basit ikame yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C20) beton örneklerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması	146
Şekil 4.34. Basit ikame yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C30) beton örneklerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması	146
Şekil 4.35. Basit ikame yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C40) beton örneklerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması	147
Şekil 4.36. C20 betonunda basit ikame yöntemine göre kullanım için amorf silika oranı - basınç dayanım değişimi ilişkisi	148
Şekil 4.37. C30 betonunda basit ikame yöntemine göre kullanım için amorf silika oranı - basınç dayanım değişimi ilişkisi	148
Şekil 4.38. C40 betonunda basit ikame yöntemine göre kullanım için amorf silika oranı - basınç dayanım değişimi ilişkisi	148
Şekil 4.39a. Amorf silikanın %5 oranında ilavesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi	149

Şekil 4.39b. Amorf silikanın %10 oranında ilavesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi	150
Şekil 4.39c. Amorf silikanın %15 oranında ilavesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi	150
Şekil 4.40a. Amorf silikanın %5 eksiltilmesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi	151
Şekil 4.40b. Amorf silikanın %10 eksiltilmesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi	151
Şekil 4.40c. Amorf silikanın %15 eksiltilmesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi	152
Şekil 4.41. C20 betonu örneklerinin aşınma dayanımı test analizi irdelemesi	157
Şekil 4.42. C30 betonu örneklerinin aşınma dayanımı test analizi irdelemesi	157
Şekil 4.43. C40 betonu örneklerinin aşınma dayanımı test analizi irdelemesi	158
Şekil 4.44. Karışım tasarımını temsil eden 25x25x279mm prizmatik çubuklar	164
Şekil 4.45. 80°C NaOH çözeltisindeki kontrol ve amorf silika katkılı harç çubuklarının zamana bağlı genişmesi	167
Şekil 4.46. ASR etkisinde kontrol betonunda meydana gelen yüzeysel bozunma	168
Şekil 4.47. ASR etkisinde kontrol betonunda yüzeysel olarak gelişen çatlak mekanizması	169
Şekil 4.48. %5 Amorf silika kullanımı ile ASR etkisinde betonda yüzeysel bozunma	169
Şekil 4.49. %10 Amorf silika kullanımı ile ASR etkisinde betonda yüzeysel bozunma	170
Şekil 4.50. Kontrol betonu örneklerinde ASR etkisinde reaksiyon jeli oluşumu	171
Şekil 4.51. Kontrol betonu örneklerinde ASR etkisinde agrega yapısında bozunma olgusu	172
Şekil 4.52. Kontrol betonu örneklerinde ASR etkisinde matriks yapıda bozunma olgusu	173
Şekil 4.53. ASR etkisinde beton örneğinin matriks yapısındaki değişimi(AS: %5 Katkı)	174
Şekil 4.54. ASR etkisinde beton örneğinin matriks yapısındaki değişimi (AS: %10 Katkı)	175

Şekil 4.55. ASR etkisinde beton örneğinin matris yapısındaki değişimi (AS: %15 Katkı)	176
Şekil 4.56. Yapıda suyun etkili olduğu durumlar	179
Şekil 4.57. Zemin neminin bir yapı duvarındaki ilerlemesinin sembolik gösterimi	183
Şekil 4.58. Kimyasal çözelti - beton örneği etkileşimi deney ortamı	185
Şekil 4.59. Beton örneklerinde Na_2SO_4 çiçeklenmesinin oluşumu	190
Şekil 4.60. Beton örneklerinde MgCO_3 çiçeklenmesi ve kristalize kabuk oluşumu	190
Şekil 4.61. Na_2SO_4 çözeltisi ile etkileşen C20 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan sülfatlı tuzlar	192
Şekil 4.62. Na_2SO_4 çözeltisi ile etkileşen C30 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan sülfatlı tuzlar	193
Şekil 4.63. Na_2SO_4 çözeltisi ile etkileşen C40 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan sülfatlı tuzlar	194
Şekil 4.64. MgSO_4 çözeltisi ile etkileşen C20 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan MgCO_3 kristalleri	195
Şekil 4.65. MgSO_4 çözeltisi ile etkileşen C30 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan MgCO_3 kristalleri	196
Şekil 4.66. MgSO_4 çözeltisi ile etkileşen C40 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan MgCO_3 kristalleri	197
Şekil 4.67. 3 farklı konsantrasyonda Na_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C20 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi	198
Şekil 4.68. 3 farklı konsantrasyonda Na_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C30 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi	198
Şekil 4.69. 3 farklı konsantrasyonda Na_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C40 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi	199
Şekil 4.70. 3 farklı konsantrasyonda MgSO_4 çözeltisiyle etkileşen C20 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi	199
Şekil 4.71. 3 farklı konsantrasyonda MgSO_4 çözeltisiyle etkileşen C30 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi	200
Şekil 4.72. 3 farklı konsantrasyonda MgSO_4 çözeltisiyle etkileşen C40	

beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi	200
Şekil 4.73. Asidik çözelti - beton örneği etkileşimi deney ortamı	203
Şekil 4.74. Beton örneklerinin yüzeyinde jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) kristalleşmesi	206
Şekil 4.75. H_2SO_4 çözeltisi ile etkileşen C20 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan jips çiçeklenmeleri	207
Şekil 4.76. H_2SO_4 çözeltisi ile etkileşen C30 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan jips çiçeklenmeleri	208
Şekil 4.77. H_2SO_4 çözeltisi ile etkileşen C40 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan jips çiçeklenmeleri	209
Şekil 4.78. 3 farklı konsantrasyonda H_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C20 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi	210
Şekil 4.79. 3 farklı konsantrasyonda H_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C30 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi	210
Şekil 4.80. 3 farklı konsantrasyonda H_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C40 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi	211
Şekil 4.81. ÇB-19 olarak kodlanmış 1.0/25 BDB üç sıra boşluklu , duvar elemanı görünümü	212
Şekil 4.82. Kontrol ve amorf silika katkılı bimsblok numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük (yaş) ağırlık değişimleri	216
Şekil 4.83. Kontrol ve amorf silika katkılı bimsblok numunelerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım performansları	217
Şekil 4.84. A ve F grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi	220
Şekil 4.85. B grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi	221
Şekil 4.86. C grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi	222
Şekil 4.87. D grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi	223
Şekil 4.88. E grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi	224
Şekil 4.89. Isı iletkenlik test cihazı ile blok örneğinin analizinden görünüm	224

Şekil 4.90. A grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	225
Şekil 4.91. B grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	226
Şekil 4.92. C grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	227
Şekil 4.93. D grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulgular	228
Şekil 4.94. E Grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	229
Şekil 4.95. F grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	230

Çizelgeler Dizini

Çizelge 2.1. Çözünmüş silikanın boyutlarına göre sınıflandırılması	16
Çizelge 2.2. Mikro silikanın tipik kimyasal ve fiziksel özellikleri	18
Çizelge 2.3. Silis dumanı tanımlamasında sıkça kullanılan Kanada Standardı	19
Çizelge 2.4. Normal beton ve yüksek dayanımlı beton kullanılan kolon maliyetlerinin karşılaştırması	21
Çizelge 2.5. Önemli projelerden sağlanan mikro silika katkılı beton karışımlarının dayanımı ile mikro silika verimlilik faktörü analizi	23
Çizelge 2.6. Dayanım ve elastisite modülü arasındaki ilişki	24
Çizelge 2.7. Kontrol ve amorf silikalı betonun aside maruz kalma deneyinde ağırlık kaybı sonuçları	26
Çizelge 2.8. Asit ortamlar için tavsiye edilen amorf silika betonu karışım tasarımı	26
Çizelge 2.9. Kimyasal etkileşimlere göre önerilen amorf silika betonu karışım tasarımı	27
Çizelge 2.10. Değişik sülfat ortamları için önerilen amorf silikalı beton tasarımı	28
Çizelge 2.11. Döşeme için aşındırma deneyi	29
Çizelge 2.12. Silis dumanı kimyasal bileşenleri	31
Çizelge 2.13. Diyatomit kayaç örneklerinin mineralojik analizleri	44
Çizelge 2.14. Diyatomit kayaç örneklerinin kimyasal analizleri	44
Çizelge 2.15. Pomzadan mamul yapı elemanlarının uygunluk kriterleri	64
Çizelge 3.1. Amorf silika kayaç ve agrega analizlerinde kullanılan ekipman ve teçhizatlar	66
Çizelge 3.2. Ürün analizlerinde kullanılan ekipman ve teçhizatlar	68
Çizelge 3.3. I. ve II. lokasyon agrega analizlerine göre gerekli en az numune miktarı ve kullanılan deney yöntemleri	72
Çizelge 3.4. Mineral katkı maddesi olarak amorf silikanın puzolanik özellikleri ve geleneksel beton performansına etkileri analizlerinde kullanılan yöntemler	73
Çizelge 3.5. Deneyde kullanılan agrega granülometrisi	75

Çizelge 3.6. Alternatif agrega olarak amorf silikanın hafif yapı elemanları üretiminde kullanılabilirliğine ilişkin analiz yöntemleri	77
Çizelge 4.1. Orijinal serpantin kayaç numunesi ile altere serpantin kayaç numuneleri kimyasal analiz sonuçlarının karşılaştırılması	87
Çizelge 4.2. Orijinal tuf numunesi ile altere tuf numuneleri kimyasal analiz sonuçlarının karşılaştırılması	88
Çizelge 4.3. Kumludere amorf silika yatağı sınır ve yükselti koordinat değerleri	91
Çizelge 4.4. Kumludere amorf silika yatağı rezerv hesabı	95
Çizelge 4.5. Değirmenderesi-Asartepe amorf silika yatağı sınır koordinat değerleri	95
Çizelge 4.6. Değirmenderesi-Asartepe amorf silika yatağı mümkün rezerv hesabı	97
Çizelge 4.7. İrepdere amorf silika yatağı sınır koordinat değerleri	97
Çizelge 4.8. İrepdere (II.lokasyon) amorf silika yatağı mümkün rezerv hesabı	98
Çizelge 4.9. Kumludere mevki amorf silikanın üretim durumu	99
Çizelge 4.10. I. ve II. lokasyon amorf silika kayacının genel fiziksel özellikleri	101
Çizelge 4.11. Amorf silika agregası granülometrik özellikleri	102
Çizelge 4.12. Hafif agregaların tane büyüklüğü dağılımı (Granülometrik bileşim)	104
Çizelge 4.13. I. ve II. lokasyon kırılmış amorf silika agregaları gevşek ve sıkışık kuru birim hacim ağırlıkları	105
Çizelge 4.14. Keçiborlu (I. ve II. lokasyon) 0-16 mm grubu kırılmış agregalarının TS 1114' de öngörülen “maksimum karışık hafif agrega birim hacim ağırlığı” değeri ile karşılaştırılması	105
Çizelge 4.15. 0-16 grubu amorf silika karışık agregalarında ince madde oranı tayini deney bulgu ve sonuçları	106
Çizelge 4.16. Birim ağırlık tayini için deney numunesi miktarı	107
Çizelge 4.17. I. ve II. lokasyon Amorf silika agregalarının “birim ağırlık, doygun kuru yüzey birim ağırlık ve görünür birim ağırlık” deney bulgu ve sonuçları	108

Çizelge 4.18. I. ve II. lokasyon amorf silika özgül ağırlık deney bulgu ve sonuçları	109
Çizelge 4.19. I. lokasyon amorf silika agregası ağırlıkça su emme deneyi sonuçları	110
Çizelge 4.20. II. lokasyon amorf silika agregası ağırlıkça su emme deneyi sonuçları	111
Çizelge 4.21. I. ve II. lokasyon amorf silika agregaları kızdırma kaybı deney sonuçları	114
Çizelge 4.22. Amorf silika partikül boyutları	117
Çizelge 4.23. I. ve II. lokasyon amorf silikaların kimyasal bileşenleri	119
Çizelge 4.24. Keçiborlu I. ve II. lokasyon amorf silika kayalar kimyasal bileşenlerinin silis dumanı/mikrosilis standardına göre değerlendirilmesi	119
Çizelge 4.25. Keçiborlu amorf silika kayalar kimyasal bileşenlerinin uçucu küllerde aranılan kimyasal özellikler ile karşılaştırılması	120
Çizelge 4.26. (I. lokasyon) Mikronize silikanın puzolanik aktivite ve özgül yüzey deney sonuçları	120
Çizelge 4.27. I. Lokasyondan alınan kayaç numunelerinin XRD analiz sonuçları	123
Çizelge 4.28. Beton karışımlarında kullanılan agreganın fiziksel özellikleri	132
Çizelge 4.29. İncelik modülü tayini hesabı	132
Çizelge 4.30. Çeşitli Beton kıvamları ve agrega en büyük tane çapına göre yaklaşık brüt karışım suyu hesabı	133
Çizelge 4.31. Beton birim hacmindeki kaba agrega hacmi	134
Çizelge 4.32. 1 m ³ beton karışımına giren malzeme hacimsel değerleri ve ince madde miktarı	135
Çizelge 4.33. Beton sınıfına göre deney numuneleri karışımlarındaki birim malzeme miktarı	135
Çizelge 4.34. C20 beton sınıfındaki her bir numune grubunda kullanılan su, çimento ve agrega miktarı	135
Çizelge 4.35. C20 beton sınıfında hazırlanan numune grupları karışım reçeteleri	136
Çizelge 4.36. C30 beton sınıfındaki her bir numune grubunda kullanılan su, çimento ve agrega miktarı	136

Çizelge 4.37. C30 beton sınıfında hazırlanan numune grupları karışım reçeteleri	136
Çizelge 4.38. C40 beton sınıfındaki her bir numune grubunda kullanılan su, çimento ve agrega miktarı	137
Çizelge 4.39. C40 beton sınıfında hazırlanan numune grupları karışım reçeteleri	137
Çizelge 4.40. C20, C30 ve C40 beton sınıflarındaki silindir numune gruplarının basınç dayanımı analiz bulguları	138
Çizelge 4.41a. C20 beton örnekleri için amorf silikanın etkinlik faktörü hesabı	152
Çizelge 4.41b. C30 beton örnekleri için amorf silikanın etkinlik faktörü hesabı	153
Çizelge 4.41c. C40 beton örnekleri için amorf silikanın etkinlik faktörü hesabı	153
Çizelge 4.42. Tikitere amorf silikasının beton uygulamaları için etkinlik faktörü	153
Çizelge 4.43. C20 betonu için aşınma dayanımı deney bulguları	154
Çizelge 4.44. C30 betonu için aşınma dayanımı deney bulguları	155
Çizelge 4.45. C40 betonu için aşınma dayanımı deney bulguları	156
Çizelge 4.46. Amorf silika, silika dumanı, uçucu kül, kalsine kil ve portland çimentosunun kimyasal bileşimleri	159
Çizelge 4.47. Keçiborlu amorf silika kimyasal bileşenlerinin, doğal puzolan sınıfında yer alan tras (TS 25) ve uçucu küllerde (TS 639) aranan kimyasal özellikler ile karşılaştırılması	160
Çizelge 4.48. Mikronize amorf silikanın puzolanik aktivite ve özgül yüzey analiz bulguları	160
Çizelge 4.49. Alkali silika reaksiyon yöntemlerinin kıyaslaması	161
Çizelge 4.50. Harç kum derecesi	162
Çizelge 4.51. Harç karışım tasarımı	163
Çizelge 4.52. Numune gruplarına göre harç karışım miktarları	163
Çizelge 4.53. ASTM C 1260-01 standardına göre ASR'na bağlı genleşme sınıflaması	164
Çizelge 4.54. Kontrol harç çubuklarının boy değişim verileri	165
Çizelge 4.55. %5 amorf silika katkılı harç çubuklarının boy değişim verileri	165
Çizelge 4.56. %10 amorf silika katkılı harç çubuklarının boy değişim verileri	165
Çizelge 4.57. %15 amorf silika katkılı harç çubuklarının boy değişim verileri	166
Çizelge 4.58. Amorf silikanın ASR bağlı genleşmeye etkisi	166

Çizelge 4.59. Na ₂ SO ₄ çözeltisiyle etkileşim analizinde beton örneklerinin orjinal kuru birim ağırlık değerleri	186
Çizelge 4.60. Na ₂ SO ₄ çözeltisine maruz beton örneklerinin etkileşim sonrası kuru birim ağırlık değerleri	187
Çizelge 4.61. MgSO ₄ çözeltisiyle etkileşim analizinde beton örneklerinin orijinal kuru birim ağırlık değerleri	188
Çizelge 4.62. MgSO ₄ çözeltisine maruz beton örneklerinin etkileşim sonrası kuru birim ağırlık değerleri	189
Çizelge 4.63. C20 betonunda, Na ₂ SO ₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri	192
Çizelge 4.64. C30 betonunda, Na ₂ SO ₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri	193
Çizelge 4.65. C40 betonunda, Na ₂ SO ₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri	194
Çizelge 4.66. C20 betonunda, MgSO ₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri	195
Çizelge 4.67. C30 betonunda, MgSO ₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri	196
Çizelge 4.68. C40 betonunda, MgSO ₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri	197
Çizelge 4.69. H ₂ SO ₄ çözeltisiyle etkileşim analizinde beton örneklerinin orijinal kuru birim ağırlık değerleri	204
Çizelge 4.70. H ₂ SO ₄ çözeltisine maruz beton örneklerinin etkileşim sonrası kuru birim ağırlık değerleri	205
Çizelge 4.71. C20 betonunda, H ₂ SO ₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri	207
Çizelge 4.72. C30 betonunda, H ₂ SO ₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri	208
Çizelge 4.73. C40 betonunda, H ₂ SO ₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri	209
Çizelge 4.74. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan pomza agregalarının fiziksel özellikleri	213

Çizelge 4.75. Kontrol ve katkı maddesi içeren hafif beton karışım tasarımları	213
Çizelge 4.76. KB1 karışımından üretilen hafif yapı elemanlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri	214
Çizelge 4.77. KB2 karışımından üretilen hafif yapı elemanlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri	215
Çizelge 4.78. ASB karışımından üretilen hafif yapı elemanlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri	215
Çizelge 4.79. KB1 ve KB2 grubuna göre ASB grubu hafif yapı elemanlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük göreceli dayanım değişimleri	216
Çizelge 4.80. Deneysel analizlerde kullanılan blok elemanlarının tanımı	218
Çizelge 4.81. A ve F blok grubu numune türleri için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları	219
Çizelge 4.82. B grubu numune türü için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları	220
Çizelge 4.83. C grubu numune türü için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları	221
Çizelge 4.84. D grubu numune türü için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları	222
Çizelge 4.85. ÇB-19 Amorf silika katkılı numune türü için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları	223
Çizelge 4.86. A grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	225
Çizelge 4.87. B grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	226
Çizelge 4.88. C grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	227
Çizelge 4.89. D grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	228
Çizelge 4.90. E grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	229
Çizelge 4.91. F grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları	230
Çizelge 4.92. Bimsblok ürün gruplarının ısı iletkenlik analiz bulguları karşılaştırması	231
Çizelge 4.93. Amorf silika agrega kullanımının blok özelliklerine etkisi	231

1. GİRİŞ

Beton, inşaat sektöründe en yaygın kullanım alanına sahip malzemedir. Bilimsel araştırma ve teknolojik gelişimlere paralel olarak modern beton, çimento, agrega ve su karışımından ibaret bir yığın olmaktan çıkmış, mineral-kimyasal katkı karışımları ve lifler içeren daha kompleks bir ürün olmuştur.

Daha kaliteli beton elde etmek için yapılması gereken tek şey daha düşük su/çimento oranı veya su/bağlayıcı oranına sahip karışımın hazırlanması değildir. Beton basınç dayanımı, çimento dozajının olduğu kadar çimento partiküllerinin sıklığının da bir fonksiyonudur.

Dünya inşaat sektöründe beton kalitesini artırmak için farklı tür ve bileşimde katkı maddeleri kullanıldığı bilinmektedir. Genel olarak bu katkı maddeleri kimyasal yöntemler, endüstriyel atıklar (yan ürün olarak) yada doğal kaynaklardan elde edilmektedir.

Kimyasal yöntemler ile elde edilen katkı maddeleri, farklı kimyevi madde bileşenlerinden oluşan sıvı veya toz polimer grubu maddeleri kapsamaktadır. Bu maddeler dünya inşaat endüstrisinde önemli bir pazar payına sahiptir.

Uçucu küller ve silis dumanı endüstriyel atık veya yan ürün olarak adlandırılabilirler diğer grup katkı maddelerini oluşturur. Pek çok ülkede olduğu gibi, Türkiye’de de beton üretiminde en fazla tüketilen katkı maddesi, termik santrallerden elde edilen uçucu küllerlerdir. Ucuz ve bol miktarda bulunması nedeniyle, hazır beton üreten kuruluşlarca (beton maliyetlerini düşürmek için) çimento yerine dolgu maddesi olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak uçucu küllerin-nispeten düşük reaktif silis içeriğinden dolayı-beton yapısını oluşturan çimento-katkı maddesi-agrega reaksiyonlarında silis dumanı kadar etkin olmadığı bilinmektedir. Mikronize toz silikatlar veya yaygın adı ile silis dumanı ise silikon, ferrosilikon, silikoferrokrom üretim tesislerinden yan ürün olarak elde edilmektedir. Silis dumanı uçucu küle göre, yüksek reaktif silis içeriği ve süper ince partikül yapısıyla beton kalitesini artırmada

çok daha etkindir. Ancak silis dumanının bir yan ürün olarak elde edildiği tesisler termik santraller kadar yaygın değildir. Buna rağmen dünya da 1 milyon tona ulaşan tüketim miktarı, çimento ve beton katkı maddesi olarak yaygın biçimde kullanılmasının bir göstergesidir (Yeğınobalı, 2001).

Beton kalitesini yükseltmede kullanılan son grup katkıları ise doğal mineraller ve kayalardır. Diğer gruplar kadar yaygın olmamakla birlikte beton katkı maddesi olarak volkanik küller, taş unu, diatomit ve kalsine edilmiş killerin de kullanıldığı bilinmektedir. Son on yılda bu doğal malzemelere amorf silika (jeosilika) kayacı da dahil olmuştur. Beton kalitesini silis dumanı kadar etkin ve ekonomik olarak artıran amorf silikanın işletilebilir rezervlerinin çok sınırlı olması nedeniyle, pazardaki payı da kısıtlıdır.

Dünyada ekonomiklik arz eden ve halen işletilmekte olan, resmi kayıtlara geçmiş tek doğal amorf silika yatağı, Yeni Zelanda'nın Rotorua bölgesinde bulunmaktadır (Annual, 1999). Ülkemizde ise inşaat sektöründe mineral katkı maddesi olarak kullanılabilir özelliklere sahip amorf silika oluşumlarını kapsayan bilimsel anlamda bir araştırmaya rastlanmamıştır.

1.1. Konu ve Amaç

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora tezi (PhD) olarak yürütülmüş olup, "İsparta Keçiborlu yöresi amorf silika oluşumlarının inşaat endüstrisinde kullanılabilirliği"nin araştırılmasını konu almaktadır.

İsparta-Keçiborlu yöresindeki amorf silika yatağı, uzun yıllar Etiholding A.Ş. (Etibank) tarafından işletilen kükürt madeni ruhsat sahası içerisinde yer almaktadır. Yöredeki rezervin bir kısmı (Kumludere bölgesi) önceleri kuvarsit, daha sonra da diatomit tanımlaması ile işletilmiştir. Tez kapsamında, yörede yapılan ilk araştırmalardan elde edilen bulgular, Kumludere-Değirmenderesi amorf silika oluşumlarının Yeni Zelanda kayacıyla benzer teknolojik özellikler gösterdiğini,

İrepedere kayacının ise hafif agrega olarak araştırılmaya değer olduğunu ortaya koymuştur.

Ülkemizde beton katkı maddelerinin üretim ve tüketim miktarını içeren herhangi bir resmi kayıt bulunmamasıyla birlikte; Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerden yan ürün olarak 800-1000 ton/yıl kapasiteyle elde edilen silis dumanının, ülkemiz inşaat sektöründe tüketildiği bilinmektedir (Yeğinobalı, 2001). Türkiye’de üretilen ve tüketilen çimento üretimi dikkate alındığında, bu tesisten elde edilen silis dumanının sektörün talebine cevap veremeyeceği açıktır.

Ayrıca hafif yapı elemanı üretimine yönelik yatırımlar hızla artmakta ve hafif agregalardan üretilen yapı elemanlarının pazar payı da giderek büyümektedir. Bununla birlikte Isparta’daki pomza ve Kula civarındaki cüruf yatakları haricinde tüm Batı Anadolu da kayda değer hafif agrega yatağı yoktur.

Bu çalışmada, öncelikle ekonomik bir potansiyel niteliğinde olabilecek Keçiborlu amorf silika oluşumlarının inşaat-beton sektörüne yönelik kullanım imkanlarının araştırılarak, elde edilen bulgular ışığında ülkemiz inşaat ve beton sektörüne alternatif hammadde kaynaklarının sunulması, dolayısıyla yöre ve ülke ekonomisine katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

1.2. İnceleme Alanı Hakkında Genel Bilgiler

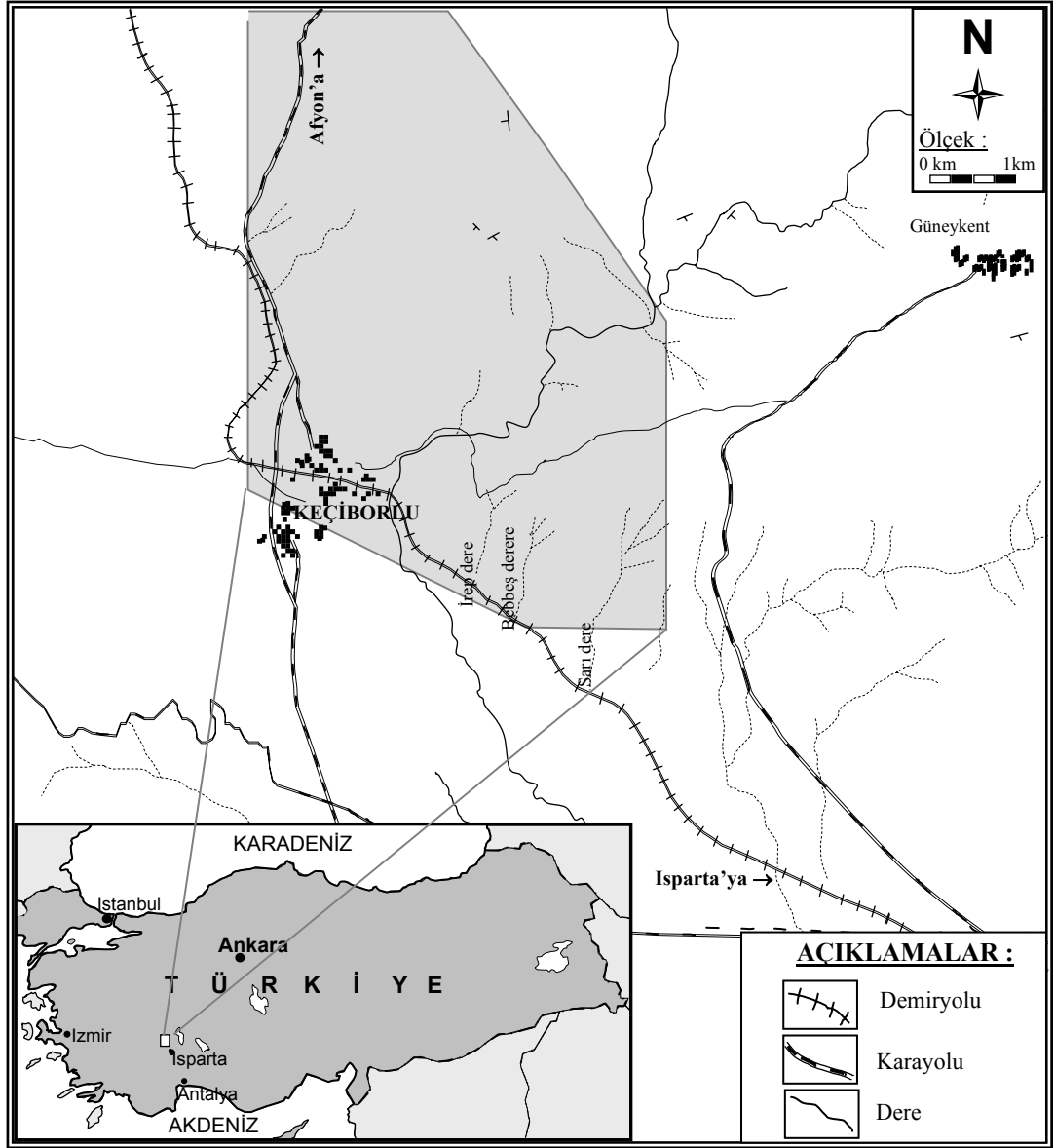
1.2.1. İnceleme Alanının Yeri

İnceleme alanı Isparta iline bağlı Keçiborlu İlçesi sınırları içerisinde, İlçe merkezinin kuzeyinden, doğusuna kadar uzanan bir bölgede yer alır. Söz konusu inceleme alanı İR 3483 numaralı Eti Holding A.Ş. kükürt ruhsatlı maden sahasını kapsamaktadır.

Çalışma alanının, gerek devlet karayolu gerekse demiryolu ile diğer yerleşim yerlerine bağlantısı bulunmaktadır. Çalışma alanının konumu yer bulduru haritasında gösterilmiş olup Isparta iline mesafesi yaklaşık 45 km dir (Şekil 1.1).

İlçe Afyon-Isparta, Isparta-Antalya, Afyon-Burdur-Antalya, Isparta-Dinar-İzmir karayolu ve Afyon-Burdur/Isparta, Isparta/Burdur-Denizli-İzmir demiryolu hattı üzerindedir. İlçenin önemli yerleşim merkezlerine uzaklığı aşağıda verilmiştir:

Isparta-Keçiborlu	:	45 km.
Burdur-Keçiborlu	:	39 km.
Ankara-Keçiborlu	:	351 km.
İstanbul-Keçiborlu	:	552 km.
İzmir-Keçiborlu	:	354 km.
Antalya-Keçiborlu	:	167 km.



Şekil 1.1. İnceleme alanının yer bulduru haritası

1.2.2. Sahanın Hukuki Durumu ve Tarihçesi

İnceleme alanı eski bir kükürt işletmesidir. Değirmendere, Kumludere ve Kükürtdere ocakları işletilmiş en önemli kükürt yataklarıdır. 1967 yılına kadar işletilen Kükürtdere ocağı sonradan cevher tenörü düşüklüğü nedeniyle terk edilmiştir. 1937'li yıllardan 1990'lı yıllara kadar kapalı işletme olarak işletilen en büyük ocak olan Değirmendere ve açık ocak olarak işletilen Kumludere ocakları, ekonomik olarak işletilebilecek rezervin tükenmesiyle 1993 yılında tamamen terk edilmiştir.

Keçiborlu kükürt sahası içerisinde yer alan amorf silika oluşumları ise Etibank Keçiborlu Kükürt İşletmesinin faal olduğu dönemlerde “kuvarsit maden ocağı” olarak işletilmiştir. Kumludere maden ocağı güney batı bitişiğinde yer alan ve açık işletme yöntemiyle kuvarsit adı altında üretilen tüvenan amorf silika, yine açık işletmeye yakın bir alanda kurulu bulunan kuvarsit hazırlama tesisinde kurutulup öğütüldükten sonra “zirai kükürt” hazırlanmasında nem tutucu ve topaklanmayı önleyici katkı maddesi olarak kullanılmıştır (Davraz, 1987).

Kükürt İşletmesinin kapatılmasından sonra 1997 yılında, Eti Holding A.Ş.’nce “diatomit” olarak nitelenen oluşum, yine aynı yıl içerisinde “diatomit lokal alanı” olarak ihale edilmiş ve işletmesi Beril Madencilik Ltd. Şti.’ne verilmiştir. 2003 yılına kadar bu lokal alan diatomit madeni olarak ISBAŞ AŞ. bünyesindeki Beril Madencilik Ltd. Şti.’nce zaman zaman işletilmiştir. Üretilen hammadde hafif yapı elemanları üretiminde agrega olarak kullanılmıştır (Etiholding, 1998-2000).

1.3. Amorf Silikanın Tanımı ve Kullanım Alanları

Amorf silika; volkanik-hidrotermal sistemler içinde belirli sıcaklığa sahip ve çözünürlüğü dengeye ulaşmış koloidal silis partikülleri içeren akışkanların yeryüzüne çıkarak soğuması ve aşırı doygunluğa erişmesi sonucunda yüzeyde silika tortuları, ayrıca pH’ı nötr alkali kloritli sular yakınında ise yeraltı damarları biçiminde oluşan tortul bir kayadır. Silika sinter veya jeosilika olarak da adlandırılmaktadır.

Amorf silika kayacı genellikle beyaz olmasına rağmen gri, siyahımsı gri, krem, yeşil, portakal, kahverengi ve hatta kırmızı renklerde bile bulunabilir. Genellikle sert ve yoğun olmasına karşılık, süngerimsi dokulu çok poroz türleri de yaygındır.

Kavram olarak amorf silika (silika sinter), silika kalıntısı (gayzerit) ve amorf silis terimleri ile sıkça karıştırılmaktadır. Silika kalıntısı; jeotermal sistemlerin (CO₂ ve H₂S içeren) buhar zonunda oluşan kuvvetli asitlerin civardaki silisli yüzey

kayaçlarını altere etmesiyle birkaç cm kalınlığında oluşan tortu çökelleri, tabakalar ve damla tepecikleridir. Amorf silikaya göre daha yüksek oranda kükürt, kristobalit ve kaolen içerir.

Amorf silis ise sürekli kavram karmaşasına yol açan bir terimdir. Türkçe’de silis, bir ametal olan silisyum elementine karşılık kullanılabildiği gibi, silisyum elementinin oksijen ile muhtelif bağ yapıları oluşturduğu silikat grubu mineraller veya camsı materyaller için de kullanılmaktadır.

Doğada olağan koşullarda saf olarak bulunmayan ancak yer kabuğunun oksijenden sonra en bol elementi (kayaçların yaklaşık % 27’si) olan silisyumdan günümüz teknolojisi ile nabit silisyum kristalleri elde edilebilmektedir. Yani saf silisyum elementinden oluşan materyal amorf yapı göstermez.

Silisyum oksijenle bağ yaparak en yaygın mineraller grubunu (yer kabuğunun yaklaşık % 55’ini) oluşturur ve silikatlar olarak adlandırılır. Kuvars, feldspat(lar), olivin, mika(lar), talk, ojit ve epidot gibi minerallerin tamamı silikatlardır. Silika ise daha dar çerçeveli bir kavram olup, sadece “Silisyum + Oksijen” birliğini ifade eder. Örneğin mineral kuvars silikadır. Yine silika formunda mineraller olan tridimit, kohesit ve kristobalit yüksek sıcaklık ve basınç altında kararlı olan minerallerdir. Bütün bu mineraller aynı zamanda silikatlardır. Bir başka deyişle kuvars saf silikadan oluşan bir silikattır. Fakat feldspat silisyum ve oksijene ilave olarak sodyum, aluminyum, potasyum ve kalsiyum içerir. Bu yüzden feldspatlar silikatlardır ancak saf silika değildir.

Keçiborlu kayacı yüksek oranda silika ($\text{SiO}_2 > \% 90$) içermektedir. Kayaç az miktarda anatas, jarosit, götit ve kükürt vd. mineralleri içerse de, bütününde kristalize yapı göstermemektedir. Bu özellikleri dikkate alınarak tez konusu kayaç “amorf silika” olarak adlandırılmıştır.

Amorf silika, açık rengi, hafifliği (birim hacim ağırlığı $< 1\text{gr/cm}^3$), mikro gözenekli yapısına bağlı yüksek porozitesi ve su emme kabiliyeti, gevrek ve kolay kırılabilir oluşu ile diğer silikatlı kayalardan kolayca ayırt edilebilir.

Bilinen en yaygın kullanım alanı inşaat sektörüdür. Beton dayanımını artırıcı ve priz hızlandırıcı polimer esaslı kimyasal maddeler, uçucu küller, zeolit grubu mineraller ile endüstriyel yan ürün/atık olarak elde edilen silis dumanı gibi, doğal amorf silika da Yeni Zelanda ve civar ülkelerinde beton katkı maddesi olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Genelde açık maden ocaklarından üretilen tüvenan amorf silika, kırma, eleme, kurutma ve öğütme işlemlerine tabi tutulduktan sonra dökme veya torbalanmış olarak inşaat sektörünün kullanımına sunulmaktadır. Amorf silikadan üretilen beton katkı maddesi, kimyasal ve/veya yan ürün olarak elde edilen alternatif katkı maddelerine göre daha düşük maliyetlerle piyasaya arz edilebilmektedir. Buna karşın dünya üzerinde ekonomik olarak işletilebilecek rezervleri hayli kısıtlıdır.

Halen Golden Bay Cement grubunda yer alan Microsilica New Zealand Ltd. Şti, günümüzde Yeni Zelanda'da Rotarua-Tikitere'de amorf silika içeren bir maden ocağını işletmektedir. Amorf silika yerel ve ihraç pazarlarında beton ve sıva katkı maddesi olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır (Annual book, 2000).

İnşaat sektörünün haricinde amorf silikanın;

- Sabun, deterjan, kağıt, boya, lastik, termo-plastik üretiminde katkı ve dolgu maddesi olarak,
- Plastik film üretiminde kaplayıcı ve katalizör olarak,
- Cam, seramik, ses ve ısısal yalıtımlar gerektiren malzeme üretiminde yüksek sıcaklık silikaları olarak,
- Elektronik, mücevhercilik, metal, cam sanayiinde vb. alanlarda aşındırıcı ve parlaticı madde olarak,
- Tıp, mikrobiyoloji, genetik, uzay sanayii gibi hassas ve saf madde kullanımı gerektiren ileri teknoloji alanlarında moleküler elek olarak,

- Muhtelif sanayi dallarında filtre ve absorban malzeme olarak kullanım alanları da mevcuttur.

1.3.1. Amorf Silikanın Dünya ve Ülkemiz İnşaat Sektöründeki Yeri

Dünyada baraj gövdesi, viyadük, köprü taşıyıcı sistemleri, çok katlı yapılar, atık baraj ve depoları, havaalanı pistleri, endüstriyel döşemeler, depreme dayanıklı olması istenen özel yapılar vs. gibi yerüstü yapıları; tünel metro, korunaklar, yeraltı depoları gibi yeraltı yapıları ile deniz ve sualtı yapılarında yüksek performanslı beton kullanımı çok yaygındır.

Ayrıca endüstriyel zemin ve döşemelerde, tünel kaplamalarında ve püskürtme sıva uygulamalarında yüksek performanslı beton, harç ve sıva kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır (Golden Bay Cement, 2002a).

Yüksek performanslı beton üretiminde yaygın olarak kullanılan katkı maddelerinden silis dumanı ve doğal amorf silikanın tüketim miktarlarına ait kesin kayıtlara rastlanamamıştır. Ancak Silis Dumanı Üreticileri Birliği'nce (SFPA) A.B.D. ve Avrupa'da yılda üretilen yaklaşık bir milyon ton silis dumanının bu ülkelerdeki talebe ancak cevap verdiği bildirilmektedir. Ülkemizde ise yüksek performanslı beton üretimi ve atık/doğal mikro-silislerin betonda katkı maddesi olarak kullanımıyla ilgili açık bir bilgi mevcut değildir. Ancak son yıllarda Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinden elde edilen yıllık 1.000 ton civarındaki silis dumanının bölgedeki hazır beton üreticileri tarafından kullanıldığı bilinmektedir.

İnşaat ve beton sektörü, ekonomimiz içerisinde payı en yüksek sektörlerin başında gelmektedir. 2000 yılında gerçekleşen çimento üretimi 35.800.000 ton, iç tüketim 31.500.000 tondur. Çimento fabrikalarının kurulu kapasitesi ise toplam 60.000.000 ton civarındadır. 30 milyon tonluk çimento tüketimi ortalama 120 milyon m³ betona eşdeğerdir. Tüketilen 120 milyon m³'e eşdeğer beton ve/veya betondan imal edilen ürünlerin % 1'i yüksek performanslı beton sınıfına girdiği kabul edilirse, ülkemiz

katkı maddesi ihtiyacının (kullanılan imento oranının en az % 10'u oranında ilave edildiği gz önünde bulundurularak) 30 bin ton civarında olduğu tahmin edilmektedir. Asgari 30 bin tonluk i tüketimin ülke ekonomisine yansımaları en az 5 milyon USD'dır. Isparta – Keçiborlu yöresindeki rezerv, bu talebe cevap verebilecek potansiyele sahiptir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Yöre ve Kükürt Yatakları Jeolojisini Konu Alan Çalışmalar

İR 3483 nolu Keçiborlu Kükürt Sahası'nın jeolojisi daha önceden pek çok araştırmacı tarafından çalışılmış, sahada gerek Etibank ve gerekse MTA tarafından 100'ün üzerinde arama ve rezerv artırmaya yönelik sondaj yapılmıştır. Yürütülen çalışmaların ışığında sahanın muhtelif ölçeklerde detay haritaları çıkarılmış, sahada yer alan jeolojik formasyonlar, cevherleşme, yan kayaç ve cevher / kayaç mineraloji ve petrografileriyle ilgili ayrıntılı araştırmalar yapılmıştır.

Etibank Keçiborlu kükürt sahasında amorf silika oluşumu; yöredeki volkanizma faaliyetleri, kükürt yataklarının oluşumu, hidrotermal alterasyon, altere olmuş kayaçların kimyasal yapısı ve yöredeki tektonik faaliyetlerle ile yakından ilişkilidir. Bu bakımdan, önceki araştırmacılar tarafından yöredeki volkanik aktivite ve kükürt yataklarının oluşumu ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Penck (1918)'e göre Keçiborlu kükürt yatakları liperitik filona bağlı volkanik kökenli bir oluşumdur.

Müller (1937), yöredeki kükürt yataklarının oluşumunu, fay doğrultusu boyunca gelişen volkanik sahada H₂S ve diğer fümerollerin yer altı sularıyla oksitlenmesi sonucu gelişen cevher mineralizasyonuna bağlar.

Lahn (1940), yörede yapmış olduğu jeolojik ve tektonik incelemeler sonucunda, kükürt yataklarının oluşumunu, yöredeki riyolitik filonun kırık ve çatlak kesimlerinden çıkan H₂S ve CO₂ gazlarına dayandırır.

Romberg (1964) ise Keçiborlu ve civarında yapmış olduğu jeolojik araştırmalar sonucunda, kükürt yataklarının liperitik bir filona bağlı olarak geliştiğini ve bu filonun haricinde cevherleşmenin bulunamayacağını belirtir.

Sarız (1985), Kumludere ve Değirmenderesi civarındaki mineral çökellerin yan kayaçlarını tuf, serpantin, kireçtaşı ve andezit olarak tanımlayarak, cevher (kükürt) mineralizasyonunun Pliyosen sonunda gerçekleştiğini belirtir. Ayrıca, yöredeki kayaçlarda gelişen yoğun alterasyonu, hidrotermal solüsyon ve gazlara bağlayarak, Kumludere, Değirmenderesi ve İrepedere bölgelerindeki silisleşmeyi, orijinal ve altere kayaçların kimyasal, mineralojik ve petrografik karşılaştırmasını yaparak açıklar.

Sarız (1985), Yalçinkaya vd. (1986), Karaman vd.(1988) ve Yalçinkaya (1989) yöredeki muhtelif formasyon ve birimleri stratigrafik ilişkilendirmeler, birim içerisindeki fosiller ve yaş tayinlerini yaparak bazı birimleri yeniden adlandırır.

Karaman (1990), kükürt sahasındaki kuvvetli deformasyon ve bindirme zonunu Orta-Miyosen'de gelişen sıkışma tektoniğine dayandırarak, bu zon içerisinde yer alan birimlerin batıdan güneybatıya taşındığı ileri sürer.

Güneş (1993), kükürt sahası içerisindeki silisleşmeyi, kükürt cevherinin empenye kayacı tüflerin ve yan kayacı niteliğindeki serpantinlerin hidrotermal alterasyonuna dayandırır.

2.2. Çözünmüş Silikanın Kimyası

Amorf silika, kristal yapısı olmayan ve kimyasal bileşiminde yüksek oranda silisyum dioksit içeren bir kayadır. Dolayısıyla amorf silika kayacını oluşturan en temel iki element silisyum ve oksijendir.

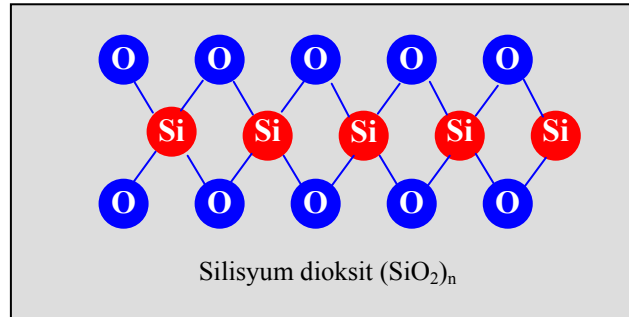
Silisyum yeryüzünde oksijenden sonra en çok bulunan ikinci elementtir. Periyodik tabloda ametaller (Grup IV A) grubunda yer alır. Atom numarası 14 atom ağırlığı 28,0855 olup, yoğunluğu 2,33 g/cm³ ve Mohs skalasına göre 7 sertliğindedir. Silisyum 1410 °C erir ve 2355 °C' de kaynar. Doğada serbest olarak bulunmaz. Alkali metaller ile reaksiyona girer.

Silisyumun kendisi (Si) cam gibi çözünmez bir katı olmasına rağmen, değişik oksitleri (özellikle SiO_2) suda bir miktar çözünebilir. Gerçekten de bütün doğal su rezervleri bir miktar çözülmüş silisyum oksit (silika) içerir.

Silisyum karbon elementinin hemsini gibi davranır. Dört kovalent bağı vardır. Bu nedenle çok fazla sayıda potansiyel moleküller oluşabilir. Silisyumun kimyası, karbon bileşiklerinin kimyasına göre biraz daha az karmaşıktır. Çünkü silis çekirdeği karbon çekirdeğinden daha büyüktür. Bundan dolayı silisyum atomunun iki veya üç bağ şeklini alması zordur ve 6 silis atomundan daha fazla zincir bağ oluşturamaz. Çözülmüş silika herhangi bir yüzey ile karşılaştığında, ısı ve basınç koşullarına da bağlı olarak tortu oluşturma eğilimi gösterir (Meyers, 1999).

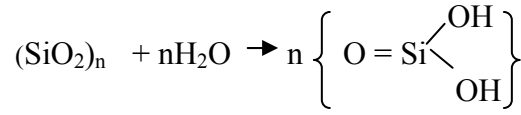
Suda çözülmüş silika, klasik olarak SiO_2 olarak formüle edilir. Çünkü amorf yapıdaki silika ve tortulaşmış silika yatakları tipik olarak her 1 gram silisyum molekülü için 2 gram oksijen molekülü içerir.

Meyers (1999), suda çözünen silika için $(\text{SiO}_2)_n$ formülünün mümkün olmadığını belirtmiş ve gerekçe olarak da, amorf silika $(\text{SiO}_2)_n$ modelinin su davranışına uygun olmadığını ileri sürmüştür. SiO_2 'in suda polimer halinde birleşmemesinden dolayı, Meyers' e göre yaygın olarak kullanılan silisik asit (H_2SiO_3) hatalı bir modeldir.



Şekil. 2.1. Silisyum dioksit (SiO_2)_n formundaki silika modeli kimyasal bağ yapısının şematik gösterimi

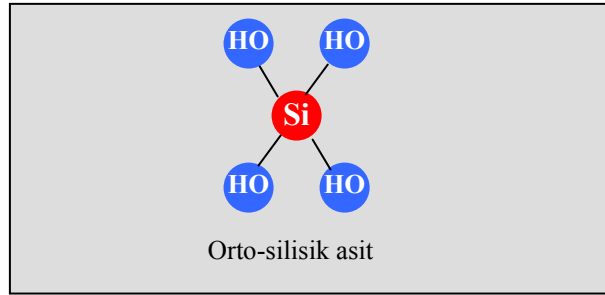
Silisyum dioksitin hepsi tetrahedral olan en az 11 farklı kristal şekli vardır. Bu yüzden suda çözünen SiO_2 modeli amorf silikayı yeterli derecede açıklayamamaktadır.



(Meta-silisik asit)

Silisyum dioksite su ilavesi, silisik asidi (H_2SiO_3) verir. Bu model, bazen çözünmüş silika ve dolayısıyla amorf silika tanımında kullanılmaktadır. Silisyum için çift bağ şekli güç olmasına rağmen var olmayan bir bileşik de değildir. Bununla birlikte silisyum atomlarının çift bağ oluşturma güçlüğü nedeniyle meta-silisik asit modeli çok geçerli bir model değildir.

Meyers (1999)'e göre silisik asit için en geçerli model H_4SiO_4 biçiminde formüle edilebilir. Bazı araştırmacılar bu modeli mono-silisik asit olarak (su ile bileşik yapmamış anlamında), diğerleri ise orto-silisik asit (tamamen hidrate olmuş anlamında) vermektedir (Şekil 2.2). Bu model tetrahedral tercihi tamamlamakta ve çok zayıf asitliği önceden bildirmektedir. Ortamdaki yüksek pH ise yüksek çözünürlüğü ifade etmektedir.

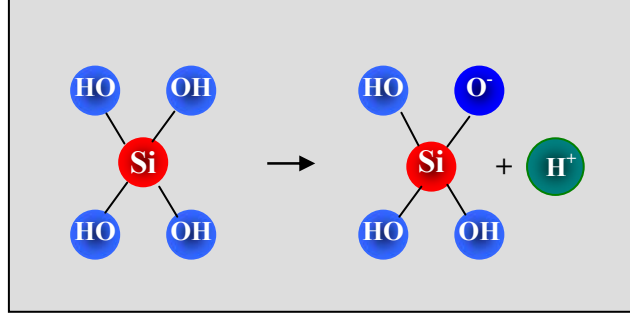


Şekil 2.2. Orto-silisik asit modeli

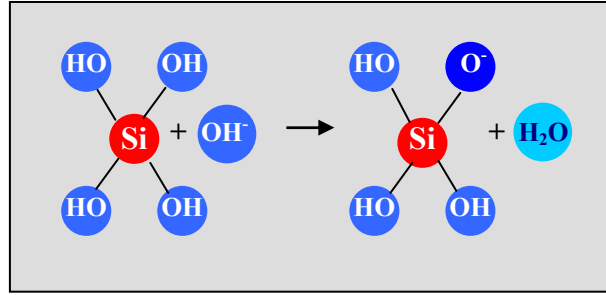
Bu model (tamamen hidrate olmuş anlamında) meta modele göre, doğruluğa daha yakın ve çözünmüş (amorf) silikanın davranışını yararlı olarak tanımlayan bir modeldir. Silika suda çözüldüğünde, su molekülleri silisik asit molekülünün bir kısmına ilave olur ve bu bileşiğin asgari miktarı ortamda bulunur.

pH >10 olan ortamlarda silika iyonlar halinde bulunur ve tamamen çözülmüştür. pH'ı nötr olan ortamlarda ise silisik asitin iyonizasyonu, hidrojen iyonlarının konsantrasyonuna bağlıdır. H^+ iyonlarının varlığında silisik asit fazla iyonize

olmayabilir(Şekil 2.3). Orto silisik aside alkanite ilavesi silikat iyonlarını verir. Silikat iyonlarının oluşumunu himaye eden alkanitenin varlığı, silikanın çözünebilirliğini artırır (Şekil 2.4).



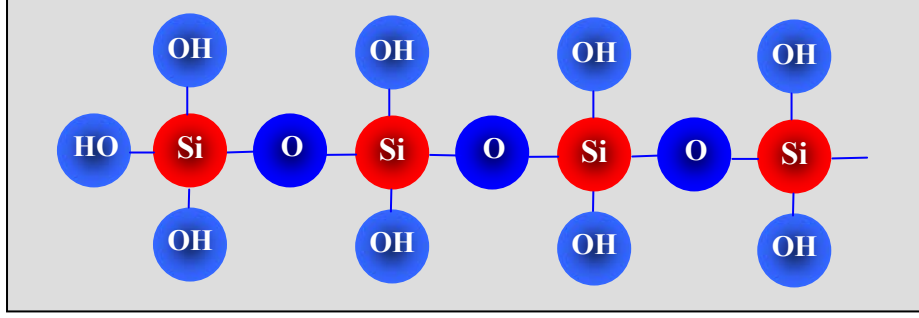
Şekil 2.3. Nötr ortamda orto-silisik asit iyonizasyonu



Şekil 2.4. Alkali ortamda orto-silisik asit iyonizasyonu

Orto-silisik asit silikat iyonlarını verir. Silisik asit için pH nötr olduğunda, ancak birkaç ppb silikat iyonu oluşabilir. Gerçekte silisyumun bağ enerjisi karbonunkinden daha düşüktür. Ancak, silis, karbon gibi oksijen ve diğer elementler ile kolayca kovalent bağ oluşturabilirken, kendisiyle kovalent bağ oluşumu çok daha güçtür.

H_4SiO_4 modeli monomerik silika için yeterli bir açıklama getirirken polimerik silikanın açıklanmasını da kolaylaştırmaktadır. Silisik asit molekülleri ancak belirtilen diğer iyonlar veya alkanitenin yokluğunda polimer halinde birleşebilir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Polimerik silika (H_2SiO_3)_n

Su ve hidrotermal ortamlarda silikanın çözünme kabiliyeti, ortam sıcaklığına, basınca ve ortamın pH'ına bağlıdır. Yüksek sıcaklık ve yüksek alkaniteye sahip ortamlarda silika çözünürlüğü de artar.

Nicel olarak kolloidal (asılı) silikanın tespiti zordur. Ancak sodyum karbonat ve diğer bazı kimyasal maddeler kullanarak pH'ın artırılması ile çözünen ve depolimerize olan silikanın filtrasyon tekniklerine dayanan, ortamdaki silika varlığını tespitte yönelik çeşitli yöntemler vardır. Genel olarak çözünmüş silikanın partikül boyut aralıkları ve boyutlarına göre adlandırılmaları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çözünmüş silikanın boyutlarına göre sınıflandırılması (Meyers, 1999)

Silikanın tipi	Boyutu (μ)
Filtre edilebilir	> 0,45
Kolloidal	0,01 – 0,45
Polimerik	0,01 – 0,0001
Monomerik	< 0,0001

2.3. Tikitere Amorf Silikası ve Teknolojik Özellikleri

İnşaat endüstrisinde mineral katkı maddesi olarak doğal amorf silikanın kullanımına ilişkin detaylı bilgi içeren kaynak sayısı oldukça azdır. Yeryüzünde ekonomik olarak işletilebilir özelliklere sahip (bilinen) amorf silika yatakları Yeni Zelanda'da bulunmaktadır. Dolayısıyla amorf silikanın endüstriyel uygulamaları da, yatağın bulunduğu coğrafya ve yakın çevresi ile sınırlı kalmıştır. Amorf silikaya alternatif diğer mineral katkı maddeleri ise dünya da yaygın biçimde üretilerek

kullanılmaktadır. Bütün bu olgular, (doğal) amorf silika ve betonda kullanımı konusunda yapılan bilimsel araştırma ve yayınların sayısını oldukça kısıtlamıştır.

Yeni Zelanda'da şu ana kadar tespit edilen amorf silika rezervleri Rotorua bölgesindeki Tikitere ve Taheke yatakları ile Taupo yakınındaki Rotokaua Gölü'dür. Tikitere ocağı Microsilica New Zealand Limited şirketince halen işletilmektedir. Keza, Tikitere yatağı resmi kayıt ve literatürlere göre yeryüzünde işletilen tek amorf silika ocağıdır. Ocaktan açık işletme yöntemiyle üretilen kayaç, öğütülerek mikronize ürün haline getirilmektedir. Bu ürün Yeni Zelanda inşaat endüstrisinde mineral katkı maddesi olarak yaygın biçimde kullanılmakta, ayrıca bazı ülkelere de ihraç edilmektedir (Golden Bay Cement, 2002a).

2.3.1. Tikitere Amorf Silikasının Kökeni, Kayaç ve Ürün Özellikleri

Yeni Zelanda'nın Rotorua bölgesinde yer alan Tikitere ve Taheke amorf silika yatakları, riyolitik kayaçların (Mamaku ignimbritleri ve Rotoiti pomza breşi) hidrotermal alterasyonu ile oluşmuştur. Pomza breşi yaklaşık 60.000 yıl yaşındadır. Bunun altında yer alan ignimbritler ise yaklaşık 220.000 yıllıktır. Bu birimleri oluşturan silikatlı kayaçlar hidrotermal akışkanlar tarafından altere edilmiş, akışkanların içerdiği çözünmüş silika soğumanın etkisiyle aşırı doymun hale gelerek çökelmiş ve amorf silika yataklarını meydana getirmiştir. Tikitere ve Taheke yataklarının rezervi 1 milyon m³'ü aşmaktadır (Campbell, 2001).

Seçici ve titiz madencilik faaliyetleri yürütülerek Tikitere maden ocağından yılda yaklaşık 50.000 ton amorf silika kayacı üretilmektedir. Ocaktan üretilen hammadde öğütme tesislerine nakledilerek ön kurutma → kırma → eleme → kurutma → öğütme işlemlerinden geçirilmektedir. Öğütme işlemi sonucunda mikronize ürün (mikro silika) torbalanarak veya bulamaç halinde varillere doldurularak tüketim alanlarına gönderilmektedir (Golden Bay Cement, 2002a).



Şekil 2.6. Tikitere amorf silika ocağından bir kesit

Çizelge 2.2. Mikro silikanın tipik kimyasal ve fiziksel özellikleri (Golden bay Cement, 2002a)

Kimyasal Analiz (%)		Partikül Boyut Analizi (µ)	
SiO ₂	87,89	100	100
Al ₂ O ₃	4,31	50	99,6
SO ₃	0,13	20	97,6
Fe ₂ O ₃	0,59	10	94,5
MnO	0,03	5	84,6
TiO ₂	1,16	2	55,6
CaO	0,32	1	35,0
K ₂ O	0,49	0,4	12,2
P ₂ O ₂	0,05	Birim Hacim Ağırlık (Yaklaşık)	610 kg/m ³
MgO	< 0,02		
Na ₂ O	0,14		
A.K.	5,01		

Mikro silika, Yeni Zelanda NZS 3122-1995 standardında geçen portland ve katkı çimento tanımlamalarında, silis dumanı olarak sınıflandırılmaktadır. Mikro silika bu standartla ilgili bütün oranları ve Avustralya AS 358.2 standardında öngörülen performans gereksinimlerini sağlamakta, ayrıca Kanada CAN/CSA-A23.5M86 standardındaki silis dumanı ve U-tipi silis dumanı kriterlerine de uymaktadır (Golden bay Cement, 2002a).

Çizelge 2.3. Silis dumanı tanımlamasında sıkça kullanılan Kanada Standardı (Golden Bay Cement, 2002a)

Özellik	Sonuç (%)	Kabul Edilen	Deney Yöntemi
Sülfürik Anhidrit (SO ₃)	0,2	Maks. % 10	CSA CAN3-AS
Kızdırma Kaybı	5,4	Maks.% 6.0	ASTM C 311
Silika (SiO ₂)	87,9	Min. % 85	ASTM C 114
Puzolanik Aktivite İndeksini Hızlandırma	119	Min. % 85	ASTM C 311
45 µ Elek Üstünde Kalan İncelik	4,8	Maks. % 10	CSA CAN3-A5

2.3.2. Amorf (Mikro) Silikanın İnşaat Sektöründeki Yeri ve Kullanım Avantajları

Yeni Zelanda inşaat endüstrisinde mineral katkı maddesi olarak amorf (mikro) silika, yüksek dayanımlı beton, endüstriyel zemin-döşeme betonu, su geçirimsiz beton, püskürtme beton, kimyasallara dirençli beton ve marina betonu gibi farklı tür ve işleve sahip betonların üretiminde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Bugün amorf silika kullanıcısı hazır beton firmalarınca, 100 MPa'lık dayanım değerlerine ulaşan ve hatta aşan yüksek dayanımlı beton üretimleri gerçekleştirilmektedir.

Amorf silika katkılı beton, endüstriyel döşemelerin yüksek performans ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik sert-dayanıklı beton talebini karşılamakta, plastik çatlama sınırı için optimum beton akışını, plastik yerleşme ve rötreyi sağlamaktadır.

Amorf silika, mikro tanecikli homojen yapısı ve yüksek puzolanik aktivitesiyle çimento hamuru gözenek yapısını incelterek beton geçirimliliğini azaltmaktadır. Geleneksel betona oranla çok daha düşük permeabiliteli amorf silika betonu zemin altındaki yapılarda membran kullanımını da en aza indirmektedir.

Püskürtme betonda amorf silika kullanımı, pahalı kalıp kullanımını sona erdirerek uygulama süresini azaltmaktadır. Amorf silikanın yüksek aderansı, uygulama

başarısını artırırken püskürtme esnasında geri sıçramayı azaltarak önemli oranda malzeme tasarrufu da sağlamaktadır.

Amorf silika betonu pek çok endüstriyel kimyasallara karşı dirençlidir. Geleneksel betona göre daha fazla sülfat direncine sahiptir. Ayrıca amorf silika partikülleri alkali agrega reaksiyonunun (AAR) etkisini de en aza indirebilmektedir.

Amorf silika ile hayli düşük klorit diffüzyon katsayısına ve yüksek mukavemete sahip marina betonu da üretilmektedir. Bu beton deniz çevresindeki yapılar için idealdir.

Amorf silika betonuyla daha ince kesitli yapı elemanları üretilmektedir. Bu şekilde hem malzeme maliyeti hem de eleman ağırlığı azalırken, efektif yapı hacmi artmaktadır. Ayrıca beton performansındaki iyileşmeler, azalan sünmeye bağlı olarak taşıyıcı eleman özelliklerini de geliştirmektedir. Taşıyıcı eleman boyutlandırma ve açıklık tasarımlarında daha az kısıtlamalar sayesinde daha ferah mekanlar ve daha zarif yapı tasarımları yapılabilmektedir.

Yüksek performanslı betonda amorf silika kullanımı, ekonomiklik ve hızlı imalat için başrol oynamaktadır. Beton özelliklerinin gelişimine bağlı olarak imalat hızlanırken, yapı güçlendirme maliyetleri azalmaktadır. Daha az donatı gereksinimi dolayısıyla, donatı kalabalığı ortadan kalkmakta, beton yerleşimi ve kompozisyonu düzelmekte, malzeme ve işçilik maliyetleri azalmaktadır.

İlave olarak, önemli uygulama alanlarından sağlanan dolaylı maliyet tasarrufları da vardır. Tünel inşaatı için projelendirilen yüksek dayanımlı (püskürtme) beton, kaplama kalınlıklarında belirli bir oranda azalma sağlayacaktır. Bu azalma beraberinde önemli miktarda kazı, hafriyat, malzeme ve işçilik tasarrufuna yol açar.

NZ (Yeni Zelanda) Çimento-Beton Birliğince yapılan maliyet analizi, beton dayanımındaki artışla, finansal kazanç sağlanabileceğini göstermektedir (Çizelge 4.2.)

Çizelge 2.4. Normal beton ve yüksek dayanımlı beton kullanılan kolon maliyetlerinin karşılaştırması (Golden Bay Cement, 2002b)

Madde	Geleneksel 600mm x 500 mm 40MPa. Beton	HSC Seçeneği 450 mm x 450 mm 70 MPa. Beton	Kazanç
Beton	8400 \$	6660\$	1740\$
Takviye			
Boyuna	7120 \$	3210\$	3910\$
Enine	13360 \$	9340\$	4020 \$
Kalıp	23760 \$	19440\$	4320 \$
Toplam	52640\$	38650\$	13990 \$
Kazanç			% 26,6

Geleneksel betona göre amorf silika betonu daha fazla yerleşim avantajı sunar. Daha fazla yapışır ve ayrışmaya daha az eğilimlidir. Yine de yeterli viskozite ve iyi pompaj özelliklerine sahiptir. Amorf silika, beton pompajına yardım eder. Pompalama basıncını muhtemel olarak azaltır. Ancak amorf silika kullanımı, pompalanan beton karışımları için izlenmesi gereken standart tasarım uygulamalarındaki olası karışım eksikliklerini halletmez.

Geleneksel betona göre sızdırması daha azdır. Betonda sızıntıyı azaltmasıyla zararlı suyu bertaraf eder. İmalatı daha erken tamamlanabilir. Ancak diğer reaktif puzolan betonlar gibi plastik çatlama eğilimi pek yoktur

Amorf silika betonun aderansı geleneksel betondan daha fazladır. Genellikle benzer uygulanabilirlikte yerleştirme vibrasyonu kullanıldığında, amorf silika betonunun çökmesi geleneksel betondan 25–50 mm daha az olabilir. İlave edilen süper akışkanlaştırıcı dozajları veya ilave su sayesinde uygulanabilirlik artışı öncesi bu husus dikkate alınmalıdır. Çökme değeri, kohezyon kontrolü ve özellikle segregasyonu önlemek açısından önemlidir. Amorf silika bizzat beton kompaksiyonu için uygun bir denge sağlayıcıdır. Amorf silika betonunun yüksek kohezyonu onu segregasyona daha az eğilimli yapar. Karışımlar, serbest akışlı beton temin etmek için tasarlanabilir. Yüksek kohezyon, yığışım içinde segregasyonsuz veya gözeneksiz (peteksiz) beton vibrasyonuna yardım eder (Golden Bay Cement, 2002b).

Yüksek dozajdaki amorf silika beton kohezyonu hava tutmaya eğilim gösterebilir. Bu nedenle segregasyon meydana gelmeksizin ilave vibrasyon uygulanabilir. Amorf silika betonu geleneksel betondan daha uzun bir süre vibre edilmelidir.

Beton karışımına amorf silika ilavesi, betonun plastiklik ve sertlik özelliklerinin her ikisine de etki eder. Beton yapısı, ısı oluşumu, sıcaklık farklılığı, beton karakteristikleri günümüz beton uygulayıcılarının karşılaştığı en önemli konular olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Yüksek yüzey sertliği ve aşınma direncinin gelişmesinde önemli rol oynayan sızdırma, geleneksel betona göre amorf silika betonunda daha azdır. Geleneksel betonda yüksek sızdırma, takviye barları üzerinde plastik yerleşim çatlakları ve yüksek su içeriği / düşük yüzey sağlamlığına etki eder. Silis dumanlı betonlarda geçerli olduğu gibi çok düşük sızıntıda plastik rötre çatlağının tersine, yetersiz su sızıntısının varlığında buharlaşma şeklinde su yer değişimi oluşur. Amorf silika, doğru bir akışla plastik çatlama riski en aza indirilen yüksek sağlamlık ve dayanımda beton çözümünü sağlayan uygun bir katkı maddesidir (Branz,1999).

2.3.3. Amorf Silikanın Beton İçerisindeki Davranışı ve Performansı

Beton üretiminde katkı maddesi olarak amorf (mikro) silika kullanımıyla sağlanan üç temel fayda bulunmaktadır:

- a. Amorf silikanın çok ince partikülleri, çimento tanecikleri arasındaki mikroskobik boşlukları doldurabildiği için, beton mikro yapısındaki geçirgenliği azaltır.
- b. Çimento hidrasyon prosesinde açığa çıkan serbest kalsiyum hidroksit, kalsiyum silikat üretmek için amorf silika ile tepkidiğinde, ilave puzolanik reaksiyon oluşur.
- c. İnce partikül boyutu beton sızdırmasını azaltarak, çimento hamuru-agrega ara yüzeyindeki bağ gelişiminin kuvvetlenmesine yardım eder (Branz,1999).

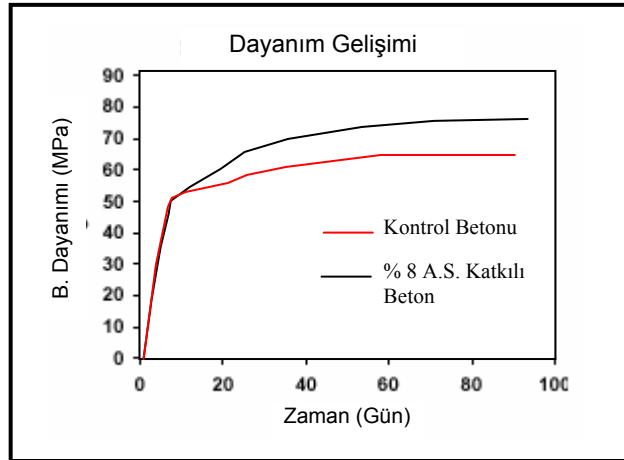
Mikro-silikanın beton dayanımına katkısı, bir verimlilik faktörü olarak ölçümlenebilmektedir. Mikro-silikanın etkinliği, “basınç dayanımı muhafaza

edilerek, mineral katkı miktarının yer değiştirebildiği çimento dozajına oranı” olarak tanımlanmıştır. Laboratuvar deneyleri mikro-silika için etkinlik faktörünün 2.1 ile 3.3 arasında değiştiğini göstermiştir. Benzer değerler (Çizelge 2.5.) yerel beton uygulamalarında da sağlanmıştır (Branz,1999).

Çizelge 2.5. Önemli projelerden sağlanan mikro silika katkılı beton karışımlarının dayanımı ile mikro silika verimlilik faktörü analizi (Golden Bay Cement, 2002a)

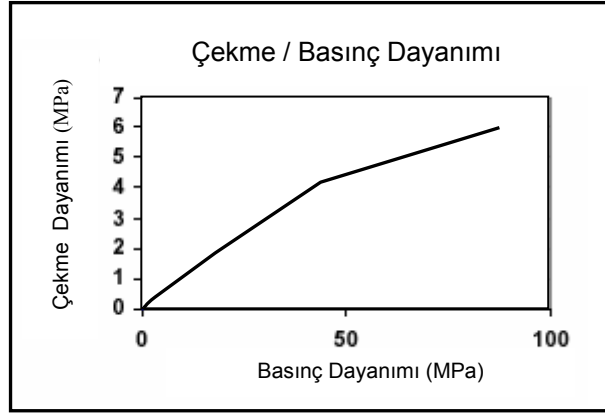
Proje	Ortalama Dayanım	Verimlilik Faktörü
Endüstriyel Döşemeler	55 MPa.	2,5
Köprü İnşaatı	53 MPa.	2,8

Puzolanik reaktiflik, ince tozların dolgu mekanizması ve agrega ara yüzeyindeki bağ gelişimi amorf silika katkılı betonda dayanım artışını sağlayan temel unsurlardır. Laboratuvar da doğal agregalar ve kum kullanılarak üretilen betonlardan, % 8 amorf silika katkılı betonun basınç dayanımının, sadece portland çimentosu kullanılarak yapılandır % 10 daha yüksek sonuç verdiği saptanmıştır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Amorf silika katkılı betonda dayanım gelişimi (Golden Bay Cement, 2002b)

Amorf silikanın etkinliği çok faktöre bağlıdır. Genellikle amorf silika 7 günlük dayanım değerini düşürmez ve betonun basınç dayanımındaki en önemli artış yaklaşık 21 günde sağlanır. Beton bünyesinde agrega ile hamur bağ özelliklerinin iyileşmesi gerilme dayanımını da artırır. Amorf silika katkılı betonunun “çekme dayanımı / basınç dayanımı oranı” geleneksel betondan daha yüksektir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Amorf silika katkılı betonda çekme-basınç dayanım oranı artışı (Golden Bay Cement, 2002b)

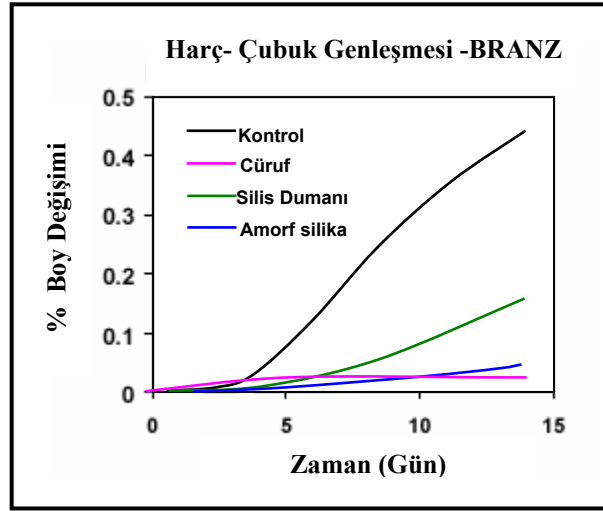
Yeni Zelanda'daki 5 önemli ocaktan temin edilen agregalarla yapılan genişleme deney sonuçları Çizelge 2.6'da verilmiştir. Çizelgede yer alan dayanım oranları göz önünde bulundurulduğunda, amorf silikanın elastisite modülü üzerine etkisi azdır. Ancak beton agregalarının mineralojik ve petrografik özellikleri de beton performansını oldukça etkilemiştir.

Çizelge 2.6. Dayanım ve elastisite modülü arasındaki ilişki (Golden Bay Cement, 2002b)

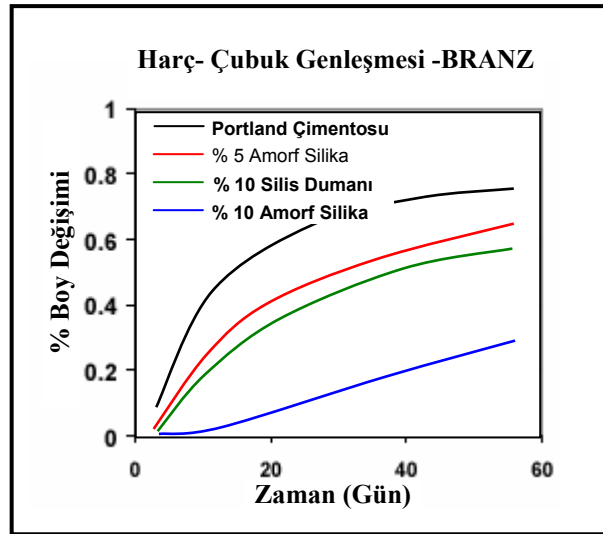
	Dayanım (MPa)	EM (GPa)
Kontrol	59	42,4
% 5 A.S.	65	42,1
% 10 A.S.	68	41,5

Alkalilerle (Na_2O ve K_2O) tepkiyebilir reaktif silikalı bileşiklerin agregata ve kum bileşiminde bulunması durumunda, beton içerisinde gelişen reaksiyonlar güvenlik ve ekonomik açıdan kabul edilemez sakıncalar yaratır. Tehlike beton çatlağı, beton parçalanması, temel oturması, yol kaplama kabarması vs. yoluyla kendisini açığa vurabilir. Günümüzdeki araştırmalar bazı tür kayaç agregalarının önemli miktarda alkaliyi serbest bırakabildiği ve bu durumun kimyasal reaksiyonda önemli rol oynayabileceği ileri sürülmektedir. Volkanik, metamorfik ve sedimanter kökenli bazı kum ve çakılların çok reaktif olduğu bilinmektedir.

ASTM C1260-94 deneyi, aşırı alkali varlığı olan ortam şartlarında uygun sıcaklıklarda alkali agrega reaksiyonunu (AAR) hızlandırır. Bu deney, zararlı davranışları zararsızlarından ayırt etmede güvenle kullanılabilirken, tercih edilen kum-agrega kombinasyon sınıflaması sonucu etkileyebilir (Golden Bay Cement, 2002c). Bağımsız deneyler (Şekil 2.9) ASTM C1260-94 ile uyumludur. Deney sonuçları amorf silikanın alkali agrega reaksiyonunun yayılmasını azaltmak için en etkin malzemelerden biri olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 2.10).



Şekil 2.9. Farklı türde katkıli betonların AAR dirençleri (Golden Bay Cement, 2002c)



Şekil 2.10. Farklı amorf silika dozajlarıyla ASTM C1260-94'e göre yapılan AAR deney sonuçları (Golden Bay Cement, 2002c)

Kullanım ortamında asitler, bazlar vd. gibi birtakım kimyasal maddeler ile etkileşen betonun dayanımı, duraylılığı ve kullanım ömrü olumsuz biçimde etkilenir. Belirli bir süre organik asit etkileşimine maruz kalan bütün portland betonları er geç işlevlerini kaybeder.

Çoğunlukla endüstride ve ticari ortamlarda kullanılan asitlere karşı, amorf silika katkılı betonun direnç gelişimi Çizelge 2.7’de gösterilmektedir. Betonun bozunması, muhtemel olarak çok zayıf, fiilen ortaya çıkmayabilen, günler sonra kendini belli eden asit etkileşimiyle meydana gelebilir. Bu süreç amorf silika kullanımıyla yavaşlatılabilir. Çizelge 2.8-2.9’da ise muhtelif kimyasallara maruz betonlar için karışım tasarımları verilmiştir.

Çizelge 2.7. Kontrol ve amorf silikalı betonun aside maruz kalma deneyinde ağırlık kaybı sonuçları (Golden Bay Cement, 2002c)

Asit	Numune Ağırlık Kaybı (gr)		
	Kontrol	Amorf Silika (+ % 10)	Gelişme
% 5 Asetik pH=2,40	1,9	1,2	% 36,8
% 5 Laktik pH=2,15	3,4	2,1	% 38,2
% 2 Laktik pH=1,42	2,3	1,4	% 39,1
% 3 Sülfürik pH=1,51	4,1	2,8	% 31,7

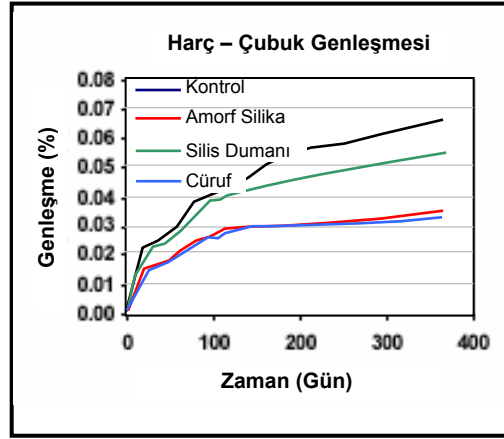
Çizelge 2.8. Asit ortamlar için tavsiye edilen amorf silika betonu karışım tasarımı (Golden Bay Cement, 2002c)

Farklı Etkileşim Koşulları İçin Karışım Koşulları				
	Zayıf	Orta	Sert	Çok Sert
Su / Çimento	0,48	0,42	0,36	0,36
% A.S.	7,5	10	12,5	15
Etkileşim Koşullarına Göre Maksimum Asit Konsantrasyonu				
Asetik	% 5	% 100	-	-
Florik	% 1	% 2,5	% 10	% 20
Formik	% 100	-	-	-
Hidroklorik	% 0,1	% 0,25	% 1	% 2
Laktik	% 0,1	% 1	% 2	% 10
Nitrik	% 0,1	% 0,25	% 1	% 2
Fosforik	% 5	% 100	-	-
Sülfürik	% 0,1	% 0,25	% 1	% 2
Sülfüroz	% 0,1	% 0,25	% 1	% 2
Tannik	% 100	-	-	-

Çizelge 2.9. Kimyasal etkileşimlere göre önerilen amorf silika betonu karışım tasarımı (Golden Bay Cement, 2002c)

Etkileşim Sınıfı	Orta	Sert	Çok Sert
Farklı Etkileşim Koşulları İçin Karışım Koşulları			
Su / Çimento Oranı	0,42	0,36	0,36
% A.S.	% 7,5	% 10	% 15
Çimento	Portland	C ₃ A < % 16	C ₃ A > % 16
Etkileşim Sıklığı Kategorisi			
Amonyum Nitrat % 10	1	2	3
Amonyum Nitrat Prill	2	3	4
Hayvani Yağ	4	-	-
Amonyum Sülfat	2	3	4
Tereyağı – Süt	4	-	-
Kalsiyum Klorit	1	2	3
Kalsiyum Nitrit (veya Nitrat) Solüsyonu	1	2	3
Hint Yağı	3	4	-
Balık Yağı	4	-	-
Hidrojen Sülfat	4	-	-
Magnezyum Klorit	3	4	-
Margarin	4	-	-
Petrol	Zararlı değil		
Fosfat	4		-
Potasyum	3	4	-
Kanalizasyon Suyu	Zararlı değil		
Hayvan Yemi	4	-	-
Sodyum Nitrat	4	-	-
Şeker	3	4	-
Üre	3	4	-
1= Nadir 2= Arasına 3= Sık sık 4= Devamlı			

Beton, doğal sülfat oluşumları ile de etkileşir. Yeraltı sularında çözünen sülfatlar beton yüzeyleriyle temas ettiğinde buharlaşma eğilimi göstereceklerdir. Yüksek konsantrasyon seviyesindeki sülfat yığılımları reaksiyon şiddetini artırır. Etkileşim mekanizması “reaksiyon formasyonu” oluşumunu kapsar, katı hacminde artış yani genişleme oluşur ve beton parçalanır. Bu tür etkileşimlerde amorf silikanın betondaki rolü, karşılaştırılan diğer katkı malzemelerinden daha uygundur (Şekil 2.11). % 8,5 luk amorf silika pek çok ortamda uygun sülfat koruması sağlamaktadır.



Şekil 2.11. Kontrol betonu ve muhtelif mineral katkılı betonların sülfat korumalarına etkisi (Golden Bay Cement, 2002c)

Betonun genleşme ve parçalanmasının nedeni sadece sülfat içeriği değildir. Magnezyum iyonlarının varlığı da bu deformasyona katkıda bulunur. Magnezyum sülfat ise özellikle zararlıdır. Betonda amorf silika dozajı ve su/çimento oranı sülfat ve magnezyum konsantrasyonuna bağlıdır (Çizelge 2.10).

Çizelge 2.10. Değişik sülfat ortamları için önerilen amorf silikalı beton tasarımı (Golden Bay Cement, 2002c)

Sınıf	SO ₄ (ppm)	Mg (ppm)	A.S. 600 Dozajı	Su / Çim. Oranı
1	< 300		Özel önlem gerekmez.	
2	300 ile 1200	-	% 5,0	0,50
3	1200 ile 2500	-	% 7,5	0,50
4a	2500 ile 5000	< 1000	% 7,5	0,45
4b	2500 ile 5000	> 1000	% 10,0	0,45
5a	> 5000	< 3000	% 10,0	0,45
5b	> 5000	> 3000	% 10 + Kaplama	0,40

Beton yüzey kaplamaları ve zemin sertleştiriciler sınırlı kalınlık ve kullanım ömürlerine sahip olup uygulama için aşınma, soyulma ve delaminasyondan (tabaka halinde dizilimden) dolayı bakım gibi ilave işlem de gerektirirler. Beton karışımına dahil olan amorf silika partikülleri ise beton tabakasının tüm derinliklerine nüfuz eder. Amorf silikalı betonun aşınma kuvvetlerine mükemmel direncini iki tip deney açıkça ortaya koymaktadır :

a. Deney I

(OPUS Uluslar Arası Ltd. – AS 4456.9’a uygun olarak “Yuvarlama Deneyi”) Deney kaldırım döşemeleri parçalarının performanslarını karşılaştırmak için geliştirilmiştir. Performans seviyesi kütle kaybı üzerine dayandırılır ve aşınma indeksi olarak kaydedilir. Deneyde 16 kaldırım döşemesi parçası (bağlayıcı içeriği 400 kg/m^3) sürekli bir yuvarlanma hareketine maruz bırakılmıştır. Numuneler 7 gün süreyle yaş ve 21 gün süreyle havada kürlenmiştir. AS 4456.9 deneyinde kaydedilen aşınma indeksleri kontrol betonu için 2.6, % 5 amorf silika katkılı beton için ise 2.3’tür (Golden Bay Cement, 2002d).

Sert ve ağır işlev üstlenen kaldırım döşemeleri için hedeflenen minimum indeks değeri 3.3 tür. Gözeneklerden arındırılan yapısı ve azaltılan sızdırmasıyla, geleneksel betonla ilişkilendirilen amorf silika betonunun aşınma direnci performansını yüksek yüzey dayanımıyla açıklamak mümkündür.

b. Deney II

BRANZ (Yeni Zelanda İnşaat Araştırma Birliği), Çizelge 2.11’de görülen, Aston Üniversitesi’nde kullanılan hızlandırılmış aşındırma cihazıyla üretilen sonuçları test etmektedir. Dairesel bir hareket içinde dönen cihaz, beton yüzeyinde bir oluk oluşturmaktadır. Oluğun derinliği ölçülmekte ve ortalama derinlik kaydedilmektedir. Bu yöntemde de amorf silikalı betonun diğerlerine göre çok daha uygun aşınma sonuçları verdiği ortaya konulmuştur.

Çizelge 2.11. Döşeme için aşındırma deneyi (Golden Bay Cement, 2002d)

Bağlayıcı İçeriği : 330 kg/m^3		Su / Bağlayıcı : 0,50
Karışım Tipi	Aşındırma Derinliği (15 dk.)	Aşındırma Derinliği (30 dk.)
Portland Çimentosu	0,08 mm	0,15 mm
% 10 Silis Dumanı	0,05 mm	0,10 mm
% 65 Cüruf	0,22 mm	0,33 mm
% 10 A.S.	0,04 mm	0,05 mm

2.4. İnşaat Endüstrisinde Kullanılan Diğer Mineral Katkılar ve Performansları

2.4.1. Silis Dumanı

Silis dumanı silisyum, ferro-silisyum metalinin veya diğer silisli metallerin üretiminden bir yan ürün olarak elde edilir. Silis dumanı açık veya koyu gri renklerde dir. Yüksek miktarda amorf SiO_2 içerir. Başka bir işlem görmeksizin baca gazlarından atık olarak toplanan silis dumanı tozu, işlem gören diğer silis dumanı formlarından ayırt etmek için bazen “yoğunlaşmamış silis dumanı” olarak refere edilir. Yoğunlaşmamış silis dumanı, çimentodan 100 kat daha ince olan, ortalama 0.1 μm çapındaki çok ince camsı partiküllerden meydana gelir. Yoğunlaşmamış silis dumanı neredeyse sigara külü kadar ince ve birim hacim ağırlığı sadece 200-300 kg/m^3 tür. Aşırı inceliğe ve yüksek SiO_2 içeriğine sahip silis dumanı yüksek etkinlikte bir puzolandır (Carette and Malhotra, 1982).

Yoğunlaşmamış silis dumanının aşırı inceliği ve düşük birim hacim ağırlığı, kullanım sırasında sorunlara neden olur. Bu nedenle silis dumanı tüketiciye teslim edilmeden önce genelde yoğunlaştırılır veya bulamaç haline getirilir .

Yoğunlaştırılmış silis dumanı, yoğunlaşmamış silis dumanının ayrıca işlem görmüş ürünüdür. İnce silis dumanı tozları yaklaşık 0.5-1 mm çapında kürecikler içerisine yoğunlaştırılır. Yoğunlaştırılmış silis dumanının birim hacim ağırlığı yaklaşık 600 kg/m^3 'e ulaşır. Yoğunlaştırılmış silis dumanı, geçmişte, sıkıştırmış mikro silika, silika tozu, tabletlenmiş silis dumanı vd. olarak da tanımlanmıştır. Bugün yaygın olarak kabul gören adlandırma yoğunlaştırılmış silis dumanı (condensed silica fume) dır. Uygulamada beton karışımına sıklıkla, suyla bulamaç haline getirilerek ilave edilir. Silis dumanı beton karışımına kuru katı formda da dahil edilebilir.

Bulamaç tipi silis dumanı; Normal su veya su azaltıcı ajanla silis dumanı tozlarının harmanlanmasıyla üretilen koyu bir akışkandır. Diğer silis dumanı formlarıyla karşılaştırıldığında, yoğunlaştırılmış silis dumanı taşıma ve kullanma kolaylığı sunar.

Bulamaç silis dumanı ise beton karışımına direkt olarak ilave edilebilme avantajı sağlarken depolanması daha zor ve taşıma maliyeti daha yüksektir.

Silis dumanlı beton (silica fume concrete) üzerine bilinen ilk çalışmalar 1950’li yıllarda Norveç Teknoloji Enstitüsünde yürütülmüştür. Aynı zamanda silis dumanı betonu (SFC), Oslo şap kili üretim bölgesinde bir tünel projesinde uygulanmıştır. Bununla beraber dünya çapında araştırma faaliyetleri ve silis dumanı kullanımı, pek çok ülkede çok katı çevresel kanunların ortaya çıkmasının bir sonucu olarak silis dumanının büyük miktarlarda toplatıldığı 1970’li yıllara kadar başlamamıştır. Silis dumanının beton endüstrisine ilk tanıtımı, çimento ile yer değiştirici olarak ve çoğunlukla ekonomik amaçladır. Araştırma çalışmalarının ilerlemesi ve SFC hakkında daha fazla bilgi elde edilmesiyle birlikte fiyatı da artan silis dumanı bugün daha kaliteli beton üretimi için etkin bir katkı maddesi olarak sıkça kullanılmaktadır. Bazı ülkelerde 300 MPa’ı aşan yüksek dayanımlı silis dumanı betonları kullanılmaktadır. Ayrıca silis dumanı alkali agregası reaksiyonunu önlemede veya zararlarını azaltmada kullanılan çok önemli bir katkı maddesidir.

Silis dumanının kimyasal bileşimi imalat proseslerinden toplanan ürünün doğasına bağlı olarak değişir. Silis dumanında ana bileşen materyal SiO_2 ’dir ve genelde % 90’ın üzerinde içeriğe sahiptir. Çizelge 2.12’de ticari olarak uygun bir silis dumanının kimyasal analizi verilmektedir.

Çizelge 2.12. Silis dumanı kimyasal bileşenleri (Yeğınobalı, 2001)

SiO_2	92.85
Al_2O_3	0.61
Fe_2O_3	0.94
CaO	0.39
MgO	1.58
K_2O	0.87
Na_2O	0.5

Silis dumanının beton özellikleri üzerine etkisi iki temel işleviyle açıklanabilir :

- Puzolanik reaksiyon ve
- Mikro-filler etkisi.

Çimento hidratasyonu ile üretilen kalsiyum hidroksit ile silis dumanı puzolanik reaksiyona girer. Bu reaksiyon araştırmacılarca, bir çimento-silis dumanı harç veya hamurundaki CaOH içeriğinin ölçülmesi suretiyle gösterilmiştir. Beton bileşiminde artan silis dumanı içeriğine karşılık CaOH içeriği düşer. Reaksiyon daha fazla agrega-bağlayıcı jel arasında oluşur ve aynı zamanda çimento hidratasyonun zararlı ürünlerini (CaOH, Na⁺, K⁺) azaltır. Net etki tüm dayanım ve sağlamlıktaki artıştır. Betonda veya harçta puzolanik reaksiyon genellikle 3-7 gün sonra gözlemlenir.

Silis dumanı partiküllerinin çapı yaklaşık 0.1 µm olup çimento partiküllerinden 100 kez daha incedir. Silis dumanının aşırı inceliği çimento partikülleri arasında mikroskopik boşlukların dolmasına izin verir. Mikrofiller etkisiyle permeabilite büyük oranda azalır ve geleneksel betona göre silis dumanı betonunda agrega – hamur ara bağı artar.

Betonda silis dumanı kullanımı genellikle su ihtiyacını artırır. Artan su talebi su/bağlayıcı oranında bir yükselmeye neden olur. Bu durum silis dumanı ilavesinin yararlarını boşa çıkarabilir. Bu nedenle silis dumanı betonunun karışımına genellikle bir su azaltıcı ajan veya süper-akışkanlaştırıcı dahil edilir.

Silis dumanı betonu geleneksel betondan çok daha fazla koheziftir. Süper akışkanlaştırıcıyla yada akışkanlaştırıcı olmaksızın silis dumanı betonu için koheziflik geçerlidir. Artan koheziflik sızdırma ve segregasyon olasılığını azaltırken, sıkıştırma enerjisinin artışı gerektirir.

Silis dumanı betonunun artan yapışkanlığı, buharlaşmayla yüzeydeki su kaybı, karşılanamayan su sızdırması durumunda ortaya çıkan plastik rötre ve çatlama

olasılığını güçlendirir. Hızlı buharlaşma koşullarında önerilen, beton yerleşimi sonrası derhal kür ölçümlerinin alınmasıdır.

Puzolan malzemeleri içeren betonların üretiminde dayanım gelişimi önemli bir kaygıdır. Silis dumanı betonu iki kademeli dayanım gelişim modeli gösterir: Silis dumanının puzolanik reaksiyona başlangıcı öncesi ve sonrası dayanımlar. Silis dumanının puzolanik reaksiyonu 3-7 gün arasında yaklaşık 20°C’de oluşur. Daha yüksek sıcaklıklarda reaksiyon hızlandırılabilir. 5°C’lik bir sıcaklıkta ise puzolanik yavaşlatılarak reaksiyon bir ay da daha uzun bir süreye geciktirilebilir.

Çimento ile yer değiştirici olarak silis dumanı içeren betonun erken yaş dayanımı, silis dumanı içermeyen betondan daha az değildir. Bu olgu silis dumanının mikro filler etkisinden kaynaklanmaktadır. Uygun agrega, uygun su azaltıcı ajan ve silis dumanı içeren karışımla dökülen bir beton numunesinin erken yaş dayanımı kolayca 100 MPa değerini sağlayabilir.

Normal koşullar altında sabit su/çimento oranlı silis dumanı betonunun basınç dayanımı geleneksel betondan yüksektir. Araştırmalar silis dumanı betonunun dayanım-su/bağlayıcı eğrisinin biçimsel olarak geleneksel beton dayanım-su/bağlayıcı eğrisine benzediğini, fakat daha yüksek bir seviyeye ötelenmiş olduğunu göstermektedir.

Beton karışımındaki silis dumanının optimum dozajı, su azaltıcı ajanın tipi ve çimento türünü kapsayan çok faktöre bağlıdır. Optimum dozaj tecrübe karışımları hazırlanarak belirlenebilir. Çimentonun ağırlıkça % 10’u oranındaki silis dumanı dozajı iyi bir başlangıç noktasıdır.

2.4.2. Uçucu Küller

Uçucu küller veya pulverize yakıt külleri, özellikle elektrik üretim tesislerinin pulverize kömür ile işleyen fırınlarının toz tutma ünitelerinden sağlanan

materyallerdir. Küresel biçimde olup, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içerirler. Diğer puzolanik maddeler gibi, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile tepkimelerinde hidrolik bağlayıcı nitelik kazanırlar. Diğer taraftan yanmış karbon kalıntılarını da içermesi olasıdır. Bu da çimento ve beton mukavemetlerine olumsuz yönde etki yapar. Uçucu küllerin spesifik yüzeyi ne kadar büyükse reaktivitesi de o kadar yüksektir. Uçucu küllerin spesifik yüzey alanı değerleri $1000\text{-}4000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ arasında değişmektedir. Kül partiküllerinin tane boyu ise $0.5\text{-}200$ mikron arasındadır. İri taneli uçucu küllerden istenen puzolanik reaktiviteyi sağlayabilmek için öğütmeye tabi tutulması gerekmektedir.

Puzolanlar kohezif, dış ortamlara dayanıklı ve ekonomik beton üretmek için kullanılırlar. Günümüzde betonda en fazla kullanılan puzolanlar uçucu küllerdir. Uçucu kül içeren betonlarda erken yaşda (3 ve 28 gün arasında) genellikle dayanım problemleri yaşanmaktadır. Uçucu kül içeren betonlarda erken yaşda istenen dayanımların elde edilmesi için değişik yöntemler mevcuttur. Hazır betonda optimum uçucu kül kullanımı ilave, ikame yöntemleri ve bunlara bağlı olarak etkinlik faktörü kavramları ile tanımlanabilmektedir.

Günümüzde hazır beton genel olarak pompa ile yerine ulaştırılmaktadır. Pompa betonları belirli akıcılıkta, aynı zamanda segregasyona yol açmayacak derecede kohezif yapıda olmalıdırlar. Söz konusu kohezifliği sağlamak, aynı zamanda dış ortam koşullarına dayanıklı ve ekonomik bir beton üretmek için puzolanlar kullanılırlar. Puzolanlar mineral katkılar olarak da adlandırılmaktadır.

Uçucu küllerin betonda yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte, uçucu kül kullanımı sonucunda erken yaşda (3 ve 28 gün arasında) yaşanan dayanım problemleri, bire bir ikame edildiklerinde genellikle yerine koyulduğu çimentonun meydana getirdiği miktarda bağlayıcı ürün meydana getirememesine bağlanmaktadır (Pekmezci ve Uyan, 2001).

Son yıllarda ülkemizde uçucu kül hazır beton sektöründe geniş şekilde kullanılmaktadır. Ancak beton üretiminde; ilgili standartlarda istenen özellikleri

sağlayıp sağlamadığına bakılmaksızın, genelde rastgele kullanıldığı gözlemlenmektedir. Şubat 2001 tarihli “TS 11222 Hazır Beton” standardı, beton üretiminde kullanılacak uçucu küllerin TS EN 450 standardına uygun olmasını istemekte, ayrıca kullanım miktarlarına da sınırlamalar koymaktadır. Bu bakımdan beton üretiminde kullanılacak olan uçucu küller Nisan 1998 tarihinde yayınlanan TS EN 450 standardındaki şartları yerine getirmelidir.

Yapılan araştırmalarda çimentonun özellikle yüksek miktarlarda uçucu külle yer değiştirmesi (betondan belirli bir miktar çimento çıkarılarak yerine aynı miktarda uçucu kül koyulması) sonucu üretilen betonların dayanımlarının uçucu kül içermeyen kontrol betonlarının dayanımlarına göre genellikle daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Araştırmacılar uçucu küllü betonlardaki uçucu kül miktarının değiştirilerek erken yaşlardaki istenen mukavemetlerin elde edilebileceğini ileri sürmüşler ve bununla ilgili yöntemler önermişlerdir (Pekmezci ve Uyan, 2001).

Uçucu kül iki şekilde kullanılır:

- Uçucu küllü çimento üretiminde ve
- Betonda ilave bir bileşen olarak.

Beton içinde uçucu küllü çimento kullanılması diğer kullanım şekline göre daha kontrollüdür. Böylece uçucu kül ve çimento oranları önceden belirlenmiş olur ve karışım oranlarındaki değişim belirli sınır aralığında kalmış olur. Diğer yöntem yani uçucu külün ilave olarak beton içine katılmasında ise uçucu külün özelliklerinin çok iyi bilinmesi ve sürekli denetlenmesi gerekir. Uçucu külün beton içerisinde kullanılması açısından üç temel karışım oranlama yöntemi mevcuttur. Bunlar ;

- Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (basit ikame yöntemi),
- Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (ilave yöntemi),
- Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine koyulması (kısmi ikame yöntemi)

Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılmasında (basit ikame yöntemi) çıkartılan portland çimentosunun yerine, çimento miktarı kadar uçucu kül koyulması (bir miktar çimentonun aynı miktardaki uçucu küle yer değiştirmesi) esası geçerlidir. Bu yöntemde uçucu külün davranışı, erken yaşlarda çok az bağlayıcılık özelliği göstermesi ve daha çok , ince agrega gibi davranması şeklindedir.

Uçucu külün ince agrega olarak kullanılmasında (ilave yöntemi) karışımda kullanılacak çimento miktarında azaltma yapılmaksızın uçucu kül karışıma eklenir. Bu sayede betonun etkin bağlayıcı miktarı arttırılmış olmaktadır. Ayrıca agrega miktarındaki değişikliklerle karışımın kullanılacağı uygulamanın özelliğine bağlı olarak farklı düzenlemeler de yapılabilmektedir.

Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine koyulması yönteminde (kısmi ikame yöntemi) ise çimentonun bir kısmının azaltılarak, karışıma çıkarılan çimento miktarından farklı miktarda uçucu kül eklenmesi şeklinde uygulanır. Kısmi ikame yönteminin ilave yönteminden farkı karışımdan bir miktar çimentonun çıkartılmasıdır. Karışıma eklenen uçucu kül miktarı çıkarılan çimento miktarından farklı olduğundan, karışımdaki ince agrega ve su miktarında değişiklik yapmak gerekmektedir. Bu yöntemin uygulanması neticesinde çimentoyla uçucu kül miktarının, yani toplam bağlayıcı miktarının kontrol betonundan fazla olduğu durumlarda dayanım gelişimi ve ekonomikliği sağlamak açısından, karışım oranlarında bir optimizasyona gidilmesi gerekir. Kısmi ikame yöntemi, kendi içerisinde, modifiye edilmiş ikame yöntemi ve rasyonel oranlama yaklaşımı olmak üzere iki farklı formda incelenir.

Modifiye edilmiş ikame yönteminin, karışım oranlarının değiştirilmesiyle, erken yaşlarda, kontrol betonu ile uçucu küllü betonların kıyaslanabilir dayanıma sahip hale gelebileceğini göstermiş olan Lowell ve Washa tarafından 1958 yılında ortaya çıkarılmış olduğu kabul edilmektedir (Pekmezci ve Uyan, 2001). Bu yöntemde ifade edilen temel nokta, erken yaşlarda (3 ve 28. günler arasında) uçucu küllü betonlarda kontrol betonu ile aynı dayanımı sağlayabilmek için, çimentoyla uçucu külün toplam ağırlığının kontrol betonundaki çimento miktarından fazla olması gerektiğidir.

Rasyonel oranlama yaklaşımı yönteminin ise ilk defa Smith tarafından önerildiği kabul edilmektedir. Bu yöntemin modifiye edilmiş ikame yönteminden farkı bir 'k' etkinlik faktörünün tanımlanmış ve kullanılıyor olmasıdır. Smith, ağırlığı F olan uçucu külün, ağırlığı k x F olan çimentoya eşdeğer olduğunu ve buradaki 'k' değerinin "bağlayıcı etkinlik faktörü" olduğunu belirtmiştir (Pekmezci ve Uyan, 201). Burada uçucu külün puzolanik aktivitesi dikkate alınmaktadır. Buna göre etkinlik faktörü k; uçucu kül miktarını eşdeğeri çimento miktarına çeviren katsayı olarak tanımlanabilir. Akman ve Yücel (1995) ise etkinlik faktörünü, uçucu külün bağlayıcılığının çimentonun bağlayıcılığına oranı olarak tanımlamışlardır.

Smith'e göre normal betonlarda dayanımı etkileyen iki ana faktör vardır. Bunlardan birincisi çimentonun tipi, diğeri de su/çimento oranıdır (Pekmezci ve Uyan, 2001). Sertleşme oranları farklı olan iki çimento için su/çimento oranında oynama yapılarak aynı dayanıma ulaşmak mümkündür. Uçucu kül ve çimento beton içinde farklı oranlarda yer aldığı ve aynı yaşlarda kontrol betonuyla eşit dayanıma ulaşması istendiğinde, aynı yöntemi uçucu kül ve çimento karışımları için uygulamak mümkündür.

Özellikleri bilinen küllerin deney sonuçlarıyla ilgili karşılaştırma yapabilmek için külün bağlayıcılık etkinliği k, eklenen külün ağırlığı F ise, kontrol betonuna eşit mukavemet verebilmesi için çıkarılabilecek çimento ağırlığının k x F' e eşit olduğu kabul edilmiştir. Bir betonda suyun ağırlığı E, çimentonun ağırlığı C ve uçucu külün ağırlığı F ise etkin su/çimento oranı;

$$\left(\frac{E}{C}\right)_e = \frac{E}{C^1 + kF} = \frac{E}{C^1} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{kF}{C^1}\right)} \right]$$

şeklindedir.

Uçucu küllü betonların dayanımı kül, çimento ve suyun birbirlerine oranlarına bağlıdır. Babu ve Rao (1993)'ya göre uçucu kül miktarının artması ile külün etkinliği azalma eğilimine girmektedir. Aynı zamanda uçucu külün etkinliği su/çimento oranının artması ile birlikte azalmaktadır. Uçucu küllü betonun su/bağlayıcı malzeme

oranındaki azalma referans betonunun su/çimento oranı ile karşılaştırılarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (dE kavramı);

$$\Delta E = \left(\frac{E}{C}\right) - \left(\frac{E}{C'+F}\right) = \left(\frac{E}{C'+k_e F}\right) - \left(\frac{E}{C'+F}\right) = \frac{E}{C'} \left[\frac{1}{1+k_e \frac{F}{C'}} - \frac{1}{1+\frac{F}{C'}} \right]$$

Babu ve Rao (1993), etkinlik faktörünün tüm uçucu kül oranları için aynı değerde olmamasından yola çıkarak, etkinlik faktörünü $k=k_e+k_p$ şeklinde iki ana bileşene ayırmışlardır. Burada k_e 'yi genel etkinlik faktörü, k_p 'yi ise uçucu kül oranına bağlı olan yüzdesel etkinlik faktörü olarak tanımlamışlardır.

“k” etkinlik faktörünün hesabında birkaç farklı yaklaşım bulunmaktadır.

a) Smith dayanım üzerindeki etkin parametrenin su/çimento oranı olduğu görüşünden yola çıkarak aynı dayanımı veren

$$\left(\frac{E}{C}\right)_e \text{ ve } \frac{E}{C'} \left[\frac{1}{1+\left(\frac{kF}{C'}\right)} \right]$$

uçucu kül içermeyen ve içeren betonların su/bağlayıcı oranları olmak üzere;

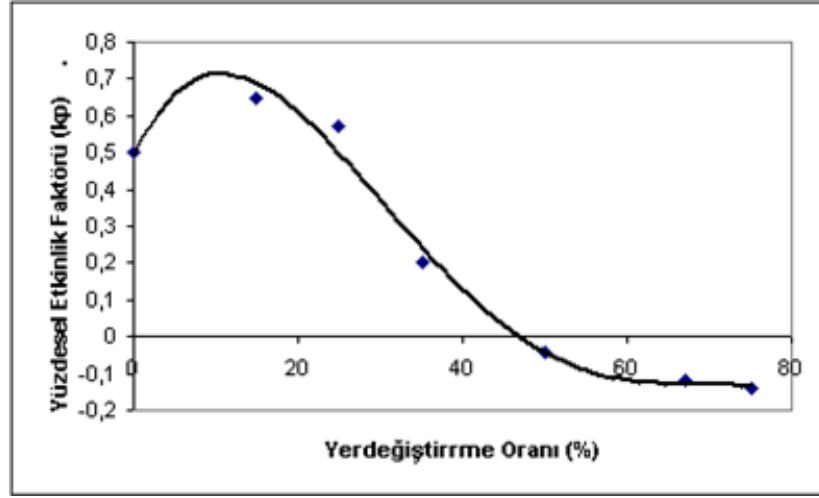
$$\left(\frac{E}{C}\right)_e = \frac{E}{C'} \left[\frac{1}{1+\frac{kF}{C'}} \right]$$

eşitliğinden etkinlik faktörünü hesaplamaktadır (Pekmezci ve Uyan, 2001).

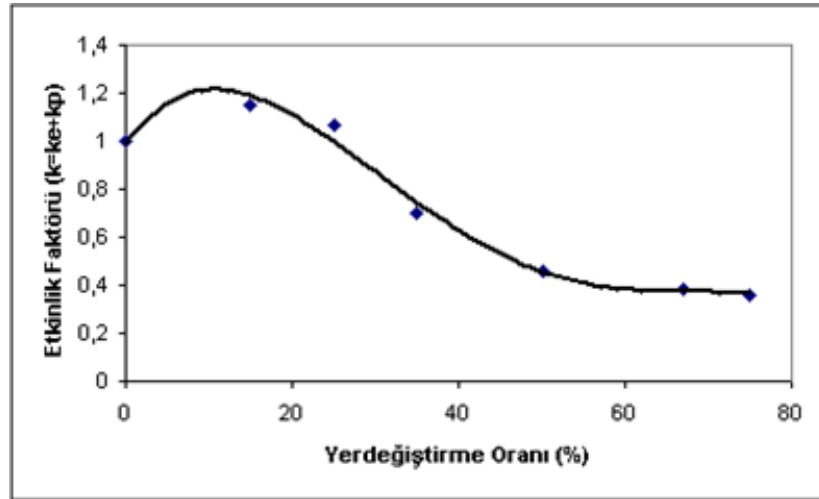
b) Babu ve Rao yukarıda da açıklandığı gibi etkinlik faktörünü uçucu külün yapısına bağlı olan genel etkinlik faktörü (general efficiency factor) (k_e) ve uçucu kül yüzdesine bağlı olan yüzdesel etkinlik faktörü (k_p) olarak iki bileşene ayırmışlardır (Pekmezci ve Uyan, 2001). Bu etkinlik faktörlerini (su/bağlayıcı) oranı-dayanım arasındaki ilişkiden faydalanarak bulmuşlardır. Bunun için uçucu kül içermeyen (şahit), yüksek dozajda uçucu kül içeren ve düşük dozajda uçucu kül içeren betonlar üretmişler ve her bir seri için sırasıyla dayanımın,

$$\frac{E}{C'+F} \quad \frac{E}{C'+k_e F} \quad \frac{E}{C'+k_e F + k_p F}$$

oranları ile değişimini gösteren diyagramları elde etmişlerdir. Daha sonra uçucu küllü beton diyagramlarının normal beton diyagramlarına çakışmasını sağlayarak k_e ve k_p değerlerini bulmuşlardır. k_p 'nin ikame edilen uçucu kül yüzdesi ile değişimi Şekil 2.12'de gösterilmiştir. $k_e=0,50$ olarak elde ettikleri genel etkinlik faktörüne ve k_p ye bağlı olarak etkinlik faktörü (k)'nın ikame edilen uçucu kül yüzdesi ile değişimi ise Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. k_p 'nin yer değiştirme oranı ile değişimi (Pekmezci ve Uyan, 2001)



Şekil 2.13. Etkinlik faktörünün (k) yer değiştirme oranı ile değişimi (Pekmezci ve Uyan, 2001)

Pekmezci ve Uyan (2001), Babu ve Rao'nun genel etkinlik faktörü olarak tanımladıkları (k_e)'yi uçucu külün yapısına bağlı olduğu için “yapısal etkinlik faktörü” olarak tanımlamayı önermektedirler. Akman ve Yücel (1995)etkinlik faktörünün tayininde Bolomey formülünü;

$$f_c = K_B \left[\frac{C}{E+h} - k' \right]$$

kullanmışlardır.

Pekmezci ve Uyan (2001), uçucu kül içermeyen betonlarda KB Bolomey katsayısı ve diğer katsayıları deneysel olarak elde ettiklerini ve daha sonra bu katsayılar kullanılarak, formülünden k etkinlik faktörüne ulaştıklarını ifade etmektedir.

$$f_c = K_B \left[\frac{C+kF}{E+h} - k' \right]$$

Bu yöntemin eleştirilebilir yönünün uçucu kül içermeyen ve içeren betonlarda KB Bolomey katsayısının aynı alınması olduğu söylenebilir.

Etkinlik katsayısını etkileyen belli başlı faktörler çimento cinsi, çimento dozajı, kimyasal katkıları, agrega tipi ve granülometrisi, kür şartları ve betonun yaşıdır.

2.4.3. Diyatomit

Diyatomit, su yosunları sınıflarından tek hücreli mikroskobik diatome alglerinin fosilleşmiş silisli kavkılarında meydana gelmiş bir çökeldir. Çok çabuk çoğalan ve su kütlesi içinde belirlenemeyecek oranlarda bulunan bu canlılar, canlılıklarını kaybedince suyun dibine çöker ve yığılırlar. İyi şartlardaki diyatome bir su alanında, yılda birkaç milimetre kalınlıkta diyatomit çökeli oluşabilir. Bugün dünyada ekonomik değerde sayılarak işletilen diyatomit rezervleri, Miyosende teşekkül etmiştir (Önem, 1997).

Bir diatomenin kavkısı sulu amorf silikadır ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Diyatomit ağırlıklı olarak silisten oluştuğu halde kayaç sertlikleri (Mohs ölçeğinde) 1,5-2 civarındadır. Kimyasal bileşimine de bağlı olarak kuru birim hacim ağırlığı $250\text{-}750 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. Ticari değerdeki bir diyatomit kayacının en az % 80 oranında veya daha fazla SiO_2 içermesi gerekmektedir (Önem, 1997).

Günümüzde diyatomit; süzme (filtrasyon) maddesi, dolgu maddesi, izolasyon malzemesi (ısı, ses, elektrik), absorban malzeme, hafif aşındırıcı ve yüzey temizleyici madde, refrakter malzeme, sentetik silikat üretimi, kimyasal gübreler için sertleşmeyi önleyici kek maddesi, diş macunu, temizlik malzemeleri, ilaç, kağıt, ince film, plastik, seramik, kozmetik, boya, cila, sır, yangın söndürücü, kibrit, cam, petrol rafinasyonu gibi farklı endüstriyel alanların yanında çimento ve hazır beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak da kullanılmaktadır (Önem, 1997).

Diyatomitin inşaat amaçlı kullanımı çok eski zamanlardan bu yana mevcuttur. M.S. 530'lu yıllarda İstanbul'da inşaa edilen Ayasofya'nın kubbesinde, hafifliği nedeniyle diyatomit tuğlasının kullanıldığı belirtilmektedir. Hafif agrega olarak kullanılabilmesinin yanında diyatomit volkanik orijinli olmayan ve ASTM C-618'e göre doğal puzolan malzemeler sınıfında yer alan az sayıdaki doğal puzolanlardan birisidir. Diyatomit hem öğütmeden önce hem de öğütüldükten sonra puzolanik özellik göstermektedir. Bu amaçla kalsine edilen ve öğütülen diyatomitlerin bir çok baraj inşaatında beton katkı maddesi olarak kullanıldığı bilinmektedir (Önem, 1997).

Bazı kaynaklarda diyatomitin betonda mineral katkı olarak kullanıldığında beton çekme ve basınç dayanımında artışlar sağladığı ve beton işlenebilirliğini kolaylaştırdığı ifade edilmektedir. Diyatomit aynı zamanda çimento üretiminde katkı maddesi olarak da kullanılmaktadır (Sezgin, 1998).

Çimento endüstrisinde kullanılan puzolanik materyaller, birkaç kalitede diyatomit türünü de kapsar. Böyle materyaller yüksek amorf silika içerikli biyolojik orijinli sedimanter kayaçlardır. Amorf silika başlıca diatome frustülleri ikincil olarak sünger iğneleri, siliko agellate iskeletleri ve/veya radyolarian hücreleri şeklindedir. Bunun

yanında amorf silika içeren diyatomitli kayalar karbonat, kil mineralleri, kuvars, feldspat ve volkanik camları dahi içerebilir. Saf diyatomit kayacı yaygın olarak filtre elemanı olarak kullanılır. Oysa kalkerli veya killi diyatomit çoğunlukla özel dolgu malzemesi, absorban ve izolasyon ürünü imalatında kullanılmaktadır. Yunanistan'da halen kullanılan doğal puzolanlar, kalsiyum-silikat bileşikli çimento oluşumu için gereken reaktif silikayı sağlayan, yüksek miktarda volkanik cam içeren volkanik tüflerdir. Diyatomit gibi biyojenik silikaca zengin kayalar opal-A formunda yüksek miktarda reaktif silika içerir. Yunanistan, Macaristan ve Romanya gibi bazı Avrupa ülkelerinde değişik kalitede diyatomit rezervlerinin bulunmasına rağmen şimdiye kadar bu ülkelerde gerçekleşen çimento ve beton üretimlerinde puzolanik katkı maddesi olarak kayda değer diyatomit kullanımına rastlanılmamıştır (Stamatakis vd. , 2002).

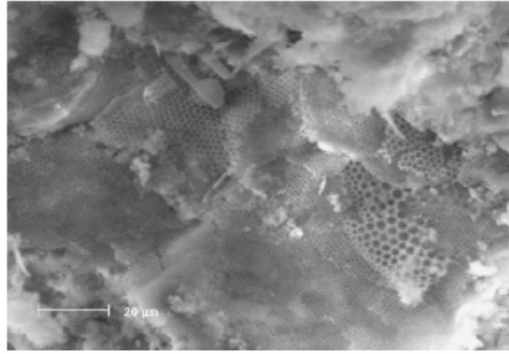
Toplam 3 yıl süreyle yürütülmüş bir Avrupa Ar-Ge projesinde (Sözleşme No: ERBİC15-CT96-0712) Yunanistan, Macaristan ve Romanya orijinli birkaç diyatomit kayacı çimento katkısı olarak denenmiştir. Bu araştırmada mevcut diyatomit materyalleri karakterize edilerek ve onların çimento katkı maddesi olarak potansiyelleri, opal-A ve reaktif silika içerikleri, diatome boyut, şekil ve morfolojisindeki farklılık göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

Araştırmada Macaristan'dan elde edilen diyatomit örnekleri ülkenin kuzeydoğusunda Erdobeny köyünün yanında absorban amaçlı diyatomit üretmek için işletilen aktif bir maden ocağından, Romanya örnekleri güney Dobrogea, Adamclisi köyü yanında periyodik olarak işletilen diyatomit ocağından elde edilmiştir. Yunanistan'da da Alimia-Sarakiniko (Milos Adası), Aitania (Girit Adası) ve Agios Nikolaos-Vougiato (Zakynthos Adası)'ndaki muhtelif yaş, depolanma ortamı ve saflıkta üç diyatomit yatağı araştırılmıştır.

Diyatomitlerin karakterizasyonu kimyasal, mineralojik ve morfolojik analizleri kapsamaktadır. Kayaların kimyasal bileşenlerini belirlemek için spektrometre ile kimyasal analizleri ve difraktometre ile mineralojik-SEM analizleri yapılmıştır (Şekil 2.14). Kayaların reaktif silika (RS) içerikleri, Avrupa Normu EN 196-2'a göre ölçümlenmiştir. Diyatomit türlerinden elde edilen puzolanik hammaddeler, klinker

ve jips ile öğütülerek çimento karışımının üretilmesi için kullanılmıştır. Elde edilen çimento, Yunan Standartlarına (EN 196-1.3.6) göre, spesifik yüzey alanı, katılma zamanı başlangıç ve sonu ile basınç dayanımı ölçümlerine maruz bırakılmıştır.

Araştırılan hammaddelerde ana unsur diatome frustülleri formundaki opal-A olmuştur. Opal-A XRD diyagramları ve SEM ile teşhis edilmiştir. Zakyntos ve Girit diyatomit kayaçlarında yüksek miktarda kalsit ve kuvars bulunmuştur. Macar ve Roman diyatomit kayaçlarında az miktarda semektit saptanmıştır (Çizelge 2.13).



Şekil 2.14. Yunanistan - Zakyntos Adası diyatomitine ait SEM fotoğrafı (Stamatakis vd., 2002).

Çalışma da, Macar, Romen ve Milos Adası'ndaki diyatomitler ile kıyaslanan Girit ve Zakyntos diyatomitleri en homojen, Macar diyatomiti ise analiz edilen hammaddelerden en yüksek opal-A içeriğine sahip olan kayaç olarak belirlenmiştir.

Araştırmada diyatomit kayaçlarının majör element analizleri farklı CaO içeriğine sahip olduklarını göstermiş ve bu sebepten kayaçlar iki grupta sınıflandırılmıştır. Birinci grupta yüksek CaO içeriğine sahip Zakyntos ve Girit diyatomit kayaçları, diğer grupta ise düşük CaO içeriğine sahip Macar, Romen ve Milos örnekleri yer almıştır. Diyatomit örneklerinde en yüksek SiO₂ içeriği (% 77,68) Macar kayaçlarında saptanmıştır. Araştırmada SiO₂'nin çoğunun opal-A'dan kaynaklandığı, örneklerin düşük Al₂O₃ içeriği, kil ve feldspat gibi alümino-silikat minerallerinin nispeten düşük miktarlarına uygun olduğu ve bütün numunelerin K₂O + Na₂O içeriğinin düşük değerler gösterdiği ifade edilmektedir. Feldspat ve diğer alkalice zengin minerallerin düşük miktarları, özellikle Macar numunesinin biyolojik silikaca

zenginliğine bağlanarak, Romen numunelerinde yaklaşık % 75 oranında yer alan SiO₂ içeriği, opal-A, kuvars ve alümino-silikat minerallerinin varlığı ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca bütün örnekler arasında en yüksek değere sahip Romen diyatomitinin Al₂O₃ içeriği, alümino-silikat minerallerinin varlığından kaynaklandığı ileri sürülmektedir (Çizelge 2.13).

Çalışmada hammaddelerin içeriğinde majör elementlerin kimyasal analizine ilave olarak, çözünmez kalıntı (IR) ve reaktif silika (RS) içerikleri de araştırılmıştır. Yunan standartlarına göre çimento tipleriyle ilgili olarak, puzolanik çimento için IR % 20 ile % 40 arasında olduğu, yeni Avrupa Çimento Standartlarında (EN 197-1) ise, puzolanik malzemenin RS içeriğinin, malzemenin en az % 25'i olması gerektiği ifade edilmektedir. Bütün örneklerin RS içeriği > % 25 olarak saptanmıştır (Çizelge 2.14). Bu bulgulara göre kayaçların hem Avrupa hem de Yunan standartlarına uygunluğuyla birlikte Macar diyatomitinin en yüksek, Zakynthos ve Girit diyatomitlerinin ise en düşük RS içeriğe sahip olduğu vurgulanmaktadır.

Çizelge 2.13. Diyatomit kayaç örneklerinin mineralojik analizleri (Stamatakis vd., 2002).

	Yunanistan			Macaristan	Romanya
	Zakynthos	Milos (Alimia)	Girit (Atina)	Erdobenyne	Adamclisi
Opal-A	Mj	mj	mj	Mmj	Mj
Kuvars	Tr	md	mj	Tr	Mj
Kalsit	Mj	md	mj		
Dolomit			tr		
Feldspat		md	tr	Tr	Tr
Semektit			md	Md	Md
İllit		md	md		Tr
Semektit- Kaolinit		md		Md	

Açıklayıcı Notlar; mmj: hakim, mj: majör, md: orta, tr: minör/eser bileşenler. Boş hücreler mineral fazların tespit edilmediğini ifade etmektedir.

Çizelge 2.14. Diyatomit kayaç örneklerinin kimyasal analizleri (Stamatakis vd., 2002).

	Yunanistan			Macaristan	Romanya
	Zakynthos (%)	Milos (Alimia) (%)	Girit (Atina) (%)	Erdobenyne (%)	Adamclisi (%)
SiO ₂	30,25	59,90	48,59	77,68	75,00
Al ₂ O ₃	2,02	7,68	5,66	4,14	9,80
Fe ₂ O ₃	1,01	2,36	3,48	3,23	3,85
CaO	32,97	9,50	16,79	1,09	0,70
MgO	1,07	1,55	2,42	1,98	1,98
K ₂ O	0,17	1,78	1,01	0,39	1,34
Na ₂ O	0,11	1,00	0,67	0,12	0,50
A.Z.	32,68	16,48	22,27	11,23	6,91
Toplam	100,28	100,25	99,89	99,86	100,08
IR	22,64	56,10	39,06	56,50	67,64
RS	25,50	45,02	28,20	69,07	50,49
RS/TS	0,84	0,75	0,58	0,89	0,69

Açıklayıcı Notlar; RS: Reaktif silika, TS: Toplam silika, IR: Çözülmez kalıntı, A.Z: Kızdırma kaybı

2.4.4. Kalsine Killer - Metakaolin

Her yıl altı milyar ton civarındaki üretimiyle beton, yeryüzünde sudan sonra en yoğun biçimde tüketilen ikinci malzemedir. Bu durum çoğunlukla çimento imalatı için hammaddenin bol bulunması, değişik yapısal biçimleri oluşturmada betonun düşük bağıl maliyeti, çok yönlülüğü ve şartlara uyma yeteneğinden dolayıdır. Bununla birlikte hem hammaddenin istihracının hem de çimento imalatı esnasında CO₂ emisyonunun neden olduğu zarar bakımından çevresel kaygılar, tamamlayıcı malzemelerin kullanımıyla çimento tüketimini azaltıcı baskıları beraberinde getirmiştir. Bu malzemeler doğal oluşumlar, endüstriyel çöpler veya yan ürünler gibi çimento üretimi için daha az enerji gerektiren malzemeler olabilir. Beton yapılar da tecrübe edilen ciddi boyutlardaki hasar olaylarının sayısındaki artış, bu baskılara katkıda bulunan diğer kaygılarla ilişkilendirilmektedir. Bu kaygıların ve diğer çevresel sorunların dile getirilmesi endüstriyel yan ürün/atıklarının bertarafı ile yakından ilişkilidir. Beton ürünlerinde günümüzde çok yaygın kullanılan portland çimentosu ve puzolanların karışımı ekonomik avantajlarda sağlamaktadır.

Başlangıçta puzolan terimi; su mevcudiyetinde ortam sıcaklığında kireç ile tepkimeye giren, doğal olarak oluşmuş volkanik küller ve pişmiş toprakla ilişkilendirilmiştir. Son zamanlarda terim, çimentolaşma özelliğine sahip bileşikler formunda kalsiyum hidroksit (CH) ile su varlığında kimyasal tepkimeye giren, çok ince tane yapısındaki bütün silikalı-alüminli malzemeleri kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Bu genelleştirmiş tanımlama uçucu kül, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı gibi atık ürünleri de kapsar. Puzolanların kullanımı, bazı durumlarda basınç dayanım gelişimleri daha yavaş olmasına rağmen, sağlamlık gelişimi ve dayanım artışı, hidrasyon sıcaklık artışında azalma gibi açıkça belli olan ilave teknik avantajlara neden olur. Portland çimentosu, tamamen hidrate olursa, kendi ağırlığının yaklaşık % 28'i oranında kalsiyum hidroksit üretmesine rağmen, uygulamada tamamen prizini almış betonlarda bu değer normalde % 20'yi aşmaz.

İlave puzolanla tepkimeye giren kalsiyum hidroksit (portlandit) ilave hidrate kalsiyum silikat oluşturur. Portland çimentosunun hidrasyonu serbest kalan kalsiyum hidroksit dayanıma önemli katkı sağlamaz ve beton sağlamlığına zarar verebilir. Puzolanlarla tepkime yoluyla kalsiyum hidroksit tüketimi veya azaltılması, önemli sağlamlık ve dayanım gelişimiyle sonuçlanabilir. Teknik ve bazı durumlarda ekonomik avantajlardan dolayı son yıllarda betonda uçucu kül, silis dumanı ve doğal zeolitlerin kullanımı artmakta ve yaygınlaşmaktadır. Bu eğilim günümüzde farklı çevresel yararlarından dolayı daha büyük hız kazanmaktadır. Puzolanik özelliklerinden dolayı, dünya çapında üretilen endüstriyel yan ürünlerin hacmi, onların güncel kullanımını aşmış ve bu şekilde kullanımıyla birleşen çevresel yararlarının daha fazla kavranılmasıyla kullanımlarının artacağına yaygın biçimde inanılmaktadır. Bu durum çevresel ihtiyaçların korunması ve gelecekte yapı güçlendirmesine katkıda bulunacaktır. Bu nedenle uzun vadede atık ve daha az yoğun enerji ile üretilen puzolanik özelliği olan malzemeler ile, harçta ve betonda çimento ile yer kısmen yer değiştiren uygulamaları yaymaya zorlayıcı nedenler vardır.

Puzolan için olası bir kaynak kalsine edilmiş killerdir. Kireçle karıştırılan kalsine edilmiş toprak formundaki doğal puzolanlar binlerce yıldan bu yana çimentolaşabilen

malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Su deposu, su kemerleri, duvarlar ve köprüler gibi bin yıllık yapılar, ısıyla aktive edilmiş killer ve kireç harçlarıyla inşa edilmiştir. Romalılar volkanik külleri kireç ve suyla karıştırma keşiflerine ilave olarak, güçlü bir çimento malzemesi üretmek amacıyla, özellikle Britanya gibi volkanik küllerin bulunmadığı bölgelerde puzolan olarak kırılmış kiremidi kullanmışlardır. Örneğin, İngiltere'den İskoçya'yı ayırmak için M.S. 112 ile 130 yılları arasında inşa edilen Hadrians duvarlarının elemanları kireç, kırılmış kiremit kırılmış kumtaşı kumu ve tuğla molozu içeren harçla bağlanmıştır. Avrupa'daki diğer kurumlarla işbirliği halindeki uzmanlar, harç ve betonda çimento ile kısmi yer değiştirici puzolan olarak atık kil tuğlaların kullanım potansiyelini, yeni bir araştırmayla gözden geçirmişlerdir. Harç ve betonda puzolanik katkı maddesi olarak metakaolin formundaki kalsine killerin kullanımı son yıllarda hatırı sayılır bir ilgiyle karşılaşmıştır. Bu ilginin çoğu yetersiz dayanımla ilişkilendirilen kalsiyum hidroksitin ortadan kaldırılmasına odaklanmıştır. Kalsiyum hidroksitin ortadan kaldırılması sülfat saldırısı ve alkali silika reaksiyonu üzerine önemli bir etkiye sahiptir. Aynı zamanda metakaolin ve kalsiyum hidroksitin tepkimesiyle oluşan ilave çimentolaşma fazı dayanım gelişimi de sağlar. Metakaolin yüksek saflıktaki kaolen kilinin orta sıcaklıkta (600-800°C) kalsinasyonu ile üretilir. Metakaolin, kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girecek şekilde aktive edilmiş silika ve alümina içerir. Harç ve betonda kil esaslı puzolan kullanımının başlıca nedenleri, malzemenin elde edilebilirliği ve sağlamlık artışıdır. İlave miktarı, kilin kalsinasyon sıcaklığına, tipine ve özellikle erken kür süresinde dayanım gelişimini sağlamasına bağlıdır. Çok erken dayanım gelişimi, filler etkisi ve çimento hidratasyonunu hızlandırmasının kombinasyonundan kaynaklanmaktadır (Sabir vd., 2001).

Sonradan, çimento hidratasyonu ile üretilen kalsiyum hidroksit ve metakaolin arasındaki puzolanik tepkimeyle bu etkiler gelişir. Puzolanik malzemelerin kullanımının yararları, sadece M.S. 127 yılında Roma'da inşa edilmiş Pantheon gibi bugün hala mevcut olan çoğu antik yapı örneklerinde değil, bunun yanında çoğu yeni yapılarda da açıkça görülmektedir. Brezilya da 1960 yılında bir depo inşaatında yöresel olarak üretilen kalsine kilin yaklaşık 300.000 tonu, bölge dışından daha pahalıya getirilen portland çimentosuyla karıştırılmıştır. Yüksek derecede reaktif

agregaların kullanılmış olması gerçeğine rağmen, bu yapılarda alkali silika reaksiyondan sıkıntı çekilmediği kaydedilmiştir. Betona kalsine killerin dahil edilmesi alkali silika reaksiyon direnci kazandırmıştır (Sabir vd., 2001).

Kaolinitin kalsinasyon koşulları ve metakaolinin karakterizasyonu 19.yy'ın son bölümünden bu yana yürütülen birtakım araştırmaların öznesidir. Bu konu üzerine Brindley ve Nakahira tarafından seramik endüstrisinin koşullarında geniş bir inceleme yürütülmüştür (Sabir vd., 2001).

Kil mineralinin havada (600-900°C'de) de hidratasyon yoluyla kristal kafes yapısının kısmen veya tamamen bozularak yüksek reaktiviteli bir geçiş fazı formuna yol açması "ısıtma etkinleştirme" olarak bilinir. Kalsine killere veya kaolinitce zengin lateritik topraklarla metakaolinit ($Al_2 \cdot 2SiO_2$ veya AS_2) üretimi tipik bir örnektir.

Betonda puzolan olarak kalsine killeri kullanılırken içermiş olduğu kimyasal reaksiyonlar Malquori ve Turrizani tarafından, yakın zamanda da DeSilva vd., Dunster vd. tarafından tartışılmıştır. Başlıca reaksiyonlar suyun varlığında AS_2 ve çimento hidratasyonundan elde edilen kalsiyum hidratları arasındaki reaksiyonlardır (Sabir vd., 2001).

Bu reaksiyon kalsiyum alüminat hidratları ve alümino-silikat hidratları (C_2ASH_8 , C_4AH_6 ve C_3AH_6 gibi) kapsayan kristalin ürünlerle birlikte kalsiyum hidroksit jelini içeren ilave çimentolaşabilen alüminyum oluşturur. Kristalin ürünlerin oluşumu esasen AS_2 / CH oranına ve reaksiyon sıcaklığına bağlıdır. Ayrıca serbest karbonat mevcutsa karbo - alüminatlar da oluşabilir. Metakaolin ile portland çimentosunun optimum yer değişimi seviyesi, doğasındaki değişim ve portland çimentosu - metakaolin sisteminde oluşan farklı reaksiyon ürünlerinin (bileşimine bağlı olarak) sıcaklık ve reaksiyon zamanı özellikleriyle ilişkilendirilir.

Hidratasyon reaksiyonunu incelemek, işlem şartları ve beslenen kilin saflığı açısından metakaolinin reaktivite seviyesini belirlemek için birkaç çalışma yürütülmüştür. Beslenen kil (kaolin) ya doğal olarak saf olmalı veya standart mineral

işlem yöntemleriyle rafine edilmelidir. Aksi halde safsızlıklar eritici olarak rol oynayabilir. Isıl aktivasyon sıcaklık aralığı genellikle 700-800 °C arasında olup önemi kritiktir ve kullanılan minerale bağlıdır.

Bu araştırmalar, yüksek kaolin (% 90) içeren besleme kiliyle elde edilen sertleşmiş betonda basınç dayanım artışı ve kalsiyum hidroksit seviyesinde azalmayı göstermiştir. Chapelle testi kullanılarak reaktiflik seviyesi belirlendiğinde uygun şartlar altında işlenen metakaolin çok etkin bir puzolan olarak bulunmuştur. Araştırmada puzolanın gram başına kalsiyum hidroksit tüketim oranı olarak ifade edilen metakaolinin reaktifliğini silika dumanı ve uçucu külünkine göre mukayese edilmiştir. Bu değerlerin puzolanların kalitesine yöre değişeceği açıktır. Yine de Chapelle testi yüksek sıcaklıkta gerçekleştirildiği ve oda sıcaklığında reaksiyon oranıyla ilgili sağlanan bilgi olmadığı için kürlenmiş betonda kalsiyum hidroksit miktarı, termo-gravimetrik analiz (TG) ve diferansiyel termal analiz (DTA) ile ölçümlenebilir (Asbridge vd., 1994; Kostuck vd., 2000).

İlaveten puzolanların reaktifliği hidrate olmuş portland pastasında tepkimeyen puzolanların kimyasal yolla saptanmasıyla değerlendirilebilir. Metakaolinin puzolanik aktivitesi silika dumanı-portland çimentosu ve uçucu kül-portland çimentosu harçlarıyla, metakaolin-portland çimentosu harçlarının ısı gelişimi karşılaştırmasıyla da değerlendirilmektedir. Hidratasyonun ilk 24 saati boyunca gözlenen sonuçlar, metakaolin-portland çimentosu harçları, silis dumanı-portland çimentosu harçlarına benzer şekilde, portland çimentosu harçlarına göre yavaşça ısı gelişimi artışı göstermiştir. Bunun aksine uçucu kül-portland çimentosu harçları önemli bir ısı çıkışı azalması göstermiştir.

2.5. Betonda Gelişen Zararlı Reaksiyonlar

2.5.1. Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)

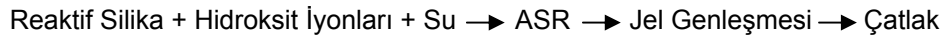
Betonda alkali silika reaksiyonundan dolayı oluşan hasar, bir olgu olarak ilk kez 1940 yılında Kuzey Amerika'da Stanton tarafından tanıtılmış ve o tarihten bu yana pek çok ülkede bilinmektedir (Stanton, 1940; Frohnsdorff vd.,1979). Stanton'dan bu yana pek çok çalışma yayınlanmış fakat Alkali silika reaksiyonu (ASR) mekanizması henüz bütün detayları ile anlaşılamamıştır (Hobbs, 1988; Diamond vd., 1992; Helmuth, 1993; Capra ve Bournazel, 1995). Bununla beraber, belirli agregalardaki reaktif silikanın varlığı, karışımın su içeriği ve gözenek suyundaki alkaliler gibi önemli faktörler tanımlanmıştır. Ortam bağıl nemi (RH), betonun porozitesi ve karışıma dahil olan katkı maddelerinin özellikleri gibi diğer faktörler de reaksiyonun gelişiminde önemli rol oynamaktadır.

Yüksek performanslı beton için malzeme tasarımı ve ASR arasındaki ilişki üzerine yapılmış pek çok çalışma vardır. Bu araştırmalarda genel olarak, mineral katkı kullanımı, düşük porozite - su/çimento oranı etkileriyle ASR'ndan oluşan hasarlardan, koruma sağlanabileceği belirtilmiştir (Schumann vd., 1988; Yeğınobalı, 2001). Ancak, yüksek performanslı beton içeren yapıların pek çoğunun genç yaşta ve sınırlı sayıda olmaları, ayrıca reaksiyon sonucu ortaya çıkan etkilerin uzun zaman almasından dolayı uzun dönemli saha tecrübeleri eksiktir. Bunların yanında reaktif agregalar içeren betonların ASR'na duyarlılığının araştırılmasıyla ilgili mevcut deney yöntemleri üzerine yeterli uzlaşma da yoktur.

Alkali silika reaksiyonu betonda yaygın olarak oluşan kimyasal bir reaksiyondur. ASR'nun, reaktif agregalarda belirli formlardaki silika ile beton gözenek suyundaki hidroksit iyonları (OH⁻) arasında oluşan reaksiyon olduğu hususunda pek çok araştırmacı uzlaşmaktadır (Hobbs, 1988; Diamond vd., 1992). Çimentonun hidratasyonu sonucu çözünebilir alkaliler gözenek suyunun pH değerini artırır (pH ≥ 12,5). Gözenek suyundaki alkalilerin miktarı, çimentoda çözülebilir alkalilerin miktarına bağlıdır. Reaktif silika ve hidroksit iyonlarının tepkimesi sonucunda oluşan

nihai ürün reaksiyon jelidir. Şayet betonun bulunduğu ortamda su mevcutsa veya ortam bağıl nemi yüksekse; jel suyu emer, genişir ve beton çevresine basınç uygular. Jelin genişmesinden kaynaklanan içsel gerilim kuvvetleri beton çekme direncini aşarsa çatlaklar oluşur. Betonda şu üç unsurun bir araya gelmesiyle ASR ve sonrası hasar oluşumu kaçınılmaz olur :

- Beton agregasının mineralojik bileşiminde reaktif silikanın varlığı,
- Portland çimentosu, don önleyici katkı veya ortamdan kaynaklanabilecek alkali iyonları,
- Yüksek bağıl nem ortamı veya su mevcudiyeti.

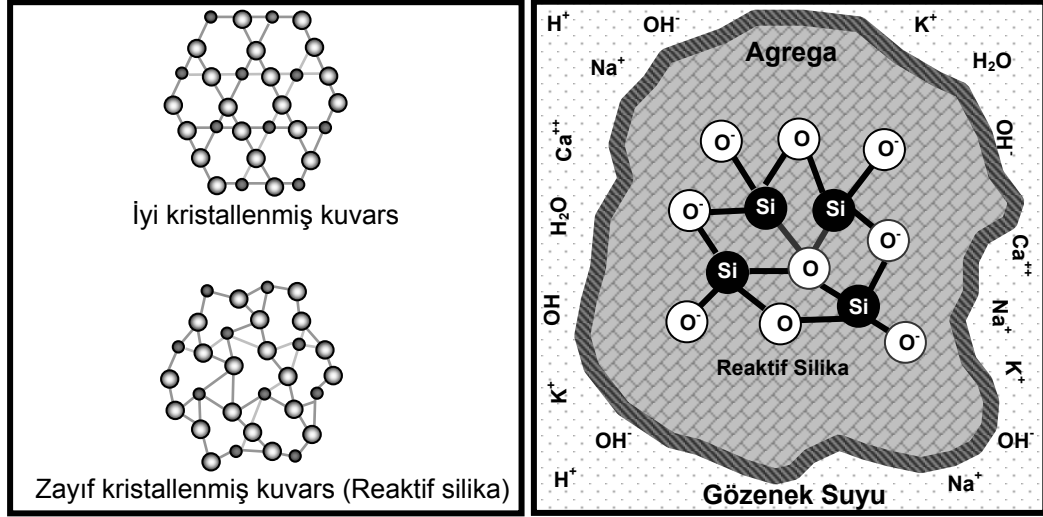


Kristal yapısı bozulmuş kuvars, sıkı mikrokristalin kuvars, opal, obsidiyen, kristobalit, tridimit, kalsedon, çört mineralleri ile fosil silis ve volkanik cam içeren agregalar potansiyel ASR riski taşır. “Reaktif silika”, silikatlı minerallerde rastgele $(\text{SiO}_2)_n$ bağlarının yapısından kaynaklanır. Bu rastgele veya amorf bağ yapısı, OH^- iyonlarının agrega yüzeyinden içeriye nüfuz etmesine ve içindeki bağları parçalamasına izin verir.

Gözenek suyundaki ana alkali katyonlar Na^+ ve K^+ ’dur. Alkali katyonların yaygın kaynağı yüksek alkali içerikli portland çimentosu, don önleyici katkı maddeleri, deniz suyu ve alkalice zengin zemin sularıdır. Gözenek solüsyonunun pH’ı $\geq 12,5$ ise portland çimentosu hidrasyonundan hidroksit iyonları oluşur. Çözülebilir alkaliler pH’ı 13 veya daha üstüne çıkarır. Aynı zamanda gözenek suyunda mevcut alkalilerin miktarı, çimentoda mevcut çözülebilir alkalilerin miktarına bağlıdır. Hidroksit iyonları bir silika yüzeyine saldıracaktır. Eğer silika iyi kristallenmişse zarar görebilecek mevkiiler sadece agreganın dış yüzeyleridir (Şekil 2.15). Fakat zayıf kristallenmiş silika durumunda agreganın yapısında zarar görebilecek, silika ağının parçalanmasına yol açan çok bölge vardır. Nötr yük dengesinde tutulan, Na^+ ve K^+ katyonları hidroksit iyonlarına doğru onlarla tepkimeye üzere yayılır. Nihai ürün jel benzeri bir malzemedir.

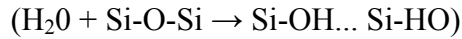
Betonda alkali silika reaksiyonunun gelişim evreleri şu şekilde özetlenebilir:

I. Beton karışımı hazırlamak için çimento-agregaya su ilave edilir. Ayrıca beton yerleştikten sonra ortamdan betona su nüfuz edebilir. Dış ortamdaki su veya yüksek nem ($RH \geq 80$) mevcudiyeti de beton gözeneklerini kısmen veya tamamen doldurabilir.

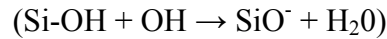


Şekil 2.15. İyi kristallenmiş kuvars ve agregada bileşimindeki reaktif silikanın bağ yapısı

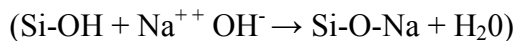
II. Gözenek suyu zamanla içerisinde alkali (Na^+ ve K^+) iyonlarının yüzdüğü yüksek pH değerine sahip alkali çözeltiye dönüşür. Bu çözelti reaktif silika içeren beton agregalarını kuşatır. Çözeltideki kutupsal su molekülleri reaktif agregada içerisindeki zayıf SiO_2 bağlarını parçalar, bunların yerinde Si-OH (silanol) bağları oluşur.

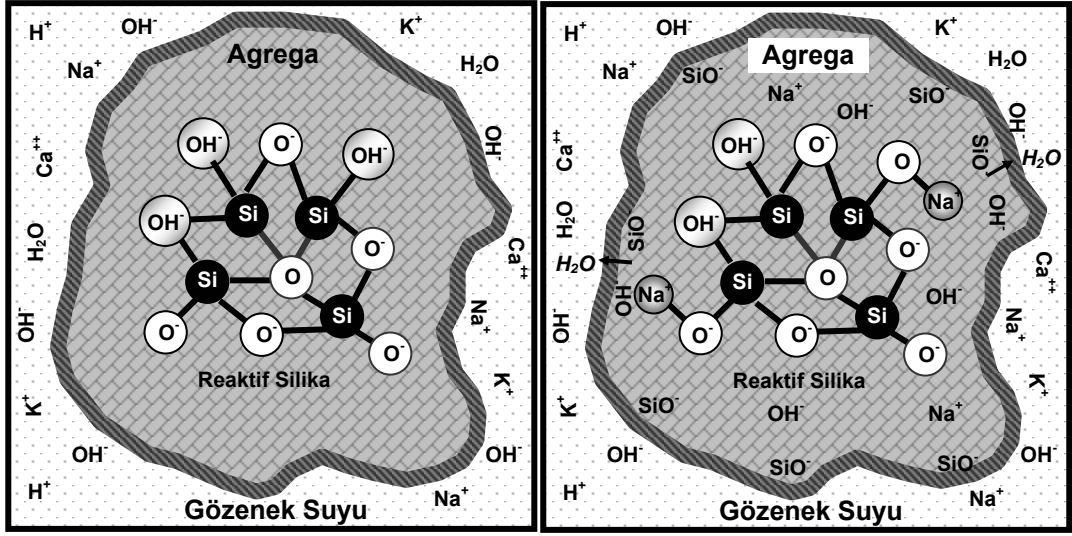


III. Sonraki adımda OH^- iyonları Si-OH bağlarını etkiler. Tepkime sonucu silika çözünerek alkali katyonların hedefi SiO^- molekülleri oluşur.



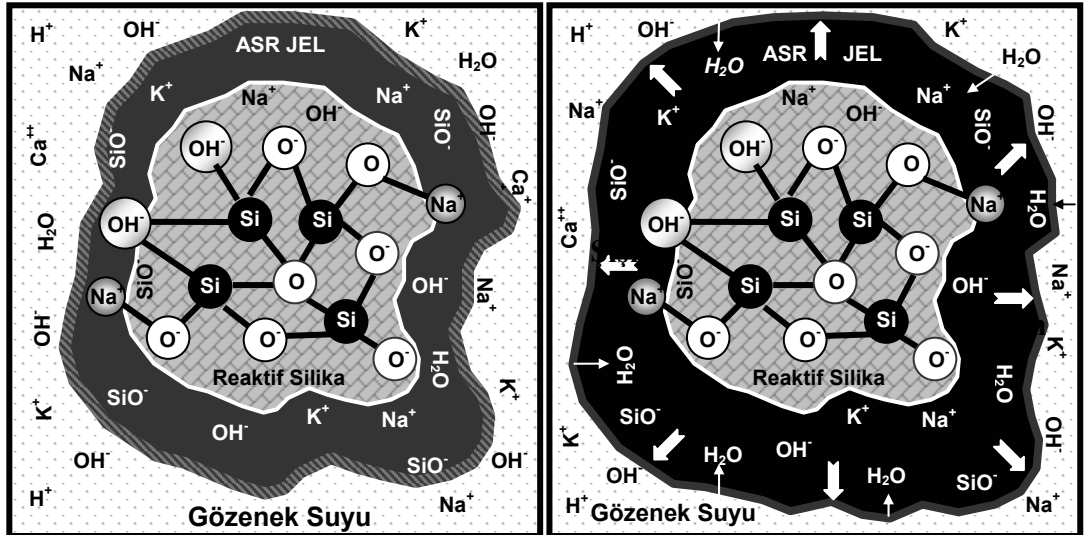
IV. Reaksiyonun son adımında ise, serbest SiO^- ve Si-OH molekülleri çözeltideki alkali katyonlarla tepkiyerek alkali silika molekülleri oluşur. Bu moleküller agreganın yüzeyinde birikerek agregada – hamur sınırında reaksiyon jeli meydana gelir (Şekil 2.16).





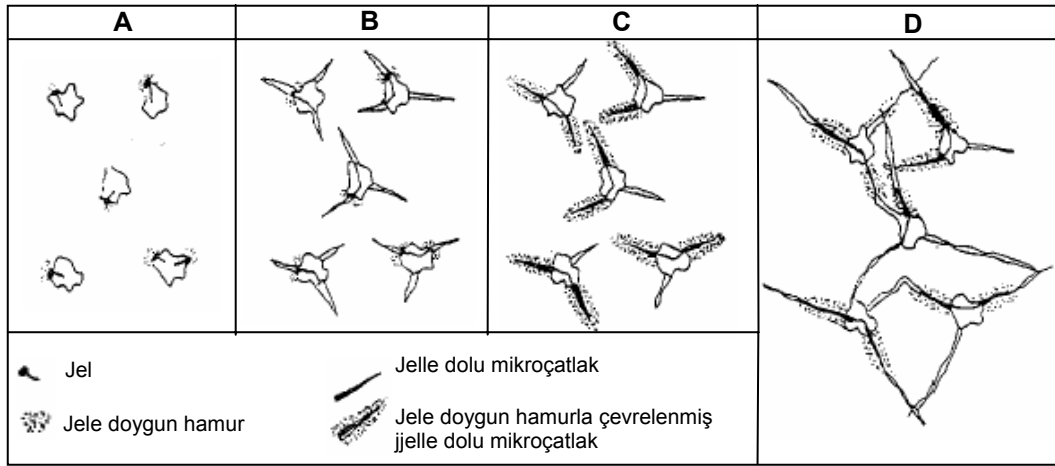
Şekil 2. 16. Beton gözenek suyunun alkalilerce zenginleşerek, oluşan hidroksit iyonları ve alkali katyonların reaktif silika ile etkileşimi

Bu reaksiyon sürecinde beton yapısı zarar görmez. Ancak alkali silika jeli çevresinden su emerek genişler. Hamur ve agregaya çevresine karşı bir kuvvet uygular. Jel genişleme kuvveti agregaya ve/veya hamur çekme gerilmesini aştığında zaman zaman beton yenilir ve mikro çatlaklar oluşur. Reaksiyon devam ederken çatlaklar büyür ve yüzeye kadar ulaşır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Alkali silika reaksiyon jelinin oluşumu ve çevreden su emerek genişlemesi

Hobbs'a (1988) göre ASR jelinin genişleme evreleri, Şekil 2.18'de genel model gösterimi olarak izlenmektedir. Çatlak oluşumu ve yayılımı, sistem çekme gerilmesinde iken aşırı olacaktır. Çatlakların yayılımı için öncelikli bir yön olmayıp, çatlak başlangıç mevkileri örnek içinde rastgele dağılır. Oluşan çatlak haritası ASR bozunmasının karakteristiğini yansıtır. Agregadaki reaktif silikanın konumu ve civardaki OH⁻ iyonlarının varlığı vasıtasıyla olası çatlak bölgelerinin yeri tahmin edilebilir.



Şekil 2.18. ASR jelinin şişme evreleri ve çatlak oluşumu (Ferraris, 1995)

ASR için temel bileşenlerin gözenek akışkanlarındaki alkali iyonları, reaktif silika ve nem olduğu bilindiğine göre, bu reaksiyonu meydana gelmeden önlemek veya en azından etkisini azaltmak için;

- Öncelikle bileşiminde reaktif silika bulunmayan agregalar ve düşük alkali içerikli portland çimentosu kullanılmalı,
- Reaktif agregalarla kullanılması zorunlu çimentolarda Na₂O eşdeğeri (Na₂O + 0,658*K₂O) alkali miktarı < 0,60 olmalıdır (ASTM C1240-03a). Bu mümkün değilse beton karışımına düşük alkali içerikli mineral katkı maddeleri (ikame yöntemine göre) dahil edilerek, karışımın toplam alkali içeriği minimize edilmeli,
- Ayrıca, beton geçirgenliğini azaltarak betonun su ile teması asgari düzeye düşürülmelidir (Ferraris, 1995).

Bugüne kadar yürütülen çok sayıda araştırma da uçucu kül, silika dumanı, kalsine edilmiş killer gibi puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddelerinin ASR üzerine etkileri incelenmiştir. Genel olarak araştırma sonuçları düşük alkali içeriğine sahip mineral katkı maddelerinin, reaksiyon kaynaklı beton genleşmesini azalttığını göstermektedir. Mekanizmanın bütün detayları tam olarak açıklanamamış olmakla birlikte mineral katkı maddelerinin ihtiva ettiği reaktif silikanın, agreganın içerdiği silikadan daha çabuk OH^- iyonlarıyla tepkidiğinde uzlaşmaktadır (Schumann, 1988). Bazı mineral katkı maddeleri gözenek solüsyonundaki alkalileri tüketerek pH seviyesini düşürür ve sonuçta ASR olasılığı azalır. Ancak bazı mineral katkı maddeleri ise zararlı seviyede alkali içeriğine sahip olabilir. Bu durum, reaksiyona hassas agrega ve çimento kullanımıyla birleşirse, kullanılan mineral katkı maddesi reaksiyonun şiddetini körükleyecektir.

2.5.2. Çiçeklenme (Efflorescence)

Çiçeklenme, çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksitin veya beton içerisinde bulunan diğer tuzların zamanla sertleşmiş beton yüzeyine çıkarak oluşturduğu beyaz lekelerdir. Portland çimentosunun hidratasyon prosesinden reaksiyon yan ürünü olan çözünebilir $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in (serbest kireç), beton içerisinde hareket halindeki suyla yüzeye taşınarak çiçeklenme oluşur. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ atmosfere maruz kaldığında, karbondioksit ile tepkir. Geride beyaz lekeler olarak açığa çıkan kalsiyum karbonat (CaCO_3) tortuları kalır.

Sıklıkla çiçeklenme, beton yapıların estetik çekiciliğini azalttığını göstermiştir. Çiçeklenme en fazla duvar ve prekast beton elemanlarında yaygınlık gösterir, sıkıntı oluşturur. Çiçeklenme, duvar ve prekast tasarım esnekliğini sınırlandıran, kalıcı bir problemdir.

Birincil ve ikincil olmak üzere çiçeklenmenin tanımlanan iki şekli bulunmaktadır: (Basheer vd., 2001; Largent, 1978).

-Birincil çiçeklenme kür süreci esnasında oluşur. Beton veya çimentolu bileşiğin su sızdırmasından nihayet yüzeydeki buharlaşmaya kadar fazla suyun ortamı terk etmesinin arkasından, Ca(OH)_2 kristalleri tortulaşır. Ca(OH)_2 atmosferdeki CO_2 'e maruz kaldığında yüzey gözeneklerinde CaCO_3 oluşur.

-İkincil çiçeklenme rutubet/ıslanma - kuruma döngüsüne maruz kalan kürlenmiş beton veya çimentolu bileşiklerde oluşur. Rutubet içeriye nüfuz eder ve portland çimentosunun normal bir yan ürünü olarak genelde çözülebilir Ca(OH)_2 veya ortamdaki diğer tuzlar eriyerek çözeltide zenginleşir. Rutubet sonrası kuruma etkisiyle çözelti, bünyesindeki çözülmüş tuzla yüzeye (atmosfere) göç eder. Buharlaşma sonunda ortamda Ca(OH)_2 ' in arttığı olan CaCO_3 kalır.

Çiçeklenme özellikle renkli, beton ve diğer bazı yapı malzemelerinde estetik açıdan renk kalitesini bozmakla beraber, betonun dayanım gibi performans özelliklerine fazla bir etkisi bulunmamaktadır. Estetik açıdan önemli bu tür yapılarda görünümü bozan çiçeklenmenin önlenmesi için mineral katkıların kullanımına ek olarak şu önlemler de alınmalıdır:

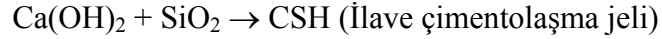
- Beton üretiminde su/çimento oranı düşük tutulmalı, betonun yerleştirilmesine özen gösterilmelidir,
- Kullanılan çimento, kür suyu ve agregaların bileşiminde muhtelif tuzların bulunmamasına dikkat edilmelidir,
- Karışım kür suyu olarak deniz suyu kullanılmamalıdır.

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan yüksek silika içerikli mineral katkıları, serbest Ca(OH)_2 ile tepkiyerek stabil, çözünmez, ilave dayanım sağlayan bileşikler oluştururlar. Mineral katkı maddeleri bir çimento hidratasyon yan ürünü olan Ca(OH)_2 (veya CH) ile tepkidiğinde, meydana gelen puzolanik reaksiyon sonucunda yeni çimentolu bileşikler (CSH) oluşur. Bu yeni bileşikler sistemde yer alan çözünebilir Ca(OH)_2 'i bağlayarak çimentolaşma dayanımına katkıda bulunur ve beton durabilite özelliklerini geliştirirler.

Çimento Hidratasyon Prosesi:



Puzolanik Reaksiyon Prosesi:



2.6. Hafif Agregalar, Hafif Beton ve Pomzadan Mamul Hafif Yapı Elemanlarının Tanımı, Sınıflandırılması ve Teknolojik Özellikleri

2.6.1. Hafif Agregalar

Hafif agregalar (beton için) su, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılarak hafif beton imalinde kullanılan, gevşek birim hacim ağırlığı 1200 kg/m³'ü aşmayan, kırılmış veya tüvenan, gözenekli, inorganik agregalardır (TS 1114, 1986). Genel olarak oluşum şekillerine göre iki kategori altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar:

- I. Doğal hafif agregalar ve
- II. Yapay hafif agregalardır.

Doğal hafif agregalar oluşumları esnasında gözenekli bir yapı kazanmış pomza, volkanik cüruf, diyatomit, tuf vb. kırılmış veya kırılmamış agregalardır. Volkanik kökenli hafif kayaçların süngerimsi hücre yapısı, erimiş kayaçların içerisinde bulunan gazlardan kaynaklanmaktadır. Pomza, erimiş volkanik malzemenin ani soğuması sonucu oluşmaktadır. Buna bağlı olarak, kuru haldeki yığın yoğunluğu 500-900 kg/m³ arasında değişmekte ve dolayısıyla su üzerinde yüzebilme özelliği göstermektedir. Bu malzemenin en yoğun şekilde bulunduğu ülkelerin başında Türkiye, Yunanistan ve İtalya gelmektedir (Gündüz, 1998). Pomza ağırlıklı olarak inşaat endüstrisinde kırma, eleme ve sınıflandırma işlemine tabi tutulduktan sonra değerlendirilir.

Puzolanlar ise, yavaş soğuyan volkanik mağmanın kristallenmesi sonucunda oluşmaktadır (scoria, köpük lavı, volkanik cüruf). Malzemenin hücre yapısı orta irilikte düzensiz boşluklar (gözenekler) içerir ve cürufsu bir karakteristiği vardır. Puzolanlar, renk itibarıyla, kırmızı-kahverengiden siyaha kadar bir değişim aralığı

gösterirler. Ağırlıklı olarak alüminyum silikatlı bir kayaçlar olup, Avrupa'nın muhtelif ülkelerinde yaygın olarak bulunmaktadır (Avusturya, Fransa, Almanya, İtalya vb.)(Gündüz, 1998). Bunlar da açık ocak işletmeciliği sonucunda elde edilirler ve aynı şekilde kırma, eleme, sınıflandırma işlemine tabi tutulurlar.

Yapay hafif agregalar ise yüksek fırın cürufu, kalsine edilmiş kil, uçucu kül, kuvarsit, perlit, obsidiyen, vermikülit, şist, arduvaz vb. inorganik elemanlardan genellikle ısıtma, gaz veya köpük oluşturma yoluyla gözenekleştirilerek elde edilen kırılmış veya kırılmamış agregalardır (TS 1114, 1986).

Klinker cürufu, kömürün evsel veya endüstriyel yakma sistemlerinde yandıktan sonra elde edilmiş halidir. Bu malzeme, bir dizi kırma ve eleme işleminden sonra, bazen hafif agrega olarak kullanılmaktadır. Agregalar çoğunlukla, sinterlenmiş veya cüruf görünümünde, sert ve koyu bir renge sahiptir. Bunlar, aşırı yanmış kireç, magnezyum, sülfat ve sülfat gibi zararlı bileşenler içermemelidir. Malzemenin yüksek oranda bir homojeniteye sahip olması için, bazı fiziksel ve kimyasal işlemlere tabi tutulması gerekmektedir. Bu yüzden bu tip agregalar, hafif beton yapımında oldukça kısıtlı bir kullanım alanı bulabilmektedirler.

Yüksek fırın cürufu, pik demirin yüksek fırında üretiminden sonra elde edilen bir yan üründür. Cürufun 1400-1500 °C'deki erimiş pozisyonunda, yüksek fırın atığı, hafif agrega haline dönüşür. Yüksek fırın cürufu, kaba bir yüzey dokusuna sahip, gözenekli ve bal peteği şeklinde, az veya çok koyu gri bir renge sahiptir. Malzemenin kuru yoğunluğu 600-900 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu ürün, besleme malzemesinde ayrıca bir ısıtma zorunluluğu bulunmamasından dolayı oldukça ekonomiktir. Bu yolla elde edilen agrega halindeki üründe, oldukça kararlı bir yapıya sahiptir (Sabir vd.,2001).

Sinterlenmiş ve pulverize edilmiş yakıt külü (PFA), pulverize kömürün termal güç istasyonlarında yakıt olarak yakılmasından sonra elde edilen bir artıktır. PFA tozu, dönen bir kap içerisinde su ile birlikte pelletlenir. Elde edilen pelletler, 1200-1300 °C arasında yatay ızgaralar içerisinde yakılır. Daha sonra bunlar soğutulur.

elenir ve farklı tane boyu fraksiyonlarında depolanır. Kuru yığın yoğunluğu, pelletlerin tane boyuna bağlı olarak $650-850 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. PFA, Almanya ve İngiltere’de halen hafif agrega üretiminde kullanılmaktadır (Anonim, 2000).

Genleştirilmiş kil, şeyl veya arduvaz da, dünyada hafif agrega amaçlı olarak yaygın biçimde kullanılan suni agrega türlerindedir. Üretim prensibi 1918’den beri bilinmekle birlikte, endüstriyel üretimi 1928 yılında başlamıştır. Üretim prosesi, tesisin özelliğine göre değişim göstermektedir. Kuru prosesinde öncelikle kil, çok ince toz boyutuna indirgenerek kuru partiküller elde edilir. Bu çok ince boyutlu toz, 2-4 metre çapında sabit hızda dönen düz tabanlı bir kap içerisinde su ilavesi ile pelletlenir. Elde edilen pelletler, merkezkaç kuvveti etkisiyle yüksek derecede sıkışmış ve kompaktlaşmış durumdadır. Sulu prosesinde ise ocaktan gelen kil, homojenize edilerek kırılır ve öğütme değirmenlerine aktarılır. Daha sonra su ve genleştirici katkıları ilave edilerek elde edilen ince ve plastik malzeme, sızdırma (extrusion) prosesi içerisinde delikli levhalar içerisinde geçirilir. Kullanılan deliklerin çapı, elde edilmek istenen agrega çapına göre belirlenir. Daha sonra deliklerden geçirilerek sızdırılmış macun durumundaki kil, istenilen uzunluklarda kesilir. Elde edilen silindirik pelletler, ilk önce döner fırınlarda kurutularak yuvarlak şekil kazandırılır. Daha sonra, yine aynı fırınlar içerisinde yakma işlemi uygulanır. Yakma sıcaklığı, $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında gerçekleştirilir. Döner fırın çıkışından genellikle saatte 10-50 ton arasında malzeme elde edilir. Daha sonra elde edilen agregalar elenir ve farklı tane boyu fraksiyonlarına ayrılır. Agregalar, kahverengiden kırmızıya doğru bir renk aralığına sahiptirler. Farklı tane boyu fraksiyonlarına göre yığın yoğunlukları $350-750 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir (Anonim1, 2000).

Perlit, % 70’den fazla SiO_2 içeren volkanik, alüminyum silikatlı kayalardan (riyolitik) gelmektedir. Kayaç, kum şeklinde kırılır ve daha sonra $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ’lik hızlı bir ısıtma işleminin ardından hafif agrega olarak elde edilir. Burada sağlanan genişleme, kayacın içerdiği bünye suyu sayesinde gerçekleşmektedir. Elde edilen malzeme, griden beyaza doğru değişen renk aralığında ve küresel şekillidir. Katı, küresel taneciklerin tane boyu, 0.1-3 mm arasında değişmekte olup, yığın yoğunluğu ise $50-100 \text{ kg/m}^3$ civarındadır. Perlit çoğunlukla, İtalya, Yunanistan, Macaristan,

İspanya, Fransa, Almanya, Belçika, Hollanda ve Türkiye’de yaygın şekilde bulunmaktadır. Perlitin endüstriyel üretimine 1946 yılında başlanmıştır.

Vermikülit, silis, magnezyum, demir ve alüminyum gibi hidrate olmuş bileşenler içeren, yapraksı yapıya sahip doğal bir malzemedir. Bu küçük ve ince levha plakalar, malzeme 900 °C’lik bir sıcaklığa tabi tutulduğunda, birbirinden ayrılarak bir mikroakordiyon yapısı gösterir. Vermikülit agregalarının eşdeğer çapları 0,1-10 mm arasında değişirken, yığın yoğunluğu 70-130 kg/m³ civarındadır. Vermikülit, perlite benzer şekilde gevrek ve kırılğan bir yapıya sahiptir. Endüstriyel üretimi 1915’te başlamıştır ve şu an Avrupa’daki üretimi oldukça sınırlı durumdadır (Anonim2, 2000).

Suni hafif agregalar grubunda yer alan genişmiş polistren de dünya inşaat endüstrisinde önemli bir kullanım potansiyeline sahiptir. İlk üretimi 1967 yılında Almanya’da başlamıştır (Eriç, 1994).

Bir başka suni hafif agrega cüruf pelletidir. Bu prosesin orijini Kanada’dır. Cüruf pelletleri, yüksek fırınlardan elde edilen artık durumundaki ergimiş cürufun, farklı su enjeksiyonları vasıtasıyla, döner fırınlarda mekanik dispersiyon (ayırım)’a tabi tutulması sonucunda elde edilir. Ergimiş cüruf, hava içerisine fırlatılır. Su enjeksiyonu, içsel genişmeyi sağlayan su buharının oluşumuna bir etkendir. Bu işlemi takiben oluşan pelletler, hava içerisinde hızlı bir şekilde soğuyarak, camsı (vitrös) dış kabuk oluşumu sağlanır. Tane boyutlarına göre yığın yoğunlukları 650-1000 kg/m³ arasında değişir. Cüruf pelletlerinin 48 saat sonraki su emme oranı hacimce % 4, erime sıcaklığı ise 1250 °C civarındadır (Anonim2, 2000).

Sinterlenmiş cam agrega ile ilgili, Kuzey Fransa’da bir pilot tesis birkaç yıldan beri üretim faaliyetlerinde bulunmaktadır. Bu tesisin kapasitesi, 5 ton/gün civarındadır. Bu pilot tesiste, bu yeni agrega türünün beton yapım özellikleri, sıva özellikleri, bitümlü ürünler ve reçineli ürünler eldesi üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Kullanılan hammadde, atık cam şişelerden elde edilmektedir. Atık şişeler kırılarak, döner değirmenler içerisinde kapalı devre öğütmeye tabi tutulur ve 3600 cm²/g

inceliğinde öğütülür. Öğütme işleminden önce, pahalı bir katkı olarak ağırlıkça % 2,5 oranında CaCO₃ ilave edilir. Elde edilen toz, iyi derecede homojenize edilerek, suyla birlikte döner kaplar içerisinde pelletlenir. Döner kabın hızına ve eğimine göre farklı çapta ürünler elde etmek mümkündür. Tane boyutlarına göre yığın yoğunlukları 130-160 kg/m³ arasında değişir. Oluşan agregalar beyaz renkte, iyi derecede yuvarlanmış ve kapalı gözenek yapısına sahiptir. Su emmesi, 24 saatlik bir süreç sonunda % 5 gibi düşük bir değere sahiptir. 20 mm çapındaki bir agreganın basınç dayanımı ortalama 2 MPa civarındadır (Lo ve Cui, 2004).

Doğal ve yapay hafif agregalar başta hafif beton olmak üzere, hafif duvar-döşeme yapı elemanları, prefabrik elemanlar, ısı ve ses izolasyon sıvası, harç ve kent mobilyaları üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

İdeal bir hafif agrega, sert ve kapalı dış yapısıyla küresel, ayrıca tanelerin iç yapıları itibarıyla, yüksek gözeneklilik derecesine sahip ve çimento ile bağlanma özelliği yüksek olmalıdır. Agregaların ağırlıkları ve su emme dereceleri arttırılmaksızın basınç dayanımlarının iyileştirilmesine yönelik araştırmalar halen devam etmektedir.

2.6.2. Hafif Beton

Kum ve çakıl agregalı normal betonların kuru birim hacim ağırlıkları 2200-2400 kg/m³ civarındadır. Betondan imal edilen elemanların birim ağırlıklarının fazla olması istenilmeyen bir durumdur. Beton yapımında hafif agregalar kullanılması durumunda betonun birim hacim ağırlığı azaltılabilmektedir. Günümüzde, betonarme yapıyı oluşturan taşıyıcı, yarı taşıyıcı ve daha sıklıkla taşıyıcı olmayan elemanların kendi öz ağırlıkları azaltılma yoluna gidilmekte ve hafif agregalı betonların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Kuru birim hacim ağırlığı 2200 kg/m³'den düşük olan betonlar, hafif beton olarak adlandırılmaktadır. Ancak kullanım amacına ve işlevine göre taşıyıcı, yarı taşıyıcı, taşıyıcı olmayan ve yalıtım betonları gibi farklı alt kategorilere ayrılmaktadır.

Yalıtım betonları en düşük birim hacim ağırlığına sahip olan betonlardır. Genelde 400 kg/m³ değerinden daha düşük birim ağırlığa sahip bu grup betonlar, yapıda ısı ve ses izolasyonunu sağlamak amacıyla kullanılırlar. 400-1000 kg/m³ arasında değişen birim hacim ağırlığına sahip betonlar ise genelde taşıyıcı olmayan (statik olarak çalışmayan) duvar ve döşeme dolgu elemanları üretiminde kullanılırlar. Yarı taşıyıcı betonların üst birim hacim ağırlığı sınırı 1600 kg/m³ civarındadır (TS 2511; TS 3234). Bu grup betonlar da yapı içerisinde statik olarak çalışabilen yarı taşıyıcı duvar-döşeme elemanları, kapı-pencere lentoları, dekoratif kent mobilyaları gibi donatı içeren betonarme elemanların üretiminde kullanılmaktadır. Son yıllarda hafif betonların kullanım alanlarına taşıyıcı beton elemanları da girmiştir. Yapı içerisinde kolon, kiriş, döşeme, panel gibi taşıyıcı elemanların imalatında kullanılan hafif betonların birim hacim ağırlığı, arzu edilen dayanım özelliklerine göre 1600-1900 kg/m³ arasında değişkenlik göstermektedir (TS 2511).

Yaşam ve iş mekanlarında geleneksel beton yerine hafif beton kullanımı, ısıtma/soğutmaya yönelik enerji kullanımında önemli avantajlar sağlamakta, ayrıca ses izolasyonu açısından daha olumlu sonuçlar sunabilmektedir. Hafif beton toplam statik yükünün azaltılmasına olanak vermekte dolayısıyla daha güvenilir ve ekonomik yapıların projelendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Tüm bu avantajları nedeniyle, günümüzde kimyasal ve mineral katkı maddeleri de kullanılarak, doğal/yapay agregalarla yüksek performanslı hafif beton üretimine yönelik araştırmalar büyük ivme kazanmıştır.

2.6.3. Pomzadan Mamul Hafif Yapı Elemanlarının Tanımı, Sınıflandırılması ve Teknolojik Özellikleri

Geleneksel yapı malzemelerine (kum, çakıl, tuğla, kiremit gibi pişmiş kil ürünleri) göre hafif agregalardan üretilen yapı malzemelerinin dünya ve ülkemiz inşaat endüstrisindeki payı, yüksek ısı-ses izolasyon özellikleri, düşük birim hacim ağırlıkları, yapı teknolojisi ve maliyeti açısından sağladıkları diğer avantajları ile ekonomik oluşları nedeniyle giderek artış göstermektedir.

Ülkemiz inşaat endüstrisinde kullanılan en yaygın hafif yapı elemanları duvar ve döşeme elemanlarıdır. Pomza (bims), volkanik cüruf (bazaltik pomza), gaz beton ve göreceli daha az miktarda perlitten imal edilen hafif yapı elemanları, genel olarak karkas yapılarda çoğunlukla taşıyıcı olmayan ve statik çalışmaya katılmayan, iç-dış duvar dolgu ve döşeme elemanı olarak önemli miktarda tüketilmektedir.

Zengin pomza ve volkanik cüruf rezervlerine sahip ülkemizde, doğal hafif agregalardan yapı malzemesi üretimi hızla artmaktadır. Son on yılda pomzaya dayalı hafif yapı elemanı üretim kapasitesi yaklaşık 10 kat artış gösterirken, bu alanda mevcut standartlara göre uygun teknolojiye sahip üretim tesisi sayısı 7'ye ulaşmıştır (DPT, 2001).

Ülkemizde pomza ve volkanik cürufa dayalı hafif yapı elemanları TS 2823 "Bimsbetondan mamul yapı elemanları" standardına göre üretilmektedir. Standart da bimsbetondan mamul yapı elemanları, "pomza agregalarının çimento ve su ilavesiyle basınç altında vibrasyonla sıkıştırılıp kür edilen ve gerektiğinde kuvars kumu da ilave edilerek üretilen yapı elemanları olarak" tanımlanmaktadır (TS 2823). Bu standarda uygun olarak imal edilen ürünler yaygın olarak bimsblok olarak adlandırılmaktadır.

TS 2823 normlarına uygun yapı elemanları donatılı ve donatısız yapı elemanları olmak üzere iki, birim hacim ağırlık değerlerine göre; 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400 ve 1600 kg/m³ olmak üzere sekiz gruba ayrılır.

Donatılı yapı elemanları;

- Kapı ve pencere lentoları (L),
- Döşeme plakları (DP),
- Çatı plakları (ÇP),
- Düşey duvar elemanları (DD) ve
- Yatay duvar elemanları(YD)dır.

Donatısız elemanlar ise;

- Duvar blokları (DB),

- Asmolen bloklar (AB) ve
- Yalıtım plakları (YP)dır.

İlave olarak donatısız duvar elemanları;

- Boşluklu duvar blokları (BDB),
- Dolu duvar blokları (DDB) ve
- Özel yarıklı duvar blokları (SW) olmak üzere üç alt gruba,

Donatısız döşeme elemanları ise;

- Statik çalışmaya katılan (KAB) ve
- Statik çalışmaya katılmayan (AB) olmak üzere iki alt gruba ayrılır.

Ülkemizde yürürlükte olan mevcut standartlara göre donatılı ve donatısız duvar ve döşeme elemanları ile yalıtım plaklarında istenilen teknolojik özellikler Çizelge 2.15’de verilmiştir.

Çizelge 2.15. Pomzadan mamul yapı elemanlarının uygunluk kriterleri (TS 2823)

Hafif Yapı Elemanı Tipi			Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Kesme Yüğü (N)	Emniyet Katsayısı	Rötre (mm/m)
Duvar Blokları	Donatılı	BDB	600-1000	5	-	1,9	≤ 0,5
		DDB	800-1600	5	-	1,9	≤ 0,5
		SW	600-800	5	-	1,9	≤ 0,5
	Donatısız	BDB	600-1000	2,5	-	-	≤ 0,5
		DDB	800-1600	2,5	-	-	≤ 0,5
		SW	600-800	2,5	-	-	≤ 0,5
Döşeme Elemanları	Statik Çalışan	KAB	≤1600	20	≥ 2000	-	≤ 0,5
	Statik Çalışmayan	AB	≤ 1000	2	≥ 2000	-	≤ 0,5
Yalıtım Plakları		YP	≤ 700	25	-	-	≤ 0,5
Kapı, Pencere Lentoları		L	≤1600	150	-	2,0	≤ 0,5

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez kapsamında materyal olarak kullanılan malzeme amorf silika kayacıdır. Araştırma, arazi, laboratuvar ve analiz çalışmaları olmak üzere başlıca 3 aşamada yürütülmüştür. Bu bölümde Keçiborlu yöresi amorf silika oluşumlarını kapsayan saha, kayaç ve kayaçtan elde edilen ürün, laboratuvar çalışmalarında kullanılan diğer yardımcı malzemeler ve ekipmanlar özetle tanımlanmıştır.

3.1.1. Arazi Çalışmaları

Isparta ili Keçiborlu ilçesi civarında yeralan amorf silika oluşumlarını kapsayan saha çalışmalarına Eylül 2002 yılında başlanmış, 2003 yılında bahar, yaz ve güz dönemlerinde aralıklarla devam edilmiştir. Amorf silika lokal alanının jeolojisini aydınlatmak amacıyla, saha çalışmaları yapılarak (önceki çalışmalar da dikkate alınarak) 1/25.000 ölçekli saha jeoloji haritası (kısmen Etibank'tan değiştirilerek) ve Kumludere-Değirmenderesi oluşumlarını içeren jeoloji kesiti hazırlanmıştır. Ayrıca, bölgedeki bindirme zonu içerisinde yeralan amorf silika oluşumlarının ekonomiklik arzedeabilecek kısımlarında görünür, muhtemel ve mümkün rezerv tespitlerine yönelik ölçüm mostra kalınlığı, boyu ve genişliği ölçüm çalışmaları yürütülmüştür.

Arazi çalışmaları esnasında Kumludere, Değirmenderesi (I. lokasyon) ve İrepdere mevkiinden (II. lokasyon), kayaç fiziksel, kimyasal, mineralojik ve petrografik analizler için 45 adet kayaç el numunesi; ilave olarak agrega, mineral katkı maddesi ve hafif beton deneyleri için I. ve II. lokasyondan ~1000'er kg ve numune kümesi alınmıştır.

Ayrıca geleneksel beton numunelerini üretmek için Isparta Belediyesi Yol Yapım ve Asfalt Şantiyesine ait mıcır kırma eleme tesisinden 1/2"-3/8" (~750 kg), 3/8"-No4 (~750 kg) ve <No 4 (~1500 kg) tane boyutu gruplarında (Diyadin taş ocağı) kireçtaşı

agregası, ilave olarak harç çubukları eldesinde kullanılmak üzere Oktaş A.Ş.'ne ait Gediz çayı kum çakıl ocağından reaktifliği bilinen < No 4 tane boyutuna haiz dere kumu (~30 kg) temin edilmiştir.

3.1.2. Laboratuvar Çalışmaları

Kayaç el ve yığın numuneleri ile ürünler üzerinde gerekli inceleme, analiz ve deneylerin yürütülmesinde kullanılan ekipman ve malzemeler bölüm 3.1.2.1. ve 3.1.2.2'de belirtilmiştir.

3.1.2.1. Hammadde Fiziksel, Kimyasal, Mineralojik ve Petrografik İncelemeleri

Kayaç ve agrega fiziksel, kimyasal, mineralojik ve petrografik incelemelerinde Çizelge 3.1'de belirtilen ekipman ve malzemeler kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Amorf silika kayaç ve agrega analizlerinde kullanılan ekipman ve teçhizatlar

Numune Türü	Analiz	Ekipman-Malzeme
Kayaç	Kimyasal bileşenler	MTA, Kalekim, Silvers&Barites Ore Mining ve ACME analiz laboratuvarlarında yaptırılmıştır.
	X-Ray difraksiyonu	Silvers&Barites Ore Mining (X-ray difraktogramı) Laboratuvarında yaptırılmıştır.
	İnce kesit	Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde yaptırılmıştır (Cevher mikroskobu).
	SEM fotoğrafları	TÇMB Lab. yaptırılmıştır (Leo 435 Tarama Elektron Mikroskobu).
Agrega	Numune alma	Bölgeç.
	Granülometrik özellikler	Kare delikli elek seti (32,16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.063 mm) ve sarsma cihazı
	Birim hacim ağırlık	Standart ölçü kapları, 25 kg'lık ve 2650 gr'lık mekanik teraziler, muhtelif hacimde cam beher, şişleme çubuğu, etüv, desikatör, vakum cihazı, piknometre.
	Doymun yüzey birim hacim ağırlık	
	Görünür birim hacim ağırlık	
	Özgül ağırlık	
	Su emme miktarı	1200 °C Yüksek fırın, seramik kruze, desikatör, maşa, 0.01 gr hasasiyetli elektronik terzi.
	Porozite, kompozite ve doyma derecesi	
Kızdırma kaybı	Cam ölçü silindiri, 8 mm kare gözlü elek, sarsma cihazı, NaOH, saf su.	
Organik madde içeriği		

3.1.2.2. Ürün Teknolojik İncelemeleri

Mineral katkı maddesi, geleneksel (amorf silika katkılı) beton ve hafif beton (amorf silika agregalı blok) numuneleri incelemelerinde Çizelge 3.2’de belirtilen ekipman ve malzemeler kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Ürün analizlerinde kullanılan ekipman ve teçhizatlar

Numune Türü	Analiz	Ekipman-Malzeme
Mineral Katkı Maddesi	Mikronize amorf silikanın hazırlanması	Laboratuvar tipi bilyalı değirmen.
	Kuru birim hacim ağırlığı	Standart ölçü kabı, 2650 gr’lık 0,1 gr hassasiyetli mekanik terazi, etüv.
	Partikül boyut analizi	Başer Madencilik A.Ş. laboratuvarında yaptırılmıştır.
	Puzolanik aktivite ve özgül yüzey alanı	Göлтаş A.Ş. Kalite kontrol laboratuvarında yaptırılmıştır.
Geleneksel (Amorf Silika Katkılı) Beton Numuneleri	Kontrol ve katkılı beton numunelerinin hazırlanması	20 adet (φ)150mmx300 mm silindirik numune kabı, 100x100x100 mm 10 adet küp numune kalıbı, 60 lt.lik mikser, 25 kg’lık mekanik terazi, 2650 gr lık 0,1 gr hassasiyetinde mekanik terazi, muhtelif hacimde cam beher, 0-4 mm/4-8mm/8-16 mm kalker agregası, vibratör masası, etüv, kükürt başlıklama seti, kür havuzu, slump seti, mala, PÇ 42.5 portland çimentosu, mikronize amorf silika süper akışkanlaştırıcı, kalıp yağı.
	Numune birim hacim ağırlığı	0.1mm hassasiyetli kumpas, 2650 gr’lık 0,1 gr hassasiyetli mekanik terazi, etüv.
	Numune su emme miktarı	2650 gr’lık 0,1 gr hassasiyetli mekanik terazi, su banyosu, etüv.
	Numune basınç dayanımı	ELE marka 200 tonluk elektronik test presi.
	Numune aşınma direnci	Böhme cihazı, 0.1mm hassasiyetli kumpas, silisyum karbür aşındırıcı.
	Harç çubuklarının hazırlanması	25mmx25mmx279mm 5 adet çelik kalıp, 5 lt’lik mikser, No 4,8,16,30,50 ve 100 elek seti, mala, sıkıştırma tokmağı, 500 ml’lik cam beher, reaktif dere agregası, kırmataş agregası, PÇ 42.5 portland çimentosu, mikronize amorf silika, kalıp ayırıcı.
	Alkali agrega reaksiyonuna direnç	NaOH, saf su, 5 adet termoplast kap, 80 ± 2 °C hassasiyetli etüv, nem ölçer, polietilen örtü, 0,01 mm hassasiyetli boy ölçüm düzeneğı, teflon kalibrasyon çubuğı.
	Kontrol ve katkılı beton numunelerinin hazırlanması	5 lt’lik mikser, 0,1 gr hassasiyetli 2560 gr’lık terazi, 100 adet 50 mm x (φ) 45 mm silindirik numune kabı, 500 ml’ lik cam beher, 3/8” ve No 4 kırmataş agregası, PÇ 42.5 portland çimentosu, mikronize amorf silika, süper akışkanlaştırıcı, mala, kalıp yağı.
	Muhtelif kimyasal maddelere karşı direnç	756 adet plastik kap, yeterli miktarda Na ₂ SO ₄ , MgSO ₄ , HCl ve H ₂ SO ₄ , etüv, 0,1 gr hassasiyetli elektronik terazi
	Hafif Beton (Blok) Numuneleri	Amorf Silika agregalı blokların hazırlanması

Çizelge 3.2. (devam)

Hafif Beton (Blok) Numuneleri	Blok birim hacim ağırlığı	0,1 mm hassasiyetli kumpas, 25 kg'lık mekanik terazi, etüv.
	Blok ısı ve ses yalıtım özellikleri	Hot-box cihazı, 1 dB hassasiyetli ses ölçüm düzeneği, akustik ses ölçüm odası
	Blok rötresi	Rötre cihazı, termostatlı kür havuzu.
	Blok basınç dayanımı	200 tonluk bilgisayar kontrollü elektronik test presi.

3.2. Yöntem

3.2.1. Arazi Çalışmaları ve Numune Alımında Kullanılan Yöntemler

Bölgedeki (mikronize silika ve hafif agrega olarak değerlendirilebilir) ekonomik amorf silika varlığını belirlemek üzere, Kumludere, Değirmenderesi, Asartep ve İrepdere mevkieğinde GPS (konum belirleme) cihazı ile koordinat ölçümleri yapılmıştır.

Kumludere mevkiindeki amorf silika yatağının üst örtü tabakası tamamen sıyrılmış durumdadır. Bununla birlikte yatağın kalınlığı da kuzey-kuzeybatı yönündeki ocak aynasından takip edilebilmektedir. Adese şeklindeki yatağın sınır koordinatları belirlenerek Gauss yöntemine göre alan hesabı yapılmış (S_K) ve ortalama kalınlıkla (h_K) çarpılarak adese hacmi (V_K) hesaplanmıştır. El örneklerin fiziksel analizlerinden elde edilen ortalama (yerinde) kayaç yoğunluğu (d_K) tespit edilerek Kumludere mevkiindeki amorf silika kayacı görünür rezervi tespit edilmiştir.

Bölgedeki aynı bindirme zonu içerisinde yeralan Değirmenderesi amorf silika yatağı da K-G doğrultusu boyunca hemen hemen düzgün bir hat boyunca takip edilebilmektedir. Arazide Değirmenderesi amorf silika yatağının 2 boyutu (boyu ve kalınlığı) gözlemlenebilmekte ancak formasyon üst örtüsü nedeniyle genişlik açık bir şekilde izlenememektedir. Genişliğin açık bir şekilde izlenemediği alanlarda 0.3 -1 m derinlikte çukur açılarak, kayaca ulaşılan noktaların koordinatları olası yayılım sınırı (genişlik) olarak kabul edilmiştir. Olası genişlik ve gerçek mostra boyu koordinatları kullanılarak Gauss yöntemiyle alan hesaplanmış (S_D) ve hesap edilen alan ortalama

kalınlık değeri (h_D) ile çarpılarak Değirmenderesi yatağının ortalama muhtemel hacmi (V_D) belirlenmiştir. El örneklerin fiziksel analizlerinden elde edilen ortalama (yerinde) kayaç yoğunluğu (d_D) tespit edilerek Değirmenderesi mevkiindeki amorf silika kayacı muhtemel rezervi hesaplanmıştır.

Kumludere ve Değirmenderesi kayaçlarına oldukça yakın fiziksel ve kimyasal özellikler gösteren bir başka amorf silika oluşumu da Asartepe mevkiinde belirlenmiştir. Aynı bindirme zonu içerisinde Değirmenderesi ve Kumludere mevkiileri arasında konumlanan Asartepe mevkiinde de kayaç pek çok yerde yüzeylenmiştir. Ancak arazinin herhangi bir bölgesinde ayna, çukur veya yarma bulunmaması nedeniyle kalınlık ile ilgili açık bir gözlemsel veriye ulaşamamıştır. Asartepe mevkiinin Değirmenderesi'ne oldukça yakın olması nedeniyle, ortalama kalınlık olarak h_D kullanılmıştır. Asartepe civarında yüzeyde gözlemlenen düşey doğrultuda (0.2-0.4 m kazılabilen derinlikte) devamlılık gösteren noktaların koordinatları belirlenerek, Gauss yöntemine göre alan hesabı (S_A) yapılmış ve öngörülen kalınlık (h_D) ile çarpılarak mümkün hacim (V_A) hesaplanmıştır. Asartepe amorf silika oluşumlarının sadece yüzeysel olarak sınırlandırılabilmesi nedeniyle mümkün rezerv kategorisinde ele alınmıştır. El örneklerinin fiziksel analizlerinden elde edilen ortalama (yerinde) kayaç yoğunluğu (d_A) tespit edilerek, Asartepe mevkiindeki amorf silika kayacı mümkün rezervi hesaplanmıştır.

İrepdere amorf silika oluşumları kayaç fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından Kumludere, Değirmenderesi ve Asartepe amorf silikalarından önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir. Konum olarak Irepdere oluşumları hem diğer üç mevkiden daha uzak olup, aynı bindirme zonunun güney kanadında yer almaktadır. Arazide Irepdere amorf silika kayacı geniş bir alanda yüzeylenmekte ve düşey doğrultudaki devamlılığı sıkça dere yataklarında izlenebilmektedir. Formasyonun üzerinde üst örtü tabakası yok denecek kadar az (0 – 0.3 m) ve genelde aşınmış olması nedeniyle, kayacın yayılımı koordinatlandırılarak, yine Gauss yöntemine göre alan hesabı yapılmıştır. Dere yataklarında gözlemlenen gerçek kalınlıkların aritmetik ortalamaları alınarak Irepdere mevkiindeki amorf silika kayacının görünür hacmi (V_I) belirlenmiş, el örneklerinin fiziksel analizlerinden elde edilen ortalama (yerinde)

kayaç yoğunluğu (d_i) tespit edilerek, görünür rezerv ($V_i * d_i$) hesaplanmıştır. Bölgedeki oluşumlar fiziksel ve kimyasal özelliklerin benzeşmesi veya farklılığına göre mineral katkı maddesi olarak kullanıma yatkın rezervler (Kumludere, Değirmenderesi, Asartepe mevkileri; I. lokasyon) ve hafif agrega olarak değerlendirilebilir rezerv (İrepdere mevkii; II. lokasyon) olarak kategorize edilmiştir.

Kimyasal analiz, ince kesit, mineralojik ve petrografik analiz için, kayacın oksidasyona uğramamış kısımlarından serbest numune alma yöntemine göre I. ve II. lokasyon amorf silika formasyonlarını temsilen el numuneleri alınmıştır. Ayrıca her iki lokasyona ait amorf silika kayaçlarından, üst örtü ve 0.2-0.3 m derinlikteki muhtemelen okside olmuş kısımlar sıyrılarak daha alt seviyelerdeki kayaçlar kazılmak suretiyle numune kümeleri alınmıştır. Bölgeden alınan numune kümeleri ISBAŞ A.Ş. kırma eleme tesisine nakledilmiş ve her iki lokasyona ait numune kümeleri darbeli kırıcıda -16 mm tane boyutuna kırılmıştır.

I. lokasyon numune kümesi (~500 kg), mikronize amorf silika üretmek üzere tekrar – 3 mm tane boyutuna kırılarak, numune ayırıcıda (bölgeç) 4 eşit kısma ayrılmak suretiyle yaklaşık 125 kg'lık (karşılıklı) iki temsili numune kümesi elde edilmiştir. Bu numune kümelerinden birisi 50 lt hacimli etüvde % 100 kuru ağırlığa ulaşıncaya kadar 105°C'de kurutulmuş, bilyalı değirmende 3 kg'lık partiler halinde, sabit süre sarj ve devirde öğütülerek nem korumalı plastik kaplara depo edilmiştir. Mikronize amorf silikanın 3 kg'lık bir kısmı özgül yüzey analizi ve puzolanik aktivite analizi için Göлтаş A.Ş. Kalite Kontrol Laboratuvarı'na, diğer bir 3 kg'lık kısmı ise partikül boyut analizi için Başer Madencilik Laboratuvarı'na teslim edilmiştir. Bölgeçte ayrılan I. lokasyona ait bir diğer 125 kg'lık numune kümesi ise agrega deneylerinde kullanılmak üzere depolanmıştır.

-16 mm tane boyutuna kırılan II. lokasyon numune kümesi (~500 kg), bölgeç ile 125'şer kg'lık 4 alt kümeye ayrılmış, bir kısmı hammadde analizi, diğer bir kısmı ise ürün analizinde (hafif beton blok) kullanılmak üzere 500 lt hacimli etüvde 105 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa ulaşıncaya kadar kurutularak depolanmıştır.

3.2.2. Hammadde Analizlerinde Kullanılan Yöntemler

Hammadde olarak amorf silikanın (kayaç ve agrega) mühendislik özellikleri fiziksel, kimyasal, mineralojik ve petrografik analiz yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Fiziksel analizlerde kayaç el numuneleri ve numune kümeleri, kimyasal ve mineralojik-petrografik analizlerde ise sadece el numuneleri kullanılmıştır.

3.2.2.1. Fiziksel Analiz Yöntemleri

Kayaç hacim kütlesi analizi

I. ve II. lokasyon amorf silika kayaçlarından alınan el numuneleriyle, kayaç orijinal (yerinde) birim hacim kütlesini belirlemek için “TS 699 – Tabii Yapı Taşları Muayene ve Deney Metotları” standardına göre laboratuvarında analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tane büyüklüğü dağılımı (granülometrik bileşim), birim hacim ağırlığı, organik maddeler, ince madde oranı ve kızdırma kaybı analizi

-16 mm boyutuna kırılarak agrega analizlerinde kullanılmak üzere, bölgeç ile ~125'er kg'lık miktara azaltılan I. ve II. lokasyon karışık (tüvenan) agrega numune kümelerinden, yine bölgeç yardımıyla “TS 1114-Hafif Agregalar-Beton İçin” standardına göre her bir analiz için hazırlanan numune miktarları ve analizlerde kullanılan deney yöntemleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. I. ve II. lokasyon agrega analizlerine göre gerekli en az numune miktarı ve kullanılan deney yöntemleri

Analiz Adı	$D_{max} = 16 \text{ mm}$ için Deney Miktarı	Kullanılan Deney Yöntemleri
Tane Büyüklüğü Dağılımı	8000 g	TS 3530-Beton Agregalarının Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini, TS 1114-Hafif Agregalar-Beton İçin.
Gevşek, Sıkışık Kuru Birim Hacim Ağırlık	2500 g	TS 3529-Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini, TS 1114-Hafif Agregalar-Beton İçin.
Organik Madde Tayini	1000 g	TS 3673-Beton Agregalarında Organik Kökenli Madde Tayini Deney Metodu, TS 1114-Hafif Agregalar-Beton İçin.
İnce Madde Oranı Tayini	10000 g	TS 3527-Beton Agregalarında İnce Madde Oranı Tayini, TS 1114-Hafif Agregalar-Beton İçin.
Kızdırma Kaybı	2000 g	TS 1114-Hafif Agregalar-Beton İçin.
Birim Ağırlık, Doygun Yüzey Birim Ağırlık, Görünür Birim Ağırlık, Su Emme Miktarı.	2000 g	TS 3526-Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini.
Özgül Ağırlık, Görünür Porozite, Gerçek Porozite, Komposite, Doluluk Oranı, Doyma Derecesi.	-	TS 699-Tabii Yapı Taşları Muayene ve Deney Metotları.

3.2.2.2. Kimyasal Analiz Yöntemleri

I. ve II. lokasyon amorf silika oluşumlarından alınan 45 adet el numunesinden toplam 6 adet kayaç numunesinin kimyasal bileşenleri, MTA Genel Müdürlüğü Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı analiz laboratuvarı, Silver & Barites Ore Mining Co. ve ACME laboratuvarlarında analiz edilmiştir.

3.2.2.3. Mineralojik ve Petrografik Analiz Yöntemleri

Her iki lokasyona ait 28 adet kayaç el numunesi üzerinde x-ışınları difraktogramı analizi (XRD) (Silver & Barites Ore Mining Co. Analiz Laboratuvarı'nda), 2 adet kayaç numunesinde taramalı mikroskop (SEM) incelemeleri (TÇMB Hammadde Analiz Laboratuvarı'nda) ve 4 adet kayaç numunesinden hazırlanan ince kesitlerin polarizan mikroskopla incelemeleri SDÜ Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır.

3.2.3. Ürün Analizlerinde Kullanılan Yöntemler

3.2.3.1. Mineral Katkı Maddesi ve Geleneksel Beton Standartları

I. lokasyona ait amorf silika kayacından elde edilen mikronize amorf silikanın, puzolanik özellikleri ve mineral katkı maddesi olarak geleneksel beton performansına etkileri analizlerinde kullanılan yöntemler Çizelge 3.4.'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.4. Mineral katkı maddesi olarak amorf silikanın puzolanik özellikleri ve geleneksel beton performansına etkileri analizlerinde kullanılan yöntemler

Analiz Adı	Kullanılan DeneY Yöntemleri
Partikül Boyutu	Başer Madencilik A.Ş. Analiz Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır.
Özgül Yüzey Alanı	TS 25-Tras standardına göre Göltaş A.Ş. Kalite Kontrol Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır.
Puzolanik Aktivite	
Beton agregası numunesi alımı ve numune hazırlanması	TS 707-Beton Agregalarından Numune Alma ve DeneY Numunesinin Hazırlanması.
İncelik Modülü	TS 3530-Beton Agregalarının Tane Büyüklüğü Dağılımı
Agrega Gevşek ve Sıkışık Birim Hacim Ağırlık Tayini	TS 3529-Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini.
Agrega Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini	TS 3526-Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini.
Beton Karışım Hesapları	TS 802-Beton Karışım Hesapları Esasları.
Taze Beton Kıvamı	TS 2871-Taze Beton Kıvam DeneYi (Çökme Hunisi Metodu ile).
Katkı Kullanımı	İlave yöntemi, Basit İkame Yöntemi ^(a) .
DeneY Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı	TS 3068-Laboratuvarda Beton DeneY Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı.
Numunelerin Basınç Dayanımları	TS 3114-Beton Basınç Mukavemeti Tayini
Sürtünme ile Aşınma Kaybı	TS 699- Tabii Yapı Taşları Muayene ve DeneY Metotları, Böhme DeneYi Maddesi.
Kimyasal Maddelere Dayanım	TS 699-Tabii Yapı Taşları Muayene ve DeneY Metotları, Açık Hava Tesirlerine Dayanıklılık DeneYi ve Asitlere Dayanıklılık DeneYi Maddeleri.
Alkali Silika Reaksiyonu	ASTM C 1260.01- Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method) ^(b) .

a. Amorf silikanın geleneksel beton performansına etkilerinin incelenbilmesi amacıyla hazırlanan beton numunelerinde mikronize amorf silika, aşağıda belirtilen yöntemler dahilinde karışıma dahil edilmiştir:

Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (Basit ikame yöntemi):

Basit ikame yönteminde, karışımdan çıkartılan portland çimentosunun yerine, çıkartılan çimento miktarı kadar mineral katkı maddesi koyulması (bir miktar çimentonun aynı miktardaki mineral madde ile yer değiştirmesi) esası geçerlidir. Bu yöntemde mineral katkı maddesinin davranışı, karışımda kullanılan malzemenin karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişebilir (Pekmezci ve Uyan, 2001).

Mineral katkı maddesinin ince agrega olarak kullanılması (İlave yöntemi) :

İlave yönteminde, karışımda kullanılacak çimento miktarında azaltma yapılmaksızın mineral katkı maddesi karışıma eklenir. Bu sayede betonun etkin bağlayıcı miktarı arttırılmış olmaktadır. Ayrıca agrega miktarındaki değişikliklerle karışımın kullanılacağı uygulamanın özeliğine bağlı olarak diğer düzenlemeler de yapılabilmektedir.

b. Geleneksel beton performans analizinde kullanılan bir başka deney “Agregaların Potansiyel Reaktivitesi için Standart Deney Yöntemi (Harç Çubuk Yöntemi)-” dir. Bu yöntem, portland çimentosu ve reaktif agregalarla hazırlanan betonlarda gelişen alkali silika reaksiyonunun (ASR) bastırılmasında, mineral katkı maddelerinin etkinliklerinin belirlenmesine olanak vermektedir.

Yöntemde, çimento olarak portland çimentosu kullanılır. Kullanılan çimentonun otoklav genişmesi % 0.20’den daha az olmalıdır (ASTM C151, 2000).

Deney aşamasında kalıplama odasının sıcaklığı korunarak, bağıl nemliliği % 50 oranının üzerinde tutulur. Kuru malzemeler $20\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{ort}} < 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta muhafaza edilir. Muhafaza kaplarının içinde depolanan numunelerin yer aldığı etüvün $80.0 \pm 2.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik sıcaklığı korunur.

Deneyde kullanılacak kırmataş agregasının granülometrisi Çizelge 3.5’e uygun olarak hazırlanır.

Çizelge 3.5. Deneyde kullanılan agrega granülometrisi

Elek Boyutu		
Geçen	Kalan	Kütlece %
4.75 mm (No 4)	2.36 mm (No 8)	10
2.36 mm (No 8)	1.18 mm (No 16)	25
1.18 mm (No 16)	600 µm (No 30)	25
600 µm (No 30)	300 µm (No 50)	25
300 µm (No 50)	150 µm (No 100)	15

Agrega değişik elek boyutlarına ayrıştırıldıktan sonra, toz ve ince partikülleri uzaklaştırmak için elek üzerinde spreyleme yöntemi ile yıkanır, daha sonra yıkanan agrega kurutularak kütlece Çizelge 3.5’de belirtilen granülometrik karışım elde etmek için karıştırılır. Hazırlanan agrega karışımı rutubetten korunmak üzere temiz ve su geçirmeyen bir kapta muhafaza edilir.

Deneyde kullanılan çimento, içerisindeki olası topakları ortadan kaldırmak için, 850 µm (No 20) eleğinden geçirilerek, rutubetten muhafaza edilmek üzere su geçirmez bir kapta saklanır.

Numune kalıpların iç yüzeyleri, çimento priz süresine etkisiz ve hazırlanan numuneler içerisine su girişini engellemeyecek bir işleve sahip, serbestleştirici bir ajanla (teflon bant) kaplanır.

Deneyde kullanılacak harç için kütlece 1 kısım çimentoya 2,25 kısım derecelenmiş kuru agrega oranlanır. Üç numune hazırlamak için bir defada karıştırılmış harç yığınındaki kuru malzeme miktarı 440 g çimento ve 990 g derecelenmiş agregadır. Karışıma dahil edilecek kütlece su miktarı $s/\ç = 0,47$ eşitliğine göre belirlenir (440 g çimento için ~ 207 g su).

Harç 5 lt kapasiteli mikserde, uygun olarak karıştırıldıktan sonra, kalıplama işlemi 2 dakika 15 saniye içerisinde tamamlanır. Kalıplar yaklaşık iki eşit tabaka halinde doldurularak her tabaka sıkıştırıcı tokmak ile sıkıştırılır. Homojen bir numune elde edilinceye kadar köşelerin içerisine, ölçüm çivilerinin çevresine ve kalıp yüzeyi boyunca harç işlenir, üst tabaka sıkıştırıldıktan sonra kalıbın üzerine taşan harç kesilir ve birkaç kez mala perdahı ile yüzey düzeltilir.

Her bir kalıp, kalıbın doldurulmasından hemen sonra nem bölmesine yerleştirilerek, numuneler kalıplar içerisinde 24 ± 2 h kadar bırakılır. Süre sonunda numuneler kalıptan dikkatli bir şekilde çıkartılarak termoplast kaplara alınır ve nem kaybından korunur. İlk ve müteakip okumalar ± 0.002 mm hassasiyette yapılır. Okuması tamamlanan numune tamamen su (musluk suyu) içerisinde kalacak şekilde sızdırmaz bir depolama kabı içerisine yerleştirilerek, 24 saat süreyle 80.0 ± 2.00 °C sıcaklığındaki bir etüve yerleştirilir.

Fırın veya su banyosundaki numunelerden her defasında bir numune çıkartılarak ve iki metal ölçüm çivisine dikkat edilerek, bir havlu ile yüzeyleri kurulanır. Çubuk okuma pozisyonuna getirilir getirilmez derhal her bir çubuğun sıfır okuması alınır. Numune sudan çıkarıldıktan 15 ± 5 s içerisinde kurulama işlemini tamamlanır. Okuma sonrası, kalan çubukların sıfır okumaları alınıncaya kadar, numune bir havlu üzerine bırakılır.

Sıfır okumaları alınan numuneler bir kap içerisine yerleştirilir. Yerleştirme esnasında çubukların birbiri ile veya kap ile yüzeysel teması mümkün olduğunca önlenir. Daha sonra yeterince 1 N NaOH çözeltisi kap içerisine boşaltılır. Kapın kapağı kapatılarak mühürlenir. Numune dolu kap 80.0 ± 2.00 °C deki fırın yada su banyosuna konulur.

Numunelerin müteakip okumaları sıfır okumasından itibaren 14 günlük sürede içerisinde, 3 ara okumayla her okuma günü aynı zamana gelecek şekilde periyodik olarak yapılır. 14 günlük süre sonunda okumalara devam edilecekse, her hafta bir değer alınır. Ölçüm işlemi – tekrar kaplarına geri dönen örnekler hariç - sıfır okumasında tanımlandığı gibidir.

Numunenin sıfır okuması (L_0) ve her bir periyotta % 0.001 duyarlılıkta okunan efektif ölçüm boyu (L_n) arasındaki fark hesaplanır ve o periyottaki numunenin genişmesi olarak kaydedilir. Belirli bir periyot için karışıma karşılık gelen genişleme olarak, muayyen bir çimento - agrega kombinasyonundaki üç numunenin ortalama genişmesi % 0.01 yakınlıkta kaydedilir.

Dökümden 16 gün sonra % 0.10 dan daha az genleşmeler çoğu durumda zararsız bir davranış gösterir. Dökümden 16 gün sonra % 0.20 den daha büyük genleşmeler potansiyel zararlı genleşmeleri belirtir. Dökümden 16 gün sonra 0.10 – 0.20 arasındaki genleşmeler saha performansında zararsız ve zararlı olarak bilinen her iki agrega grubunu kapsar. Bu agregalar için ASTM C 1260-01 Bölüm 3.3.'de belirtilen tamamlayıcı bilgileri harekete geçirmek gerekir. Ayrıca böyle bir durumda mukayese okumalarını 28 güne çıkarmak yararlı olabilir.

3.2.3.2. Hafif Beton ve Yapı Elemanları Standartları

II. lokasyon amorf silika kayacının alternatif agrega olarak hafif yapı elemanları üretiminde kullanılabilirliğine ilişkin analiz yöntemleri Çizelge 3.6'da belirtilmiştir.

Çizelge 3.6. Alternatif agrega olarak amorf silikanın hafif yapı elemanları üretiminde kullanılabilirliğine ilişkin analiz yöntemleri

Analiz Adı	Kullanılan Deney Yöntemleri
Hafif Beton Karışım Hesapları	TS 3234- Bimsbeton Karışım Hesabı ve Deney Metotları.
Agrega Granülometrisi	
Çimento Miktarı Seçimi	
Karışım Suyunun Saptanması	
Kıvam Deneyi	
Blok Birim Hacim Ağırlığı	TS 2823- Bimsbetondan Mamul Yapı Elemanları, Bölüm 2.3.1. Birim Hacim Ağırlığı Tayini Deneyi.
Blok Basınç Dayanımı	TS 2823- Bimsbetondan Mamul Yapı Elemanları, Bölüm 2.3.2. Basınç Mukavemeti Tayini Deneyi.
Blok Rötresi	TS 2823- Bimsbetondan Mamul Yapı Elemanları, Bölüm 2.3.4. Rötire Deneyi.
Blok Isı Yalıtım Özellikleri	ASTM C.236-Standard Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box ^(a) .

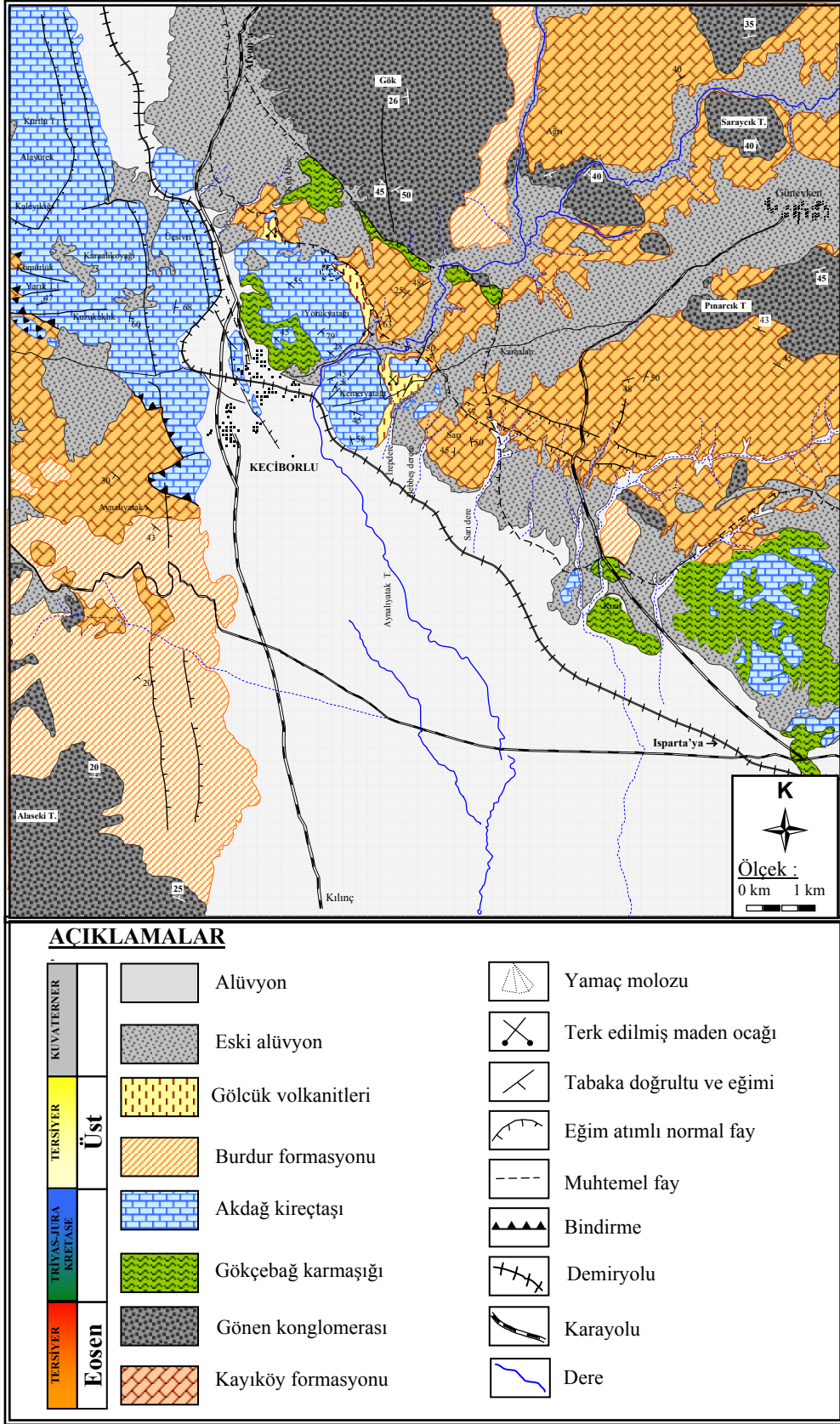
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. İnceleme Alanının Jeolojisi

İR 3483 nolu Keçiborlu Kükürt Sahası'nın jeolojisi daha önceden pek çok araştırmacı (Penck, 1918; Müller, 1937; Lahn, 1940; Romberg, 1964; Sariiz, 1985) tarafından çalışılmış, sahada gerek Etibank ve gerekse MTA tarafından yapılan 100'ün üzerinde arama ve rezerv artırmaya yönelik sondajlar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların ışığında sahanın muhtelif ölçeklerde detay haritaları çıkarılmış, sahada yer alan jeolojik formasyonlar, cevherleşme, yan kayaç ve cevher / kayaç mineraloji ve petrografileriyle ilgili ayrıntılı araştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, amorf silika oluşumlarının sahanın sınırlı kesimlerinde var olması nedeniyle, saha jeolojisi olarak inceleme alanı da genel de bu alanlar seçilmiştir.

Amorf silika lokal alanının jeolojisini aydınlatmak amacıyla, önceki çalışmalar incelenmiş ve saha çalışmaları yapılarak 1/25.000 ölçekli saha jeoloji haritası hazırlanmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Keçiborlu yöresinin jeoloji haritası (Sarız,1985'den değiştirilerek alınmıştır)

4.1.1. Stratigrafi

Çalışma alanında bulunan birimlerin litolojik özellikleri ve birbiriyle ilişkileri bu bölümde açıklanacaktır. Formasyon adlamalarında bölgede daha önce yaygın olarak kullanılan isimler tercih edilmiştir. İnceleme alanında bulunan jeolojik birimler otokton ve allokton konumlu olmak üzere iki grup altında toplanmıştır.

Otokton birimler ; Kayıköy formasyonu, Gönen konglomerası, Burdur formasyonu, Gölcük volkanitleridir. Allokton birimler ise Gökçebağ karmaşığı ve Akdağ kireçtaşlarıdır (Şekil 4.2.).

4.1.1.1. Kayıköy formasyonu (Tka)

Kayıköy formasyonu; Keçiborlu ilçesinin kuzeydoğusu ve batısında dar alanlarda, Güneykent köyünün çevresinde geniş alanlarda görülmektedir. Formasyonun ismi farklı çalışmalarda Isparta formasyonu (Sarıiz, 1985), Kurttepe formasyonu (Yalçinkaya, 1989), Garipçe formasyonu (Yalçinkaya vd., 1986) ve Kayıköy formasyonu (Karaman vd., 1988) olarak adlandırılmıştır.

Formasyon; birbiriyle yanal ve düşey yönde geçişli, orta katmanlı, boz, kahve renkli detritik kireçtaşları ile kumtaşı, marn, çakıltası ve şeyl araldanmasından oluşmaktadır.

Marn seviyeleri, açık krem beyaz renkli, mikritik doku ve böbreğimsi ayrışma yapıları sunmaktadır ve kolay kırılımandır. Kumtaşları açık yeşilimsi, kahve renkli, kötü boylanmalı ve karbonat çimentoludur. Kayıköy formasyonunda tabakalanma genellikle K 30°B doğrultulu ve eğimleri ise 40°KD ve 30°- 40°GB yönlerinde değişmektedir (Sarıiz,1985).

Kayıköy formasyonu, bölgede Gönen konglomerası ile uyumsuz olarak bulunur. Formasyonda gözlenen fosil içeriğine göre yaşı Alt-Orta Eosen olarak belirlenmiştir (Yalçinkaya vd.,1986).

4.1.1.2. Gönen konglomerası (Tg)

Gönen konglomerası, çalışma alanında Keçiborlu'nun kuzeyinde Gök Tepe ve civarı, Güneykent Köyü çevresinde ve İğdecik kuzeyinde Demirli Tepe ve batısında Kara Tepe, Eğriderebaşı Tepe civarında görülmektedir. Birim; Yalçinkaya vd., (1986) tarafından Gökdere formasyonu, Sarıiz (1985) tarafından İncesu konglomeraları olarak adlandırılmıştır.

Konglomeralar, egemen olarak kireçtaşı, radyolarit, çört ve serpantin çakıllarından meydana gelmiştir. Gri, kirli sarı ve açık yeşil renkli konglomeralar kalın ve düzensiz tabakalar halindedir. Bu bölgedeki konglomeralarda taneler iyi yuvarlaklaşmış ve bağlanmış olmakla birlikte yersel olarak pekleşme zayıftır.

Akdağ kireçtaşları ve ofiyolit kütleleri Gönen konglomerası üzerine bindirmiştir. Birimin yaşı önceki çalışmalarda ve stratigrafik ilişkilere göre Oligosen olarak kabul edilmiştir (Sarıiz,1985).

4.1.1.3. Burdur formasyonu (Tb)

Burdur formasyonu, Keçiborlu İlçesinin güneybatısında geniş bir alanda ve kuzeydoğusunda gözlenmektedir. Birim; konglomera seviyeleri ile başlayan ve üste doğru beyaz-bej renkli, ince-orta tabakalanmalı kumtaşı, kiltası, marn, konglomera ve tuf aralanmasından oluşmaktadır. Konglomera ve kumtaşı düzeylerinin boşluk ve çatlaklarında jips katkıları bulunmaktadır.

Birim içerisinde yer alan tüfler; Keçiborlu'nun Değirmenderesi, Kokardere ve İrepdere bölgelerinde yüzeylemiştir. Genellikle ayrılmış, sarımsı gri renkli, bol çatlaklı, çatlakları limonitle dolmuş olan tüfler, Değirmenderesi bindirme hattı boyunca diğer kayalarla karışmış olarak bulunmaktadır (Sarıiz, 1985). Gölsel oluşuklardan meydana gelmiş olan formasyon, bütün temel birimler üzerine açıl diskordansla oturur. Formasyon yaşı Orta-Üst Miyosen (Pliyosen) olarak tespit edilmiştir (Yalçınkaya vd.,1986).

4.1.1.4. Gölcük volkanitleri (Tv)

İnceleme alanında volkanitler; Keçiborlu'nun kuzeydoğusunda İrepdere, Kokardere ve Kumludere civarında tüflerle birlikte gözlenmektedir. Andezit, traki-andezit türünde lavlardan oluşmuşlardır. Bölgede volkanitler dar ve uzun bir alan içinde yer almakta olup, tektonik olaylar sonucu çatlak veya yarık boyunca yerleşmiş bir dayk şeklindedir. Yaşı Gölcük volkanizması ile bağlantılı olduğundan Pliyosen olarak kabul edilmektedir.

4.1.1.5. Alüvyon (Kal) ve eski alüvyon (Ke)

Alüvyon, ovada birikmiş olan kum, silt ve kilden meydana gelmiştir. Çalışma alanında eski alüvyonlar geniş alanlarda görülmektedir. Bunlar genellikle gevşek tutturulmuş blok, kum ve çakıldan oluşmuştur. Birimin yaşı stratigrafik konumuna göre Kuvaterner olarak tespit edilmiştir.

4.1.1.6. Gökçebağ karmaşığı (To)

Birim çalışma alanında; Keçiborlu ilçesi kuzeyi ve kuzeydoğusu ile Gümüşgün kuzeybatısında gözlenmektedir. Karmaşık, dünit, serpantin, gabro, çört, diyorit, radyolarit, kumtaşı, harzburjit, kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Açık yeşil renkli

dünitler, ince taneli, bol çatlaklı, düzensiz kırılma yüzeylidir. Dünit fasiyesindeki kayaçların deformasyonu ile serpantinitler oluşmuştur. Serpantinitleşme farklı derecelerde ve şiddette oldukça yaygın olarak gözlenmektedir. Serpantinitler içerisinde bunları kesen dayk biçiminde gabrolara rastlanmaktadır. Gabrolar; koyu yeşil renkli, bol çatlaklı düzensiz kırılma yüzeylidir. Diyabazlar yeşilimsi renkte olup serpantinit ve çört içinde yumrular şeklinde bulunurlar. Kumtaşları serpantinitler üzerinde ve yer yer bunlarla karışmış şekilde görülürler.

Birimin alt sınırı Kayıköy formasyonu ve Gönen konglomeraları ile tektonik dokanıklıdır. Üstte Burdur formasyonu ile örtülmüştür. Karmaşığın bölgeye yerleşim yaşı Üst Paleosen – Alt Eosen sonrasıdır (Yalçinkaya vd., 1986).

4.1.1.7. Akdağ kireçtaşı (Tea)

İnceleme alanında; Keçiborlu ilçesi batısında Üçsivri Tepe, Karaali Koyağı Tepe, Kuzukaklık Tepe civarında, kuzeydoğuda Yörükyatağı Tepe ve Kemer Tepe ile Gümüştün kuzeybatısında Asarlık Tepe ve Küçükasarlık Tepe civarında gözlenmektedir. Birim; gri, açık krem ve beyaz renklerde, kalın ve monoton bir kireçtaşı istifli şeklindedir. Orta-Miyosen’de sıkışma tektoniği sonucu batıdan güneybatıya taşındığı tahmin edilmektedir. Birim içerisinde yaygın olarak kuvvetli deformasyona bağlı olarak gelişen makaslama ve ezilme zonları görülmektedir (Karaman, 1990).

Akdağ kireçtaşları ofiyolitik karmaşıklar ile hareket etmiştir. Bu nedenle Akdağ kireçtaşlarına ait parçalar ofiyolitik karmaşıklar içerisinde yaygın olarak gözlenmektedir. Birim içerisinde rastlanan fosillere göre yaşı Orta-Üst Triyas olarak tespit edilmiştir (Yalçinkaya, 1989).

Üst Sistem	Sistem	Seri	Formasyon Simge	Açıklamalar	
SENOZOYİK	KUVATERNER		Alüvyon (Kal)		Kal: Kum, Çakıl, kil, silt. Ke: Gevşek tutturulmuş kum-çakıl.
			Eski Alüvyon (Ke)		UYUMSUZLUK
	TERSİYER	ÜST MİYOSEN - PLİYOSEN	Gölçük Volkanitleri (Tv)		Tv: Andezit, traki-andezit. Tüfler
			Burdur Formasyonu (Tb)		Tb: Beyaz bej renkli, ince-orta katmanlı, kumtaşı, kiltası, marn, konglomera, tuf ardışıklanması. UYUMSUZLUK
MESOZOYİK	TRİYAS - JURA - KRETASE		Akdağ Kireçtaşı (TRa) Gökçebağ Karmaşığı (To)	TRa: Beyaz renkli, orta katmanlı, rekristalize kireçtaşı. To: Kuvvetli tektonikle karışmış, serpantinit, gabro, diyabaz, çört, radyolarit, kireçtaşı blokları. TEKTONİK DOKANAK	
SENOZOYİK	TERSİYER	OLİGOSEN	Gönen Konglomerası (Tg)	Tg: Gri, açık yeşil renkli, polijenik çakıllı, karbonat konglomeralar. UYUMSUZLUK	
		EOSEN	Kayıköy Formasyonu (Tka)	Tka: Kirli sarı-boz renkli, ince katmanlı, kumtaşı, marn, kireçtaşı ardalanması.	

Şekil 4.2. İnceleme alanının tektono-stratigrafik sütun kesiti (Sarıiz,1985'den değiştirilerek alınmıştır)

4.1.2. Keçiborlu Amorf Silika Yatağının Jeolojisi

Keçiborlu kükürt yatakları ve yörenin jeolojisi ile ilgili günümüze kadar pek çok araştırmacı tarafından yürütülmüş bilimsel araştırma ve çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmaların hiçbirisinde yöredeki amorf silika oluşumlarının adlandırılması, tanımlaması ve yorumlanmasına rastlanmamıştır. Bununla beraber çalışmaların bir kısmında amorf silika oluşumlarına serpantinitle ve tüflerin alterasyonu sonucu oluşan silisleşme olarak kısaca değinilmiştir (Sarız, 1985; Güneş, 1993).

4.1.2.1. Alterasyon Zonunun İncelenmesi

Keçiborlu İlçesi kuzeyinde, Kumludere mevkiinden başlayıp Kükürtdere ve Değirmenderesini içine alan ve İrepdere mevkiine kadar uzanan KB-GD doğrultulu bir bindirme zonu mevcuttur. Esas mineralizasyon ve alterasyonun bu zon içinde geliştiği bilinmektedir (Şekil 4.3).

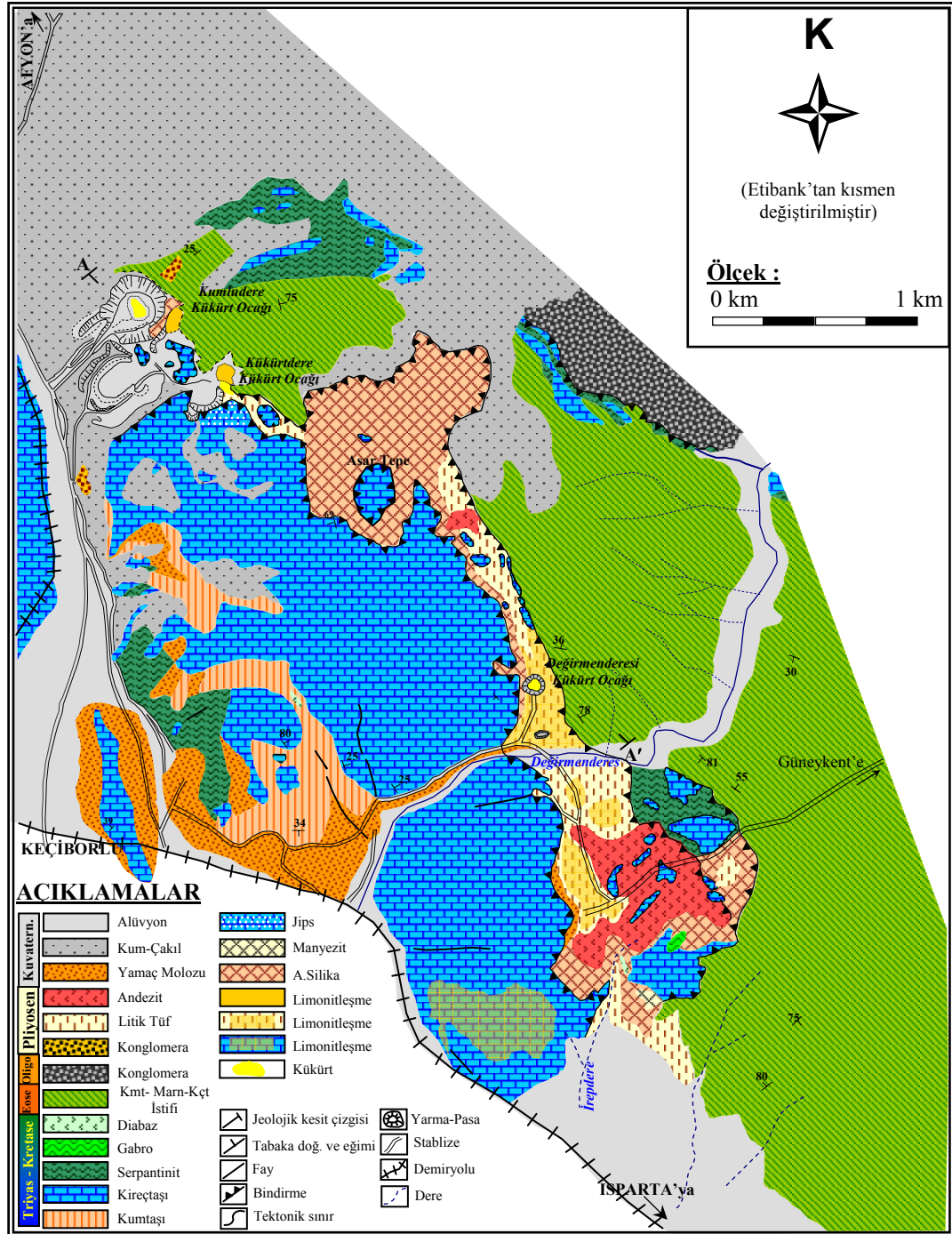
Bu zon içerisinde kükürt ihtiva etmeyen ve kükürtlü zonlardan 200–400 m mesafedeki kayalarda silisleşme, piritleşme, limonitleşme etkisiyle oluşan farklılıklar ayırt edilmektedir. Kumludere mevki eski kükürt ocağı güney batısında yer alan yamaçlarda kalın bir yatak oluşturan ve Değirmenderesi mevkiinde, bindirme zonu içerisinde Yörükyatağı Tepe doğu yamaçlarında K-G doğrultulu bir mostra biçiminde uzanan amorf silika oluşumları dikkat çekmektedir.

Bindirme zonu içerisinde alterasyona uğrayarak orjinallerinden farklılaşan kayaç tipleri oluşmuştur.

Serpantinitle

Bu kayalar Kemertepe güneydoğusunda Karaalan yolu altında ve İrepdere mevkiinde belirgin bir şekilde ayırt edilmektedir. İrepdere mevkiinde açık krem renkli, ince taneli, sert yapıda, yüzeyde bol çatlaklı tamamen silisleşmiş, uzaktan bakıldığında kireçtaşı bloğunu andıran bir yapıda güneye doğru yaklaşık 300

hektarlık bir alanı kaplarlar. Karaalan yolu üzerindeki altere olmuş serpantinitler ise siyahımsı – koyu kahverengi renkte, obsidyen andıran ve konkoidal kırılma şekline sahip görünüşleriyle kolayca fark edilirler. Alterasyonu tamamlanmamış kayalarda serpantinit dokularını halen ayırt etmek mümkündür.



Şekil 4.3. Etiholding Keçiborlu kükürt sahası jeoloji haritası (Sarız,1985'den değiştirilerek alınmıştır)

Kumludere eski açık kükürt ocağı civarındaki altere serpantinitle ise siyaha kaçan koyu yeşil renkleriyle kolayca ayırt edilmektedir. Kumludere ocağının çoğu kesiminde serpantinitle alterasyonuyla oluşan killeri (illit, montmorillonit, klorit) takip etmek mümkündür. İşletilen kükürt cevher zonunun hemen dışındaki killi zon (özellikle doğu - güneydoğu yönünde) amorf silika ile karışmıştır. Bu zonun üst kotlarında yer alan yamaçlardan itibaren amorf silika oluşumları başlamaktadır.

Kumludere ve Değirmenderesi mevkieinden alınmış serpantinitle numuneleri üzerinde yapılmış kimyasal analiz sonuçları aşağıdaki gibidir (Sarıız, 1985):

Çizelge 4.1. Orijinal serpantinitle kayaç numunesi ile altere serpantinitle kayaç numuneleri kimyasal analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Sarıız, 1985).

Kimyasal Bileşen	Kumludere Mevkii %	Değirmenderesi Mevkii (1) %	Değirmenderesi Mevkii (2) %	Orijinal Serpantinitle %
SiO ₂	39,80	52,79	51,25	39,40
Al ₂ O ₃	25,15	13,95	17,70	0,70
Fe ₂ O ₃	0,65	8,98	8,85	3,44
FeO	-	0,56	0,14	1,50
MgO	-	1,50	2,00	38,50
CaO	-	0,30	1,35	0,50
MnO	-	0,04	0,03	0,10
K ₂ O	0,08	0,01	3,90	0,01
Na ₂ O	0,09	0,04	0,13	0,14
TiO ₂	0,02	0,70	0,70	0,03
P ₂ O ₅	-	0,16	0,41	0,01
S	2,43		4,73	-

Andezitler

Bindirme zonu içerisinde, İrepdere kuzeyinde ve Asar Tepe doğusunda dayk biçiminde görülürler. Sahada genelde altere olmuş kısımlar sarımtırak renklerde, bozunmamış andezitler ise gri-koyu gri renktedirler. Andezitlerin bol çatlaklı kısımlarında limonit dolgularına rastlamak mümkündür.

Tüfler

Bindirme zonu içerisinde, KB –GD doğrultulu, Kükürtdere'den İrepdere'ye kadar gözlemlenir. Genelde andezit, diabaz, serpantin, kuvars ve çört parçaları ile karışmış halde olup ezilmiştir. Açık sarı, sarımsı gri renktedir.

Kükürt işletmesinin faal olduğu dönemlerde, (litik) tüfler kükürt tarafından empenye edildiği ve kükürt yerleşimine uygun bir ortam oluşturduğu için ekonomik önem arz etmiştir. Ayrıca asidik özellik gösteren hidrotermal solüsyonların ileri derecede alterasyona uğrattığı kayaç bölgelerinde alterasyon ürünü olarak kil mineralleri oluşmuştur. Kumludere ve Değirmenderesi mevkiilerinden alınmış tüf numuneleri üzerinde yapılmış kimyasal analiz sonuçları aşağıdaki gibidir (Sarız, 1985).

Çizelge 4.2. Orijinal tüf numunesi ile altere tüf numuneleri kimyasal analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Sarız, 1985)

Kimyasal Bileşen	Değirmenderesi Mevkii (1) %	Değirmenderesi Mevkii (2) %	Değirmenderesi Mevkii (3) %	Orijinal Tüf %
SiO ₂	30,00	28,25	27,45	64,50
Al ₂ O ₃	20,00	26,55	27,45	12,50
Fe ₂ O ₃	7,42	1,21	0,11	2,80
FeO	0,53	0,09	0,04	2,51
MgO	0,02	0,01	0,02	0,80
CaO	0,10	3,00	0,15	1,80
MnO	-	-	-	0,02
K ₂ O	0,04	0,90	0,54	1,13
Na ₂ O	0,15	0,12	0,08	2,35
TiO ₂	-	-	-	1,13
P ₂ O ₅	2,10	1,42	0,73	0,01
S	12,54	15,30	25,90	-

Kireçtaşları

Sahanın güney ve batı kesiminde Asar Tepe, Yörük Yatağı Tepe ve Kemertepe civarında yaygın olarak bulunan kireçtaşları, bindirme zonu içerisinde Kumludere – Kükürtdere arasında, Kükürtdere mevkiinin güneydoğusunda, Değirmendere mevkiinin kuzeyinde ve Kemer Tepe doğusunda bloklar halinde bulunurlar.

Alterasyona uğramamış kısımlar genelde ince taneli ve masif yapıda, grimsi renktedir.

Cevher gelişimine paralel olarak Kemertepe güneydoğusundaki primer kireçtaşları içerisinde, demirce zengin sülfürik asit konsantrasyonu içeren çözeltilerin ornatımıyla, kovuklu yapıda limonit dolguları oluşmuş, ayrıca Kükürtlede güneyindeki kireçtaşları içerisinde kalsiyum tuzlarının asidik çözeltilerle reaksiyona girmesi sonucunda ortamdaki jipsler teşekkül etmiştir (Şekil 4.4).

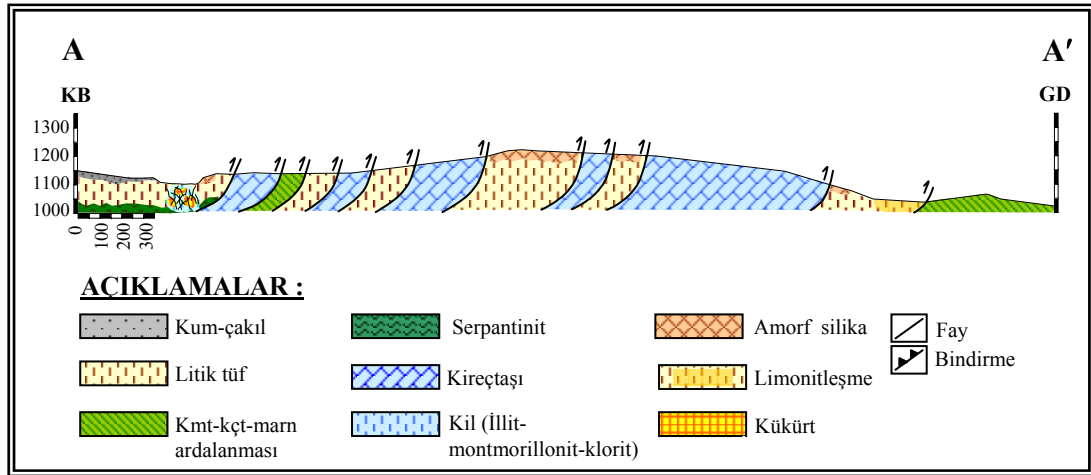
4.1.2.2. Alterasyona Uğrayan Serpantinit ve Tüf Numunelerinin Kimyasal Analizlerinin Yorumlanması

Orijinal serpantinit numunesi ile alterasyona uğrayan serpantinitlerin kimyasal analiz sonuçları mukayese edildiğinde, alterasyona uğrayan serpantinit içerisinde SiO_2 , Fe_2O_3 ve Al_2O_3 artarken, MgO da azalma meydana gelmiştir.

Alterasyona uğramış tüf numunelerinde ise Al_2O_3 ve S oranlarında orijinal numuneye göre önemli artışlar gözlenirken, SiO_2 oranında belirgin bir azalma mevcuttur.

Bu sonuca göre serpantinit ve tüflerde gelişen alterasyon neticesinde serpantinitler silisce zenginleşirken magnezyum oksitce fakirleşmiştir. Bunun en güzel örneğini İrepedere kuzeyindeki altere serpantinlerde gözlemek mümkündür. Bu serpantinitler hemen hemen tamamen silisleşirken, magnezyum oksitce fakirleşmiş, bununla beraber silisleşen serpantinitlerin güney kesiminde Karatepe güney batısında manyezit zuhurları oluşmuştur.

Tüflerde gelişen alterasyon ile de (litik) tüflerin kimyasal bileşeninde önemli oranda yeralan silisin belirgin bir kısmı hidrotermal çözeltiler ile göç etmiş ve silika tortuları şeklinde bindirme zonunun özellikle Kumludere-Değirmenderesi-Asartepe ve İrepedere mevkilerinde tortulaşması neticesinde amorf silika yataklarını oluşturmuştur.



Şekil 4.4. Etibank Keçiborlu kükürt sahası jeoloji kesiti

4.1.2.3. Amorf Silika Yataklarının Oluşumu

Ekonomiklik arzeden amorf silika oluşumları Kumludere ve Değirmenderesi mevkiilerinde yer almaktadır. Bu mevkiilerdeki amorf silika yataklarının oluşumunu şu şekilde açıklamak mümkündür:

H₂S, HS, SO₂, SO₃ ve benzeri bileşikler içerecek yükselen gazlı çözeltiler ile primer Fe bileşikleri yeraltı suları ile karışmışlar ve oksitlenmişlerdir. Bu reaksiyon sonucunda konsantre sülfürik asit çözeltileri oluşmuştur. Asidik özellikte ve düşük sıcaklıktaki (100-150°C de) çözeltiler epitermal kükürt yataklarını oluştururken, aynı zamanda cevherin yerleşimini sağlayan tüfler ve tüf dokanağında yan kayaç niteliği kazanan serpantinitleri ornatarak alterasyon zonunu oluşturmuşlardır. Ortamda bulunan serpantinitler silisce zenginleşirken magnezyumca fakirleşmiş, litik tüfler ise silisce fakirleşmişlerdir. Diğer taraftan ortamda mevcut kaolin gibi alümino-silikat mineralleri H₂SO₄ ile reaksiyona girerek Al₂(SO₄)₃ halinde dışarı atılmışlar. Alterasyon zonunda montmorillonit, illit ve klorit mineralleri ile silisleşme (opal mineralleri ve amorf silika) oluşmuştur.

Asidik karakterde ve kolloidal silika partikülleri içeren hidrotermal çözeltilerin yüzeye ulaşması ile soğuması neticesinde silika partikülleri jel halinde Kumludere ve Değirmenderesi civarında çökerek amorf silika yataklarını meydana getirmiştir.

4.1.3. Amorf Silika Yataklarının Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

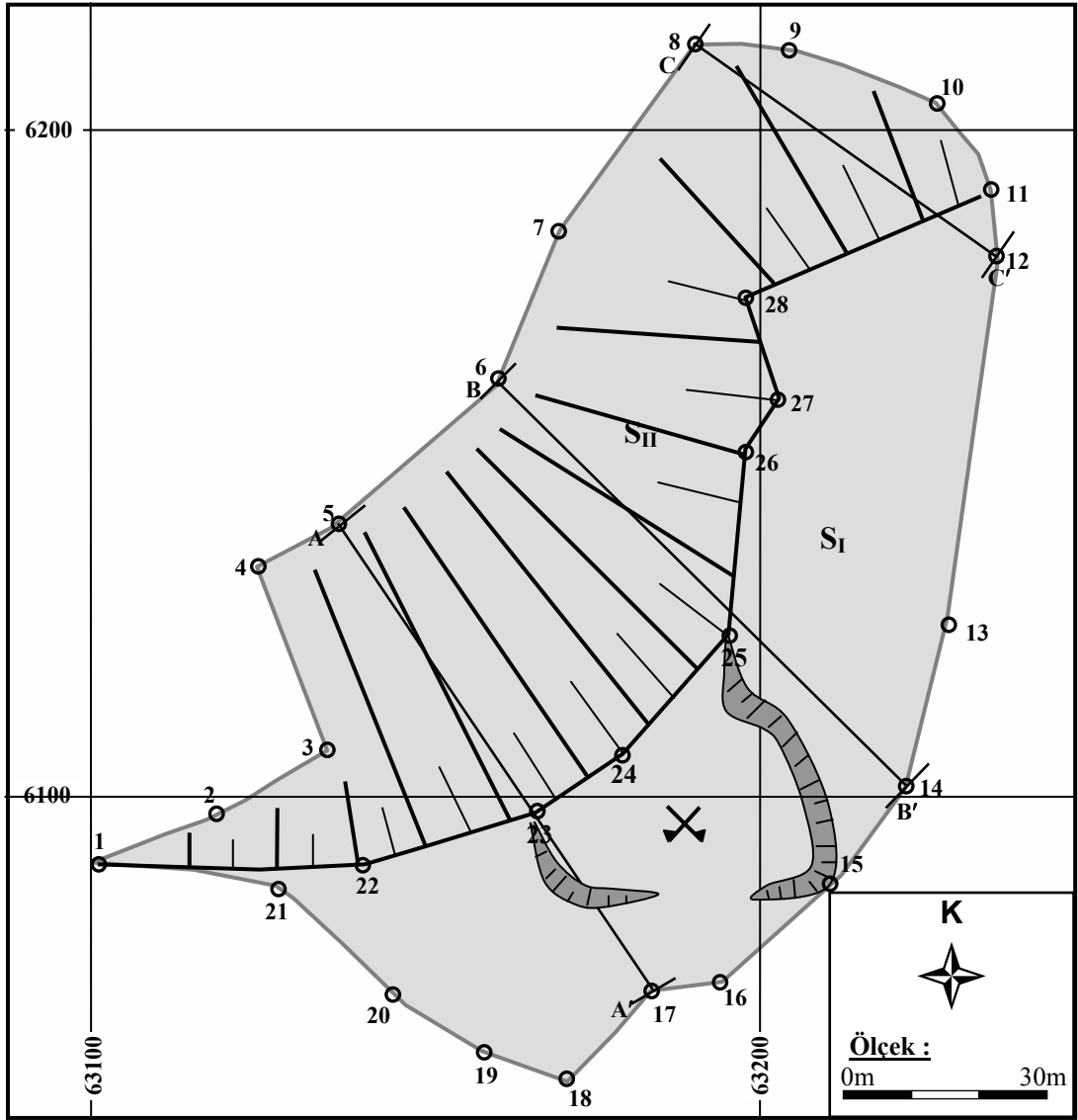
4.1.3.1. Rezerv Bilgileri

Sahadaki amorf silika oluşumları Kumludere-Değirmenderesi-Asartep mevkileri (I. lokasyon) arasında ve İrepdere (II. lokasyon) mevkiinde yoğunlaşmıştır. Kumludere bölgesinde yer alan rezerv, diyatomit lokal alanı içerisinde olup zaman zaman işletilmiştir (Şekil 4.5). Değirmenderesi, Asartep ve İrepdere civarındaki rezervlerin diyatomit lokal alanının sınırları dışında kalması dolayısıyla işletmesi yapılmamıştır.

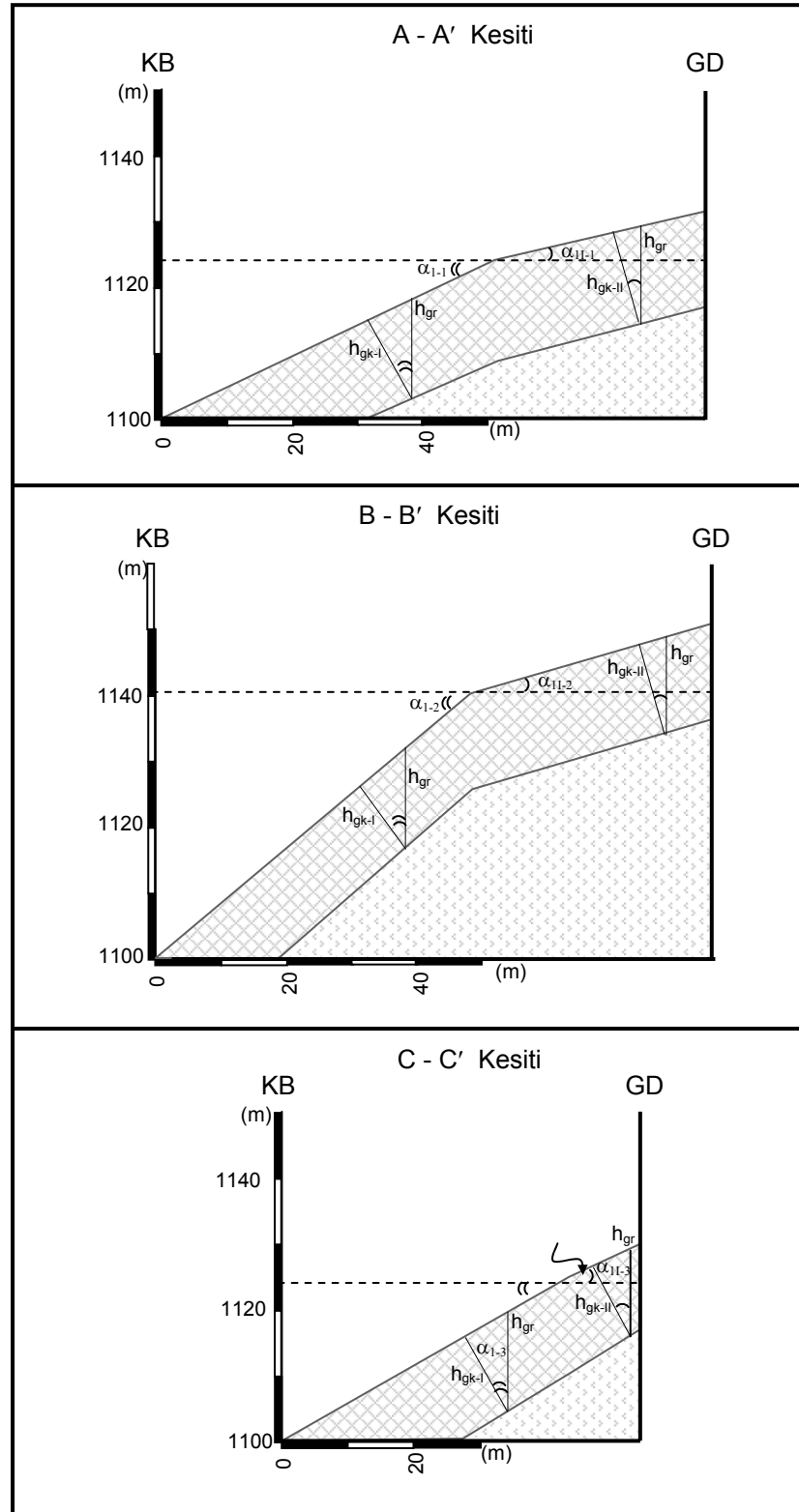
Her iki lokasyonda da amorf silika rezervi topoğrafyaya uygun adese şeklindedir. Kumludere civarındaki amorf silika yatağı yaklaşık 15 m kalınlıkta 150 m uzunluğunda ve 80 m genişliğinde bir zondur (Şekil 4.6-7). Saha içerisindeki önceden işletilmiş ocakta ortalama ayna yüksekliği 15,5 m olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.3. Kumludere amorf silika yatağı sınır ve yükselti koordinat değerleri

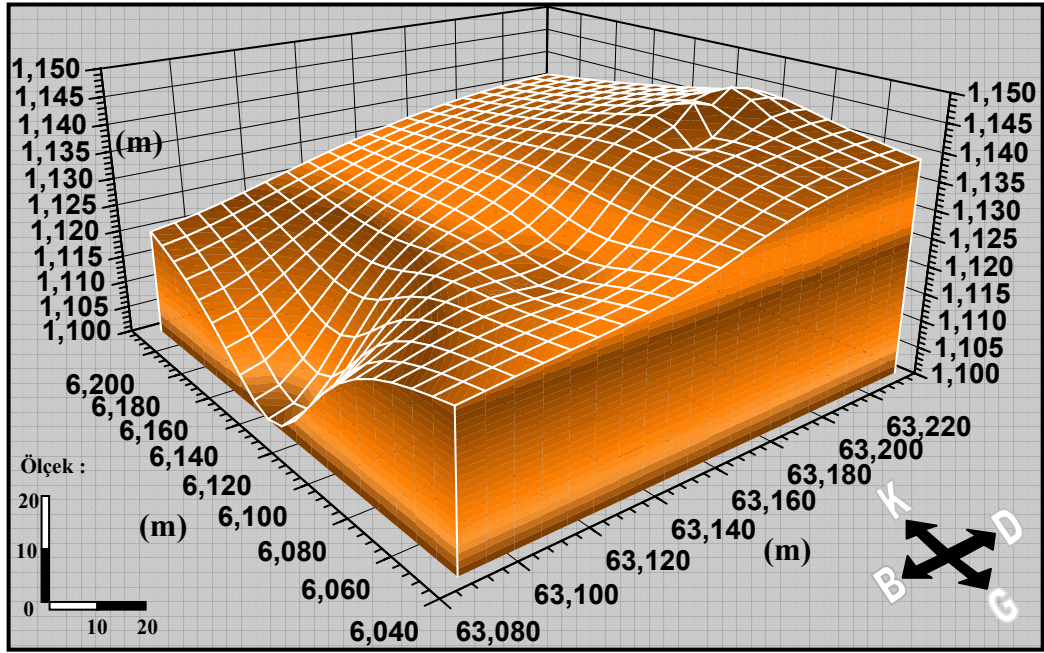
Kumludere Amorf Silika Yatağı Koordinatları							
Nokta No	Y (Sağa)	X (Yukarı)	Z (Kot)	Nokta No	Y (Sağa)	X (Yukarı)	Z (Kot)
1	63101	6090	1126.30	15	63201	6086	1146.00
2	63119	6097	1120.40	16	63194	6071	1133.40
3	63136	6107	1114.50	17	63184	6070	1131.20
4	63125	6134	1099.90	18	63171	6057	1129.70
5	63137	6140	1100.10	19	63159	6061	1130.40
6	63161	6162	1101.10	20	63155	6070	1131.00
7	63170	6184	1104.90	21	63128	6085	1132.20
8	63190	6214	1105.40	22	63141	6090	1132.60
9	63204	6212	1113.50	23	63167	6097	1124.00
10	63227	6204	1126.70	24	63179	6106	1125.10
11	63235	6191	1129.00	25	63195	6124	1141.60
12	63236	6180	1131.60	26	63198	6151	1140.20
13	63229	6125	1145.90	27	63203	6158	1135.70
14	63222	6102	1152.40	28	63197	6174	1130.60



Şekil 4.5. Kumludere amorf silika yatağına ait ekonomik rezerv alanı sınır haritası



Şekil 4.6. Kumludere amorf silika yatağı kesit görünümleri



Şekil 4.7. Kumludere amorf silika oluşumu 3 boyutlu modellemesi

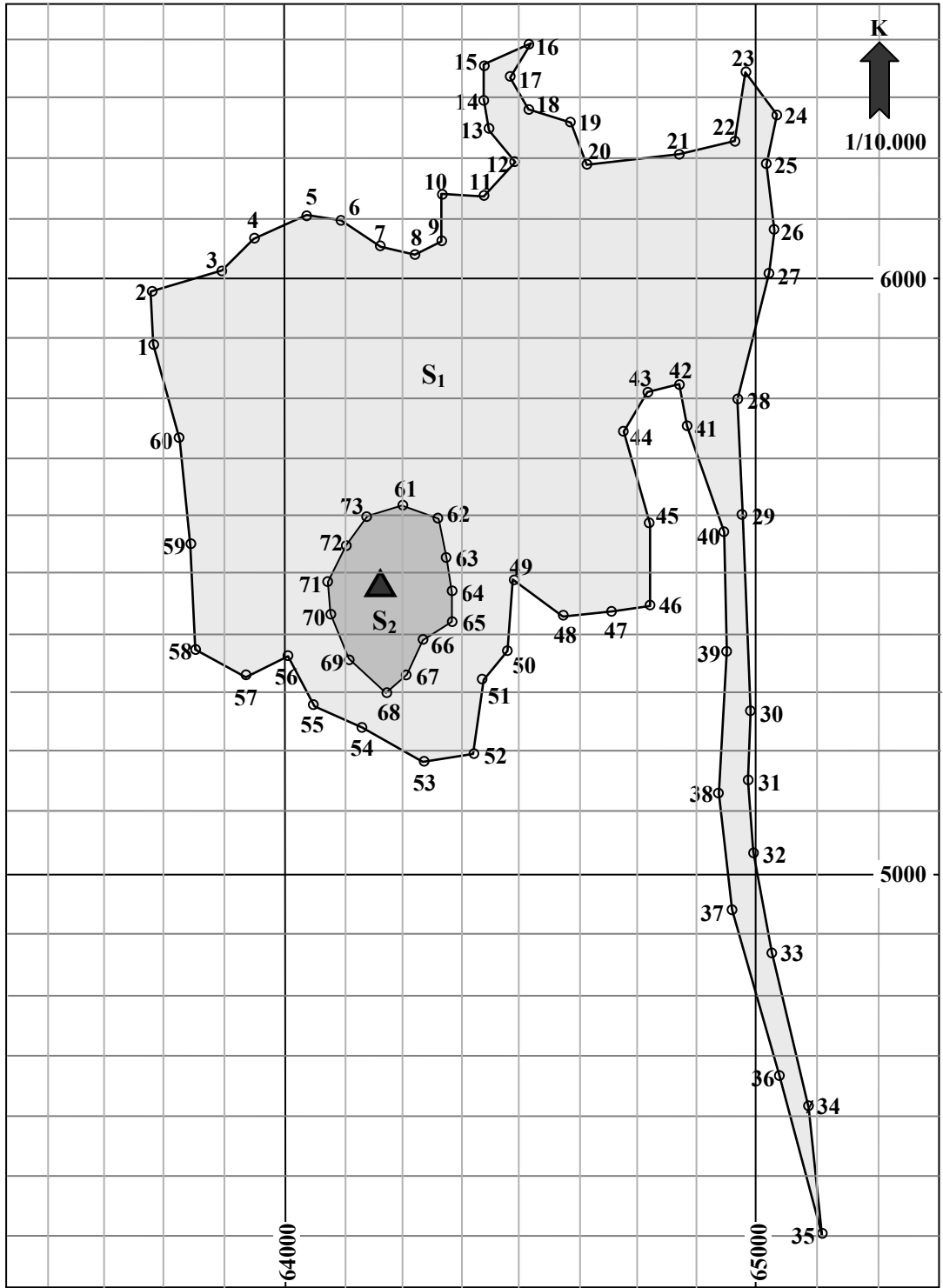
Kumludere yatağı sınır koordinat değerleri kullanılarak, harita alanları (S_I ve S_{II}), gerçek kalınlık ve görünür rezerv değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Buna göre, Kumludere amorf silika yatağının görünür rezervi 180.092,6 ton olarak hesaplanmıştır. Yine I. lokasyona dahil olan Değirmenderesi-Asartepe arasındaki rezerv, eski Değirmenderesi açık kükürt ocağı civarından başlayarak, bindirme hattının batı kanadı boyunca kuzey istikametine doğru, yaklaşık 1400 m uzunluğa, 6 m kalınlığa, 50 m genişliğe sahip bir mostra olarak uzanmakta ve Asartepe civarında oldukça geniş bir alanda yayılım göstermektedir. Ancak amorf silika oluşumlarının Asartepe civarındaki kalınlığı açık bir biçimde gözlenmemektedir. Bu bağlamda Değirmenderesi-Asartepe arasında süreklilik gösteren formasyonun ortalama kalınlığı olarak, Değirmenderesi mostrasında ölçülen kalınlık değerlerinin aritmetik ortalaması olan 6 m kabul edilmiştir. Ancak yatağın büyük bölümünün Asartepe civarındaki alanda yüzleklenmesi ve bu alanda kalınlığa ilişkin belirgin bir gözlem veya ölçüm yapılamaması nedeniyle yöredeki amorf silika potansiyeli mümkün rezerv kategorisinde ele alınmıştır (Gümüş, 1988). Çizelge 4.5’de verilen Değirmenderesi-Asartepe amorf silika yatağı sınır koordinat değerleri kullanılarak, rezerv alanı (S_I) ve rezerv alanı içerisinde kalan kireçtaşı formasyonunun kapladığı alan (S_{II}) değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4.8).

Çizelge 4.4. Kumludere amorf silika yatağı rezerv hesabı

Alan Hesabı					
(*) ... S = [((Y ₁ *X ₂)+(Y ₂ *X ₃)+ ... +(Y _n *X _{n+1}))-((Y ₂ *X ₁)+(Y ₃ *X ₂)+ ... +(Y _{n+1} *X _n))] * 0,5					
S _{H-I}	(*)	6.029,5 m ²	S _{H-II}	(*)	5.057,5 m ²
α _{I-1}	tan ⁻¹ [(h _n -h _{n-1})/(l _n -l _{n-1})]	25,0°	α _{I-II}	tan ⁻¹ [(h _n -h _{n-1})/(l _n -l _{n-1})]	12,7°
α _{I-2}	tan ⁻¹ [(h _n -h _{n-1})/(l _n -l _{n-1})]	39,6°	α _{II-2}	tan ⁻¹ [(h _n -h _{n-1})/(l _n -l _{n-1})]	16,3°
α _{I-3}	tan ⁻¹ [(h _n -h _{n-1})/(l _n -l _{n-1})]	29,8°	α _{II-3}	tan ⁻¹ [(h _n -h _{n-1})/(l _n -l _{n-1})]	25°
α _{I (ort.)}	α _I =(α _{I-1} +α _{I-2} +α _{I-3})/3	31,5°	α _{II (ort.)}	α _{II} =(α _{II-1} +α _{II-2} +α _{II-3})/3	18°
h _{gr}	Ölçülen	15,5 m	h _{gr}	Ölçülen	15,5
h _{gk-I}	h _{gk-I} =h _{gr} * cos α _I	13,2 m	h _{gk-II}	h _{gk-II} =h _{gr} * cos α _{II}	14,7 m
S _{R-I}	S _{R-I} =S _{H-I} /cos α _I	7.071,6 m ²	S _{R-II}	S _{R-II} =S _{H-II} /cos α _{II}	5.317,8 m ²
Rezerv Hesabı					
V _I	V _I =(h _{gk-I})*(S _{R-I})	93.345,1 m ³	V _{II}	V _{II} =(h _{gk-II})*(S _{R-II})	78.171,7 m ³
ρ _{ort.}	Hesaplanan	1,05 gr/cm ³	ρ _{ort.}	Hesaplanan	1,05 gr/cm ³
M _I	M _I =V _I * ρ _{ort.}	98.012,4 ton	M _{II}	M _{II} =V _{II} * ρ _{ort.}	82.080,2 ton
M _T	M _T =M _I +M _{II}	180.092,6 Ton			

Çizelge 4.5. Değirmenderesi-Asartepe amorf silika yatağı sınır koordinat değerleri

Değirmenderesi-Asartepe Amorf Silika Yatağı Sınır Koordinatları								
Nokta No	Y (Sağa)	X (Yukarı)	Nokta No	Y (Sağa)	X (Yukarı)	Nokta No	Y (Sağa)	X (Yukarı)
1	63784	5892	26	64830	6082	51	64331	5326
2	63781	5978	27	64820	6003	52	64315	5197
3	63897	6009	28	64766	5799	53	64227	5187
4	63947	6063	29	64882	5601	54	64126	5243
5	64035	6104	30	64789	5267	55	64044	5279
6	64096	6099	31	64786	5150	56	64003	5360
7	64154	6051	32	64824	4872	57	63935	5336
8	64218	6038	33	64824	4872	58	63848	5374
9	64264	6063	34	64885	4616	59	63845	5550
10	64263	6142	35	64903	4403	60	63823	5737
11	64335	6140	36	64841	4665	Kireçtaşı Bloğu		
12	64392	6294	37	64754	4941			
13	64341	6246	38	64735	5129	61	64198	5617
14	64340	6297	39	64746	5371	62	64260	5596
15	64337	6350	40	64739	5570	63	64269	5528
16	64415	6398	41	64680	5755	64	64280	5472
17	64380	6330	42	64662	5822	65	64281	5420
18	64415	6279	43	64611	5810	66	64231	5395
19	64488	6255	44	64572	5747	67	64203	5329
20	64513	6194	45	64615	5588	68	64167	5298
21	64666	6203	46	64619	5448	69	64104	5354
22	64762	6228	47	64558	5438	70	64075	5433
23	64784	6342	48	64470	5429	71	64072	5488
24	64835	6281	49	64393	5492	72	64100	5547
25	64819	6196	50	64378	5366	73	64135	5599



Şekil 4.8. Değirmenderesi-Asartepe amorf silika yatağına ait rezerv alanı sınır haritası

Çizelge 4.6'daki veriler dikkate alındığında, Değirmenderesi-Asartepe civarındaki amorf silika oluşumlarına ait mümkün rezerv 5.419.300 ton olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.6. Değirmenderesi-Asartepe amorf silika yatağı mümkün rezerv hesabı

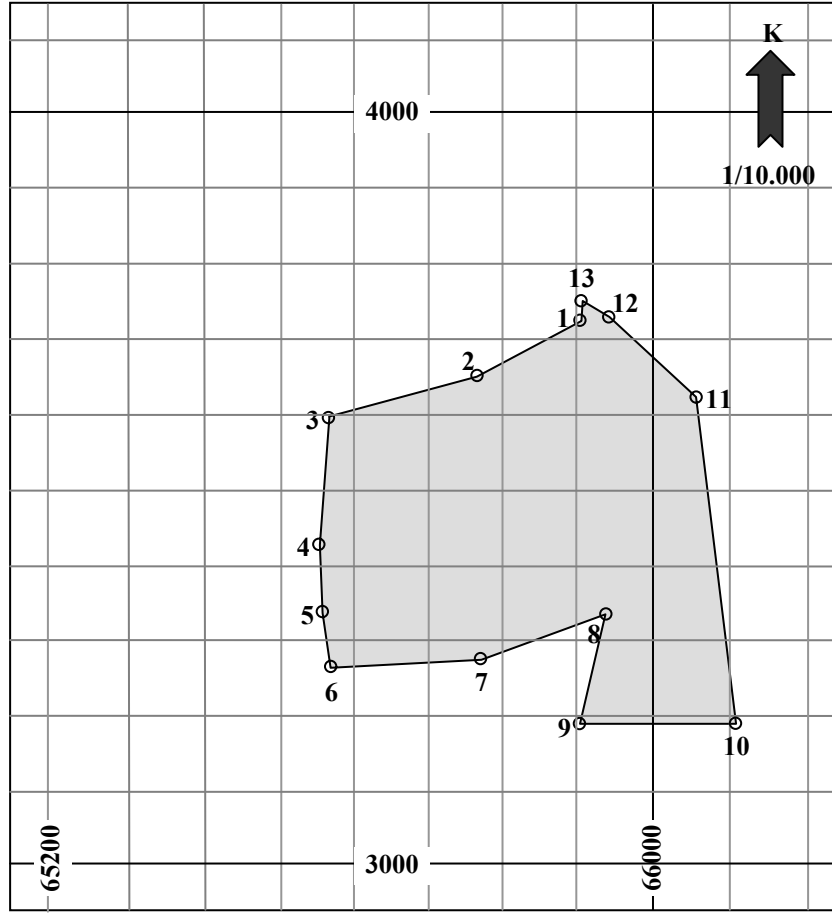
Alan Hesabı					
$(^*) \dots S = [((Y_1 * X_2) + (Y_2 * X_3) + \dots + (Y_n * X_{n+1})) - ((Y_2 * X_1) + (Y_3 * X_2) + \dots + (Y_{n+1} * X_n))] * 0,5$					
S_I	(*)	805.334 m ²	S_{II}	(*)	46.328 m ²
h_I	Beklenen	6 m			
(Mümkün) Rezerv Hesabı					
V_I	$V_I = (S_I * S_{II}) * (h_I)$	4.554.036 m ³			
ρ_{ort.}	Hesaplanan	1,19 gr/cm ³			
M_I	$M_I = V_I * \rho_{ort.}$	5.419.300 ton			

II. lokasyon (İrepdere-Bebbeşdere) amorf silika kayacı, I. lokasyon kayacından farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olup, amorf silika oluşumları bindirme hattının güneyinde yer alan alanı kapsar (Şekil 4.3). Bölgede amorf silika oluşumunun kalınlığının net bir biçimde ölçümlenebileceği yarma veya çukur yoktur. Ancak İrepdere ve Bebbeşderesi içerisinde açığa çıkan amorf silika mostrasının gözlemlenen kalınlığı yaklaşık 5 m dir (Gümüş, A., 1988).

Çizelge 4.7'de verilen II. lokasyon amorf silika yatağı sınır koordinat değerleri kullanılarak, rezerv alanı (S_I) hesaplanmıştır (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.7. İrepdere amorf silika yatağı sınır koordinat değerleri

İrepdere Amorf Silika Yatağı Sınır Koordinatları					
Nokta No	Y (Sağa)	X (Yukarı)	Nokta No	Y (Sağa)	X (Yukarı)
1	65905	3727	8	65939	3304
2	65765	3649	9	65908	3190
3	65625	3598	10	66108	3190
4	65546	3433	11	66058	3626
5	65569	3347	12	65940	3736
6	65599	3267	13	65910	3757
7	65769	3276			



Şekil 4.9. İrepdere (II. lokasyon) amorf silika yatağına ait rezerv alanı sınır haritası

Çizelge 4.8. İrepdere (II lokasyon) amorf silika yatağı mümkün rezerv hesabı

Alan Hesabı		
(*) ... $S = [((Y_1 * X_2) + (Y_2 * X_3) + \dots + (Y_n * X_{n+1})) - ((Y_2 * X_1) + (Y_3 * X_2) + \dots + (Y_{n+1} * X_n))] * 0,5$		
S_I	(*)	343.505 m ²
h_I	Beklenen	5 m
(Mümkün) Rezerv Hesabı		
V_I	$V_I = (S_I) * (h_I)$	1.717.525 m ³
$\rho_{ort.}$	Hesaplanan	1,27 gr/cm ³
M_I	$M_I = V_I * \rho_{ort.}$	2.181.256 ton

Çizelge 4.8'deki veriler dikkate alındığında, İrepdere civarındaki amorf silika oluşumlarına ait mümkün rezerv 2.181.256 ton olarak hesaplanmıştır.

Bu rezerv verilerine göre, Keçiborlu yöresi I. lokasyon bölgesinde 180.092,6 tonu görünür ve 5.419.300 tonu mümkün rezervli olmak üzere yaklaşık 5.599.392 ton mineral katkı maddesi olarak kullanılabilir amorf silika ve 2.181.256 ton mümkün rezervli hafif agrega olarak kullanılabilir amorf silika potansiyeli bulunmaktadır.

4.1.3.2. İşletme Durumu

Keçiborlu kükürt ruhsatlı saha içerisinde, Kumludere eski kükürt ocağı güney doğusunda kalan amorf silika rezervi, Etibank Keçiborlu Kükürt İşletmesi'nce 1990 yılına kadar "kuvarsit" olarak işletilmiş ve işletme alanı kuvarsit maden ocağı olarak tanımlanmıştır. Keçiborlu Kükürt İşletmesi kapatıldıktan sonra 1997 yılına kadar atıl kalan rezerv, 1997 yılından 2003 yılına kadar, ISBAŞ A.Ş. bünyesinde faaliyet gösteren Beril Madencilik Ltd. Şti.'nce "diatomit madeni" olarak aralıklarla işletilmiştir (Etiholding, 1988-2000). Değirmenderesi-Asartepe ve İrepdere olarak adlandırılan diğer rezerv alanlarında ise herhangi bir arama ve işletme faaliyetinde bulunulmamıştır.

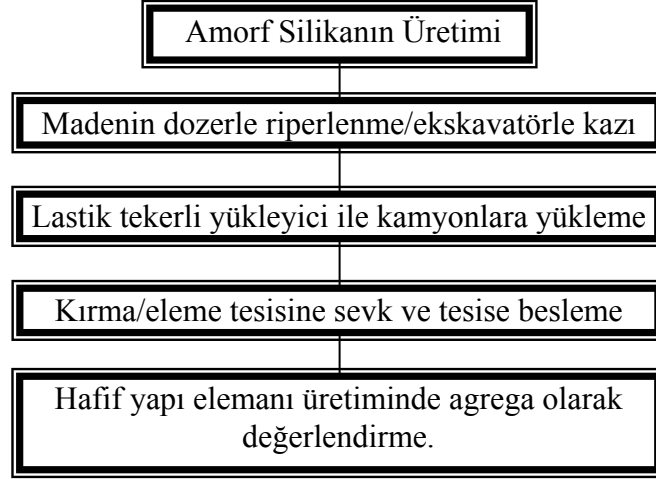
Kumludere mevkiinden diatomit madeni adıyla 1997-2003 yılları arasında toplam 7.864 ton amorf silika üretimi gerçekleştirilmiştir. Yıllara göre üretim durumu Çizelge 4.9' da verilmiştir (Etiholding, 1988-2000).

Çizelge 4.9. Kumludere mevki amorf silikanın üretim durumu

Yıllar	Üretim Miktarı (Ton)
1997	Yok
1998	1852
1999	4349
2000	1663
2001	yok
2002	yok
2003	yok

İşletme yapılan sahada açık işletme yöntemi uygulanmıştır. Amorf silika kayacı gevrek ve kolay kazılabilir olduğundan işletme esnasında patlayıcı madde kullanımı

gerekmemiştir. Cevher üst örtüsü bulunmadığı için ekskavatör ile gevşetilen veya dozer ile ripetlenen kayaç, lastik tekerlekli yükleyici ile kamyonlara yüklenerek, Isbaş A.Ş. Hafif Yapı Elemanları üretim tesisine sevk edilmiştir. Burada kırılıp sınıflandırılan amorf silika (0 mm ile -16 mm arası boyutta), hafif yapı elemanı üretiminde hafif agrega olarak kullanılmıştır (Şekil 4.10) (Etiholding, 1988-2000).



Şekil 4.10. Isbaş A.Ş.'nce (diatomit olarak adlandırılan) amorf silikanın üretim ve kullanımı

4.2. Keçiborlu Amorf Silika Kayacının Teknolojik Özellikleri

Keçiborlu yöresi I. ve II. lokasyona amorf silika kayaçları, açık renkleri ve hafiflikleri ile yöredeki diğer kayaçlardan hemen ayırt edilmektedir. Gözle ve lupla fark edilemeyen, mikro ölçekteki gözenekli yapısı, amorf silika kayacına yüksek porozite özelliği ve su emme kabiliyeti kazandırmaktadır. Ayrıca mevcut gözenek yapısından dolayı kayacın ısı iletkenlik değeri oldukça düşüktür. Amorf silikanın bu özelliği, ona ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirlik avantajı da sağlamaktadır.

Lokasyonlara göre Keçiborlu yöresi amorf silika kayacının genel fiziksel özellikleri Çizelge 4.10`de verilmiştir.

Çizelge 4.10. I. ve II. lokasyon amorf silika kayacının genel fiziksel özellikleri

Kayaç Fiziksel Özellikleri	I. lokasyon	II. lokasyon
Renk	Açık krem, sarımsı beyaz.	Krem, açık gri.
Sertlik (Mohs)	5,5-6	5-5,5
Gerçek Özgül Ağırlık	2,39 gr/cm ³	2,55 gr/cm ³
Birim Hacim Ağırlığı (Orijinal kayaç) (% 100 kuru halde-ort.)	1050-1190 kg/m ³	1270 kg/m ³
Görünür Porozite	% 45	% 34
Su Emme (ağırlıkça)	% 50	% 24
Isı İletkenlik Değeri (λ)	0,11-0,13 W/m.K.	0,13-0,15 W/m.K.

4.2.1. Fiziksel Analiz Bulguları

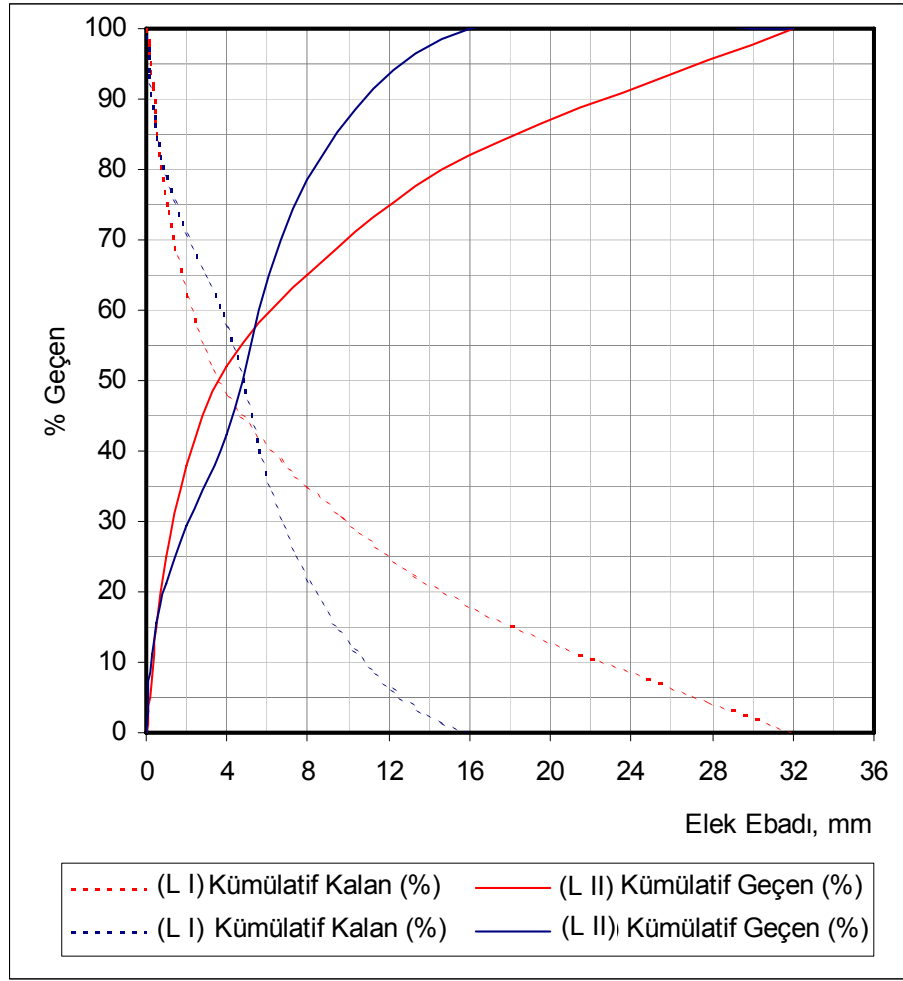
4.2.1.1. Tane Boyut Dağılımı

Bu bölüm kapsamında Keçiborlu Kumludere-Değirmenderesi-Asartepe (I. lokasyon) ve İrepdere (II. lokasyon) mevkieinden alınan amorf silika kayaç numunelerinin hafif betonda kullanılabilirliğine yönelik agrega özellikleri araştırılmıştır. I. ve II. lokasyondan alınan kayaç numuneleri, İsbaş A.Ş. kırma eleme tesisine nakledilerek, tesisdeki darbeli kırıcıda < 32 mm boyutuna kırılmıştır. Kırıcı çıkışından karışık agrega olarak alınan numuneler, S.D.Ü. Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezinde

konileme - dörtleme yöntemiyle bölünerek (TS 1114) azaltılmış, azaltılan numunelerin titreşimli elek ile boyut tasnifi yapılarak, tane büyüklüğü dağılımı belirlenmiştir (Çizelge 4.11, Şekil 4.11) (TS 3530).

Çizelge 4.11. Amorf silika agregası granülometrik özellikleri

Kayaç	Elek Açıklığı (mm)	Deney Sırasında		Hesaplanan	
		Elek Üstünde Kalan (gr)	Elek Üstünde Kalan Kümülatif (gr)	Elek Üstünde Kalan Kümülatif (%)	Elekten Geçen Kümülatif (%)
I. lokasyon	32	0,00	0,00	0	100,00
	16	1495,83	1495,83	18,29	81,71
	8	1359,57	2855,40	34,91	65,09
	4	1073,73	3929,13	48,03	51,97
	2	1152,33	5081,45	62,12	37,88
	1	1055,58	6137,03	75,02	24,98
	0,5	830,73	6967,76	85,18	14,82
	0,25	566,67	7534,43	92,10	7,90
	0,125	368,88	7903,31	96,61	3,39
	0,063	148,77	8052,08	98,43	1,57
	Kalan	128,22	8180,30	100	0,00
II. lokasyon	32	0,00	0,00	0	100,00
	16	0,00	0	0	100
	8	1757,08	1757,08	21,56	78,44
	4	2937,92	4695,00	57,61	42,39
	2	1065,83	5760,83	70,69	29,31
	1	666,40	6427,24	78,86	21,14
	0,5	459,62	6886,86	84,50	15,50
	0,25	357,63	7244,48	88,89	11,11
	0,125	408,45	7652,93	93,90	6,10
	0,063	243,26	7896,19	96,89	3,11
	Kalan	253,52	8149,71	100	0



Şekil 4.11. Amorf silika (< 32 mm kırılmış) agrega granülometri eğrileri

TS 1114 (hafif agregalar-beton için) standardında belirtilen 0/32 ve 0/16 mm karışık tane sınıfında kare gözlü elekten (TS 1226,1227) geçen ince tane boyut oranına bir sınırlama getirilmemiş, ancak uygulayıcı tarafından 0,25 mm tane boyutunun gerektiğinde sınırlanabileceği belirtilmiştir. 8 mm ve üzeri tane boyutunda ise 0-16 mm karışık agrega için kırılmış agreganın 16 mm elekten en az % 90'ının 31,5 mm elekten ise % 100'ünün geçmesi istenmiştir. < 32 mm karışık agregada ise kırılmış agreganın 31,5 mm'lik elekten en az % 90'ının, 63 mm elekten tamamının geçmesi öngörülmektedir (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.12. Hafif agregaların tane büyüklüğü dağılımı (Granülometrik bileşim- TS 1114)

Tane Sınıfları		Kare Gözlü ve kare delikli elekten geçen %									
		TS 1227 kare gözlü elek göz açıklıkları (mm)					TS 1226 kare delikli elek delik açıklıkları (mm)				
		0,12	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63
Karışık	0/8	-	-	-	-	-	-	≥ 90	100	-	-
Agrega	0/16	-	*	-	-	-	-	-	≥ 90	100	-
	0/32	-	-	-	-	-	-	-	-	≥ 90	100

(*) Gerektiğinde sınırlanabilir.

Şekil 4.11’de verilen I ve II. lokasyon kırılmış amorf silika agregalarının ve ortalama tane boyut dağılım grafiklerinde, her iki numune grubunun birbirinden oldukça farklı granülometrik dağılım arz ettiği görülmektedir. Kimyasal ve fiziksel özellikleri farklı I. ve II. lokasyon kayaçlarının, kırılma karakteristikleri de farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, her iki lokasyona ait kırılmış amorf silika agregaları, Çizelge 4.12’de öngörülen granülometrik bileşim tanımına uymaktadır.

I ve II. lokasyon için < 32 mm kırılmış amorf silika agregasında iri (-32 mm / + 4 mm) ve ince (- 4 mm) tane grupları ağırlıkça dağılım oranları;

	İri	İnce
I. lokasyon	% 48,03	% 51,97
II. lokasyon	% 57,61	% 42,39

şeklindedir.

4.2.1.2. Gevşek ve Sıkışık Kuru Birim Hacim Ağırlığı

Kırılmış amorf silika agregaları, gevşek ve sıkışık kuru birim hacim ağırlığı analiz bulguları Çizelge 4.13’de verilmiştir. I. ve II. lokasyon kayaçlarına ait (optimum kullanılabilir üst boyut olan) < 16 mm kırılmış agregalarının gevşek ve sıkışık kuru birim hacim ağırlık değerleri, TS 1114 standardı “hafif agreganın birim ağırlıkları” maddesinde öngörülen “karışık agreganın maksimum gevşek birim ağırlığı” değerinin altında kalmaktadır (Çizelge 4.14). Ancak I. lokasyon kayacı diğerine göre daha hafiftir.

Çizelge 4.13. I. ve II. lokasyon kırılmış amorf silika agregaları gevşek ve sıkışık kuru birim hacim ağırlıkları

Numune No	Tane Boyutu (mm)	Amorf silika kuru birim hacim ağırlık- B.H.A. (kg/m ³)					
		Gevşek Birim Hacim Ağırlık			Sıkışık Birim Hacim Ağırlık		
		Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	K.B.H.A. (kg/m ³)	Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm ³)	K.B.H.A. (kg/m ³)
I. lokasyon	> 16	1389,25	2925	474,959	1546,84	2925	528,835
	16 - 8	1315,77	2925	449,835	1426,48	2925	487,686
	8 - 4	1262,83	2925	431,736	1348,76	2925	461,116
	4 - 2	1238,29	2925	423,347	1349,73	2925	461,446
	2 - 1	1371,56	2925	468,909	1559,10	2925	533,025
	1-0,5	1375,91	2925	470,397	1507,03	2925	515,223
	0,5-0,25	1350,72	2925	461,785	1493,20	2925	510,496
	0,25-0,125	1371,34	2925	468,835	1510,46	2925	516,397
	0,125-0,063	1477,13	2925	505,000	1586,44	2925	542,372
	<0,063	1601,84	2925	547,636	1817,34	2925	621,314
II. lokasyon	16 - 8	2174,36	2925	743,369	2498,55	2925	854,205
	8 - 4	2264,87	2925	774,314	2438,99	2925	833,845
	4 - 2	2339,47	2925	799,816	2468,14	2925	843,806
	2 - 1	2394,25	2925	818,546	2591,55	2925	885,996
	1-0,5	2516,44	2925	860,325	2724,36	2925	931,405
	0,5-0,25	2672,17	2925	913,451	2817,04	2925	963,091
	0,25-0,125	2642,60	2925	903,451	2865,82	2925	979,768
	0,125-0,063	2730,06	2925	933,358	2999,96	2925	1025,629
	< 0,063	2856,27	2925	976,505	3230,02	2925	1104,280

Çizelge 4.14. Keçiborlu (I. ve II. lokasyon) <16 mm grubu kırılmış agregalarının TS 1114’ de öngörülen “maksimum karışık hafif agrega birim hacim ağırlığı” değeri ile karşılaştırılması

Agrega Sınıfı		TS 1114’e göre karışık agrega	A.S. kırılmış agregası (< 16mm)	
		Kuru Gevşek B.H.A. (Maks.- kg/m ³)	Kuru Gevşek B.H.A. (kg/m ³)	Kuru Sıkışık B.H.A. (kg/m ³)
I	İri	1000	473,708	516,000
	İnce	1200	500,749	578,954
II	İri	1000	794,977	884,217
	İnce	1200	928,708	1007,806

Çizelge 4.14.’de açıkça görüldüğü gibi I. ve II. lokasyonlara ait amorf silika (<16 mm kırılmış) agregaları hem gevşek hem de sıkışık birim hacim ağırlıkları, TS 1114 standardında öngörülen maksimum gevşek birim ağırlığı standardına uygunluk taşımaktadır.

4.2.1.3. İnce Madde Miktarı

Karışık agrega gruplarının ince “madde oranı tayini” deney bulgu ve sonuçları çizelge 4.15.’de verilmiştir.

Çizelge 4.15. <16 mm grubu amorf silika karışık agregalarında ince madde oranı tayini deney bulgu ve sonuçları (TS 3527)

Lokasyon	Yıkama öncesi kuru numune ağırlığı (gr)	8.0 mm`lik elek üstünde kalan numune (gr)	4.0 mm`lik elek üstünde kalan numune (gr)	1.0 mm`lik elek üstünde kalan numune (gr)	0.063 mm`lik elek üstünde kalan numune (gr)	Toplam Elek Üstünde kalan numune (gr)	0.063 mm`lik elekten geçen malzeme yüzdesi (%)
I	1006,20	221,13	127,76	256,20	199,83	804,92	20,00
II	1000,01	204,37	328,92	205,94	174,6	913,83	8,62

I. ve II. lokasyon kayaçlarına ait kırılmış (< 16 mm) agregaların ince madde oranı, TS 1114 standardında öngörülen maksimum ince madde oranına (ağırlıkça maksimum % 5) uygun olmadığı belirlenmiştir.

Bu analiz sonuçlarına özellikle I. lokasyon amorf silika oluşumlarının gevrek ve kolay kırılabilir kayaç yapısına sahip olması nedeniyle, madencilik (kazı ve yükleme) faaliyetleri ve kırma işlemi esnasında aşırı derecede ufalandığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte II. lokasyon kayacının da ince madde oranı mevcut standartların oldukça üzerindedir.

Bu hafif beton ve hafif betondan imal edilen yapı elemanları üretiminde istenilmeyen bir durumdur. Ancak işletme esnasında gerekli tedbirlerin alınması, uygun kırıcı tipi, devri, plaka ayarlarının seçilerek yeterli elemanın yapılması durumunda arzu edilen granülometrinin sağlanarak II. lokasyon amorf silika kayacının ince madde oranının standartta öngörülen limitlerin altına çekilmesi mümkündür.

4.2.1.4. Birim Hacim Ağırlık (Dh), Doygun Yüzey Birim Hacim Ağırlık (Dh_d), Görünür Birim Hacim Ağırlık (Dh_g) ve Özgül Ağırlık (Do)

Birim ağırlık, gevşek/sıkışık birim hacim ağırlığından farklı bir kayaç/agrega fiziksel özellik kavramıdır. Hafif agregaların birim ağırlığı, agreganın tanelerinin belli bir hacmi doldurduğunda (agrega gözenekleri dahil, agreganın taneleri arasındaki boşluklar hariç), doldurduğu hacmin ağırlığıdır.

Birim ağırlık tayini için TS 3526 standardında belirtilen miktarlarda her iki bölgeye ait numuneler hazırlanarak (Çizelge 4.16) yapılan analizlerde, amorf silika karışık agregaları dh, dh_d, dh_g, ve do hesaplamalarında aşağıda verilen eşitlikler kullanılmış, deney bulgu ve sonuçları Çizelge 4.17’ de verilmiştir.

Çizelge 4.16. Birim ağırlık tayini için deney numunesi miktarı (TS 3526)

En Büyük Tane Boyutu (mm)	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Numune Miktarı (kg)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,5	2	3

- Birim ağırlık : $dh = W_1 / (W_2 + W_4 - W_3)$
- Doygun kuru yüzey birim ağırlık : $dh_d = W_2 / (W_2 + W_4 - W_3)$
- Görünür birim ağırlık : $dh_g = W_1 / (W_1 + W_4 - W_3)$

Bu eşitliklerde geçen;

W₁ : Numunenin etüvde kurutulmuş ağırlığı (gr),

W₂ : Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (gr),

W₃ : “Ölçü kabı + su + numune” toplam ağırlığı (gr),

W₄ : 500 ml çizgisine kadar su ile dolu ölçü kabı ağırlığıdır (gr).

Çizelge 4.17. I. ve II. lokasyon amorf silika agregalarının “birim hacim ağırlık, doygun kuru yüzey birim ağırlık ve görünür birim ağırlık” deney bulgu ve sonuçları

	Tane Boyutu		W (gr)	dh (gr/cm ³)	dh _d (gr/cm ³)	dh _g (gr/cm ³)
I. lokasyon	32-16 mm	1	192,2	0,830	1,254	1,440
		2	290,2			
		3	767,3			
		4	708,6			
	16 - 8 mm	1	114,4	1,004	1,470	1,882
		2	167,6			
		3	756,3			
		4	702,7			
	8 - 4 mm	1	115,2	1,067	1,449	1,727
		2	156,4			
		3	705,5			
		4	657,0			
	4 – 2 mm	1	74,7	1,190	1,594	1,997
		2	100,1			
		3	743,3			
		4	706,0			
	2 – 1 mm	1	52,8	1,198	1,565	1,892
		2	68,9			
		3	728,2			
		4	703,3			
1 - 0,5 mm	1	28,4	1,108	1,394	1,552	
	2	35,7				
	3	673,5				
	4	663,4				
II. lokasyon	16 - 8 mm	1	100,1	1,465	1,796	2,190
		2	122,7			
		3	834,6			
		4	780,2			
	8 - 4 mm	1	100,1	1,426	1,770	2,173
		2	124,2			
		3	983,7			
		4	929,7			
	4 – 2 mm	1	50,1	1,485	1,833	2,278
		2	61,8			
		3	934,6			
		4	906,5			
	2 – 1 mm	1	50,1	1,528	1,874	2,337
		2	61,4			
		3	808,8			
		4	780,2			
	1-0,5 mm	1	50,1	1,514	1,925	2,572
		2	63,67			
		3	938,2			
		4	907,6			

Özgül ağırlık (ρ) ise agrega tanelerinin işgal ettiği gerçek birim hacimdeki ağırlık değeridir. Deney bulgularından, amorf silika numunelerine ait özgül ağırlık değeri

(ρ) aşağıdaki eşitlikle belirlenmiş olup, deney bulgu ve sonuçları Çizelge 4.18.'de verilmiştir.

$$\bullet \text{ Özgül ağırlık} \quad : \quad \rho = (M_{pn}-M_p) / [(M_{pn}-M_p) - (M_{pns}-M_s)]$$

Bu eşitlikte geçen;

M_{pn} : “Piknometre + deney numunesi” toplam ağırlığı (gr),

M_p : Piknometre ağırlığı (gr),

M_{pns} : “Piknometre + su + numune” toplam ağırlığı (gr),

M_s : Su ile dolu piknometre ağırlığıdır (gr).

Çizelge 4.18. I. ve II. lokasyon amorf silika özgül ağırlık deney bulgu ve sonuçları

Lokasyon	Deney No	Mp	Mpn	Mpns	Ms	ρ	$\rho_{Ort.}$
I	1	164,61	189,53	691,03	676,82	2,33	2,39
	2	128,52	178,90	520,89	491,24	2,43	
	3	176,39	228,37	708,72	678,34	2,41	
II	1	36,10	48,05	143,32	136,12	2,52	2,55
	2	36,10	48,87	143,89	136,12	2,55	
	3	36,10	46,70	142,60	136,12	2,57	

4.2.1.5. Su Emme Miktarı

Hafif agregaların, hafif beton ve yalıtım betonu agregası olarak kullanımı söz konusu olduğunda, beton karışım hesaplamalarında kullanılacak olan hafif agreganın su emme oranı değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Hafif agrega su emme oranı (M_t) değerleri aşağıdaki eşitlik yardımıyla tanımlanabilmektedir:

$$\% M_t = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 100$$

Eşitlikte geçen ;

W_1 : Numunenin etüvde (105°C de değişmez ağırlığa kadar) kurutulmuş ağırlığı (gr),

W_2 : Numunenin doygun kuru yüzey ağırlığıdır (gr).

I. ve II. lokasyon kırılmış amorf silika agregalarının tane boyut sınıfına göre 30 dakikalık ve 24 saatlik su emme oranları Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20’de verilmiştir.

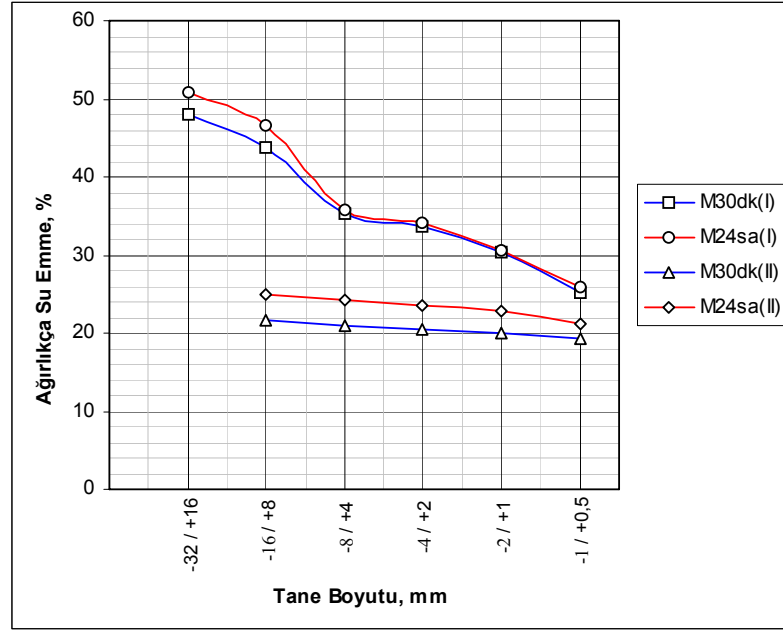
Çizelge 4.19. I. lokasyon amorf silika agregası ağırlıkça su emme deneyi sonuçları

Deney No:	Tane Boyutu (mm)	W1 (gr)	W2 _{30dk} (gr)	W2 _{24sa} (gr)	%M _{30dk}	%M _{30dk} (Ort.)	%M _{24sa}	%M _{24sa} (Ort.)
1	>16	32,298	43,911	44,718	35,956	48,106	38,454	50,918
2	>16	30,868	43,319	44,138	40,336		42,990	
3	>16	29,534	46,317	47,420	56,826		60,561	
4	>16	29,946	47,230	47,966	57,717		60,175	
5	>16	31,672	47,412	48,272	49,697		52,412	
1	-16+8	32,260	45,202	45,424	40,118	43,740	40,806	46,518
2	-16+8	31,597	45,538	46,592	44,121		47,457	
3	-16+8	30,478	43,692	44,946	43,356		47,470	
4	-16+8	31,169	45,065	45,994	44,583		47,563	
5	-16+8	30,938	45,331	46,188	46,522		49,292	
1	-8+4	31,395	42,828	42,845	36,417	35,405	36,471	35,784
2	-8+4	32,866	44,540	44,795	35,520		36,296	
3	-8+4	30,243	40,297	40,340	33,244		33,386	
4	-8+4	31,892	43,781	42,870	37,279		37,422	
5	-8+4	31,340	42,172	42,416	34,563		35,343	
1	-4+2	30,994	40,668	40,758	31,212	33,645	31,502	34,030
2	-4+2	30,604	40,588	40,755	32,623		33,169	
3	-4+2	30,889	40,135	40,307	29,933		30,489	
4	-4+2	30,541	42,176	42,282	38,096		38,445	
5	-4+2	30,903	42,139	42,196	36,359		36,543	
1	-2+1	31,168	40,100	40,384	28,658	30,257	29,569	30,655
2	-2+1	15,487	20,707	20,803	33,706		34,328	
3	-2+1	16,232	19,899	19,904	22,591		22,623	
4	-2+1	16,231	21,834	21,938	34,520		35,162	
5	-2+1	16,777	22,114	22,245	31,811		32,592	
1	-1+0,5	30,145	37,989	38,043	26,021	25,212	26,200	25,836
2	-1+0,5	16,967	21,429	21,517	26,298		26,815	
3	-1+0,5	15,275	19,021	19,077	24,524		24,894	
4	-1+0,5	16,903	20,730	20,839	22,639		23,286	
5	-1+0,5	16,600	21,012	21,036	26,578		26,723	

Çizelge 4.20. II. lokasyon amorf silika agregası ağırlıkça su emme deneyi sonuçları

Deney No	Tane Boyutu (mm)	W1 (gr)	W2 _{30dk} (gr)	W2 _{24sa} (gr)	%M _{30 dk}	%M _{30 dk} (Ort.)	%M _{24 sa}	%M _{24 sa} (Ort.)
1	-16+8	100,13	130,553	136,844	23,316	21,663	26,842	24,982
2	-16+8	100,072	125,636	135,659	20,348		26,233	
3	-16+8	100,098	127,295	133,262	21,365		24,886	
4	-16+8	100,055	129,568	132,075	22,778		24,244	
5	-16+8	100,104	125,930	129,511	20,508		22,706	
1	-8+4	100,040	125,660	133,249	20,388	21,011	24,923	24,184
2	-8+4	100,066	128,821	130,216	22,322		23,154	
3	-8+4	100,127	126,554	127,417	20,882		21,418	
4	-8+4	100,022	124,992	130,895	19,977		23,586	
5	-8+4	100,083	127,469	138,691	21,484		27,837	
1	-4+2	50,034	61,335	64,561	18,425	20,454	22,501	23,634
2	-4+2	50,086	65,680	68,139	23,742		26,494	
3	-4+2	50,104	60,934	63,826	17,773		21,499	
4	-4+2	50,092	62,212	64,906	19,482		22,824	
5	-4+2	50,069	64,898	66,627	22,850		24,852	
1	-2+1	50,086	64,518	66,844	22,369	19,951	25,070	22,802
2	-2+1	50,031	65,806	68,101	23,972		26,534	
3	-2+1	50,058	61,335	63,622	18,386		21,320	
4	-2+1	50,103	61,290	63,118	18,253		20,620	
5	-2+1	50,068	60,159	62,950	16,774		20,464	
1	-1+0,5	50,025	60,191	65,773	16,890	19,201	23,943	21,278
2	-1+0,5	50,056	60,454	66,655	17,200		24,903	
3	-1+0,5	50,083	63,167	61,220	20,713		18,192	
4	-1+0,5	50,042	61,665	61,878	18,849		19,128	
5	-1+0,5	50,112	64,540	62,816	22,355		20,224	

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi; I. lokasyon amorf silika agregalarının tane boyutu büyüdükçe 30 dakikalık ve 24 saatlik ağırlıkça su emme miktarları da artmaktadır. Buna karşın ince boyut aralığındaki amorf silika agregalarının 30 dakikalık ve 24 saatlik ağırlıkça su emme miktarları yaklaşık olarak aynıdır. II. lokasyon agregalarında ise durum farklıdır. Diğerine göre bu bölge agregalarının iri tane boyutunda ağırlıkça su emme oranları % 50 oranında daha azdır. Tane boyutu küçüldükçe 30 dakikalık ve 24 saatlik su emme miktarları arasındaki fark ise homojen biçimde devamlılık göstermektedir.



Şekil 4.12. I. ve II. lokasyon kırılmış amorf silika agregalarının tane boyutu sınıfına ve zamana bağlı ağırlıkça su emme oranları

4.2.1.6. Porozite, Kompasite ve Doyma Derecesi

Kayaç ve agregalarda için gerçek ve görünür porozite olmak üzere iki ayrı porozite tanımı söz konusudur. Görünür porozite kayaçtaki birbiriyle bağlantılı boşlukların hacminin, kayaç toplam hacmine, gerçek porozite ise toplam boşluk hacminin kayaç toplam hacmine oranının yüzde olarak ifadesidir. Amorf silika agregaları için her iki porozite değeri de belirlenmiştir. Görünür porozite değeri ve görünür kompasite (doluluk oranı) agreganın su emme oranından aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır :

$$n_0 = d_h \times M_t$$

$$k_0 = 1 - n_0$$

Eşitlikte kullanılan;

n_0 = Görünür porozite (%),

d_h = Birim hacim ağırlık (gr/cm^3),

M_t = Kütlece su emme oranı (%),

k_0 = Görünür kompasitedir (görünür doluluk oranı, %).

Gerçek porozite değeri ise agreganın ortalama hacim ağırlığı ve ortalama özgül ağırlığının bir fonksiyonudur. Gerçek porozite, gerçek kompasite ve doyma derecesi aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$n_1 = |1 - (d_h/\rho)| \times 100$$

$$k_1 = 100 - n_1$$

$$D = M_t / n_1$$

n_1 = Gerçek porozite (%),

d_h = Birim hacim ağırlık (gr/cm^3),

ρ = Özgül ağırlık (gr/cm^3),

k_1 = Gerçek kompasite (görünür doluluk oranı, %),

D = Doyma derecesidir (%).

4.2.1.7. Kızdırma Kaybı

Amorf silika taneleri üzerinde yapılan diğer bir analiz de, amorf silikanın farklı sıcaklıklarda davranışı ve ateşe dayanıklılık (kızdırma kaybı) deneyidir (TS 1114). Amorf silika (< 2 mm boyutunda) numunelerinin ateşe dayanıklılık deneyi, 1200 °C sıcaklığa ulaşabilen, ± 5 °C sıcaklık ayarlı yüksek fırın ile yapılmıştır. Numune oda sıcaklığından 1180 °C sıcaklık aralığına kadar, her bir sıcaklık aralığında, 2 saat sabit sıcaklıkta bekletilmiş ve desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Isıya dayanıklı ve tara ağırlığı belli olan porselen kroze içerisindeki, değişmez aralığa kadar kurutulmuş amorf silika numunesinin kızdırma öncesi ve sonrası ağırlıkları 1 mg hassasiyetindeki elektronik terazi ile tartılmış, kroze darası düşülerek her bir sıcaklık aralığındaki kızdırma kaybı aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenmiştir:

$$A = [(A_1 - A_2) / A_1] \times 100$$

Eşitlikte kullanılan;

A : Kızdırma kaybı (%),

A_1 : Numunenin kızdırmadan önceki kütlesi (gr),

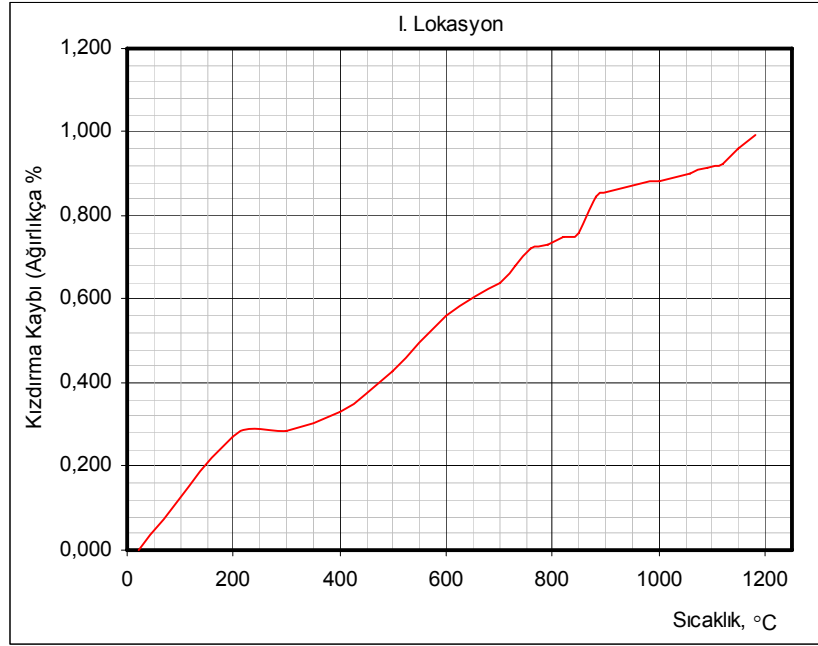
A_2 : Numunenin kızdırmadan sonraki kütlesi (gr),

Kızdırma kaybı deney bulgularından hesaplanan sonuçlar Çizelge 4.21’de verilmiştir.

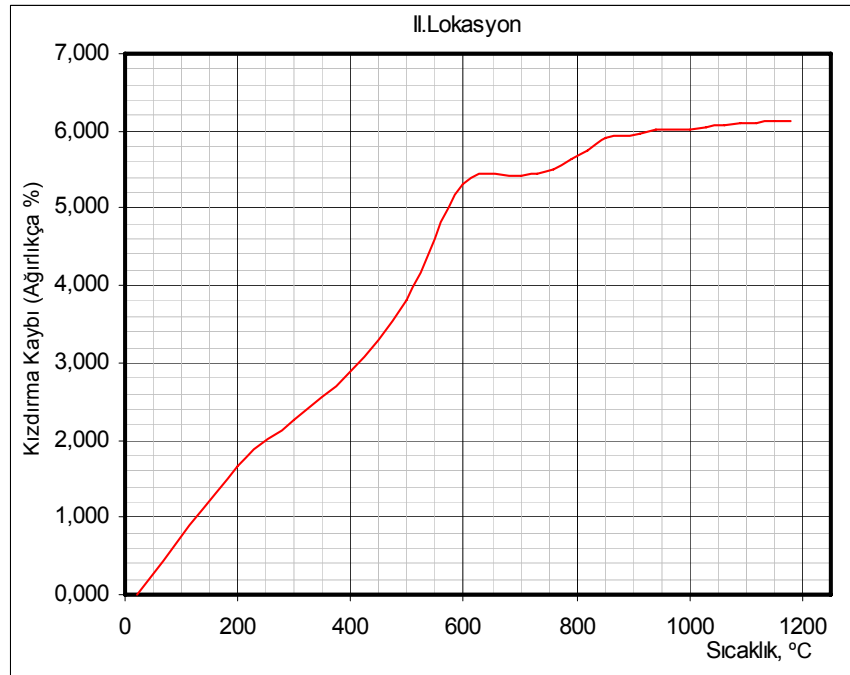
Çizelge 4.21. I. ve II. lokasyon amorf silika agregaları kızdırma kaybı deney sonuçları

Deney Sıra No	Sıcaklık (°C)	I. lokasyon		II. lokasyon	
		Agrega Ağırlığı (gr)	Kızdırma Kaybı (%)	Agrega Ağırlığı (gr)	Kızdırma Kaybı (%)
1	20	5,1277	0,0000	5,2102	0,0000
2	200	5,1138	0,2702	5,1231	1,6724
3	300	5,1132	0,2830	5,0930	2,2486
4	400	5,1107	0,3325	5,0600	2,8834
5	500	5,1057	0,4291	5,0109	3,8247
6	600	5,0989	0,5619	4,9336	5,3088
7	700	5,0950	0,6370	4,9283	5,4106
8	730	5,0927	0,6819	4,9263	5,4484
9	760	5,0907	0,7212	4,9234	5,5050
10	790	5,0902	0,7309	4,9165	5,6373
11	820	5,0894	0,7473	4,9102	5,7579
12	850	5,0888	0,7580	4,9027	5,9023
13	880	5,0843	0,8469	4,9012	5,9306
14	910	5,0836	0,8607	4,8988	5,9776
15	940	5,0831	0,8699	4,8973	6,0059
16	970	5,0828	0,8765	4,8968	6,0153
17	1000	5,0824	0,8832	4,8961	6,0279
18	1030	5,0820	0,8918	4,8953	6,0435
19	1060	5,0815	0,9010	4,8941	6,0679
20	1090	5,0809	0,9128	4,8928	6,0914
21	1120	5,0803	0,9250	4,8917	6,1124
22	1150	5,0785	0,9588	4,8910	6,1268
23	1180	5,0768	0,9925	4,8906	6,1341

Elde edilen verilerden yararlanılarak, her iki lokasyona ait amorf silika kayacının sıcaklık değişimine bağlı kütlece kızdırma kaybı oranı incelenmiş ve yapısal bozunması gözlenmiştir (Şekil 4.13 - 4.14). Bu bağlamda I. lokasyon kayacının TS 1114 standardında belirtilen 1000 °C deki kütle kaybı % 0,883, deneyde ulaşılan 1180 °C de ise % 0,993 olarak hesaplanmıştır. II. lokasyona ait kayacın 1000 °C deki kütle kaybı % 6,028, 1180 °C de ise % 6,134’dır. TS 1114 de, hafif agregalar için kütlece maksimum kızdırma kaybı % 5, TS 25 puzolan malzemeler için % 10’dur (TS 1114 ve TS 25). Bu durumda II. lokasyon amorf silika kayacının kütlece kızdırma kaybı oranı TS 1114 standardında belirtilen limitleri aşmaktadır.



Şekil 4.13. I. lokasyon amorf silikasının sıcaklık artışı - kızdırma kaybı ilişkisi



Şekil 4.14. II. lokasyon amorf silikanın sıcaklık artışı - kızdırma kaybı ilişkisi

Deneyde uygulanan sıcaklık aralıklarında (20 °C - 1180 °C arası) I. lokasyon numunesinde renk değiştirme, akma yapısı ve yapışma gibi sıcaklığa bağlı yapısal bozunma belirtileri gözlenmemiştir. Şekil 4.13 incelendiğinde, sıcaklık değişimine

bağlı yapısal bozunma, açık bir şekilde fark edilememektedir. Bununla birlikte 880 °C’de kütle kaybının oransal olarak bir miktar artış gösterdiğini, yani minimum düzeyde de olsa yapısal bozunma sürecinin bu sıcaklık eşiğinde başladığını söylemek mümkündür.

II. lokasyona ait numunenin 600 °C’de rengi pembeleşirken 1000 °C’de kahverengiye dönüşmüş, ancak 20 °C – 1180 °C arası sıcaklıklarda malzemede erime, akma ve yapışma gözlenmemiştir. Şekil 4.14 incelendiğinde, sıcaklık değişimine bağlı kütle kaybının büyük bölümünün 20 °C – 600 °C arası gerçekleştiği görülmektedir. 600 °C sıcaklık eşiğinden itibaren kayada gözlenen renk değişimi yapısal bozunma belirtisidir. Ancak deneyde ulaşılan 1180 °C’de kayada erime, akma ve kruzeye yapışma eğiliminin gözlenmemesi yapısal bozunmanın sınırlı düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. Kütlece kızdırma kaybının yüksek olması ise kayacın önemli miktarda organik madde içermesine bağlanabilir.

4.2.1.8. Partikül Boyut Dağılımı

Mineral katkı maddesinin betonda çimento hamuru ile puzolanik reaksiyona girme kabiliyeti, yüksek silis içeriği ve ince tane miktarı ile ilişkilidir. Bununla birlikte katkı maddesinin kızdırma kaybı, organik madde içeriği, Na_2O eşdeğeri ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$) alkali miktarı da beton duraylılığı açısından önemlidir (TS 2517).

Her iki lokasyona ait kayaların kimyasal özellikleri beton ve çimentoda mineral katkı maddesi olarak kullanılacak mikro silika (silis dumanı) ile ilgili yürürlükteki standartlar açısından değerlendirildiğinde, I. lokasyon kayacının standartlara uygunluk taşıdığı, II. lokasyon kayacının ise ilgili standartlarda öngörülen değerleri sağlamadığı belirlenmiştir. Bu husus dikkate alınarak, Keçiborlu amorf silika oluşumlarının betonda mineral katkı maddesi olarak değerlendirilebilirliğinin belirlenmesine yönelik analizlerde I. lokasyon kayacı kullanılmıştır.

Amorf silika kayacının betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılabilirlik analizlerinin yürütülebilmesi için Kumludere-Değirmenderesi lokasyonunu temsil edecek şekilde numune alınmıştır. Alınan numuneler laboratuarda çeneli kırıcı ile kırılmış, titreşimli eleklerle boyut tasnifi yapılmış ve < 3 mm boyutundaki ince agrega grubu 105°C lik etüvde kurularak bilyalı değirmende sabit süre, şarj ve devirde öğütülmüştür. Geleneksel beton ve hafif betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılmak üzere öğütülen amorf silikanın puzolanik aktivite ve blaine değerleri “4.2.2.2. Puzolanik Aktivite” bölümünde verilmiştir.

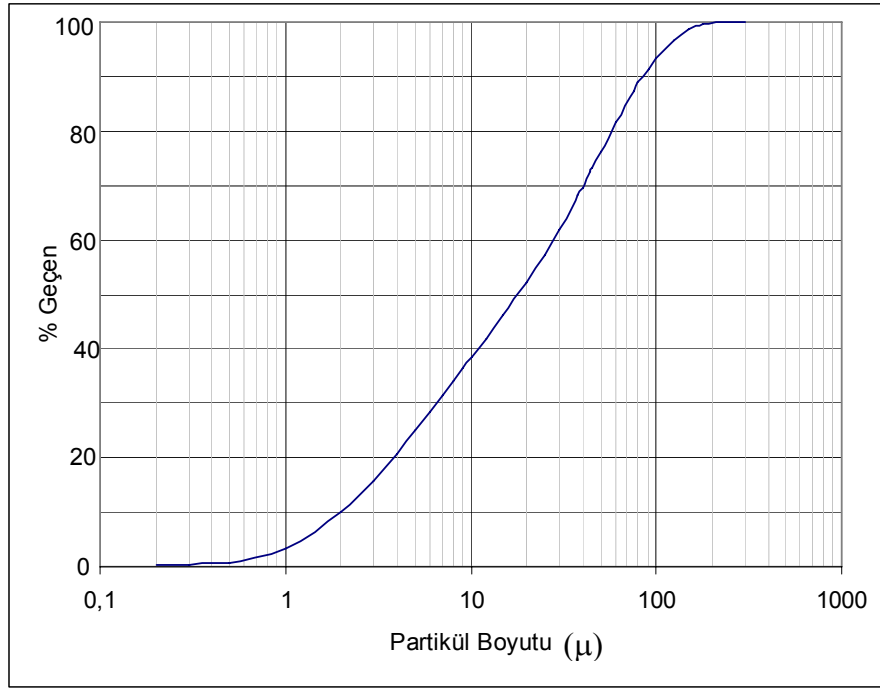
Mikronize amorf silikanın partikül boyut analizi Başer Madencilik San. Tic. A.Ş. Laboratuvarı’na yaptırılmıştır. Analiz sonucunda amorf silika partikül boyut dağılımı Çizelge 4.22.’de verilmiştir.

Çizelge 4.22. Amorf silika partikül boyutları

Partikül Boyutu (μ)	% Geçen (Hacimce)	Partikül Boyutu (μ)	% Geçen (Hacimce)
300.0	100,0	25.00	57,31
250.0	100,0	20.00	52,22
180.0	99,70	15.00	46,27
150.0	98,57	12.00	41,92
125.0	96,70	10.00	38,40
106.0	94,36	9.00	36,36
100.0	93,38	8.00	34,07
90.00	91,40	7.00	31,46
80.00	88,88	6.00	28,45
75.00	87,37	5.00	24,93
60.00	81,54	4.00	20,78
50.00	76,30	3.00	15,84
45.00	73,17	2.00	9,92
44.00	72,50	1.00	3,31
40.00	69,72	0.500	0,82
38.00	68,26	0.400	0,52
35.00	65,97	0.300	0,31
30.00	61,86	0.200	0,18

Beton dayanım katkı maddesi olarak mikronize amorf silikanın partikül dağılımı irdelendiğinde (Şekil 4.15), maksimum partikül boyutunun 222μ ve ortalama partikül boyutunun 18μ civarında olduğu görülmektedir. Partikül boyut dağılımının, özgül yüzey alanı (blaine), puzolanik aktivite ve beton içerisinde yığılma gibi beton dayanımına olumlu veya olumsuz yönde etki eden malzeme teknik parametrelerini

belirlediği bilinmektedir. Bu açıdan deneyde kullanılan mikronize amorf silikanın maksimum partikül boyutu (222μ) ve ortalama partikül boyutu (18μ), Yeni Zelanda Microsilica Ltd. Şti'nin ürünü ile karşılaştırıldığında daha iri partikül boyutuna sahiptir. Mikronize ürün partikül boyutunun $< 45 \mu$ ve ortalama partikül boyutunun 5μ civarında tasarlanması, kullanım aşamasında daha az yığışım ve daha homojen beton karışımı elde edilmesini, dolayısıyla ürünün beton dayanım, kimyasal direnç ve diğer performanslarına etkisinin artmasını sağlayacaktır.



Şekil 4.15. Mikronize amorf silika partiküllerinin boyutsal analiz grafiği

4.2.2. Kimyasal Analiz Bulguları

4.2.2.1. Kayaç Kimyasal Analizleri

Keçiborlu Kumludere-Değirmenderesi ve İrepdere yöresini temsil eden amorf silika kayaç numunelerinin kimyasal analizleri Çizelge 4.23'de verilmiştir. Çizelge 4.23. incelendiğinde, I. lokasyona ait her iki amorf silika kayacının birbirine oldukça yakın kimyasal bileşenlere sahip ve SiO_2 içeriklerinin oldukça yüksek değerler arz ettiği görülmektedir. II. lokasyon amorf silika kayacının kimyasal bileşenleri ise I.

lokasyon kayaçlarından farklılık göstermektedir. İrepdere kayacının özellikle SiO_2 içeriği daha düşük Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO ve CaO içerikleri ise yüksektir.

Çizelge 4.23. I. ve II. lokasyon amorf silikaların kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler	I. lokasyon		II. lokasyon
	Kumludere (%)	Değirmenderesi (%)	İrepdere (%)
SiO_2	92,48	90,84	61,66
Al_2O_3	2,60	2,66	18,42
TiO_2	1,34	1,24	1,03
Fe_2O_3	0,09	0,15	5,16
MgO	0,00	0,00	0,93
CaO	0,31	0,18	1,39
Na_2O	1,08	1,12	2,70
K_2O	0,04	0,09	0,95
SO_3	0,09	0,06	0,01
Diğer	0,12	0,15	1,74
A.K.	1,85	3,51	6,01

Her iki lokasyona ait kayaçların Na_2O ve K_2O alkali metal oksit bileşenleri betonda alkali-agrega reaksiyonu ve SO_3 içeriği de sülfat etkisi bakımından önem taşımaktadır. TS 1114 standardına göre hafif agregalarda sülfat içeriğinin ağırlıkça % 1'den çok olmaması istenmektedir. Sülfat içeriği bakımından her iki lokasyon kayacı TS 1114 standardına uygundur. Kayaçlar betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılabilirlik kriterleri yönünden (ASTM C 1240-03) irdelendiğinde ise İrepdere kayacının uygun niteliklere sahip olmadığı saptanmıştır (Çizelge 4.24).

Çizelge 4.24. Keçiborlu I. ve II. lokasyon amorf silika kayaçları kimyasal bileşenlerinin silis dumanı/mikrosilika standardına göre değerlendirilmesi (ASTM C1240-03)

Kayaç Kimyasal Bileşen ve Özellikleri		ASTM C 1240-03	I. lokasyon		II. lokasyon
			K.Dere	D.Deresi	İrepdere
SiO_2 (%)	En az	85	92,48	90,84	61,66
Na_2O Eşdeğeri Alkali (%)	En fazla	1.5	1,11	1,18	3,33
SO_3 (%)	En fazla	1.0	0,09	0,06	0,01
Kızdırma Kaybı (%)	En fazla	6.0	1,85	3,51	6,01

Ayrıca Çizelge 4.25'de I ve II. lokasyon kayaçları TS 639 standardına göre uçucu küllerde aranılan kimyasal özellikler ile de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.25. Keçiborlu amorf silika kayaları kimyasal bileşenlerinin uçucu küllerde aranan kimyasal özellikler ile karşılaştırılması

Kimyasal Bileşen ve Özellikler		U.K. ¹ (%)	U.K. ² (%)	I. lokasyon		II. lokasyon
				K.dere (%)	D.deresi (%)	İrepdere (%)
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	En az	70	-	95,17	93,65	85,24
MgO	En fazla	5	-	0,00	0,00	0,93
SO ₃	En fazla	5	3,0	0,09	0,06	0,01
CaO	En fazla	-	1,0	0,31	0,18	1,39
Cl ⁻ (Klorür)	En fazla	-	0,1	-	-	< 0,01
Kızdırma Kaybı	En fazla	10	5,0	1,85	3,51	6,01

TS 639 standardında (UK¹, çimentoda) geçen kimyasal özellikler ölçüt kabul edilerek Çizelge 4.25 incelendiğinde, her iki lokasyona ait amorf silika kayacı kimyasal bileşen ve özellikler açısından standardı fazlasıyla sağlamakta iken, İrepdere amorf silikası kızdırma kaybı TS EN 450 (UK², betonda) standardında öngörülen sınır değerini aşmaktadır.

4.2.2.2. Puzolanik Aktivitesi

I. lokasyon kayacına ait öğütülmüş malzemenin “Puzolanik Aktivite Deneyi” ve özgül yüzey (blaine) deneyleri Göltaş Kalite Kontrol Laboratuvarında yaptırılmış olup, bulgular Çizelge 4.26 ‘da verilmiştir (TS 25).

Çizelge 4.26. (I. lokasyon) Mikronize silikanın puzolanik aktivite ve özgül yüzey deney sonuçları

Puzolanik aktivite		
Blaine		12.124 cm ² /g
İncelik	200µ	1,8
	90µ	8,8
Özgül Ağırlık		2,32 g/cm ³
Dansite		920 g
Beton Sonuçları		
7 gün sonunda eğilme dayanımı		1,6 N/mm ²
7 gün sonunda basınç dayanımı		11,9 N/mm ²
(TS 25’e göre 7 gün sonunda eğilme dayanımı minimum 1,0 N/mm ² ; basınç dayanımı minimum 4,0 N/mm ² olmalıdır.)		

Deneylemler sonucunda mikronize silika 7 günlük eğilme ve basınc dayanim değerlerinin, TS 25 standardına uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca numunenin özgül yüzey alanı, (Gltaş) portland imentosu özgül yüzey alanı değeri ile karşılaştırıldığında, mikronize silikanın çimentoya göre 4 kat daha ince olduğu görülmektedir.

4.2.2.3. Organik Madde İçeriği

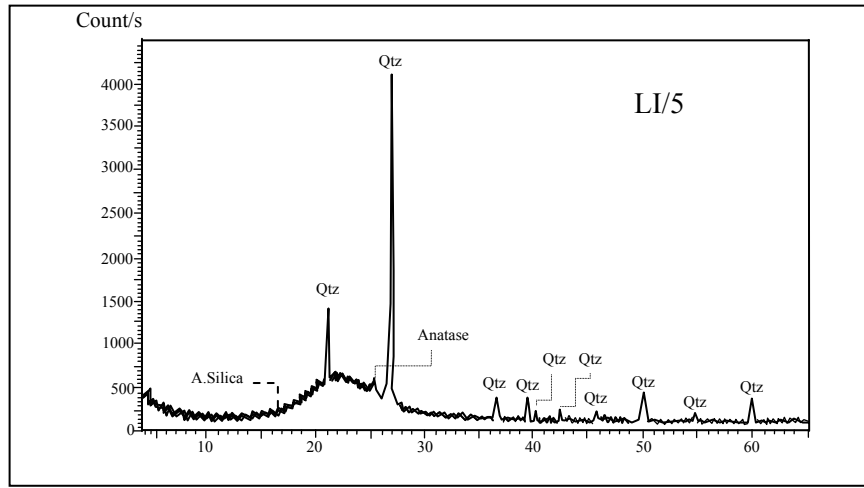
Hafif beton (agrega olarak) ve beton (katkı maddesi olarak) retiminde kullanılacak hammadde bileşiminde organik maddelerin bulunması, çimentonun yapısını etkileyerek bağlayıcılık özelliğinin zayıflamasına neden olmasından dolayı, arzu edilen bir olgu değildir. % 3'lk NaOH ile yapılan standart deneyde 24 saat sonra agreganın aldığı açık sarı-koyu kırmızı renklere göre karar verilmekte ve kırmızıdan sonraki renkler organik madde bakımından zengin malzeme bileşimini simgelemektedir. TS 3673 standardında belirtilen prensiplere göre I. lokasyona ait amorf silika agrega taneleri üzerinde yapılan organik madde içeriği analizlerinde, organik madde oluşumuna rastlanmamışken, II. lokasyon kayacına ait deney solüsyonunun rengi kırmızıya dnmştir. Bu sonuç İrepdere kayacının organik madde içerdiğini göstermektedir.

4.2.3. Mineralojik ve Petrografik Analiz Bulguları

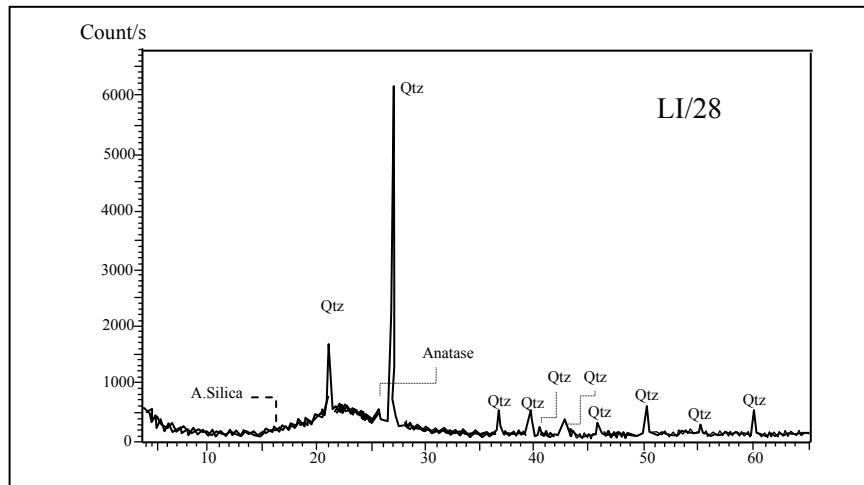
Farklı endüstrilerde hammadde olarak kullanılan çoğu mineral ve kayalarda olduğu gibi, betonda agrega ve katkı maddesi olarak kullanılan veya kullanımı öngörülen malzemelerin mineralojik- petrografik analizlerinin yapılması, ilgili endüstriyel kullanım alanına uygunluğunun ve malzeme performans kriterlerinin belirlenebilmesi açısından önem taşımaktadır.

Beton-imento üretimine yönelik tüketimde mineral katkı maddesini oluşturan partiküllerin ilave bağ yapısı oluşturabilmesi bakımından reaktif SiO₂ içeriği önem

kazanırken, aynı kayacın hafif beton ve mamullerinin üretimi ile ilgili endüstriyel uygulamalarında dayanım, yalıtım, su emme gibi özellikleri açısından agrega gözenek yapısı ve dağılımı ön plana çıkabilmektedir. Bu bağlamda, betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılan I. lokasyona ait toplam 28 adet kayaç numunesi üzerinde XRD analizleri yaptırılmıştır (Silver-Baryte Mining Co, 2001). I. lokasyon amorf silika kayaç numunelerinden LI/5 ve LI/28'e ait X-Ray diyagramları Şekil 4.16 ve 4.17'de, diğer X-Ray analiz bulguları ise Çizelge 4.27'de verilmiştir. Diyagramlarda eğri üzerindeki tekdüzelik amorf, pikler ise kristal yapıyı göstermektedir.



Şekil 4.16. (LI/5) Amorf silika numunesine ait XRD analiz diyagramı (Silver-Baryte Mining Co, 2001)



Şekil 4.17. (LI/28) Amorf silika numunesine ait XRD analiz diyagramı (Silver-Baryte Mining Co, 2001)

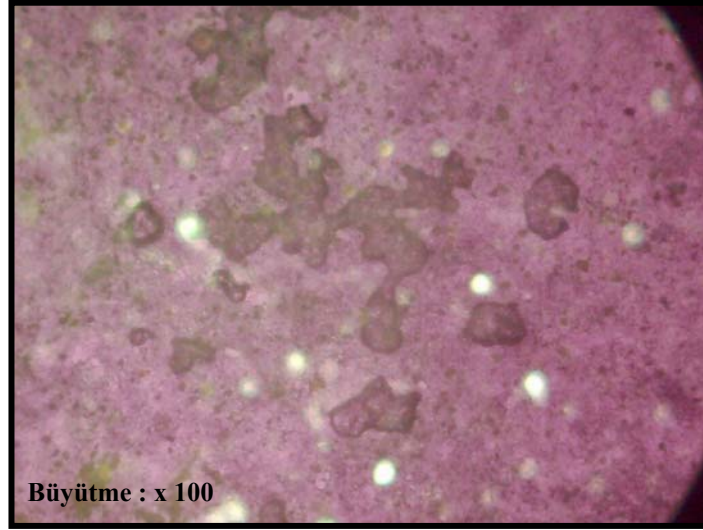
Çizelge 4.27. I. lokasyondan alınan kayaç numunelerinin XRD analiz sonuçları (Silver-Baryte Mining Co, 2001)

Numune No	pH	Kuvars (%)	Anatas (%)	Toplam XI ⁽¹⁾ (%)	Diğer (%)	Amorf Hal	Diğer Hal
LI/1	7,76	35,8	1,0	36,9	63,1	Opal	-
LI/2	7,28	38,6	1,3	39,9	60,1	Opal	-
LI/3	7,40	44,8	1,4	45,8	54,2	Opal	-
LI/4	7,53	46,6	2,0	48,6	51,4	A.Silika	-
LI/5	7,25	9,8	1,6	11,4	88,6	A.Silika	-
LI/6	7,30	12,2	4,4	16,7	93,3	A.Silika	-
LI/7	7,39	19,7	1,8	21,5	78,5	A.Silika	-
LI/8	7,42	49,6	1,1	50,8	49,2	A.Silika	-
LI/9	7,19	7,6	2,7	10,3	89,7	A.Silika	-
LI/10	7,08	22,0	1,6	23,6	76,4	A.Silika	-
LI/11	7,41	31,1	1,2	32,3	67,7	A.Silika	-
LI/12	7,53	27,4	1,7	29,1	70,9	A.Silika	-
LI/13	4,90	11,7	1,1	12,8	87,2	Opal, A.Sil.	-
LI/14	3,20	23,2	0,9	24,1	75,9	A.Silika	-
LI/15	3,15	62,8	1,2	64,0	36,0	A.Silika	Kükürt
LI/16	2,02	34,0	1,1	35,1	64,9	A.Silika	-
LI/17	2,96	52,6	1,3	53,9	46,1	A.Silika	-
LI/18	3,20	0,5	0,0	0,5	99,5	A.Silika	-
LI/19	5,06	32,0	1,2	33,2	66,8	A.Silika	-
LI/20	4,51	9,0	0,8	9,7	90,3	A.Silika	Jarosit
LI/21	6,24	19,7	1,4	21,1	78,9	A.Silika	-
LI/22	7,03	37,1	2,3	39,4	60,6	A.Silika	-
LI/23	5,96	7,9	0,7	8,5	91,5	A.Silika	Götüt
LI/24	6,67	5,4	0,8	6,1	93,9	A.Silika	-
LI/25	7,36	55,1	0,7	55,8	44,2	Opal, A.Sil.	-
LI/26	6,06	44,1	1,5	45,6	54,4	A.Silika	-
LI/27	7,21	82,5	1,8	84,3	15,7	A.Silika	-
LI/28	6,60	6,7	2,7	9,3	90,7	Opal, A.Sil.	-
Ort.	6,10	29,62	1,46	31,09	68,91	-	-

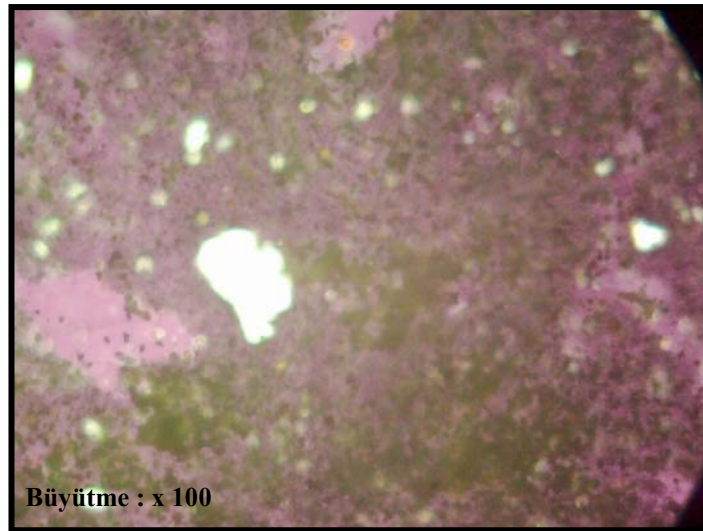
(1) Toplam kristal (XI) içeriği kuvars ve anatas (TiO₂) minerallerinin toplamına eşittir.

Amorf silika numunelerinin ortalama pH = 6,10 değeri kayacın asidik özelliğini karakterize etmektedir. Numunelerin ortalama % 68,91'i amorf , % 31,09'i mineral yapı göstermektedir. % 31,09 oranında mineral yapının % 29,62'si kuvars kristali, % 1,46'sı anatas (TiO₂) mineralidir. X-Ray analiz bulgularına göre, kayaç numuneleri içerisinde amorf fazda en fazla gözlenen (~% 80) silisyum dioksit (SiO₂) yapısı amorf silikadır. Ayrıca bazı kayaç numunelerinde (~% 20) opale (SiO₂ x nH₂O) de rastlanmıştır. Bununla birlikte az sayıdaki kayaç numunesinde kükürt, jarosit ve götüt mineralleri de saptanmıştır (Çizelge 4.27).

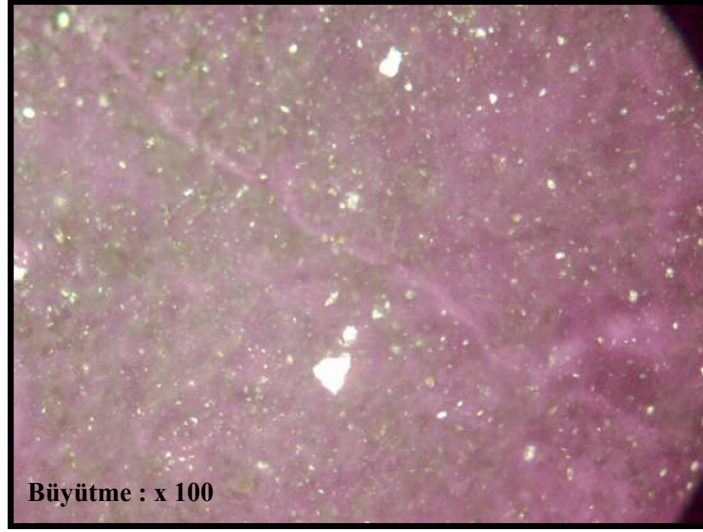
I. ve II lokasyon kayacına ait incekesit görüntüleri incelendiğinde; camsı (amorf) doku ve opalin I. lokasyon kayacında daha belirgin olduğu, özşekilsiz kuvarların ise daha az oranda bulunduğu gözlenmektedir. Ayrıca I. lokasyon kayacının boşluk yapısı (koyu renkli noktalar) daha küçük ve oldukça homojendir (Şekil 4.18.a,b,c).



Şekil 4.18.a. I. lokasyon kayacının ince kesit görüntüsü

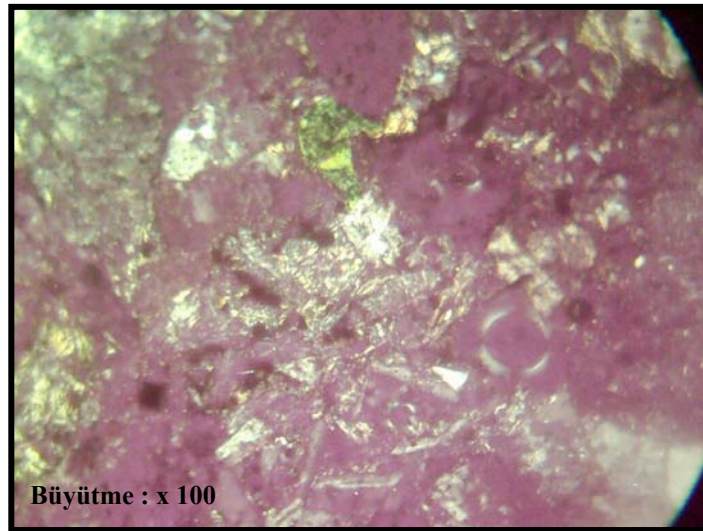


Şekil 4.18.b. I. lokasyon kayacının ince kesit görüntüsü

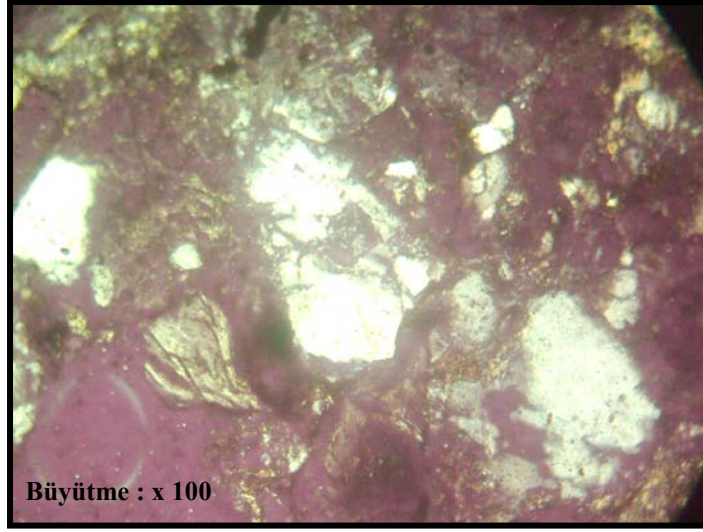


Şekil 4.18.c. I. lokasyon kayacının ince kesit görüntüsü

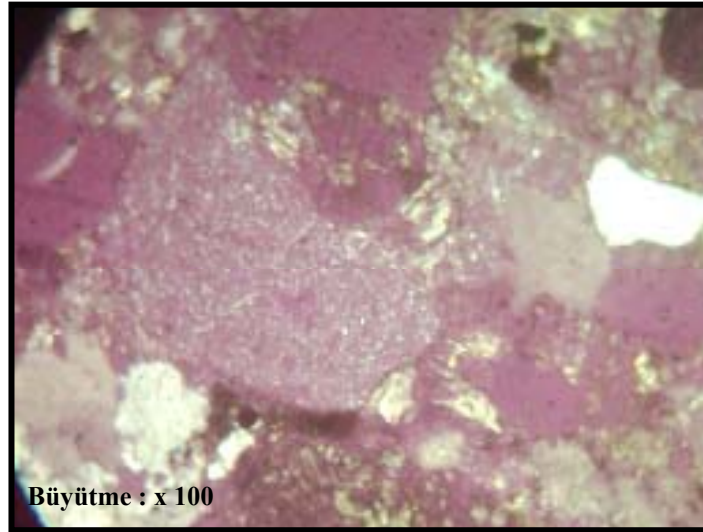
II. lokasyon kayacının ince kesit görüntülerinde ise yapının mikro-kriptokristalin dokulu camsal (amorf) hamur, opal ve özşekilsiz serbest kuvars tanelerinden oluştuğu gözlenmektedir. Kuvars kristallerinin hamurla olan dokanaklarındaki reaksiyon kuşağı, erken evrede hamurdan kuvars oluşumuna işaret etmektedir. Kayacın boşluk yapısı diğerine göre daha iri olup, dağılımı I. lokasyon kayacı kadar homojenlik göstermemektedir (Şekil 4.19.a,b,c,d).



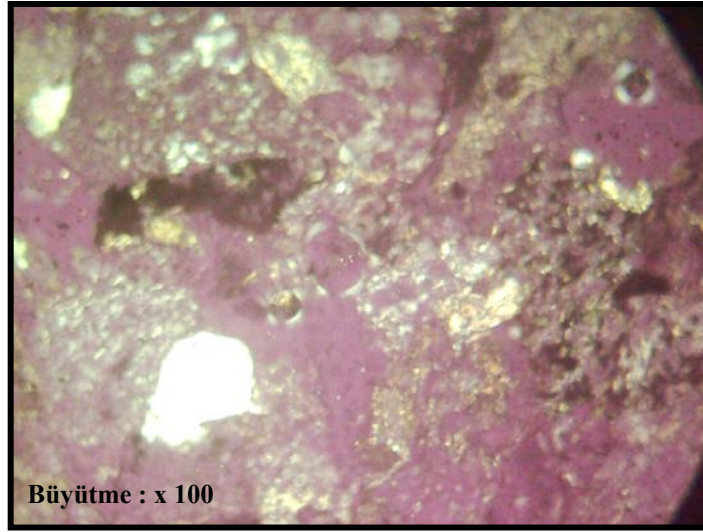
Şekil 4.19.a. II. lokasyon kayacının ince kesit görüntüsü



Şekil 4.19.b. II. lokasyon kayacının ince kesit görüntüsü



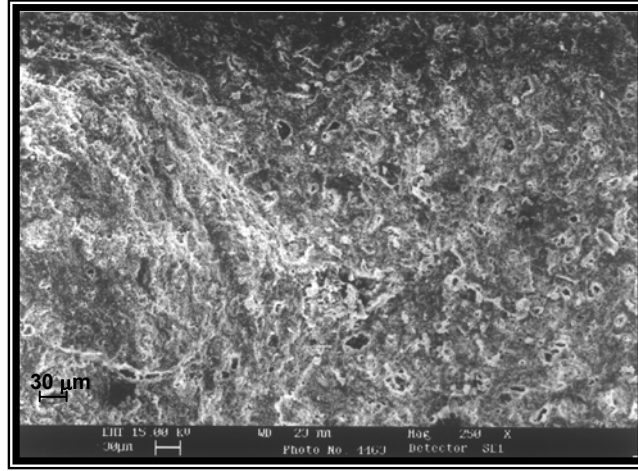
Şekil 4.19.c. II. lokasyon kayacının ince kesit görüntüsü



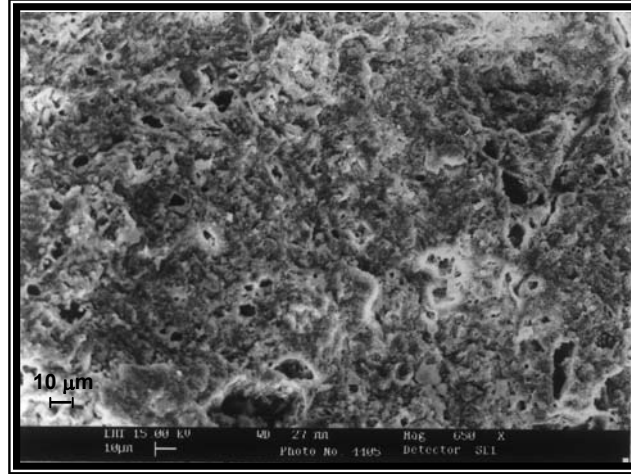
Şekil 4.19.d. II. lokasyon kayacının ince kesit görüntüsü

Amorf silika ve opal gibi kristal yapıya sahip olmayan veya düzensiz bağlar oluşturan SiO_2 molekülleri reaktif özelliğe sahiptir. X-Ray analizlerine göre amorf yapıya sahip (reaktif) silis içeriği ortalama \sim % 69'dur (Çizelge 4.27). Beton ve çimento da mineral katkı maddesi olarak kullanılacak silis dumanı ve benzeri malzemelerde aranılan reaktif SiO_2 (RS) oranı en az % 25'tir (TS EN 197-1).

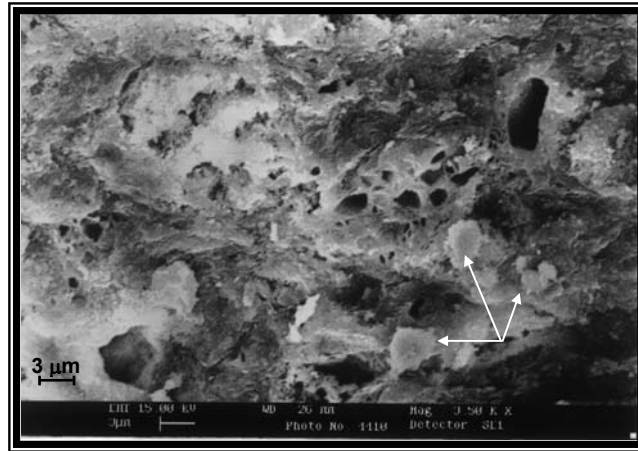
Ayrıca lokasyonlara ait iki adet numunenin Leo 435 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile gözenek yapısı ve dağılımı incelenmiştir (Şekil 4.20). İnceleme sonucunda I. lokasyon numunesinde yoğun ve camsı faz içeren mikroyapı saptanmış, belirgin bir kristal forma rastlanmamıştır. SEM fotoğrafında gözlenen camsı faz, akışkan ortamda çözülmüş silika kolloidlerinin yığılması ve pekişmesi sonucu oluşuma işaret etmektedir. Ayrıca aynı görüntüde opal kürecikleri de seçilebilmektedir (Şekil 4.21). Bu numunede gözenekler homojen olarak dağılmakta ve boyutu 1-15 mikron arasında değişmekte olup, 15 mikrondan büyük gözeneğe rastlanmamıştır (Şekil 4.21 ve 4.22).



Şekil 4.20. I. lokasyon numunesinin mikroyapısı

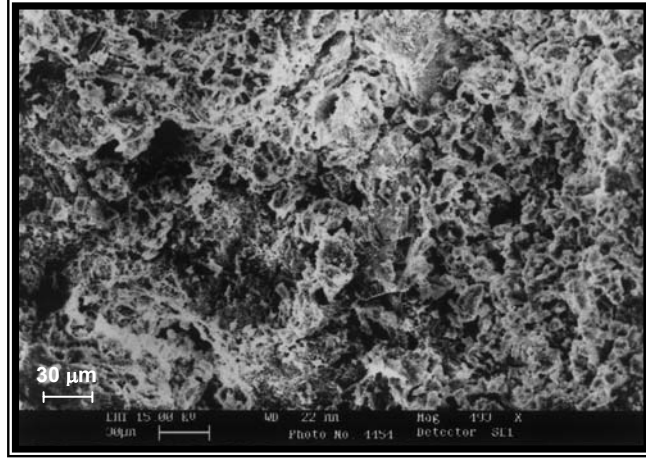


Şekil 4.21. I. lokasyon numunesinde gözenek dağılımı

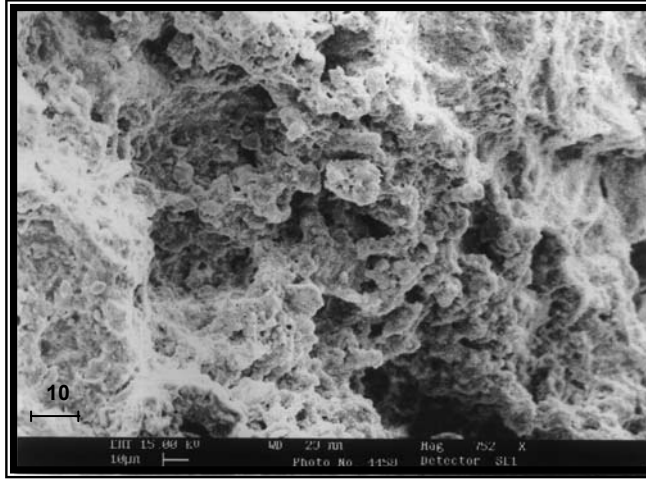


Şekil 4.22. I. lokasyon numunesinde opal kürecikleri ve camsı fazın görünümü

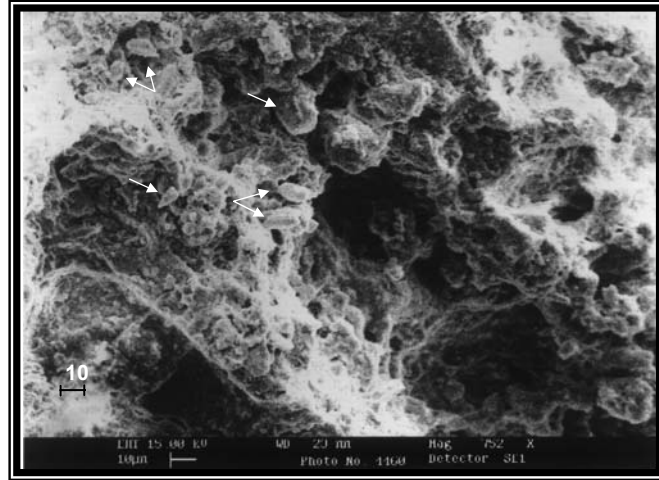
II. lokasyona ait numunede homojen olarak dağılan gözenek boyutları genelde 5-15 mikron arasında değişmektedir. Bununla birlikte 30-40 mikrona ulaşan gözenekler de mevcuttur. I. lokasyon kayacına göre bu numunede camsı faz belirgin değildir (Şekil 4.23. ve Şekil 4.24.). Gözeneklerin bir kısmında kuvars kristalleri gözlenmektedir (Şekil 4.25.).



Şekil 4.23. II. lokasyon numunesinin mikroyapısı



Şekil 4.24. II. lokasyon numunesinde gözenek dağılımı



Şekil 4.25. II. lokasyon numunesi boşluklarında kuvars kristalleri

4.3. Amorf Silikanın Mineral Katkı Maddesi ve Hafif Agrega Olarak Kullanılabilirliği

4.3.1. Amorf Silika Katkısının Beton Performans Özelliklerine Etkisi

Amorf silika yüksek derecede reaktif bir puzolandır. Puzolanlar kohezif, dış ortamlara dayanıklı, ekonomik ve yüksek performanslı beton üretmek için kullanılırlar. ASTM C 618-03'e göre puzolanlar kendi başına bağlayıcı özelliği çok az olan veya hiç olmayan, fakat doğal yapıları gereği veya öğütülme sonucu çok ince taneli duruma getirildiklerinde ve rutubetli ortamlarda kireç (kalsiyum hidroksit) ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellikteki bileşenlerin oluşmasını sağlayan silisli veya alüminli malzemelerdir (ASTM C 618-03). Betonda puzolanlar, çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan sönmüş kireci kullanarak bağlayıcı ürünler oluştururlar. Portland çimentosuna ilave edildiği zaman, yüksek dayanımlı betonlarda genellikle şu özelliklerin daha etkin olduğu tecrübe edilmiştir:

- Kimyasal etkileşim direncinde artış, çiçeklenmede azalma,
- Basınç dayanımında artış, aşınma direncinde artış,
- Su geçirimsizlikte azalma, jeotermal ortamdaki duraylılıkta artış
- Çok düşük klorit iyon difüzyonu (Golden Bay Cement, 2002a).

Amorf silikanın yüksek performanslı beton eldesinde kullanımı, 3 temel mekanizmayla sağlanabilmektedir:

1. Amorf silikanın çok ince tanecikleri, çimento partikülleri arasındaki mikroskobik boşlukları doldurabildiği için beton mikro yapısında geçirgenliği azaltır,
2. Çimento hidratasyon prosesinde açığa çıkan serbest kalsiyum hidroksit, ilave kalsiyum silikat üretmek için amorf silika ile tepkidiğinde puzolanik reaksiyon oluşur,
3. İnce partikül boyutu beton sızdırmasını azaltır ve çimento pastasıyla agrega ara yüzeyinde bağ gelişimine yardımcı olur.

Yukarıda özetle tanımlanan bu olguların detaylı incelemesini yapabilmek ve geleneksel beton uygulamalarında bu etkileri irdeleyebilmek amacıyla, Keçiborlu yöresi amorf silika oluşumlarının beton katkı maddesi (doğal puzolan) olarak kullanılabilirliği bir dizi deneysel çalışma ile analiz edilmiştir.

Keçiborlu I. lokasyondan alınan amorf silika numuneleri, darbeli tip bir kırıcıda 32 mm boyut altına kırılarak, 105 °C'de 24 saat süreyle etüvde kurutulmuş ve değişmez sabit ağırlığa ulaşan -3 mm boyutlu agregalar laboratuvar tipi bir bilyalı değirmende öğütülmüştür. Öğütme süresi ve şarjı sabit tutularak ortalama 18 µ boyutuna öğütülen amorf silika, normal beton karışımı hazırlanmasında doğal mineral katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

4.3.1.1. Kontrol ve Amorf Silika Katkılı Beton Karışım Tasarımları

Amorf silikanın normal beton dayanımına etkisinin tayini analizinde, Isparta Belediyesi Diyadin Taş ocağından üretilen kireçtaşı agregası ve PÇ 42.5 portland çimentosu kullanılmıştır. Kontrol ve mineral katkı olmak üzere iki farklı malzeme içeriğine sahip C20, C30 ve C40 beton sınıfındaki deney karışımları 21 farklı reçete esas alınarak hazırlanmıştır. Öğütülmüş amorf silika malzemesi, nispeten geniş yüzey alanına sahip olmasından dolayı, işlenebilir karışım için çok fazla suya

gereksinim duyar. İyi kalitede bir beton ve işlenebilir bir karışım yapmak için, su içeriği deneysel bir çalışma ile saptanmalıdır. Betonda amorf silikanın kullanımı durumunda optimum işlenebilirlik şartlarını belirlemek amacıyla yapılan ön araştırmada, işlenebilir bir karışım için su/çimento oranı C20 betonunda 0,70 ve C30 betonunda 0,50 ve C40 betonunda 0,40 olarak saptanmıştır. Agregasın karışım oranları ve karışım süresi ise sabit tutulmuştur. Hazırlanan beton karışımlarında kullanılan beton agregasının fiziksel özellikleri Çizelge 4.28, incelik modülü hesabı Çizelge 4.29'da ve karışım reçeteleri Çizelge 4.30'da verilmiştir.

Çizelge 4.28. Beton karışımlarında kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Malzeme Fiziksel Özellikleri	Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	Kuru Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Maksimum Tane Boyutu (D _{max})	İncelik Modülü	Kuru Sıkışık B.H.A. (kg/m ³)	Su Emme %
Çimento (PÇ 42,5)	3,1	-	-	-	-	-
Agrega	İri	2,43	12,5 mm	-	1.545	0,5
	İnce	2,58	-	3,40	1.867	1,0
Su	Şehir içme suyu kullanılmıştır.					

Çizelge 4.29. İncelik modülü tayini hesabı

Elek Ebadı	Elek Üstünde Kalan (g)	Elek Üstünde Kümülatif (g)	Yığılmış Oran
3/8"	3	3	0,001
No 4	3	6	0,002
No 8	987	993	0,326
No 10	517	1.510	0,496
No 30	950	2.460	0,808
No 50	71	2.531	0,831
No 100	223	2.754	0,904
< No	291	3.045	
İncelik Modülü			3,368

Karışımında kullanılan maksimum agregasın çapı 12,5 mm dir. Betonda olması istenen çökme değeri 7-12 cm arasında öngörölmüş ve buna göre Çizelge 4.30'dan 1 m³ betona girecek karışım suyu miktarı 220 kg/m³ seçilmiştir.

Çizelge 4.30. Çeşitli Beton kıvamları ve agrega en büyük tane çapına göre yaklaşık brüt karışım suyu hesabı (TS 802)

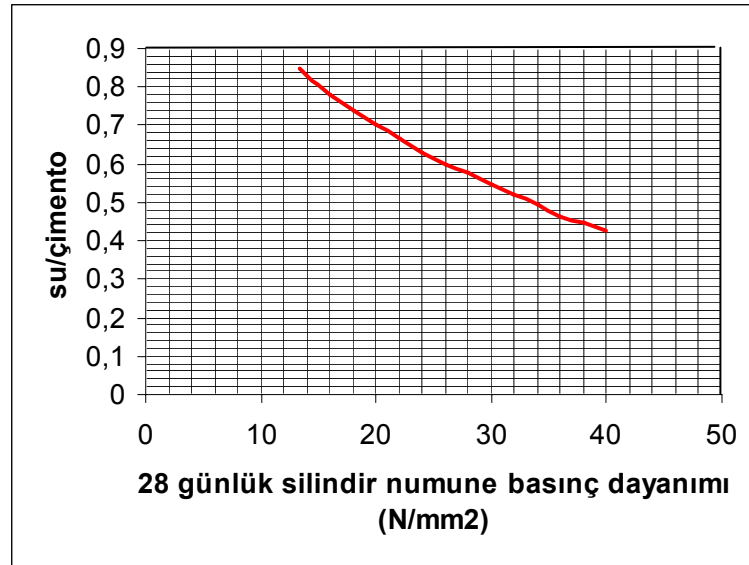
Çökme (cm)	D _{max} (mm)	9,5	12,5	19	25
		Karışım Suyu Miktarı (kg/m ³)			
2-6		210	200	185	180
7-12		230	220	205	195
13-17		245	230	215	205
Hapsolmuş Ortalama Hava Miktarı (%)		3	2,5	2	1,5

Aynı şekilde sıkışmış betondaki hava miktarı Çizelge 4.30'dan % 2,5 olarak bulunmuştur. Bu duruma göre betondaki hava hacmi;

$$V_H = 1000 \text{ dm}^3 \times 0,025 = 25 \text{ dm}^3$$

olarak hesaplanmıştır.

Karışımı hazırlanan betonun kullanım ortamında sert hava şartları ve sülfat etkilerine maruz kalması öngörülmediğinden, su/çimento oranı istenilen dayanım ve işlenebilirliğe göre Şekil 4.26' dan seçilmiştir.



Şekil 4.26. Arzu edilen basınç dayanım ve işlenebilirliğe göre 28 günlük silindir numune karışımındaki su/çimento oranı (TS 802)

C20 betonu için bu grafikten seçilen uygun su/çimento oranı değeri 0,7'dir. Hazırlanan karışımlarda bu oran kullanılmıştır. Karışımda kullanılacak çimento dozajı ;

$$\begin{aligned}\text{Çimento miktarı (doz)} &= \text{su} / (\text{su}/\text{çimento}) \text{ kg/m}^3 \text{ den,} \\ \text{Çimento miktarı} &= 220/0,7 = 314 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

olarak hesaplanmıştır.

Beton karışımında kullanılan filler malzemenin incelik modülü değerine ve en büyük agrega çapına göre kaba agrega hacmi Çizelge 4.31'de verilmiştir.

Çizelge 4.31. Beton birim hacmindeki kaba agrega hacmi (TS 802)

Birim Hacimdeki betonda kuru, şişlenmiş kaba agrega hacmi (m ³)							
İncelik Modülü	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40
En Büyük Agrega Çapı (mm)							
9,5	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40	0,38	0,36
12,5	0,57	0,55	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45
19	0,67	0,65	0,63	0,61	0,59	0,57	0,55
25	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60

Karışımında kullanılan agrega maksimum tane boyutu 12,5 mm ve incelik modülü 3,40 değerlerine göre Çizelge 4.31'den 1 m³ sıkışmış betona giren kaba agrega miktarı 0,45 m³ seçilmiştir. Buna göre aynı hacimdeki kaba agrega ağırlığı ;

$$\text{Kaba agrega miktarı} : 0,45 \times 1545 \text{ kg} = 695,25 \text{ kg}$$

İnce agrega miktarı ise ;

$$\begin{aligned}\text{İnce agrega hacmi (V}_{\text{ince}}) &= 1000 \text{ dm}^3 - [220 \text{ dm}^3 + 25 \text{ dm}^3 + (314/3,1) \text{ dm}^3 \\ &\quad + (695/2,43)] \text{ dm}^3 \\ &= 368 \text{ dm}^3\end{aligned}$$

$$\text{İnce agrega miktarı} = 368 \text{ dm}^3 \times 2,58 \text{ kg/dm}^3 = 949 \text{ kg'dır.}$$

Buna göre 1m³ beton karışımına giren kuru malzeme ve su miktarları hesaplanarak, hacimce değerleri Çizelge 4.32 ve ağırlıkça değerleri Çizelge 4.33'de verilmiştir.

Çizelge 4.32. 1 m³ beton karışımına giren malzeme hacimsel değerleri ve ince madde miktarı

Beton Sınıfı	V _{topl.} (dm ³)	V _{su} (dm ³)	V _{hava} (dm ³)	V _{çim.} (dm ³)	V _{iri} (dm ³)	V _{ince} (dm ³)	d _{ince} (kg/dm ³)	M _{ince} (kg)
C20	1000	220	25	101	286	368	2,58	949
C30	1000	220	25	142	286	351	2,58	905
C40	1000	220	25	177	286	291	2,58	752

Çizelge 4.33. Beton sınıfına göre deney numuneleri karışımlarındaki birim malzeme miktarı

1 m ³ Karışıma Giren Malzeme	Beton Sınıfı		
	C20	C30	C40
Su (kg)	220	220	220
Çimento (kg)	314	440	550
İnce agregası (kg)	949	844	752
Kaba agregası (kg)	695	695	695
Toplam (kg)	2.178	2.199	2.217

Deneyde 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde standart silindirik numune kalıpları kullanılmıştır. Her bir beton sınıfına ait bir karışım serisi (C20 - Kontrol vb.) için gereken silindir numune kalıbı (~5,3 dm³ hacminde 7, 14 veya 28 günlük kür sürelerinden herhangi bir numune grubu için) 10 adet olup, toplam kalıp hacmi 0,053 m³ tür. Birim kalıp hacmi esas alınarak beton numunelerini hazırlamada uygulanan malzeme karışım miktarları, kalıp hacimleri toplamının % 25'i oranında artırılarak hesaplanmıştır. Bir beton sınıfında yer alan her bir numune grubuna ait toplam malzeme miktarları ve karışım reçeteleri Çizelge 4.34'den Çizelge 4.39'a kadar verilmiştir.

Çizelge 4.34. C20 beton sınıfındaki her bir numune grubunda kullanılan su, çimento ve agregası miktarı

Malzeme Cinsi	Birim Miktar (kg)	V _{kalıp} (m ³)	Adet	Sıkıştırma Oranı	Deney Miktarı (kg)
Su	220,0	0,0053	10	1,25	14,580
Çimento	314,3	0,0053			20,820
İnce Agregası	948,2	0,0053			62,820
İri Agregası	695,3	0,0053			46,060
Toplam	2.177,8	0,053			144,280

Çizelge 4.35. C20 beton sınıfında hazırlanan numune grupları karışım reçeteleri

Beton Sınıfı	Numune Grup No	Çim. Dozajı (kg)	< No4 (kg)	No4-3/8 (kg)	3/8-1/2 (kg)	Su (lt)	Su / Σ Bağl.	S.Akış. (kg)	A.S. (kg)
C 20	K	20,822	62,818	23,032	23,032	14,576	0,700	0,250	0,000
	İ5	20,822	62,818	23,032	23,032	15,304	0,700	0,262	1,041
	İ10	20,822	62,818	23,032	23,032	16,033	0,700	0,275	2,082
	İ15	20,822	62,818	23,032	23,032	16,762	0,700	0,287	3,123
	E5	19,781	62,818	23,032	23,032	14,576	0,700	0,250	1,041
	E10	18,740	62,818	23,032	23,032	14,576	0,700	0,250	2,082
	E15	17,699	62,818	23,032	23,032	14,576	0,700	0,250	3,123

Çizelge 4.36. C30 beton sınıfındaki her bir numune grubunda kullanılan su, çimento ve agrega miktarı

Malzeme Cinsi	Birim Miktar (kg)	V _{kalıp} (m ³)	Adet	Sıkıştırma Oranı	Deney Miktarı (kg)
Su	220,00	0,0053	10	1,25	14,58
Çimento	440,00	0,0053			29,15
İnce Agrega	843,50	0,0053			55,88
İri Agrega	695,30	0,0053			46,06
Toplam	2186,90	0,053			145,67

Çizelge 4.37. C30 beton sınıfında hazırlanan numune grupları karışım reçeteleri

Beton Sınıfı	Numune Grup No	Çim. Dozajı (kg)	< No4 (kg)	No4-3/8 (kg)	3/8-1/2 (kg)	Su (lt)	Su / Σ Bağl.	S.Akış. (kg)	A.S. (kg)
C 30	K	29,150	55,882	23,032	23,032	14,576	0,500	0,350	0,000
	İ5	29,150	55,882	23,032	23,032	15,304	0,500	0,367	1,458
	İ10	29,150	55,882	23,032	23,032	16,033	0,500	0,385	2,915
	İ15	29,150	55,882	23,032	23,032	16,762	0,500	0,402	4,373
	E5	27,693	55,882	23,032	23,032	14,576	0,500	0,350	1,458
	E10	26,235	55,882	23,032	23,032	14,576	0,500	0,350	2,915
	E15	24,778	55,882	23,032	23,032	14,576	0,500	0,350	4,373

Çizelge 4.38. C40 beton sınıfındaki her bir numune grubunda kullanılan su, çimento ve agrega miktarı

Malzeme Cinsi	Birim Miktar (kg)	V _{kalıp} (m ³)	Adet	Sıkıştırma Oranı	Deney Miktarı (kg)
Su	220,0	0,0053	10	1,25	14,580
Çimento	550,0	0,0053			36,440
İnce Agrega	752,0	0,0053			49,820
İri Agrega	695,3	0,0053			46,06
Toplam	2.217,3	0,053			146,890

Çizelge 4.39. C40 beton sınıfında hazırlanan numune grupları karışım reçeteleri

Beton Sınıfı	Numune Grup No	Çim. Dozajı (kg)	< No4 (kg)	No4-3/8 (kg)	3/8-1/2 (kg)	Su (lt)	Su / Σ Bağl.	S.Akış. (kg)	A.S. (kg)
C 40	K	36,438	49,820	23,032	23,032	14,576	0,400	0,437	0,000
	İ5	36,438	49,820	23,032	23,032	15,304	0,400	0,459	1,822
	İ10	36,438	49,820	23,032	23,032	16,033	0,400	0,481	3,644
	İ15	36,438	49,820	23,032	23,032	16,762	0,400	0,503	5,466
	E5	34,616	49,820	23,032	23,032	14,576	0,400	0,437	1,822
	E10	32,794	49,820	23,032	23,032	14,576	0,400	0,437	3,644
	E15	30,972	49,820	23,032	23,032	14,576	0,400	0,437	5,466

4.3.1.2. Muhtelif Çimento Dozajlardaki Betonların Basınç Dayanımlarına Amorf Silikanın Etkisi

Amorf silikanın geleneksel betondaki dayanım etkinliğinin analizi amacıyla, numune karışımlarının hazırlanmasında iki temel karışım oranlama yöntemi uygulanmıştır. Bunlar:

- a. Amorf silikanın ince agregaya olarak kullanılması (ilave yöntemi),
- b. Çimentonun yerine kısmi olarak amorf silikanın kullanılması (basit ikame yöntemi) dir.

Amorf silikanın, ince agregaya olarak kullanılması (ilave) yönteminde; karışımda kullanılacak çimento miktarında herhangi bir azaltma yapmaksızın amorf silika, beton karışımına ilave edilmiştir. Böylece beton karışımındaki etkin bağlayıcı maddenin artışı amaçlanmıştır. Bu olgunun analizi için, 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde standart silindirik numune kalıpları kullanılmıştır. 314, 440 ve 550 kg/m³ dozajlarında portland çimentosu içeren karışımlara, çimento ağırlığının % 5'i, % 10'u, % 15'i oranlarında mikronize amorf silika ilave edilmiş, ayrıca benzer çimento dozajlarına sahip, üç seri de (C20, C30 ve C40) katkısız kontrol beton örnekleri dökülmüştür. Tüm karışımlar eşit şartlarda kürlenmiştir. Elde edilen örneklerin 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde basınç dayanım analizleri yapılmıştır. Deneysel bulgular Çizelge 4.40 ve Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29'da verilmiştir.

Çizelge 4.40. C20, C30 ve C40 beton sınıflarındaki silindir numune gruplarının tek eksenli basınç dayanımı analiz bulguları

Numune Basınç Dayanımları (MPa)				Numune Basınç Dayanımları (MPa)			
C20 - Kontrol				C20 -% 10 A.S.İlave			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	18,17	18,54	20,99		17,85	24,34	29,30
	15,77	18,62	18,90		17,07	23,30	27,34
	17,26	17,30	20,14		18,02	24,02	28,65
	13,96	17,72	21,55		19,76	24,02	26,75
	15,47	17,42	19,94		19,34	26,55	30,35
	13,62	18,75	20,62		17,08	25,34	27,14
	18,46	18,41	21,23		19,16	23,57	28,71
	17,49	17,08	21,34		17,76	26,48	25,32
	18,10	17,99	19,38		20,18	25,91	30,09
	14,56	17,34	17,31		17,86	23,82	29,07
A.O.	16,29	17,92	20,14	A.O.	18,41	24,74	28,27
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	1,84	0,63	1,32	S.S.	1,11	1,23	1,59
C20 -% 5 A.S.İlave				C20 -% 15 A.S.İlave			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	17,64	21,20	23,04		19,83	20,85	23,94
	19,26	23,30	24,77		18,69	22,68	24,31
	19,79	19,94	23,34		19,48	24,16	27,94
	17,93	22,15	25,30		19,44	22,78	25,62
	20,54	21,57	23,74		17,47	22,06	24,86
	19,46	21,62	24,58		16,88	24,30	27,02
	17,02	23,05	23,03		19,32	23,50	24,34
	18,32	20,20	25,86		18,75	21,45	24,06
	19,86	20,31	24,97		20,22	22,03	27,93
	20,50	22,94	23,41		18,46	21,22	26,75
A.O.	19,03	21,63	24,20	A.O.	18,85	22,50	25,68
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	1,23	1,23	1,02	S.S.	1,04	1,20	1,60

Çizelge 4.40. (devam)

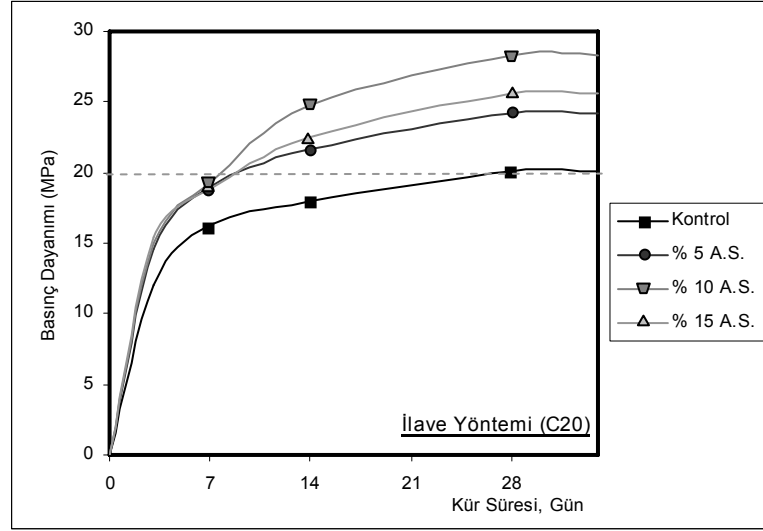
C20 -% 5 A.S.Eksiltme				C30 - Kontrol			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	20,91	24,74	23,86		28,66	29,50	33,14
	21,69	22,34	25,22		27,12	30,17	31,16
	20,07	22,92	25,62		26,34	28,38	31,26
	19,31	22,20	25,06		27,40	29,70	31,23
	18,02	22,50	24,12		29,26	27,15	33,14
	18,52	23,90	23,93		28,34	28,60	31,55
	19,69	22,90	26,01		29,23	30,24	30,65
	21,45	21,66	24,14		27,73	29,58	30,48
	18,51	21,92	25,22		29,43	26,49	32,66
	21,86	24,30	24,62		25,62	30,30	31,66
A.O.	20,00	22,94	24,78	A.O.	27,91	29,01	31,69
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	1,42	1,05	0,75	S.S.	1,30	1,33	0,97
C20 - % 10 A.S.Eksiltme				C30 -% 5 A.S.İlave			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	21,46	21,36	23,23		31,57	32,05	35,54
	19,26	23,74	25,93		32,19	32,85	36,80
	19,69	22,70	25,73		30,12	35,38	34,39
	21,30	23,60	25,06		29,86	34,22	34,40
	20,97	20,50	23,88		31,34	31,60	35,46
	18,70	21,30	23,46		29,88	32,06	34,14
	20,40	24,26	23,39		31,64	32,65	35,96
	21,36	20,58	26,11		32,06	35,00	34,12
	21,53	21,99	24,87		28,98	35,12	35,83
	20,67	23,77	26,00		31,14	31,26	36,51
A.O.	20,54	22,38	24,77	A.O.	30,88	33,22	35,32
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	1,00	1,42	1,18	S.S.	1,09	1,57	0,99
C20 -% 15 A.S. Eksiltme				C30 -% 10 A.S.İlave			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	19,81	19,62	23,12		33,24	32,83	37,36
	19,05	19,02	24,06		32,16	33,98	37,71
	18,96	20,09	24,99		32,51	34,83	37,46
	16,58	18,97	23,70		30,29	33,11	37,55
	19,60	19,32	25,14		30,66	35,26	36,34
	17,74	19,98	24,59		31,98	34,60	37,39
	20,39	18,77	23,45		33,01	35,14	37,28
	19,01	19,71	23,10		31,42	32,02	35,66
	19,89	19,63	24,34		31,84	32,88	37,54
	16,97	18,98	25,50		33,01	35,43	36,38
A.O.	18,80	19,41	24,20	A.O.	32,01	34,01	37,07
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	1,29	0,46	0,85	S.S.	1,00	1,22	0,69

Çizelge 4.40. (devam)

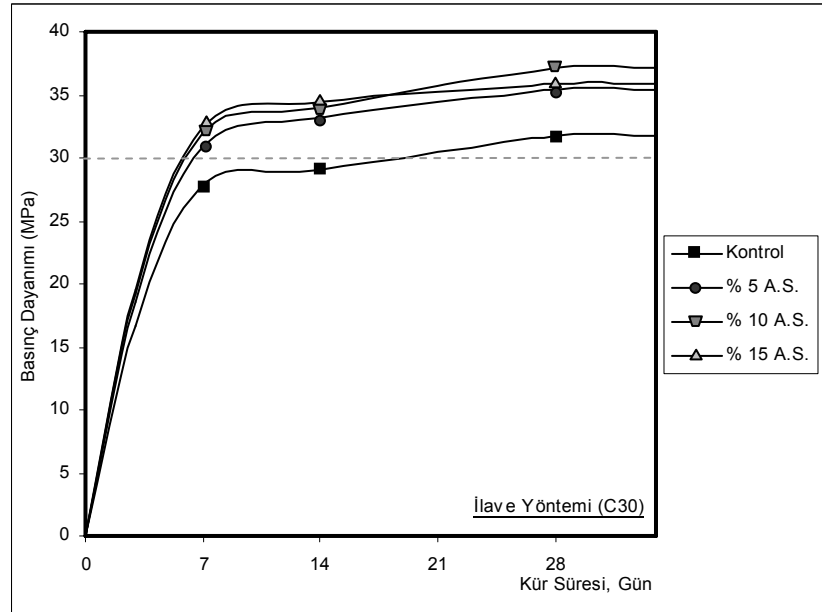
C30 -% 15 A.S.İlave				C30 -% 15 A.S.Eksiltme			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	31,73	34,96	36,42		31,65	33,11	33,40
	32,95	33,61	34,69		32,15	33,46	34,95
	30,56	35,97	34,97		30,15	31,59	35,77
	31,74	33,14	35,54		30,82	34,14	35,11
	34,10	34,47	37,59		29,76	34,20	33,62
	32,27	34,30	37,26		32,46	31,19	35,84
	33,21	35,56	34,20		30,18	32,20	34,35
	34,22	33,02	36,09		29,62	34,06	33,68
	30,66	33,45	36,86		31,54	33,14	33,30
	33,55	35,82	34,75		30,69	33,68	35,62
A.O.	32,50	34,43	35,84	A.O.	30,90	33,08	34,56
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	1,32	1,11	1,18	S.S.	1,00	1,08	1,02
C30 -% 5 A.S.Eksiltme				C40-Kontrol			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	32,43	33,41	35,04		35,11	39,98	41,78
	32,26	34,82	36,55		36,93	40,79	42,70
	31,74	34,55	37,55		36,45	36,93	43,94
	32,00	34,29	36,21		38,58	39,41	41,91
	32,18	34,50	35,74		35,41	39,41	45,07
	31,54	34,14	35,97		36,65	37,18	44,26
	31,32	35,56	36,76		38,16	39,78	43,08
	32,68	34,04	37,34		34,10	39,28	41,10
	33,90	35,95	34,58		36,05	38,68	42,02
	31,57	34,98	36,44		37,48	41,58	44,92
A.O.	32,16	34,62	36,22	A.O.	36,49	39,30	43,08
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	0,75	0,74	0,93	S.S.	1,39	1,44	1,40
C30 -% 10 A.S.Eksiltme				C40 -% 5 A.S. İlave			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	31,33	34,95	36,47		37,68	39,98	44,43
	31,98	34,74	36,25		39,83	43,44	43,49
	30,84	34,31	36,70		37,56	39,57	43,63
	31,84	33,93	35,97		38,61	41,81	42,54
	30,20	34,52	35,78		36,69	40,78	45,05
	31,50	34,92	36,74		38,96	38,39	43,40
	31,78	33,84	36,66		38,14	40,84	42,74
	31,18	34,70	36,64		37,34	43,02	43,20
	29,98	33,64	35,80		39,65	41,16	45,46
	30,36	35,12	35,44		36,28	42,13	44,32
A.O.	31,10	34,47	36,24	A.O.	38,07	41,11	43,82
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	0,72	0,52	0,47	S.S.	1,19	1,56	0,96

Çizelge 4.40. (devam)

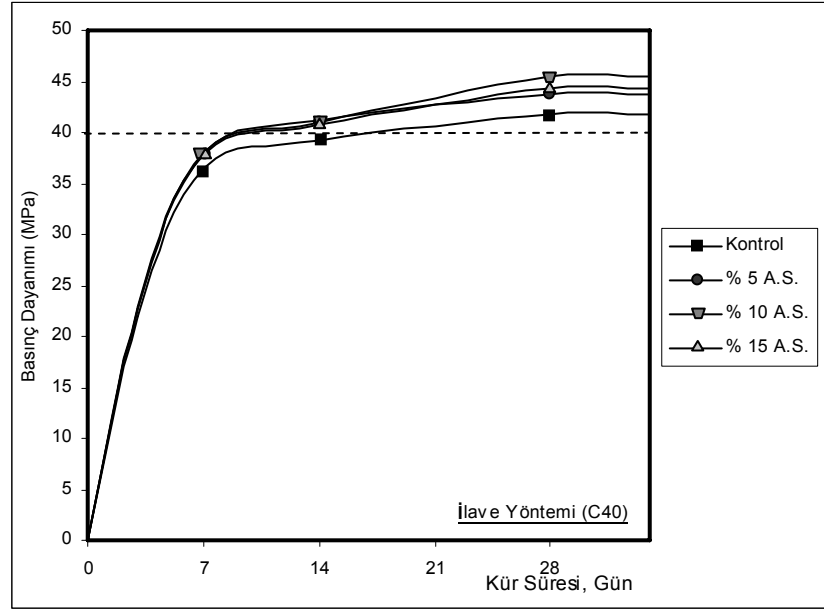
C40 -% 10 A.S. İlave				C40 -% 10 A.S.Eksiltme			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	39,90	41,00	47,12		36,17	40,20	42,78
	38,54	40,24	46,78		37,50	41,04	40,83
	37,29	40,09	44,11		38,54	38,49	43,02
	37,75	43,34	45,42		36,41	40,94	41,60
	37,15	40,66	44,34		35,62	39,86	43,92
	38,72	37,86	45,85		36,25	38,62	42,98
	38,38	41,06	45,18		36,44	41,38	40,82
	37,34	42,98	44,98		35,34	39,87	42,30
	39,75	41,43	45,78		37,41	39,52	44,41
	36,44	41,95	45,92		38,77	41,11	41,68
A.O.	38,13	41,06	45,55	A.O.	36,85	40,10	42,43
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	1,14	1,56	0,96	S.S.	1,17	1,03	1,22
C40 -% 15 A.S. İlave				C40 -% 15 A.S.Eksiltme			
	7 gün	14 gün	28 gün		7 gün	14 gün	28 gün
	37,10	41,63	44,98		35,10	36,87	40,86
	39,61	41,46	45,46		33,02	35,94	38,70
	37,63	40,09	44,58		34,32	35,05	39,06
	37,02	39,34	44,82		36,41	37,59	39,95
	37,74	41,80	42,02		35,69	39,02	42,18
	39,54	39,05	43,32		32,89	38,80	41,07
	36,50	41,25	45,06		36,88	37,55	39,40
	37,02	42,42	42,50		35,38	35,90	38,04
	37,90	40,63	46,34		34,33	34,48	40,00
	38,17	41,00	44,70		34,99	37,78	42,27
A.O.	37,82	40,87	44,38	A.O.	34,90	36,90	40,15
N-1	9	9	9	N-1	9	9	9
S.S.	1,05	1,09	1,35	S.S.	1,31	1,53	1,43
C40 -% 5 A.S.Eksiltme				A.O. : Aritmetik ortalama, N : Numune sayısı			
	7 gün	14 gün	28 gün	S.S. : Standart sapma			
	38,77	39,80	44,12				
	39,28	40,54	42,82				
	37,81	39,26	42,22				
	37,33	42,03	43,94				
	37,18	41,48	41,78				
	39,14	38,83	44,66				
	37,22	40,38	41,91				
	36,83	42,22	43,16				
	38,88	40,28	43,24				
	38,31	41,41	41,89				
A.O.	38,07	40,62	42,97				
N-1	9	9	9				
S.S.	0,91	1,14	1,03				



Şekil 4.27. İlave yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C20) beton numunelerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması (TS 3114)



Şekil 4.28. İlave yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C30) beton numunelerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması (TS 3114)

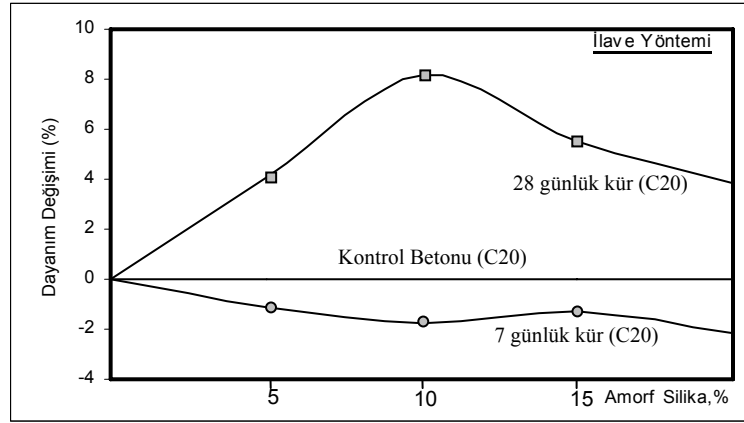


Şekil 4.29. İlave yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C40) beton numunelerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması (TS 3114)

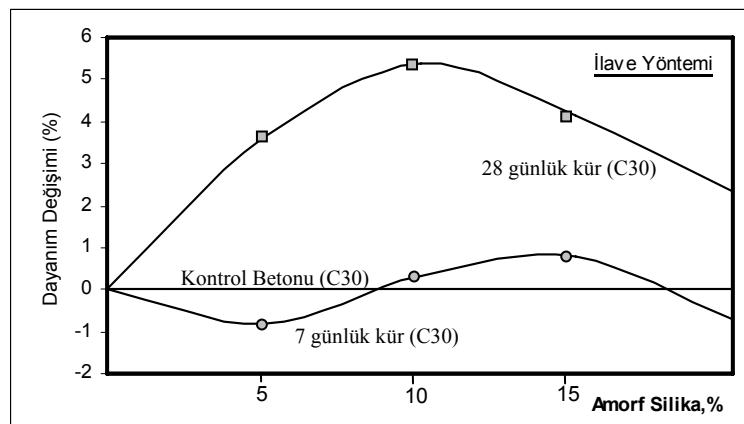
Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29 irdelendiğinde görüleceği gibi, üç (C20, C30 ve C40) beton sınıfındaki katkılı beton örneklerinin basınç dayanım değerleri, kontrol betonlarına göre daha yüksektir. Amorf silikanın puzolanik reaktifliğine ilave olarak, ince partiküllerinin dolgu kabiliyeti ve agrega ara yüzeylerindeki bağ gelişimine katkısı nedeniyle beton dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. Karışıma ilave edilen amorf silika 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde test edilen beton örneklerinin basınç dayanım değerlerinde önemli artışlar sağlamıştır. Ancak, amorf silika ilavesinin belirli bir kullanım miktarına kadar betonun dayanım artışına etki ettiği gözlenmiş olup, karışımda bu miktardan daha fazla kullanılması durumunda, betonun dayanım artışındaki etkisinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, karışımın su talebi ve işlenebilirliğin temel etkisinden dolayıdır. Sabit bir işlenebilirlik için; yalnızca portland çimentosu bulunan karışımla karşılaştırıldığında, % 5-15 oranları arasında amorf silika ilave edilen karışımların su talebindeki artış, C20 betonu için % 1-3, C30 betonu için % 2-5 ve C40 betonu için % 3-6 arasındadır. Çimento partiküllerinin yüzeyini kaplamak için yeterli miktardan fazla (\geq % 20) amorf silika kullanımı, su ihtiyacını aşırı artıracığından dolayı yarar sağlamayacaktır. Yaklaşık % 20 ve üzerindeki oranlarda amorf silika içeren karışımın su talebinde önemli miktarda artış

olur. Böylece yüksek oranda amorf silika içeren karışımın aşırı su talebi dayanım gelişimi olumsuz etkiler.

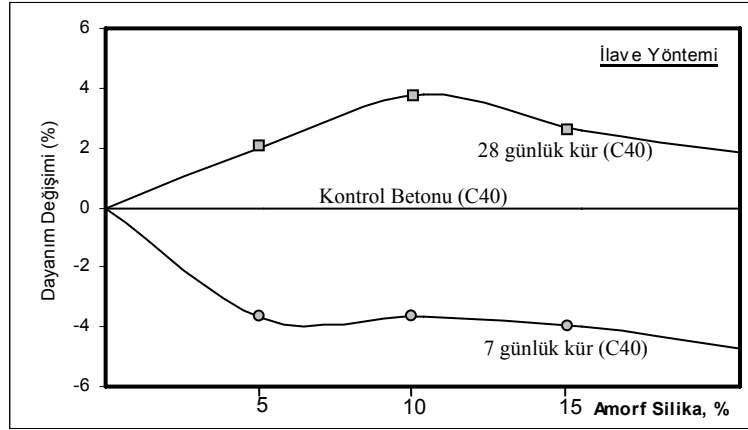
Araştırmanın bu bölümündeki bulgular değerlendirildiğinde, karışıma giren amorf silika katkısının belli bir miktardan sonra beton dayanım artışının yavaşça düştüğü gözlemlenmektedir. 314, 440 ve 550 kg portland çimentosu dozajlarındaki karışımlar (C20, C30 ve C40) için en yüksek dayanım, amorf silikanın karışıma yaklaşık % 10 ilavesiyle elde edilmiştir. Bu amaçla, beton sınıfına göre amorf silikanın optimum ilave oranı, grafiksel bir analizle belirlenmeye çalışılmış olup, ilave oranının beton basınç dayanımındaki artışı yüzdesel olarak irdelenmiştir. Analiz bulguları, Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.30. C20 betonunda ilave kullanım için amorf silika oranı - basınç dayanım değişimi ilişkisi



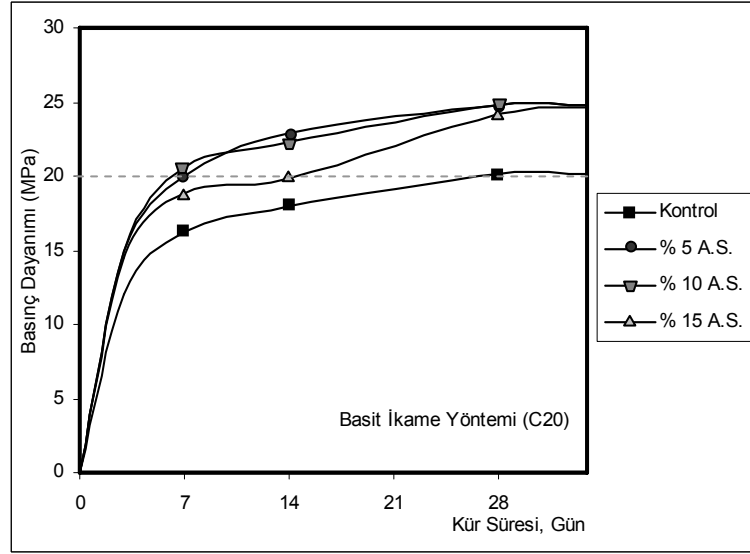
Şekil 4.31. C30 betonunda ilave kullanım için amorf silika oranı-basınç dayanım değişimi ilişkisi



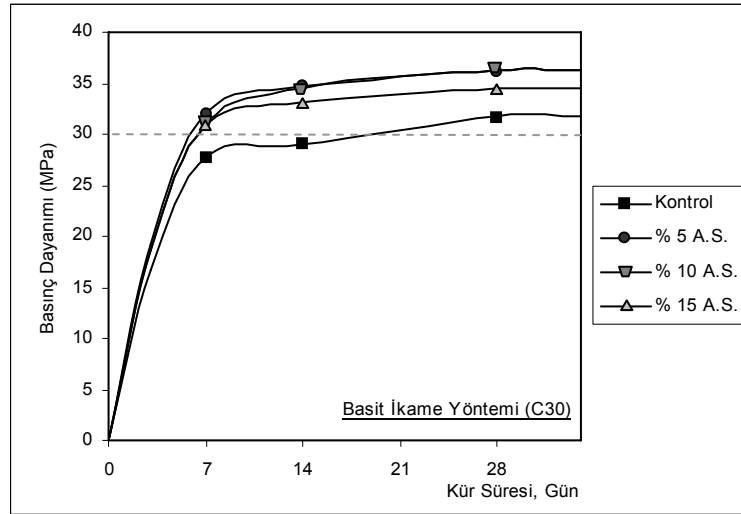
Şekil 4.32. C40 betonunda ilave kullanım için amorf silika oranı-basınç dayanım değişimi ilişkisi

Katkı maddesinin beton karışımındaki bir diğer kullanım (basit ikame) yöntemi, çimento yerine kısmi yer değiştirici olarak kullanmaktır. Optimum yer değişim miktarı çimento ağırlığının % 0 - % 15'i arasındaki bir oranda gerçekleşebilir. Burada karışımındaki çimentolaşabilen malzemelerin toplam ağırlığı değişmediği halde, mikronize amorf silikanın inceliğinden dolayı su ihtiyacında artış vardır. Aynı su/çimento + amorf silika oranının sürdürülmesi ve gerekli çökmeyi sağlamak için süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılabilir.

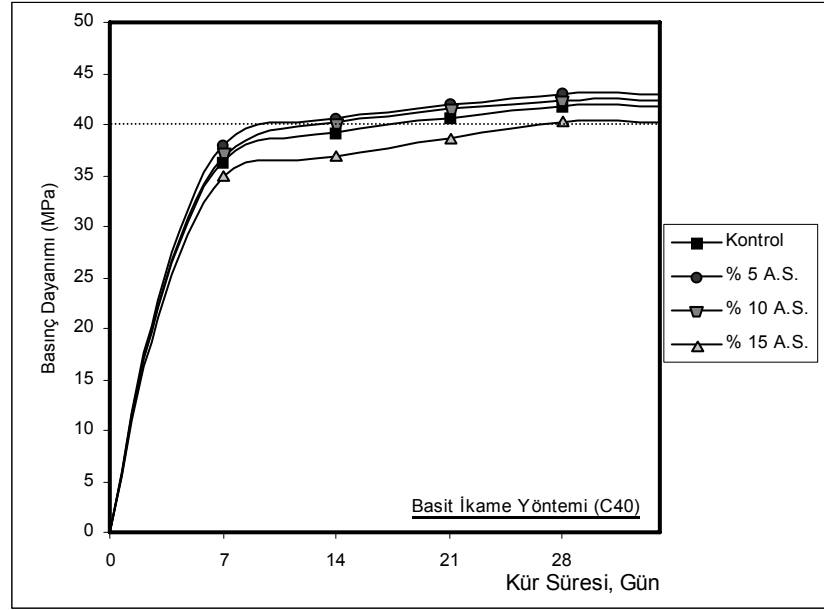
Amorf silikanın beton dayanımına katkısı verimlilik veya bir etkinlik faktörü olarak tanımlanabilir. Amorf silikanın verimliliği; betonun basınç dayanımını muhafaza ederek, katkı maddesi miktarının yer değiştirebildiği çimento miktarına oranı olarak tanımlanabilir. Amorf silikanın C20, C30 ve C40 karışımlarına bu etkisini analiz etmek için, laboratuvarında bir dizi deneysel çalışma yürütülmüştür. Bu amaçla, çimento yerine kısmi yer değiştirici olarak % 5, % 10, % 15 amorf silika oranlarıyla hazırlanan, 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde standart silindirik beton örnekleri hazırlanmıştır. Örnekler 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde test edilmiştir. Beton karışımındaki amorf silikanın etkisini değerlendirmek için kontrol karışımları da dökülmüş ve tüm karışımlar aynı şartlarda kür edilmiştir. C20, C30 ve C40 betonlarında % 5, % 10 ve % 15 katkı kullanım oranları için araştırma bulguları sırasıyla Şekil 4.33, 4.34 ve 4.35'de verilmektedir.



Şekil 4.33. Basit ikame yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C20) beton örneklerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması (TS 3114)

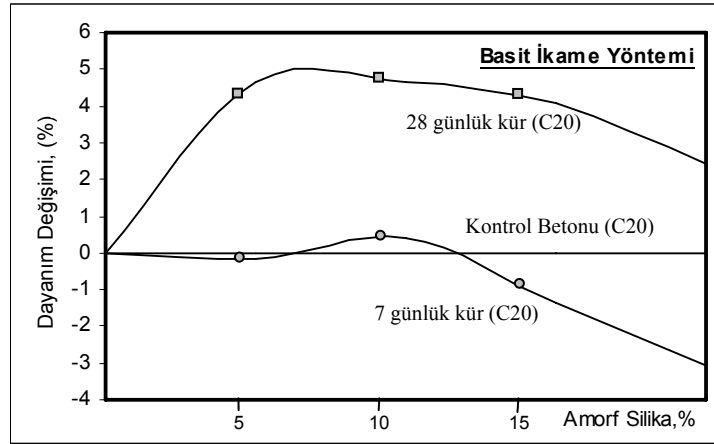


Şekil 4.34. Basit ikame yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C30) beton örneklerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması (TS 3114)

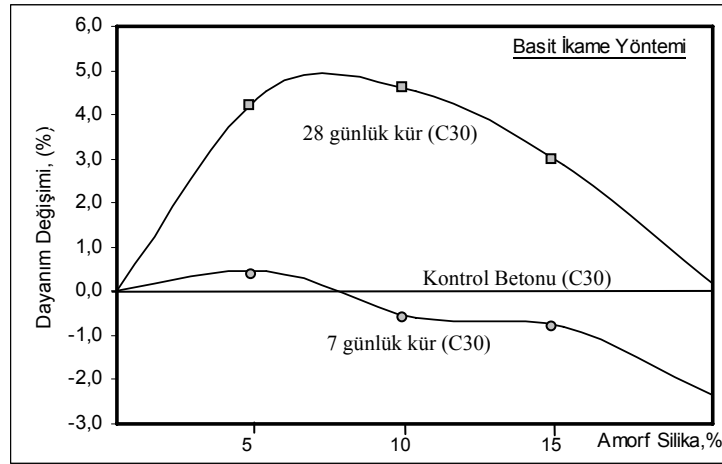


Şekil 4.35. Basit ikame yöntemine göre hazırlanan kontrol ve amorf silika katkılı (C40) beton örneklerinin basınç dayanım gelişimlerinin karşılaştırılması (TS 3114)

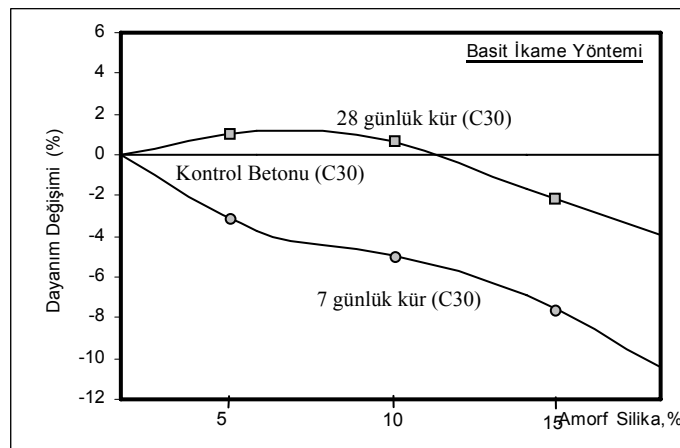
Araştırma bulguları değerlendirildiğinde, yer değiştirici malzeme olarak karışımda kullanılan amorf silikanın % 5'den % 15'e kadar değişen oranlarının, beton numunelerinin dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte C30 ve C40 betonlarına % 15 amorf silika ilavesi, C20 betonuna benzer dayanım gelişimini göstermemektedir. Amorf silikanın % 5'den % 10' a kadar farklı oranlarında dayanım yavaşça artmaktadır. Bu yüzden portland çimentosuyla betonda yer değiştirici malzeme olarak kullanmak için amorf silikanın belirli bir miktarı vardır. Bu etki deney sonuçlarına göre dayanım değişim skalası olarak da analiz edilmiştir (Şekil 4.36, 4.37 ve 4.38). Mikronize amorf silikanın bir miktarından sonra beton dayanımı yavaşça artmaktadır. 28 günlük kür süresi için en yüksek dayanımlar, amorf silikanın karışıma yer değiştirici malzeme olarak C20 betonunda % 6,65, C30 betonunda % 7,20 ve C40 betonunda ise % 5,00-% 7,00 arasında yer alan oranlarda ilave edilmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 4.36. C20 betonunda basit ikame yöntemine göre kullanım için amorf silika oranı-basınç dayanım değişimi ilişkisi



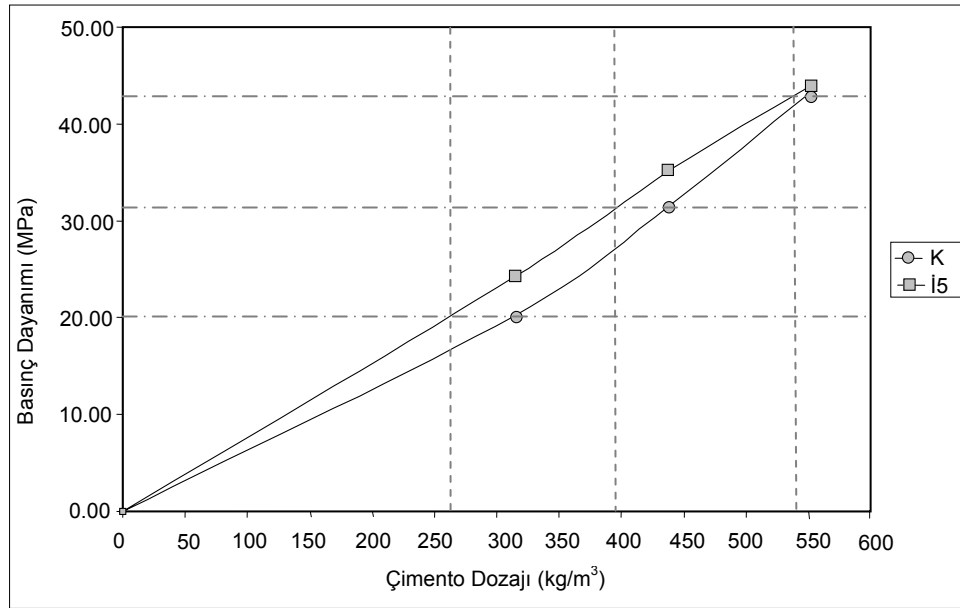
Şekil 4.37. C30 betonunda basit ikame yöntemine göre kullanım için amorf silika oranı - basınç dayanım değişimi ilişkisi



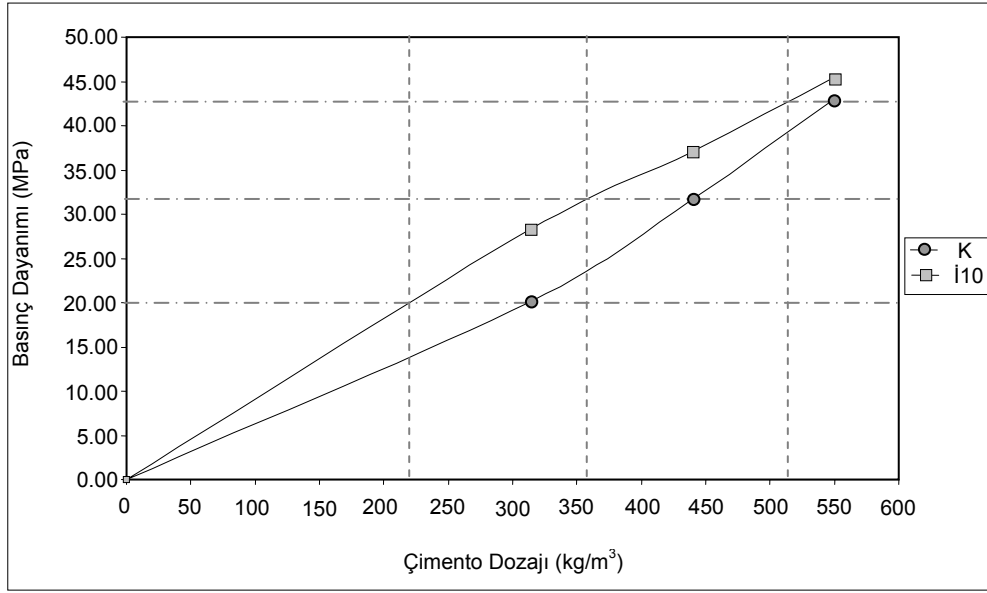
Şekil 4.38. C40 betonunda basit ikame yöntemine göre kullanım için amorf silika oranı - basınç dayanım değişimi ilişkisi

Portland çimentosunun hidratasyonu esnasında kalsiyum silikatlarla beraber oluşan gözenek suyundaki serbest kalsiyum hidroksit (ve diğer alkali) iyonlarının bir kısmı, amorf silika partikülleri ile puzolanik reaksiyona girmektedir. Reaksiyon, kalsiyum hidroksit iyonu ve bu iyonla çekirdeklik yapan çok ince amorf silika partiküllerinin kimyasal bağ oluşturmalarından kaynaklanmakta ve ilave kristal oluşumu beton matriksini güçlendirmekte, böylece dayanımda iyileşme gerçekleşmektedir.

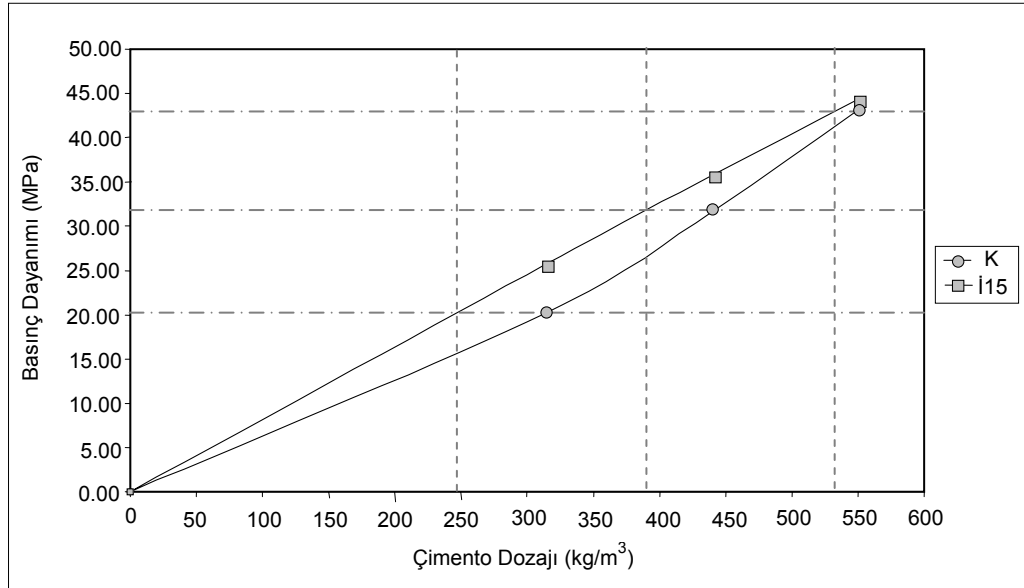
Amorf silikanın betonda verimlilik, bir diğer değişle etkinlik faktörü (k) tespit edilebilir. Bu amaçla, mikronize amorf silikanın ilave ve eksiltme yöntemlerine göre betonda katkı elemanı olarak kullanımında, beton performansını ne ölçülerde etkin kıldığı için deney bulguları, farklı çimento doz kullanımı ve beton örneklerinin basınç dayanımı ilişkileri grafiksel olarak irdelenmiştir. Bu grafikler Şekil 4.39.a-b-c ve Şekil 4.40.a-b-c’de verilmiştir.



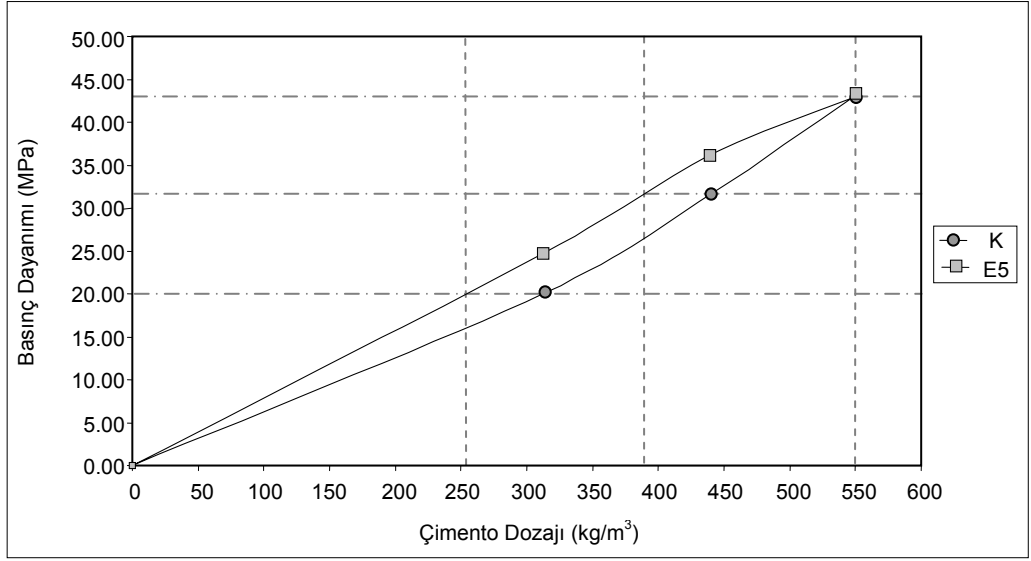
Şekil 4.39a. Amorf silikanın % 5 oranında ilavesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi



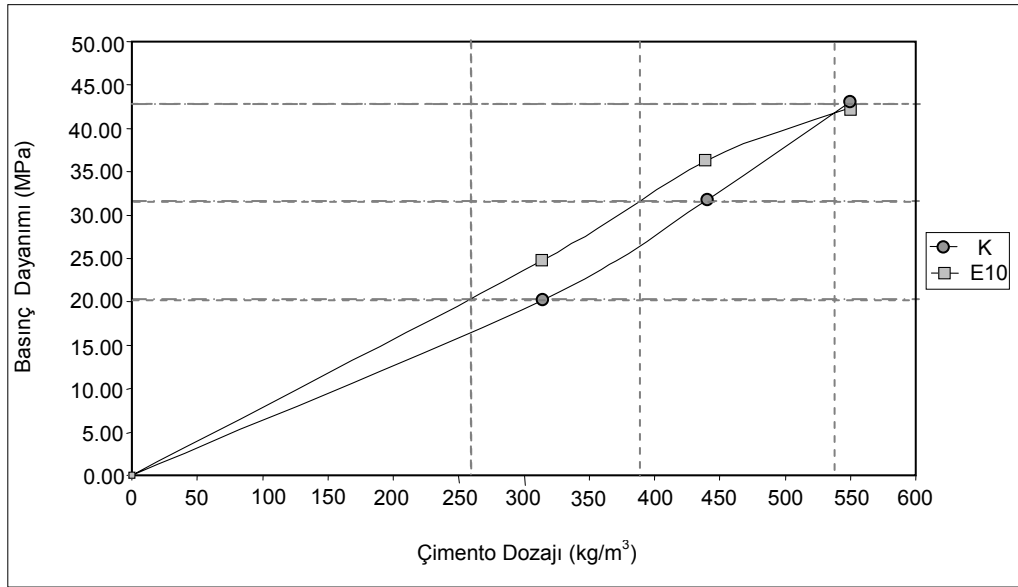
Şekil 4.39b. Amorf silikanın % 10 oranında ilavesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi



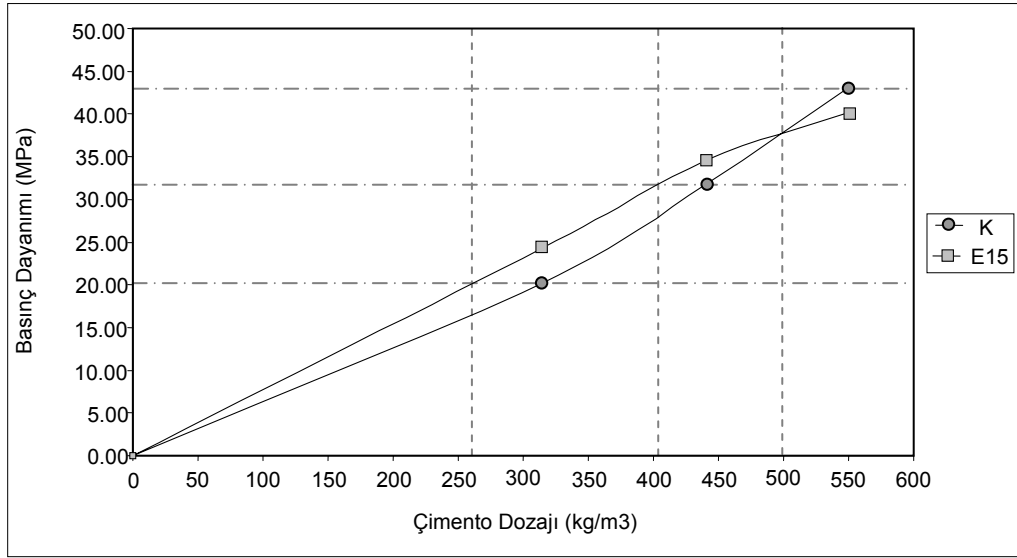
Şekil 4.39c. Amorf silikanın % 15 oranında ilavesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi



Şekil 4.40a. Amorf silikanın % 5 eksiltmesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi



Şekil 4.40b. Amorf silikanın % 10 eksiltmesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi



Şekil 4.40c. Amorf silikanın % 15 eksiltmesinde beton dayanımı-çimento dozajı ilişkisi

Araştırmalara göre elde edilen verimlilik faktörleri ise Çizelge 4.41a-b-c'de verilmiştir. Bu C20 ve C30 sınıfı beton numuneleri için bu değerler, Yeni Zelanda'dan Tikitere amorf silika kayacı için Branz (1999) tarafından verilen betonda mikrosilika kullanım değerlerine benzemektedir (Çizelge 4.42).

Çizelge 4.41a. C20 beton örnekleri için amorf silikanın etkinlik faktörü hesabı

C20	Ç1	Ç2	AS	Ç1-Ç2	k20
İ 5	314	261	15,7	53	3,38
İ 10	314	220	31,4	94	2,99
İ 15	314	246	47,1	68	1,44
E 5	314	252,5	15,7	61,5	3,92
E 10	314	260	31,4	54	1,72
E 15	314	260	47,1	54	1,15
C20-İ için etkinlik faktörü					2,60
C20-E için etkinlik faktörü					2,26

Çizelge 4.41b. C30 beton örnekleri için amorf silikanın etkinlik faktörü hesabı

C30	Ç1	Ç2	AS	Ç1-Ç2	k20
İ 5	440	398	22	42	1,91
İ 10	440	358	44	82	1,86
İ 15	440	388	66	52	0,79
E 5	440	388	22	52	2,36
E 10	440	387,5	44	58,13	1,32
E 15	440	403	66	60,45	0,92
C30-İ için etkinlik faktörü					1,52
C30-E için etkinlik faktörü					1,53

Çizelge 4.41c. C40 beton örnekleri için amorf silikanın etkinlik faktörü hesabı

C40	Ç1	Ç2	AS	Ç1-Ç2	k20
İ 5	550	542,2	27,5	7,8	0,28
İ 10	550	514	55	36	0,65
İ 15	550	532	82,5	18	0,22
E 5	550	546	27,5	4	0,15
E 10	550	538	55	12	0,22
E 15	550	499,5	82,5	50,5	0,61
C40-İ için etkinlik faktörü					0,39
C40-E için etkinlik faktörü					0,33

Çizelge 4.42. Tikitere amorf silikasının beton uygulamaları için etkinlik faktörü (BRANZ, 1999)

Uygulama	Ortalama Dayanım (N/mm ²)	Etkinlik Faktörü
Endüstriyel Döşemeler	55	2.5
Köprü İnşaatı	53	2.8

4.3.1.3. Muhtelif Çimento Dozajlardaki Betonların Aşınma Dayanımlarına Amorf Silikanın Etkisi

Amorf silikanın geleneksel beton aşınma dayanımına etkisini analiz amacıyla 10x10x10cm ebatlarında küp numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin hazırlanmasında Bölüm 4.3.1.1.'de Çizelge 4.34'den 4.39'a kadar verilen beton

karişım tasarımları uygulanmıştır. Böhme yöntemine göre sürtünme ile aşınma tayini deneyinde elde edilen bulgular ise Çizelge 4.43–4.44-4.45’ de verilmiştir.

Çizelge 4.43. C20 betonu için aşınma dayanımı deney bulguları

		Deney Öncesi					Deney Sonrası						
Numune No		Ağırlık (gr)	Boyutlar (cm)			V (cm ³)	Ağırlık (gr)	Boyutlar (cm)			V (cm ³)	A (cm ²)	ΔV cm ² /50cm ³
C20 Kontrol	1	2167,42	10,11	10,03	10,16	1071,63	2148,02	10,11	9,97	10,09	1016,13	101,26	7,38
	2	2188,71	10,13	10,22	10,15	1008,62	2173,96	10,11	10,18	10,09	1038,98	102,82	5,55
	3	2191,51	10,10	10,17	10,16	1039,19	2165,32	10,09	10,06	10,09	1023,17	101,41	9,87
	4	2186,53	10,11	10,16	10,17	1036,02	2168,38	10,10	10,10	10,10	1030,61	101,26	6,83
	5	2174,93	10,12	10,14	10,16	1044,74	2158,18	10,11	10,10	10,08	1028,97	102,40	6,35
	Ort	2181,82	10,11	10,14	10,16	1042,21	2162,77	10,10	10,08	10,09	1027,57	101,83	7,20
C20 - % 5 A.S. İlave	1	2232,59	10,09	10,07	10,16	1032,02	2217,41	10,05	10,05	10,11	1020,43	100,68	5,76
	2	2246,73	10,03	10,05	10,14	1020,91	2223,65	9,96	9,98	10,09	1003,56	100,45	8,64
	3	2250,99	10,12	10,12	10,23	1048,01	2233,10	10,08	10,08	10,18	1034,35	102,14	6,69
	4	2238,46	10,08	10,09	10,20	1036,89	2220,66	10,04	10,05	10,14	1023,35	101,60	6,67
	5	2235,18	10,06	10,07	10,19	1031,68	2215,47	10,01	10,03	10,13	1016,65	101,63	7,39
	Ort	2240,79	10,08	10,08	10,18	1033,90	2222,06	10,03	10,04	10,13	1019,67	101,30	7,03
C20 - % 10 A.S. İlave	1	2232,59	10,09	10,07	10,16	1032,02	2217,41	10,08	10,01	10,11	1020,41	101,36	6,78
	2	2246,73	10,03	10,05	10,14	1020,91	2223,65	10,05	10,08	10,09	1021,96	101,69	5,35
	3	2250,99	10,12	10,12	10,23	1048,01	2233,10	10,01	10,11	10,11	1023,14	102,02	5,60
	4	2238,46	10,08	10,09	10,20	1036,89	2220,66	10,04	10,05	10,13	1021,63	100,94	7,83
	5	2235,18	10,06	10,07	10,19	1031,68	2215,47	10,02	10,18	10,10	1029,42	101,74	6,08
	Ort	2240,79	10,08	10,08	10,18	1033,90	2222,06	10,04	10,08	10,11	1023,31	101,55	6,33
C20 - % 15 A.S. İlave	1	2232,59	10,09	10,07	10,16	1032,02	2217,41	10,05	10,05	10,11	1020,43	100,68	5,76
	2	2246,73	10,03	10,05	10,14	1020,91	2223,65	9,96	9,98	10,09	1003,56	100,45	8,64
	3	2250,99	10,12	10,12	10,23	1048,01	2233,10	10,08	10,08	10,18	1034,35	102,14	6,69
	4	2238,46	10,08	10,09	10,20	1036,89	2220,66	10,04	10,05	10,14	1023,35	101,60	6,67
	5	2235,18	10,06	10,07	10,19	1031,68	2215,47	10,01	10,03	10,13	1016,65	101,63	7,39
	Ort	2240,79	10,08	10,08	10,18	1033,90	2222,06	10,03	10,04	10,13	1019,67	101,30	7,03
C20 - % 5 A.S. Eksilt.	1	2277,33	10,18	9,99	10,12	1029,40	2256,79	10,16	9,95	10,01	1011,74	102,75	8,59
	2	2282,45	10,17	10,16	10,20	1054,66	2271,22	10,14	10,13	10,17	1045,06	102,17	4,70
	3	2295,87	10,23	10,40	10,23	1087,55	2284,34	10,20	10,36	10,19	1077,64	104,13	4,76
	4	2300,54	10,17	10,16	10,28	1062,31	2289,68	10,14	10,14	10,25	1053,07	103,45	4,47
	5	2308,58	10,21	10,16	10,29	1066,90	2293,76	10,17	10,11	10,25	1054,41	103,49	6,04
	Ort	2292,95	10,19	10,17	10,22	1060,16	2279,16	10,16	10,14	10,17	1048,38	103,20	5,71
C20 - % 10 A.S. Eksilt.	1	2246,73	10,12	10,17	10,30	1060,29	2230,94	10,10	10,12	10,23	1046,15	103,01	6,86
	2	2273,62	10,17	10,18	10,32	1068,55	2257,64	10,15	10,14	10,25	1054,63	102,53	6,79
	3	2258,68	10,15	10,17	10,29	1061,88	2243,03	10,13	10,12	10,23	1048,01	103,76	6,68
	4	2251,38	10,20	10,20	10,32	1072,64	2234,65	10,18	10,14	10,25	1057,44	103,90	7,32
	5	2277,39	10,18	10,18	10,31	1067,72	2262,06	10,15	10,16	10,23	1054,33	104,08	6,43
	Ort	2261,56	10,16	10,18	10,31	1066,22	2245,66	10,14	10,14	10,24	1052,11	103,46	6,82
C20 - % 15 A.S. Eksilt.	1	2273,99	10,11	10,22	10,22	1056,49	2255,80	10,06	10,19	10,17	1042,13	102,72	6,99
	2	2255,90	10,12	10,14	10,15	1040,43	2236,05	10,04	10,08	10,12	1023,67	101,50	8,26
	3	2253,89	10,08	10,34	10,15	1058,63	2236,53	10,05	10,29	10,13	1047,49	103,09	5,41
	4	2286,10	10,17	10,37	10,16	1071,40	2267,58	10,14	10,32	10,12	1058,91	104,36	5,99
	5	2292,82	10,15	10,30	10,16	1060,72	2274,71	10,12	10,24	10,11	1047,99	102,92	6,18
	Ort	2272,54	10,13	10,27	10,17	1057	2254,13	10,08	10,22	10,13	1044,04	102,92	6,56

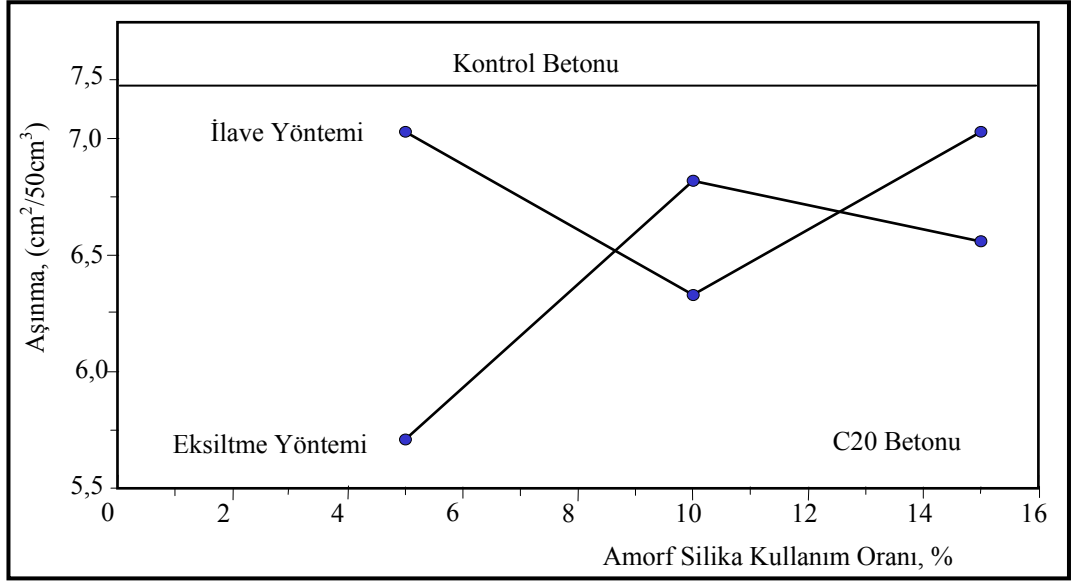
Çizelge 4.44. C30 betonu için aşınma dayanımı deney bulguları

Numune No	Deney Öncesi					Deney Sonrası					A (cm ²)	ΔV cm ² / 50cm ³	
	Ağırlık (gr)	Boyutlar (cm)			V (cm ³)	Ağırlık (gr)	Boyutlar (cm)			V (cm ³)			
C30 Kontrol	1	2265,10	10,11	10,20	10,28	1059,99	2248,67	10,07	10,17	10,22	1046,64	103,07	6,47
	2	2270,23	10,11	10,22	10,27	1061,04	2247,55	10,07	10,16	10,19	1042,76	102,29	8,94
	3	2280,61	10,10	10,23	10,17	1051,41	2265,70	10,08	10,20	10,11	1039,47	102,06	5,85
	4	2291,29	10,15	10,19	10,38	1072,84	2274,52	10,11	10,16	10,32	1059,31	103,18	6,56
	5	2258,57	10,13	10,22	10,25	1060,44	2241,40	10,08	10,18	10,19	1046,46	102,81	6,80
	Ort	2273,16	10,12	10,21	10,27	1061,14	2255,57	10,08	10,17	10,21	1046,93	102,68	6,92
C30 - % 5 A.S. İlave	1	2266,07	10,20	10,18	10,15	1053,62	2249,03	10,16	10,15	10,09	1040,73	102,69	6,28
	2	2255,49	10,17	10,29	10,13	1059,89	2239,56	10,12	10,25	10,10	1047,88	103,15	5,82
	3	2272,81	10,15	10,24	10,19	1059,11	2256,99	10,13	10,17	10,17	1047,84	102,87	5,48
	4	2278,32	10,21	10,23	10,16	1060,47	2261,41	10,15	10,20	10,13	1047,83	103,39	6,11
	5	2305,12	10,19	10,22	10,24	1066,62	2288,70	10,16	10,17	10,20	1054,45	103,55	5,87
	Ort	2275,56	10,18	10,23	10,17	1059,94	2259,14	10,14	10,19	10,14	1047,75	103,13	5,91
C30 - % 10 A.S. İlave	1	2280,49	10,15	10,24	10,23	1064,10	2266,62	10,13	10,20	10,19	1053,51	103,40	5,12
	2	2235,88	10,15	10,18	10,16	1049,60	2221,16	10,09	10,15	10,13	1036,42	102,38	6,43
	3	2289,64	10,09	10,26	10,16	1051,07	2275,26	10,06	10,21	10,12	1039,45	103,07	5,64
	4	2328,06	10,19	10,23	10,19	1062,97	2312,51	10,15	10,18	10,16	1048,87	103,54	6,81
	5	2282,89	10,09	10,19	10,14	1043,13	2269,69	10,10	10,17	10,07	1033,44	101,65	4,77
	Ort	2283,39	10,13	10,22	10,18	1317,72	2269,05	10,10	10,18	10,13	1042,34	102,81	5,75
C30 - % 15 A.S. İlave	1	2271,58	10,15	10,10	10,16	1041,96	2258,25	10,11	10,05	10,15	1031,60	102,14	5,07
	2	2305,37	10,17	10,21	10,13	1051,86	2292,53	10,13	10,18	10,11	1042,78	102,86	4,41
	3	2306,44	10,07	10,09	10,21	1036,89	2291,98	10,00	10,05	10,20	1025,01	101,70	5,84
	4	2266,91	10,17	10,15	10,15	1047,43	2255,42	10,13	10,13	10,14	1039,82	102,66	3,71
	5	2280,40	10,26	10,26	10,12	1064,79	2267,70	10,22	10,23	10,10	1055,75	101,64	4,45
	Ort	2286,14	10,17	10,16	10,15	1048,59	2273,17	10,12	10,13	10,14	1038,99	102,20	4,70
C30 - % 5 A.S. Eksilt.	1	2277,33	10,18	9,99	10,12	1029,40	2256,79	10,16	9,95	10,01	1011,74	102,75	8,59
	2	2282,45	10,17	10,16	10,20	1054,66	2271,22	10,14	10,13	10,17	1045,06	102,17	4,70
	3	2295,87	10,23	10,40	10,23	1087,55	2284,34	10,20	10,36	10,19	1077,64	104,13	4,76
	4	2300,54	10,17	10,16	10,28	1062,31	2289,68	10,14	10,14	10,25	1053,07	103,45	4,47
	5	2308,58	10,21	10,16	10,29	1066,90	2293,76	10,17	10,11	10,25	1054,41	103,49	6,04
	Ort	2292,95	10,19	10,17	10,22	1060,16	2279,16	10,16	10,14	10,17	1048,38	103,20	5,71
C30 - % 10 A.S. Eksilt.	1	2317,42	10,17	10,11	10,20	1048,96	2302,13	10,12	10,06	10,15	1033,34	101,90	7,664
	2	2287,65	10,16	10,14	10,21	1052,07	2273,92	10,14	10,09	10,19	1042,26	102,71	4,775
	3	2285,03	10,19	10,17	10,16	1053,11	2272,23	10,17	10,13	10,15	1045,26	103,96	3,774
	4	2281,16	10,14	10,06	10,26	1046,82	2267,70	10,11	10,03	10,23	1037,45	102,19	4,581
	5	2298,61	10,13	10,15	10,20	1048,76	2283,90	10,11	10,06	10,18	1034,97	102,53	6,726
	Ort	2293,97	10,16	10,13	10,20	1049,94	2279,98	10,13	10,07	10,18	1038,66	102,66	5,504
C30 - % 15 A.S. Eksilt.	1	2290,18	10,11	10,06	10,17	1032,93	2278,04	10,07	10,03	10,14	1024,16	101,69	4,308
	2	2303,69	10,14	10,19	10,18	1051,97	2288,95	10,09	10,16	10,16	1041,34	103,52	5,132
	3	2297,59	10,13	10,23	10,10	1045,74	2281,85	10,08	10,21	10,06	1034,63	102,47	5,421
	4	2285,36	10,23	10,22	10,19	1065,68	2275,26	10,19	10,21	10,16	1058,08	103,81	3,660
	5	2316,73	10,16	10,19	10,23	1059,36	2303,34	10,11	10,19	10,19	1049,79	102,30	4,663
	Ort	2298,71	10,15	10,18	10,17	1051,13	2285,49	10,11	10,16	10,14	1041,60	102,76	4,637

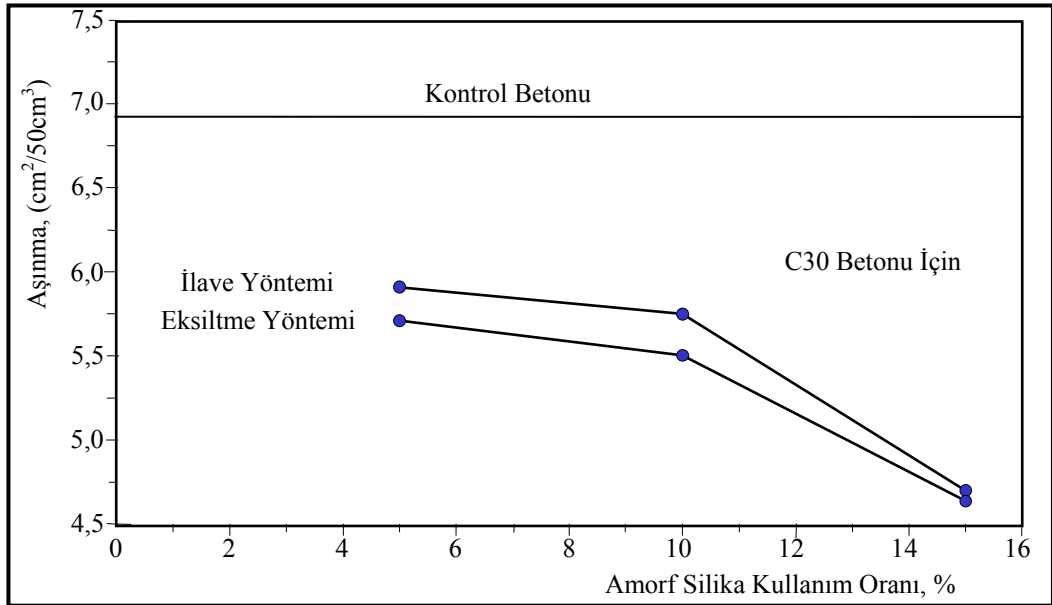
Çizelge 4.45. C40 betonu için aşınma dayanımı deney bulguları

Deney Öncesi						Deney Sonrası							
Numune No	Ağırlık (gr)	Boyutlar (cm)			V (cm ³)	Ağırlık (gr)	Boyutlar (cm)			V (cm ³)	A (cm ²)	ΔV cm ² /50cm ³	
C40 - Kontrol	1	2319,05	10,22	10,21	10,27	1071,64	2303,86	10,16	10,17	10,25	1058,69	103,88	6,230
	2	2328,40	10,05	10,04	10,00	1008,62	2307,45	9,93	10,00	9,98	991,51	100,40	8,520
	3	2285,29	10,10	10,16	10,13	1039,19	2272,50	10,06	10,11	10,11	1028,56	100,44	5,295
	4	2299,17	10,09	10,14	10,13	1036,02	2289,17	10,06	10,10	10,12	1027,54	102,28	4,145
	5	2278,94	10,11	10,19	10,14	1044,74	2266,40	10,06	10,15	10,13	1034,06	102,30	5,219
	Ort	2302,17	10,11	10,15	10,13	1040,04	2287,87	10,05	10,11	10,12	1028,07	101,86	5,882
C40 - % 5 A.S. İlavası	1	2302,19	10,01	10,28	10,27	1055,98	2287,69	9,98	10,24	10,23	1045,25	103,24	5,196
	2	2325,25	10,23	10,26	10,32	1082,55	2311,99	10,21	10,20	10,30	1072,66	104,72	4,722
	3	2294,56	10,12	10,27	10,27	1067,81	2281,83	10,10	10,24	10,24	1058,34	103,24	4,584
	4	2317,73	10,11	10,28	10,32	1072,78	2303,47	10,09	10,25	10,28	1062,24	103,73	5,078
	5	2307,65	10,13	10,24	10,28	1065,94	2294,73	10,11	10,20	10,24	1056,28	104,55	4,621
	Ort	2309,47	10,12	10,27	10,29	1069,01	2295,94	10,10	10,23	10,26	1058,95	103,90	4,840
C40 - % 10 A.S. İlavası	1	2317,78	10,14	10,27	10,32	1074,28	2305,77	10,16	10,15	10,09	1040,73	102,69	6,28
	2	2331,02	10,24	10,25	10,38	1088,96	2319,18	10,12	10,25	10,10	1047,88	103,15	5,82
	3	2325,70	10,05	10,25	10,25	1056,18	2316,21	10,13	10,17	10,17	1047,84	102,87	5,48
	4	2313,38	10,13	10,26	10,29	1069,47	2302,55	10,15	10,20	10,13	1047,83	103,39	6,11
	5	2335,63	10,17	10,23	10,34	1074,40	2323,06	10,16	10,17	10,20	1054,45	103,55	5,87
	Ort	2324,70	10,14	10,25	10,32	1072,66	2313,35	10,14	10,19	10,14	1047,75	103,13	5,91
C40 - % 15 A.S. İlavası	1	2342,70	10,08	10,05	10,09	1022,66	2334,83	10,06	10,03	10,07	1016,79	101,11	2,905
	2	2327,04	10,16	10,14	10,11	1041,15	2319,83	10,11	10,14	10,10	1035,61	102,36	2,704
	3	2313,30	10,11	9,88	10,21	1020,05	2306,40	10,09	9,87	10,19	1014,91	101,00	2,544
	4	2339,95	10,21	10,00	10,26	1047,03	2332,00	10,18	9,97	10,26	1040,93	102,72	2,969
	5	2310,82	10,11	9,98	9,97	1005,85	2297,53	10,06	9,96	9,95	995,97	99,73	4,954
	Ort	2326,76	10,13	10,01	10,13	1027,35	2318,12	10,10	9,99	10,11	1020,84	101,38	3,215
C40 - % 5 A.S. Eksiltme	1	2328,71	10,07	10,30	10,14	1051,41	2317,53	10,04	10,27	10,09	1040,50	102,24	5,337
	2	2347,59	10,09	10,24	10,16	1049,34	2336,08	10,07	10,18	10,13	1038,25	101,87	5,444
	3	2344,36	10,08	10,25	10,18	1051,80	2333,58	10,06	10,21	10,14	1041,30	102,48	5,122
	4	2315,41	10,09	10,22	10,15	1046,67	2303,26	10,07	10,17	10,10	1034,66	102,97	5,827
	5	2321,43	10,10	10,15	10,23	1048,53	2312,72	10,08	10,12	10,19	1039,89	103,44	4,175
	Ort	2331,50	10,09	10,23	10,17	1049,55	2320,63	10,07	10,19	10,13	1038,92	102,60	5,181
C40 - % 10 A.S. Eksiltme	1	2336,60	10,24	10,26	10,11	1061,46	2321,55	10,20	10,23	10,09	1052,96	102,54	4,145
	2	2379,28	10,26	10,30	10,12	1069,04	2360,79	10,21	10,27	10,09	1057,38	103,83	5,615
	3	2299,68	10,20	10,18	10,10	1048,64	2283,65	10,15	10,16	10,07	1038,56	103,24	4,879
	4	2343,08	10,18	10,15	10,08	1042,15	2334,88	10,16	10,17	10,05	1038,44	102,29	1,817
	5	2321,56	10,22	10,24	10,14	1061,18	2303,75	10,23	10,20	10,06	1050,35	103,15	5,251
	Ort	2336,04	10,22	10,22	10,11	1056,49	2320,93	10,19	10,21	10,07	1047,54	103,01	4,341
C40 - % 15 A.S. Eksiltme	1	2380,92	10,17	10,40	10,25	1084,03	2370,30	10,16	10,35	10,24	1076,16	105,05	3,742
	2	2456,36	10,09	10,25	10,21	1055,43	2446,14	10,07	10,21	10,20	1048,61	103,86	3,283
	3	2340,74	10,09	10,27	10,19	1056,66	2331,00	10,08	10,23	10,18	1049,95	102,74	3,267
	4	2400,04	10,02	10,16	10,15	1033,30	2388,14	10,00	10,10	10,14	1023,33	101,30	4,921
	5	2374,33	10,10	10,26	10,20	1056,26	2364,92	10,07	10,24	10,18	1050,14	103,55	2,954
	Ort	2390,47	10,09	10,27	10,20	1057,13	2380,10	10,08	10,23	10,19	1049,64	103,30	3,633

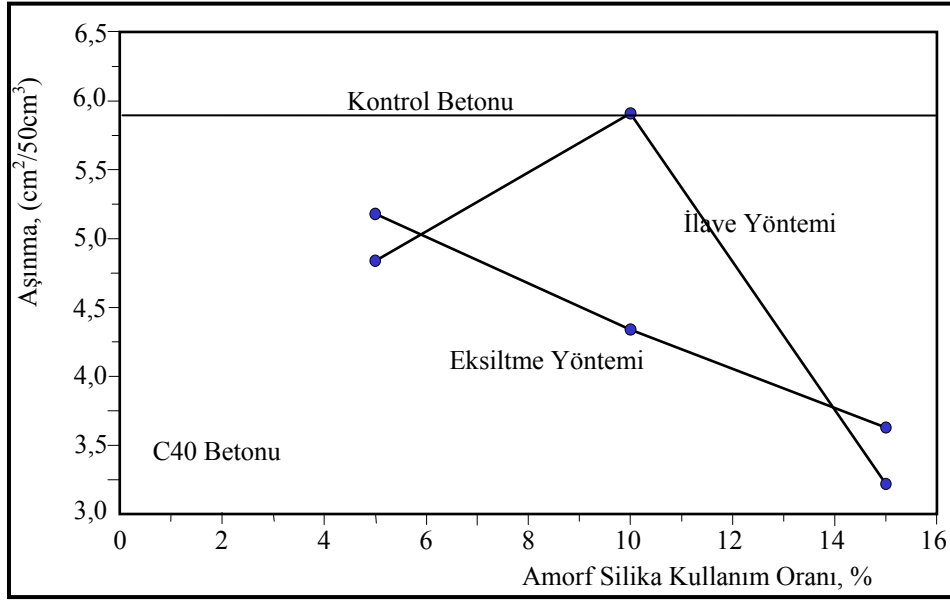
Yapılan deneysel çalışmalar, amorf silika katkılı tüm beton örneklerinin aşınma dayanımlarının, kontrol betonu aşınma dayanımlarından oldukça düşük olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, amorf silika katkısı, betonun aşınmaya karşı mukavemetini önemli ölçüde artırmaktadır. Araştırma bulgularına göre, betonun aşınma dayanımına amorf silika katkısının etkisini irdelemek ve yukarıda değinilen olguyu göstermek amacıyla Şekil 4.41-4.42-4.43`de verilen grafikler elde edilmiştir. Grafiksiz analizlerde, amorf silika katkısının aşınma dayanımına etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 4.41. C20 betonu örneklerinin aşınma dayanımı test analizi irdelemesi



Şekil 4.42. C30 betonu örneklerinin aşınma dayanımı test analizi irdelemesi



Şekil 4.43. C40 betonu örneklerinin aşınma dayanımı test analizi irdelemesi

4.3.1.4. Reaktif Agregalı Betonlarda Gelişen Alkali- Agregat Reaksiyonuna Amorf Silikanın Etkisi

Beton, inşaat endüstrisinde en fazla kullanılan malzemedir. Sudan sonra yeryüzünde en fazla tüketilen betonun sürekli-sağlamlığı güvenlik, ekonomi ve çevre açısından büyük önem taşır. Büyük hacimli beton yapıların kullanım ömrünü öngörülenden önce tamamlaması, yüksek onarım, takviye yada yeniden inşaa maliyetleri gerektirebilir. Sürekli-sağlam beton tasarımlarında önemli kaygı unsurlarından birisi de alkali silika reaksiyonu olmuştur. Alkali silika reaksiyonuyla oluşan kılcal çatlaklar, betonun geçirgenliğini artırır, dayanımını düşürür ve ekonomik kullanım ömrünü azaltır.

20.yy ortalarından bu yana alkali silika reaksiyonunun betonda yol açtığı zararları azaltma ve hatta önlemeye dönük pek çok çalışma yapılmıştır. Maalesef ülkemizde bu konuda dünyayla eş zamanlı olarak harekete geçilememiştir. Ancak son dönemlerde yüksek performanslı beton, çimento kriterleri, reaktif agregalar, reaksiyonunun önlenmesi, deney yöntemleri vs. konularını kapsayan çalışmaların sayısında önemli bir artış gözlenmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde, doğal

(mikronize) amorf silika kullanılarak, reaktif agregalı betonlarda gelişebilecek zararlarının önlenabilirliği deneysel yöntemler ile araştırılmış ve bulgular tartışılmıştır.

Doğal (mikronize) amorf silika kullanılarak, reaktif agregalı betonlarda gelişebilecek zararlara ilişkin bu tez çalışmasında yapılan deneysel çalışmalarda, Isparta Keçiborlu yöresi Kumludere amorf silika kayacı kullanılmıştır. Bölüm 4.2.1 ve Bölüm 4.2.2’de belirtildiği gibi, bu amorf silika kayacının SiO₂ içeriği oldukça yüksek, buna karşılık alkali metal (Na₂O, K₂O) ve toprak alkalilerin (CaO, MgO) oksit bileşenleriyle, SO₃ oranının düşük olduğu görülmektedir. Na₂O eşdeğeri alkali miktarı betonda alkali silika reaksiyonu bakımından önem taşımaktadır. ASTM C1240-03 standardına göre puzolanik katkı maddelerinin, Na₂O eşdeğeri alkali miktarı en fazla % 1,5 olmalıdır (Sabir vd., 2001). Buna göre Isparta yöresi amorf silika kayacının alkali içeriği standarda uyumludur. Kıyaslama yapılabilmesi amacıyla, Çizelge 4.46’de amorf silika ile beraber portland çimentosu ve diğer bazı beton katkı maddelerinin kimyasal bileşenleri de verilmiştir.

Çizelge 4.46. Amorf silika, silika dumanı, uçucu kül, kalsine kil ve portland çimentosunun kimyasal bileşimleri (Yeğınobalı, 2001; Akman ve Öztekin, 1995; ASTM C1260-01; ASTM C227-03)

Çimento ve Mineral Katkı Maddeleri	Kimyasal Bileşenler							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+(0,658*K ₂ O)	SO ₃	AZ
Portland çimentosu ¹	20,23	4,14	3,57	64,43	2,13	0,79	2,54	0,91
Uçucu kül ²	48,80	19,6	6,50	10,10	4,2	1,19	4,2	1,0
Silika dumanı ³	93,20	0,31	0,58	0,44	1,08	1,00	0,22	3,10
Kalsine kil ⁴	52,10	41,00	4,32	0,07	0,19	0,89	0,00	0,60
Amorf silika ⁵	92,48	2,60	0,09	0,00	0,31	1,10	0,09	1,85

(1) Göltaş A.Ş. portland çimentosu, (2) Orhaneli uçucu külü, (3) Antalya Etimetelurji A.Ş. baca tozu, (4) Metakaolin, (5) Isparta Keçiborlu amorf silikası

Keçiborlu Kumludere Ocağı amorf silika kayacı, “TS 25-Tras ve TS 639-Uçucu Küller” standartlarına göre değerlendirildiğinde de oldukça kaliteli doğal puzolan sınıfı bir malzeme olduğunu söylemek mümkündür. Amorf silika uçucu küllerde istenilen kimyasal özellikleri fazlasıyla sağlamaktadır (Çizelge 4.47).

Malzemenin puzolanik aktivite deney bulguları ise Çizelge 4.48’de verilmiştir. Mikronize amorf silikanın puzolanik aktivite ve özgül yüzey (blaine) deneyleri,

GÖLTAŞ A.Ş. Kalite Kontrol Laboratuvarına yaptırılmıştır. Deneyler sonucunda mikronize amorf silika 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerlerinin, TS 25 standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca mikronize amorf silikanın özgül yüzey alanı, (Göлтаş) portland çimentosu özgül yüzey alanı değeri ile karşılaştırıldığında, numunenin çimentoya göre 4 kat daha ince olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.47. Keçiborlu amorf silika kimyasal bileşenlerinin, doğal puzolan sınıfında yer alan tras (TS 25) ve uçucu küllerde (TS 639) aranılan kimyasal özellikler ile karşılaştırılması

Kimyasal Bileşen		Tras (%)	Uçucu Kül (%)	Amorf Silika (%)
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	En az	70	70	95,17
MgO	En çok	5	5	0,00
SO ₃	En çok	3	5	0,09
Kızdırma Kaybı	En çok	-	10	1,85

Çizelge 4.48. Mikronize amorf silikanın puzolanik aktivite ve özgül yüzey analiz bulguları (Akman ve Öztekin, 1995)

Puzolanik aktivite		
Blaine		12.124 cm ² /g
İncelik	200μ	1,8
	90μ	8,8
Özgül Ağırlık		2,32 g/cm ³
Dansite		920 g
Beton Sonuçları		
7 gün sonunda eğilme dayanımı		1,6 N/mm ²
7 gün sonunda basınç dayanımı		11,9 N/mm ²
(TS 25'e göre 7 gün sonunda eğilme dayanımı minimum 1,0 N/mm ² ; basınç dayanımı minimum 4,0 N/mm ² olmalıdır.)		

Betonda alkali silika reaksiyonunu ortaya çıkarmak için uygulanabilir, mevcut deney yöntemleri iki ana kategoride sınıflandırılabilir:

- I. Yalnızca agregalar üzerine uygulanabilen deney yöntemleri,
- II. Beton ve harç örnekleriyle yapılan deney yöntemleri.

İkinci kategori deney yöntemleri çimento ve agregaların birleşik kullanımına yöneliktir. Bu kategoriye uygun, ASTM C1260-01 “Agregaların Potansiyel Reaktivitesi İçin Standart Deney Yöntemi (Harç-Çubuk Yöntemi)” ve ASTM C227

“Çimento Agregası Kombinasyonunun Potansiyel Alkali Reaktivitesi” gibi birkaç yöntem mevcuttur (ASTM C441-02a; ASTM C227-03). Bu iki yöntemin önemli özellikleri ve farklılıkları Çizelge 4.49’da özetle verilmiştir.

Çizelge 4.49. Alkali silika reaksiyon yöntemlerinin kıyaslaması

Deney	ASTM C1260-01	ASTM C227
Numune Tasarımı	Harç Çubukları; w/c : 0,50 Agregalar : Sabit dereceli Kum/çimento : 2,25	Harç veya beton çubuklar; w/c : Belirtilmemiş Agregalar : Sabit dereceli Kum/çimento : 2,25
Ölçüm Koşulları	80°C’de 1N NaOH çözeltisinde.	%100 bağıl nem ve 38°C’de.
Genleşme kriterleri	Eğer; 14 günde genleşme > % 0,2 ise zararlı	Eğer; • 6 ayda genleşme > % 0,05 • 12 ayda genleşme > %0,1 ise zararlı

II. kategoriye uyan yöntemlerde çözeltilerden sağlanan alkalilerin yeterinden daha fazla ASR sebebiyet vermesi beklenir. Bundan dolayı bu tip yöntemlerde çimentonun alkali içeriği konu dışıdır. Deney yöntemlerinin uygulanabilirliği açısından örneğin karışım tasarımı ve agrega derecelenmesi önemlidir. Bu ve benzeri yöntemler arasında en önemli farklardan birisi 3 günden 12 aya kadar (veya daha fazla) değişen ölçüm sürekliliğidir. ASTM C227 deney yöntemi uzun zaman alması ve deney ortamının uzun süre korunması zorunluluğu açısından uygulaması zor bir yöntemdir. Doğal olarak hızlı yöntemler daha caziptir.

ASTM C441 deney yöntemi de ASR’nu önlemede mineral karışımının etkinliğini belirleme amacıyla bazı araştırmacılarca kullanılmıştır (ASTM C441-02a). Ancak bu yöntem, yüksek reaktiviteli, yapay agrega (ergitilmiş silika) kullanılması mecburiyeti ve su/çimento oranının özel bir düzenek yardımıyla ölçümlenen akıştan belirlenmesi nedeniyle çok kullanışlı değildir.

Araştırmada mevcut yöntemlerin içerisinde en uygulanabilir yöntem olan ve makul bir sürede tamamlanabilen ASTM C1260-01 standardı benimsenmiş ve uygulanmıştır. Bu deney yöntemi, zararlı iç genleşmeye neden olan ASR’na maruz betonda, kullanımı planlanan bir agreganın reaktivite potansiyelini saptamayı sağlamaktadır. Yavaş tepkiyen veya reaksiyonda geç genleşme üreten agregalar için

genellikle yararlıdır. Hazırlanan temsili örnekler NaOH çözeltisiyle genleştiğinden dolayı, çimentonun alkali içeriği genleşmeler için önemli bir faktör değildir. Bu deney yöntemini kullanarak belirli bir agreganın dikkate alınan potansiyel reaktifliği, agreganın performansından kaynaklandığı sonucuna varıldığında, ilgili standart da düşük alkali portland çimentosu, mineral katkı maddeleri veya derecelenmiş yüksek fırın cürufu gibi reaksiyonu bastırıcı önlemlerin kullanımı önerilmektedir.

Deney karışımlarının hazırlanması için agrega olarak potansiyel reaktifliğe sahip Uşak Gediz çayı kum-çakıl ocaklarından sınıflanmış agrega temin edilmiştir. Standartta öngörülen granülometriyi sağlayabilmek için (standartta uygun olarak) dere malzemesinin eksik boyutu, Isparta Belediyesi Diyadin Taş Ocağı'na ait kireçtaşı agregası (No 16-30 ve No 50-100) ile takviye edilmiştir. Deneyde kullanılacak agrega granülometrisi Çizelge 4.50'ye uygun olarak hazırlanarak, değişik elek boyutlarına gruplandırıldıktan sonra toz ve ince partikülleri uzaklaştırmak için elek üzerinde spreyleme yöntemi ile yıkanmıştır. Daha sonra yıkanan agrega kurutulurken, ağırlıkça Çizelge 4.51'de belirtilen granülometrik dereceleri elde etmek için karıştırılmıştır.

Çizelge 4.50. Harç kum derecesi (ASTM C1260-01)

Harç Adı	Elek Serisi (ASTM E 11)	Boyut (mikron)	Ağırlık (%)
ASTM C 1260-01	No (4-8)	4750-2360	10
	No (8-16)	2360-1180	25
	No (16-30)	1180-600	25
	No (30-50)	600-300	25
	No (50-100)	300-150	15

Çizelge 4.51. Harç karışım tasarımı (ASTM C1260-01)

Karışım Tasarımı	Karışım A (Kontrol)	Karışım B (A.S. Katkılı)
s/b	0,47	0,47
k/b	2,25	2,25
Hava Miktarı (%)	5,9	5,9
Kum Tipi	Dere Çakılı + Kırmataş	Dere Çakılı + Kırmataş
Kum Derecesi	Çizelge 4.50	Çizelge 4.50
Amorf Silika	0	m _ç x (% 5, % 10, % 15)
S.Akışkanlaştırıcı	0	0
Ortam	1 N NaOH - 80°C	1 N NaOH - 80°C
Bekleme Süresi	14 gün	14 gün
Kür Süresi	2 gün	2 gün

Derecelenmiş deney agregası ile Çizelge 4.51'deki karışım tasarımı ve Çizelge 4.52'deki karışım miktarı uygulanarak deney harcı hazırlanmıştır. Amorf silikanın ASR'na etkisini saptamak için, ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 oranlarında çimento yerine ikame edilerek karışıma dahil edilmiştir. Bu şekilde karışıma giren toplam bağlayıcı madde miktarı sabit kalmıştır. Diğer karışım parametrelerinde ise bir değişiklik yapılmamıştır.

Çizelge 4.52. Numune gruplarına göre harç karışım miktarları (5'er adet çubuk için)

Çmt. (kg)	Karışım Oranı (%)	Kum (g)					Su (g)	A.S. (g)	
		Mix.	4-8	8-16	16-30	30-50			50-100
K	733,33	1650	165	412,5	412,5	412,5	247,5	344,67	0
AS-5	696,67	1650	165	412,5	412,5	412,5	247,5	344,67	36,67
AS-10	660,00	1650	165	412,5	412,5	412,5	247,5	344,67	73,33
AS-15	623,33	1650	165	412,5	412,5	412,5	247,5	344,67	110,00
AS-20	586,67	1650	165	412,5	412,5	412,5	247,5	344,67	146,67

Hazırlanan harç karışımı bekletilmeden kalıplara dökülerek, karışım tasarımını temsil eden 25 x 25 x 279 mm (1 x 1 x 11 inç) prizmatik çubuklar elde edilmiştir. Su/çimento, kum/çimento, kum (agrega) granülometrisi, kür süresi ve 1N NaOH çözeltisinde 80°C'deki deney koşulları, vs. gibi deneye etki eden parametreler ASTM C 1260-01 standardında tanımlanmıştır. ASTM C 1260-01 standardına göre ASR'na bağlı genleşme sınıflamasına ilişkin tanımsal değerlendirme Çizelge 4.53'de verilmiştir.

Çizelge 4.53. ASTM C 1260-01 standardına göre ASR'na bağlı genleşme sınıflaması

Yaş	r_{ort} (%)	Reaktivlik Derecesi
Dökümden 16 gün sonra	< 0,10	Zararsız
	> 0,20	Zararlı
	0,10-0,20	Potansiyel zararlı

2. gün sonunda harç çubukları kalıptan çıkarılarak sıfır okumaları yapılmış ve 80°C'deki 1 N NaOH çözeltisine maruz bırakılmışlardır. Çözelti içerisindeki harç çubuklarının 7, 12, 16 ve 28. gün sonundaki boy değişimleri ölçülerek, elde edilen bulgulardan her grup harç çubuğunda gelişen reaksiyon ve amorf silika katkısının reaksiyona etkisi değerlendirilmiştir. Deney ortamı için hazırlanan prizmatik harç çubukları farklı katkı oranlarına göre Şekil 4.44'de verilmiştir. Deney sonunda elde edilen bulgular Çizelge 4.54–4.55-4.56-4.57'de verilmiştir.



Şekil 4.44. Karışım tasarımını temsil eden 25 x 25 x 279 mm prizmatik çubuklar

Numunelerin sıfır okuması (L_0) ve her bir periyotta 0.01 mm duyarlılıkta okunan efektif ölçüm boyu (L_n) arasındaki fark hesaplanarak, o periyottaki numunenin genişmesi olarak kaydedilmiştir. Her bir periyot için bir karışım grubuna karşılık gelen beş numunenin genişleme aritmetik ortalaması, o çimento-agrega kombinasyonunun genişmesi olarak dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.54. Kontrol harç çubuklarının boy değişim verileri

Kür Süresi	2.gün	7.gün			12. gün		16. gün			28. gün		
Numune No	L_0 (mm)	L_1 (mm)	r_7 (%)	L_2 (mm)	r_{14} (%)	L_3 (mm)	r_{16} (%)	r_{ort} (%)	L_4 (mm)	r_{28} (%)	r_{ort} (%)	
KONTROL	1	278,63	278,95	0,117	279,12	0,178	279,22	0,214	0,228	279,35	0,260	0,272
	2	279,12	279,54	0,150	279,72	0,215	279,83	0,254		279,95	0,297	
	3	279,26	279,61	0,126	279,75	0,176	279,86	0,216		279,98	0,259	
	4	278,81	279,23	0,151	279,21	0,143	279,60	0,283		279,66	0,305	
	5	279,20	279,51	0,111	279,70	0,179	279,69	0,176		279,87	0,240	

r: Harç çubuk boy değişimi l_0 : İlk boy ölçümü l_n : Müteakip boy ölçümü $r = (l_n - l_0) / l_n$

Çizelge 4.55. % 5 amorf silika katkılı harç çubuklarının boy değişim verileri

Kür Süresi	2.gün	7.gün			12. gün		16. gün			28. gün		
Numune No	L_0 (mm)	L_1 (mm)	r_7 (%)	L_2 (mm)	r_{14} (%)	L_3 (mm)	r_{16} (%)	r_{ort} (%)	L_4 (mm)	r_{28} (%)	r_{ort} (%)	
% 5 A. S.	1	279,22	279,46	0,086	279,48	0,093	279,50	0,100	0,141	279,71	0,175	0,221
	2	279,65	279,86	0,075	280,05	0,143	280,05	0,143		280,17	0,186	
	3	279,85	280,12	0,096	280,25	0,143	280,28	0,154		280,45	0,214	
	4	279,69	279,93	0,086	280,09	0,143	280,15	0,164		280,33	0,229	
	5	279,99	280,21	0,079	280,35	0,129	280,39	0,143		280,83	0,300	

r: Harç çubuk boy değişimi l_0 : İlk boy ölçümü l_n : Müteakip boy ölçümü $r = (l_n - l_0) / l_n$

Çizelge 4.56. % 10 amorf silika katkılı harç çubuklarının boy değişim verileri

Kür Süresi	2.gün	7.gün			12. gün		16. gün			28. gün		
Numune No	L_0 (mm)	L_1 (mm)	r_7 (%)	L_2 (mm)	r_{14} (%)	L_3 (mm)	r_{16} (%)	r_{ort} (%)	L_4 (mm)	r_{28} (%)	r_{ort} (%)	
%10 A. S.	1	279,59	279,68	0,032	279,82	0,082	279,86	0,097	0,103	279,90	0,111	0,123
	2	279,35	279,48	0,048	279,61	0,094	279,61	0,094		279,70	0,126	
	3	279,40	279,43	0,011	279,71	0,111	279,77	0,132		279,85	0,161	
	4	278,71	278,84	0,047	278,86	0,054	279,00	0,104		279,03	0,115	
	5	279,30	279,49	0,067	279,52	0,077	279,55	0,088		279,59	0,102	

r: Harç çubuk boy değişimi l_0 : İlk boy ölçümü l_n : Müteakip boy ölçümü $r = (l_n - l_0) / l_n$

Çizelge 4.57. %15 amorf silika katkılı harç çubuklarının boy değişim verileri

Kür Süresi	2.gün	7.gün			12. gün		16. gün			28. gün		
Numune No	L ₀ (mm)	L ₁ (mm)	r ₇ (%)	L ₂ (mm)	r ₁₄ (%)	L ₃ (mm)	r ₁₆ (%)	r _{ort} (%)	L ₄ (mm)	r ₂₈ (%)	r _{ort} (%)	
%15 A.S.	1	279,82	280,23	0,147	280,39	0,204	280,48	0,236	0,135	280,68	0,307	0,180
	2	278,78	279,10	0,115	279,25	0,169	279,35	0,204		279,52	0,265	
	3	278,93	279,04	0,039	279,08	0,054	279,18	0,090		279,26	0,118	
	4	279,83	279,96	0,046	279,96	0,046	280,03	0,071		280,10	0,096	
	5	279,18	279,29	0,039	279,30	0,043	279,39	0,075		279,50	0,115	

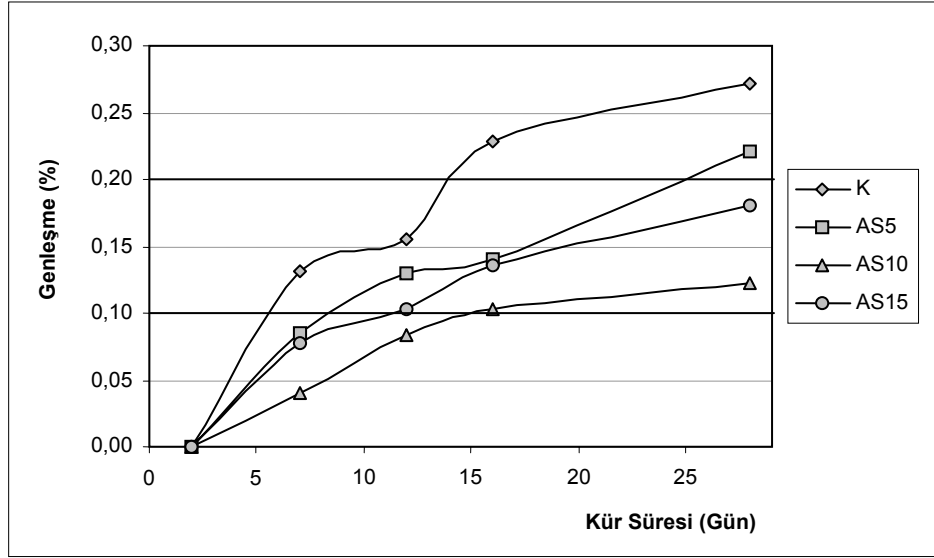
r: Harç çubuk boy değişimi l₀: İlk boy ölçümü l_n: Müteakip boy ölçümü $r = (l_n - l_0) / l_n$

Her bir grup numunenin 16 günlük genişleme ortalamaları (r₁₆) Çizelge 4.53’de verilen sınır değerlere göre irdelendiğinde, kontrol karışımına ait çubukların 16 günlük ortalama genişleme değerinin zararlı seviyede olduğu görülmüştür. Çimento yerine % 5 ve % 15 amorf silika katkılı karışımlara ait numunelerin ortalama genişmeleri ise potansiyel zararlı genişleme aralığındadır. Çimento yerine % 15 amorf silika kullanılarak elde edilen harç çubuklarının ortalama genişleme değeri zararsız-potansiyel zararlı sınırındadır.

Deney numunelerinin ASR’na bağlı genişleme etkisi Çizelge 4.58’de verilmiş ve grafik olarak Şekil 4.45’de gösterilmiştir. Harç çubuklarının 16 gün sonundaki ortalama genişmeleri dikkate alındığında; karışıma dahil olan amorf silika bütün karışım oranlarında ASR’na bağlı genişmeleri azaltmıştır. Amorf silikanın % 5 ve % 15 oranlarında kullanımı birbirine yakın genişleme iyileşmesi sağlarken, en fazla etki % 10 amorf silika kullanımı ile sağlanmıştır. Ancak amorf silikanın % 5 ve %15 oranında kullanımıyla 16 günde sağlanan etki 28 günlük periyotta azalırken, % 10 kullanım oranında ise iyileştirme etkisi korunmuştur.

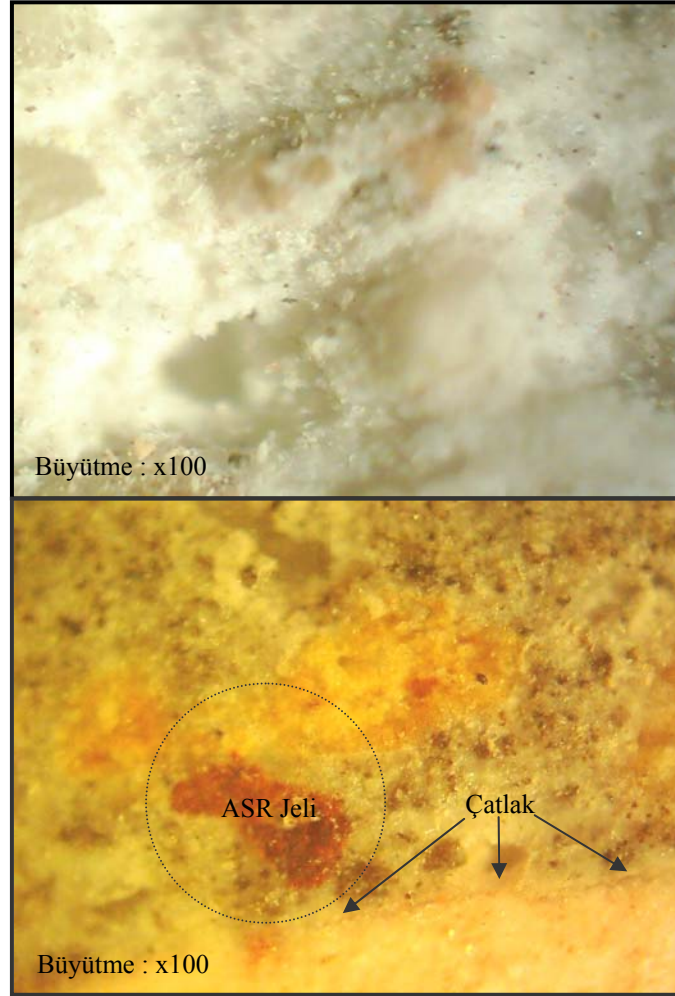
Çizelge 4.58. Amorf silikanın ASR bağlı genişlemeye etkisi

Karışım Kombinasyonları	r ₁₆ (ort.-%)	r ₂₈ (ort.-%)	İyileşme (16 gün)	İyileşme (28 gün)
Kontrol	0,228	0,272	-	-
% 5 A.S. katkılı	0,141	0,221	% 61	% 23
% 10 A.S. katkılı	0,103	0,123	% 121	% 121
% 15 A.S. katkılı	0,135	0,180	% 69	% 51



Şekil 4.45. 80°C NaOH çözeltisindeki kontrol ve amorf silika katkılı harç çubuklarının zamana bağlı genişmesi

Çubuk örnekleri üzerinde yapılan ASR deneylerinden sonra, her bir çubuk örneğinin matriks yapısında herhangi bir bozunma olgusunun meydana gelip gelmediğini analiz etmek amacıyla, çubuk örneklerinin 400 büyütme bir mikroskop ortamında yüzeysel fotoğrafları çekilmiş ve incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, katkı kullanmadan hazırlanan kontrol betonu çubuk örneklerinin yüzeylerinde ASR etkisinde çatlak mekanizmasının geliştiği ve yapının bozunuma uğradığı gözlenmiştir. Bu olgu Şekil 4.46-4.47’de gösterilmiştir. Ancak, yukarıda da değinildiği gibi, amorf silikanın mikronize katkı olarak kullanılması durumunda, betonun matriks yapısında ASR etkisinde bozunma olgusunun katkı oranına bağlı olarak minimum seviyelerde geliştiği gözlenmiştir (Şekil 4.48 ve Şekil 4.49).



Şekil 4.46. ASR etkisinde kontrol betonunda meydana gelen yüzeysel bozunma

Bölüm 2.5.1`de tanımlandığı gibi, alkali silika reaksiyonu betonda yaygın olarak oluşan kimyasal bir reaksiyondur. ASR`nun, bazı agrega türlerinde belirli formlarda yeralan reaktif SiO_2 ile beton gözenek suyundaki OH^- arasında gelişen reaksiyon olduğu hususunda birçok araştırmacı uzlaşmaktadır (Ferraris, 1995). Ancak, mineral katkı maddesi olarak doğal amorf silika kullanımının, betonda gelişen ASR`a etkisi hususunda değerlendirmelere literatürde rastlanılamamaktadır. Konuya ışık tutmak amacıyla bu tez çalışmasında yapılan deneysel analizler için hazırlanan her bir çubuk örneğinden ince kesitler alınmış ve mikroskop ile muhtelif büyütme oranlarında görüntülenerek betonun matriks yapısı incelenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.47. ASR etkisinde kontrol betonunda yüzeysel olarak gelişen çatlak mekanizması

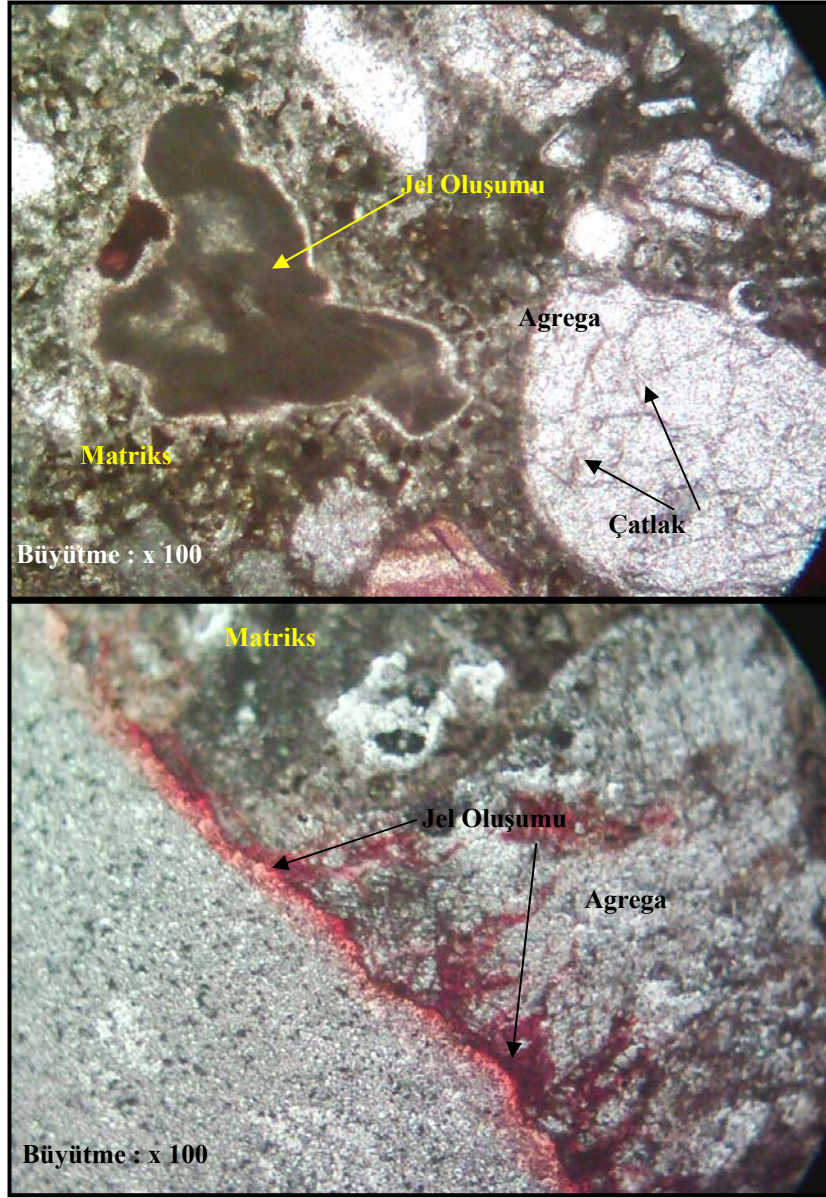


Şekil 4.48. % 5 Amorf silika kullanımı ile ASR etkisinde betonda yüzeysel bozunma

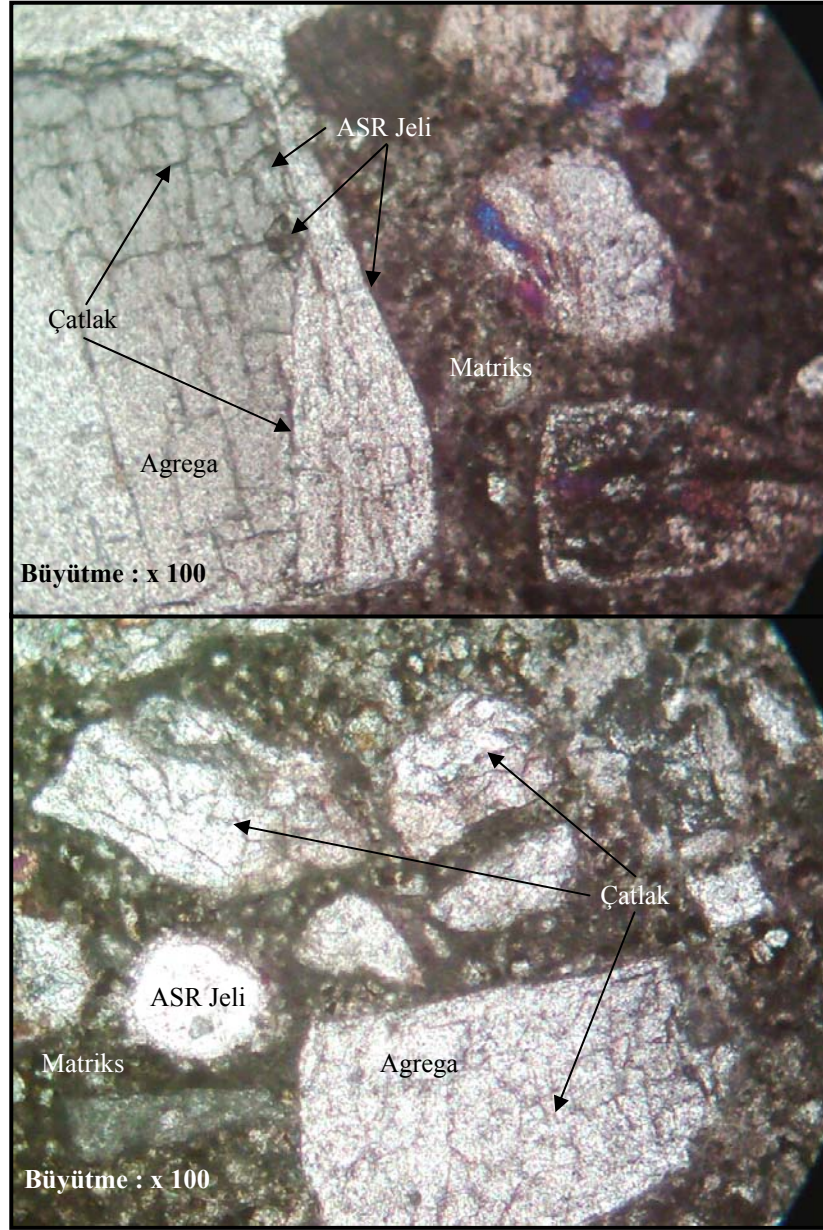


Şekil 4.49. % 10 Amorf silika kullanımı ile ASR etkisinde betonda oluşan yüzeysel bozunma

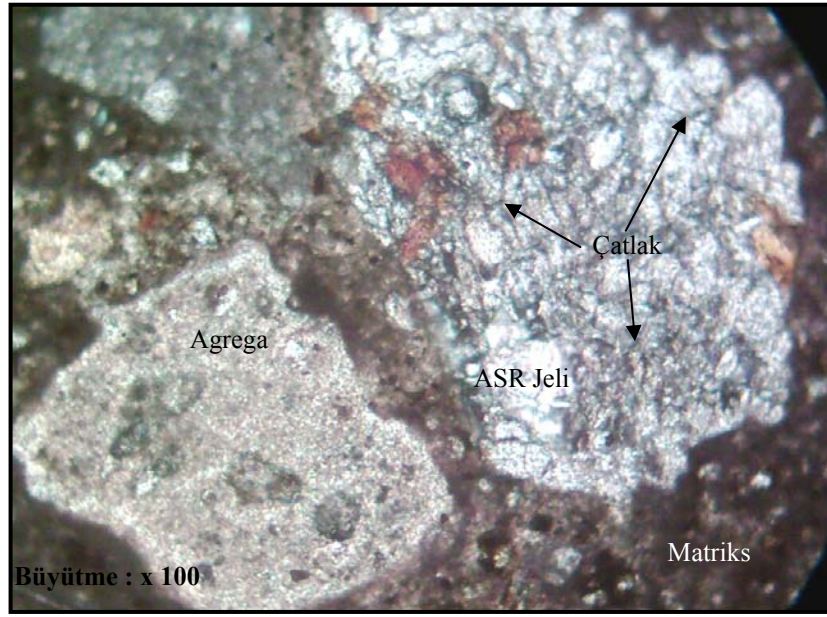
Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan çözünebilir alkaliler gözenek suyunun pH değerini artırmakta, bu gözenek suyundaki alkalilerin miktarı da, çimentoda toplam çözülebilir alkalilerin miktarına bağlı olarak değişim göstermektedir. İnce kesitler üzerindeki analizler sonucunda, kontrol betonu olarak hazırlanan karışımlarda, agregalardaki reaktif SiO_2 ve OH^- iyonlarının tepkimesi sonucunda, agregada çeperinde bir reaksiyon jeli oluşumu gözlenmiştir (Şekil 4.50–4.51-4.52-4.53). Reaksiyon dinamiğinin sonraki adımında ise matriks yapıda oluşan jel, gözenek suyunu emerek genişleme göstermekte ve jelin genişlemesinden kaynaklanan içsel gerilim kuvvetleri, betonun çekme direncini aşarak çatlak oluşumlarına sebep olmaktadır.



Şekil 4.50. Kontrol betonu örneklerinde ASR etkisinde reaksiyon jeli ve sonrası çatlak oluşumu (100 büyütme)

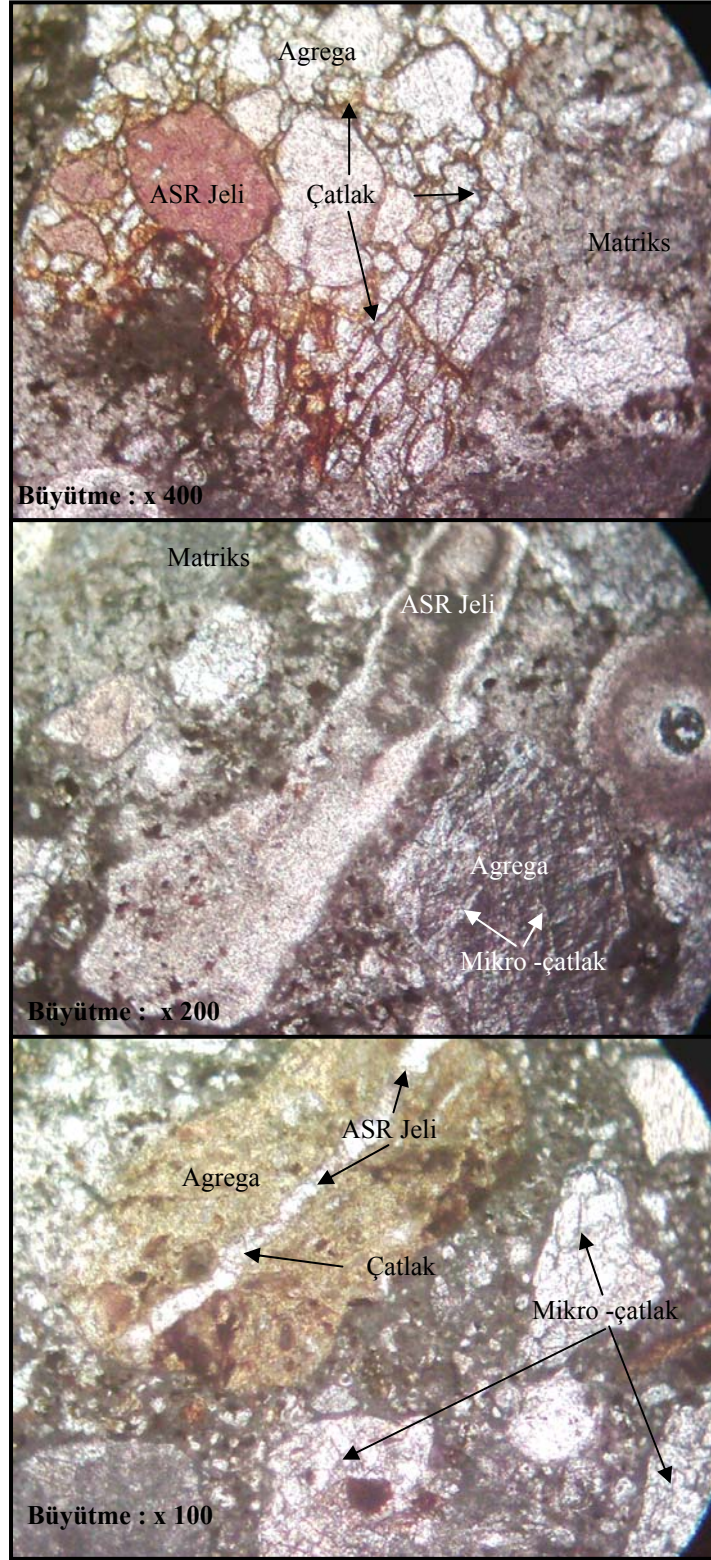


Şekil 4.51. Kontrol betonu örneklerinde ASR etkisinde agrega yapısında bozunma ve çatlak gelişimi

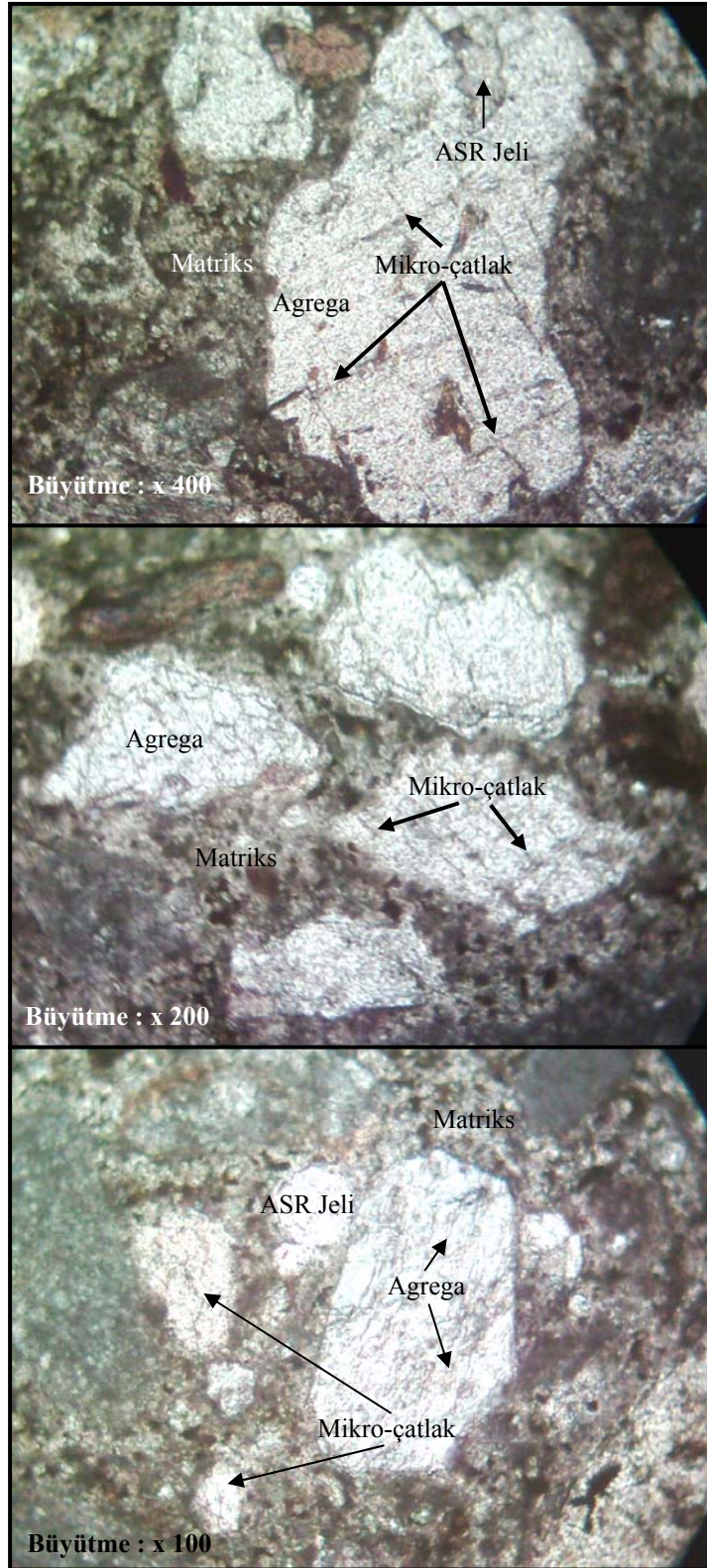


Şekil 4.52. Kontrol betonu örneklerinde ASR etkisinde matriks yapıda bozunma ve çatlak gelişimi

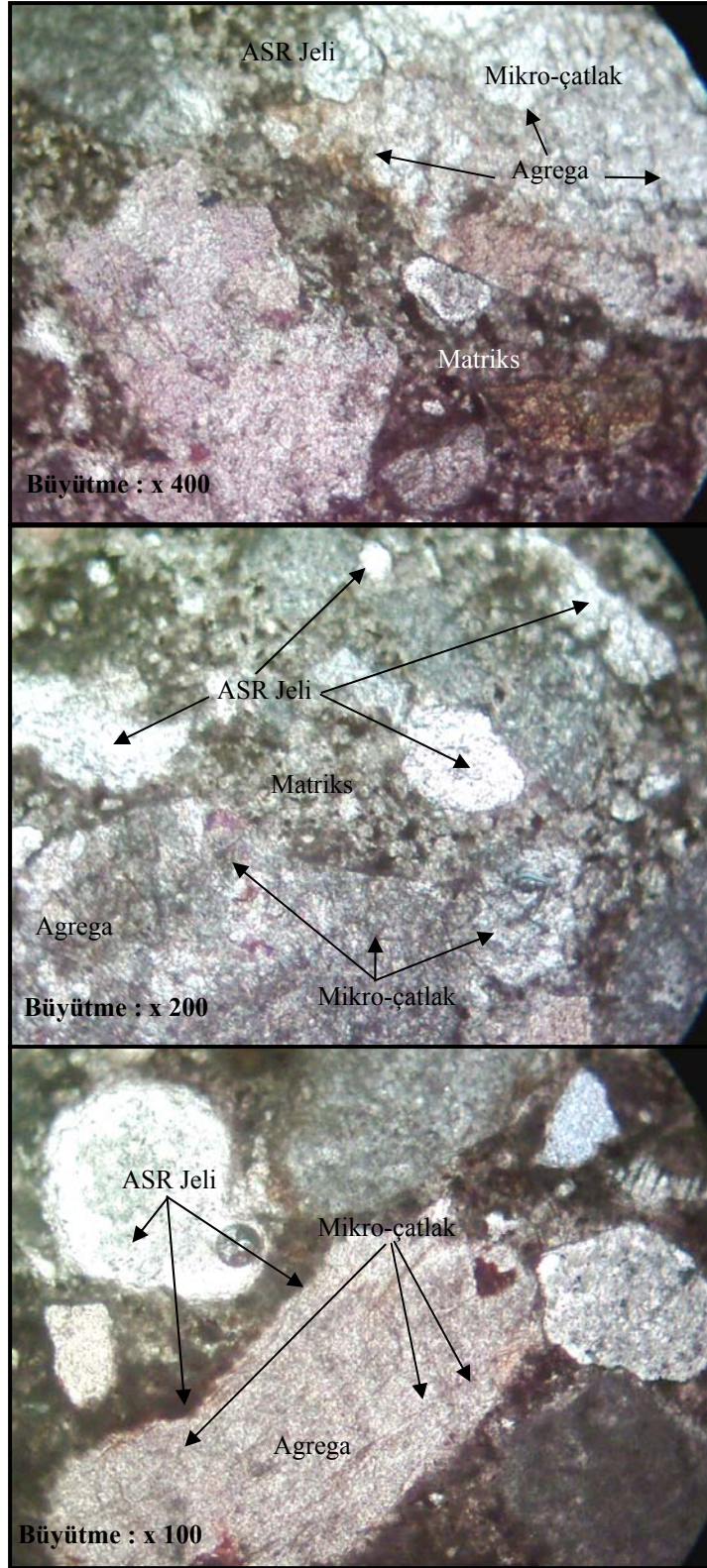
Amorf silikanın mikronize katkı şeklinde kullanıldığı beton örneklerinde, karışımdaki katkı oranına bağlı olarak serbest SiO^- ve Si-OH molekülleri çözeltideki alkali katyonlarla tepkiyerek, kontrol betonuna göre daha az oranlarda alkali silika jelini oluşturduğu gözlenmiştir. Reaksiyon jeli, agreganın yüzeyinde birer film şeridi gibi veya kısmen birikim göstererek, agregasın hamur sınırında çok düşük miktarlarda oluşur. Bu jelin kimyasal gelişimi $\text{Si-OH} + \text{Na}^{+2}\text{OH}^- \rightarrow \text{Si-O-Na} + \text{H}_2\text{O}$ tepkimesi biçimindedir. Bu reaksiyon sürecinde, amorf silika katkılı betonlarda, beton yapısı zarar görmez. Fakat, yeterli miktardan düşük oranlarda amorf silika içeren betonlarda, az da olsa alkali silika jeli oluşur. Oluşan jel çevresinden bir miktar su emerek genişler ve agregasın çevresine karşı bir kuvvet uygulayarak düşük düzeyde mikro çatlakların oluşumuna imkan tanır. Karışımdaki amorf silika oranı optimum düzeye yaklaştıkça, reaksiyon kinematığının daha düşük düzeylerde seyrettiği, buna bağlı olarak da reaksiyon devam ettiği sürece çatlak gelişiminin minimum seviyelerde kaldığı gözlenmiştir. İnce kesit görüntülerinin incelenmesi sonucunda, karışımda amorf silika katkısı kullanılan çubukların matriks yapısında, reaksiyon etkisiyle yüzeye kadar oluşan çatlak oluşumlarına rastlanmamıştır. Farklı oranlarda amorf silika kullanımıyla elde edilen çubukların yapısal analiz görüntüleri Şekil 4.53 - 4.54 - 4.55`de verilmiştir.



Şekil 4.53. ASR etkisinde beton örneğinin matriks yapısındaki değişim (% 5 A.S. Katkılı)



Şekil 4.54. ASR etkisinde beton örneğinin matriks yapısındaki değişim (% 10 A.S. Katkılı)



Şekil 4.55. ASR etkisinde beton örneğinin matriks yapısındaki değişim (% 15 A.S. Katkılı)

Alkali silika reaksiyonu zaman içerisinde beton yapıların kullanım ömrünü kısaltarak önemli ekonomik kayıplara neden olmakta, reaksiyondan aşırı etkilenen yapıların yeniden inşası durumunda kaynak israfı ve çevresel tahribatı artırmakta, hatta yapı emniyetini azaltarak can güvenliği açısından risk oluşturabilmektedir. Betonda ASR'nun etkilerini ekonomik ve dolayısıyla yaygın bir biçimde kontrol altına alabilmek, tüm dünya da olduğu kadar ülkemiz açısından da önem taşıyan bir konudur.

Bu araştırmada, yeryüzünde ekonomik olarak işletilebilir az sayıdaki amorf silika yatağından birisi olan Isparta yöresi amorf silika oluşumlarının betonda ASR'na etkisi araştırılmıştır. Deneysel olarak yürütülen çalışmalardan elde edilen bulgular da irdelenerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Amorf silikanın alkali madde içeriği (% 1,10) alkali silika reaksiyonu açısından ASTM C1240-03 standardında belirtilen puzolanik katkıların maksimum alkali içeriğine (% 1,5) uygundur.
- Betonda mineral katkı maddesi olarak amorf silika kullanımı, ASR'na bağlı jel oluşumundan kaynaklanan genişmeyi % 120'ye ulaşan bir düzeyde azaltmıştır.
- ASR'nu bastırmada amorf silikanın (ort. partikül boyutu 18 μ) en etkin kullanım oranı çimentonun ağırlıkça % 10'u oranında gerçekleşmiştir.
- Daha düşük kullanım oranlarında etkinliğin azalması, gözenek solüsyonundaki serbest OH⁻ iyonlarını bağlayacak yeterli silika partiküllerinin olmamasına, daha yüksek kullanım oranlarındaki etkinlik azalması ise su gereksinimindeki artışa bağlı hamur - agrega ara yüzeyindeki bağ yapısının zayıflaması dolayısıyla dayanım (çekme gerilmesi) düşmesine bağlanmıştır.

Bu araştırma, ASR'nu kontrol altına almada amorf silikanın etkin bir beton katkı maddesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte bu araştırmanın, muhtelif çimento dozajları, farklı su/çimento, katı/çimento ve hava içeriği oranlarıyla, amorf silikanın farklı partikül boyutları seçilerek ayrıntılı biçimde sürdürülmesi yararlı olacaktır.

4.3.1.5. Muhtelif Çimento Dozajlardaki Betonların Kimyasal Maddelere Karşı Direncinde Amorf Silikanın Rolü

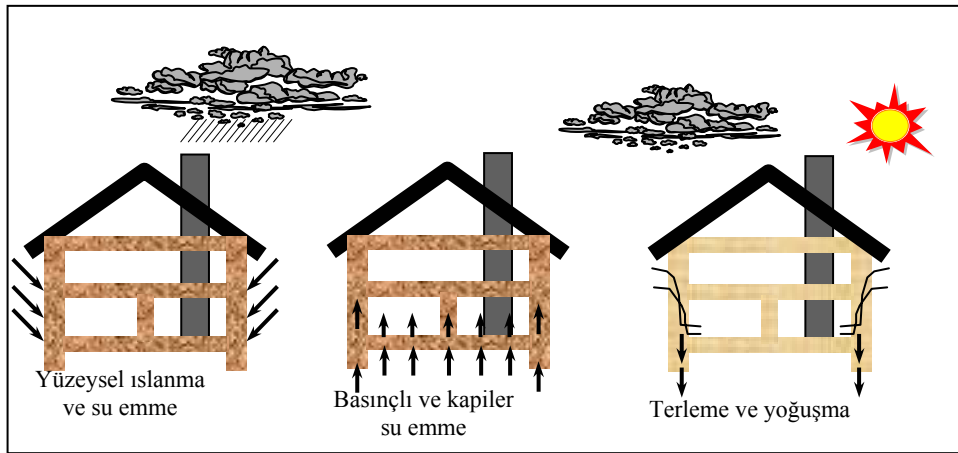
Su ile yüzeysel olarak temasta bulunan malzemelerde basınçlı veya kılcal su geçirimsizlik olgusu etkili olmaktadır. Boşluklu bir malzeme, herhangi bir yüzünden su ile temas halinde olduğunda - su basınçlı olmasa dahi - kılcallık nedeni ile ince boşluklar suyu içeri çekecektir. Suyun yüzey geriliminden doğan bu çekim yatay, eğik veya düşey olarak yukarı doğru, diğer bir deyişle yerçekimi kuvvetine karşı olmaktadır. Bunun en açık örneği, zemindeki rutubetin duvarlarda yükselmesidir. Su veya nemin, malzeme içersinde bu şekildeki sürekli hareketi, üst kesimlerde kuru kısımlarda buharlaşması ve içerdiği erimiş tuzları ortamda bırakması, duvarlarda lekelenme ve çiçeklenmelere neden olmaktadır. Su emilmesi, alt yüzeyin kapiler güçleri, yer çekimi kuvveti, rüzgâr basıncı, yağmur damlalarının kinetik enerjisi ve hava akımı sayesinde gerçekleşir. 0,01 ile 0,5 mm arasındaki çatlaklar kapiler etkiyi artırır. 0,1 ve 0,2 mm arasındaki çatlaklarda kapiler güçlerin su emilmesine katkısı hemen hemen rüzgarın ki kadardır. Çatlak daha da genişlerse rüzgar basıncının etkisi ağır basar. Daha geniş çatlaklarda rüzgar, suyu 4 mm genişliğe kadar içeri bastırır. Yağmur gören cephe üzerinde, aşağıya doğru akmak isteyen bir su filmi oluşur. Pürüzsüz cephelerde ve rüzgarsız havalarda bu durum gerçekleşir. Bu verilen açıklamaların ışığında, genelde yapılarda su etkisi üç farklı şekilde sınıflandırılabilir (Eriç, 1994).

1. Yüzeysel ıslanma ve su emme olaylarının etkili olduğu haller (düz veya meyilli çatılar, ıslak hacim döşemeleri, banyo, mutfak, teras, balkonlar, genleşme için bırakılan derzler ve doğrama). Bu olguda, yapının rüzgar yönleri tespit edilmelidir. Bir yapının, rüzgar tarafından sık sık normalin üzerinde yağmur parçacıkları taşınan cepheleri rüzgar yönleri olarak tanımlanır. Rüzgar yönlerinin saptanmasında önemli etken, etkili rüzgarın yönüdür. Sağanak yağmur, yapının dış yüzeylerini birinci derecede etkileyen bir yağış şekli olmaktadır. Rüzgar olmadan yağmur yağdığı düşünülürse, su sadece çatıları ilgilendiren bir sorun olacaktır. Ancak rüzgar olgusu kaçınılmaz olduğu için, yapı cephelerine de su düşmesi yoğun olarak görülmektedir.

Binaların cephe elemanları genellikle hiç dikkate alınmadığı halde, yönere göre konumları uyarınca bu etkenlerden farklı şekilde etkilenirler. Yönere göre konumları uyarınca bulunulan bölgenin sadece sıcaklık etkileri değil, rüzgar, yağmur, sağanak, soğuk ve kar etkileri de farklıdır. Bu nedenle sık sık sağanak etkisinde kalan cephelerin, hiç bir zaman rüzgarla kamçılanan yağmur görmeyen cephelerle aynı şekilde donatılması doğru değildir. Beton ve duvar elemanlarının şekil değiştirme eğilimi için yaz mevsimindeki güneş ışınması, kış soğğundan daha önemlidir.

2. Basınçlı su ve kapilerite olaylarının etkili olduğu haller (zemin suyu ve yeraltı sularının etkilediği yapı temelleri, bodrum duvar ve döşemeleri, su depoları, barajlar).

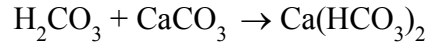
3. Yapı elemanını çevreleyen havanın nemi ve hidrotermik olayların etkili olduğu haller (duvar ve teraslarda görülen terleme ve buhar geçirimsizlik ile yapım sonrası malzeme kurumaları) (Şekil 4.56).



Şekil 4.56. Yapıda suyun etkili olduğu durumlar

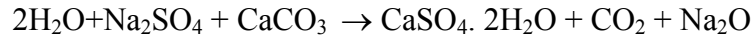
Yapı malzemelerine zarar veren suların başında tatlı sular, yani sertliği az olan, içinde erimiş tuzlar ve kireç bulunmayan sular gelmektedir. Memba suyunda, dağlık yerlerde kar ile beslenen göl ve akarsularda erimiş olarak bulunan havanın CO₂'ini bağlayacak kireç bulunmadığı için, bu sular zayıf bir karbonik asit etkisi yapar. Suyun asidik karakterde olduğu, pH değerinin 7'den küçük olması ile

anlaşılmaktadır. Bu şekildeki agresif tatlı sular, özellikle bünyesinde karbonat bileşiği bulduran yapı malzemeleri için zararlı etki yapmaktadırlar. Bu olguda;



reaksiyonu, suda erimeyen kalsiyum karbonatı, suda eriyen bikarbonat haline getirerek, akışkanı, malzemenin kısa bir sürede erimesine ve parçalanmasına etki edecek forma dönüştürmektedir.

Yapı malzemelerine zararlı etki yapan diğer bir su çeşidi ise sülfatlı sulardır. Bu sulara bataklıklarda, sülfatlı zeminlerde, kanalizasyonlarda ve denizlerde rastlanmaktadır. Bunlarla temas eden kalkerli malzemeler ve betonlar;



reaksiyonuna ve benzer şekillerdeki farklı reaksiyonlara maruz kalarak zamanla şişip parçalanmaktadırlar. Esmer renkli, çürük yumurta kokusu veren şüpheli suları analize tabi tutarak, sülfat içeriklerini tayin etmek gerekmektedir. Sudaki SO_3 miktarı % 0,03'ü aştığı takdirde suyun zararlı olacağı ve koruyucu tedbir alınması gerektiği kabul edilmektedir. SO_3 miktarı % 0,1 oluncaya kadar tedbir alarak korunma sağlanabilmektedir. % 0,1'i aşarsa hiç bir tedbir işe yaramamakta ve malzemeyi bu sudan tamamen yalıtım gerekmektedir (Kocataşkın, 1976). Yapı malzemesinden alınan örneklerin sülfatlı sulara dayanıklılığını analiz etmek amacıyla, örnekler % 10 konsantrasyonlu Na_2SO_4 veya MgSO_4 eriyiği içerisine yarısı batmış durumda uzun süre saklanır ve zamana bağlı bozulma süreçleri gözlemlenir.

Bazı topraklar ve özellikle killi arazi ve bataklık bölgeler, yüksek miktarda çeşitli tuzlar ile özellikle magnezyum, kalsiyum, sodyum ve potasyum sülfatları ihtiva edebilirler. Piritli arazilerde de, havanın etkisi ile piritin oksidasyonu sonucunda serbest H_2SO_4 veya farklı bileşimdeki sülfatlar meydana gelebilir. Oluşan bu tür bileşiklerin beton elemanları üzerinde çeşitli seviyelerde zararlı etkileri görülür. Beton veya yapı malzemesi ile doğrudan doğruya temas etmeseler bile, malzemenin porozitesi sebebiyle temel ve toprak hattından sızarak kılcallık yolu ve rutubetin de yardımıyla, malzeme içine nüfuz ederek yukarı doğru tırmanırlar. Hava ve ısı koşullarının etkisiyle, buharlaşma sonucu uygun bir konsantrasyona ulaşıncaya billurlaşırırlar. Bu billurlaşma hacim genişlemesine neden olduğu için yapıya mekanik

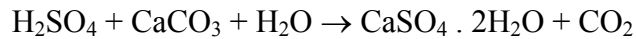
bir etki yapar. Bu etki beton veya yapı malzemelerini parçalayacak kadar şiddetli olabilir. Yukarıda işaret edilen bu çeşit olaylar, ısı etkinin ve rutubetin yoğun olduğu Akdeniz bölgesi gibi sıcak iklimli bölgelerde daha sık ve belirgin olarak görülebilmektedir. Termo-gravimetrik şartlar değişip de denge bozulunca, bu billurlaşmayı bir dehidratasyon olayı izler. Burada yapı malzemesinin bünyesine yerleşen tuz sodyum sülfat ise - orta derecede bir kuraklıkta su buharının basıncı daha düşük olduğundan - amorflaşan sülfat beyaz bir tuz haline dönüşerek zaman içerisinde dökülmeye başlar. Bu olay sonucunda, malzemenin mekanik ve diğer karakteristik özelliklerinde önemli derecelerde bir zayıflama söz konusu olmaktadır. Yapı tekniğinde genelde bu olay, “çiçeklenme” olarak tanımlanmaktadır.

Yapı malzemelerine zararlı etkisi olan üçüncü su çeşidi deniz suyudur. Deniz suyunda çok miktardaki NaCl’in yanısıra az miktarda da MgSO₄ da bulunmaktadır. Bu bileşikler suyu zayıf sülfatlı su haline getirmektedir. Bu bakımdan deniz suyu ile temas eden sahil beldelerindeki yapılarda bu etkileşim önemli bir sorunu gündeme getirmektedir.

Deniz suyunun etkisi, denizin kabarıp çekilmesi ve dalgaların yaptıkları mekanik etkiler sonucunda daha da yıkıcı bir durum gösterir. Bu olaylar dolayısıyla, her zaman değişen, yenilenen suyun dövüşü ve yıpratıcı etkisi altında, su ile temasta bulunabilen yapı malzemesi gittikçe daha gözenekli bir hal almaktadır. En çok zarar gören kısımlar, tümüyle suyun içinde kalanlar değildir. Fakat, deniz yüzeyinin alçalıp yükselmesi sonucunda sıra ile su ve hava ile karşılaşan kısımlarda daha fazla tahribat meydana gelir. Oluşan kimyasal reaksiyonlarda; Mg iyonları ile Ca iyonları arasındaki tepkimelerde Ca iyonları, Mg iyonlarını çöktürürler. Bu olay kendi başına tehlikeli değil ise de, oluş şekli bakımından zararlıdır. Mg⁺² içeren su ile temas halinde olan malzemede, bu iyonlar kütlemin içine girmez. Kalsiyum dışarı çıkar ve böylece, malzeme ornatılır. Yani kütleminde boşluklar oluşur ve yüzeyde bir tabaka, magnezyum kabuk (MgCO₃) meydana gelmektedir.

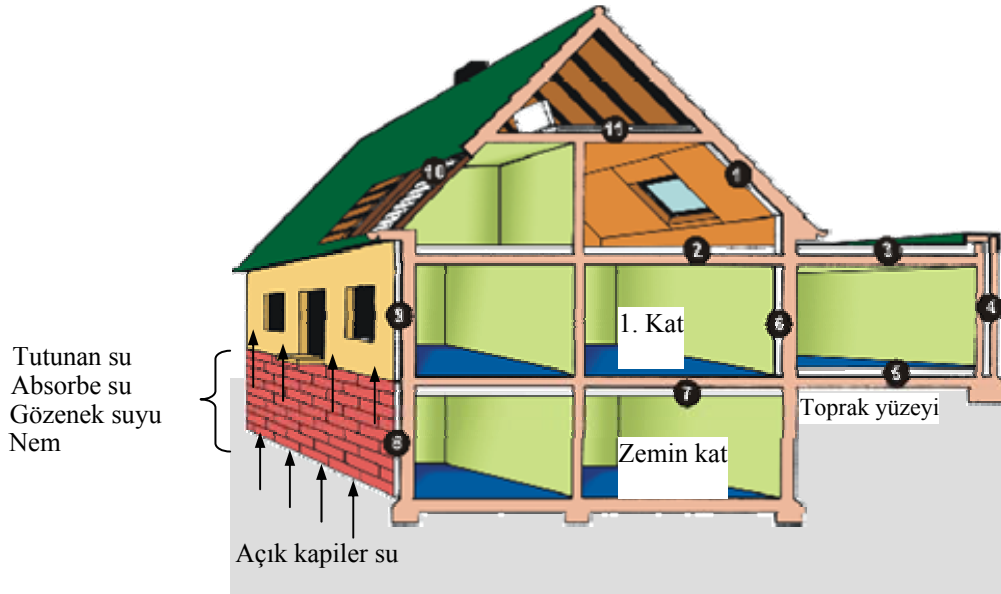
Yapı malzemelerine zararlı olabilecek suların etkilerinin ne tarz olabileceği yukarıda özet olarak belirtilmiştir. Beton ve duvar elemanlarında farklı biçimlerde oluşabilen çiçeklenme olayını genel olarak şu şekilde gruplandırmak mümkündür:

- Genellikle güherçile olarak bilinen KNO_3 veya $NaNO_3$ oluşumu: Bu tip çiçeklenme olgusuna, beton ve yapı malzemelerinin organik maddeler içeren toprakla temasında karşılaşılmaktadır. Bu maddeler, suda erir nitelikte tuz oluşumlarıdır. Oluşum sonrası su ile temas ettiklerinde, çiçeklenmede görülen tuz kristalleşmeleri malzemedan uzaklaştırılmış olmaktadır.
- Na_2SO_4 çiçeklenmesi: En sık rastlanan çiçeklenme tipidir. Zemin suyu etkisine maruz kalmış beton ve döşeme elemanlarında gözlenen bir tuz kristalleşmesine işaret eder. Malzemenin bünyesinde ve yüzeyinde oluşan tuz kristalleri, mekanik dayanımını da olumsuz yönde etkilemektedir.
- $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ çiçeklenmesi: Bu tip çiçeklenmeler, atmosfer ortamında oluşan sülfürik asitli bileşiklerin, kalker agregalı beton ve yapı malzemeleri üzerine yağışla beraber temas etmesi sonucunda oluşmaktadır. Burada oluşan kimyasal reaksiyon dengesi;



şeklindedir. Reaksiyon sonucu oluşan $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ kristalleşmesi, suyla giderilemeyen bir nitelikte olup, malzemenin yapısal bozunmasına neden olabilmektedir.

Yukarıdaki paragraflarda belirtildiği gibi, yapılarda genelde karşılaşılan sorunların başında nem etkileri gelmektedir. Nem, sürekli değişen şekillerde yapı malzemesinde, nem emme ve nem verme yeteneği farklı ölçülerdedir. Örneğin, taşıyıcı eleman olarak değerlendirilen beton birimler, zeminden gelen su ile kısa sürede tümüyle etkilenmekte ve bünyeye alınan su, ancak su buharı şeklinde dışarı verilebilmektedir. Ayrıca zemin nemi, yapı yüzeylerine temas ederse, bunların kılcallığı sayesinde yukarı doğru ilerlemekte ve yayılmaktadır. Duvarlara nüfuz eden zemin nemi, burada yükseldikten sonra, zemin kat duvarlarını da ıslatmakta, daha sonra hem içeri hem dışarıya doğru buharlaşmaktadır. Nemin kapiler yoldan yükselmesi, bir limite kadar devam etmektedir. Bu limit, buharlaşan nem miktarının zeminden gelen nem miktarına eşit olduğu noktadır. Bu durum genellikle 1,50 - 3,0 m'de görülebilmekte, fakat daha yüksekliklerde de nemliliğe rastlanabilmektedir (Şekil 4.57).



Şekil 4.57. Zemin neminin bir yapı duvarında ilerlemesinin sembolik gösterimi

Yapılarda kullanılan betonarme taşıyıcı elemanlar ile duvar-döşeme elemanları ve bileşenleri, malzeme karakteristiği açısından nem bileşiminde bulunabilecek tüm zararlı etkenlere karşı dayanıklı olmalıdır. Bu etkileşimin incelenmesi, farklı kategorideki her yapı bileşeni bakımından ayrı bir uzmanlığı gerektirmektedir. Malzemenin gerek nem etkisinde eskime, nem bileşenleri etkisinde bozunma,

dağılma ve çürüme süreci, gerekse bu etkileşimler altında malzeme kalitesinin yeniden belirlenmesi yaklaşımları gibi hususlar, önemle analiz edilmelidir. Özellikle, toprakla temas eden malzemelerde kılcal su geçirimsizlik ve buharlaşma sonucu meydana gelen çiçeklenme olayı, KNO_3 , $NaNO_3$, $NaSO_4$, $CaCO_3$, $CaSO_4.2H_2O$ gibi birtakım tuzların ve sülfatların yüzeyde birikmesine neden olmaktadır. Genellikle bünyesinde belirli miktarda karbonat bileşimi bulunduran yapı malzemelerinde oluşan çiçeklenme olaylarından en zararlısı $CaSO_4.2H_2O$ 'dır. Bu bileşik lekelenme dışında malzemedeki parçalanmaya da yol açabilmektedir.

Çoğu durumda, yapı bileşeni olarak kullanılan pek çok malzeme türü, nem etkisiyle oluşan fiziksel ve kimyasal bir takım olumsuz etkilerle karşı karşıyadır. Günümüzde betonarme yapılarda kullanılan birçok malzemenin bu yöndeki karakteristik incelemeleri, farklı araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Ancak, doğal amorf silikanın mineral katkı maddesi olarak kullanıldığı farklı beton sınıflarını temsil eden örneklerin, zemin nemi etkisine bağlı yapısal değişimleri herhangi bir araştırmaya konu edilmemiştir.

Bu bölümde, değişik kimyasal bileşenlerdeki nem etkilerine maruz, katkısız ve farklı oranlarda amorf silika katkısıyla hazırlanan C20, C30 ve C40 beton örneklerinde oluşan yapısal değişimler analiz edilmiştir. Bu amaçla, kimyasal bileşenleri açısından muhtelif türde zemin sularını temsil etmesi için, farklı konsantrasyonlarda sülfatlı ve tuzlu su bileşikleri hazırlanmıştır. Sülfatlı zemin sularıyla etkileşim analizleri için Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ bileşiklerinin % 1, % 3, % 5'lik konsantrasyonlarında iki ayrı kimyasal çözelti türü kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında aşağıdaki hususlar araştırmaya konu edilmiştir:

- Muhtelif konsantrasyonlardaki çözeltilere maruz beton örneklerinin kütle değişim oranları,
- Amorf silika katkı maddesinin, beton örneklerinin çözeltilere direncindeki rolü,
- Beton-çözelti etkileşimindeki zararlı etkilerin minimize edilebilmesi için katkı maddesi optimum kullanım oranı .

Deneysel analiz için hazırlanan (\emptyset 45 mm x 50 mm boyutlarında) silindirik C20, C30 ve C40 beton örnekleri şu şekilde gruplandırılmıştır :

- K : Kontrol betonu
- İ5 : % 5 Amorf silika katkı (İlave yöntemine göre)
- İ10 : % 10 Amorf silika katkı (İlave yöntemi göre)
- İ15 : % 15 Amorf silika katkı (İlave yöntemi göre)
- E5 : % 5 Amorf silika katkı (İkame yöntemi göre)
- E10 : % 10 Amorf silika katkı (İkame yöntemi göre)
- E15 : % 15 Amorf silika katkı (İkame yöntemi göre)

Beton örnekleri, Bölüm 4.3.1.1.'de verilen karışım tasarımlarına göre hazırlanmıştır. 28 günlük kür süresini tamamlayan örnekler, hazırlanan kimyasal çözeltilerde 5 x 18 saat süreyle bekletilmiştir. Her bir periyot sonunda 4 saat süreyle $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de, hava dolaşımli etüvde kurutulan örnekler, oda sıcaklığına soğuduktan sonra tekrar çözelti içerisine yerleştirilmiştir. 5. periyot sonunda tekrar kurutulan beton örnekleri, 18 saat süreyle su içerisinde bekletildikten sonra ve 30 dakika boyunca temiz su ile yıkanarak çözeltiden arındırılmıştır. $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de değişmez ağırlığa ulaşınca kadar kurutulan örneklerin etkileşim öncesi ve sonrası ağırlıkları 0.01 gr hassasiyetteki terazi ile ölçülmüştür (TS 699, 1987). % 1, % 3 ve % 5 konsantrasyona sahip Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltileriyle etkileşen beton örneklerinin kütleli değişim bulguları Çizelge 4.59, 4.60, 4.61 ve 4.62'de verilmiştir.



Şekil 4.58. Kimyasal çözelti - beton örneği etkileşimi deney ortamı

Çizelge 4.59. Na₂SO₄ çözeltisiyle etkileşim analizinde beton örneklerinin orijinal kuru birim ağırlık (g) değerleri

C20 Betonu Örnekleri Orijinal Birim Ağırlık (g) Değerleri (Na ₂ SO ₄)							
Numune	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	196,44	187,25	197,65	187,29	195,73	187,05	194,32
2	194,50	191,37	195,68	183,56	195,14	194,94	199,43
3	201,28	190,74	193,55	190,37	196,33	192,17	192,28
1	205,11	195,22	197,70	182,49	188,43	189,57	194,60
2	188,73	190,60	196,62	187,80	194,10	193,90	195,41
3	197,82	195,49	185,88	182,52	200,18	191,79	192,48
1	202,99	193,83	192,44	184,66	191,20	196,20	196,15
2	196,46	195,11	190,36	180,65	191,60	201,12	187,49
3	206,40	193,26	193,40	179,07	193,55	192,92	197,10
C30 Betonu Örnekleri Orijinal Birim Ağırlık (g) Değerleri (Na ₂ SO ₄)							
Numune	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	198,43	198,05	188,08	190,94	192,15	195,14	186,40
2	185,19	188,85	184,88	186,52	197,43	197,87	195,55
3	200,93	199,39	187,20	186,79	194,14	192,66	188,65
1	198,80	199,48	194,46	198,99	198,04	198,15	194,33
2	193,52	193,94	183,26	189,64	195,40	197,50	187,12
3	198,57	197,47	191,65	184,82	196,24	187,07	189,70
1	202,33	187,61	191,59	188,25	198,50	193,58	182,62
2	194,30	199,70	192,31	188,88	192,19	197,72	186,83
3	199,80	198,10	186,46	187,12	193,86	199,10	192,68
C40 Betonu Örnekleri Orijinal Birim Ağırlık (g) Değerleri (Na ₂ SO ₄)							
Numune	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	202,06	200,77	194,24	186,70	198,20	194,24	191,70
2	196,23	197,53	192,96	190,26	196,81	191,40	200,26
3	193,76	197,24	195,15	191,50	196,22	190,69	192,07
1	200,70	197,44	193,63	190,47	197,96	194,95	196,20
2	194,62	199,07	196,71	189,25	197,48	190,20	190,45
3	197,65	198,59	192,33	185,23	198,66	189,48	189,56
1	195,01	198,32	190,22	187,44	193,22	190,99	190,54
2	193,88	194,71	190,38	187,90	193,92	187,94	192,82
3	199,16	198,18	191,90	186,34	193,60	195,37	192,63

Çizelge 4.60. Na₂SO₄ çözeltisine maruz beton örneklerinin etkileşim sonrası kuru birim ağırlık (g) değerleri

C20 Betonu Örnekleri Etkileşim Sonrası Birim Ağırlık (g) Değerleri (Na ₂ SO ₄)								
Konsant.	No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
% 1	1	178,62	163,94	182,45	177,40	177,96	171,28	189,48
	2	178,12	170,47	182,63	169,48	180,25	180,07	190,10
	3	182,32	188,52	180,80	178,80	182,63	182,60	178,92
% 3	1	185,67	178,55	186,89	168,86	174,35	177,78	182,20
	2	167,57	169,23	180,85	174,26	181,97	183,72	185,54
	3	181,46	182,16	176,92	171,11	183,12	182,43	184,05
% 5	1	177,98	167,39	179,66	171,68	179,67	181,15	185,50
	2	174,71	178,78	174,43	170,05	176,52	191,35	180,63
	3	177,79	176,14	184,00	166,16	178,05	185,61	187,76
C30 Betonu Örnekleri Etkileşim Sonrası Birim Ağırlık (g) Değerleri (Na ₂ SO ₄)								
Konsant.	No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
% 1	1	182,42	174,38	175,50	177,90	172,01	186,50	178,44
	2	168,49	165,21	174,40	174,12	184,34	187,26	189,96
	3	185,42	197,31	174,86	172,07	176,71	180,75	179,99
% 3	1	178,56	180,45	179,43	187,57	180,62	185,43	185,14
	2	173,37	176,47	168,56	177,80	177,33	186,71	178,98
	3	184,31	184,99	181,72	171,43	175,20	176,07	181,96
% 5	1	177,40	163,90	175,04	169,93	185,54	180,67	172,70
	2	172,79	182,99	179,35	174,05	173,77	182,18	179,49
	3	178,50	174,61	176,34	175,46	172,05	187,57	185,99
C40 Betonu Örnekleri Etkileşim Sonrası Birim Ağırlık (g) Değerleri (Na ₂ SO ₄)								
Konsant.	No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
% 1	1	189,41	183,00	183,38	173,95	185,62	187,58	182,17
	2	180,49	177,28	180,09	177,61	185,73	182,19	191,53
	3	180,74	183,13	185,49	176,41	181,27	180,74	182,01
% 3	1	181,77	180,76	182,54	179,54	183,42	186,33	184,66
	2	175,86	185,83	185,26	177,44	183,16	181,71	178,13
	3	183,46	180,08	182,36	171,81	186,88	182,13	178,03
% 5	1	176,84	181,48	177,21	169,20	178,67	180,92	179,26
	2	173,12	178,41	175,83	173,15	191,84	177,39	182,54
	3	180,52	177,11	183,21	174,73	175,69	184,64	183,50

Çizelge 4.61. MgSO₄ çözeltisiyle etkileşim analizinde beton örneklerinin orijinal kuru birim ağırlık (g) değerleri

C20 Betonu Örnekleri Orijinal Birim Ağırlık (g) Değerleri (MgSO ₄)							
Numune	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	192,00	182,60	196,30	188,60	190,60	196,10	196,10
2	199,10	192,30	196,30	179,00	189,60	192,00	188,80
3	201,20	196,70	201,50	191,20	196,00	194,90	190,60
1	199,50	196,70	193,30	178,90	195,40	199,20	195,80
2	208,30	193,30	192,20	175,40	198,70	199,20	191,20
3	199,30	194,00	193,20	169,90	197,90	197,90	195,40
1	202,40	193,30	191,80	184,20	190,70	195,50	191,00
2	198,50	189,90	196,00	177,30	189,50	181,70	196,90
3	197,80	195,20	189,20	183,20	195,30	199,40	194,00
C30 Betonu Örnekleri Orijinal Birim Ağırlık (g) Değerleri (MgSO ₄)							
Numune	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	204,04	198,42	189,56	190,14	196,37	190,91	186,94
2	196,65	194,33	197,88	187,43	195,80	193,46	193,50
3	201,02	196,97	191,55	189,80	188,45	193,17	190,25
1	200,07	198,82	188,67	187,90	196,69	188,16	192,99
2	200,51	200,67	187,96	189,40	200,55	192,30	192,16
3	197,28	192,34	187,26	182,72	198,26	193,54	190,68
1	197,24	193,18	187,38	194,78	202,20	196,96	195,25
2	198,29	196,30	194,23	190,13	197,13	187,74	186,04
3	201,79	201,12	187,14	183,90	193,53	192,08	198,78
C40 Betonu Örnekleri Orijinal Birim Ağırlık (g) Değerleri (MgSO ₄)							
Numune	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	193,84	203,99	191,40	189,51	191,35	193,48	187,33
2	194,75	197,52	190,44	184,44	193,80	193,92	185,22
3	197,43	194,03	197,93	190,47	192,91	189,60	191,31
1	192,65	200,92	189,41	188,38	195,75	188,76	190,12
2	193,64	194,84	190,76	188,92	196,95	195,21	195,60
3	197,27	201,49	189,62	186,07	197,88	190,38	191,69
1	197,30	194,50	189,32	186,45	193,78	191,44	190,25
2	192,12	196,34	189,98	185,04	196,46	196,22	190,27
3	197,47	194,60	194,59	196,38	192,56	190,93	192,13

Çizelge 4.62. MgSO₄ çözeltisine maruz beton örneklerinin etkileşim sonrası kuru birim ağırlık değerleri

C20 Betonu Örnekleri Etkileşim Sonrası Birim Ağırlık (g) Değerleri (MgSO ₄)								
Konsant.	No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
% 1	1	182,65	174,47	187,09	181,73	182,82	186,63	190,33
	2	188,31	182,12	185,17	170,64	182,72	188,87	185,29
	3	193,31	187,55	194,27	183,21	190,34	187,84	183,76
% 3	1	188,57	189,74	184,54	169,15	186,08	190,20	188,65
	2	198,70	185,16	180,63	170,52	193,43	194,12	183,48
	3	186,23	182,71	184,85	164,04	186,38	189,17	185,96
% 5	1	189,61	180,50	182,90	176,78	183,01	188,15	182,35
	2	188,44	174,95	185,47	170,70	181,31	173,91	190,28
	3	184,27	186,44	179,13	178,24	185,32	191,52	186,94
C30 Betonu Örnekleri Etkileşim Sonrası Birim Ağırlık (g) Değerleri (MgSO ₄)								
Konsant.	No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
% 1	1	194,84	190,25	180,67	186,68	189,54	184,53	181,82
	2	189,73	183,60	191,19	180,78	184,33	186,57	188,31
	3	191,44	192,14	185,82	183,57	182,83	187,99	186,25
% 3	1	190,45	188,40	184,27	180,80	191,20	179,47	184,05
	2	192,27	192,82	183,81	182,75	192,03	184,40	186,05
	3	191,62	184,74	176,36	174,59	186,92	189,90	186,71
% 5	1	190,02	183,25	182,40	188,22	194,05	193,49	188,51
	2	188,43	187,02	187,55	183,32	185,54	182,60	179,73
	3	190,37	195,37	176,23	179,06	185,81	184,70	192,78
C40 Betonu Örnekleri Etkileşim Sonrası Birim Ağırlık (g) Değerleri (MgSO ₄)								
Konsant.	No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
% 1	1	187,52	198,24	186,44	184,20	184,69	188,99	182,10
	2	190,82	189,13	185,22	179,55	186,75	187,91	178,81
	3	190,09	187,86	194,05	183,08	187,76	185,33	186,45
% 3	1	184,12	192,38	184,41	181,33	188,98	184,19	184,64
	2	186,59	189,95	185,84	184,37	191,53	190,62	190,77
	3	189,02	193,59	186,17	181,51	189,49	183,37	183,87
% 5	1	187,59	184,81	182,81	180,24	187,58	184,32	186,60
	2	184,61	188,74	185,91	179,77	191,19	190,02	185,84
	3	188,66	188,90	186,13	189,25	183,03	184,46	186,87

Na_2SO_4 çözeltisi etkileşimlerinde, Na_2SO_4 çiçeklenmesi olarak tanımlanan tuz kristallerinin örnek yüzeylerinde yoğun miktarda olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.59). MgSO_4 çözeltisi etkileşimlerinde ise örneklerin yüzeylerinde MgCO_3 bileşiminde kristalize kabuk oluşumları meydana gelmiştir (Şekil 4.60). Bu durum özellikle kontrol betonu örneklerinde oldukça belirgindir.



Şekil 4.59. Beton örneklerinde Na_2SO_4 çiçeklenmesinin oluşumu



Şekil 4.60. Beton örneklerinde MgCO_3 çiçeklenmesi ve kristalize kabuk oluşumu

Beton bünyesine çözeltiyle emilen Na_2SO_4 ve MgSO_4 bileşikleri, gözeneklerde birikerek tuz kristallerine dönüşür. Bu tuzlar genişleme-parçalanma ve ornatma yoluyla beton yapısında kütle kaybına, dolayısıyla önemli yapısal zararlara yol açar. Bu durumu daha rasyonel bir biçimde ifade edebilmek amacıyla, beton örneklerinde toplam 90 saatlik kimyasal etkileşim sürecinde oluşan kütle kayıpları, aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\Delta M = [(M_0 - M_1) / M_0] \cdot 100 (\%) \quad (\text{TS 699, 1987})$$

Burada,

ΔM : Kütle kaybı (%),

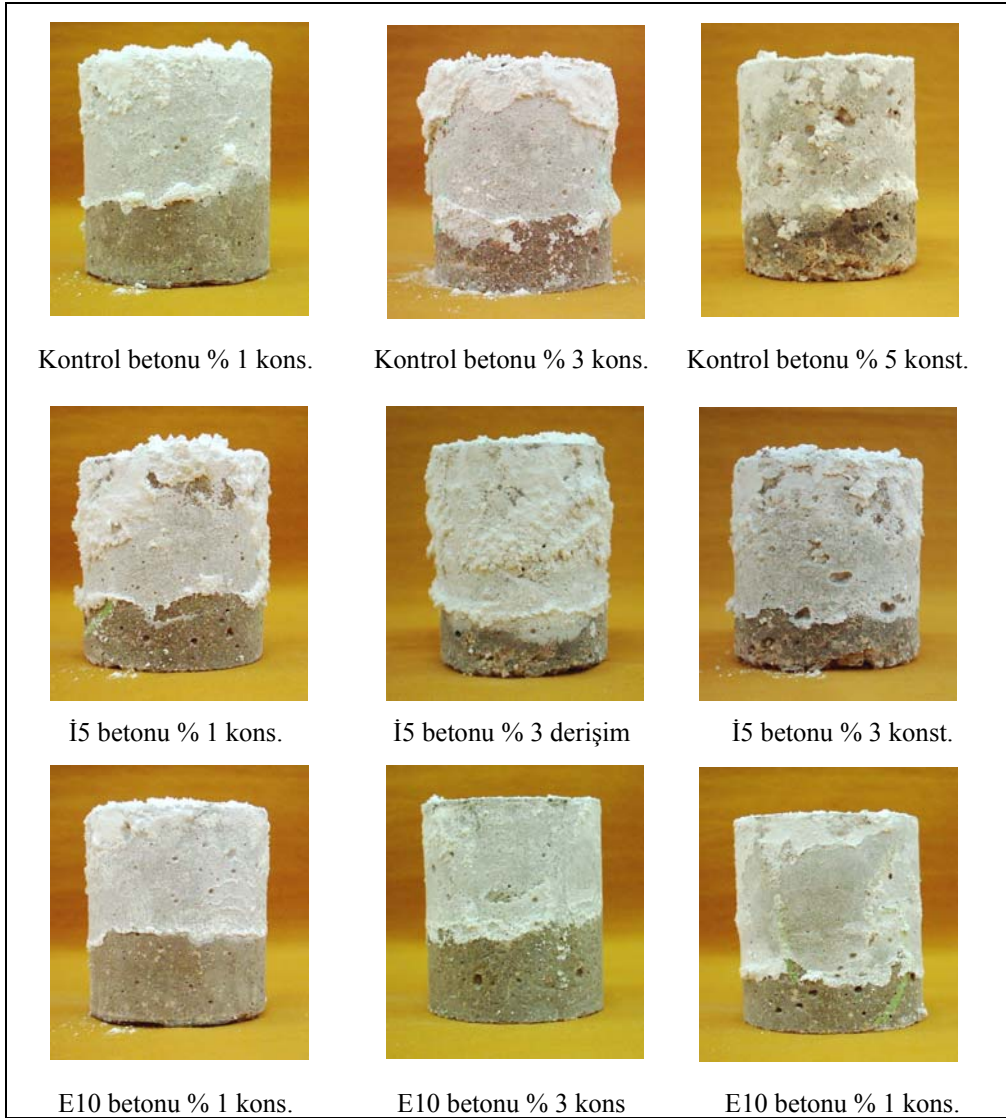
M_0 : Numunenin ilk ağırlığı (g),

M_1 : Numunenin son ağırlığı (g) dır .

Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözelti etkileşimleri için kütle değişimi değerlendirmesi sırasıyla Çizelge 4.63, 4.64, 4.65, 4.66, 4.67 ve 4.68'de, bu analizlerde kullanılan beton örneklerinin çözelti etkileşimi sonrası yüzeylerinde oluşan sülfat tuzlarının genel görünümü Şekil 4.61, 4.62, 4.63, 4.64, 4.65 ve 4.66'da, konsantrasyona ve beton karışım türüne bağlı kütle değişimlerinin grafiksel ifadeleri Şekil 4.67, 4.68, 4.69, 4.70, 4.71 ve 4.72'de verilmiştir.

Çizelge 4.63. C20 betonunda, Na₂SO₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri

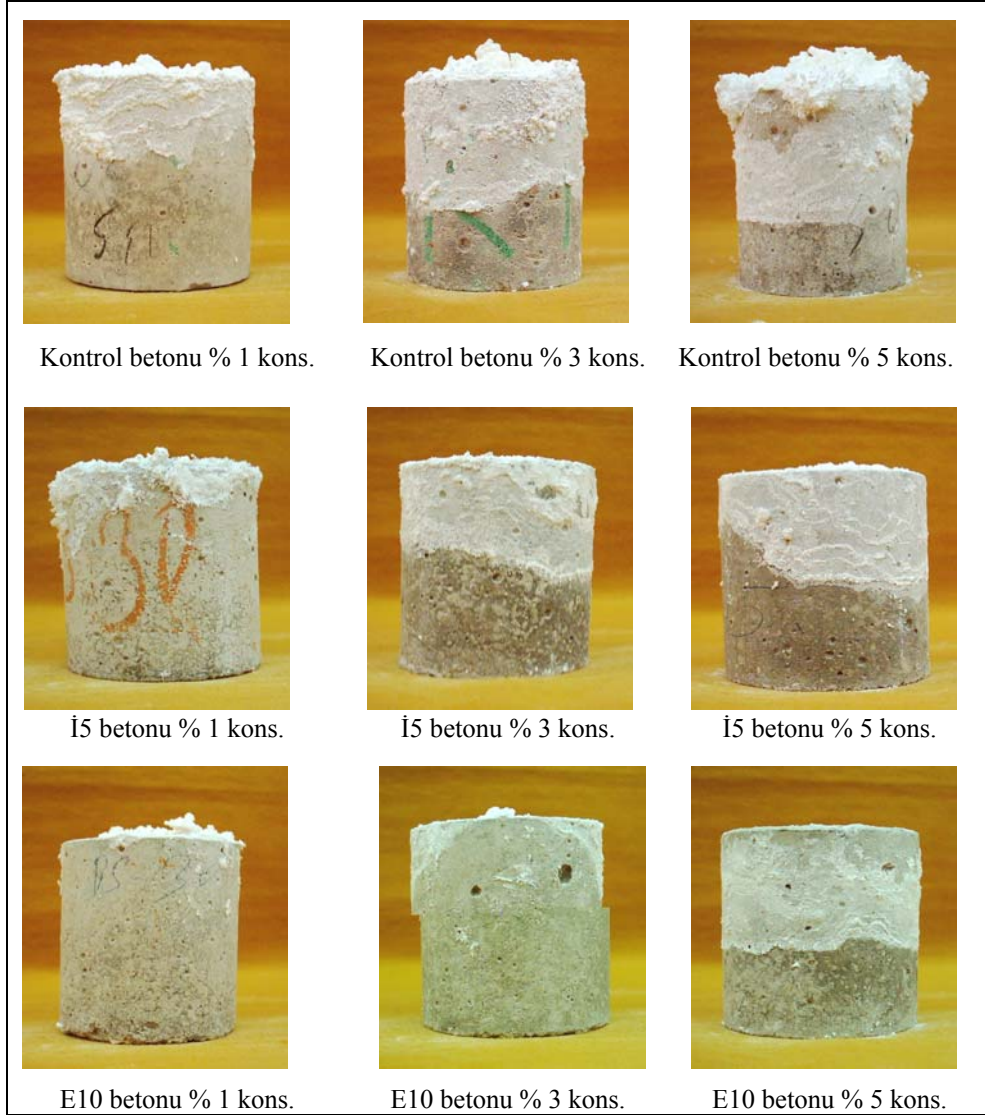
Konsantrasyon (%)	C20 Beton Örneklerinin Na ₂ SO ₄ Çözeltisi Etkisinde Kütle Kaybı (%)						
	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	9,86	8,88	7,51	6,76	8,57	7,53	4,93
3	10,65	9,69	6,53	7,50	8,02	5,76	5,56
5	14,21	11,47	7,08	7,19	7,88	5,76	4,85



Şekil 4.61. Na₂SO₄ çözeltisi ile etkileşen C20 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan sülfatlı tuzlar

Çizelge 4.64. C30 betonunda, Na_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri

Konsantrasyon %	C30 Beton Örneklerinin Na_2SO_4 Çözeltisi Etkisinde Kütle Kaybı (%)						
	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	8,99	9,20	6,75	7,66	9,50	5,62	4,05
3	1,019	9,04	7,49	6,83	10,60	6,30	4,59
5	12,81	12,26	7,47	8,62	10,01	7,26	4,45



Şekil 4.62. Na_2SO_4 çözeltisi ile etkileşen C30 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan sülfatlı tuzlar

Çizelge 4.65. C40 betonunda, Na_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri

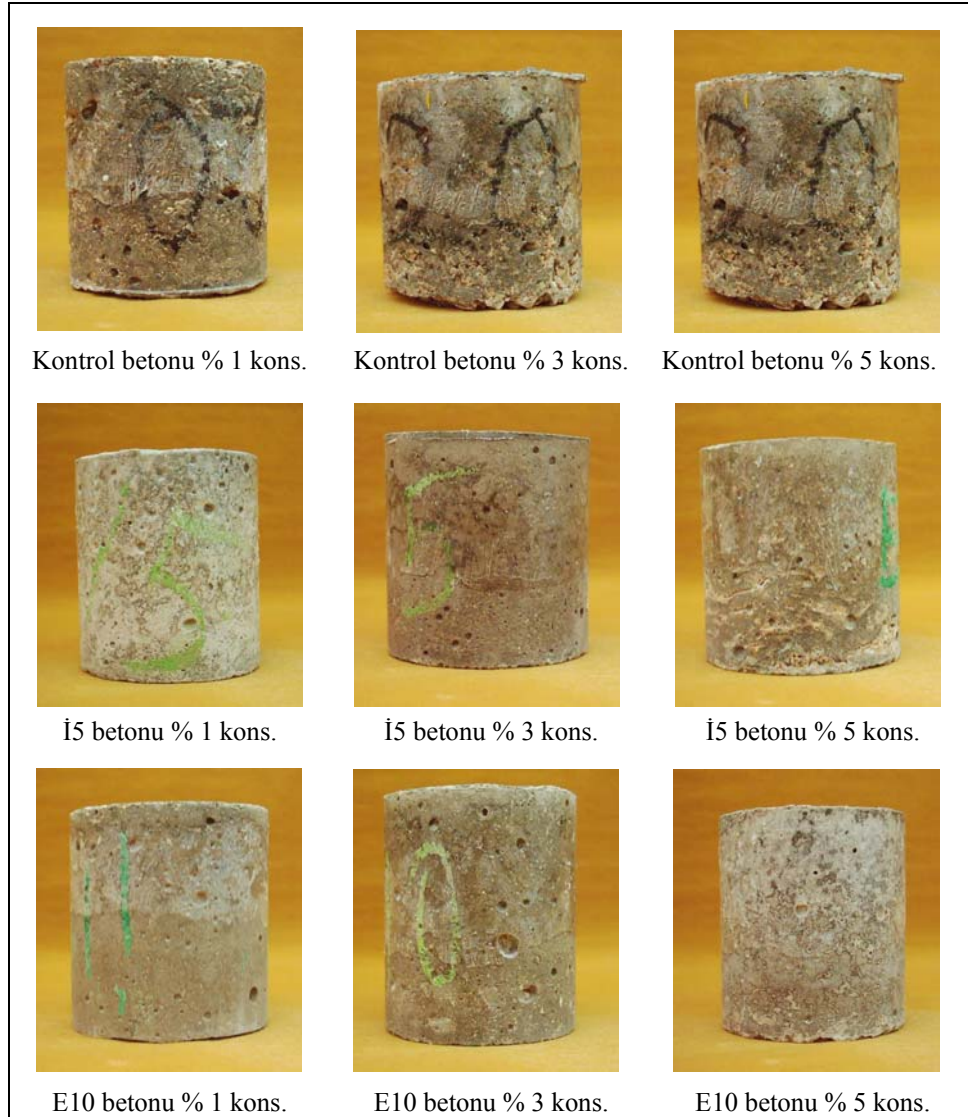
Konsantrasyon %	C40 Beton Örneklerinin Na_2SO_4 Çözeltisi Etkisinde Kütle Kaybı (%)						
	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	7,52	9,59	6,08	7,67	6,99	4,69	5,10
3	9,59	8,86	5,91	6,84	7,34	4,45	6,54
5	10,85	10,09	6,76	8,62	6,32	5,77	5,63



Şekil 4.63. Na_2SO_4 çözeltisi ile etkileşen C40 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan sülfatlı tuzlar

Çizelge 4.66. C20 betonunda, $MgSO_4$ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri

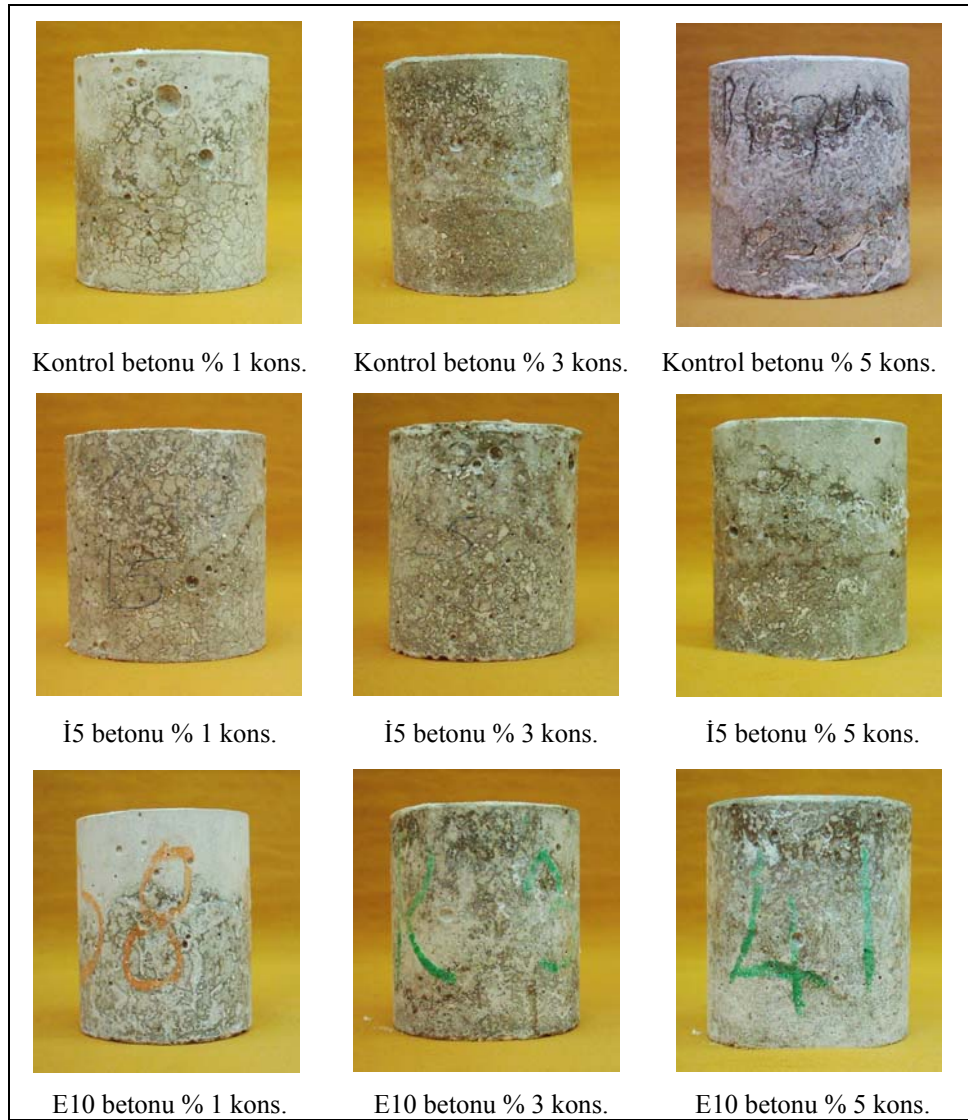
Konsantrasyon %	C20 Beton Örneklerinin $MgSO_4$ Çözeltisi Etkisinde Kütle Kaybı (%)						
	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	4,97	5,04	4,87	4,33	3,66	3,49	2,88
3	5,86	4,73	5,21	4,07	4,61	3,98	4,36
5	6,47	6,74	5,39	3,61	4,70	4,16	3,99



Şekil 4.64. $MgSO_4$ çözeltisi ile etkileşen C20 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan $MgCO_3$ kristalleri

Çizelge 4.67. C30 betonunda, $MgSO_4$ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri

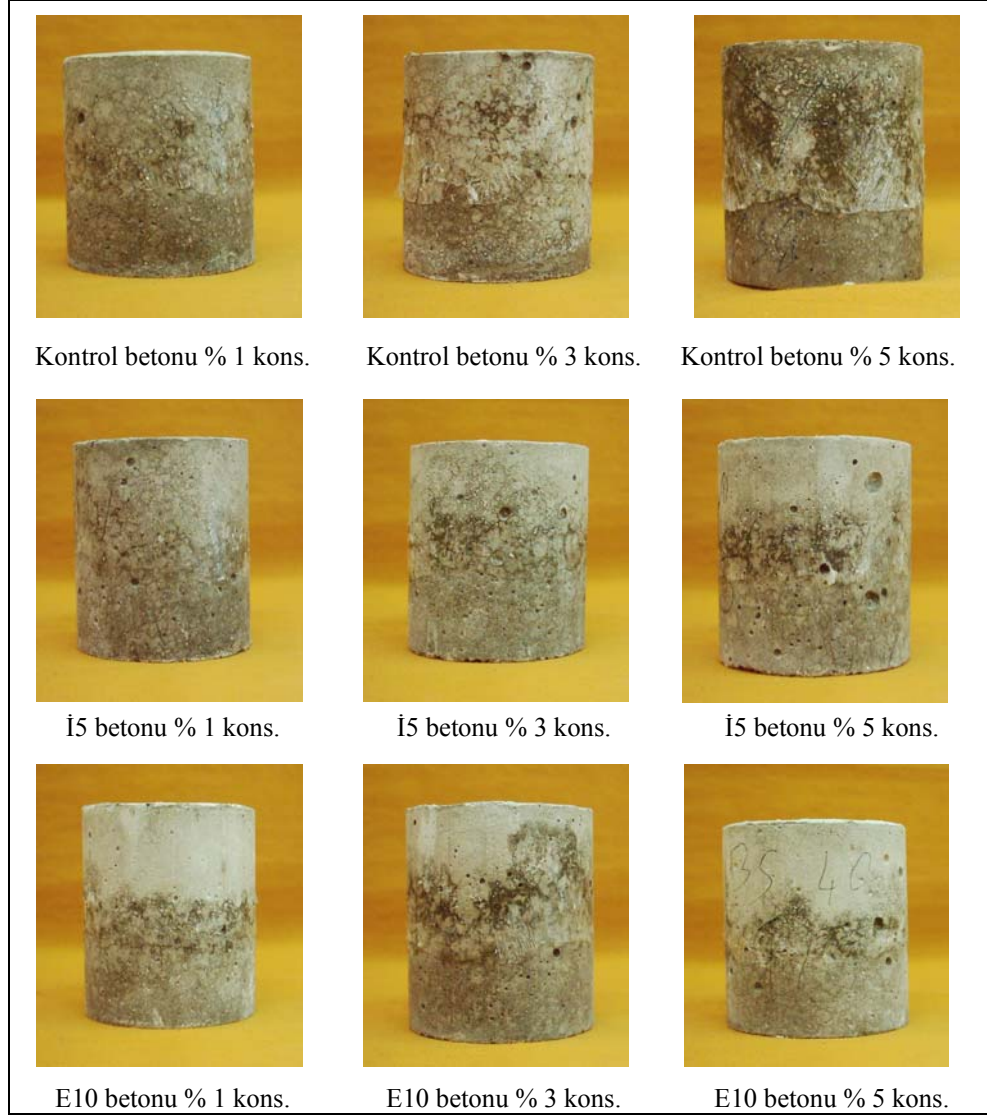
Konsantrasyon %	C30 Beton Örneklerinin $MgSO_4$ Çözeltisi Etkisinde Kütle Kaybı (%)						
	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	4,46	4,19	3,82	2,97	4,30	3,30	2,57
3	4,10	4,57	3,57	4,07	4,45	3,65	3,41
5	5,01	4,41	4,13	3,31	4,86	2,85	3,39



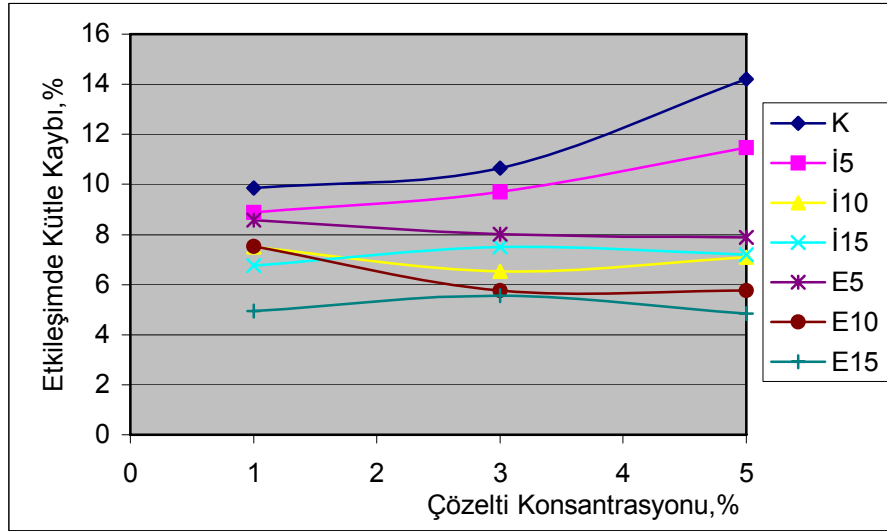
Şekil 4.65. $MgSO_4$ çözeltisi ile etkileşen C30 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan $MgCO_3$ kristalleri

Çizelge 4.68. C40 betonunda, $MgSO_4$ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri

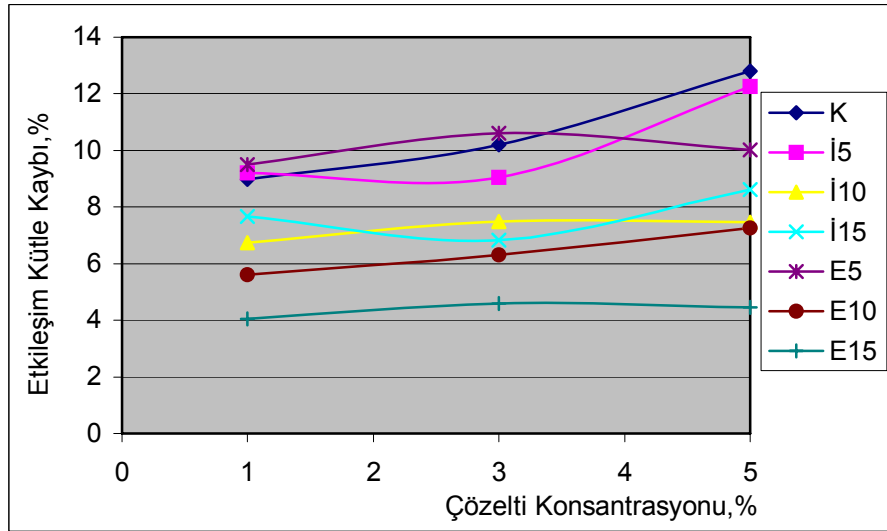
Konsantrasyon %	C40 Beton Örneklerinin $MgSO_4$ Çözeltisi Etkisinde Kütle Kaybı (%)						
	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	3,10	3,53	2,48	3,22	3,37	2,63	3,01
3	4,26	3,70	2,40	2,95	3,61	2,90	3,24
5	4,64	4,09	3,43	3,39	3,74	3,54	2,39



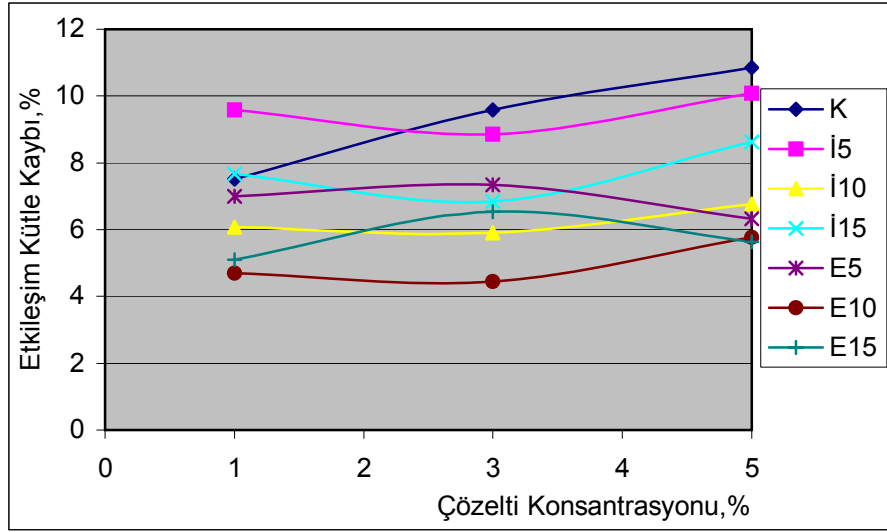
Şekil 4.66. $MgSO_4$ çözeltisi ile etkileşen C40 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan $MgCO_3$ kristalleri



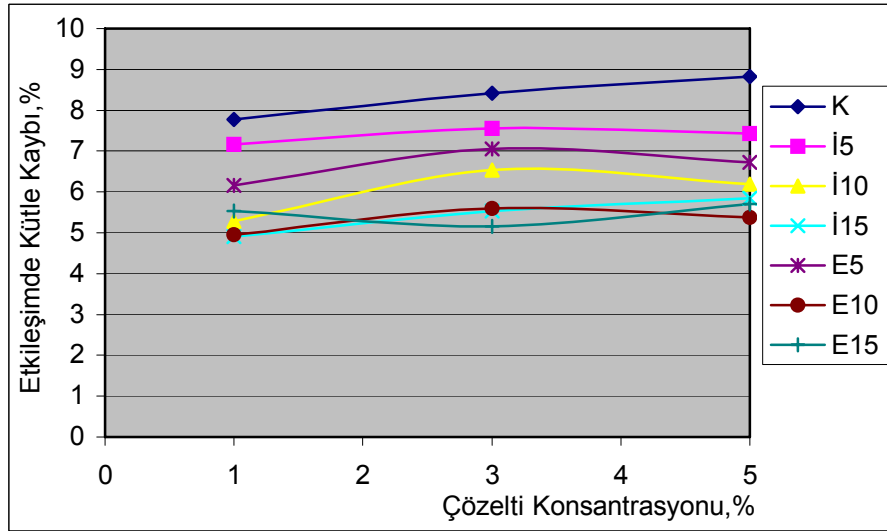
Şekil 4.67. 3 farklı konsantrasyonda Na_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C20 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi



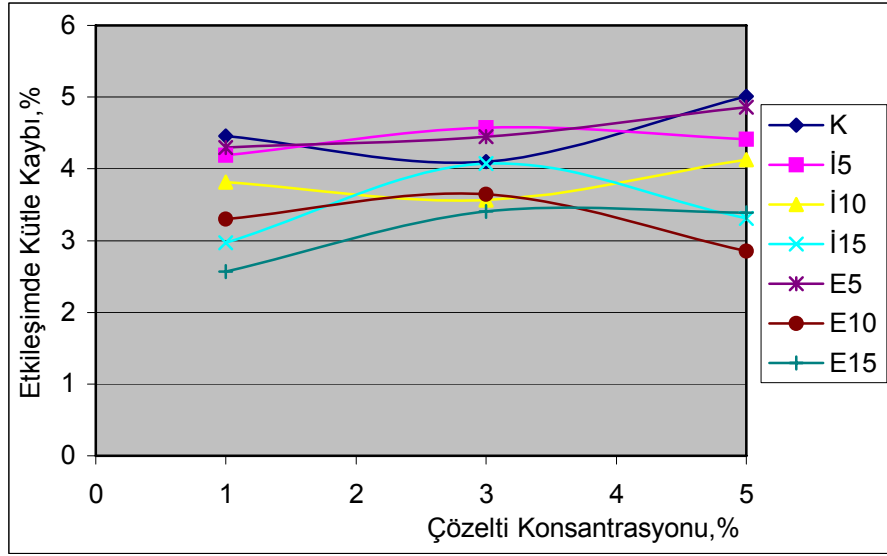
Şekil 4.68. 3 farklı konsantrasyonda Na_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C30 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi



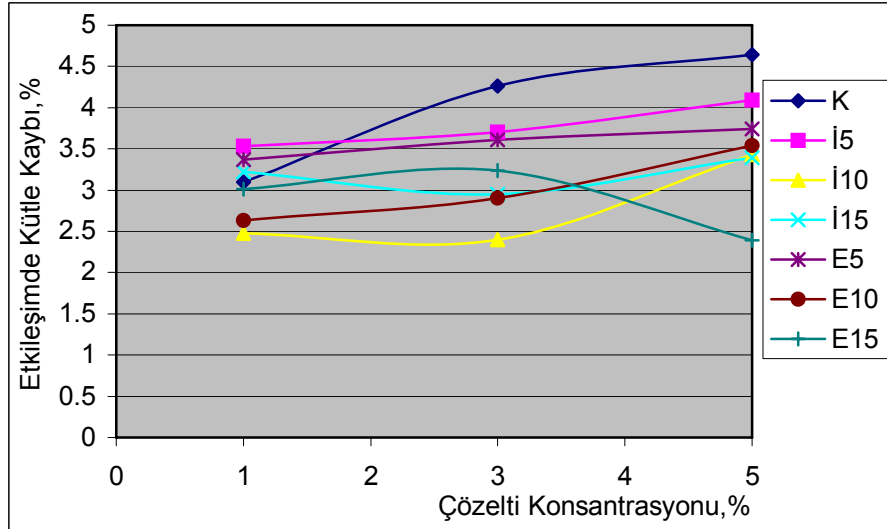
Şekil 4.69. 3 farklı konsantrasyonda Na_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C40 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi



Şekil 4.70. 3 farklı konsantrasyonda MgSO_4 çözeltisiyle etkileşen C20 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi



Şekil 4.71. 3 farklı konsantrasyonda $MgSO_4$ çözeltisiyle etkileşen C30 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi

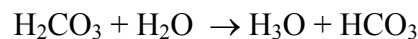
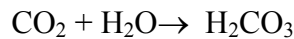


Şekil 4.72. 3 farklı konsantrasyonda $MgSO_4$ çözeltisiyle etkileşen C40 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi

Beton örneklerinin, Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltileriyle toplam 90 saatlik etkileşimlerinin analizlerinde, genel olarak en fazla kütle kaybının kontrol beton örneklerinde olduğu belirlenmiştir. Amorf silika katkılı beton örneklerinde katkı kullanım oranı arttıkça kütle kaybının azaldığı, katkı maddesinin çözelti konsantrasyonuna bağlı olarak Na₂SO₄ çözeltisi için % 25-73, MgSO₄ çözeltisi için % 17-62 oranlarında iyileşme sağladığı belirlenmiştir.

Etkileşimi azaltmada, ikame yöntemine göre katkı kullanımının, ilave yöntemine göre kullanımdan daha etkili olduğu saptanmıştır. Bu durum, karışımda kullanılan toplam bağlayıcı madde içerisinde artan SiO₂'in sülfat direncini artırmasına, ayrıca zamanla ortamda konsantre olarak genişmeleri sonucu yapıyı parçalayabilen Na ve Mg iyonlarının bir kısmının, silanol (Si-O-Si) molekülleriyle bağ yaparak zararsız duruma getirilmelerine bağlanabilir.

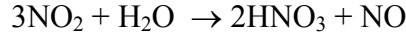
Bu araştırma kapsamında bir diğer inceleme konusu ise, amorf silika katkılı beton örneklerinin atmosferdeki gaz konsantrasyonlarına karşı dayanım karakteristiğinin analizidir. Bilindiği gibi atmosferde, özellikle endüstri bölgelerinde bulunan SO₃, CO₂ gibi gazlar, yağmur, sis ve havadaki nem ile birleşerek, H₂SO₄ ve H₂CO₃ asitlerinin oluşmasına neden olurlar. Bu tür asitlerin CaCO₃ esaslı yapı bileşenleri üzerinde eritici ve parçalayıcı bir etkisi vardır. Özellikle endüstri bölgeleri ve büyük yerleşim birimlerinde, evlerin ve fabrikaların bacalarından, otomobillerin eksozlarından atmosfere önemli miktarda CO₂ ve SO_x emisyonu verilmektedir. Bu gazlar yağmurlu ve sisli havalarda H₂CO₃ ve H₂SO₄ formunda asit haline dönüşerek, zaman içerisinde yapılarda kullanılan CaCO₃ içerikli malzemeleri deforme ederler. Bu etkileşime genelde “asit yağmuru etkisi” adı verilmektedir. CO₂, asidik bir oksittir. Yağmur suyundaki asitliğin büyük bir kısmı karbonik asidin birincil iyonlaşmasından ileri gelmektedir. Bu etkileşimin kimyasal reaksiyon dengesi;



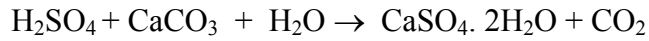
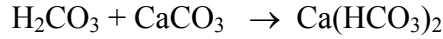
ile verilmektedir (Gündüz ve Uğur, 1996). Atmosferde, doğal kısmi basıncı 0.00035 atm olan CO₂ ile dengedeki yağmur suyunun pH değeri 5,6 dolayındadır. Diğer taraftan NO, gök gürültüsü ile meydana gelen yağışlarda, havadaki N₂ ve O₂

gazlarının tepkimesiyle oluşur. NO, daha sonra yükseltgenerek NO₂'i oluşturur. Bu bileşik H₂O ile tepkime vererek nitrik asidi meydana getirir.

Bu reaksiyon:



dengesi ile sağlanmaktadır (Gündüz ve Uğur, 1996). Bu şekilde doğal olarak meydana gelen nitrik asit, yağmur suyunun asitliğine katkıda bulunmaktadır. Bununla beraber, otomobil motorları ve termik santraller gibi yüksek sıcaklıklarda üretilen tepkimeler, atmosfere verilen HNO₃ miktarı açısından önem arzeder. Hava kirliliğinin yoğun olduğu bazı bölgelerde HNO₃'ün asit yağmuru oluşumuna katkısı 1/4 oranında olabilmektedir. Hava kirliliği ve dolayısıyla asit yağmurlarına etki eden diğer önemli bir faktörde, kükürt yüzdesi yüksek fosil yakıtların kullanılmasıdır. Bu tür yakıtların yoğun olarak tüketildiği bölgelerde atmosfere salınan SO₂ gazı, çeşitli kimyasal etkileşimler sonucu SO₃ bileşiği haline dönüşür. SO₃ ise sülfürik asidin anhidrit formudur. Sülfürik asidin, asit yağmuru oluşumuna katkısı % 50 olarak kabul edilmektedir. H₂CO₃ ve H₂SO₄ asitlerinin, CaCO₃ esaslı yapı bileşenleri üzerindeki etkilerini aşağıdaki tepkime denklemleri ile göstermek mümkündür (Kocataşkın, 1976):



Karbonik asit reaksiyonunu gösteren ilk denklem, suda erimez bir bileşik olan kalsiyum karbonatın, suda erir bir bileşik olan kalsiyum bikarbonat haline geçtiğini göstermektedir. Bu şekilde suda erir hale geçen dış yüzler, yağış tarafından eritilip taşınınca, malzeme eskimeye başlar. Sülfürik asit-kalsiyum karbonat reaksiyonu ise, kalsiyum karbonatın jips formuna geçtiğini ve iki mol su alarak kristalleştiğini göstermektedir. Bu olayda meydana gelen hacim genişlemesi malzemeyi parçalar ve eskimesine yol açar. Asidik özelliğe sahip yağmurların bu tür etkileri, binaların özellikle dış yüzeylerinde açıkça görülebilmektedir. Bu nedenle, atmosferde oluşan zararlı bileşikler, yapılarda kullanılan malzemelerde gerek fiziksel ve gerekse kimyasal birtakım değişimlere neden olmakta ve malzemelerin dayanım karakteristiğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltileriyle etkileşim analizinde kullanılan beton örneklerinin, değişik konsantrasyonlara sahip H_2SO_4 çözeltisindeki kütleli değişimleri de deneysel olarak incelenmiştir (Şekil 4.73). Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltileriyle etkileşim analizinde kullanılan oranlarda hazırlanan amorf silika katkılı beton örnekleri, % 1, % 3 ve % 5'lik konsantrasyonlara sahip H_2SO_4 çözelti ortamında, her biri 18 saatlik 5 periyot boyunca etkileşime tabi tutulmuştur (TS 699, 1987). Beton-asidik çözelti etkileşimlerinde aşağıda belirtilen noktalar araştırmaya konu edilmiştir:

- Muhtelif konsantrasyonlardaki asidik çözeltiliye maruz beton örneklerinin kütle değişim oranları,
- Amorf silika katkısının, beton örnekleri asidik çözelti etkileşim direncindeki rolü,
- Beton-asidik çözelti etkileşimindeki zararlı etkilerin minimize edilebilmesi için optimum katkı kullanım oranı.

% 1, % 3 ve % 5 konsantrasyona sahip H_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen beton örneklerinin kütle değişim bulguları Çizelge 4.69 ve 4.70'de verilmiştir.



Şekil 4.73. Asidik çözelti - beton örneği etkileşimi deney ortamı

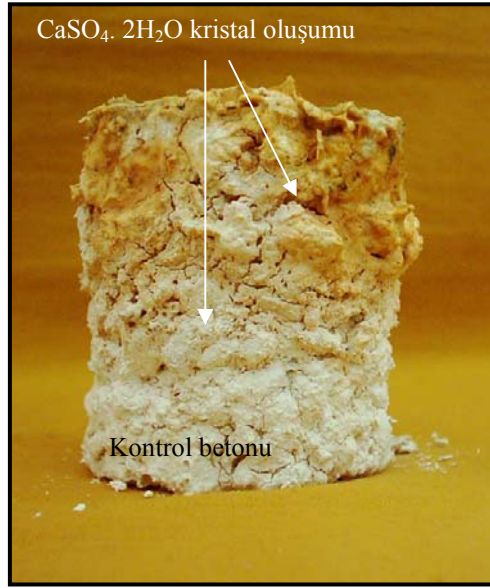
Çizelge 4.69. H₂SO₄ çözeltisiyle etkileşim analizinde beton örneklerinin orijinal kuru birim ağırlık değerleri

C20 Betonu Örnekleri Orijinal Birim Ağırlık (g) Değerleri (H ₂ SO ₄)							
No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	185,48	194,33	193,55	176,01	193,74	197,89	196,83
2	205,56	186,42	192,34	185,58	195,25	190,97	190,95
3	196,22	190,51	191,29	183,72	196,00	196,24	192,11
1	200,25	191,86	186,06	183,79	198,08	196,82	192,67
2	189,41	189,60	191,77	193,06	198,35	199,15	191,35
3	198,10	190,59	189,43	177,91	203,57	197,86	195,32
1	196,93	197,14	187,15	187,05	196,99	191,58	192,39
2	199,04	196,50	193,07	193,60	196,04	194,88	186,26
3	210,72	191,28	186,52	184,99	202,75	194,39	194,32
C30 Betonu Örnekleri Orijinal Birim Ağırlık (g) Değerleri (H ₂ SO ₄)							
No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	200,17	203,66	195,50	187,96	195,55	193,52	188,33
2	203,82	200,34	190,58	188,72	190,58	196,30	187,82
3	203,91	202,90	186,67	189,19	195,98	194,32	191,04
1	201,26	199,42	182,45	190,10	197,44	192,62	196,09
2	203,61	196,14	191,07	192,43	190,51	193,18	191,92
3	203,49	197,11	189,99	196,36	195,31	195,13	188,12
1	202,28	193,36	189,76	191,92	193,80	191,46	191,51
2	200,62	194,89	190,84	186,35	196,38	192,19	187,70
3	194,54	195,44	188,12	195,70	196,16	199,03	190,07
C40 Betonu Örnekleri Orijinal Birim Ağırlık (g) Değerleri (H ₂ SO ₄)							
No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	192,96	195,12	196,66	185,05	199,64	196,41	192,51
2	192,84	195,36	191,74	190,45	195,49	190,60	191,99
3	195,64	194,40	187,80	188,43	195,11	190,90	194,29
1	191,66	194,56	190,01	184,88	197,72	194,21	190,93
2	185,56	197,85	187,19	185,76	206,13	191,10	189,65
3	194,22	194,75	191,35	187,39	196,83	194,84	189,27
1	196,59	194,62	189,68	185,69	197,81	191,38	192,97
2	196,23	193,05	192,75	184,18	200,46	188,95	191,50
3	204,71	195,24	189,08	188,06	199,30	194,16	188,14

Çizelge 4.70. H₂SO₄ çözeltisine maruz beton örneklerinin etkileşim sonrası kuru birim ağırlık değerleri

C20 Betonu Örnekleri Etkileşim Sonrası Birim Ağırlık (g) Değerleri (H ₂ SO ₄)								
Konsantrasyon	No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
% 1	1	167,90	175,97	179,50	164,32	176,15	184,37	185,14
	2	190,31	169,10	177,76	175,06	176,45	176,40	174,03
	3	179,76	174,03	177,06	168,69	178,58	183,25	178,87
% 3	1	180,47	175,48	172,05	170,10	178,73	182,02	178,70
	2	169,31	174,03	179,86	178,04	179,21	182,12	177,88
	3	179,16	173,78	175,56	164,12	185,62	183,20	181,98
% 5	1	174,64	178,17	172,85	173,90	174,08	174,80	176,21
	2	177,01	171,82	180,77	176,72	173,85	180,67	174,41
	3	190,83	170,64	169,14	168,88	183,47	176,99	180,25
C30 Betonu Örnekleri Etkileşim Sonrası Birim Ağırlık (g) Değerleri (H ₂ SO ₄)								
Konsantrasyon	No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
% 1	1	185,26	193,23	186,33	178,90	184,83	185,12	179,82
	2	190,53	185,27	180,33	180,89	471,25	185,78	178,09
	3	188,25	187,78	177,36	179,58	184,26	185,61	179,56
% 3	1	183,53	186,98	172,73	181,01	184,03	183,14	185,05
	2	189,13	180,63	179,20	181,83	177,40	183,31	184,28
	3	188,49	183,41	177,03	185,66	183,36	183,66	178,56
% 5	1	184,76	181,49	177,12	179,69	182,11	180,43	179,16
	2	184,63	181,77	178,55	175,95	182,87	183,08	178,90
	3	179,64	180,08	179,88	186,64	184,41	189,40	180,53
C40 Betonu Örnekleri Etkileşim Sonrası Birim Ağırlık (g) Değerleri (H ₂ SO ₄)								
Konsantrasyon	No	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
% 1	1	182,04	185,72	189,60	181,57	190,90	189,89	189,26
	2	188,94	188,42	182,65	186,20	186,61	184,54	187,65
	3	184,45	186,94	179,61	183,49	185,51	186,60	190,97
% 3	1	181,42	184,35	182,90	179,81	188,90	187,57	186,00
	2	173,24	188,93	180,11	181,65	196,34	182,79	186,86
	3	184,16	185,17	183,85	182,24	186,52	189,75	183,44
% 5	1	184,95	182,98	181,26	181,36	187,29	184,83	186,10
	2	186,60	181,72	184,77	179,30	189,53	182,58	186,27
	3	193,53	185,61	181,48	182,00	189,37	186,61	183,34

H₂SO₄ çözeltisi etkileşimlerinde, örnek yüzeylerinde yoğun miktarda jips (CaSO₄.2H₂O) çiçeklenmeleri olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.74). Bu durum özellikle kontrol betonu örneklerinde oldukça belirgindir.

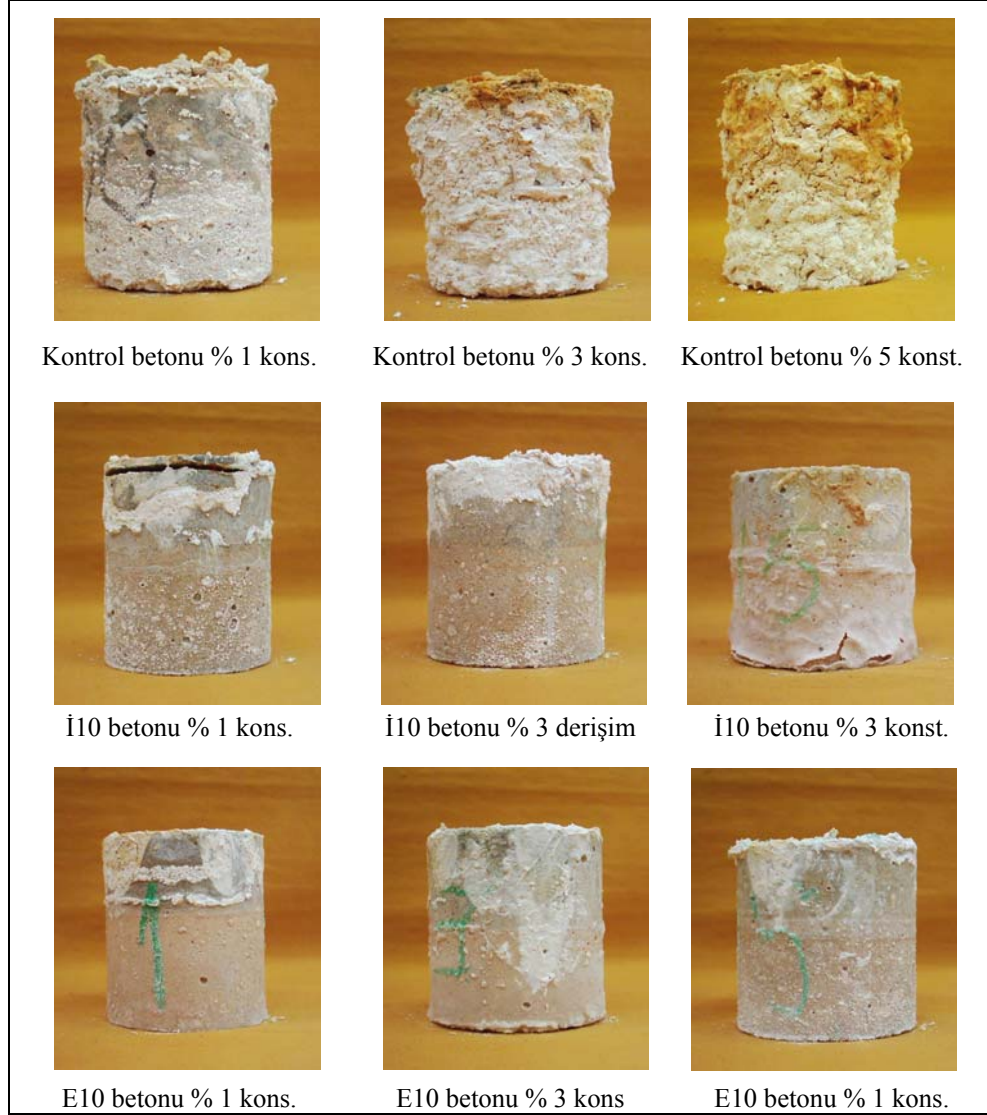


Şekil 4.74. Beton örneklerinin yüzeyinde jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) kristalleşmesi

Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerine maruz örnekler üzerine yapılan hesaplamalar ve değerlendirmeler, benzer yaklaşımlarla H_2SO_4 asit ortam etkileşimleri için de tekrarlanmıştır. H_2SO_4 çözelti etkileşimleri için kütle değişimi değerlendirmesi sırasıyla Çizelge 4.71, 4.72 ve 4.73’de, bu analizlerde kullanılan beton örneklerinin çözelti etkileşimi sonrası yüzeylerinde oluşan jips çiçeklenmeleri Şekil 4.75, 4.76 ve 4.77’de, konsantrasyona ve beton karışım türüne bağlı kütle değişimlerinin grafiksel ifadeleri Şekil 4.78, 4.79 ve 4.80’da verilmiştir.

Çizelge 4.71. C20 betonunda, H₂SO₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütle kaybı

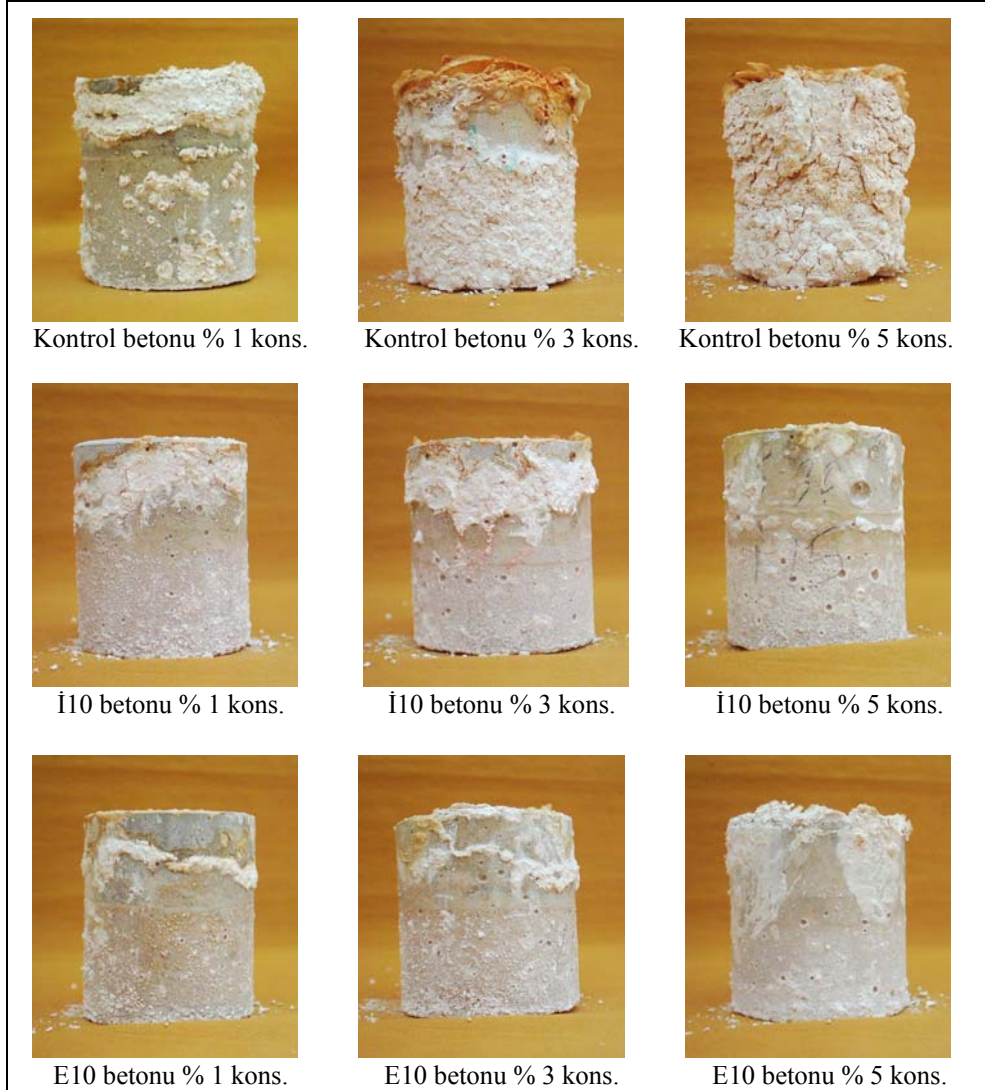
Konsantrasyon (%)	C20 Beton Örneklerinin H ₂ SO ₄ Çözeltisi Etkisinde Kütle Kaybı (%)						
	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	9,16	10,05	8,02	7,33	10,13	7,55	7,78
3	11,12	9,32	7,54	8,30	10,39	8,49	7,57
5	11,84	12,35	8,41	8,88	12,12	9,09	7,93



Şekil 4.75. H₂SO₄ çözeltisi ile etkileşen C20 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan jips çiçeklenmeleri

Çizelge 4.72. C30 betonunda, H₂SO₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri

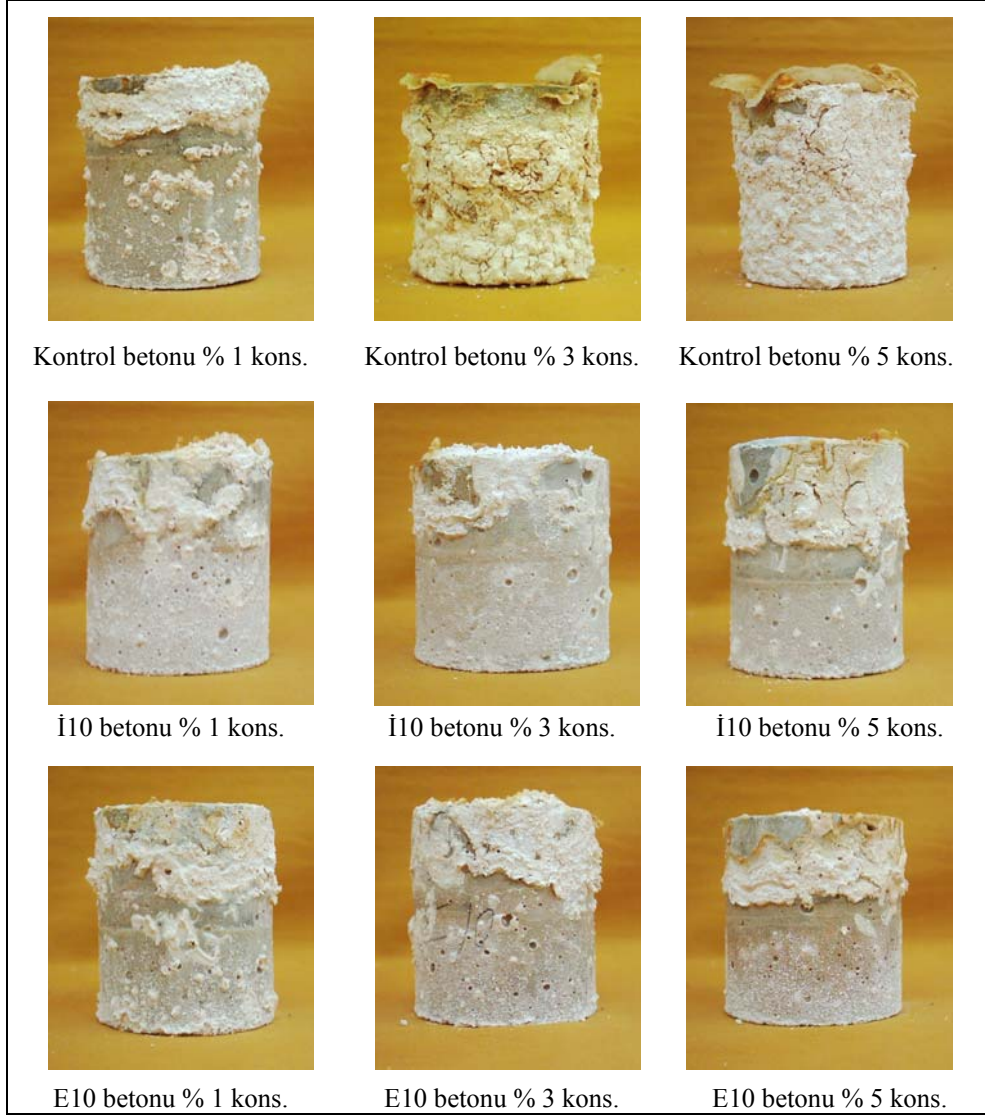
Konsantrasyon %	C30 Beton Örneklerinin H ₂ SO ₄ Çözeltisi Etkisinde Kütle Kaybı (%)						
	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	7,78	7,17	5,28	4,91	6,16	4,96	5,53
3	8,41	7,56	6,53	5,54	7,06	5,60	5,15
5	8,82	7,43	6,19	5,84	6,73	5,38	5,70



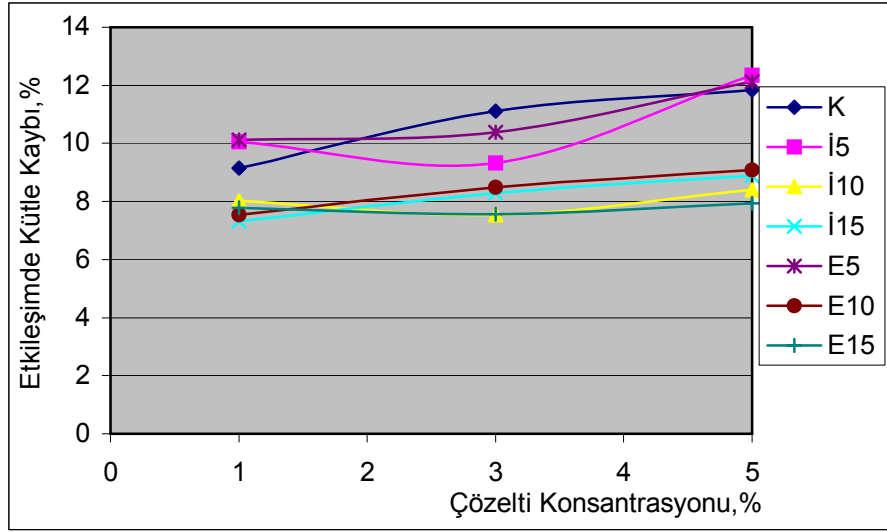
Şekil 4.76. H₂SO₄ çözeltisi ile etkileşen C30 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan jips çiçeklenmeleri

Çizelge 4.73. C40 betonunda, H₂SO₄ çözeltisiyle etkileşen örneklerin karışım türü ve çözelti konsantrasyonuna göre kütleli değişimleri

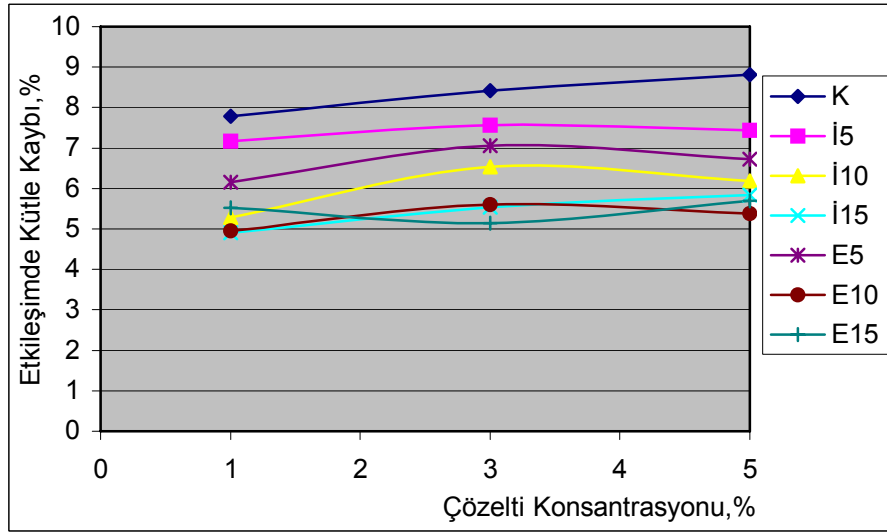
Konsantrasyon %	C40 Beton Örneklerinin H ₂ SO ₄ Çözeltisi Etkisinde Kütle Kaybı (%)						
	K	İ5	İ10	İ15	E5	E10	E15
1	4,68	4,24	4,41	2,30	4,83	3,01	1,92
3	6,05	5,14	3,96	2,63	5,06	3,58	2,43
5	5,74	5,92	4,38	2,81	5,54	3,69	3,04



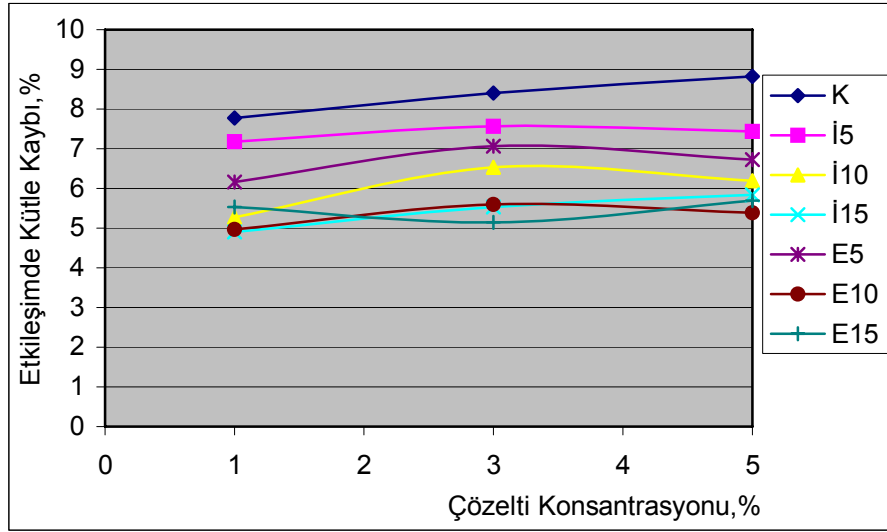
Şekil 4.77. H₂SO₄ çözeltisi ile etkileşen C40 sınıfı beton örneklerinin yüzeyinde oluşan jips çiçeklenmeleri



Şekil 4.78. 3 farklı konsantrasyonda H_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C20 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi



Şekil 4.79. 3 farklı konsantrasyonda H_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C30 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi



Şekil 4.80. 3 farklı konsantrasyonda H_2SO_4 çözeltisiyle etkileşen C40 beton örneklerinin karışım tasarımı - kütle kaybı ilişkisi

Beton örneklerinin, H_2SO_4 çözeltisiyle toplam 90 saatlik etkileşimlerinin analizlerinde, genel olarak en fazla kütle kaybının yine kontrol beton örneklerinde olduğu belirlenmiştir. Amorf silika katkılı beton örneklerinde katkı kullanım oranı arttıkça kütle kaybının azaldığı, katkı maddesinin çözelti konsantrasyonuna bağlı olarak % 27-70 oranında iyileşme sağladığı belirlenmiştir.

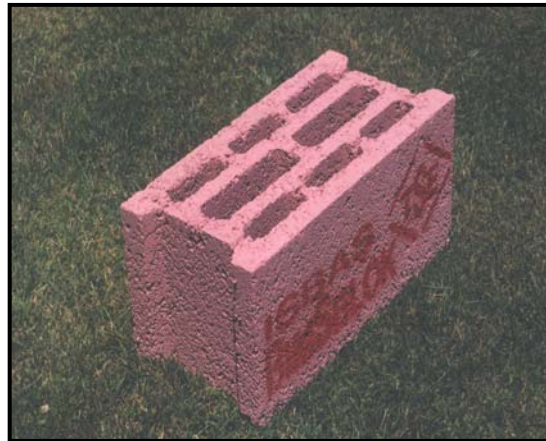
Etkileşimi azaltmada, ikame yöntemine göre katkı kullanımının, ilave yöntemine göre kullanımdan bir miktar daha etkili olduğu saptanmıştır. Bu durum, karışımda kullanılan toplam bağlayıcı madde içerisinde artan SiO_2 'in sülfat direncini artırmasına, buna bağlı olarak da $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ kristallerinin nispeten düşük seviyelerde oluşarak genleşme sonrası yapıya daha az düzeyde zarar vermesine bağlanabilir.

4.3.2. Hafif Yapı Elemanları Üretiminde Amorf Silikanın Mikronize veya Agregası Olarak Kullanılabilirlik Analizleri

4.3.2.1. Mikronize Amorf Silikanın Hafif Yapı Elemanı Üretiminde Katkı Malzemesi Olarak Kullanımı

I. lokasyon amorf silika oluşumlarından elde edilen mikronize katkı maddesinin, geleneksel betonun yanısıra “TS 2823’e göre bims betondan üretilen yapı elemanları”nın (hafif beton) basınç dayanımlarına da etkisini belirlemek üzere, deneysel olarak yürütülen araştırma bulguları bu bölümde tartışılmıştır. Katkı maddesinin pomza agregalı hafif betondan üretilen yapı elemanlarının dayanımlarına etkisini birebir ve çok sayıda ürün üzerinde analiz ederek yorumlayabilmek amacıyla, deney numuneleri “Isbaş A.Ş. Hafif Yapı Elemanları Fabrikası (Isparta)”nda üretilmiştir.

Deney numunesi olarak TS 2823 normlarına uygun, ÇB-19 olarak kodlanmış “1.0/25 BDB üç sıra boşluklu duvar elemanı” tipi seçilmiştir (Şekil 4.81). Hafif yapı elemanları üretiminde kullanılan temel hammadde kırılmış-sınıflandırılmış pomza agregasıdır. Üretimde kullanılan (Karakaya maden sahası) pomza agregalarının fiziksel özellikleri Çizelge 4.74’ de verilmiştir.



Şekil 4.81. ÇB-19 olarak kodlanmış 1.0/25 BDB üç sıra boşluklu duvar elemanı görünümü

Çizelge 4.74. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan pomza agregalarının fiziksel özellikleri

Agrega Özellikleri	Maks. Tane Boyutu (mm)	Gevşek B.H.A (kg/m ³)	Sıkışık B.H.A (kg/m ³)	Gerçek Ö.A. (gr/cm ³)	İnce Madde Miktarı (%)	Su Emme (%)	Nem (%)	Organik Madde İçeriği	A.Z. (%)
İri -12mm / +4mm	12	675	710	2,57	1,75	24,6	13,3	Renklenme yok	0,64
İnce - 4 mm	-	950	1.065	2,62	7,90	-	11,7	Renklenme yok	1,50
TS 1114 göre	İri	32	≤ 1.000	-	-	≤ 3	-	Renklenme yok	≤ 5
	İnce	-	≤ 1.200	-	-	>5	-	Renklenme yok	

Agrega özellikleri incelendiğinde, karışımda kullanılan pomza agregasının TS 1114’de belirtilen hafif agregalar tanımına uygun olduğu, ancak 0 /-3 mm grubu ince agregada (pümisit) ince madde miktarının TS 1114’de belirtilen ağırlıkça maksimum % 5 limitinden yüksek olduğu belirlenmiştir.

Hafif beton karışımında en büyük tane çapı olarak, Isbaş A.Ş. hafif yapı elemanı üretim prosesinde kullanılan $D_{max}=12$ mm seçilmiştir. Yine üretim prosesinde kullanılan su/bağlayıcı oranı, agrega granülometrisi, karışım süresi (45 sn), vibrasyon süresi (5 sn) ve frekansı ile presleme basıncı (120 bar) değiştirilmemiştir. Bu bağlamda deney numunesi olarak üretilen kontrol ve katkı bimsblok karışım özellikleri Çizelge 4.75’ de verildiği gibi uygulanmıştır.

Çizelge 4.75. Kontrol ve katkı maddesi içeren hafif beton karışım tasarımları.

Karışım Grubu	Kuru Agregası Miktarı (kg)		Çimento Miktarı (kg)	Karışım Su Miktarı (kg)			s/b Oranı	Amorf Silika Katkı Miktarı (gr)
	İri	İnce		Agrega Nemi	İlave Su	Toplam Su		
KB1	535	465	220	126	190	316	1,44	-
KB2	535	465	180	126	134	260	1,44	-
ASB	535	465	180	126	162	288	1,44	20.000

KB1, KB2 ve ASB karışım gruplarında, karışıma giren agregası miktarları ve oranları sabit tutulmuştur. KB1 karışımına 220 kg, KB2 karışımına ise 180 kg (PÇ 42.5) çimento dahil edilirken katkı maddesi kullanılmamıştır. ASB karışımına ise 180 kg çimento ile birlikte 20 kg mikronize amorf silika ilave edilmiştir. Tüm karışımların

s/b oranları sabit tutulurken, agrega bünyesinden gelen su dikkate alınarak, karışımlara farklı miktarlarda su ilavesi yapılmıştır. Bu şekilde, (180 kg çimento dozajı için) çimento dozajı değiştirilmeden ve (220 kg çimento dozajı için) karışıma giren katkı maddesinden daha fazla miktarda çimentodan eksiltme yapılarak, amorf silikanın numune dayanımları üzerindeki etkisi ve etkinlik faktörü (k) araştırılmıştır.

Tüm deney numunelerinin kalıplanmasında, karışım süresi (45 sn), kalıba yerleştirme vibrasyon frekansı ve süresi (5 sn) ile presleme basıncı (120 bar) sabit tutulmuştur. Üretilen hafif bloklar, normal üretim prosesinde uygulandığı gibi, 3 gün (havada) kür kamaralarında bekletildikten sonra stok sahasına alınmıştır. Kalan priz sürelerini stok alanında tamamlayan ürünlerin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. Basınç dayanım deneyinde her bir karışım grubundan 10'ar adet blok sistematik olarak (TS 2823'e göre) seçilmiştir. Deney bulguları Çizelge 4.76, 4.77, ve 4.78'de verilmiştir.

Çizelge 4.76. KB1 karışımdan üretilen hafif yapı elemanlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri

KB1	3 gün		7 gün		14 gün		28 gün	
	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)
1	121,70	1,64	112,1	1,51	163,50	2,21	209,20	2,82
2	83,60	1,13	114,8	1,55	141,40	1,91	185,30	2,50
3	113,90	1,54	93,6	1,26	222,50	3,00	156,00	2,11
4	103,20	1,39	105,8	1,43	151,40	2,04	202,60	2,73
5	104,20	1,41	127,4	1,72	152,40	2,06	234,70	3,17
6	97,30	1,31	114,5	1,55	163,00	2,20	198,20	2,67
7	140,40	1,89	128,1	1,73	176,30	2,38	211,70	2,86
8	102,50	1,38	130,1	1,76	161,70	2,18	184,90	2,50
9	99,50	1,34	97,2	1,31	187,80	2,53	199,90	2,70
10	92,60	1,25	121,8	1,64	120,20	1,62	217,60	2,94
Ort.	105,89	1,43	114,54	1,55	164,02	2,21	200,01	2,70

Çizelge 4.77. KB2 karışımdan üretilen hafif yapı elemanlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri

KB2	3 gün		7 gün		14 gün		28 gün	
	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)
1	62,10	0,84	88,7	1,20	94,90	1,28	133,10	1,80
2	63,00	0,85	120,5	1,63	74,70	1,01	144,30	1,95
3	74,70	1,01	101,2	1,37	102,80	1,39	119,60	1,61
4	63,10	0,85	81,6	1,10	109,40	1,48	153,00	2,06
5	79,20	1,07	85,2	1,15	123,20	1,66	134,20	1,81
6	86,00	1,16	102	1,38	122,50	1,65	125,50	1,69
7	80,10	1,08	117,3	1,58	125,20	1,69	101,60	1,37
8	67,90	0,92	107,5	1,45	123,30	1,66	152,20	2,05
9	89,50	1,21	100,2	1,35	137,50	1,86	113,60	1,53
10	71,20	0,96	81,7	1,10	117,50	1,59	155,10	2,09
Ort.	73,68	0,99	98,59	1,33	113,10	1,53	133,22	1,80

Çizelge 4.78. ASB karışımından üretilen hafif yapı elemanlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri

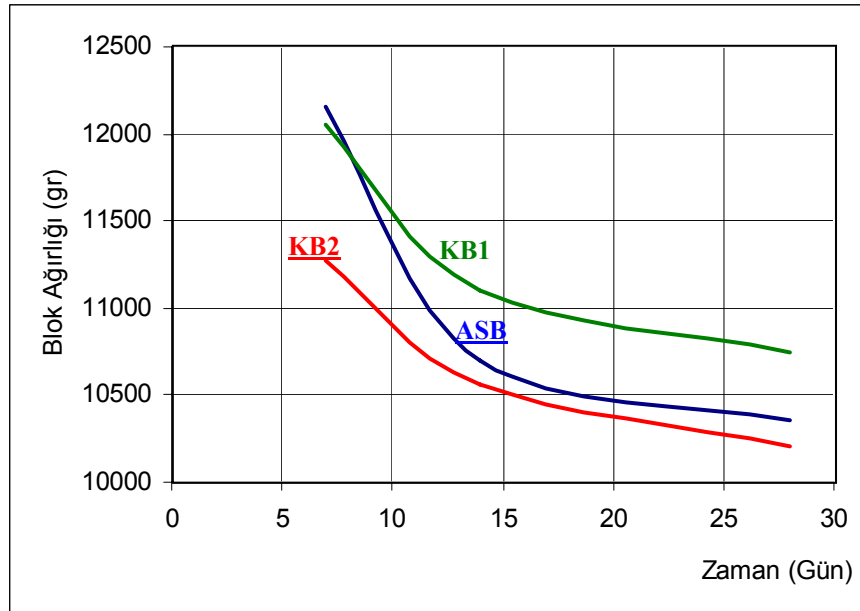
ASB	3 gün		7 gün		14 gün		28 gün	
	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)	K.Yükü (KPa)	Dayanım (MPa)
1	74,00	1,00	137,2	1,85	151,00	2,04	204,80	2,76
2	92,10	1,24	150,8	2,04	149,20	2,01	198,50	2,68
3	108,60	1,47	149,9	2,02	157,40	2,12	157,20	2,12
4	107,10	1,45	97,4	1,31	155,30	2,10	189,70	2,56
5	125,30	1,69	142,4	1,92	128,30	1,73	121,80	1,64
6	103,50	1,40	134,9	1,82	157,10	2,12	184,40	2,49
7	101,50	1,37	122,6	1,65	155,30	2,10	183,90	2,48
8	125,20	1,69	155,5	2,10	174,20	2,35	193,30	2,61
9	103,50	1,40	106,4	1,44	192,00	2,59	158,90	2,14
10	123,00	1,66	154,3	2,08	164,20	2,22	132,80	1,79
Ort.	106,38	1,44	135,14	1,82	158,40	2,14	172,53	2,33

Bimsblokların zamana bağlı (yaş) ağırlık değişimleri (Şekil 4.82) irdelendiğinde, amorf silikanın katkı maddesi olarak 28 gün (doğal kuruma) sonunda blok ağırlıkları üzerinde önemli bir etkisi olmadığı, ancak KB1 grubu (220 kg çimento dozajlı) karışım ürünlerinde blok ağırlıklarının ASB grubu ürünlerine göre % 3,7 oranında arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte KB2 grubu (180 kg çimento dozajlı) karışım ürünlerinde ise ASB grubuna ürünlerine göre blok ağırlıkları yaklaşık % 1,5 oranında azalmıştır. Blok ağırlıklarının stok alanındaki konumlarına da bağlı olarak küçük oranlarda değişim göstermesinin katkı maddesi oranından daha çok stok alanındaki

ısı ve rüzgar alma konumlarına göre değiştiği gözlenmiştir. Bu bağlamda katkı maddesi kullanımının hafif blokların ağırlık değişimi üzerine olumlu veya olumsuz önemli bir etkisi saptanmamıştır.

Çizelge 4.79. KB1 ve KB2 grubuna göre ASB grubu hafif yapı elemanlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük göreceli dayanım değişimleri

Grup	Kür Süresi							
	3 gün		7 gün		14 gün		28 gün	
	Basınç Dayanımı (Mpa)	Göreceli Artış %	Basınç Dayanımı (Mpa)	Göreceli Artış %	Basınç Dayanımı (Mpa)	Göreceli Artış %	Basınç Dayanımı (Mpa)	Göreceli Artış %
ASB	1,43	-	1,55	-	2,21	-	2,70	-
KB1	1,44	-1	1,82	-15	2,14	03	2,33	16
KB2	0,99	44	1,33	17	1,53	44	1,80	50



Şekil 4.82. Kontrol ve amorf silika katkılı bimsblok numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük (yaş) ağırlık değişimleri

Mikronize amorf silika katkısının hafif blok basınç dayanımlarına etkisi, deneysel verilerin analizinden irdelenmiştir (Çizelge 4.79 ve Şekil 4.83). Yapılan değerlendirmeler sonucunda, ikame yöntemine göre ~ % 9 ve ilave yöntemine göre ~ % 11 amorf silika katkılı ASB grubu hafif blok numunelerinin 28 günlük kür süreleri sonunda, KB1 grubu numunelerine (ikame yöntemi) göre % 16 , KB2 grubu numunelerine (ilave yöntemi) göre ise % 50 oranında dayanım artışı sağladığı belirlenmiştir.

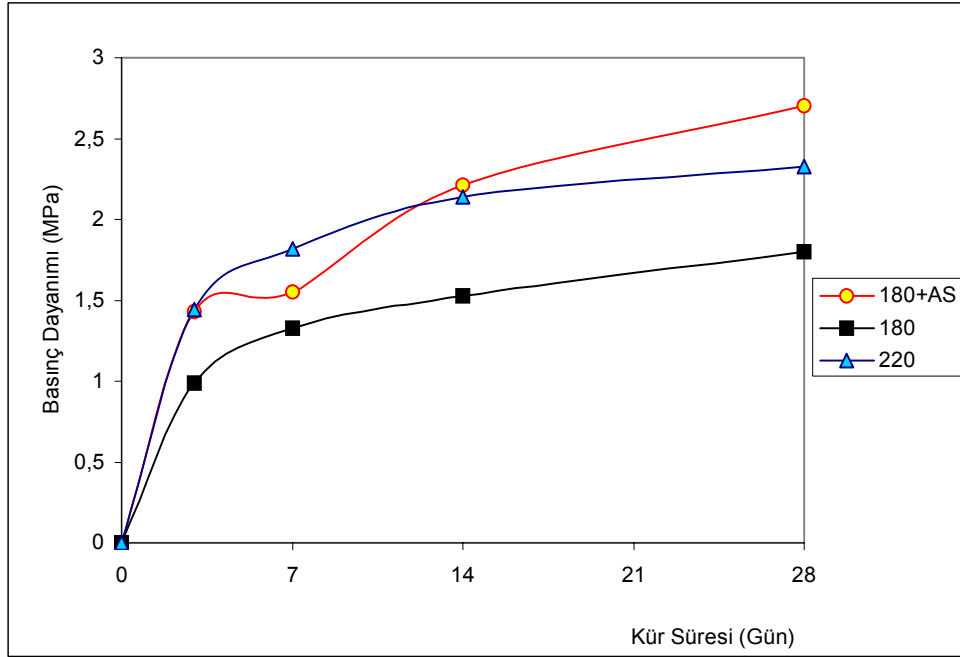
Mikronize amorf silikanın hafif betonda etkinlik faktörünün (k) belirlenebilmesi amacıyla, ASB grubu numunelerin hazırlanması esnasında, karışıma giren mikronize amorf silikanın ağırlıkça miktarının iki katı oranında çimento dozajından eksiltme yapılmış, buna rağmen KB1 numunelerine göre 28 günlük ortalama basınç dayanım değerleri artış göstermiştir. Bu bağlamda pomza agregalı hafif betonda I. lokasyon amorf silikalarının etkinlik faktörü;

$$k_{AS} = (\text{Karışımdan çıkan çimento miktarı}) / (\text{Karışıma ilave edilen A.S. miktarı})$$

$$k_{AS} = 40 \text{ kg} / 20 \text{ kg} = 2$$

olarak belirlenmiştir.

Elde edilen bu deneysel bulgular ve yorumların ışığında, amorf silikanın hafif yapı elemanı üretiminde de mineral katkı malzemesi olarak kullanılabilceği ve bu bağlamda hafif yapı elemanı sektöründe önemli ekonomik avantajlar sağlayabileceği saptanmıştır.



Şekil 4.83. Kontrol ve amorf silika katkılı bimsblok numunelerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanım performansları

4.3.2.2. Amorf Silikanın Hafif Yapı Elemanı Üretiminde Agregada Olarak Kullanımı

Amorf silikanın hafif yapı elemanı üretiminde agregada olarak kullanımının analizi için, TS 2823 normlarına uygun BB-19 ve ÇB-19 ürün kodlu, bir sıra ve üç sıra boşluklu duvar elemanları örnek kalıp formları olarak seçilmiştir. Birebir ve çok sayıda ürün üzerinde analizlerin yorumlanabilmesi amacıyla, deney numuneleri “İsbaş A.Ş. Hafif Yapı Elemanları Fabrikası (Isparta)”nda üretilmiştir. Bu çalışma kapsamında, duvar elemanlarında pomza agregaları ile birlikte alternatif agregada olarak kullanılan amorf silika, II. lokasyondan (İrepedere) temin edilmiştir. Amorf silika kayacı, +4 / -8 mm boyut aralığına sahip agregada taneleri olarak blok elemanlarının üretiminde kullanılmıştır. Birebir boyutta bloklar üzerinde deneysel analizlerin yapılabilmesi amacıyla, Çizelge 4.80’de tanımı verilen karışımlarda duvar elemanları üretilmiştir. Araştırmanın bu aşamasında, amorf silikanın alternatif agregada olarak kullanımının, blokların teknik özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla, deney numunesi olarak üretilen duvar elemanlarının kuru birim ağırlık değerleri, özgül ısı kapasite değerleri (c) ve ısı iletkenlik katsayı değerleri (λ) belirlenmiştir.

Çizelge 4.80. Deneysel analizlerde kullanılan blok elemanlarının tanımı

Numune	Tanım	Boyut (Boy x Yükseklik x Genişlik)
A	BB - 19 Bir Sıra Boşluklu Bimsblok - Katkısız	390 x 185 x 190 mm
B	BB - 19 Bir Sıra Boşluklu Bimsblok - % 37 Amorf Silika Agregalı	390 x 185 x 190 mm
C	BB - 19 Bir Sıra Boşluklu Bimsblok - % 28 Amorf Silika Agregalı	390 x 185 x 190 mm
D	BB - 19 Bir Sıra Boşluklu Bimsblok - % 18 Amorf Silika Agregada Katkılı	390 x 185 x 190 mm
E	ÇB - 19 Üç Sıra Boşluklu Bimsblok - %15 Amorf Silika Agregalı	390 x 185 x 190 mm
F	ÇB - 19 Üç Sıra Boşluklu Bimsblok - Katkısız	390 x 185 x 190 mm

Deney örneklerinin ısısal özelliklerinin analizinde, TS 4048 (Isı Yalıtım Malzemesinin Özgül Isı Tayini) standardına göre, her bir duvar elemanının özgül ısı değerleri (c), kcal / kg^oC biriminde deneysel olarak belirlenmiş olup, bulgular Çizelge 4.81, 4.82, 4.83, 4.84, 4.85 ve Şekil 4.84, 4.85, 4.86, 4.87, 4.88’de grafiksel olarak verilmiştir. Blokların ısı iletkenlik değerleri (λ), ASTM C236-89 standardında

öngörülen “Dengeli sıcak oda metodu ve deney düzeneği” ile analiz edilerek, her bir örneğin ısı iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Deneysel veriler, TS 415 (Isı iletkenliği ve ısı geçirgenlik direncinin yapıda kullanılması için hesap değerlerinin bulunması) standardında öngörülen hesaplama algoritmasına göre değerlendirilerek, örneklerin ısı iletkenlik hesap değerleri (λ_h) belirlenmiştir. Deney ortamının genel görünümü Şekil 4.89’da gösterilmiştir. Deneysel bulgular Çizelge 4.86’den Çizelge 4.91’e kadar ve Şekil 4.90’den Şekil 4.95’e kadar verilmiştir.

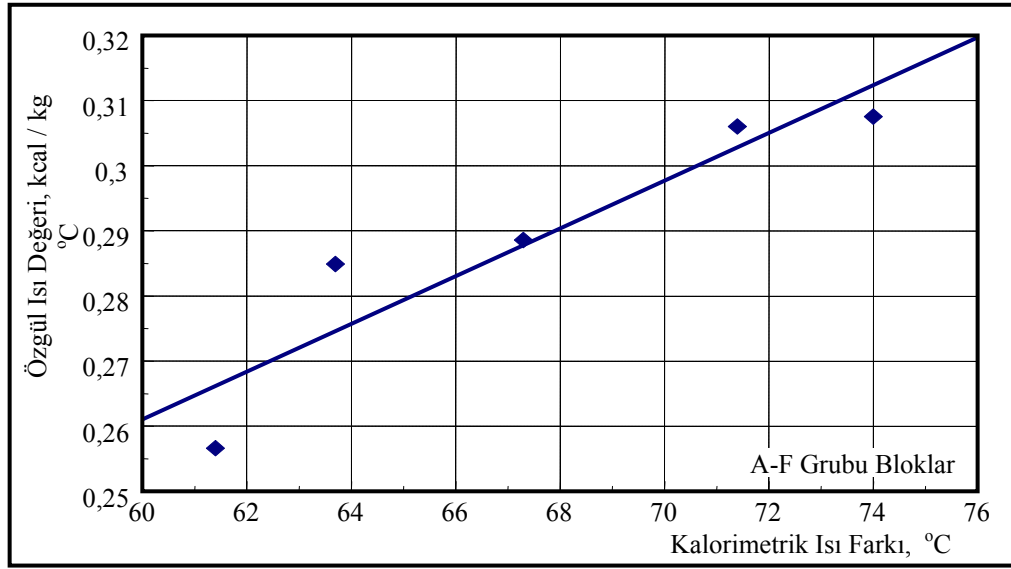
Blok Grubu

A (BB-19 Bir Sıra Boşluklu Bimsblok, Katkısız)

F (ÇB-19 Üç Sıra Boşluklu Bimsblok, Katkısız)

Çizelge 4.81. A ve F blok grubu numune türleri için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları

Numune	Numune Ağırlığı (gr)	Özgül Isı Değeri (c) (kcal/kg °C)	Kalorimetrik Isı Farkı (Δt) (°C)
1	102,722	0,28493	63,7
2	116,691	0,30604	71,4
3	118,838	0,28858	67,3
4	111,696	0,30753	74,0
5	114,484	0,25660	61,4



Şekil 4.84. A ve F grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi

Şekil 4.84'deki grafikten, enterpolasyon yöntemi ile bulunan istatistiksel eşitlik aşağıda verilmiştir:

$$c = 0,03513 + 0,00375 * \Delta t \quad (R^2 = 0,875)$$

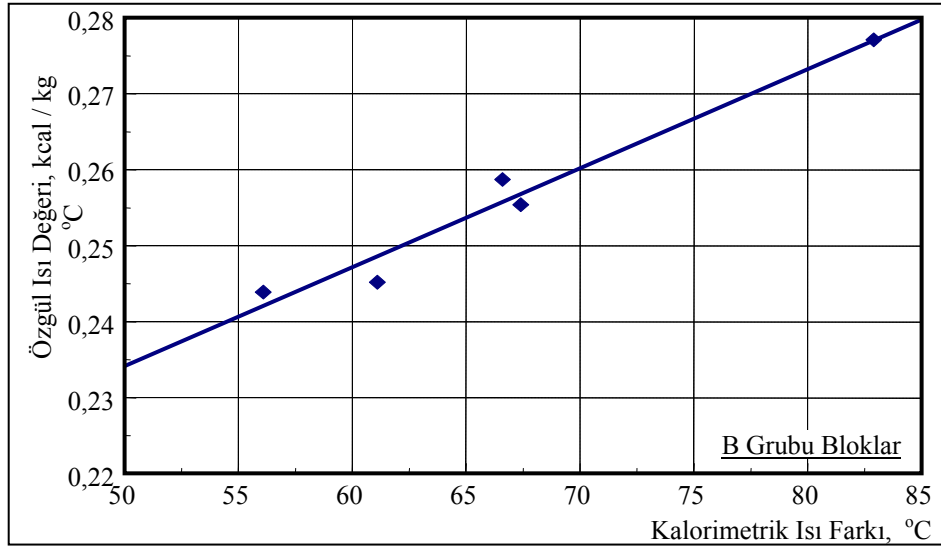
Bu eşitliğe göre, kalorimetrik ısı farkının ortalama 60 °C olduğu değerlerde, Bimsblok grubu numune türleri için özgül ısı değeri “ $c = 0,26013 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}$ ” dir.

Blok Grubu

B (BB-19 Bir Sıra Boşluklu Bimsblok, % 37 amorf silika agrega katkılı)

Çizelge 4.82. B grubu numune türü için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları

Numune	Numune Ağırlığı (gr)	Özgül Isı Değeri (c) kcal/kg°C	Kalorimetrik Isı Farkı(Δt) °C
1	109,985	0,2452	61,1
2	107,510	0,2587	66,6
3	122,257	0,2439	56,1
4	125,385	0,2771	82,9
5	96,312	0,2554	67,4



Şekil 4.85. B grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi

Şekil 4.85'deki grafikten, enterpolasyon yöntemi ile bulunan istatistiksel eşitlik şu şekildedir:

$$c = 0,16885 + 0,0013 * \Delta t \quad (R^2 = 0,965)$$

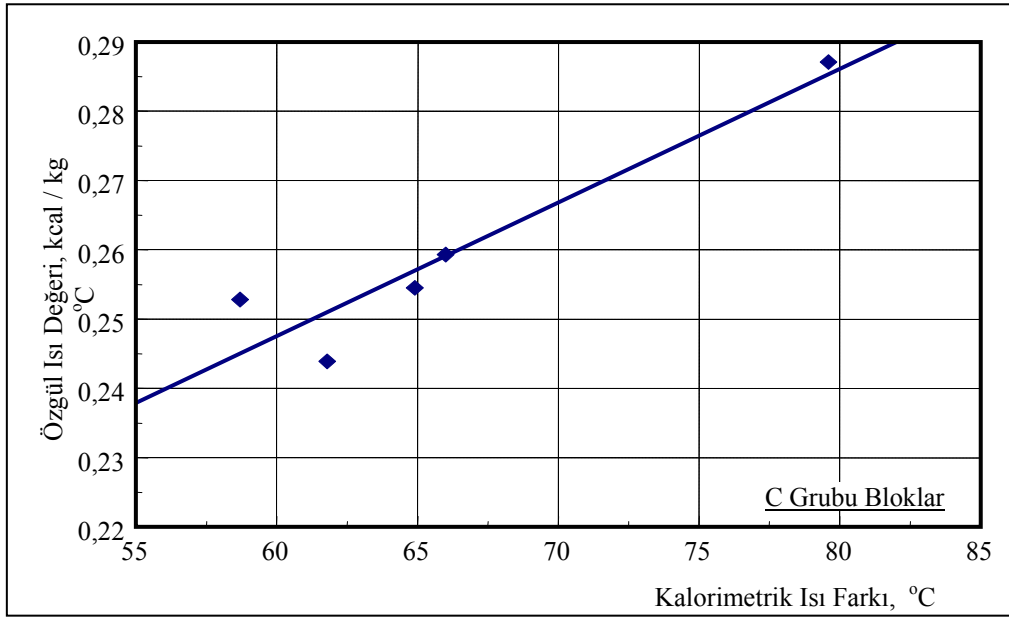
Bu eşitliğe göre, kalorimetrik ısı farkının ortalama 60 °C olduğu değerde, B grubu numune türü için özgül ısı değeri “c = 0,24685 kcal / kg °C” dir.

Blok Grubu

C (BB-19 Bir Sıra Boşluklu Bimsblok, % 28 amorf silika agrega katkılı)

Çizelge 4.83. C grubu numune türü için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları

Numune	Numune Ağırlığı (gr)	Özgül Isı Değeri (c) (kcal /kg °C)	Kalorimetrik Isı Farkı (Δt) (°C)
1	109.3005	0.2439	61.8
2	102.4590	0.2545	64.9
3	112.9530	0.2529	58.7
4	112.2130	0.2871	79.6
5	114.8315	0.2593	66.0



Şekil 4.86. C grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi

Şekil 4.86'deki grafikten, enterpolasyon yöntemi ile bulunan istatistiksel eşitlik şu şekildedir:

$$c = 0,13174 + 0,00193 * \Delta t \quad (R^2 = 0,889)$$

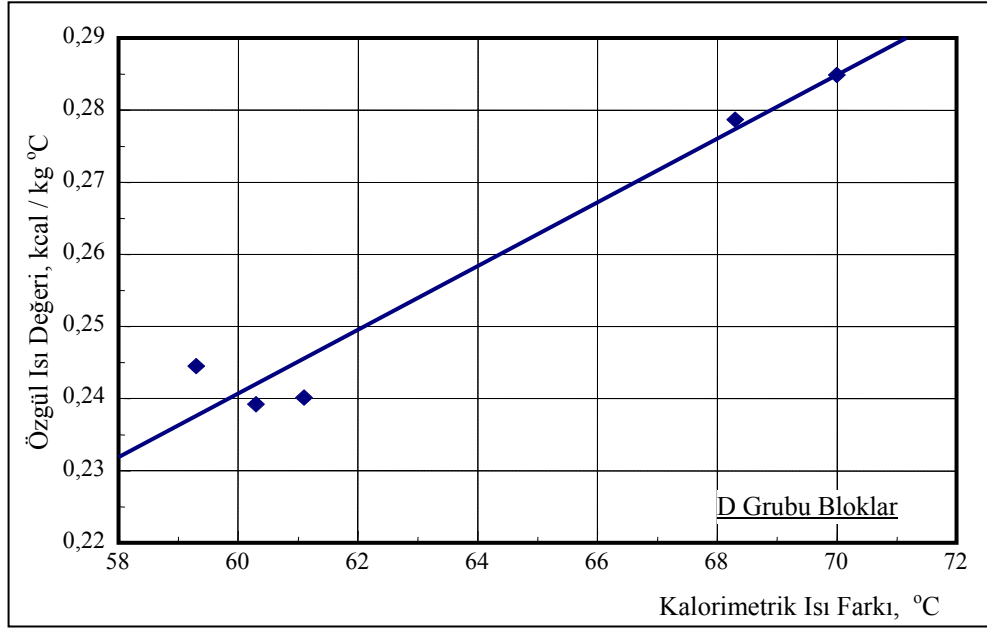
Bu eşitliğe göre, kalorimetrik ısı farkının ortalama 60 °C olduğu değerde, C grubu numune türü için özgül ısı değeri “c = 0.2474 kcal / kg °C” dir.

Blok Grubu

D (BB-19 Bir Sıra Boşluklu Bimsblok, % 18 amorf silika agrega katkılı)

Çizelge 4.84. D grubu numune türü için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları

Numune	Numune Ağırlığı (gr)	Özgül Isı Değeri (c) (kcal/kg°C)	Kalorimetrik Isı Farkı (Δt) (°C)
1	126,655	0,2401	61,1
2	125,447	0,2849	70,0
3	122,301	0,2787	68,3
4	128,673	0,2444	59,3
5	114,338	0,2392	60,3



Şekil 4.87. D grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi

Şekil 4.87'deki grafikten, enterpolasyon yöntemi ile bulunan istatistiksel eşitlik şu şekildedir:

$$c = -0,00434 + 0,00441 * \Delta t \quad (R^2 = 0,957)$$

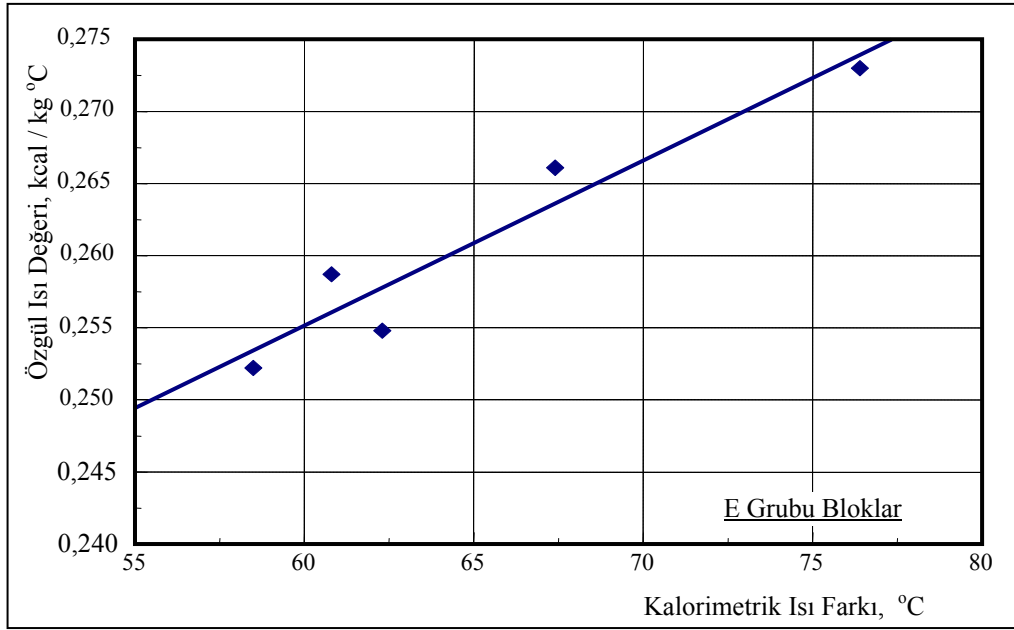
Bu eşitliğe göre, kalorimetrik ısı farkının ortalama 60 °C olduğu değerde, D grubu numune türü için özgül ısı değeri “c = 0,26026 kcal / kg °C” dir.

Blok Grubu

E (ÇB-19 Üç Sıra Boşluklu Bimsblok, % 15 amorf silika agrega katkılı)

Çizelge 4.85. ÇB-19 Amorf silika katkılı numune türü için özgül ısı değeri tayini deneysel bulguları

Numune	Numune Ağırlığı (gr)	Özgül Isı Değeri (c) (Kcal / kg °C)	Kalorimetrik Isı Farkı (Δt) (°C)
1	142,345	0,2587	60,8
2	141,391	0,2661	67,4
3	145,253	0,2522	58,5
4	143,568	0,2730	76,4
5	142,569	0,2548	62,3



Şekil 4.88. E grubu numune türü için özgül ısı değerleri-kalorimetrik ısı farkı ilişkisi

Şekil 4.88'deki grafikten, enterpolasyon yöntemi ile bulunan istatistiksel eşitlik şu şekildedir:

$$c = 0,17125 + 0,0014 * \Delta t \quad (R^2 = 0,988)$$

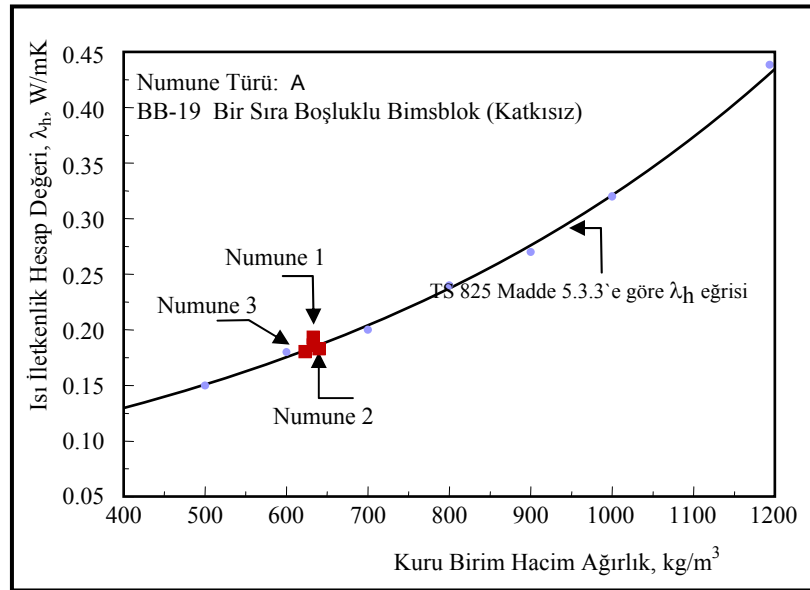
Bu eşitliğe göre, kalorimetrik ısı farkının ortalama 60 °C olduğu değerinde, E grubu numune türü için özgül ısı değeri “c = 0.25525 kcal / kg °C” dir.



Şekil 4.89. Isı iletkenlik test cihazı ile blok örneğinin analizinden görünüm

Çizelge 4.86. A grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

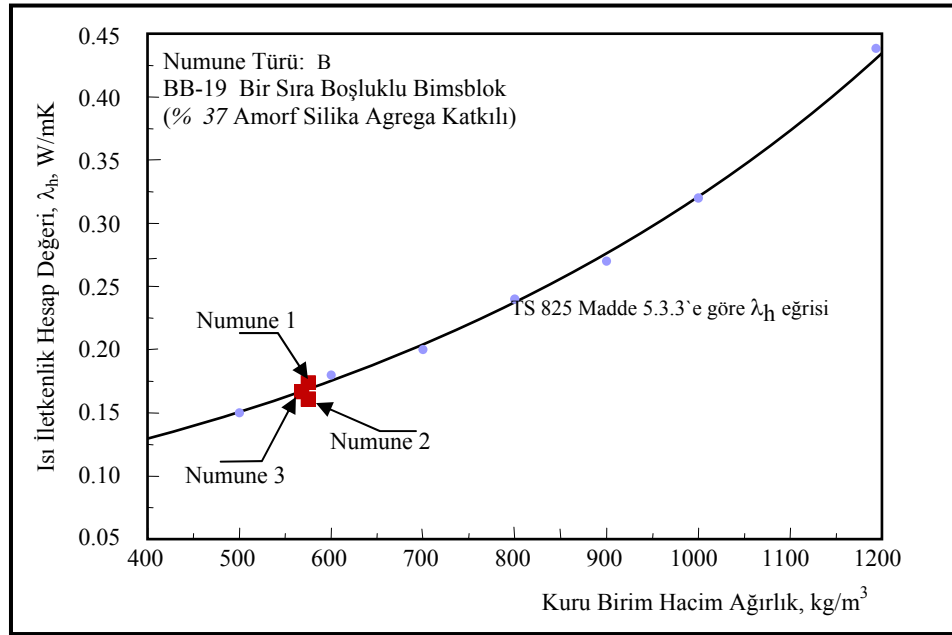
Deney Verileri ve Hesaplamalar	Birim	Numune			ort.
		1	2	3	
Deney Öncesi Numune Ağırlığı	kg	8,487	8,641	8,618	8,582
Deney Sonrası Numune Ağırlığı	kg	8,451	8,637	8,587	8,559
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	kg/m ³	623	633	633	630
Kuru Birim Alan Ağırlığı	kg/m ²	117	120	119	119
Numune Özgül Isı Kapasitesi, (c)	Kcal/kg °C	0,2601	0,2601	0,2601	0,2601
Numune Yüzeyleri Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri	°C	9,5	9,8	10,3	9,9
Sıcak Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _h)	°C	46,0	51,0	48,0	48,3
Soğuk Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _c)	°C	27,0	32,0	30,0	29,7
Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri, (t _h - t _c)	°C	19,0	19,0	18,0	18,7
Numunenin Ağırlıkça Nem Değeri, (ng)	%	0,425	0,043	0,362	0,277
Numunenin Hacimce Nem Değeri, (nv)	%	0,265	0,027	0,229	0,174
Kuru Durumda Numune Isı İletkenlik Değeri, (λ)	kcal/mh°C	0,115	0,119	0,124	0,119
TS 415 Çizelge 1 Sıra 2'ye göre Kuru Durumda Isı İletkenlik Değerine Yapılan Ek (Z)	-	35	35	35	35
Numune Isı İletkenlik Hesap Değeri, (λ _h)	Kcal/mh°C	0,155	0,161	0,167	0,161
	W/mK	0,181	0,187	0,194	0,187
Numune Isı Geçirgenlik Değeri, (Λ)	Kcal/m ² h°C	0,816	0,847	0,879	0,847
	W/m ² K	0,953	0,984	1,021	0,986
Numune Isı Geçirgenlik Direnci, (1/Λ)	m ² h°C/ kcal	1,225	1,181	1,138	1,181
	m ² K/W	1,050	1,016	0,979	1,015
TS 825 Madde 5.3.3.'e göre blok elemanın enterpolasyon yöntemi ile 630 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık için Isı İletkenlik Hesap Değeri λ_h = 0.183 W/mK dir.					



Şekil 4.90. A grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

Çizelge 4.87. B grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

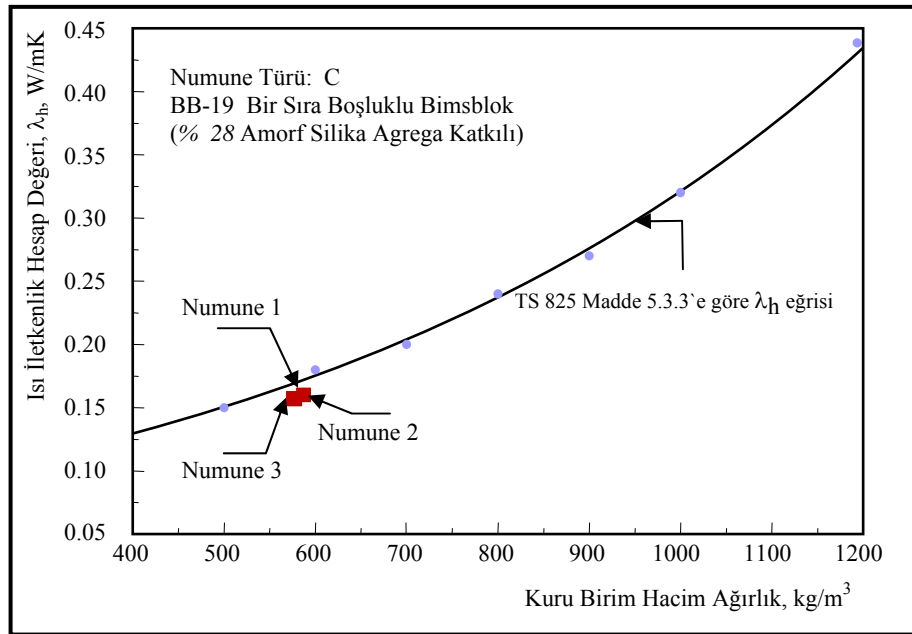
Deney Verileri ve Hesaplamalar	Birim	Numune			ort.
		1	2	3	
Deney Öncesi Numune Ağırlığı	kg	7,815	7,761	7,733	7,770
Deney Sonrası Numune Ağırlığı	kg	7,768	7,759	7,700	7,742
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	kg/m ³	575	575	568	573
Kuru Birim Alan Ağırlığı	kg/m ²	108	108	108	108
Numune Özgül Isı Kapasitesi, (C)	kcal/kg °C	0,2468	0,2468	0,2468	0,2468
Numune Yüzeyleri Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri	°C	9,0	9,0	9,5	9,2
Sıcak Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _h)	°C	50,5	51,0	49,0	50,2
Soğuk Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _c)	°C	32,5	31,0	30,0	31,2
Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri, (t _h - t _c)	°C	18,0	20,0	19,0	19,0
Numunenin Ağırlıkça Nem Değeri, (ng)	%	0,607	0,028	0,431	0,355
Numunenin Hacimce Nem Değeri, (nv)	%	0,350	0,016	0,245	0,204
Kuru Durumda Numune Isı İletkenlik Değeri, (λ)	kcal/mh°C	0,106	0,097	0,100	0,101
TS 415 Çizelge 1 Sıra 2'ye göre Kuru Durumda Isı İletkenlik Değerine Yapılan Ek (Z)	-	35	35	35	35
Numune Isı İletkenlik Hesap Değeri, (λ _h)	kcal/mh°C	0,143	0,131	0,135	0,136
	W/mK	0,166	0,153	0,157	0,159
Numune Isı Geçirgenlik Değeri, (A)	kcal/m ² h°C	0,753	0,689	0,710	0,717
	W/m ² K	0,874	0,805	0,826	0,835
Numune Isı Geçirgenlik Direnci, (1/A)	m ² h°C/ kcal	1,328	1,451	1,408	1,396
	m ² K/W	1,144	1,242	1,211	1,199
TS 825 Madde 5.3.3.'e göre blok elemanın enterpolasyon yöntemi ile 573 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık için Isı İletkenlik Hesap Değeri λ_h = 0.168 W/mK dır.					



Şekil 4.91. B grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

Çizelge 4.88. C grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

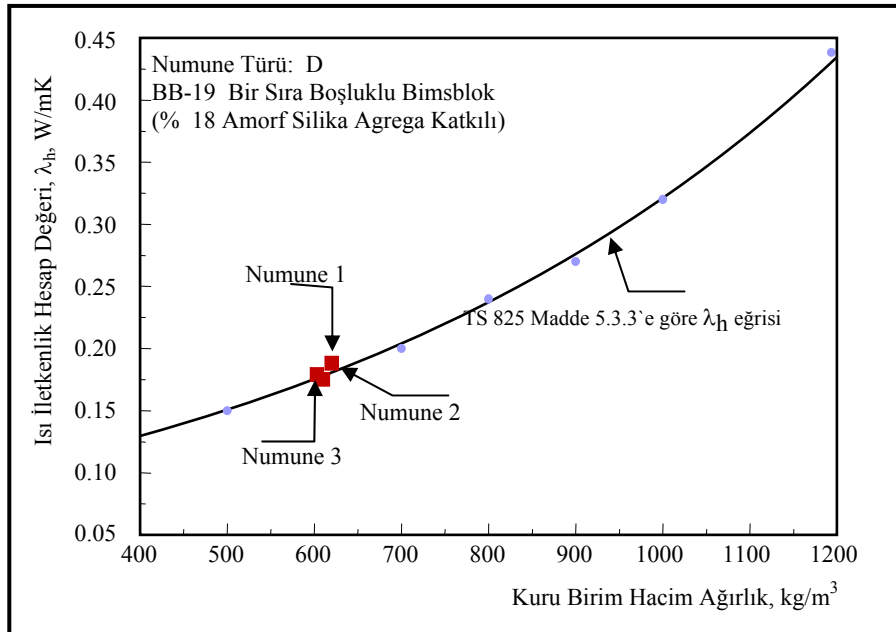
Deney Verileri ve Hesaplamalar	Birim	Numune			ORT.
		1	2	3	
Deney Öncesi Numune Ağırlığı	kg	7,788	7,943	7,757	7,83
Deney Sonrası Numune Ağırlığı	kg	7,742	7,901	7,724	7,79
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	kg/m ³	574	585	575	578
Kuru Birim Alan Ağırlığı	kg/m ²	107	110	107	108
Numune Özgül Isı Kapasitesi, (C)	kcal/kg °C	0,2474	0,2474	0,2474	0,2474
Numune Yüzeyleri Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri	°C	10,0	10,0	10,5	10,2
Sıcak Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _h)	°C	51,0	51,0	51,0	51,0
Soğuk Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _c)	°C	32,0	32,0	32,0	32,0
Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri, (t _h - t _c)	°C	19,0	19,0	19,0	19,0
Numunenin Ağırlıkça Nem Değeri, (ng)	%	0,603	0,524	0,422	0,516
Numunenin Hacimce Nem Değeri, (nv)	%	0,346	0,307	0,243	0,299
Kuru Durumda Numune Isı İletkenlik Değeri, (λ)	kcal/mh°C	0,099	0,102	0,100	0,100
TS 415 Çizelge 1 Sıra 2'ye göre Kuru Durumda Isı İletkenlik Değerine Yapılan Ek (Z)	-	35	35	35	35
Numune Isı İletkenlik Hesap Değeri, (λ _h)	kcal/mh°C	0,135	0,138	0,135	0,136
	W/mK	0,157	0,160	0,157	0,158
Numune Isı Geçirgenlik Değeri, (Λ)	kcal/m ² h°C	0,711	0,726	0,711	0,716
	W/m ² K	0,826	0,842	0,826	0,831
Numune Isı Geçirgenlik Direnci, (1/Λ)	m ² h°C/ kcal	1,406	1,377	1,406	1,396
	m ² K/W	1,211	1,188	1,211	1,203
TS 825 Madde 5.3.3.'e göre blok elemanın interpolasyon yöntemi ile 578 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık için Isı İletkenlik Hesap Değeri λ_h = 0.169 W/mK dir.					



Şekil 4.92. C grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

Çizelge 4.89. D grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

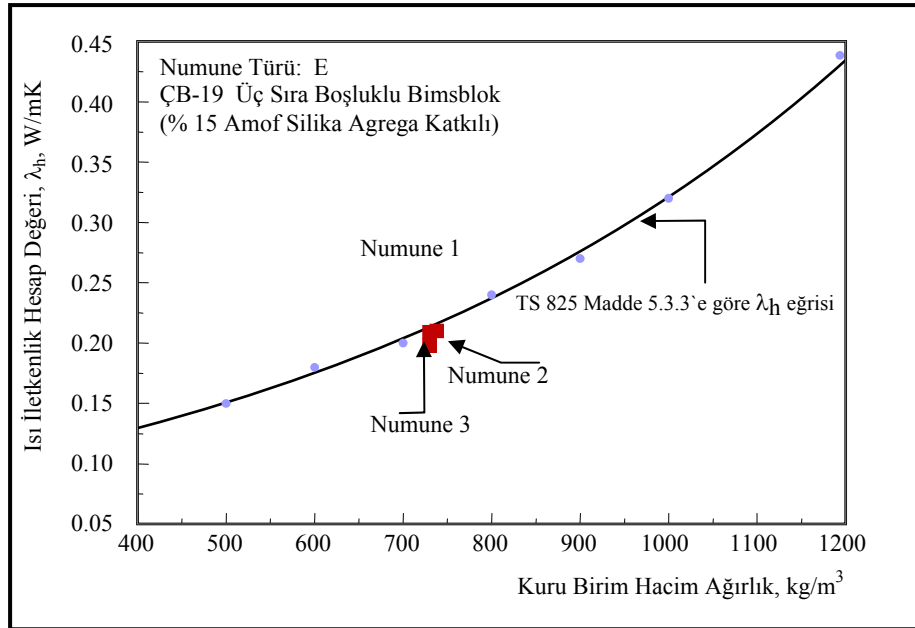
Deney Verileri ve Hesaplamalar	Birim	Numune			ort.
		1	2	3	
Deney Öncesi Numune Ağırlığı	kg	8,310	8,401	8,219	8,310
Deney Sonrası Numune Ağırlığı	kg	8,261	8,361	8,181	8,268
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	kg/m ³	610	620	603	611
Kuru Birim Alan Ağırlığı	kg/m ²	114	116	113	114
Numune Özgül Isı Kapasitesi, (C)	kcal/kg °C	0,2603	0,2603	0,2603	0,2603
Numune Yüzeyleri Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri	°C	9.5	9.3	9.5	9.4
Sıcak Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _h)	°C	51,0	50,0	50,0	50,3
Soğuk Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _c)	°C	32,0	32,0	32,0	32,0
Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri, (t _h - t _c)	°C	19,0	18,0	18,0	18,3
Numunenin Ağırlıkça Nem Değeri, (ng)	%	0,591	0,470	0,464	0,508
Numunenin Hacimce Nem Değeri, (nv)	%	0,360	0,291	0,280	0,310
Kuru Durumda Numune Isı İletkenlik Değeri, (λ)	kcal/mh°C	0,112	0,119	0,114	0,115
TS 415 Çizelge 1 Sıra 2'ye göre Kuru Durumda Isı İletkenlik Değerine Yapılan Ek (Z)	-	35	35	35	35
Numune Isı İletkenlik Hesap Değeri, (λ _h)	kcal/mh°C	0.151	0.161	0.154	0.155
	W/mK	0.175	0.188	0.179	0.180
Numune Isı Geçirgenlik Değeri, (A)	kcal/m ² h°C	0.795	0.847	0.810	0.817
	W/m ² K	0.921	0.989	0.942	0.951
Numune Isı Geçirgenlik Direnci, (1/A)	m ² h°C/ kcal	1.258	1.180	1.235	1.224
	m ² K/W	1.086	1.011	1.062	1.053
TS 825 Madde 5.3.3.'e göre blok elemanın entropolasyon yöntemi ile 611 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık için Isı İletkenlik Hesap Değeri λ_h = 0.178 W/mK dir.					



Şekil 4.93. D grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

Çizelge 4.90. E grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

Deney Verileri ve Hesaplamalar	Birim	Numune			ort.
		1	2	3	
Deney Öncesi Numune Ağırlığı	kg	10,176	10,184	10,068	10,143
Deney Sonrası Numune Ağırlığı	kg	10,112	10,122	10,001	10,078
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	kg/m ³	730	738	730	733
Kuru Birim Alan Ağırlığı	kg/m ²	140	140	140	140
Numune Özgül Isı Kapasitesi, (C)	kcal/kg °C	0,2553	0,2553	0,2553	0,2553
Numune Yüzeyleri Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri	°C	8,0	9,5	9,5	9,0
Sıcak Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _h)	°C	47,0	49,0	51,0	49,0
Soğuk Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _c)	°C	28,0	30,0	31,0	29,7
Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri, (t _h - t _c)	°C	19,0	19,0	20,0	19,3
Numunenin Ağırlıkça Nem Değeri, (ng)	%	0,632	0,616	0,668	0,639
Numunenin Hacimce Nem Değeri, (nv)	%	0,461	0,454	0,488	0,468
Kuru Durumda Numune Isı İletkenlik Değeri, (λ)	kcal/mh°C	0,133	0,134	0,125	0,130
TS 415 Çizelge 1 Sıra 2'ye göre Kuru Durumda Isı İletkenlik Değerine Yapılan Ek (Z)	-	35	35	35	35
Numune Isı İletkenlik Hesap Değeri, (λ _h)	kcal/mh°C	0,180	0,181	0,169	0,176
	W/mK	0,209	0,210	0,198	0,205
Numune Isı Geçirgenlik Değeri, (Λ)	kcal/m ² h°C	0,947	0,953	0,889	0,930
	W/m ² K	1,100	1,105	1,042	1,082
Numune Isı Geçirgenlik Direnci, (1/Λ)	m ² h°C/ kcal	1,056	1,049	1,125	1,077
	m ² K/W	0,909	0,905	0,960	0,925
TS 825 Madde 5.3.3.'e göre blok elemanın enterpolasyon yöntemi ile 733 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık için Isı İletkenlik Hesap Değeri λ_h = 0.213 W/mK dır.					

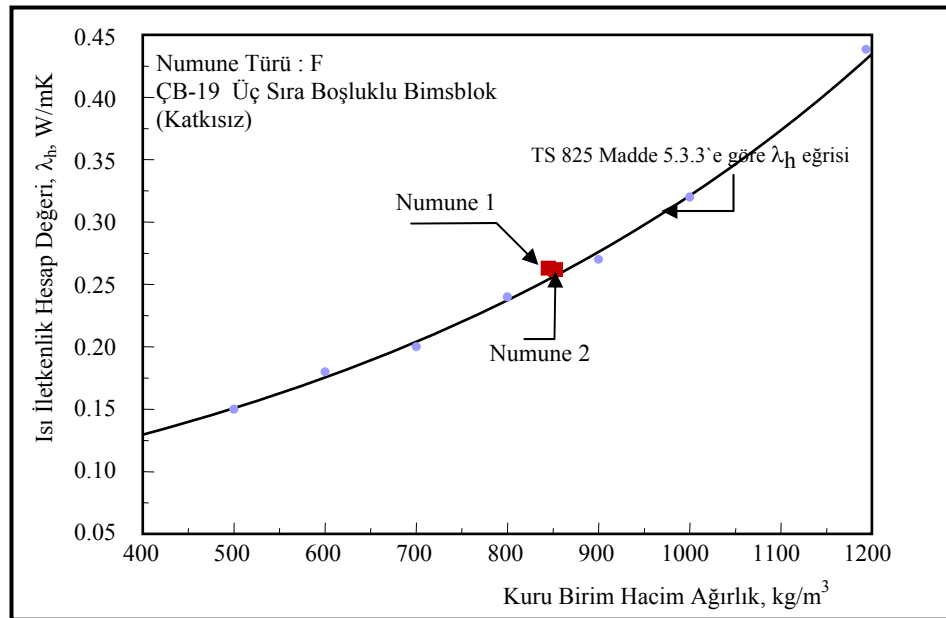


Şekil 4.94. E Grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

Çizelge 4.91. F grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

Deney Verileri ve Hesaplamalar	Birim	Numune		ort.
		1	2	
Deney Öncesi Numune Ağırlığı	kg	11,825	11,735	11,780
Deney Sonrası Numune Ağırlığı	kg	11,765	11,695	11,730
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	kg/m ³	845	853	849
Kuru Birim Alan Ağırlığı	kg/m ²	163	162	163
Numune Özgül Isı Kapasitesi, (C)	kcal/kg °C	0,2601	0,2601	0,2601
Numune Yüzeyleri Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri	°C	9,5	10,25	9,9
Sıcak Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _h)	°C	44,0	46,0	45,0
Soğuk Oda Ortalama Sıcaklığı, (t _c)	°C	26,0	28,0	27,0
Sıcaklık Farkı Ortalama Değeri, (t _h - t _c)	°C	18,0	18,0	18,0
Numunenin Ağırlıkça Nem Değeri, (ng)	%	0,5177	0,3377	0,428
Numunenin Hacimce Nem Değeri, (nv)	%	0,4374	0,2880	0,363
Kuru Durumda Numune Isı İletkenlik Değeri, (λ)	kcal/mh°C	0,168	0,167	0,168
TS 415 Çizelge 1 Sıra 2'ye göre Kuru Durumda Isı İletkenlik Değerine Yapılan Ek (Z)	-	35	35	35
Numune Isı İletkenlik Hesap Değeri, (λ _h)	kcal/mh°C	0,226	0,225	0,226
	W/mK	0,263	0,262	0,263
Numune Isı Geçirgenlik Değeri, (A)	kcal/m ² h°C	1,189	1,184	1,187
	W/m ² K	1,384	1,380	1,382
Numune Isı Geçirgenlik Direnci, (1/A)	m ² h°C/ kcal	0,841	0,845	0,843
	m ² K/W	0,722	0,725	0,724

TS 825 Madde 5.3.3.'e göre blok elemanın enterpolasyon yöntemi ile **849 kg/m³** kuru birim hacim ağırlık için Isı İletkenlik Hesap Değeri **λ_h = 0.255 W/mK** dir.



Şekil 4.95. F grubu numune türü için ısı iletkenlik analiz bulguları

Çizelge 4.92. Bimsblok ürün gruplarının ısı iletkenlik analiz bulguları karşılaştırması

Ürün Grubu ve Tipi	Kuru Birim Hacim Ağırlık	Numune Özgül Isı Kapasitesi, (c)	Kuru Durumda Numune Isı İletkenlik Değeri, (λ)	Numune Isı İletkenlik Hesap Değeri, (λ_h)		TS 825 Madde 5.3.3.'e göre . kg/m ³ K.B.H.A. için olması gereken Isı İletkenlik Hesap Değeri, (λ_h)
				(kcal/mh°C)	(W/mK)	
A	BB 19	630	0.2601	0.119	0.161	0.187
B	BB 19	573	0.2468	0.101	0.136	0.159
C	BB 19	578	0.2474	0.100	0.136	0.158
D	BB 19	611	0.2603	0.115	0.155	0.180
E	ÇB 19	733	0.2553	0.130	0.176	0.205
F	ÇB 19	849	0.2601	0.168	0.226	0.263

Çizelge 4.92 incelendiği zaman, BB-19 tipi bimsblok ürünleri içerisinde λ_h değeri en uygun ürün grubu B ve C' dir. Bu ürün gruplarının λ_h değerleri, TS 825`de belirtilen eş değer birim hacim ağırlık değerlerine karşılık gelen λ_h sınır değerlerinden daha düşüktür.

ÇB 19 tipi Bimsblok ürünleri içerisinde ise, (E grubu) amorf silika agrega katkılı olan ürün, (F grubu) katkısız ürüne göre daha iyi ısı yalıtım değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Katkısız ürün, TS 825`de belirtilen eş değer birim hacim ağırlık değerlerine karşılık gelen λ_h sınır değerlerini çok az aşmakla beraber, amorf silika agrega katkılı ürün, sınır değerinin oldukça altında kalmaktadır. BB 19 normu ve ÇB-19 normu duvar elemanlarında amorf silikanın agrega olarak kullanımının etkisi Çizelge 4.93`de verildiği gibi yorumlamak mümkündür.

Çizelge 4.93. Amorf silika agrega kullanımının blok özelliklerine etkisi

BB-19 Normu Blok Elemanı (Bir Sıra Boşluklu Bimsblok)	Blok Birim Ağırlık Azalması (%)	Blok Isı İletkenliğinde İyileşme (%)
% 37 Amorf Silika Agregata Katkısı	9,05	14,97
% 28 Amorf Silika Agregata Katkısı	8,25	15,51
% 18 Amorf Silika Agregata Katkısı	3,02	3,74
ÇB-19 Normu Blok Elemanı (Üç Sıra Boşluklu Bimsblok)	Blok Birim Ağırlık Azalması (%)	Blok Isı İletkenliğinde İyileşme (%)
% 15 Amorf Silika Agregata Katkısı	13,66	22,05

Günümüzde yapı ve inşaat sektöründe hafiflikleri sebebiyle, farklı tanımlamalar altında doğal / suni yapı malzemeleri ve bileşenleri kullanılmaktadır. Doğal bir yapıya sahip ve değişen atmosferik koşullara oldukça dayanıklı pomza madeni, inşaat sektöründe hammadde olarak farklı kullanım olanakları bulabilmektedir.

Konut ve iş mekanlarında ısı yalıtımı amaçlı konforu sağlamak, optimum koşullarda sıcaklık dengesini kurmak, yapılarda kullanılan malzemenin seçimi ile doğrudan ilgili bir durumdur. Seçilen yapı elemanları hangi türden bir malzeme olursa olsun, ısı yalıtım etkileri ve ısı geçirimsizlik karakteristiği analiz edilerek irdelenmelidir. Yapılarda iç ortam sıcaklığı ve buna bağlı olarak yapı kesitini oluşturan elemanlarla, iç yüzey sıcaklıklarının belirli değerler aralıklarını sağlaması gerekmektedir.

Bir mekanın ısısal etkilerden korunması, mekanı çevreleyen yapı bileşenlerinin ısı depolama niteliğine bağlıdır. Yapı bileşenlerinin ısı depolama yeteneği, ısı geçirgenlik direnci ($1/\Lambda$) ile belirlenmektedir. Bu direnç, kullanılan malzemelerin cinsine, kalınlığına ve ısı iletkenlik katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Yapı malzemelerin ısı iletkenliği değeri ne kadar düşükse, ısısal konfor açısından daha yalıtım kalitesi o kadar yüksektir. Bu nedenle, ısısal yalıtımın istendiği durumlarda, yapı elemanının ısı iletkenlik değeri olabildiğince düşük değerlerde olması arzu edilir. Bu açıdan irdelendiğinde; pomzadan üretilen duvar elemanlarında, amorf silikanın agrega olarak % 28 - % 37 oranlarında hafif beton karışımına katılması, ürünlerin ısı iletkenlik değerini % 14 - % 15,5 oranlarında iyileştirmektedir. Bu durum, amorf silikanın pomzaya göre, agrega olarak daha yüksek ısı yalıtımı sağladığının açık bir göstergesidir. Amorf silikanın bu oranlarda agrega katkısı olarak kullanımı, hafif yapı elemanının birim ağırlıklarını da % 8 – % 9 oranlarında azaltmakta, daha hafif blokların elde edilmesine imkan sağlamaktadır.

Ayrıca, yapı elemanının geometrik formundaki sıra boşluk sayısının artması durumunda (aynı kesit değerindeki bir yapı elemanının bir sıra boşluk yerine, üç sıra boşluk formunda üretilmesi durumu), amorf silikanın agrega katkısı olarak iyileştirme etkisinin daha yüksek oranlarda gerçekleştiği gözlenmiştir. Örneğin, ÇB 19 türü blok formunda, % 15 oranında amorf silika agregası katkısının, blok birim

ağırlığını % 13,66, ısı iletkenlik değerini de % 22,05 oranında iyileştirdiği deneysel olarak belirlenmiştir.

Bu bulgu ve sonuçlara dayanarak, agregada olarak amorf silikanın, hafif yapı elemanı üretiminde alternatif agregada olarak kullanılabilceği belirlenmiştir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Isparta Keçiborlu yöresi amorf silika oluşumlarının jeolojik açıdan oluşum özellikleri, yayılımı, rezerv durumu; madencilik açısından işletilebilirliği, kayaç mühendislik özellikleri ve endüstriyel kullanım olanakları (betonda mineral katkı maddesi ve hafif agrega olarak kullanılabilirliği) araştırılmıştır. Yapılan inceleme ve analiz bulguları yorumlanarak sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Keçiborlu yöresi amorf silika oluşumları, ülkemizde şu ana kadar bilinen ve ekonomiklik arzeden tek amorf silika yatağıdır.
- Asidik karakterde ve kolloidal silika partikülleri içeren hidrotermal çözeltilerin yüzeye ulaşması ile soğuması neticesinde silika partikülleri jel halinde, bindirme zonunun özellikle Kumludere-Değirmenderesi-Asarteppe (I. lokasyon) ve İrepdere (II.lokasyon) mevkilerinde tortulaşması neticesinde Keçiborlu amorf silika yataklarını oluşturmuştur.
- Keçiborlu yöresi I.lokasyon bölgesinde 180.092,6 tonu görünür ve 5.419.300 tonu mümkün rezervli olmak üzere yaklaşık 5.599.392 ton betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılabilir amorf silika ve II. lokasyon bölgesinde 2.181.256 ton mümkün rezervli hafif agrega olarak kullanılabilir amorf silika potansiyeli bulunmaktadır.
- Fiziksel, kimyasal ve diğer teknolojik özellikleri açısından Keçiborlu I. lokasyon kayacı, Yeni Zelanda'da halen işletilen amorf silika yatağındaki kayaç ile karşılaştırıldığında büyük benzerlikler taşımaktadır. Keçiborlu amorf silikasının daha yüksek silisyum dioksit (Keçiborlu: % 90 - Y.Zelanda: % 88) ve çok daha düşük kızdırma kaybı oranı (Keçiborlu: % 0,88 - Y.Zelanda: % 5,1), önemli bir avantajdır.
- Keçiborlu I. lokasyon amorf silika kayacı oldukça kaliteli, doğal puzolan sınıfına dahil edilebilir. Kayacın fiziksel (birim hacim ağırlık, özgül yüzey alanı, puzolanik

aktivite vs.) ve kimyasal (kimyasal bileşenler, kızdırma kaybı, amorf silika içeriği vs.) özellikleri, beton mineral katkı maddesi olarak kullanım amacına uygundur.

- İlave yöntemine göre normal betonda katkı maddesi olarak kullanılan amorf silikanın optimum kullanım oranı, tüm beton sınıfları (C20, C30 ve C40) için çimentonun ağırlıkça % 10'u olarak belirlenmiştir.
- Basit ikame yöntemine göre optimum kullanım oranları ise C20 betonu için çimento oranının ağırlıkça % 6,65'i, C30 betonu için % 7,20'si ve C40 betonu için % 5-7'si oranlarında amorf silika ilavesiyle gerçekleşmiştir.
- Keçiborlu amorf silikasının etkinlik faktörü (k), C20 betonu için 2.43, C30 betonu için 1.52, C40 betonu için 0,36 olarak saptanmıştır. Bu değerler uçucu küllere göre oldukça (0.25 – 0.5) önemli bir avantaj sağlamaktadır.
- Amorf silikanın alkali madde içeriği (% 1,10) alkali silika reaksiyonu açısından ASTM C 1240-03 standardında belirtilen puzolanik katkıların maksimum alkali içeriğine (% 1,5) uygundur.
- Betonda mineral katkı maddesi olarak amorf silika kullanımı, alkali silika reaksiyonuna bağlı jel oluşumundan kaynaklanan genişmeyi % 120'ye ulaşan bir düzeyde azaltmıştır.
- Alkali silika reaksiyonu, bastırmada amorf silikanın (ort. partikül boyutu 18 μ) en optimum kullanım oranı çimentonun ağırlıkça % 10'u oranında gerçekleşmiştir.
- Daha düşük kullanım oranlarında etkinliğin azalması, gözenek solüsyonundaki serbest hidroksit iyonlarını bağlayacak yeterli silika partiküllerinin olmaması, daha yüksek kullanım oranlarındaki etkinlik azalması ise karışımdaki katkı maddesi artışının hamur agrega ara yüzeyindeki bağ yapısını zayıflatması dolayısıyla dayanım (çekme gerilmesi) düşmesine bağlanmıştır.

- Amorf silikanın geleneksel beton aşınma dayanımına etkisini belirlemek için yapılan analizlerde, ilave yöntemine göre en uygun amorf silika kullanım oranı C20 betonu için % 9, C30 betonu için % 10 ve C40 betonu için % 6.5; basit ikame yöntemine göre C20 betonu için % 8, C30 betonu için % 7 ve C40 betonu için % 5.5 olarak saptanmıştır.

- Muhtelif beton sınıflarındaki numunelerin kimyasal maddeler ile etkileşiminde katkı maddesi olarak kullanılan amorf silikanın rolü ise şu şekildedir; Karışıma özellikle ikame yöntemine göre mineral katkı olarak maddesi olarak ilave edilen mikronize amorf silikanın, % 10-15 kullanım oranlarında kimyasal etkenlere karşı betona önemli oranda direnç sağladığı belirlenmiştir. Hazırlanan beton örnekleri üzerinde, kimyasal etkileşimler sonrası yapılan kütle değişimi ölçümlerinde bu olgu çok açık bir şekilde ortaya konulmuştur.

- Amorf silikanın hafif yapı elemanı eldesinde hafif agrega olarak kullanımı analizlerinden elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, I. ve II. lokasyonlara ait amorf silika (0-16 mm / kırılmış) agregaları hem gevşek hem de sıkışık birim hacim ağırlıkları, TS 1114 standardında öngörülen maksimum gevşek birim ağırlığı standardına uygunluk taşıdığı; II. lokasyon kayacının kızdırma kaybının limit değerleri bir miktar aştığı (% 6) ve organik madde içerdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte; I. lokasyon kayacından elde edilen mikronize silikanın hafif yapı elemanı üretiminde etkin bir mineral katkı maddesi olarak ($k = 2$) kullanılabilceği, ayrıca II. lokasyon kayacından elde edilen agrega katkısı ile üretilen blokların ölçümlenen ısı iletkenlik ve birim ağırlık değerlerinin, blok üretiminde önemli avantajlar sağlayacağını ortaya koymuştur.

- Mineral katkı maddesi olarak kullanımda, optimum öğütme tasarımı yapılarak, ürünün özgül yüzey alanını, dolayısıyla betondaki etkinliğini artırmak mümkündür. Bu amaçla kayacın - üretim maliyet analizleri de dikkate alınarak - ekonomik öğütülebilirlik kriterlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ekonomik olarak üretilebilecek optimum partikül tane boyutlarına göre, geleneksel betonda ilave ve

basit ikame yöntemlerine göre amorf silika kullanım oranları ve etkinlik faktörü yeniden belirlenmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Akman S.M. ve Öztekin E., 1995. Düşük Çimento Dozajlı ve Uçucu Kül Katkılı Hazır Betonlarda Dayanım ve Dayanıklılık, Hazırbeton Dergisi, s. 18-23.
- Akman, S.M. ve Yücel, K.T., 1995. Efficiency factors of Turkish class fly ashes, XIth European Ready Mixed Concrete Congress, İstanbul, Turkey.
- Anonim, 2000. Pulverised fuel ash-PFA (Lytag) Technical Report, ESCSI,p-7, USA.
- Anonim1, 2000. A technical report on the leightweight expanded clay aggregates (LECA), ESCSI, p.125, USA.
- Anonim2, 2000. Lightweight aggregates (LWA)-General information-Technical report, ESCSI, p.7, USA.
- Annual Book, 2000. New Zealand's Industrial Mineral Potential, Industrial minerals, No: 394, p.66-77.
- Annual Books of Energy and Minerals, 1999. New Zealand's Official Statistical Agency, New Zealand.
- Asbridge A.H., Walters, G.V. and Jones, T.R., 1994. Ternary blended concretes- OPC/ggbfs/metakaolin. Denmark: Concrete Across Borders, p. 547-557.
- ASTM C 151-00, 2000. Test Method for Auotoclave Expansion of Portland Cement, Annual Book of ASTM Standarts, Vol 04.01.
- ASTM C 236-89, 1989. Test Method for Steady-state Thermal Performance of Building Assemblies by Means of A Guarded Hot Box, Annual Book of ASTM Standarts, Vol 04.06.
- ASTM C 1260-01, 2001. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method) Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.
- ASTM C 441-02a, 2002. Standard Test Method for Effectiveness of Pozzolans or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to The Alkali-Silica Reaction, Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02.
- ASTM C 618-03, 2003. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw Calcined Natural Pozzolan for Use As A Mineral Admixture in Concrete, American Society for Testing and Materials, USA.

- ASTM C 227-03, 2003. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar Bar Method)", Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02.
- ASTM C 1240-03a, 2003. Standart Specification for Use for Silica Fume for Use As A Mineral Admixture in Hydroulic-Cement Concrete, Mortar and Grout, American Society for Testing and Materials, USA.
- Babu, K.G. and Rao, G.S.N., 1993. Efficiency of fly ash in concrete, Cement and Concrete Composites 15, pp 223-229.
- Basheer L., Krapp J. And Cleland J.D., 2001. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A rewiev. Construction and Building Materials (15), p. 93-103.
- Boğaz, R., 1975. Keçiborlu kükürt işletmesi sahasının jeolojisi ve maden etüt raporu Etibank, Ankara (yayınlanmamış)
- BRANZ, 1999 (Building Research Association of New Zealand). Test Reports on Micro silica 600, New Zealand.
- Campbell, K.A., Rodgers, K., Browne, P., 2001. Mineralogic and textural transformations of siliceous sinter: Examples from New Zealand, Edinburg International Conferance, Aucland, New Zealand.
- Capra B. and Bournazel J.P., 1995. Perspective nouvelles pour la prise en comptedes alcali-reactions clans I calcul des structures, Materials and Structures, vol. 28, p. 71-73.
- Carette G.G. and Malhotna V.M., 1982. Preliminary investigations into the use of silica fume in concrete, CANMET Raport 82-6®, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada.
- Davraz, M., 1987. Etibank Keçiborlu kükürt yataklarının değerlendirilmesi, Hacettepe Üniversitesi Bitirme Tezi, Zonguldak.
- Davraz M., Gündüz L., 2003. Isparta yöresi amorf silika kayacının katkı maddesi olarak beton dayanımına etkisi, 3. Ulusal Kırmataş Sempozyumu Kitabı, s. 35-42, İstanbul.
- Diamond S. and Penko M., 1992. Alkali Silica Reaction Processes: The Conversion of Cement Alkalis to Alkali Hydroxide, G. M. Idorn Inter. Symposium, Durability of Concrete ACI SP-131.
- DPT, 2001. Pomza, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı-Madencilik Özel İhtisas Komisyon Raporu, Ankara.
- Eriç, M., 1994. Yapı fiziği ve malzemesi, Literatür yayınları, Ankara.

- Etiholding, 1998-2000. Keçiöorlu diyatomit lokal alanı yıllık işletme faaliyet raporları, Isparta.
- Ferraris F.C., 1995. Alkali-silica reaction and high performance concrete, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- FrohnsdorffG., Cliflon J., Brown P., 1979. TI.istov and Status of Standards Relating to Alkalies in Hydraulic Cements. Special Technical Publication # 663, ASTM 1979, p 16-34.
- Golden Bay Cement, 2002a. Microsilica New Zealand, About amorphous silica, at URL <http://www.microsilica.co.nz/brochures/General.pdf>.
- Golden Bay Cement, 2002b. Microsilica New Zealand, About amorphous silica, at URL <http://www.microsilica.co.nz/brochures/High Strenght Concrete.pdf>.
- Golden Bay Cement, 2002c. Microsilica New Zealand, About amorphous silica, at URL <http://www.microsilica.co.nz/brochures/Chemically Resistant Concrete.pdf>.
- Golden Bay Cement, 2002d. Microsilica New Zealand, About amorphous silica, at URL <http://www.microsilica.co.nz/brochures/Industrial&Commercial Floors.pdf>.
- Gündüz, L. ve Uğur, İ., 1996. Asitlerin mermer karakteristiğine etkisi, Türkiye’de Mermer Dergisi, sayı: 45, 9-16.
- Gündüz, L., 1998. Pomza madenciliğinde sektörel faaliyetler. Pomza Teknolojisi-Cilt I, s. 33-46, Isparta.
- Güneş, N., 1993. Keçiöorlu kükürt yataklarının çevresindeki hidrotermal alterasyon, Akdeniz Ün. Fen Bil. Enst. Yüksek Lisans Tezi (yayınlanmamış), Isparta.
- Gümüş, A., 1988. Jeolojik prospeksiyon ve rezerv hesapları, Maden Jeolojisi, İzmir.
- Helmuth R., 1993. Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research, SHRP Report C-342.
- Hobbs DW.,1988. Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford, London.
- Karaman, M.E., Meriç, E. ve Tansel, İ., 1988. Çünür (Isparta) dolaylarında Kretase-Tersiyer geçiői, A.Ü. Isparta Müh. Fak. Derg., 4, 80-100, Isparta.
- Karaman, M.E., 1990. Isparta güneyinin temel jeolojik özellikleri, Türkiye Jeoloji Bülteni, C.33, 57-67.

- Kocataşkın, M., 1976. Yapı mühendislerine malzeme bilimi, İTÜ Yayını, sayı:1060, İstanbul.
- Kostuck, J.A., Walters, G.V. and Jones, T.R., 2000. High performance concrete incorporating metakaolin-a review, *Concrete*, p.1799-1811.
- Lahn, E., 1940. Keçiborlu T.A.Ş. (Isparta Vilayeti) imtiyaz sahasının jeolojik haritası Hakkında Rapor, M.T.A. Rapor No: 1036, Ankara (Yayınlanmamış).
- Largent R., 1978. High-resetivity metakaolin engineered mineral admixture for use with portland cement-efflorescence, *R. Bull. Lissons Lab. Pont Chausés*, V. 93, pp 63.
- Lo, Y.T. and Cui, H.Z., 2004. Properties of green lightweight aggregate concrete. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, p. 113-118, Beijing.
- Meyers, P., 1999. Behaviour of silica in ion exchange and other systems. *International water conference*, October 18-20, Pittsburg.
- Müller, B., 1937. Keçiborlu kükürtleri hakkında rapor. M.T.A. Rapor No: 602, Ankara (Yayınlanmamış).
- Önem, Y., 1997. Diyatomit, *Sanayi Madenleri*, 278-286, Ankara.
- Pekmezci, B.Y. ve Uyan, M., 2001. Uçucu küllerde etkinlik faktörü kavramı, *Hazır Beton Dergisi*, 65-67.
- Penck, W., 1918. *Tektonische Grundzüge West Anatoliens*.
- Romberg, H., 1964. Keçiborlu müracaat sahasına ait jeolojik rapor. Etibank, Ankara (Yayınlanmamış).
- Sabir, B.B., Wild S. and Bai,J., 2001. Metakaolin and calcined clays as puzzolans for concrete: A review. *Cement & Concrete composites*, 23, p.441-454.
- Sarız, K., 1985. Keçiborlu kükürt yataklarının oluşumu ve yörenin jeolojisi. *Anadolu Üniv. Yayınları*, 91, "Doktora Tezi", Eskişehir.
- Schumann D.C., Carrasquillo R. L. and Farbiarz J., 1988. State of the part report on the Mechanism of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete containing Fly Ash, *Research report p.450-2*, Center for Transportation Research.
- Sezgin, M., 1998. Diyatomitin hafif yapı eldesinde değerlendirilebilirliği, *SDÜ Fen Bilimleri Ens. Yüksek Lisans Tezi*, Isparta.
- Stamatakis M.G., 2002. The influence of biogenic micro-silica-rich rocks on the properties of blended cements, *Cement&Concrete composites*, Elsevier.

- Stanton T. E., 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate proc. of the American Soc. of Civil Eng. Vol. 66, #10, 1940, p. 1781-1811.
- Silver-Baryte Mining Co, 2001. Isparta- Keçiborlu amorf silika numunelerinin XRD analizleri, Kentpo-Epeynas Kai Analiz Lab., Yunanistan.
- TS 25, 1975. Tras standardı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 639, 1975. Uçucu küller-çimentoda kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 415, 1977. Isı iletkenliği ve ısı geçirgenlik direncinin yapıda kullanılması için hesap değerlerinin bulunması (Plaka metodu ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2511, 1977. Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2517, 1977. Alkali agrega reaktivitesinin kimyasal yolla tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2871, 1977. Taze beton kıvam deneyi (çökme hunisi metodu ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3068, 1978. Laboratuarda beton deney numunelerinin hazırlanması ve bakımı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3234, 1978. Bimsbeton yapım kuralları, Karışım hesabı ve deney metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 707, 1980. Beton agregalarından numune alma ve deney numunesinin hazırlanması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3526, 1980. Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3527, 1980. Beton agregalarında ince madde oranı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3529, 1980. Beton agregalarının birim ağırlıklarının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3673, 1982. Beton agregalarında organik kökenli madde tayini deney metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 4048, 1984. Isı yalıtım malzemesinin özgül ısı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS 802, 1985. Beton karışım hesapları esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1114, 1986. Hafif agregalar-Beton için, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2823, 1986. Bimsbetondan mamül yapı elemanları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 699, 1987. Tabii yapı taşları muayene ve deney metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3114, 1990. Beton basınç mukavemeti tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1226, 1996. Deney elekleri-teknik özellikler ve deneyler-kısım 2: Delikli metal levhalı deney elekleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1227, 1996. Deney elekleri-teknik özellikler ve deneyler-kısım 1: Tel örgülü deney elekleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450, 1998. Uçucu kül ve betonda kullanılan tarifler- özellikler ve kalite kontrol, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 825, 1998. Binalarda ısı yalıtım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3114 ISO 4012, 1998. Beton deney numunelerinin basınç dayanımı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3530, 1999. Beton Agregalarının Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 11222, 2001. Beton- hazır beton-sınıflandırma, özellikler, performans, üretim ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2002. Genel çimentolar bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- Yalçınkaya, S., Avşar, Ö.P. ve Taner, K., 1986. Batı torosların jeoloji raporu. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Yalçınkaya, S., 1989. Isparta-Ağlasun dolayının jeolojisi, İstanbul Üniv. Fen Bil. Enst. Doktora Tezi, (yayınlanmamış), İstanbul.
- Yeğinobalı, A., 2001. Silis dumanı ve çimento kullanımı, TÇMB AR-GE Y:01.01, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Metin Davraz

Doğum Yeri : Isparta

Doğum Yılı : 1966

Medeni Hali : Evli

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise :1980-1983 Şehit Ali İhsan Kalmaz Lisesi (Isparta)

Lisans :1983-1988 Hacettepe Üniversitesi Zonguldak Mühendislik Mimarlık
Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans :1996-1998 Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Yabancı Dil : İngilizce

İş Deneyimi:

1988-1989 Göltaş A.Ş. Göldağ Ltd. Şti. Kömür İşletmesi -Ocak Mühendisi (Denizli)

1991-1992 Akse Kömür İşletmesi - Ocak Mühendisi (Uşak)

1992-1994 Isparta Belediyesi Yol Yapım ve Asfaltlama Müdürlüğü - Mühendis

1994-1999 Isparta Belediyesi- Isbaş A.Ş. - Fenni Nezaretçi - Ocak Mühendisi

1999-2004 Isparta Belediyesi- Isbaş A.Ş. - Ar-Ge Birim Sorumlusu

2004- Isparta Belediyesi- Isbaş A.Ş. – Teknik Genel Müdür Yardımcısı