

**ERZİNCAN VE NEVŞEHİR YÖRESİ POMZALARININ ÇİMENTOLU
SİSTEMLERDE KULLANILABİLİRLİĞİ**

Hayati ULUSU

**DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2006
ANKARA**

Hayati ULUSU tarafından hazırlanan ERZİNCAN VE NEVŞEHİR YÖRESİ
POMZALARININ ÇİMENTOLU SİSTEMLERDE KULLANILABİLİRLİĞİ adlı
bu tezin doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Hayati ULUSU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2006

Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ
Tez Yöneticisi

ÖZET

Bu çalışma, jürimiz tarafından Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi
olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa TOKYAY

Üye : Prof. Dr. Metin ARSLAN

Üye : Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

Üye : Doç. Dr. Atilla DORUM

Üye : Yrd. Doç. Dr. İ. Özgür YAMAN

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına
uygundur.

**ERZİNCAN VE NEVŞEHİR YÖRESİ POMZALARININ ÇİMENTOLU
SİSTEMLERDE KULLANILABİLİRLİĞİ
(Doktora Tezi)**

Hayati ULUSU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mart 2006**

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye’de geniş rezervleri bulunan pomzanın çimento üretiminde puzolanik katkı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Katkılı çimento üretimine başlanmadan önce Erzincan ve Nevşehir yörelerinden temin edilen pomzaların kimyasal kompozisyonları, fiziksel özellikleri, mineralojik özellikleri, mikro yapıları ve puzolanik aktiviteleri belirlenmiştir.

Erzincan ve Nevşehir yöresi pomzalarının klinker ile birlikte öğütülmesiyle pomza katkılı çimentolar (PKÇ) ve PÇ 42,5 kontrol çimentosunun bir kısmıyla ikame edilmesi (ağırlıkça) ile de pomza ikameli çimentolar (POİÇ) elde edilmiştir. PKÇ’lerde pomza miktarı %10, 20, 25, 30 ve 40 olarak değişirken, alçı taşı %5 olarak alınmıştır. Böylece her bir pomza türünden beş farklı katkılı ve beş farklı ikameli çimento üretilmiştir.

Çimento içerisinde pomza kullanılmasının çimentonun kimyasal bileşimine, özgül ağırlığına, inceliğine, normal kıvamına, priz sürelerine, hacim genişlemesine, otoklav genişlemesine ve bu çimentolarla üretilen harçların su ihtiyacına, rötresine, sülfat genişlemesine, eğilme ve basınç

dayanımına olan etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar kontrol çimentoları PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5'tan (Portland Kompoze Çimento) ve bu çimentolarla üretilen harçlardan elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.

PKÇ'ler ve POİÇ'lerin kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri TS EN 197-1'de verilen sınır değerler içerisinde. Bu çimentolar kontrol çimentolarına göre 7 ve 28 günde eğilme ve basınç dayanımında düşüşlere neden olmakla birlikte, ilerleyen yaşlarda onlara çok yakın yada onlardan daha yüksek değerler vermişlerdir. Ayrıca PKÇ'lerin kullanıldığı harçların rötre ve sülfat genleşme değerlerinde de önemli düşüşler gözlenmiştir.

Sonuç olarak araştırma, Erzincan ve Nevşehir yöresi pomzalarının çimento üretiminde çimento ağırlığının maksimum %20'si oranında puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Bilim Kodu : 714.1.143

Anahtar Kelimeler : Pomza, katkılı çimento, puzolan, harç

Sayfa adedi : 158

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

**USABILITY OF ERZINCAN AND NEVSEHIR REGIONS PUMICES IN
CEMENTITIOUS SYSTEMS**

(PhD. Thesis)

Hayati ULUSU

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

March 2006

ABSTRACT

In this study, usability of pumice which Turkey is known to have large deposits, as an pozzolanic admixture in the cement production was investigated. Before the production of blended cements chemical compositions, physical properties, mineralogical properties, micro structures and pozzolanic activity of pumices supplied from Erzincan and Nevşehir regions were determined.

In blended cements, while pumice were changed 10, 20, 25, 30 and 40 % (by weight of cement), gypsum was fixed at 5 %. Thus, five different types of pumice added cements (PKÇ) and five different types of pumice replaced cement (POİÇ) were obtained for each pumice type.

Effects of use of pumice in the cement to chemical composition, specific weight, fineness, normal consistency, setting times, soundness, autoclave expansion of cement and water requirement, drying shrinkage, sulfate expansion, flexural and compressive strength of mortars produced with these cements were investigated by experimentally. Results, taken from these tests, were compared with

the results taken from control cements PC 42,5, PKC 32,5 and mortars produced by using these cements.

Chemical compositions and physical properties of PKÇ and POİÇ are convenient to TS EN 197-1. These blended cements caused to decrease in flexural and compressive strengths with respect to control cements at early ages (7-28 days), but later ages (90-360 days) gave closer values to control cements or higher values than control cements. Besides, important decreases were observed in the drying shrinkage and sulfate expansion values of mortars produced with PKÇ.

As a result, investigation showed that, Erzincan and Nevşehir pumices could be used in the production of blended cement up to 20 % of cement weight as a pozzolanic additive material.

Science Code : 714.1.143

Key Words : Pumice, blended cement, pozzolan, mortar

Page Number : 158

Adviser : Assoc. Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a, değerli katkıları ile çalışmalarımı teşvik eden ve yönlendiren Sayın Prof. Dr. Mustafa TOKYAY ve Doç. Dr. Atila DORUM'a, deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen, Yapı Eğitimi Bölümü Araştırma Görevlileri Sayın Serkan SUBAŞI, Kürşat YILDIZ, Murat ÇAVUŞ, Gökhan DURMUŞ, Mustafa DAYI ve Uzman Dr. Mustafa ÖZER'e, pomzaların temin edilmesine katkıda bulunan Üçler Madencilik'e, çalışmada kullanılan çeşitli malzemelerin sağlanmasına ve deneylerin yapılmasına katkıda bulunan Set Ankara Çimento Fabrikası yetkilileri ve laboratuvar çalışanlarına, SEM resimleri için Öğr. Gör. Dr. Bülent BOSTAN'a, XRD'ler için Jeoloji Yüksek Mühendisi Dr. Mustafa ALBAYRAK'a, teşvik ve desteklerinden dolayı Yapı Eğitimi Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Metin ARSLAN ve Yapı Eğitimi Bölümünün değerli öğretim üyelerine ve diğer çalışanlarına, akademik çalışmalarım süresince desteğini hiç esirgemeyen Erzincan M.Y.O. Müdürü Sayın Prof. Dr. Şakir BAYINDIR'a, ayrıca meslek hayatım boyunca her türlü desteğini esirgemeyen değerli eşime, çocuklarıma ve aileme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Portland Çimentoları.....	7
2.2. Çimento Hidratasyonu	10
2.2.1. C_3S ve C_2S 'in hidratasyonu	13
2.2.2. C_3A ve C_4AF 'nin hidratasyonu	16
2.2.3. Hidrate olmuş çimento pastasının bileşimi	17
2.3. Puzolanlar	18
2.4. Puzolanların Sınıflandırılması.....	20
2.5. Puzolanik Aktivite ve Puzolanik Reaksiyon	26
2.5.1. Puzolanik reaksiyon ürünleri.....	29
2.6. Puzolan İçeren Çimentolar	31
2.7. Puzolan İçeren Çimentoların Hidratasyonu	33

Sayfa

2.7.1. Puzolan içeren çimento pastaları içerisinde oluşan bileşikler.....	35
2.7.2. Puzolan içeren çimentoların reaksiyon mekanizmaları	39
2.8. Puzolan İçeren Harçlar	41
2.8.1. Mikro yapıları	41
2.8.2. Mekanik özellikleri	41
2.9. Pomza	43
2.9.1. Pomzanın tarihi.....	45
2.9.2. Dünya pomza yatakları	46
2.9.3. Türkiye pomza rezervi	47
2.9.4. Pomzanın kullanım alanları	49
2.10. Pomzanın Çimento ve Beton Üretiminde Kullanımına Yönelik Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	52
3. MATERYAL VE METOT	56
3.1. Materyal.....	56
3.1.1. Çimento	56
3.1.2. Klinker	56
3.1.3. Kireç	56
3.1.4. Standart kum	56
3.1.5. Pomza	59
3.1.6. Karışım suyu.....	59
3.2. Metot	60
3.2.1. Pomza deneyleri.....	62
3.2.2. Çimentoların üretilmesi	66

Sayfa

3.2.3. Çimento deneyleri.....	68
3.2.4. Harç deneyleri	71
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	78
4.1. Pomzaların Özellikleri.....	78
4.2. Pomzaların Standart Kıvam Suyuna Etkileri.....	82
4.3. Pomzaların Priz Sürelerine Etkileri	95
4.4. Pomzaların Hacim Genleşmesine Etkileri	99
4.5. Pomzaların Özgül Ağırlığa Etkileri.....	100
4.6. Pomzaların Çimentoların Kimyasal Kompozisyonları Üzerindeki Etkileri.....	101
4.7. Pomzaların Harçların Su İhtiyacına Etkileri	101
4.8. Pomzaların Çimento Dayanımlarına Etkisi	105
4.8.1. Eğilmede çekme dayanımı	105
4.8.2. Basınç dayanımı	115
4.9. Rötire	125
4.10. Sülfat Genleşmesi.....	133
4.11. Otoklav Genleşme Deneyi	134
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	136
5.1. Sonuçlar	136
5.1.1. Puzolanik aktivite	136
5.1.2. Standart kıvam suyu ihtiyacı	137
5.1.3. Priz süreleri.....	137
5.1.4. Hacim genleşmesi	137

	Sayfa
5.1.5. Özgöl ağırlık	137
5.1.6. Kimyasal kompozisyon	138
5.1.7. Otoklav genleşmesi	138
5.1.8. Harçların su ihtiyacı	138
5.1.9. Eğilmede çekme dayanımı	139
5.1.10. Basınç dayanımı.....	139
5.1.11. Rötire	139
5.1.12. Sülfat genleşmesi.....	139
5.2. Öneriler	140
KAYNAKLAR.....	142
EKLER.....	152
EK-1. EPKÇ ve NPKÇ'lerin 40 Mikronluk Elekten Geçen ve Kalan Kısımlarına Ait Kimyasal Analiz Sonuçları.....	153
EK-2. PKÇ ve POİÇ'lere Ait Eğilmede Çekme Dayanımı Grafikleri.....	154
EK-3. PKÇ ve POİÇ'lere Ait Basınç Dayanımı Grafikleri.....	156
ÖZGEÇMİŞ.....	158

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Portland çimentosunun tipik kimyasal analizi ve anabileşen miktarları	10
Çizelge 2.2. Kalsiyum silikatların hidratasyonu	15
Çizelge 2.3. Alüminatların hidratasyonu	18
Çizelge 2.4. Hidrate olmuş Portland çimentosu pastasının bileşimi	19
Çizelge 2.5. Çimento ve beton endüstrisinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan silisli atıkların sınıflandırılması	25
Çizelge 2.6. Dünya pomza rezerv dağılımı	48
Çizelge 2.7. Türkiye pomza yataklarının rezerv miktarları ve kategorileri ...	49
Çizelge 2.8. İllere göre işletme ruhsatı dağılımı	50
Çizelge 3.1. PÇ 42,5 R'nin kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	57
Çizelge 3.2. PKÇ/B 32,5 R'nin kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	58
Çizelge 3.3. Klinkerin kimyasal kompozisyonu.....	59
Çizelge 3.4. Karışım suyunun bazı özellikleri	60
Çizelge 4.1. Pomzaların kimyasal bileşimleri ve bazı fiziksel özellikleri	80
Çizelge 4.2. Puzolanik aktivite deneyi sonuçları	80
Çizelge 4.3. Pomzaların puzolanik aktivite indisi deney sonuçları	81
Çizelge 4.4. PKÇ ve POİÇ'lerin standart kıvam suyu miktarları	83
Çizelge 4.5. EPKÇ'lerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	91
Çizelge 4.6. NPKÇ'lerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	92
Çizelge 4.7. POİÇ'lerin priz süreleri ve hacim genleşme değerleri.....	98

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.8. PKÇ'ler, POİÇ'ler, PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 ile üretilen harçların su ihtiyaçları	103
Çizelge 4.9. Katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	106
Çizelge 4.10. İkameli numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.....	107
Çizelge 4.11. Katkılı numunelerin eğilme dayanımı değerlerine göre katkı yüzdelerinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi.....	109
Çizelge 4.12. İkameli numunelerin eğilme dayanımı değerlerine göre katkı yüzdelerinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi.....	110
Çizelge 4.13. Katkılı numunelerde eğilme dayanımı değerlerine ait SNK çoklu karşılaştırma testi sonuçları.....	111
Çizelge 4.14. İkameli numunelerde eğilme dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma SNK testi sonuçları.....	113
Çizelge 4.15. Katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanım değerleri.....	114
Çizelge 4.16. Katkılı numunelerin basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	116
Çizelge 4.17. İkameli numunelerin basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler	117
Çizelge 4.18. Katkılı numunelerin basınç dayanımı değerlerine göre katkı yüzdelerinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi.....	119
Çizelge 4.19. İkameli numunelerin basınç dayanımı değerlerine göre katkı yüzdelerinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi.....	120
Çizelge 4.20. Katkılı numunelerde basınç dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma SNK testi sonuçları.....	121
Çizelge 4.21. İkameli numunelerde basınç dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma SNK testi sonuçları.....	123
Çizelge 4.22. Katkılı numunelerin basınç dayanımı değerleri (ASTM)	124
Çizelge 4.23. TS 3322'ye göre hazırlanan numuneler ait rötire değerleri.....	125

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.24. ASTM C 596'ya göre hazırlanan numuneler ait rötre değerleri	126
Çizelge 4.25. PKÇ'lere ait sülfat genleşme değerleri	133
Çizelge 4.26. Otoklav genleşme deneyi sonuçları	135

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çimento hamurundaki hidrate yapı gelişimi	14
Şekil 2.2. Puzolanların sınıflandırılması	22
Şekil 4.1. Erzincan ve Nevşehir pomzalarının Lazer Kırınım Cihazıyla belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrileri	81
Şekil 4.2. Nevşehir pomzası X-Işınları difraktogramı	84
Şekil 4.3. Erzincan pomzası X-Işınları difraktogramı.....	85
Şekil 4.4. PKÇ ve POİÇ'lerde standart kıvam için gerekli su miktarı- pomza miktarı ilişkisi	90
Şekil 4.5. PKÇ'lerde pomza miktarı-incelik (ölgül yüzey alan) ilişkisi	93
Şekil 4.6. PKÇ'lerde standart kıvam suyu-incelik ilişkisi.....	94
Şekil 4.7. PKÇ'lerde standart kıvam suyu-priz süresi ilişkisi	96
Şekil 4.8. PKÇ'lerde priz süresi-pomza miktarı ilişkisi	96
Şekil 4.9. PKÇ'lerde incelik-priz süresi ilişkisi	98
Şekil 4.10. POİÇ'lerin priz süresi-pomza miktarı ilişkisi.....	99
Şekil 4.11. POİÇ'lerin priz süresi-standart kıvam suyu ilişkisi	100
Şekil 4.12. PKÇ'lerde ölgül ağırlık-pomza miktarı ilişkisi.....	101
Şekil 4.13. PKÇ ve POİÇ'lerle üretilen harçlarda %110 akma için standart kıvam suyu-pomza miktarı ilişkisi	104
Şekil 4.14. PKÇ'ler ve PKÇH'larda incelik-standart kıvam suyu ilişkisi	104
Şekil 4.15. PKÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı-pomza katkı oranı ilişkisi.....	108
Şekil 4.16. POİÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı-pomza katkı oranı ilişkisi.....	108
Şekil 4.17. PKÇ'lere ait basınç dayanımı-pomza katkı oranı ilişkisi	118

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. POİÇ'lere ait basınç dayanımı–pomza katkı oranı ilişkisi	118
Şekil 4.19. PKÇ'lere ait rötre – numune yaşı ilişkisi (TS 3322)	126
Şekil 4.20. PKÇ'lere ait rötre – numune yaşı ilişkisi (ASTM C 596)	127
Şekil 4.21. PKÇ'lere ait sülfat genleşmesi – numune yaşı ilişkisi	134

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Nevşehir pomzasının mikro yapısı-1	86
Resim 4.2. Nevşehir pomzasının mikro yapısı-2.....	86
Resim 4.3. Nevşehir pomzasının mikro yapısı-3.....	87
Resim 4.4. Nevşehir pomzasının mikro yapısı-4.....	87
Resim 4.5. Erzincan pomzasının mikro yapısı-1	88
Resim 4.6. Erzincan pomzasının mikro yapısı-2	88
Resim 4.7. Erzincan pomzasının mikro yapısı-3	89
Resim 4.8. Erzincan pomzasının mikro yapısı-4	89
Resim 4.9. PÇ'nin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri	128
Resim 4.10. EPKÇ 10'nun 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri	129
Resim 4.11. EPKÇ 20'nin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri.....	130
Resim 4.12. NPKÇ 10'nun 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri	131
Resim 4.13. NPKÇ 20'nin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri	132

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

p	Anlamlılık düzeyi
F	F testi için değer
μ	Mikron

Kısaltmalar

Açıklama

PÇ	Portland çimentosu
PKÇ	Pomza katkılı çimento
POİÇ	Pomza ikameli çimento
TS	Türk Standartları
EN	Europeane Norm
M.T.A.	Maden Tetkik Arama
C₃S	Trikalsiyum silikat
C₂S	Dikalsiyum silikat
C₃A	Trikalsiyum alüminat
C₄AF	Tetrakalsiyum alüminoferrit
C-S-H	Kalsiyum silika hidrat
CH	Kalsiyum hidroksit
$\bar{S}$	Kükürt anhidriti
Aft	Alümino-ferrit trisülfat hidratı
Afm	Alümino-ferrit monosülfat hidratı
s/ç	Su / çimento oranı
s/b	Su / bağlayıcı oranı

Kısaltmalar**Açıklama**

ASTM	American Society for Testing of Materials
ACI	American Concrete Institute
SEM	Tarayıcı elektron mikroskobu
XRD	X-Işınları difraksiyonu
SNK	Student Newman Keuls
MPa	Mega Pascal
G.Ü.T.E.F.	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
ASKİ	Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi
EPKÇ 10	%10 Erzincan pomzası katkılı çimento
EPKÇ 20	%20 Erzincan pomzası katkılı çimento
EPKÇ 25	%25 Erzincan pomzası katkılı çimento
EPKÇ 30	%30 Erzincan pomzası katkılı çimento
EPKÇ 40	%40 Erzincan pomzası katkılı çimento
NPKÇ 10	%10 Nevşehir pomzası katkılı çimento
NPKÇ 20	%20 Nevşehir pomzası katkılı çimento
NPKÇ 25	%25 Nevşehir pomzası katkılı çimento
NPKÇ 30	%30 Nevşehir pomzası katkılı çimento
NPKÇ 40	%40 Nevşehir pomzası katkılı çimento
EPOİÇ 10	%10 Erzincan pomzası ikameli çimento
EPOİÇ 20	%20 Erzincan pomzası ikameli çimento
EPOİÇ 25	%25 Erzincan pomzası ikameli çimento
EPOİÇ 30	%30 Erzincan pomzası ikameli çimento
EPOİÇ 40	%40 Erzincan pomzası ikameli çimento
NPOİÇ 10	%10 Nevşehir pomzası ikameli çimento
NPOİÇ 20	%20 Nevşehir pomzası ikameli çimento
NPOİÇ 25	%25 Nevşehir pomzası ikameli çimento
NPOİÇ 30	%30 Nevşehir pomzası ikameli çimento
NPOİÇ 40	%40 Nevşehir pomzası ikameli çimento

1. GİRİŞ

Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı ham maddelerin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve “klinker” olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonunda elde edilen (1), dünyada ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Standart tanımlamasına göre ise Portland çimentosu, klinkere alçıdan başka bir madde katılmayan çimentodur (2).

Gelişen, modern çimento ve beton teknolojisinin amaçlarından biri üretim için harcanan enerjiden kayda değer bir tasarruf sağlarken, mukavemet ve durabilitede iyileşmeler sağlamaktır. Bu amaca ulaşmanın yollarından biri doğal ve endüstriyel inorganik maddelerin her ikisini de çimento üretiminde kullanmak veya direkt olarak çimentoya eklemektir. Bu açıdan gelecekte hem ekonomik hem de teknolojik açıdan çimento ikame malzemeleri çimento sektöründe önemli roller alacaklardır. Çimento üretiminde kullanılan bu mineral katkılar hidrolik özellikleri ve Portland çimentosu ile reaktiviteleri esas alındığında gizli hidrolik malzemeler, puzolanik malzemeler ve dolgu malzemeleri (filler) olarak üç gruba ayrılabilirler.

Granüle yüksek fırın cürufu, bakır cürufu, çinko cürufu, nikel cürufu, krom cürufu, kurşun cürufu gibi diğer demirli ve demirsiz cüruflar gizli hidrolik malzemeler sınıfına giren mineral katkı maddeleridir (3). Çalışmalar demirsiz cürufların puzolanik özelliğe sahip olduğunu ve beton içerisindeki çimento ve agrega ile kısmen ikame edilebileceğini göstermiştir (4).

Silisli veya silisli ve alüminli yapıda olan puzolanik malzemeler tek başlarına bağlayıcı özelliğe sahip değildir, ancak ince öğütüldüklerinde rutubetli ortamlarda kireçle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluştururlar. Puzolanik malzemeler doğal ve yapay olarak iki ana gruba ayrılırlar (5). Doğal puzolanların çoğu pomza gibi volkanik kökenlidir ve esas

olarak silika ve alüminden oluşurlar ki buda, onlara kireç ve alkalilerle birleşebilme imkanı sağlar. Yapay puzolanlar ise değişik endüstriyel ve ısıt işlemlerin ürünleridir; fiziksel ve mineralojik yapıda farklılık göstermelerine rağmen, kimyasal bileşenleri bakımından doğal puzolanlara çok benzerdirler. Uçucu kül, mikro silika, pişmiş kil ve prinç kabuğu külü yapay puzolanlardan bazılarıdır (6).

Filler, çimento bileşenleri ve su ile reaksiyona girmeyen yada çok az reaksiyona giren ince taneli inorganik mineral malzemelerdir. Eğer fillerin inceliği uygun ise çimento tane büyüklüğü dağılımını tamamlarki buda, çimentonun su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi özelliklerini belirgin şekilde iyileştirir (6)

Bu katkı maddeleri çimentoya ayrıca öğütölüp katılır veya çimento klinkeri ile birlikte öğütölerek katılabilir. Yüksek fırın cürufu, kireç taşı tozu, yapay ve doğal puzolanlar gibi mineral katkı maddelerinin sıradan Portland çimentolarına eklenmesinin çimentoların temel özelliklerini etkilemediği, ayrıca bu şekilde elde edilen katkılı çimentoların sülfat ataklarına, olumsuz çevre şartlarına ve alkali-agrega reaksiyonlarının neden olduğu bozulmalara karşı kimyasal direnci artırması, geçirimsizliğe olan olumlu katkıları, hidrasyon ısı ve termal genleşmeyi azaltması, kolay işlenebilmesi ve üretim maliyetinde yaptığı azaltmalardan dolayı 1929 yılında şartnamelere girmiştir (7,8,9,10,11,12).

Bu çimento katkılarına olan ilgi 1973 Yom Kippur (Arap-İsrail) Savaşından sonraki petrol krizi ile daha da artmıştır. Çünkü, termal ve elektrik enerjisi maliyetlerinde meydana gelen dikkate değer yükselişler, çimento üretim maliyetlerine de yansımıştır. Çimento üretiminde kullanılan 10 ton mineral katkı, yakıtta yaklaşık 1 tonluk bir tasarruf sağlamaktadır. Bu nedenle katkılı çimento üretiminde bir artış beklentisine girilmiştir (7).

Çimento içerisinde çeşitli mineral katkıların kullanılması günümüzde bir çok ülkede geçerli bir uygulama durumundadır. Böyle katkılar klinkerin öğütülmesi esnasında öğütülmeye yardımcı olması için veya çimentoların belirli özelliklerini iyileştirmek için veya da tamamen ekonomik ve çevresel nedenlerle kullanılır. Yerel olarak mevcut mineral malzemeleri, sıradan Portland çimentosu içerisinde mineral katkı formunda kullanan bir çok ülke mevcuttur (13).

Çimento içerisinde yaygın olarak kullanılan mineral katkılar granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, toz halindeki kireç taşı, volkanik kökenli doğal camsı malzemeler ve doğal puzolanların muadili olan taşimsı volkanik tüflerdir (13). Böyle mineral katkıların çimentonun öğütülme safhasında kullanılması daha çok kabul görmüştür. Mineral katkılar yönünden bakıldığında ikame oranı %0-20 arasında değişmektedir (13).

Çimentoya veya betona az veya çok miktarda mineral katkı ilave edilmesinin aşağıdaki kısmi teknik avantajları sağladığı iddia edilmektedir (8,9,10,14,15):

- Aşındırıcı çevre şartlarına karşı direnci iyileştirir,
- Hidratasyon ısını azaltır,
- Alkali-silika reaksiyonu riskini minimize etmek için çimento bileşenlerinin alkali seviyesini düşürür,
- Harçların ve betonların erken basınç dayanımlarını artırır (karbonat ilavesi durumunda),
- Taze harç ve betonun akış ile ilgili özelliklerini iyileştirir,
- Harcın ve betonun uzun vadede basınç dayanımını artırır,
- Taze betonun terleme ve ayrışmasını azaltır,
- Sertleşmiş betonun geçirimliliğini azaltır,
- Karbonasyon ve sülfat direncini artırır.

Böyle mineral katkıları kullanmanın yukarıdaki teknik avantajlarının yanı sıra, bazı ekonomik ve çevresel faydaları da vardır:

- Çimento ya mineral katkı ilave edilmesi çimento üretimini artırır ve her ton çimento üretimi için gerekli yakıt ve elektrik enerjisi ihtiyacını azaltır,
- Çimento hammaddesinin korunumunu sağlar,
- Çimento üretiminde maliyeti azaltır,
- Atık malzeme olarak bir çok ciddi çevresel ve yok etme problemine neden olabilecek endüstriyel ürünleri kullanarak, bu sorunları ortadan kaldırır,
- Atıkları faydalı bir şekilde zenginliğe dönüştürür,
- Böyle endüstriyel ürünlerin yok edilmesi için yapılacak masraftan tasarruf sağlar,
- Çok ihtiyaç duyulan yapı malzemelerinin mevcudiyetini artırır,
- Hava ve su kirliliğindeki azalmaya katkı sağlar,
- Sera gazlarından kaynaklanan küresel ısınmayı azaltır.

Mineral katkı ilave edilmesi, uygulamada on yıllardır bu malzemelerin mevcudiyetine ve ticari kullanımlarına bağlıdır. Fakat geçen 40 yıldan fazladır, çimento ve beton içerisindeki teknik avantajlarından dolayı granüle yüksek fırın cürufu, toz haline getirilmiş yakıt külü veya uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemelerin dünya üzerindeki kullanımı, beklentiler doğrultusunda önemli bir artış göstermiştir (8,10,14,16).

Portland çimentosu içerisinde mineral katkıları kullanmanın teknik, ekonomik ve çevresel avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır (17):

- Özellikle düşük sıcaklıkta erken yaşlarda daha yavaş mukavemet kazanır, ancak 28 günlük hidrasyondan sonrada mukavemet kazanmaya devam eder,
- Cürufu ve uçucu küllü betonlar erken yaşlarda yetersiz kür ve nem kaybına karşı çok hassastırlar.

Bu dezavantajlarının kullanıcılar tarafından bilinmesi, bu zaafiyetlerine karşı tedbir alabilmeleri açısından son derece önemlidir.

Çoğu puzolanik özelliğe sahip olan doğal mineral katkı maddeleri bakımından ülkemiz oldukça zengindir. Türkiye'deki doğal puzolan yatakları hakkındaki etüt ve envanter çalışmaları Maden Tetkik Arama (M.T.A.) Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Tamamının rezerv miktarları belirlenmemiş olmakla birlikte, ülkemizdeki yedi coğrafi bölgenin tamamında önemli doğal puzolan kaynakları mevcuttur (18,19). Ancak ülkemizde bu kaynakların yeterince kullanıldığı söylenemez.

Pomza volkanik orijinli bir doğal puzolandır. Puzolaniklik özelliğine rağmen çimento endüstrisinde yeterince kullanılmamaktadır. Beton üretiminde hafif agrega olarak kullanımına yönelik bir çok çalışma bulunmasına rağmen, çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanımına yönelik yapılan çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır.

Yapılan literatür taraması sonucunda, pomzanın çimento içerisinde puzolan olarak kullanılmasına yönelik sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Pomza tozunun %15'e kadar çimento ile ikame edilerek Portland volkanik pomza çimentosu üretilbileceği ileri sürülmüştür (20).

Pomzanın çimento üretiminde katkı olarak kullanılmasına yönelik yapılan bir çalışmada, %20 'ye kadar pomza tozu ikamesiyle daha yüksek priz süresi ve daha düşük hidratasyon ısısı sağlayan katkılı Portland volkanik pomza çimentosu elde edilebileceği görülmüştür (21).

Pomzanın beton içerisinde hafif agrega olarak kullanılmasına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Çalışmalar pomzanın hafif beton ve yapısal hafif beton üretiminde rahatlıkla kullanılabileceğini göstermiştir (20,22-28).

Bu çalışmanın amacı pomzaların çimentolu sistemlerde kullanılabilirliğini araştırmaktır. Bu amaçla Nevşehir ve Erzincan yörelerinden alınan pomzaların 5 değişik oranda (çimento ağırlığının %10, %20, %25, %30 ve %40'ı):

- doğrudan klinkerle birlikte öğütülmesi (pomza katkılı çimento (PKÇ)),
veya
- çimentonun bir kısmı ile yer değiştirilmesi (pomza ikameli çimento (POİÇ)),

ile herbir pomza için 5 ikameli, 5 katkılı olmak üzere toplam 20 çeşit çimento üretilmiştir. Elde edilen bu çimentolara ait çimento hamurları ve harçlar üzerinde fiziksel ve mekanik özellikler belirlenmiştir. Bu iki yörenin pomzaları çimento ve harçtaki performansları bakımından birbirleriyle kıyaslanırken, pomza içermeyen ve pomzalı çimentoların üretiminde kullanılan klinker ile üretilmiş PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 kontrol numuneleri ile de karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Pomzanın çimento üretiminde kullanılması ile çimento üzerine yaptığı etkilerin (olumlu ve olumsuz) daha iyi anlaşılması ve pomzanın puzolanik etkilerinin görülmesi açısından çimento, çimentoların hidratasyonu, puzolanlar ve puzolanik tepkimeler hakkında genel bir bilgi vermenin yararlı olacağı düşünülmektedir.

2.1. Portland Çimentoları

Portland çimentosu esas olarak bir kalsiyum silikat çimentosudur. Kalker ve kilin yaklaşık 1500 °C'ye kadar ısıtılması ile elde edilen klinkerin, kireç taşı veya kalsiyum karbonat ve uygun miktarda kil veya tortulu şist ile birlikte ince bir şekilde öğütülmesi ile elde edilir. Öğütülmüş Portland çimentosu tanelerinin boyutu 1-200 µm arasında değişmektedir. Portland çimentosu su ile birleştiğinde hidrolik bağlayıcı (su altında sertleşebilen ve suda erimeyen) özelliği kazanmaktadır (32).

İlk kalsiyum silikat çimentosu Yunanlılar ve Romalılar tarafından üretilmiştir. Bunlar, volkanik külleri ince öğütüp kireç ve su ile karıştırarak hava şartlarına direnç gösteren ve sertleşen bir harç elde etmişlerdir. Bu reaksiyon puzolanik reaksiyon olarak bilinir ve uçucu kül, mikro silika ve metakaolin gibi malzemeler betonun mukavemetine ve performansına katkıda bulunurlar (32).

18. yüzyılın ortalarında John Smeaton bazı karışık kireçlerin (uygun miktarlarda silis ve alümin içerenler) hidrolik özelliklere sahip olduğunu keşfetmiştir. Yani bunlar kararlı hidratlar oluşturmak için suyla reaksiyona girebilen reaktif silikatlar ve alüminatlar içermektedirler. Smeaton bu malzemeleri 1759 yılında Eddystone Deniz fenerinin inşasındaki harçlarda kullanmıştır (32).

Portland çimentosu terimi ilk kez Josep Aspdin'e ait 5022 nolu İngiliz Patentinde (1824) kullanılmıştır. Bu patent yapay taş yapmak için kirecin kil ile çamur formunda karıştırılıp açık hava fırınında kurutulması ve malzeme kütlelerinin kalsinasyonu (karbon dioksit ve suyun uzaklaştırılması için ısıtma işlemi) işlemlerini tanımlamaktadır. Çimentonun bileşkesi yaygın olarak ince kum veya demir oksit ilavesi ile ayarlanır (1,29,30,32).

19. yüzyılın ilk yarısında üretilen çimentolar modern Portland çimentoları ile aynı bileşen yapısına sahip değillerdi. Çünkü, o dönemlerde çimento üretimi esnasında ulaşılan sıcaklık, modern çimentoları teşkil eden trikalsiyum silikat (C_3S) gibi ana mineral bileşenleri meydana getirebilmek için yeteri kadar yüksek değildi. Çimentonun silikat bileşiği sadece daha az reaktif olan dikalsiyum silikatlerdi (C_2S) (32).

19. yüzyılın sonlarında dönel fırınların kullanımı ile C_3S 'in oluşumu için yeteri kadar sıcaklık sağlanmış ve daha homojen bir üretim imkanına kavuşulmuştur. 20. yüzyıl boyunca ürünlerin kimyasal ve mineral bileşimlerinde nispeten küçük değişimler olmakla birlikte, asıl ilerlemeler üretim teknolojisinde olmuştur. Bu ilerlemeler enerji verimliliğini ve kalite kontrolü iyileştirmiş, çevresel etki ve işçi yoğunluğunu azaltmıştır (32).

20. yüzyılda iyice yaygınlaşan dönel fırınlar esas olarak silika, kireç, alümina ve demir oksitten oluşan çimento hammadde karışımlarının yüksek sıcaklıklara kadar ($1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) pişirilmesine imkan sağlamışlardır. Hammadde karışımının içerisinde bulunan kil, $500\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ayrılarak SiO_2 ve Al_2O_3 gibi oksitlere dönüşmektedir. Kalker, $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık civarında CaO ve karbon dioksit haline dönüşmektedir (32).

Sıcaklığın etkisiyle hammadde karışımından açığa çıkan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi oksitler, sıcaklık arttıkça (yaklaşık $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) kendi aralarında kimyasal reaksiyona başlamaktadır. $1250\text{-}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, hammadde karışımının %20-%30'u sivilaşma göstermekte ve klinker denilen irili ufaklı

katı tanecikler haline dönüşmektedir. Oksitlerin 1200-1450 °C civarındaki kimyasal reaksiyonlardan sonra, çimentoyu oluşturan ve birbirinde farklı özelliklere sahip dört ana bileşenin oluşumu tamamlanmış olur. Portland çimentosunu oluşturan bu dört anabileşen kimyasal sembolleri ve çimento kimyasında kullanılan kısa gösterimleri ile birlikte aşağıda verilmiştir.

1. Dikalsiyum silikat, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S),
2. Trikalsiyum silikat, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S),
3. Trikalsiyum alüminat, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A),
4. Tetrakalsiyum alüminoferrit, $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF).

Normalde çimento bileşenleri basit oksitler halinde bulunmaz, ancak çimentoların kimyasal analiz sonuçları oksit miktarları olarak verilir. Portland çimentosunu oluşturan anabileşenlerin miktarlarının tayininde aşağıdaki üç yöntem kullanılmaktadır (1):

1. X-ışını kırılma yöntemi,
2. Optik veya elektron tarama mikroskobu ile inceleme yöntemi,
3. Hesap yöntemi.

Kullanılan yöntemler arasında en çok ve en kolay uygulanan yöntem hesap yöntemidir. Ancak bu yöntemin kullanılabilmesi için, çimento içerisinde bulunan oksit miktarlarının bilinmesi gerekmektedir. Çimentodaki anabileşenlerin oranlarının hesap yöntemiyle tayini için, Bogue denklemleri denilen bir dizi denklem kullanılmaktadır (katkılı çimentoların anabileşenlerinin oranlarının tayininde bu denklemler kullanılamaz). Normal Portland Çimentosunun (ASTM Tip I) kimyasal analizi sonucunda elde edilen tipik değerler ve Bogue denklemleri ile hesaplanan ana bileşen miktarları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Portland çimentosunun tipik kimyasal analizi ve anabileşen miktarları (1)

Oksitler ve diğer değerler	Çimento kimyasındaki karşılıkları	Oksit miktarları (%)	Anabileşen miktarları (%)
CaO	C	63,6	
SiO ₂	S	20,7	C ₃ S=51,9
Al ₂ O ₃	A	6,0	C ₂ S=20,4
Fe ₂ O ₃	F	2,4	C ₃ A=11,8
SO ₃	$\bar{S}$	2,1	C ₄ AF=7,3
MgO	M	2,6	
Na ₂ O	N	0,1	
K ₂ O	K	0,9	
Çözünmeyen kalıntı	Ç.K.	0,2	
Kızdırma kaybı	K.K.	1,4	
Serbest CaO	-	1,4	
Cl ⁻	-	0,1	

2.2. Çimento Hidratasyonu

Hidratasyon, genel anlamda bir maddenin su ile birleşmesi sonucu ortaya çıkan reaksiyon olarak tanımlanır (32,33). Diğer bir ifade ile anhidro kristallerin hidrate kristallere dönüşümüdür.

Portland çimentosunun hidratasyonu ise, anhidrate kalsiyum silikat ve alüminat fazlarının hidrate olmuş ürünler oluşturmak için, su ile reaksiyona girmelerini kapsamaktadır (34). Bu katı hidratlar anhidrate taneciklerden daha fazla yer kaplar ve sonuçta katı ve iç içe geçmiş bir kütle oluştururlar ki bunun porozitesi orijinal karışımın w/ç oranının bir fonksiyonudur.

Çimentonun hidratasyonu sonucunda suda çözünmeyen ve hidrolik bağlayıcı özelliği taşıyan sert bir madde oluşur. Bu proses priz alma ve sertleşme şeklinde iki kademedeyi gerçekleştirir (33).

Priz almada, çimento pastası donarak katı hale gelir ancak, henüz yeterli dayanıma sahip değildir. Daha sonra oluşan sertleşme kademesiyle dayanımda önemli ölçüde artış gerçekleşir (33).

Priz zamanı klinker mineralojisi (özellikle serbest kireç oranı), klinker kimyası ve inceliğin bir fonksiyonudur. Genellikle çimentonun ince olması ve kireç seviyesinin yüksek olması daha kısa priz süresi anlamına gelir.

Çimentonun hidratasyonu, tanelerin (1-200 μm) yüzeyinden merkeze doğru ilerleyerek gelişmektedir. Buna göre hidratasyonun suyun çimento taneleri etrafındaki hidrate tabaka boyunca difüzlenmesi şeklinde gerçekleştiği düşünülür (33).

Çimento ve su arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda sert ve katı bir kütle meydana gelir. Çimentonun katı bir kütle haline dönüşümü, aşağıda verilen reaksiyonlardan sonra gerçekleşmektedir:

1. Kimyasal reaksiyonlar (hidratasyon ve hidroliz),
2. Çözünme ve kristalizasyon reaksiyonları ve
3. Matrisdeki reaksiyonlar.

Oldukça iri taneciklerden oluşan çimento hidratasyon reaksiyonları sırasında su içinde yavaş yavaş çözünür. Çözünme katı taneciklerin yüzeylerinde meydana gelir ve çözünen bileşikler hemen hidrate hale gelerek tane yüzeyini jel halinde kaplarlar. Böylece, henüz reaksiyona girmemiş olan klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmiş olur. Diğer taraftan, çözeltiye geçmiş olan klinker bileşikleri de çözelti içinde doymuş hale gelerek, çözünme hızının yavaşlamasına yol açar. Bu etkiler hidratasyon hızının zamanla azalmasına neden olur (33).

Çimento bileşenlerinin tam olarak hidrate olması için uzun sürenin geçmesi gereklidir. Örneğin, hidratasyonun 28'inci gününde tanecik yüzeyinde

hidratasyonun taneciğın içine işleme derinliğı ancak 4 mikron kadardır. Bu derinlik bir yıl sonra 8 mikrona ulaşabilir. Çimento taneciklerinin ortalama 50 mikron olduğı düşünülürse, böyle bir büyüklüğe sahip taneciğın tam olarak hidrate olabilmesi için yaklaşık 5 yılın geçmesi gereklidir. Ancak, tanecik boyutunun daha küçük olması halinde bu süre daha da kısalabilir.

Çimentonun hidratasyon reaksiyonları arasında özellikle alüminat (C_3A) ve alitin (C_3S) hidratasyonları önemlidir. Belit (C_2S) ve alit benzer şekilde hidrate olur. Ferrit (C_4AF) ise fazla hidrolik nitelik taşımaz (33).

Portland çimentosu hidratasyonu ekzotermik reaksiyonları kapsar ve ısı açığa çıkarır. Reaksiyonların ilerleyişi sabit sıcaklıklı iletim ısın ölçüm tekniğı kullanılarak izlenebilir (37). Çimento hidratasyon ısısı (ilk 48 saat boyunca) ince öğütölmüş yüksek oranda C_3S (>%60) ve yüksek oranda C_3A (>%10) içeren çimentolar için en yüksektir (32).

Diğer bir ifadeyle, ayrılan ısının miktarı çimento tipine ve katkıların oranına bağılı olarak değişir. Değişik tipteki Portland çimentoları içerisinde, klinker bileşiklerinin oranlarıda birbirinden farklıdır. Bu durum, söz konusu çimentoların hidratasyon ısılarının da farklı olmasına neden olur.

Örneğın, ASTM'de yer alan Tip III çimentosu en yüksek hidratasyon ısısına; Tip IV çimentosuda en düşük hidratasyon ısısına sahiptir. Hidratasyon ısıları arasındaki farklılık, çimentoların kimyasal faz bileşimi ile ilgilidir. Tip III çimentosunun en yüksek hidratasyon ısısına sahip olmasının nedeni, hidratasyon sırasında en aktif bileşenler olan alit ve alüminatın fazla miktarda (alit %57-alüminat %11) olmasıdır. Buna karşılık, Tip IV çimentosu ise, hidrolik aktivitesi yüksek olan alit ve alüminat bileşenlerinden az miktarda (alit %20-alüminat %6,0) içermekte, dolayısıyla diğer çimentoya kıyasla daha düşük hidratasyon ısısına sahip olmaktadır.

Isı çıkışı soğuk havalarda ve ısı artışının mukavemet artışını ve üretim işlemini hızlandırdığı prekast betonlarda bir avantajdır. Bununla birlikte kütle betonlarda betonun merkezi (çekirdeği) ile yüzeyi arasındaki ısı farkı termal çatlaklarla sonuçlanacak gerilmeler üretebilir (32).

Çimentoda sertleşme sırasında ısı ayrılması 1 ila 3 günde maksimum düzeyde olur. Daha sonra azalan bir hızda devam eder.

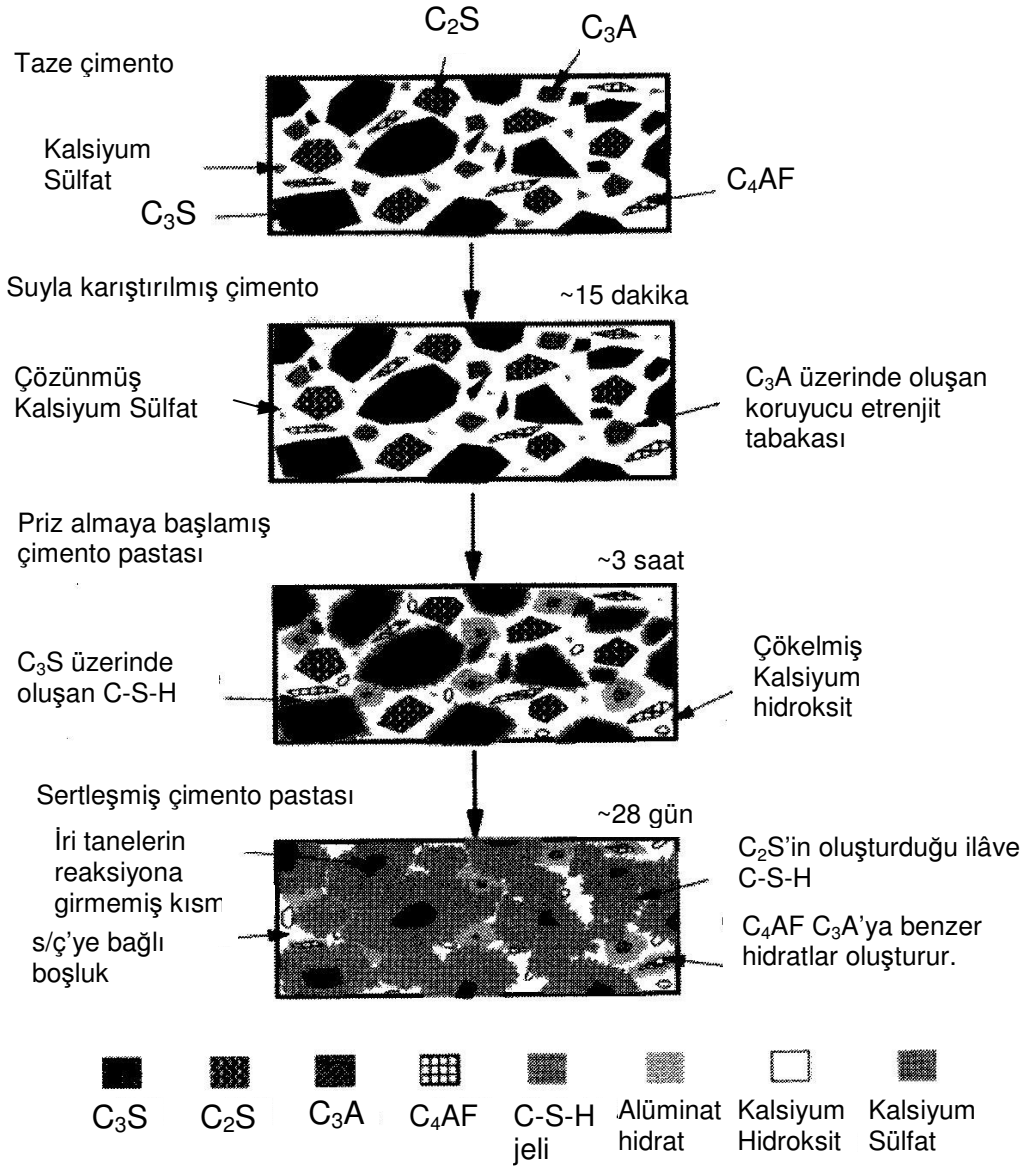
Portland çimentosunun hidratasyonu kendini oluşturan bileşenlerinkine göre çok daha komplekstir. Çimento hamurundaki hidrate yapı gelişimi Şekil 2.1’de basitleştirilmiş şekilde gösterilmiştir (32).

Portland çimentosunun hidratasyonu hakkında genel bilgiler verildikten sonra, oldukça kompleks olan hidratasyon olayının daha iyi anlaşılabilmesi için, silikat fazların (C_3S ve C_2S) ve alüminat fazların (C_3A ve C_4AF) hidratasyonlarını ayrı ayrı ele almak daha uygun olacaktır.

2.2.1. C_3S ve C_2S ’in hidratasyonu

C_3S ve C_2S ’in her ikisinde C-S-H jeli diye bilinen amorf (belirli bir şekli olmayan) kalsiyum silika hidrat oluşturmak için su ile reaksiyona girerler. C-S-H jelleri beton içerisindeki kum ve agregaları bir birine bağlayan yapıştırıcıdır. Reaksiyonlar Çizelge 2.2’de özetlenmiştir (32).

C_3S C_2S ’den çok daha reaktiftir. 20 °C’lik standart sıcaklık koşulları altında tipik bir çimentoda mevcut C_3S ’in 3 günde hemen hemen yarısı, 28 günde ise %80’ni hidrate olacaktır. Bunun aksine C_2S ’in hidratasyonu hemen hemen 14 güne kadar başlamaktadır.



Şekil 2.1.Çimento hamurundaki hidrate yapı gelişimi (32)

Çizelge 2.2. Kalsiyum silikatların hidratasyonu (32)

Mineral	Reaksiyon oranı	Reaksiyon ürünleri
C ₃ S	Orta	C-S-H (Ca/Si ≈ 1,7) CH
C ₂ S	yavaş	C-S-H (Ca/Si ≈ 1,7) Az miktarda CH

C₃S ve C₂S'in her ikisi tarafından üretilen C-S-H jelleri, yaklaşık 1,7 gibi tipik bir Ca/Si oranına sahiptir. Bu oran C₃S'teki 3/1'lik orandan oldukça düşüktür. Fazla Ca CH kristalleri olarak çökelmektedir. C₂S'in hidratasyonunda bir miktar CH oluşumuna neden olmaktadır. Aşağıdaki denklemler hidratasyon reaksiyonlarını yaklaşık olarak özetlemektedir (32).



C₃S'in hidratasyonunun önemli bir özelliği, ilk karıştırmada su ile reaksiyona başlaması ve daha sonra reaksiyonların ertelendiği bir periyoda geçmesidir. Reaksiyonların ertelendiği bu süreç, uygulamada oldukça önemlidir. Çünkü, bu durum betonun sertleşmeye başlamadan önce yerleştirilmesine ve sıkıştırılmasına imkan sağlar. Bu bekleme periyodunu açıklamak için bir çok teori geliştirilmiştir. Bunlardan en ünlüsüne göre, başlangıçtaki reaksiyon C₃S'in yüzeyinde koruyucu bir C-S-H tabakası oluşturmaktadır ve bu C-S-H tabakası tahrip olduğunda veya yaşlanmayla veya yapı değişikliği ile daha geçirgen bir hale geldiğinde, bu bekleme periyodu son bulur (32).

Bir elektron mikroskop kullanılarak incelendiğinde büyük C₃S ve C₂S tanecikleri etrafında oluşan C-S-H jelinin oldukça yoğun ve özelliği olmayan bir görüntüsünün olduğu görülmektedir. Bu malzemeler başlangıçta anhidrate malzemeler üzerinde bir reaksiyon çerçevesi oluşturur, fakat hidratasyon

ilerledikçe susuz malzemeler tedricen yer değiştirir ve sadece çok iri parçalar (30 mikrondan daha büyük) yıllar süren hidrasyondan sonra bile, reaksiyona girmemiş bir çekirdek olarak kalacaklardır. Bu yoğun hidrasyon dahili ürün olarak bilinmektedir.

2.2.2. C_3A ve C_4AF 'nin hidrasyonu

Laboratuarda hazırlanan C_3A ve C_4AF 'in su ile yaptığı reaksiyonlar (kalsiyum sülfat ve kalsiyum hidroksitin olduğu ve olmadığı durumlarda) üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır (36). Bulgular dikkatlice yorumlandığında endüstriyel klinker içerisindeki alüminat fazların, sentetik olarak hazırlanan klinkerlerden çok farklılık gösterdiği ve çimento hidrasyonunun önemli miktardaki reaktif silikadan ve alkali mevcudiyetinden, oldukça güçlü bir şekilde etkilendiği görülmektedir.

Çözünebilir kalsiyum sülfatın bulunmadığı durumlarda C_3A müteakiben C_2AH_6 'ya dönüştürmek üzere C_2AH_8 ve C_4AH_{19} oluşturur.

Eğer son olarak suyla karıştırılmadan önce alçı ($C\bar{S}H_2$ veya $C\bar{S}\frac{1}{2}H$) C_3A ile öğütülürse, başlangıç reaksiyonları C_3A kristalleri yüzeyinde oluşan bir koruyucu etrenjit tabakası ile kontrol edilir. Reaksiyon aşağıdaki gibi özetlenebilir.



Alçının susuz halinin daha hızlı çözünmesi, yeterli miktarda çözünmüş kalsiyum ve sülfat iyonları sağlar ve son olarak bölünen veya oldukça reaktif olan C_3A formlarının reaksiyonlarının kontrolünde oldukça etkili olacaktır.

Bir çok ticari Portland çimentosunda, etrenjit oluşumunu sürdürecektür sülfat mevcut değildir. Mevcut sülfat tüketildiği zaman etrenjit, monosülfat diye

bilinen ve daha az SO₃ içeren bir fazını oluşturmak üzere C₃A ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon aşağıdaki gibi özetlenebilir.



Bir çok çalışma C₄AF'in (veya daha doğrusu C₂A-C₂F) hidratasyonunun C₃A'ın kine benzediğini göstermektedir. Fakat çok daha yavaş ilerlemektedir (37). Demir, alüminyumun yerine geçen monosülfatın ve etrenjitin kristal yapısı içerisinde katı hale geçer. C₃A ve C₄AF karışımları tarafından oluşturulan etrenjit ve monosülfat bileşiminin değişkenliğini göstermek için, C₃A ve C₄AF sırasıyla Aft (alümino-ferrit trisülfat hidratı) ve Afm (alümino-ferrit monosülfat hidratı) fazları ile gösterilmiştir. C₃A ve C₄AF'nin hidratasyon reaksiyonları Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

2.2.3. Hidrate olmuş çimento pastasının bileşimi

Tipik bir Portland çimentosu 28 gün boyunca 20 °C'de kür edildiğinde, %90 hidrate olması umut edilir. Hidratasyonun uzunluğu (süresi) çimento inceliği ve bilhassada çimento içerisindeki iri taneciklerin oranından önemli ölçüde etkilenir. 30 mikrondan büyük çimento tanecikleri muhtemelen hiçbir zaman tamamen hidrate olmayacaktır. Bu nedenle, çimentonun tane büyüklüğü dağılımı uzun vadede basınç mukavemeti üzerinde, güçlü bir etkiye sahip olacaktır (32).

Termal analiz, XRD ve SEM kullanılarak Portland çimentosu hidratları olarak terkip edilen fazların sayısal olarak hesaplanması mümkündür (38). Çizelge 2.4'te tipik bir örnek verilmiştir (32).

Çizelge 2.3. Alüminatların hidratasyonu (37)

Mineral	Çözülebilir kalsiy. sülfat mevcut	Reaksiyon oranı	Reaksiyon ürünleri
C_3A	Hayır	Isı açığa çıkışı ile çok hızlı	C_2AH_8 } C_2AH_6 C_4AH_{19} }
C_3A	Evet	Başlangıçta hızlı	Etrenjit $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ki hemen sonra monosülfat oluşturmak için reaksiyona girer $3(C_4A\bar{S}H_{12})$
C_4AF	Hayır	Değişken (Al/Fe oranına bağlı)	$C_2(A,F)H_8$ ve $C_4(A,F)H_x$ hidratları ki hemen sonra $C_3(A,F)H_6$ 'e dönüşür.
C_4AF	Evet	Değişken fakat genellikle yavaş	Demir etrenjitle (Aft) yer değiştirir ve hemen sonra demir monosülfatla yer değiştirir (Afm).

Çizelge 2.4'ten görüldüğü gibi hacim olarak mevcut dominant faz C-S-H jelidir ve yaklaşık eşit miktarda kalsiyum hidroksit ve monosülfat mevcuttur. Bu hidrat oranları Portland çimentosu puzolanlarla veya granüle yüksek fırın cürufu ile ikame edildiğinde veya birlikte öğütüldüğünde önemli değişiklikler gösterir (32).

2.3. Puzolanlar

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcı özelliğe sahip olmayan, ancak ince öğütülmüş halde ve rutubetli ortamda çimento hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (1,5,39,40,41). Diğer bir ifade ile puzolan kalsiyum hidroksit veya açığa

kalsiyum hidroksit çıkaran (Portland çimentosu klinkeri gibi) malzemelerle karıştırıldığında su içinde sertleşebilen doğal ve yapay tüm inorganik malzemeleri kapsamaktadır (42). Ancak bu, tüm silisli ve alüminli malzemelerin puzolan olduğu anlamına gelmez.

Çizelge 2.4. Hidrate olmuş Portland çimentosu pastasının bileşimi (32)

Susuz çimento				
		Ağırlık (%)		
	C_3S	63		
	C_2S	13		
	C_3A	9,5		
	C_4AF	7,5		
	$C\bar{S}$	5		
Hidrate çimento pastası		Hacim (%)		
		3 gün	28 gün	365 gün
Reaksiyona girmemiş	C_3S	18	8	5
	C_2S	7	5	2
	C_3A	4	0	0
	C_4AF	5	5	2
Hidratlar	Kalsiyum hidroksit (CH)	13	18	18
	C-S-H jeli	39	47	54
	Monosülfat ($C_4A\bar{S}H_{12}$)	4	16	20
	Etrenjit ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$)	11	0	0

Puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir.

Puzolan ismi birbirinden farklı volkanik kökenli ürünler için kullanılmaktadır. Puzolanlar esas olarak silika ve alüminden meydana gelirler ki, buda onlara asit karakteri ile kireç ve alkalilerle kuvvetli bir birleşme eğilimi verir. Onlar

asında çok küçük boşluklardan meydana gelen camsı ürünlerdir ve bu nedenle büyük yüzey alanlarına sahiptirler. Kristal fazları sınırlıdır ve meydana geldikleri magmanın özelliklerini taşırlar (42, 43).

Puzolanik ürünler köken, yapı, kimyasal ve mineralojik bileşenleri bakımından oldukça farklıdır. Sulu ortamlarda bağlayıcı özelliğe sahip kararlı yeni hidratasyon ürünleri oluşturmak için kireçle birleşme eğilimine sahiptirler (43).

Puzolanların, genleşme yaratan reaksiyonlara karşı etkili oldukları bilinmektedir. Kireç-puzolan reaksiyonunda boşluk çözeltisinin pH'nın düşmesinde puzolanların etkili olduğu öne sürülmektedir. Ayrıca reaktif puzolanların alkalilerle reaksiyona girerek alkalileri tükettikleri ve genleşme yaratmayan ürünler oluşturdukları iddia edilmektedir. Puzolanların alkali-silika reaksiyonunu azaltmadaki etkisinin puzolanın reaktivitesine bağlı olduğu ve bu etkinin çimento yerine kullanılabilecek miktarı belirlediği ifade edilmektedir (44).

Günümüzde, sertleşmiş betonda alkali-silika reaksiyonu sebebiyle meydana gelebilecek zararlı genleşmeleri kontrol etmesi mümkün olan tüm metodlar arasında, puzolanik veya mineral katkıların kullanılması betonun durabilitesini artırması nedeni ile de ayrı bir avantaja sahiptir (45).

2.4. Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadırlar (1,5,39,40,41,46).

Bu genel puzolan ismi kimyasal bileşimleri, mineralojik doğaları ve jeolojik kökenleri farklı olan bir çok malzemeyi kapsadığından, sınıflandırılmasında oldukça zordur (42).

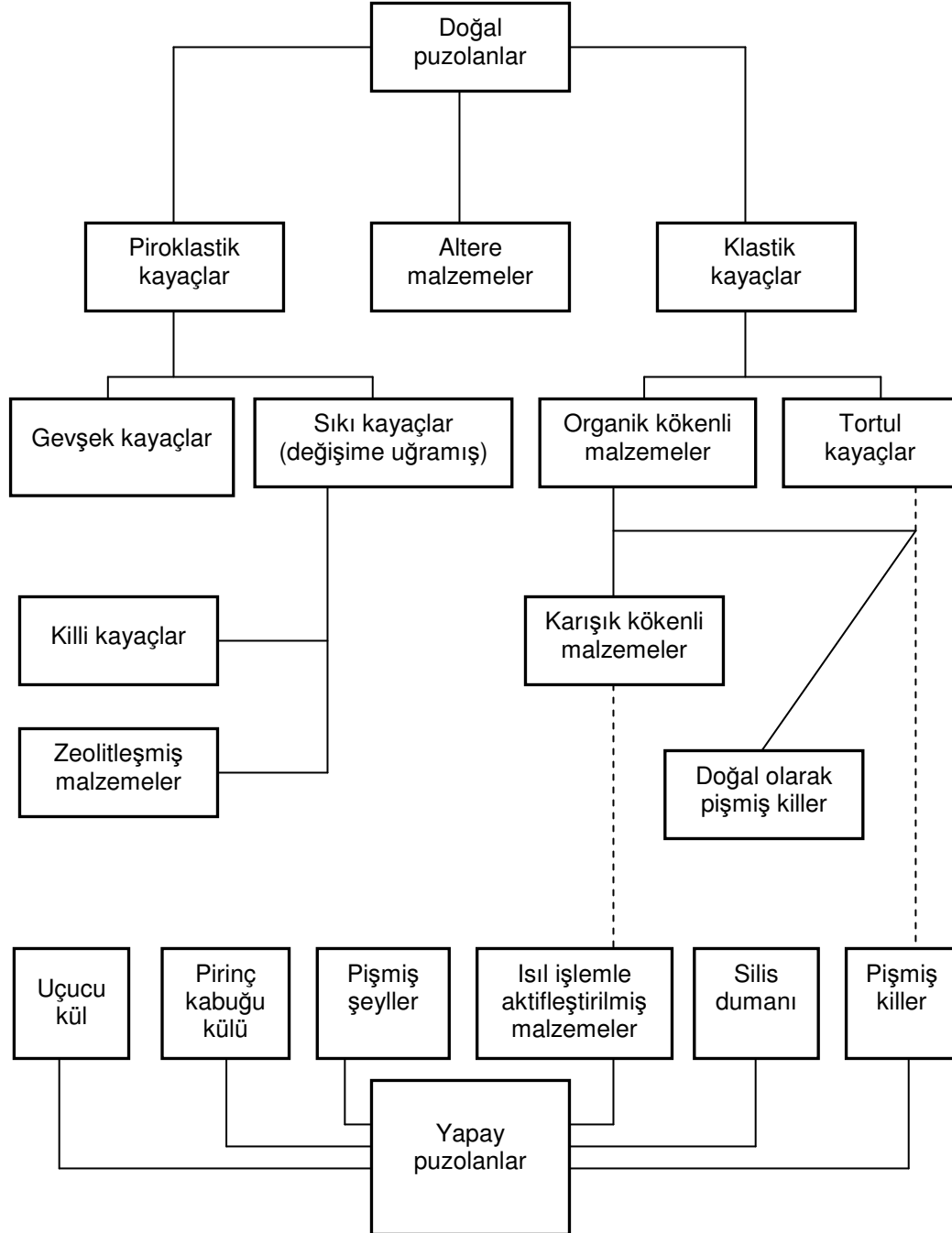
En yaygın kabul gören sınıflandırma sistemi, puzolanların kökenlerini esas alan sınıflandırma sistemidir. Bu sistemde puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki genel gruba ayrılmaktadırlar (42).

Doğal puzolanlar öğütmenin dışında bir işlem gerektirmezler. Yapay puzolanlar ise orjinalinde hiç veya çok az puzolanik özelliğe sahip malzemelerin kimyasal ve/veya yapısal modifikasyonlarının bir sonucudur. Yapay puzolanlar ya belirli üretim metotlarının kalıntısıdır yada seçilmiş hammaddelerden özel olarak üretilirler (42).

Doğada bol miktarda bulunan volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısıtılmış işlem görmüş killer ve şeyller ve diatomlu topraklar doğal puzolanlar içerisinde yer alan puzolanlardır.

Uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünler ise yapay puzolanlardır.

Araştırmacılar farklı kriterler kullanarak puzolanlarla ilgili bir çok değişik sınıflandırma yapmışlardır. Şekil 2.2’de Massazza tarafından verilen puzolan sınıflandırma sistemi, esas olarak 1974 yılında Moskova’da yapılan 6. Uluslar arası Çimento Kimyası Kongresinde önerilen sınıflandırmaya çok benzerdir (4,42,47).



Şekil 2.2. Puzolanların sınıflandırılması (40, 42, 47)

Bu sınıflandırma sisteminde doğal puzolanlar üç ana gruba ayrılmaktadır. İlk grup olan ve pomzayıda içerisinde alan piroklastik kayalar (püskürük, volkanik asıllı), dünya üzerindeki volkanik bölgelerde bulunurlar. Volkanik kökenli bu malzemeler volkanik patlamalarla birlikte atmosfere fırlayan, erimiş küçük magma parçalarının bir sonucudur. Patlama süresince basınçta meydana gelen hızlı düşüş, gazların açığa çıkan sıvı magma içerisinde çözünmesine neden olur. Bunun sonucu olarak, her bir parça mikro-poröz bir yapı oluşturan bir grup mikroskobik kabarcık ve kılcal kanal içerir. Parçacıkların bu esnada su ile temas etmesi, camsı bir faza sahip olmalarına neden olur. Doğal olarak bu malzemelerin kimyasal bileşimi de püsküren magmanın kimyasal kompozisyonuna bağlıdır (7,42).

Massazza'nın sınıflandırmasına göre, doğal puzolanların ikinci grubu değişime uğramış yüksek miktarda silis içeren malzemelerden meydana gelir. Bu puzolanlar, hava şartlarının etkisiyle bozunan silisli kayaların, kimyasal değişime uğrayan kayaların, durgun sularda farklı kökenli malzemelerle birlikte çökmesiyle meydana gelirler (32,47).

Doğal puzolanların son grubu, diatomit ve kil toprağında içine alan klastik (parçalardan oluşmuş) kayalardır. Bunlar yüksek silika içeriğine sahip olmakla birlikte, içlerinde önemli miktarda kil ihtiva ederler. Kilin puzolanik davranışı yetersiz olduğundan, çimento ikame malzemesi olarak kullanılması mümkün olmamaktadır. Ancak, ısıtma işlemi tabii tutulması killerin puzolanik özelliğini önemli ölçüde artırmaktadır (47).

Diatomlar ise tek başlarına puzolanik özellik göstermekle birlikte, eğer içerisinde önemli miktarda kil bulunduruyorsa, puzolanik özellik göstermesi için ısıtma işlemi ihtiyaç duymaktadır (47).

Aynı sınıflandırmada yapay puzolanlar silis dumanı, uçucu kül, yanmış tarım atıkları, kalsine edilmiş şeyler, genişletilmiş killer ve ısıtma işlemi uygulanmış kayalar olmak üzere 6 gruba ayrılmaktadır (47).

Mehta tarafından, çimento ve beton endüstrisinde mineral katkı olarak kullanılan yapay puzolanlarla ilgili yapılan sınıflandırmada, puzolanik aktivite ve bağlayıcılık ön plana çıkmıştır (48).

Yapay puzolanlar bu sınıflandırma sisteminde, puzolanik aktiviteleri dikkate alınarak 5 gruba ayrılmıştır. Silisli atıkların betonda kullanımı hakkında RILEM teknik komitesi tarafından da kabul edilen bu sınıflandırma, Çizelge 2.5'te verilmiştir (48,49).

Bu sınıflandırma sisteminin ilk grubunda bağlayıcı özelliğe sahip yüksek kalsiyumlu uçucu kül ($> \%20$ C) ve ani olarak soğutulmuş yüksek fırın cürufu gibi mineral katkılar yer almaktadır. Bu tip mineral katkılar, Portland çimentosu, alkaliler ve alçıda hidratasyonu ve mukavemet kazanma oranını hızlandırırlar (48).

İkinci gruptaki uçucu küller, kalsiyum oranları birinci gruptakilerden daha düşük ($\%10-20$ C) olduğundan ve camsı fazın aynı özellikleri taşımaması nedeniyle kısmen puzolanik ve daha az bağlayıcıdırlar. Camın bir kısmı alüminyum silikat camı, geriye kalan kısmı ise yüksek miktarda kalsiyum ve magnezyum içeren bir silikat camıdır (48).

Yüksek puzolanik davranış gösteren camsı silisten meydana gelen üçüncü grup yüksek derecede puzolan olarak kabul edilmektedir. Yoğunlaştırılmış silis dumanı ve kontrollü yakılmış prinç kabuğu külü bu gruba girmektedir (48).

Dördüncü grupta, normal puzolan olarak adlandırılan ve genellikle alüminyum ve demir ile değişik silikat camlarından meydana gelen, düşük kalsiyumlu uçucu kül gibi silisli atıklar yer almaktadır (48).

Yavaş soğutulmuş yüksek fırın cürufu ve alt külü gibi düşük reaksiyonlu mineral katkılar son grupta yer almaktadır (48).

Çizelge 2.5. Çimento ve beton endüstrisinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan silisli atıkların sınıflandırılması (48)

Sınıflandırma	Kimyasal ve mineralojik bileşim	Tanecik özellikleri
I. Bağlayıcı -Hızla soğutulmuş yüksek fırın cürufu	Başlıca kalsiyum, magnezyum ve alüminyum içeren silikat camı küçük miktarlarda kristalli melilit grubu ve mervinit bileşikleri bulunabilir.	İşlem görmemiş taneli malzemedir ve %5-15 nem içerir. Kullanılmadan önce kurudur ve toprak tanecikleri, genellikle 45 µm'den küçüktür (Blaine 400-500 m ² /kg). Tanecikler pürüzlü yapıdadır.
II. Bağlayıcı ve puzolan -Yüksek kalsiyumlu uçucu kül (>%10 C)	Başlıca kalsiyum, magnezyum ve alüminyum içeren silikat camı. Kristalli maddenin az bir miktarı, genellikle kuvarz ve C ₃ A'dır. Serbest kireç ve periklas bulunabilir. Yüksek kükürtlü kömürler olduğu takdirde CS ve C ₄ A ₃ S bulunabilir. Yanmamış karbon genellikle %2'den azdır.	Uygun toz taneciklerinin %10-15'i 45 µm'den büyüktür (Blaine 300-400 m ² /kg). Bir çok tanelerin çapı 20 µm'den küçük olup üç boyutlu ve küreseldir. Tane yüzeyi genellikle pürüzsüzdür. Fakat düşük kalsiyumlu uçucu küldeki kadar temiz değildir.
III. Yüksek derecede puzolan a. yoğunlaştırılmış silis dumanı b. yakma kontrollü üretilen pirinç kabuğu külü	Esası amorf yapıda silistir. Esası amorf yapıda silistir.	- Üç boyutlu ve küresel olan son derece ince toz taneciklerinin çapı genellikle 0,1 µm'den azdır (Yüzey alanı, nitrojen absorpsiyonu ile yaklaşık 20 000 m ² /kg). - Taneler genellikle 45 µm'den küçüktür ve yüksek oranda gözeneklidir (yüzey alanı nitrojen absorpsiyonu ile yaklaşık 60 000 m ² /kg).
IV. Normal puzolan - Düşük kalsiyumlu uçucu kül (<%10 C)	Başlıca alüminyum ve demir içeren silikat camı genellikle az miktarda kuvarz, mullit, hematit ve magnetit'ten ibaret kristalli madde bulunur. Yanmamış karbon genellikle %5'den azdır. Fakat bazen %10'a kadar çıkabilir.	Uygun toz taneciklerinin %15-30'u 45 µm'den büyüktür (Blaine genellikle 250-300 m ² /kg). Taneciklerin pek çoğu, üç boyutlu ve küresel olup ortalama 20 µm çaplıdır. Cenoküre ve pleroküre bulunabilir.
V. Diğerleri a. yavaş soğutulmuş yüksek fırın cürufu b. alt külü, kazan cürufu, tarlada yakılmış pirinç kabuğu külü	Kristali silikat minarelerden meydana gelir ve oldukça az miktarda amorf madde vardır.	Malzemeler puzolanik davranışını yada bağlayıcılığını geliştirmek için çok ince tane ölçüsünde öğütülmüş olmalıdır. Toprak taneleri pürüzlü yapıdadır.
Camın davranışı ve bileşimi (%20'den fazla C içeren uçucu küllerde, düşük kalsiyumlu uçucu küldeki camdan çok farklıdır. Cam, yüksek kalsiyumlu uçucu külde daha reaktiftir.		

2.5. Puzolanik Aktivite ve Puzolanik Reaksiyon

Puzolanik aktivite terimi, puzolanların aktif bileşenleri ile kireç ve su arasında meydana gelen tüm reaksiyonları kapsar (42). Diğer bir ifade ile puzolanik aktivite; puzolanların bir takım maddelerde var olan kalsiyum hidroksitle rutubetli ortamda reaksiyona girme ve sertleşme kapasiteleridir. Puzolanik aktivite aynı zamanda; puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği ve ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği, olarakta ifade edilebilir (1). Bu tanımlar tam olmamalarına rağmen, teknik ve pratik açıdan kabul edilebilirdirler. Hidratasyon işlemi içerisinde puzolanların aktif fazlarının değişiminin takip edilmesinin zor olmasına rağmen, puzolanik reaksiyonun ilerleyişi yaygın olarak sistemdeki serbest kirecin azalması türünden veya florentin saldırı metodu kullanılarak asit içerisinde çözünebilir silis + alümin miktarındaki artış türünden değerlendirilir.

Puzolanik aktivite terimi, puzolanların bağlayabileceği maksimum kireç miktarı ve bunu puzolan hangi oranda karıştırıldığında gerçekleştirebilir, şeklinde iki parametre içermektedir. Her iki faktörde puzolanların doğasına ve daha büyük oranda da aktif fazların kalite ve miktarına bağlıdır. Hidratasyon boyunca olan kompleks olaylar gibi puzolan grubu (ailesi) farklılıkları; bir puzolanik aktivite modelinin tanımlanmasına imkan vermez, sadece genel bir eğilimin belirlenmesini mümkün kılar (42).

Sulu ortamlarda puzolanların bağladıkları kireç miktarları, puzolan tipine göre önemli oranda değişiklik gösterebilir. Bağlanan kireç miktarının esas itibarıyla aşağıdaki nedenlere bağlı olduğu, genel kabul gören bir durumdur (42):

- Aktif fazların doğasına: Örneğin zeolit familyası içerisinde herschelitte'nin analcime'den daha aktif olduğu düşünülmektedir. Zeolitik puzolanlar ise camsı puzolanlardan daha aktif olarak kabul edilmektedir. Cam içeren farklı puzolanlarda, farklı kireç bağlama kapasitesine sahip

olabilmektedirler (cam içeren Bavarian trası Rhine trasından daha az kireç bağlamaktadır).

- Aktif fazların puzolan içerisindeki miktarına: Diğer özelliklerin eşit olduğu durumlarda, aktif fazlar daha fazla ve etkisiz veya kristal fazların daha az olduğu durumlarda bağlanan kireç miktarı daha fazladır (quartz, mullite ve magnetit gibi).
- Aktif fazların S içeriğine: Bağlanan kireç miktarı aktif fazların S içeriğiyle ilişkilidir. Bu da volkanik camlarda ve uçucu küllerde %45-75 arasında değişirken, doğal silika jelleri veya silis dumanı gibi çok aktif amorf mikro silikalarda ise %95'lere ulaşır, bazanda geçer (50). Ancak bazan silika içeriği daha düşük olan bir puzolan, silika içeriği daha yüksek olan bir puzolandan daha fazla kireç bağlayabilir. Bu da silika içeriğine ilaveten diğer kimyasal ve yapısal faktörlerinde, puzolanik aktivitenin belirlenmesinde önemli roller oynadığı anlamına gelmektedir.
- Karışımın kireç/puzolan oranına: Belirli sınırlar içerisinde kireç/puzolan oranı arttıkça bağlanan kireç miktarı artar.
- Kür süresinin uzunluğuna: Bağlanan kireç miktarı kür süresine bağlıdır; fakat bağlanan kireç oranı bir puzolandan diğerine çok büyük farklılıklar gösterebilir. Costa ve Massazza tarafından yapılan çalışmada, 90 günlük kür sonunda doğal puzolanlarda reaksiyonlar hemen hemen sonlanırken; uçucu küllerdeki reaksiyonlar sonlanmadan çok uzaktadır (51).
- Puzolanın özgül yüzey alanına: Massazza puzolanik aktivitenin esas olarak kısa vadede puzolanın özgül yüzey alanına, uzun vadede ise puzolanın kimyasal ve minaralojik kompozisyonuna bağlı olduğunu göstermiştir (52).
- Su/katı karışım oranına: Karışımın su oranının daha yüksek olması, daha fazla kireç bağlama oranı anlamına gelmektedir (42).
- Sıcaklığa: Puzolanik reaksiyon oranı sıcaklıkla birlikte artar. Esasen sıcaklık mikro silikanın reaktivitesini artırır. Kireç/silika oranına bağlı olarak 55 °C'de 2,5 saatlik işlemin sonrasında bağlanan kireç, ilave edilen

CaO'in %25-55'i kadardır. 90 °C'lik sıcaklıkta ise bu değer %68-90'lara kadar ulaşır (42).

Bir puzolanı kullanmak için onun puzolanik aktivitesini belirlemek gerekir. Puzolanik aktivite olayı üzerine sayısız araştırma yapılmıştır. Böyle bir aktivitenin değerlendirilmesi oldukça zordur ve bu nedenle karışık bileşenlerin teknik davranışlarını temsil edecek sonuçları bulmak için, bir çok test yapılmalıdır (7). Önerilen bir çok metoda karşın, bu problem tam olarak çözülmüş sayılmaz. Çünkü hala, bütün puzolan tiplerine uygulanabilir ve aynı zamanda maddenin kullanım karakteristikleriyle uyumlu, hız ve hassasiyet açısından kabul edilebilir olan, genel bir test metodu yoktur. Fakat, bu durum şaşırtıcı değildir; çünkü, puzolanik aktivite bir çok faktöre bağlıdır (53,54).

Kimyasal ve mineralojik kompozisyon, morfoloji (şekli), camı faz / kristaller'den oluşan faz oranı ve öğütme inceliği aktif katkıların reaktivitesini belirleyen ana unsurlardır. Şimdilerde genellikle katkıların reaktivitesinin çoğunlukla onların tane karakteristiklerine ve mineralojik bileşimlerine bağlı olduğu kabul edilmektedir (7).

Puzolanik aktivitenin belirlenmesinde genellikle kimyasal, fiziksel ve mekanik olmak üzere üç yöntem kullanılmaktadır.

Geçmiş çok eski yıllara dayanan kimyasal yöntemler (soğuk hidroklorik asit ya da hidroflorik asit veya hidroflorik ve nitrik asit karışımı içinde çözünürlük gibi), hidratlı kireç veya Portland çimentosuyla karıştırılan puzolanların sabitleştirdiği kireç miktarını belirlenmesi, puzolan-kalsiyum hidroksit süspansiyonunun bir saat kaynatılmasından sonra, başlangıçtaki ve kaynatma sonundaki serbest kireç miktarlarının karşılaştırılması veya puzolanların kireçle reaksiyonu neticesinde eriyen silis ve alüminyum oksit miktarlarının belirlenmesi vb. esaslara dayanmaktadır (53,55).

X-ışınları difraksiyonunu, fiziksel yöntemlerle puzolanik aktivite belirlenmesine örnek olarak verebiliriz (53).

Puzolanik aktivitenin belirlenmesinde kullanılan mekanik yöntemlerin esasını, puzolan-kireç ve puzolan-çimento harçlarının mukavemetlerinin belirlenmesi teşkil etmektedir. Ancak kireç daha sabit bir karakteristiğe sahip olduğundan, puzolan-kireç harcının kullanılması test sonucuna olan güvenilirliği artıracaktır. Diğer yandan puzolan çimento harcı, klinker-puzolan birleşiminin doğrudan değerlendirilmesine imkan sağlar (53).

2.5.1. Puzolanik reaksiyon ürünleri

Her iki karışımın tüm kimyasal bileşenleri aynı alana düştüğü için, puzolan-kireç karışımlarının reaksiyonları, Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan bileşelerin aynısını üretirler. Yine aynı nedenle, farklı tip puzolanlarda aynı alümina ve silika hidratları üretirler. Aralarındaki küçük farklılıklar önemsizdir ve genellikle hidrate fazların yapısından (doğasından) ziyade miktarını etkiler (42).

Doygun veya hemen hemen doygun kireç içerisine yayılmış doğal puzolanlar, kireçle reaksiyona girerler ve kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ve hegzagonal (altıgen) alüminatlar (C_4AH_{13}) oluştururlar. Puzolan-kireç pastası üzerinde yapılan çalışmalardan da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Fazla sulu ortamlarda alçı ilavesi kireç bağlanmasını hızlandırmıştır. Pasta içerisindeki hidratasyon ile sulu ortam içerisindeki hidratasyonlar birbirinden farklılıklar göstermektedir. Farklı koşullar altında meydana gelen bileşenler birbirinden farklıdır ki, bunun muhtemel sebebidir, fazla suyun reaksiyonun final aşamasına erişilmesini hızlandırmasıdır. Bunun da ötesinde pastada oluşan hidratasyon ürünleri daha küçük ve daha düzensizdir (42).

Puzolanlar ve kireç solüsyonları arasındaki reaksiyonların devam etmesi ile, hegzagonal (altıgen) kalsiyum alüminat ve kalsiyum silika hidratın yanında karboalüminat, gehlenit hidrat ve hidrogarnet diye bilinen diğer bileşenlerde meydana gelir. Bağlanan kireç, puzolanların başlangıçtaki ağırlığının %40-60'ına ulaştıktan 70-150 gün sonra hidrogarnet görülür (42).

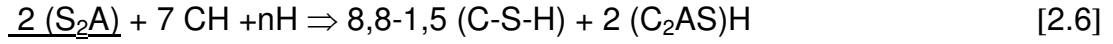
Puzolan-kireç pastası içerisinde alçının mevcut olması durumunda etrenjitte oluşur. Kalsiyum sülfat muhtevası belirli değerleri aştığı zaman, etrenjit oluşması pastanın ufalanmasına neden olur (42).

C-S-H'nin C/S oranı değişkendir ve kullanılan analitik metot kadar puzolan tipine, kür süresi ve sıcaklığına ve kireç/puzolan oranına da bağlı görünmektedir. Opal esaslı bir puzolan ile, kür sıcaklığında bir fonksiyonu olan C/S 0,75-0,87 arasında değişirken; camsı bir puzolan ile oranlar önemli miktarda artış göstererek 1,35-1,75 arasında değişmiştir. Bu da demek oluyor ki, çalışma süresi içerisinde opal esaslı puzolan mevcut tüm kireci tüketirken, camsı puzolan tüketememiştir ve karışım içerisinde hala serbest kireç mevcuttur (42).

Puzolanik reaksiyonun ilerleyişi, reaksiyon ürünleri içerisindeki silikat iyonlarının dağılışındaki değişimden görülebilir. Polimer türlerinin muhtevası daima artarken, monomer içeriğinin belirli bir seviye civarında inip çıktığı (dalgalandığı), dimer miktarının ise maksimum değere kadar yükselip sonra azaldığı görülmektedir (56).

50-90 °C arasındaki sıcaklıklarda puzolanik reaksiyonun ana ürünü, Portland çimentosunun hidratasyonundan elde edilene benzer amorf C-S-H ve zayıf kristalize tobermorittir (57).

Puzolanik çimento katkı maddeleri kalsiyum hidroksiti kullanarak, aşağıdaki denkeleme benzer bir şekilde, daha fazla çimentolaşabilen bileşenler (ilave C-S-H jeli) meydana getirirler (30,58).



puzolan

Çimento ya da betondaki puzolanik reaksiyon, sadece kalsiyum hidroksit ve silisin birbirini etkilemesinden ibaret değildir. C-S-A- $\bar{S}$ -H sistemindeki bütün bağlayıcı davranışları kapsamaktadır. Bu nedenle, çimento hidratasyonunda puzolanik reaksiyon ile bağlayıcı reaksiyonlar arasındaki fark, ortaya çıkan ürünlerin özelliğinden değil reaksiyon sürelerinden kaynaklanır (59).

Swamy (47)'ye göre kalsiyum hidroksit-puzolan reaksiyonu, alıp-verme reaksiyonu ile bir yandan diğer yana kireç absorbe eden zeolitlerin bulunmasından dolayı, meydana gelmektedir. Ancak, zeolit içermeyen bir çok puzzolanda kalsiyum hidroksit-puzolan reaksiyonu sonucunda bu mekanizma ile açıklanamayan yeni bileşikler meydana getirmektedirler (60).

Takemoto ve Uchikava, difüzyon kontrollü çözülme mekanizmasına göre, SiO_4^{-4} ve H tanecik yüzeyinde SiOH grubunun çökmesi sonucunda, puzolanik taneciklere yüksek alkali-kireç çözeltisinde su ile hücum edildiğini belirtmektedirler (63). Sonuç olarak tanecik yüzeyi, negatif olarak yüklenir ve Ca^{2+} absorbe eder. Tanecik yüzeyindeki Ca^{2+} , silis ve alümin ile tepkimeye girerek zamanla koyulaşan bir tabaka oluşturur. Kalsiyum silika hidratlar ile kalsiyum alüminatların yayılma özelliklerindeki farkların bir sonucu olarak, puzolanın yüzeyindeki tortular, puzolandan uzakta çekirdeklenir (61).

2.6. Puzolan İçeren Çimentolar

Portland çimentosu ve su ile karıştırıldığında puzolanlar, klinker içerisindeki kalsiyum silikatların hidratasyonu boyunca oluşan kalsiyum hidroksitlerle reaksiyona girerler. Bu reaksiyonun bir sonucu olarak, hidratasyon ürünleri içerisindeki nihai portlandit muhtevası kontrol Portland çimentosunda bulunandan daima daha azdır. Bu süspansiyonlar, pastalar, harçlar ve

betonlar için olduğu gibi doğal ve yapay tüm puzolanlar için doğrudur. Portland çimentosu ve puzolanın aynı anda bulunması kendi hidratasyon reaksiyonlarını değiştirir. En iyi teknik performansın elde edilmesine olanak sağlayacak şartları belirleyebilmek için, bu karşılıklı etkinin detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir (42).

Portland çimentosu ve puzolanın karıştırılması ile elde edilen puzolanik çimentolar bol su içerisinde dağıtılır ve belirli şartlar altında muhafaza edilirse, doymamış kalsiyum hidroksit çözeltisinde artışa neden olur (62). Artı kalan portlandit miktarı puzolan/çimento oranı kadar puzolanın aktivitesine ve klinker tarafından açığa çıkarılan kireç miktarına bağlıdır. Doğal puzolan içeren puzolanik çimentolar veya siliko-alümine uçucu küller dikkate alındığında puzolan / Portland çimentosu oranı 1:2'dir.

Prensip olarak, puzolan Portland çimentosuna çimento üretim tesislerinde veya inşaat alanında ilave edilebilir. Birinci durumda, puzolan klinker ve alçı ile birlikte öğütülür veya ayrı öğütülüp, uygun ekipmanlarla öğütülmüş alçı ve klinkerle homojen olarak karıştırılır. İkinci durumda puzolan Portland çimentosu ile beton mikseri içerisinde karıştırılır. Puzolan ince agreganın tane büyüklüğü dağılımını iyileştirmek amacı ile ilave edildiğinde bu işlem betonun mukavemet ve durrabilite açısından kalitesini iyileştirir. Fakat, puzolan Portland çimentosunun bir kısmı ile ikame etme şeklinde kullanıldığında ve ikame oranı nispeten yüksek olduğunda; özellikle erken yaştaki mukavemette ciddi kayıplar olabilir. Aşağıda verilen nedenlerden dolayı da, puzolanın arazide ilave edilmesi uygun bulunmamaktadır (42).

- Genellikle, puzolan arazide Portland çimentosu ile karıştırıldığında elde edilen homojenlik derecesi, çimento fabrikada karıştırıldığında elde edilenden daha düşüktür.
- İnşaat sahalarında çok ender olarak, puzolan ve karışımın özelliklerini kontrol etmek için ihtiyaç duyulan personel, ekipman ve zamana sahip olunur.

2.7. Pozolan İçeren Çimentoların Hidratasyonu

Klinker (alçı içeren) ve pozolan farklı reaksiyon işlemlerini takip ederler ve farklı oranlarda reaksiyon verirler. Bununla birlikte her iki malzeme karşılıklı etkiye sahiptir. Genel kanıya göre pozolanik reaksiyonlar (en azından yaygın doğal ve yapay pozolanlar için) su ile karıştırıldıktan 3-14 gün sonra görülür; diğer bir ifade ile Portland çimentosu içerisinde bulunan C_3S 'in %70-80'nin reaksiyona girmesi ile görülür. Pozolanik reaksiyonun oranı sıcaklığa olduğu kadar pozolanın ve karışımın özelliklerine bağlıdır (42).

Portland çimentosunun hidratasyonunun kinetikleri prosesin başında bile pozolan tarafından etkilenir ve bu etki aşağıdakilerde meydana gelen değişikliklerle kendini gösterir:

- hidratasyon ısısı,
- portlandit muhtevası,
- bağlanan su
- C_3S 'in hidratasyon derecesi,
- pozolanın reaksiyon derecesi.

Silika polimerizasyon derecesi gibi, pozolanın hidratasyon üzerindeki etkisini gösteren başka olaylarda vardır. Fakat, yukarıda bahsedilen değişiklikler çok daha fazla dikkate alınmaktadırlar.

Hidratasyon işlemi ısı değişim oranı ve karışım tarafından açığa çıkarılan toplam hidratasyon ısısı kaydedilerek izlenebilir. Pozolan içeren çimentolarda durgun periyot kısalır ki, buda hızlandırılmış bir klinker hidratasyon oranına neden olur. Pozolanların C_3S üzerinde hidratasyonu hızlandırıcı bir etkisi vardır. Doğal pozolanlardan kaynaklanan bu hızlandırma henüz deneysel kanıtlarla detaylı bir şekilde açıklanmış değildir. Ca^{2+} iyonlarının pozolan yüzeyi üzerine çekilmeleri, muhtemelen bunların

solüsyondan uzaklaşmasını kolaylaştırmakta ve buda C_3S 'in hidratasyonunu hızlandırmaktadır. Tabiki özgül yüzel alanı, kimyasal bileşimi, yüzeyinin fiziksel durumu ve alkalileri serbest bırakma hızı tüm puzolan özellikleri çimentonun başlangıç hidratasyon oranını hızlandırmaya katkıda bulunabilir.

Portland çimentolarında hidratasyonun ilerleyişi genellikle portlandit içeriğindeki zamana bağlı artış ölçülerekte izlenir. Bununla birlikte, 28-91 gün sonra hidratasyonun ilerlemesine rağmen portlandit içeriği hafifçe (63) veya belirgin bir şekilde (64) azaldığı için; Portland çimentosunun hidratasyon derecesini açıklarken değerler dikkatli kullanılmalıdır.

Puzolanın mevcudiyeti, çimentoların bilinen hidratasyon rotalarını değiştirir. Bu nedenle portlandit içeriği sadece klinkerin hidratasyon derecesine değil, puzolanik reaksiyonun ilerleyişine, karışımın ve hidratların bileşimine, puzolan tipine, sıcaklığa, su/çimento oranına v.b. faktörlere bağlıdır.

Çimento pastası içerisindeki reaksiyona girmemiş C_3S 'in tespit edilmesi, katkılı ve benzeri Portland çimentolarında hidratasyonun ilerleyişini karşılaştırmak için çok faydalı bir metottur. Çimento puzolanik malzemeler içerdiği zaman C_3S 'in hidratasyon derecesi artar (65,66).

Puzolan içeren çimentolu sistemlerde salisilik asit-metanol (metil alkol), salisilik asit-metanol ve potasyum hidroksit-şeker-su solüsyonu (65) veya pikrik asit-metanol-su solüsyonu (67) gibi seçici ayrıştırıcı metotlar kullanılarak yapay ve doğal puzolanların reaktif olmayan muhtevaları hesaplanabilir. Bu metotlarda puzolanın reaksiyona giren kısmı verilen bir hidratasyon periyodunun başında ve sonunda tespit edilen çözünmeyen kalıntılar arasındaki farktan hesaplanır.

2.7.1. Puzolan içeren çimento pastaları içerisinde oluşan bileşikler

Puzolanik çimentoların hidratasyonu sonucu ortaya çıkan reaksiyon ürünleri, Portland çimentosu pastasında ortaya çıkanlarla aynıdır. Çok nadir olan farklılıklar, morfolojilerini olduğu kadar çeşitli bileşenlerin oranlarını kapsamaktadır. Sertleşmiş pastalarda bulunan ana hidratlar aşağıdaki gibidir:

- Etrenjit,
- Tetrakalsiyum alüminat (sıklıkla karbonatlı),
- Monosülfoalüminat,
- C-S-H,
- C_2ASH_8 ,
- CH,
- $C\bar{C}$

Doğal puzolan veya uçucu kül içeren çimentolarda etrenjit çok çabuk oluşur. Etrenjit uçucu kül içeren çimentolarda 5 saat ile 28 gün arasında, doğal puzolan içeren çimentolarda ise 1 yılda gözlenir. Etrenjit üç gün sonra kaybolabilir ve monosülfata dönüşebilir. Etrenjitin monosülfata dönüşümü, mevcut $\bar{S}$ miktarına ve çimento pastasının $\bar{C}$ (CO_2) muhtevasına bağlıdır. Aslında, karbon dioksit fazla kalsiyum alümina hidratla reaksiyona girer ve karboalüminat oluşturur ki, bu da onun etrenjitle reaksiyona girerek monosülfat oluşturmasını engeller (42).

Tetrakalsiyum alümina hidrat çimentonun $A/\bar{S}$ oranına bağlı olarak çimento pastaları içerisinde bulunabilir. Fakat o genellikle ya atmosferdeki karbondioksit tarafından kirletildiği için, ya da çimento içerisinde filler olarak kalsit bulunmasından dolayı karbonatlaşır (68).

C-S-H 24 saat sonra görülür (69) çünkü, puzolanik malzemelerin varlığı C_3S 'in hidratasyonunu hızlandırır. C-S-H miktarı zamana bağlı olarak artar.

C_3S 'in hidratasyon ürünü olan C-S-H'nin bileşiminde görülen düzensizlikler, Portland çimentosu ve puzolan içeren çimentoların hidratasyonu ile oluşan C-S-H'nin bileşimi dikkate alındığında da yine görülür. Ayrıca Portland çimentolarının hidratasyonundan oluşan C-S-H, C_3S 'in hidratasyonundan oluşan C-S-H'a görede bazı farklılıklar gösterir.

Bir çok araştırmacı iç ve dış ürünlerde bazı farklılıkların olduğunu ifade etmişlerdir. Daha içteki ürün ortalaması 1,5-2,10 arasında değişen C/S oranına sahip, saf C-S-H gibi görünmektedir (70-74). Dış ürünün C/S oranı iç üründen daha yüksek görünmektedir (1,60-2,70) (70,73).

İç ürün genellikle saf veya safa yakın C-S-H gibi görüldüğü zaman, daha dış ürün içerisinde Al, S ve K gibi diğer bir çok elementi ihtiva eder (70). Sadece çimento kısmen hidrate olduğunda veya kimyasal dengeye ulaşılmaya çok uzak olunması gibi durumlarda iç ve dış ürünler farklı bileşimler gösterirler. Tamamen hidrate olmuş 10 yıllık beton içerisindeki C-S-H içerisinde, sadece bir bileşimin (C/S=1,82-1,97) baskın olduğu tahmin edilmektedir (73).

C/S oranı azalan su/çimento oranıyla artar (74) ve buda C-S-H bileşimindeki farklılığın ana sebeplerinden biri ve betondaki C/S oranının neden çimento pastasındakinden daha düşük olduğunun bir nedeni olabilir (74,75). C-S-H içerisinde bulunan minör elementler, geniş bir yelpazede değişiklikler gösterir ki buda C/S oranındaki yüksek değişkenliği açıklamaktadır. Kısacası elektron mikro analizi ile C-S-H'nin bileşiminde tespit edilen düzensizlikler ve değişkenliklerin bir çok nedeni olabilir:

- Tamamen ulaşılmamış kimyasal denge,
- Ca ve Si bölgelerinin farklı miktarlardaki yabancı elementlerle yer değiştirmesi,
- C-S-H ve diğer hidrate bileşenlerin tam karışımı,

- Numune hazırlama teknikleri ve cihazlar tarafından sağlanan verilerdeki hatalar.

Puzolanik reaksiyon sonucu oluşan C-S-H'nin bileşimi, C_3S ve C_2S 'den oluşan C-S-H'nin bileşiminden farklılıklar göstermektedir. Bunun nedeni farklı oluşum ortamlarıdır. Örneğin 8 günlük hidratasyondan sonra bir puzolan olan uçucu külün varlığı, C_3S taneleri etrafındaki C-S-H'nin C/S oranını 1,71'den 1,55'e düşürmüştür. Daha düşük C/S oranı daha yüksek potasyum muhtevasını çağrıştırmaktadır (71).

Yüksek-kireçli uçucu kül içeren çimentolarda C-S-H'nin yanında C_2ASH_8 'de (gehlenit hidrat) oluşur. Herhangi bir durumda eğer çimentoya alçı eklenirse, C_2ASH_8 tedricen azalır ve neticede 60 gün sonra kaybolur.

Puzolanlı çimentolarda mevcut puzolan miktarı, klinkerlerin kalsiyum silikatlerinin açığa çıkardığı tüm CH'i bağlamak için yeterli değildir. Bu nedenle 10 yıl sonra bile portlandit oluşması bunu doğrulamaktadır. Diğer yandan, uzun süre kür edilmiş puzolanik çimentolar içerisinde serbest kalsiyum hidroksitin var olması, yavaş puzolanik reaksiyon oranına ve Ca'nın puzolan taneciklerine ulaşmaktaki ve onlarla reaksiyona girmekte karşılaştığı zorluklara atfedilebilir.

Karbondioksit, hidrate çimento bileşenleri ile reaksiyona girebilir ve kalsiyum karbonat oluşturur. Karbonasyon puzolan içeren çimentolarda da vuku bulur. Fakat, bunun diğer hidratları değil sadece portlanditi kapsadığı görülmektedir. Gerçek $CaCO_3$ eşdeğer $Ca(OH)_2$ 'ye dönüştürüldüğünde, 90 gün ile 10 yıl arasında portlandit miktarı değişmez (76,77).

Çimento pastasının boşluklarında bulunan solüsyon atomik absorpsiyon spektroskopisi, plazma fotometrisi ve iyon kromatografisi (renkli fotoğraf) v.b. hassas metotlar kullanılarak analiz edildiğinde; çimento içerisinde puzolanik

malzeme bulunmasının boşluk çözeltisinin bileşimini değiştirdiği görülmüştür. Bu da betonun ve betonarmenin durabilitesi üzerinde etkili olabilir.

Puzolan içeren çimentolar içerisindeki portlandit miktarını belirlemek diğer Portland çimentolarına göre daha komplekstir. Puzolan içeren pastaların toplam portlandit miktarı, bağlayıcı (Portland çimentosu + puzolan) referans alındığında kontrol Portland çimentosu pastasındakinden daha düşüktür. Fakat 28 günlüklerde referans olarak sadece Portland çimentosu alındığında yüksekte olabilir, düşükte olabilir veya aynıda olabilir (63,66,68). Daha pratik bir ifadeyle, ilk ayda puzolanlı çimento pastalarının portlandit mutevası, aşağı yukarı kontrol Portland çimentosunda oluşanla seyreltme faktörünün çarpımına eş değerdir.

Massazza tarafından yapılan bir çalışmada, %30 doğal puzolan veya uçucu kül içeren bir çok çimento karşılaştırılmış ve doğal puzolan içeren numunelerin uçucu kül içeren numunelerden daha fazla kireç bağladığı tespit edilmiştir (51).

Uzun vadede sertleşmiş puzolanik çimentolar içerisindeki süreklilik arzeden önemli miktardaki portlandit yüzdesinin nedenini açıklamak, pek mümkün gibi görünmüyor. Yaygın volkanik puzolanlar kendi ağırlıklarının en fazla %50'si kadar Ca(OH)_2 bağlayabilirler. Bu nedenle olgunlaşmış normal Portland çimentosu pastası içerisindeki portlandit miktarının CaO 'in %22'si olduğu dikkate alındığında ve puzolan muhtevası %35-40 olan bir puzolanik çimento kullanıldığında, mevcut puzolan miktarı kalsiyum silikatların hidratasyonu boyunca oluşan portlanditlerin tamamını veya tamamına yakınına bağlamak için yeterli olmalıdır. Tersine farklı volkanik puzolanlarla yapılan puzolanik çimento pastalarının içerisindeki portlandit miktarı 90 günlük kürün sonunda %3-8 arasında değişmektedir (51). Tabiki gerçek kalsiyum hidroksit miktarı özellikle puzolanın doğası gibi bir çok faktöre bağlıdır.

Pastaların portlandit miktarlarındaki dalgalanmaya, farklı olayların aynı anda olması neden olmaktadır.

- Klinkerin kalsiyum silikatlerinin hidrolizinin hızlanması,
- Hidrate fazların bileşimindeki değişiklikler,
- Puzolanik reaksiyon,
- Reaksiyonların ilerleyişinin önündeki engeller gibi.

Uzun süre kür edilmiş pastalarda hala portlandit bulunmasını, reaksiyona giren portlandit kristallerinin ve puzolan taneciklerinin karşılaştıkları zorluklara atfetmek gerekmektedir. Muhtemelen henüz bağlanmamış puzolan tanecikleri uzaktaki kalsiyum hidroksit kristalleri ile (eğer bu kristaller puzolanik reaksiyon ürünleri ile çevrelenmiş ise) reaksiyona giremeyecektir. Aşağıdaki argümanlarda bu var sayımı desteklemektedirler.

- Serbest kireç pasta, harç ve beton içerisinde tedricen azalır,
- Portland çimentosunun inceliği arttığı zaman, önce daha fazla yüzeyin reaksiyona girmesinin bir sonucu olarak bağlanan kireç miktarı artar; daha sonra çözünmeyen türlerin difüzyonu ile artan zorluklardan dolayı, bağlanan kireç miktarı azalır.
- Pastaların önemli oranda CH muhtevasına sahip olmalarına rağmen, puzolanlar esas itibari ile ve dikkate değer biçimde 28. günden sonra reaksiyona girerler (65,67)

2.7.2. Puzolan içeren çimentoların reaksiyon mekanizmaları

Hidratasyon ürünlerinin oluşumunda (pasta mikro yapısının gelişimi gibi) Portland çimentosu ve puzolanların doğası, bileşenlerin inceliği, s/ç oranı ve sıcaklık gibi bir çok faktöre bağlıdır. Bu nedenle klinker hidratasyonu ve puzolanik reaksiyon proseslerini tam olarak tanımlamak imkansızdır. Bunun yanında puzolan içeren çimentoların hidratasyonu, diğer çimentolarla ortak

genel bir trend takip eder ki, buda bize bazı genel sonuçlar çıkarma imkanı sağlar. Elbetteki bunlar özel testler ve araştırmalardan elde edilen diğer gözlemlerle tamamlanmalıdır (32).

Feldman (63) elektron mikroskop araştırması esasına dayanan çalışması ile, uçucu kül içeren çimentoların hidratasyonunu takip eden mükemmel bir şema hazırlamıştır. Bu şema puzolanik malzeme içeren tüm çimentolara adapte edilebilir (63).

Puzolan içeren çimentoların hidratasyon prosesi malzemelerin bireysel özelliklerine ve çevresel şartlara bağlı olarak farklı uzunluktaki basamaklara ayrılabilir. Basamaklar, klinker hidratasyonu ve puzolanik reaksiyonun tüm reaksiyon süresi boyunca hemen hemen örtüştüğünü göstermektedir.

- Hidratasyondan 1 saat sonra, etrenjit iğnesi şeklindeki klinker taneciklerinin reaksiyon işaretleri ve tanımlanması biraz zor küçük taneli ürünler vardır. Görünen uçucu kül tanecikleri üzerinde biraz hidratasyon ürünü mevcuttur.
- 4 saat sonra, uçucu kül taneciklerinin yüzeyinde etrenjite ilaveten, CH görünür. Bunların bazıları ilerleyen saatlerde daha fazla belirginleşecek oyulmaların kesin işaretlerini göstermektedir.
- 8 saat sonra klinker tanecikleri etrenjit, C-S-H ve bazı geniş CH kristalleri ile çevrelenir.
- 12 saat sonra bu bileşikler uçucu kül tanecikleri üzerinde bile oluşur.
- 18 saat sonra pasta biraz kohezyon kazanır, Aft çubukları daha iyi kristalleşir, Haley tanecikleri daha da çoktur ve CH kristalleri büyümeye devam eder.
- 1 gün sonra bazı boşluklardaki Aft kristallerinin dahada uzadığı birbirine geçtiği görülmektedir. Bazı uçucu kül taneciklerinin reaksiyon verdiği görülmektedir.

- 3 gün sonra bazı uçucu kül tanecikleri kısmen bir reaksiyon tabakası ile çevrelenir. Reaksiyona girmeyen kısmın reaktif olmayan kristal bileşenler yönünden nispeten zengin olduğu, reaksiyon veren kısmın ise reaktif cam yönünden zengin olduğu var sayılmaktadır.
- 14 güne kadar CH ve C-S-H'dan sürekli devam eden doldurmadan dolayı, daha yoğun bir yapı meydana gelir.
- Daha sonraki yaşlarda klinker reaksiyonu gerilerken, puzolanik reaksiyon iyonların sertleşmiş pastalar içerisindeki hareketleri duruncaya kadar, tedricen devam eder.

2.8. Puzolan İçeren Harçlar

2.8.1. Mikro yapıları

Agrega taneciklerinin varlığı dikkate alınmadığında, puzolan içeren harçların mikro yapıları benzer pastalardan çok az farklılıklar gösterir. SEM gözlemleri, kalsiyum hidroksitin puzolan tarafından tüketilmesinin tüm pasta hacminde olduğu gibi, agrega macun birleşim yerindeki portlandit kristallerinin sayısında ve büyüklüğünde de bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Serbest kireçteki azalma harç içerisindeki çatlakları azaltır ve homojenliği iyileştirir (78). Genellikle puzolanik çimentolarla yapılan harçlar, benzer Portland çimentoları ile yapılan harçlardan daha yüksek bir poroziteye sahiptir.

2.8.2. Mekanik özellikleri

Priz

Doğal puzolan içeren çimentoların priz süresi, Portland çimentolarından elde edilen tipik değerlerden fazla farklılık göstermez. Ancak, uçucu küller priz başlangıç ve priz sona erme sürelerinin her ikisinde geciktirirler (79). Uçucu

küllerin bu farklı davranışları doğal puzolanlarla karşılaştırıldığında, bunun muhtemel nedeninin uçucu kül içerisindeki mevcut karbon tanecikleri olduğu düşünülmektedir. Silis dumanının priz sürelerini uzattığı söylenmekte (80) fakat, genellikle akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanıldığından dolayı, silis dumanının geciktirici etkisini ayırt etmek oldukça zordur.

Mukavemet

Puzolan, klinkerin hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile, biraz gecikmeli olarak reaksiyona başlar ve bundan dolayı en azından başlangıçta karıştırıldığı Portland çimentosunu seyrelten, etkisiz bir malzeme gibi davranır. Bununla birlikte puzolan suyla karıştırıldıktan 8 saat sonra, klinker bileşenlerinin erken hidratasyonunu hızlandırır. Bir bütün olarak ele alındığında, Portland çimentosunun kısmi olarak puzolanlarla yer değiştirmesi, genellikle çimento sertleşmesinin başlangıç oranını azaltır. Fakat, daha ileriki yaşlarda durum tersine döner ve puzolan içeren çimentolar, benzer kontrol Portland çimentoları ile aynı, hatta daha yüksek mukavemete ulaşabilirler (81-83).

Başlangıçtaki bu azalma doğal puzolanlarda, yüksek ve düşük kireçli uçucu küllerde ve silis dumanında vuku bulmaktadır (81-83). Portland çimentosu ve puzolanik çimento arasındaki mukavemet farkı, yaş ilerledikçe azalır ve neticede tamamen kaybolur veya çok az kalır. Telafi noktası (puzolanik çimento mukavemetinin Portland çimentosu mukavemetine ulaşması) puzolanik aktiviteye olduğu kadar, puzolanın ve Portland çimentosunun inceliğine bağlıdır (84).

Puzolanik çimentolar direkt olarak çimento fabrikasında hazırlandığı zaman, Portland çimentosunun puzolanlarla yer değiştirmesinden kaynaklanan daha yavaş sertleşme oranı, büyük problem oluşturmaz. Çünkü, çimento üreticileri katkılı çimentoların mukavemet değerlerinin standartlardaki değerleri

sağlaması için, gerekli tüm önlemleri alabilirler. Pozolan çimentoya inşaat sahasında eklendiğinde, pozolanın ve Portland çimentosunun özellikleri daha fazla iyileştirilemez ve karışımın özelliklerini optimize etmenin mümkün olan tek yolu ise, çimento muhtevasını artırmaktır.

Pozolanların mukavemet üzerindeki etkileri, aşağıda önemli olanlardan birkaçının verildiği bir çok faktöre bağlıdır:

- çimentonun pozolan muhtevası,
- pozolan tipi,
- pozolanın tane dağılımı ve özgül yüzey alanı,
- katkılı Portland çimentosunun bireysel karakteristikleri.

Büzülme

Çimentolara normal oranda pozolan katıldığında bunun, harcın kuruma rötresini (büzülmesini) fazla etkilemediği konusunda genel bir kanı mevcuttur. Portland çimentoları ve doğal pozolan içeren pozolanik çimentolar, su içerisindeki genleşme ve hava içerisindeki büzülmede önemli farklılıklar göstermemektedirler. Harçların rötresi kullanılan pozolanın inceliğinden daha ziyade, klinkerin inceliğinden etkilenmektedir. Bu nedenle rötrenin kullanılan çimentonun tipinden çok inceliğinden etkilendiği söylenebilir.

2.9. Pomza

Pomza madeni, dünya endüstrisinde yeni olmamakla birlikte, ülkemiz endüstrisine son 20 yılda girmeye başlayan ve değeri yeni anlaşılan volkanik kökenli bir kayadır.

Pomza veya ponza terimi İtalyanca bir sözcüktür. Farklı dillerde değişik adlandırmaları vardır. Fransızca'da ponce, İngilizce'de iri taneli olanlara

pumice, ince taneli olanlara ise pumicite denir. Almanca'da ise iri taneli olanlara bims, ince taneli olanlara ise bimstein adı verilmektedir. Türkçe'de ise süngertaşı, nasır taşı, topuktaşı, hışır taşı, küvek ve kisir gibi pek çok adla anılmaktadır (85-87).

Asidik ve bazik karakterli volkanik faaliyetler neticesinde oluşan pomza, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, süngerimsi ve gözenekli bir yapıya sahip, camsı volkanik bir kayadır. Oluşumu sırasında ani soğuma ve bünyedeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçeye kadar sayısız gözenek içerir. İçerdiği gözenekler gözle görülebilecek boyutlardan, mikroskobik boyutlara kadar sayısız olup, herbiri diğerinden camsı bir zarla yalıtılmıştır. Poröz yapısı ve gözeneklerinin genelde bağlantısız oluşundan dolayı, permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir (85-87).

Sertliği mohs skalasına göre 5-6'dır. Kimyasal olarak %75'e varan silis içeriği bulunabilmektedir. Pomzanın genel kimyasal bileşimi: %60-75 SiO₂, %13-17 Al₂O₃, %1-3 Fe₂O₃, %1-2 CaO, %7-8 Na₂O-K₂O ve eser miktarda TiO₂ ve SO₃'den oluşmaktadır. Kayacın içerdiği SiO₂ oranı kayaca abraziflik özelliği kazandırmaktadır. Bu özelliğinden dolayı çeliği rahatlıkla aşındırabilecek bir kimyasal yapı sergileyebilmektedir. Al₂O₃ bileşimi ise ateşe ve ısıya karşı yüksek dayanım özelliği kazandırmaktadır. Na₂O ve K₂O tekstil sanayiinde reaksiyon özellikleri veren mineraller olarak bilinmektedir (85-87).

Asidik ve bazik volkanik faaliyetler neticesinde iki tür pomza oluşmaktadır. Bunlar asidik ve bazik pomzalardır.

Bazik pomzaya bazaltik pomza veya özellikle yurt dışında "scoria" da denilmektedir. Bazaltik pomza koyu renkli, kahverengimsi siyahımsı olup, birim ağırlığı 1000-2000 kg/m³ arasında değişmektedir. Bazik karakterli pomzalar alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum gibi bileşenlerin daha yüksek oranda bulunması nedeniyle, diğer endüstriyel alanlarda (örneğin

gübre sanayiinde kek maddesi olarak, toprak ıslahı amacıyla tarımda vs.) kullanılmaktadır (85-87).

Yeryüzünde en yaygın olarak bulunan ve kullanılan türü olan asidik pomza, beyaz kirli görünümde ve grimsi beyaz renktedir. Asidik magmanın yoğunluğu bazik magmaya göre daha düşük olup, asidik karakterdeki pomzanın birim ağırlığı, gözeneklilik yapısına ve iç yapı karakteristiğine göre 200-1000 kg/m³ arasında değişim göstermektedir. Asidik karakterli pomzalarda silis oranı da daha yüksek olduğundan, inşaat sektöründe yaygın kullanım alanına sahiptir (85-87).

Pomza kendisine özgü bazı özellikleri ile perlit, obsidyen ve pekş-tayn gibi volkanik camsı kayalardan farklıdır. Bunlardan rengi, gözenekliliği ve kristal suyunun olmaması ile pratik olarak ayırt edilebilmektedir (85-87).

2.9.1. Pomzanın tarihi

İnşaat, tekstil, tarım, kimya ve diğer endüstriyel ve teknolojik alanlarda hammadde olarak kullanılan pomzanın tarihi çok eskilere dayanmaktadır. M.Ö. 1. yüzyılda Vitruvio'ya ait mimari özetinde pomza taşından bahsedilmektedir. Vitruvio, yığınları sudan hafif bu nedenle de yüzücü olarak tanımlamaktadır. Ayrıca suyu emmediğini ve hijyenik olduğunu da belirtmektedir (88).

Eski Romalılar zamanında pomza taşı çoğunlukla termal banyoların ve tapınakların yapımında kullanılmıştır. Bu eserlerin bazıları halen görülebilir. Bu dönemlere ait en belirgin örnekler Roma Pantheon'u ve İstanbul'daki Ayasofya Müzesi'dir (88).

Almanya 'da ise 1800'lü yıllarda Rhinenland şehrinde kullanılmaya başlanmıştır. Almanya II. Dünya Savaşından önce pomza sayesinde hafif

bina yapım ünitelerinde sağlam bir dış ticarete sahip olmuştur. Avrupa genelinde ise, pomza taşına ilgi gösterilmemiştir (88).

ABD de ise Pomza taşının yapı malzemesi olarak kullanılması 18. yüzyılın ortalarında California'da başlamıştır (88). Sektördeki en büyük üretici ve kullanıcılardan olan A.B.D. 'de sağlamlaştırılmış pomza Kaliforniya'da 1851 yılından beri inşaatlarda kullanılmaktadır. Bu tarihten 1963 yılına kadar yerli pomza endüstrisi 15 eyalette 103 işletmeye kadar genişlemiştir. Pomza çimento ile karıştırılarak Los Angles su kemerinin yapımında kullanılmıştır. Puzolanik aktivitesinin yüksek oluşu sebebiyle puzolan ve Portland çimentosu ile karıştırılarak Kaliforniya'daki Friant ve Pardee barajlarında, su kanallarında, Oklahama'daki Altus baraj gövde inşaatında kullanılmıştır (88).

Son 30 yıl içerisinde ise teknolojinin gelişmesi ve çevre bilincinin artması pomza taşının kullanımını yaygınlaştırmıştır (89).

2.9.2. Dünya pomza yatakları

Dünyada en büyük pomza rezervine sahip veya büyük pomza üreticisi ülkeler A.B.D., Almanya, İtalya, İngiltere, Yunanistan, İzlanda, Türkiye ve Yeni Zelanda'dır (90).

Volkanik kaynaklı üretimler İtalya ekonomisinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. İtalya'daki volkanlar genellikle Agenien Dağları ve Tiran kıyılarına paralel olarak gelişmiş bir hat boyunca görülürler. En önemli ticari pomza yatağı Lipari adasında işletilmektedir (90).

Dünyanın en büyük üreticilerinden olan Yunanistan da pomza madenciliği uzun bir tarihçeye sahiptir. Bir çok volkanik oluşumlarda pomzalı materyaller gözlenmesine karşılık büyük oluşum ve rezervler Yali ve Thera adasında bulunmaktadır (90).

Almanya pomza ticaretine uzun yıllar önce başlamış, bugüne kadar sürdürmüştür . 1978 yılından bu yana 7 milyon ton'a yakın scoria ve pomza üretimi ile dünyanın önde gelen üreticilerinden olmuştur. Almanya'da pomza; Ren bölgesi ve Neuwied Kasabasının bir kaç km batısındaki pomza yataklarından sağlanmaktadır (90).

Batı tüketiminin liderliğinde yapmakta olan ABD 'nin batı eyaletlerindeki volkanik faaliyetler, doğu eyaletlerinden fazla olduğundan toplam pomza üretiminin büyük kısmı tamamen dört batı eyaletinde gerçekleştirilmektedir. Bunlar Kaliforniya, Idaho, New Mexico ve Oregon'dur (90).

Yeni Zelanda'nın en büyük pomza üreten bölgesi Kuzey Adasının Rotorua Taupo bölgesindeki riyolitik volkanik kayaların bulunduğu yerlerdir. Ticari nitelikteki materyal Auckland'in hemen güneyinde bulunan The Waikato River'in altından tarakla taranarak çıkarılmaktadır. Bu şekilde çıkan malzemenin üçte ikisi kum ve üçte bir pomza olup, pomza eleme ve yoğunluk ayırma yolu ile kumdan ayrılmaktadır. Wanganui, Hamilton, Taurand ve Güney Auckland'da birçok işleyen ocak vardır. Dünya pomza rezerv dağılımı Çizelge 2.6'da verilmiştir (90).

2.9.3. Türkiye pomza rezervi

Ülkemiz pomza rezervleri açısından oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Araştırılmış alanlarda yaklaşık 3 milyar m³ pomza rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Pomza rezervlerinin İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmış olmasına karşılık, Akdeniz ve Ege bölgelerinde de pomza rezervlerine rastlanmakta ve üretim faaliyetleri görülmektedir. M.T.A. Genel Müdürlüğü'nce ülke çapında yapılan pomza ile ilgili detay jeolojik etüt çalışmalarından elde edilen verilere göre, ülkemizde varlığı bilinen pomza yatakları ve bunların rezerv durumları aşağıda Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.6. Dünya pomza rezerv dağılımı (90)

		Milyon (Ton)
Kuzey Amerika		
A.B.D.		11 500
Diğerleri		500
Toplam		12 000
İzlanda		
Dominik		25
Guadelouphe		15
Diğerleri		15
Guatemala		25
Toplam		80
Güney Amerika		
Şili		60
Diğer		20
Toplam		80
Avrupa		
Yunanistan		500
İtalya		2 000
Türkiye		2 836
Toplam		5 336
Okyanusya		500
Toplam		500
Dünya Toplamı		17 996

Çizelge 2.7. Türkiye pomza yataklarının rezerv miktarları ve kategorileri (89)

Yeri	Rezerv Miktarı (m ³)	Rezerv Kategorisi
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	404 412 834	A+B
Derinkuyu	48 660 500	C
Kayseri-Gömeç	13 250 000	A+B
Kayseri-Develi	58 500 000	A+B
Kayseri-Talas-Tomarza	241 000 000	A
Kayseri-Talas-Tomarza	284 000 000	B
Bitlis-Tatvan	1 100 000 000	A+B
Bitlis-Ahlat	210 000 000	A+B
Van-Erciş-Kocapınar	154 625 000	A+B
Van-Mollakasım	5 950 000	A+B
Ağrı-Patnos	27 812 000	A+B
Ağrı-Doğubeyazıt	26 875 000	A+B
Kars-Iğdır-Kavaktepe	40 156 250	B
Kars-Digor	11 718 750	B
Kars-Sarıkamış	1 875 000	B
Ankara-Güdül-Tekköy	8 070 000	A+B
İsparta-Gölcük	30 983 250	A+B
Erzincan	9 989 450	---

Maden İşleri Genel Müdürlüğü'nün bilgisayar kayıtlarına göre ülkemizde 100 adet pomza işletme ruhsatı mevcuttur. Bu işletme sahalarının vilayetlere göre dağılımı Çizelge 2.8'de verilmiştir.

2.9.4. Pomzanın kullanım alanları

Pomza başlıca 3 sektörde kullanılmaktadır.

1. İnşaat sektöründe,
2. Çeşitli sanayii sektörlerinde aşındırıcı olarak,
3. Tarım sektöründe.

Çizelge 2.8. İllere göre işletme ruhsatı dağılımı (Maden İşleri Genel Müdürlüğü Bilgisayar Kayıtları)

İli	İşl. Ruh. Say.	İli	İşl. Ruh. Say.
Adana	7	Manisa	9
Isparta	9	Muğla	2
Burdur	1	Ağrı	3
Hatay	2	Bitlis	6
Kayseri	17	Erzurum	1
Konya	4	Erzincan	1
Nevşehir	23	Kars	2
Niğde	4	Van	2
Aksaray	2	Urfa	1
İzmir	2	Mardin	2

İnşaat sektöründe

Pomza dünyada ve ülkemizde inşaat sanayiinde kullanılmaktadır. Ülkemizde üretilen pomzanın % 90'ı yurt içinde inşaatlarda kullanılmaktadır. Pomza, perlitin kullanıldığı alanların genellikle tümünde kullanılır. Perlit gibi genişletmek için enerji ve yatırım gerektirmediğinden, inşaat sektöründeki kullanımı son yıllarda hızla artış göstermektedir. Bu artışın elbette başka somut nedenleri de vardır. Bu nedenlerin başlıcaları şöyle sıralanabilir (90).

- Pomza; normal kumun ve çakılın 1/3 ile 2/3'ü kadar yoğunluğa sahiptir. Aynı durum pomza ile yapılan betonlar içinde geçerlidir.
- Pomza ile üretilen betonun normal betondan hafif olması nedeni ile, zaman ve işçilikten tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca zemin mekaniği açısından temele iletilen yük azalacağından inşaat demirinden yaklaşık % 17 civarında tasarruf sağlanması mümkündür.
- Pomzanın ısı geçirgenlik kat sayısı normal betondan 6 kat daha iyidir. Bu izolasyon özelliğinden dolayı da büyük çapta ısı ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Tabii ki bunun en büyük nedeni gözenekli oluşudur.

Sanayii sektöründe

Pomzanın sanayii sektöründeki kullanım alanlarının başında abrazif sanayii gelmektedir. Pomza çok kırılğan ve sertliği 5,5-6 civarındadır. Öğütme sırasında camısı, midye kabuğu şeklinde kırıldığından, keskin kenarlı yapısı en ince boyutuna indirildiğinde bile kalmaktadır.

Oldukça hafif aşındırıcı olarak sınıflandırılan pomza gerek doğal, gerekse doğal olmayan madeni eşyaları ve yumuşak metalleri (gümüş gibi) cilalamakta kullanılmaktadır.

Abrazif sanayii dışında, pomza aşağıda sıralanan sanayii dallarında da kullanılmaktadır (90):

- Boya sanayiinde: Pürüzlü kaplamalarda (kaleterasit gibi), ses izole edici duvar boyalarında,
- Kimya sanayiinde: Kimyasal taşıyıcı ve filtrasyon malzemesi olarak,
- Metal ve plastik sanayiinde: Temizleme ve cilalama, titreşim özelliği olan malzemelerin yapımında son işçilik için, elektriksel kaplama ve taş basma kalıplarını temizlemede,
- Cam sanayiinde: Televizyon tüpü düzeltme, cam cilalama, kesik cam tamamlama malzemesi olarak ;
- Mobilya sanayiinde: Cilalama, piyano anahtarı ve resim çerçevelerine motif vermede;
- Elektronik sanayiinde: Devre plaketlerini temizlemede;
- Seramikte: Astar malzemesi olarak;
- Tekstil sanayiinde: Kot kumaşının ağartılmasında, kullanılmaktadır.

Tarım sektöründe

Toprağın özelliklerini ıslah etmek ve suni gübrenin topaklaşmasını önlemek amacı ile anti-kek olarak, kullanılmaktadır (90).

2.10. Pomzanın Çimento ve Beton Üretiminde Kullanımına Yönelik Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Kalousek, Porter and Benton (91), sülfatlı çevrelerde uzun süre hizmet verecek betonla ilgili yaptıkları çalışmada; %2,1 sodyum sülfat çözeltisinde sürekli olarak ıslatılan, dönüşümlü olarak ıslatılan ve kurutulan betonlara ait verileri betonların hizmet sürelerinin tahmininde kullanmışlardır. ASTM Tip V (sülfata dayanıklı Portland çimentosu) ve Tip II (değiştirilmiş Portland çimentosu (Tip I'e göre daha az hidratasyon ısıasına ve daha çok sülfat dayanıklılığına sahip)) çimentolarla yapılan 19 betondan 16 tanesi 50 yıldan daha az bir ömür beklentisi göstermiştir. Farklı puzolanlar içeren betonlar kötüden oldukça faydalıya kadar değişen geniş bir yelpazede etkiler göstermişlerdir. 33 puzolanlı betondan sadece 6 tanesi 50 yıldan az bir hizmet beklentisi göstermişlerdir. Uçucu kül, pomza ve iki kalsine ürünün sülfat dayanımını belirgin şekilde iyileştirdiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda betonun sülfat dayanımına ait günümüzdeki şartnamelerin revize edilmesi önerilmiştir (91).

Sarı and Paşamehmetoğlu (23), pomza kullanarak ACI standardına göre orta mukavemetli hafif beton üretebilmek için bir deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Yaptıkları çalışmada A16 ve C16 gradasyon eğrileri (TS 706) arasına düşen gradasyon eğrilerini kullandıklarında ve süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıları ilave ettiklerinde taze iken işlenebilirliği yüksek, sertleştğinde ise minimum basınç dayanımı $6,56 \text{ N/mm}^2$ ve yoğunluğu 1300 kg/m^3 olan hafif beton bloklar elde etmişlerdir (23).

Şahin, Demirboğa, Uysal and Gül (92), farklı çimento dozajlarının, slamplarının ve pomza agrega oranlarının betonun basınç dayanımına ve yoğunluğuna etkileri üzerine yaptıkları deneysel çalışmada a) normal agrega yerine hacim olarak %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza agregası ikame etmişler, b) dozajı 200, 250, 350 ,400 ve 500 kg/m^3 'te, c) slampı ise 3 ± 1 , 5 ± 1 ve $7\pm 1 \text{ cm}$ 'de sabit tutmuşlardır. Test sonuçlarının analizi pomza

agregası artışının betonun yoğunluğunu %41,5'e kadar azalttığını göstermiştir. Karışımdaki çimento dozajının artırılması ile betonun yoğunluğu %3,2'ye kadar, basınç mukavemeti ise 200 kg/m³'lük dozaja göre %265'e kadar azalmıştır (92).

Anwar Hossain (20), volkanik pomzanın çimento ve hafif beton açısından özelliklerini incelemiştir. Çalışmada volkanik pomza toz halinde puzolan olarak, iri agrega halinde ise hafif beton üretiminde kullanılmıştır. Çimentonun bir kısmının yerine puzolan olarak çimento ağırlığının %0'ı ile %25'i arasında değişen oranlarda pomza tozu, hafif beton üretiminde de agrega hacminin %0' ile %100'ü arasında değişen oranlarda iri pomza agregası kullanılmıştır. Volkanik pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkatli bir şekilde gözden geçirilerek çimento ve betona taze ve sertleşme anında mümkün olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Farklı Portland çimentosu-volkanik pomza tozu karışımları üzerinde yapılan standart testlerden cesaret verici sonuçlar elde edilmiş ve %15'e kadar volkanik pomza tozu kullanılarak Portland volkanik pomza çimentosu üretilebileceği görülmüştür. Ayrıca, farklı yüzdelerde volkanik pomza agregası kullanılarak üretilen volkanik pomza betonunun özellikleri işlenebilirlik, mukavemet, kuruma rötresi, başlangıç yüzey su emme ve su geçirgenliği dikkate alınarak belirlenmeye çalışılmış ve sonuçta volkanik pomza betonunun taşıyıcı hafif beton olarak dayanım ve yoğunluk açısından yeterli olduğu görülmüştür (20).

Uysal, Demirboğa, Şahin and Gül (93), farklı çimento dozajı, slamp ve pomza agrega oranlarının betonun ısı iletkenliği ve yoğunluğu üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında; normal agreganın yerine hacim olarak %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza kullanmışlar, çimento dozajını ise 200, 250, 350, 400 ve 500 kg/m³ olarak almışlardır. Test sonuçlarının analizi pomza agregasının betonun yoğunluğunu %40, ısı iletkenliğini ise %46'ya kadar azalttığını göstermiştir. Karışımın çimento dozajındaki artış ise betonun yoğunluğunu ve ısı iletkenliğini artırmıştır (93).

Kılıç, Atış, Yaşar and Özcan (94), bazaltik pomza agregası ile yapılan ve mineral katkı malzemeleri içeren yüksek-mukavemetli hafif beton üretmek için yaptıkları laboratuvar çalışmasında, bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanarak hafif bazaltik pomza agregası ile kontrol hafif beton karışımı hazırlamışlardır. Kontrol hafif beton karışımı çimentonun %20'si uçucu külle yer değiştirilerek ve çimentonun %10'u silis dumanı ile yer değiştirilerek ayrı ayrı modifiye edilmiştir. Ayrıca hafif beton karışımı çimentonun %20'si uçucu külle, %10'u da silis dumanı ile ikame edilerek tekrar modifiye edilmiştir. Kontrol amacıyla ikide normal ağırlıklı beton dökülmüştür. Laboratuvar test sonuçları mineral katkılar ve bazaltik pomza birlikte kullanılarak yapısal hafif beton üretilebileceğini göstermiştir (94).

Anwar Hossain (21), volkanik kül ve volkanik pomza tozunun katkılı çimento üretimi için uygunluğunun araştırıldığı bu çalışmada; kullandığı Portland çimentosunu %0-%50 arasında değişen oranlarda volkanik kül ve volkanik pomza tozu ile ikame etmiştir. Araştırma taze ve sertleşmiş beton üzerinde yapılan testleri kapsamaktadır. Volkanik kül ve volkanik pomza tozu ikameli karışımlar üzerinde yapılan standart deneyler; uçucu küllü çimentolara kıyasla daha cesaret verici sonuçlar sağlamış ve %20 ikameye kadar daha yüksek priz süresi ve daha düşük hidratasyon ısısı sağlayan katkılı Portland volkanik küllü çimento ve katkılı Portland volkanik pomza çimentosu üretiminde iyi bir potansiyel göstermiştir (21).

Cavalari, Miraglia and Papia (22), hafif pomza taşı betonunun yapısal kullanımı açısından bazı özelliklerini araştırmışlardır. Pomzanın gerçekten yaygın olan yapay hafif agregaların bir alternatifi olarak düşünülüp düşünülemediğini göstermek için, deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yapısal hafif pomza betonu, genleştirilmiş hafif kil betonu ve normal ağırlıklı betonlar kullanılarak üç farklı tür donatılı duvar paneli yapılmıştır. Test sonuçlarının analizi, en azından bu tip yapısal betonlar için pomzanın beton üretiminde agrega olarak kullanılmasının bir olumsuz etkisi olmadığını göstermiştir (22).

Demirboğa (95), silis dumanı ve uçucu külün perlit ve pomza ile üretilen hafif beton özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi adlı doktora tezinde, silis dumanı ve uçucu külün çalışmaya konu olan hafif betonların rötre ile donma-çözülme özelliklerini iyileştirdiği, ısı iletkenlik değeri ile birim ağırlıkları azalttığı; silis dumanının 28 günlük basınç dayanımlarını artırırken, uçucu külün düşürdüğünü ortaya koymuştur (95).

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Çimento

Araştırmada, kontrol çimentosu olarak Set Çimento Ankara Fabrikasında TS EN 197-1'e (96) uygun olarak üretilen, PÇ 42,5 R ve PKÇ/B 32,5 R kullanılmıştır. Bu çimentolar 2004 yılında ülkemiz iç piyasa çimento tüketiminin yaklaşık %60-65'ini (97) oluşturduğu için tercih edilmiştir. Bu çimentolara ait fiziksel, kimyasal, mekanik özellikler ve ilgili standart sınır değerleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir (96).

3.1.2. Klinker

Çalışmada kullanılan klinker, Set Çimento Ankara Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Kontrol çimentoları PÇ 42,5 R ve PKÇ/B 32,5 R'nin üretiminde de aynı klinker kullanılmıştır. Klinkerin, kullanılmadan önce kimyasal analizi yapılarak, çimento üretimi için uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Klinkerin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.3'te verilmiştir.

3.1.3. Kireç

Pomzaların TS 25 "Tras" (98) standardına göre yapılan "Puzolanik Aktivite" deneyinde, puzolanik aktivite ve benzeri deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere özel olarak üretilen, sönmüş kireç kullanılmıştır.

3.1.4. Standart kum

Harç numunelerinin hazırlanmasında, TS EN 196-1'e uygun olarak Set Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Trakya Fabrikasında üretilen CEN Standart kumu kullanılmıştır (99).

Çizelge 3.1. PÇ 42,5 R'nin kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri

Bileşenler (%)		PÇ 42,5 R	TS EN 197-1
CaO		64,02	---
SiO ₂		20,31	---
Al ₂ O ₃		5,64	---
Fe ₂ O ₃		3,27	---
MgO		1,64	≤ 5,00
SO ₃		2,86	≤ 4,00
K ₂ O		0,80	---
Na ₂ O		0,87	---
Kızdırma kaybı		0,90	≤ 5,00
Çözünmeyen kalıntı		0,31	≤ 5,00
Anabileşenler			
C ₃ S		55,55	---
C ₂ S		16,50	---
C ₃ A		9,41	---
C ₄ AF		9,95	---
Serb. CaO		1,48	---
Fiziksel ve Mekanik Özellikler			
Yoğunluk (g/cm ³)		3,11	---
Özgül yüzey (cm ² /g)		3489	---
200 µm elek üstü (%)		---	---
90 µm elek üstü (%)		0,30	---
40 µm elek üstü (%)		8,40	---
Hacim genleşmesi (mm)		2	≤ 10
Priz (dakika)	Başlangıcı	145	≥ 60
	Sonu	230	---
Basınç dayanımı (MPa)	7 gün	38,80	---
	28 gün	45,78	≥ 42,5

Çizelge 3.2. PKÇ/B 32,5 R'nin kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri

Bileşenler (%)		PKÇ/B 32,5 R	TS EN 197-1
CaO		47,89	---
SiO ₂		30,64	---
Al ₂ O ₃		7,83	---
Fe ₂ O ₃		3,57	---
MgO		1,68	≤ 5,00
SO ₃		2,66	≤ 3,50
K ₂ O		1,09	---
Na ₂ O		1,13	---
Kızdırma kaybı		3,48	---
Anabileşenler			
C ₃ S		---	---
C ₂ S		---	---
C ₃ A		---	---
C ₄ AF		---	---
Ser. CaO		1,38	---
Fiziksel ve Mekanik Özellikler			
Yoğunluk (g/cm ³)		2,97	---
Özgül yüzey (cm ² /g)		5038	≥ 2800
200 µm elek üstü (%)		---	
90 µm elek üstü (%)		2,00	
40 µm elek üstü (%)		20,40	
Hacim genleşmesi (mm)		1	≤ 10
Priz (dakika)	Başlangıcı	155	≥ 75
	Sonu	245	---
Basınç dayanımı (MPa)	7 gün	27,84	---
	28 gün	32,59	≥ 32,5

Çizelge 3.3. Klinkerin kimyasal kompozisyonu

Bileşenler	(%)
CaO	64,69
SiO ₂	20,71
Al ₂ O ₃	5,81
Fe ₂ O ₃	3,38
MgO	1,74
SO ₃	1,33
K ₂ O	1,06
Na ₂ O	0,90
Kızdırma kaybı	0,24
Serbest kireç	1,18

3.1.5. Pomza

PKÇ'lerin ve POİÇ'lerin üretilmesinde Erzincan ve Nevşehir yörelerinden temin edilen pomzalar kullanılmıştır. Tipik bir pomzanın kimyasal bileşiminde %60-75 SiO₂, %13-17 Al₂O₃, %1-3 Fe₂O₃, %1-2 CaO, %7-8 Na₂O – K₂O ve eser miktarda TiO₂ ve SO₃ bulunmaktadır (89).

3.1.6. Karışım suyu

Araştırmada karışım suyu olarak, Ankara Büyük Şehir Belediyesi içme suyu şebekesinden temin edilen su kullanılmıştır. Karışım suyunun, ASKİ'nin resmi internet sitesinden alınan, kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.4'de sunulmuştur (100).

Çizelge 3.4. Karışım suyunun bazı özellikleri (100)

Parametre	Ortalama Değer	TS 266
Renk	0.30	20
Bulanıklık	0,30	5
PH	7.35	6,5<=pH<=9.5
Mangan ($\mu\text{g/l}$)	0	50
Florür (mg/l)	0.15	1.5
T.Sertlik(°FS)	8.5	---
Klorür (mg/l)	8.0	250
Toplam Demir ($\mu\text{g/l}$)	<5	200
Alüminyum ($\mu\text{g/l}$)	55	200
Amonyum (mg/l)	Yok	0.5
Nitrit (mg/l)	Yok	0.5
Nitrat (mg/l)	0.17	50
Oksitlenebilirlik (mg/IO_2)	2.2	---
Bakiye Klor (mg/l)	0.7	---

3.2. Metot

Deneysel çalışmanın ilk bölümünü PKÇ ve POİÇ'lerin üretiminde kullanılacak pomzaların kimyasal kompozisyonlarının, fiziksel özelliklerinin, mineralojik özelliklerinin, mikro yapılarının belirlenmesi ve puzolanik özelliklerinin olup olmadığının tespit edilmesi oluşturmaktadır. Her iki yöreye ait pomzaların kimyasal bileşimleri ve bazı fiziksel özellikleri TS 639'a göre belirlenmiştir (101). Pomzaların puzolanik aktivite deneyleri TS 25 "Tras" (98) standardına göre yapılmıştır. TS 25'te verilen oranlar kullanılarak hazırlanan numunelerin eğilme ve basınç dayanımları TS EN 196-1'e "Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım" göre belirlenmiştir (99). Ayrıca, Erzincan ve Nevşehir pomzalarının ASTM C 595-02 "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements" (102) standardına göre puzolanik aktivite indisleri de belirlenmiştir. Bu amaçla üretilen kontrol ve test numunelerinin kalıplanması ve bakımı

ASTM C 109/C 109M-01'e "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or 50-mm Cube Specimens" göre yapılmıştır (103). Bu deneyde kontrol çimentosu olarak ASTM C 150'nin "Specification for Portland Cement" (104) gereksinimlerini sağlayan bir Portland çimentosu (PÇ 42,5) kullanılmıştır.

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünü kontrol çimentoları (PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5), PKÇ'ler ve POİÇ'lerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Çimentoların kimyasal analizleri TS EN 196-2'ye "Çimento Deney Metotları – Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi" (105) uygun olarak yapılmıştır. Çimentoların fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde TS EN 196-3 "Çimento Deney Metotları - Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini" (106), TS EN 196-6 "Çimento Deney Metotları – Bölüm 6: İncelik Tayini" (107), ASTM C 188-95 "Test Method for Density of Hydraulic Cement" (108), ASTM C 151-00 "Standart Test Method For Autoclave Expansion of Portland Cement" (109) standartlarından faydalanılmıştır.

Deneysel çalışmanın son bölümü, laboratuarda üretilen PKÇ'ler ve POİÇ'lerle hazırlanan harçlar üzerinde yapılan deneylerden oluşmaktadır. Harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ASTM C 1437 "Standart Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar" (110), TS EN 196-1 "Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım" (99), ASTM C 348-97 "Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars" (111), ASTM C 349-97 "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars" (Using Portions of Prism Broken in Flexure) (112), TS 3322 "Çimento Harcı ve Beton Numunelerinde Boy Değişimi" (113), ASTM C 596-01 "Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement" (114), ASTM C 1012-95a "Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution" (115), ASTM C 157 "Standart Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic Cement Mortar and Concrete" (116), ASTM C 595-02 "Specification for Blended Hydraulic Cements" (102), standartları

kullanılmıştır. Harç deneylerinin bazıları pomza ve çimento deneylerinin de yapıldığı sıcaklık ve nemi bir klima vasıtasıyla kontrol edilen, %50 - 60 bağıl nem ile 21 ± 2 °C sıcaklığa sahip, Set Ankara Çimento Fabrikası Laboratuvarlarında, bazıları ise Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi (GÜTEF) Yapı Eğitimi Bölümüne ait Yapı Malzemeleri ve Beton Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin tartım işlerinde 0,1 ve 0,01 g hassasiyetli Sartorius ve Denver Instrument marka dijital göstergeli teraziler, kurutma işlemlerinde ise Memmert ve Labortechnik marka dijital göstergeli etüvler kullanılmıştır.

3.2.1. Pomza deneyleri

PKÇ ve POİÇ'lerin üretimine geçilmeden önce, kullanılacak Erzincan ve Nevşehir pomzalarının kimyasal kompozisyonları, fiziksel özellikleri, mineralojik özellikleri ve mikro yapıları belirlenmiştir. Ayrıca, pomzaların hem TS hem de ASTM'ye göre puzolanik özelliklerinin olup olmadığı tespit edilmiştir.

Ocaktan alınması

Çalışmada kullanılan Erzincan ve Nevşehir yöresi pomzaları, açık işletme yöntemi ile çıkarılan ocaklardan alınmıştır. Alınan numunelerin ocağın bütününe temsil etmesi için, ocağın değişik yerlerinden ve değişik derinliklerinden azami miktarda numune alınmaya çalışılmıştır. Deneylerde kullanılacak miktarlar ise numunelerin yarılanması yöntemi ile elde edilmiştir.

Çok ince numuneler içerisine farklı malzemeler karışmış olması ihtimaline karşı kullanılmamıştır. Ocaktan alınan numunelerin önemli miktarda su muhafaza ettiği gözlemlenmiştir.

Kimyasal bileşimleri

Her iki yöreye ait pomzaların kimyasal bileşimleri TS 639'a göre belirlenmiştir (98). Kimyasal analiz sonuçlarına göre Erzincan pomzasının $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı %75'den, Nevşehir pomzasının ki ise %85'ten büyüktür.

Doğal nemi

Pomzaların doğal nemlerini belirlemek için ocaktan çıkarılan numunelerden 500 g'lık üç adet numune tartılıp, nem kaybını önlemek için naylon torbalara konularak laboratuara getirilmiştir. Laboratuarda 105 ± 5 °C'lik etüv sıcaklığında kurutulan numunelerin doğal nemleri hesaplanmıştır. Pomzalar, PKÇ'lerin ve POİÇ'lerin üretiminden önce etüvde tamamen kurutulmuştur.

Numunelerin kırılması ve tane büyüklüğü

Her iki yöreye ait irili ufaklı pomzalar etüvde kurutulduktan sonra, önce iri çeneli kırıcıdan, sonra da küçük çeneli kırıcıdan geçirilmiştir. Pomzalar toz haline getirilmeleri için, 3 kg kapasiteli bilyalı değirmende 40 dakika öğütülmüş ve bu süre her iki pomza türü içinde sabit tutulmuştur. Öğütülen pomzaların tane büyüklüğü, 12500 Pa emiş gücüne sahip Alpine marka cihaz kullanılarak belirlenmiştir. 20 g'lık numuneler 40 µm, 90 µm ve 200 µm'lik eleklerin her birinde 3 dakika 2500 Pa emiş gücü ile elenmiş ve her bir elek üzerinde kalan malzeme miktarları belirlenmiştir. Ayrıca, Malvern Master Sizer X marka Lazer Kırınım Cihazıyla, toz halindeki her iki yöre pomzasının tane büyüklüğü dağılımı analizi yapılmıştır.

Özgül ağırlık

Pomzaların özgül ağırlıkları, 40 g etüv kurusu numune üzerinde Le Chatelier balonu kullanılarak belirlenmiştir. Her bir pomza türü için, deneyler üçer defa tekrarlanmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır.

Özgöl yüzey alanı

Öğütülmüş pomzaların özgöl yüzey alanları, Tonindustrie-Seger marka otomatik blaine aleti kullanılarak belirlenmiştir. Herbir deney için kullanılacak numune miktarı, pomzaların özgöl ağırlıklarına göre belirlenmiştir. Deneyler etüv kurusu çimentolar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir pomza tipinin özgöl yüzey alanı, yapılan üç adet deneyin aritmetik ortalamaları alınarak bulunmuştur.

Puzolanik aktivite deneyi

Erzincan ve Nevşehir pomzalarına TS 25 “Tras” (98) standardına göre puzolanik aktivite deneyi uygulanmıştır. Deneyde kullanılacak pomza tozu, kireç ve su miktarları pomza tozu ve kirecin özgöl ağırlığından yararlanılarak, ilgili standartta verilen formüller yardımı ile hesaplanmıştır. Karışımın hazırlanması ve kalıplanması TS EN 196-1’e göre yapılmıştır. Her bir pomza türü için altı adet 40x40x160 mm’lik prizma numune hazırlanmıştır. Kalıpların üzeri camla kapatılmış ve buharlaşmayı önlemek için etrafı çekomastikle izole edilmiştir. 1 gün oda sıcaklığında (23 ± 2 °C), 6 gün de kalıplar sökülmeden sıcaklığı 55 ± 2 °C olan etüv içerisinde bekletilmiştir. Numuneler kırılmalarından 4 saat önce etüvden çıkarılmış ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Numunelerin eğilme ve basınç dayanımları TS EN 196-1’e (99) göre belirlenmiştir.

Puzolanik aktivite indisı deneyi

Erzincan ve Nevşehir pomzalarının puzolanik aktivite indisleri, ASTM C 595-02 “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements” (102) standardına göre belirlenmiştir. Kontrol ve test numunelerinin kalıplanması ve bakımı ASTM C 109/C 109M’e (103) göre yapılmıştır. Kontrol çimentosu olarak ASTM C 150’nin (104) gereksinimlerini sağlayan, bir Portland çimentosu (PÇ 42,5) kullanılmıştır.

Test karışımında, kontrol numunesinde kullanılan Portland çimentosunun %35'i (hacim olarak) puzolanik aktivitesi test edilecek Erzincan ve Nevşehir pomzaları ile yer değiştirilmiştir. Her malzeme için altı adet 5x5x5 cm'lik küp numune hazırlanmıştır. Kontrol numunesinin hazırlanmasında her bir karışım için 250 g çimento, 687,5 g standart kum ve %100-115 akma sağlayacak kadar su kullanılmıştır. Pomza katkılı numunelerin hazırlanmasında 162,5 g çimento, 87,5 g çimentoya eşdeğer hacimde pomza, 687,5 g standart kum ve %100-115 akma sağlayacak kadar su konulmuştur.

Kalıplanmadan hemen sonra, numuneler kalıpla birlikte 20-24 saat arası $23 \pm 1,7$ °C'lik nem odasında bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda kalıplardan çıkarılan numuneler bir cam desikatöre konulmuş ve desikatörün ağzı hava geçirmeyecek şekilde izole edilmiştir. Cam desikatör $38 \pm 1,7$ °C'lik sıcaklıkta 27 gün bekletilmiştir. Numuneler test edilmeden önce laboratuvar sıcaklığına kadar soğumaları beklenmiş ve basınç dayanımı testleri ASTM C 109/C 109M'e (103) göre yapılmıştır. Pomzaların puzolanik aktivite indislerinin belirlenmesinde aşağıdaki formülden faydalanılmıştır.

Portland çimentosu ile puzolanik aktivite indisi = $(A / B) \times 100$

A : Test numunelerinin ortalama küp basınç dayanımı

B : Kontrol numunelerinin ortalama küp basınç dayanımı

Mineralojik özellikleri

Pomzaların mineralojik özellikleri, X-ışınları difraksiyon (XRD) analizi yöntemi kullanılarak, M.T.A. Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında belirlenmiştir. XRD analizlerinde Rigaku marka X-ışını Difraktometre cihazı kullanılmıştır (bakır tüp, 40 KV/30 MA, 6 derece/dakika tarama hızı, 1,5406 Å dalga boyu).

Mikroskopik analiz

Pomza numunelerinin mikroskopik analizi, Jeol (JSM-6060LV) marka Tarayıcı Elektron Mikroskop Cihazı - SEM kullanılarak GÜTEF Metal Eğitimi Bölümü Malzeme laboratuvarında yapılmıştır. SEM'deki görüntü kalitesini artırmak için, görüntüsü alınacak pomza numuneleri Polaron (SC7620 Sputter) marka kaplama cihazı kullanılarak altınla kaplanmıştır.

3.2.2. Çimentoların üretilmesi

Katkılı çimentolar

PKÇ'lerin hazırlanmasında Çizelge 3.5'te verilen oranlara uyulmuştur. PKÇ'ler hazırlanırken klinker, pomza taşı ve alçı taşının herbiri önce büyük, sonra küçük çeneli kırıcılardan geçirildikten sonra değirmen kapasitesi olan 3 kg'lık numune, Çizelge 3.5'teki oranlara uyularak hazırlanıp bilyalı değirmene yerleştirilmiştir. Üretilen PKÇ'ler, Çizelge 3.5'te kullanılan pomza türünü ve oranını ifade edecek sembollerle gösterilmiştir (EPKÇ 10: %10 Erzincan pomzası katkılı çimento, NPKÇ 20: %20 Nevşehir pomzası katkılı çimento gibi).

Öğütme süresi, elde edilecek PKÇ'lerin ortalama özgül yüzölçümü kontrol çimentosu olarak kullanılan PÇ 42,5'in özgül yüzölçümü civarında olması için, deneme üretimleriyle 80 dakika olarak belirlenmiş ve tüm çimento tipleri için sabit tutulmuştur.

Herbir PKÇ tipi için yaklaşık 25 kg'lık numune üretilmiş ve bu 25 kg'lık çimento büyük bir kapta homojen olarak karıştırıldıktan sonra deneylere başlanmıştır. Üretilen PKÇ'ler, nemlenmelerini önlemek için 2 kat naylon torba içerisinde 3'er kg'lık parçalar halinde muhafaza edilmişlerdir.

Çizelge 3.5. PKÇ'lerin üretimi için kullanılan karışım oranları

Çimento Tipi	Klinker (%)	Pomza tozu (%)	Alçı taşı (%)
EPKÇ 10	85	10	5
EPKÇ 20	75	20	5
EPKÇ 25	70	25	5
EPKÇ 30	65	30	5
EPKÇ 40	55	40	5
NPKÇ 10	85	10	5
NPKÇ 20	75	20	5
NPKÇ 25	70	25	5
NPKÇ 30	65	30	5
NPKÇ 40	55	40	5

İkameli çimentolar

POİÇ'lerin üretiminde Çizelge 3.6'da verilen oranlar kullanılmıştır. Ancak, POİÇ'lerin homojenliğini artırmak için tüm deneyler için gerekli olan çimento miktarı bir seferde hazırlanmamış, her bir deney için gerekli olan çimento miktarı ayrı ayrı hazırlanmıştır. Bunun için, her bir deneyde kullanılacak çimento Çizelge 3.6'daki oranlara göre alınan Portland çimentosu ve pomzanın, şişirilmiş bir naylon torba içerisinde homojen hale gelinceye kadar sallanması ile hazırlanmıştır.

Üretilen POİÇ'ler, Çizelge 3.6'da kullanılan pomza türünü ve oranını ifade edecek sembollerle gösterilmiştir (EPOİÇ 30: %30 Erzincan pomzası ikameli çimento, NPOİÇ 40: %40 Nevşehir pomzası ikameli çimento gibi).

Çizelge 3.6. POİÇ'lerin üretimi için kullanılan karışım oranları

Çimento tipi	PÇ 42,5 (%)	Pomza tozu (%)
EPOİÇ 10	90	10
EPOİÇ 20	80	20
EPOİÇ 25	75	25
EPOİÇ 30	70	30
EPOİÇ 40	60	40
NPOİÇ 10	90	10
NPOİÇ 20	80	20
NPOİÇ 25	75	25
NPOİÇ 30	70	30
NPOİÇ 40	60	40

3.2.3. Çimento deneyleri

Çimento deneylerinin tamamı sıcaklık ve nemi bir klima vasıtasıyla kontrol edilen, %50 - 60 bağıl nem ile 21 ± 2 °C sıcaklığa sahip Set Ankara Çimento Fabrikası Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Standart kıvam tayini

Standart kıvam tayini Vicat aleti ve sondası kullanılarak TS EN 196-3'e uygun olarak yapılmıştır (106). Her bir deney için 500 g çimento kullanılmıştır. POİÇ'ler için 500 g'lık numune hazırlanırken, ikame oranına bağlı olarak gerekli çimento ve pomza ayrı ayrı tartılmış ve homojenliğini sağlamak için şişirilmiş bir naylon torba içerisinde 2 dakika süre ile karıştırılmıştır. Çimentolar su içerisine konulurken, numune kaybı olmaması için azami gayret gösterilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra, numune düşük hızda toplam 3 dakika süre ile karıştırılmıştır. Elde edilen numune, zaman kaybetmeden vicat kalıbına fazla miktarda olmak üzere hiçbir sıkıştırma veya vibrasyon uygulanmadan yerleştirilmiştir. Kalıbın üzerindeki fazla çimento

pastası alınarak yüzeyi düzeltilmiştir. Sonda 30 sn içerisinde cam levhaya 6 ± 1 mm uzaklıkta kaldığında, standart kıvam için gerekli su miktarı belirlenmiştir.

Priz süreleri

PKÇ'lerin, POİÇ'lerin ve kontrol çimentolarının priz başlangıcı ve priz sona erme süreleri TS EN 196-3'e göre, vikat aleti kullanılarak belirlenmiştir (106). Deney, standart kıvamın belirlenmesinde kullanılan çimento hamuru numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Vicat iğnesinin cam levhaya 4 ± 1 mm uzaklıkta kaldığı an priz başlangıcı; çimento hamuruna en çok 0,05 mm girebildiği an da priz sonu olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçların doğruluklarını artırmak için, priz başlangıcına ve priz sonuna yaklaşıldığında okuma aralıkları sıklaştırılmıştır. Her bir çimento tipi için, üç adet deney yapılarak ortalaması alınmıştır.

Hacim genleşmesi

Hacim genleşmesi deneyleri TS EN 196-3'e göre, Le Chatelier aleti kullanılarak yapılmıştır (106). Deney numunesi olarak standart kıvam tayini için hazırlanan çimento hamurundan bir parça kullanılmıştır. Suda bekletilen numunedan $24 \pm 0,5$ saat sonra yapılan ölçümle, 3 saat ± 5 dak.'lık kaynama sonunda laboratuvar sıcaklığına kadar soğuyan numune üzerinde yapılan ölçüm arasındaki fark, deney sonucu olarak kabul edilmiştir. Herbir çimento tipi için üç deney yapıp ortalamaları genleşme değeri olarak kabul edilmiştir.

Tane büyüklüğü

PKÇ'lerin, POİÇ'lerin ve kontrol çimentolarının tane büyüklüğü, 12500 Pa emiş gücüne sahip, Alpine marka deney cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Hassas olarak tartılmış 20 g'lık numuneler 40 μ m, 90 μ m, 200 μ m eleklerde

2500 Pa emiş gücü ile 3 dak. elenmiş ve her elek üzerinde kalan %'ler hesaplanmıştır.

zgl ağırlık

Çimentoların zgl ağırlıklarının belirlenmesinde gaz yağı kullanılmıştır. zgl ağırlık deneyleri, sarsıntısız bir ortamda Le Chatelier balonu kullanarak ASTM C 188-95'e göre "Test Method for Density of Hydraulic Cement" (108) 60 g'lık numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numune ağırlığı ve Le Chatelier balonu üzerinde okunan değerler kullanarak, çimentoların zgl ağırlıkları hesaplanmıştır. Her bir imento tipi için üç adet deney yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınarak zgl ağırlıkları hesaplanmıştır.

zgl yüzey alanı

PK'lerin ve kontrol çimentolarının zgl yüzey alanları, Tonindustrie-Seger marka otomatik blaine aleti kullanarak TS EN 196-6'ya göre belirlenmiştir (107). Herbir deney için kullanılacak numune miktarı, o çimentonun zgl ağırlığı kullanarak TS EN 196-6'da verilen formül ile hesaplanmıştır. Deneyler etüv kurusu çimentolar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir imento tipinin zgl yüzey alanı, yapılan üç adet deneyin aritmetik ortalamaları alınarak bulunmuştur.

Kimyasal analiz

Üretilen PK'lerin ve kontrol çimentolarının kimyasal kompozisyonları TS EN 196-2'ye göre "imento Deney Metotları – Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi" (105), Set Ankara imento Fabrikası Kimya Laboratuvarında tespit edilmiştir. P 42,5 ve PK 32,5 kontrol çimentolarının kimyasal özellikleri, ilgili imento standartlarındaki sınır değerlerle birlikte izelge 3.1 ve izelge 3.2'de sunulmuştur.

Otoklav genleşme deneyi

Deney ASTM C 151-00 “Standart Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement” (109) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım için 650 g çimento ve ASTM C 187’de (117) tanımlandığı gibi standart kıvamı sağlayacak kadar su kullanılmıştır. Her bir çimento tipi için üç adet çubuk numune (285x25x25mm) hazırlanmıştır. Numuneler ASTM C 305’te (118) tarif edilen çimento pastası gibi karıştırılmıştır. Kalıplama işleminden sonra kalıpla birlikte 24 saat kür odasında bekletilen numuneler, ilk boy ölçümleri yapıldıktan sonra, otoklava yerleştirilmiştir. Çalıştırılıp 100 °C’ye ayarlanan otoklavın buhar vanası, ilk buhar çıkışına kadar açık tutulmuş ve daha sonra kapatılmıştır. Otoklavın basıncının 40-75 dakika arasında 2 MPa’ya ulaşması sağlanmış ve sıcaklık yaklaşık 45-55 °C arasında tutularak 2 MPa’lık basınç, 3 saat süreyle sabit tutulmuştur. Daha sonra otoklavın sıcaklığa ayarlı düşmesi fana dönüştürülmüştür. 1,5 saat içerisinde basıncın 10 Psi’nin altına düşmesi sağlandıktan sonra, buhar vanası açılıp basınç sıfıra düşürülmüştür. Otoklavdan çıkarılan numuneler sıcaklığı 90 °C’nin üstünde olan suyun içerisine konulmuştur. İçerisine numune konulan suyun sıcaklığı, soğuk su ilave edilerek 15 dakika içerisinde 23 °C’ye düşürülmüştür. Numuneler sudan çıkarılıp kurulandıktan sonra, boy değişim ölçümleri yapılarak deney sonuçlandırılmıştır. Yapılan ilk boy değişim ölçümleride kullanılarak her bir numunede meydana gelen genleşmeler, ayrı ayrı hesaplanmış ve ortalamaları alınmıştır.

3.2.4. Harç deneyleri

PKÇ’ler / POİÇ’ler ve kontrol çimentoları ile üretilen harçlar üzerinde yapılan deneylerin büyük çoğunluğu GÜTEF Yapı Eğitimi Bölümü Yapı Malzemesi ve Beton laboratuvarlarında, bir kısmıda çimento deneylerinin de yapıldığı, sıcaklık ve nemi bir klima vasıtasıyla kontrol edilen Set Ankara Çimento Fabrikası Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Harçların su ihtiyacı

Harç karışımlarının su ihtiyacı, ASTM C 1437 “Standart test method for flow of hydraulic cement mortar” (110) standardında belirtilen esaslara göre, akma tablası kullanılarak $\%110 \pm 5$ akma olacak şekilde belirlenmiştir. ASTM C 230/C 230M’nin (119) gereksinimlerini karşılayan bir akma tablası kullanılmıştır. Deney, istenilen akma değeri elde edilinceye kadar farklı numuneler ile tekrarlanmıştır. Üretilen 22 harç grubundan, kontrol çimentoları ile EPKÇ’li ve NPKÇ’li toplam 12 harç grubu için harçların hazırlanmasında, her çimento tipi için TS EN 196-1’e göre 450 g çimento ve 1350 g standart kum kullanılmıştır (99). POİÇ’li toplam 10 harç karışımında ise, bağlayıcı miktarı sabit kalmış ancak, çimento ağırlıkça $\%10$, $\%20$, $\%25$, $\%30$ ve $\%40$ oranlarında pomza ile ikame edilmiştir. Harç karışımından önce çimento ile toz halindeki pomza, şişirilmiş naylon torba içerisinde 2 dakika süre ile karıştırılmıştır. Karışımlara giren su miktarları, pomza katkı oranına göre her harç için ayrı ayrı deney yapılarak belirlenmiştir. Her bir çimento tipi için üç deney yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır.

Eğilme ve basınç dayanımı için harçların hazırlanması

PÇ 42,5’ğa, PKÇ 32,5’ğa, EPKÇ’lere ve NPKÇ’lere ait harç numunelerinin üretilmesinde; her bir numune için 450 ± 2 g çimento, 225 ± 1 g su ve 1350 ± 5 g standart kum kullanılmıştır. Harçlar POİÇ’lerle üretilirken 450 g’lık çimento $\%10$, $\%20$, $\%25$, $\%30$ ve $\%40$ oranlarında pomza ile yer değiştirilmiştir. Harç karışımına geçilmeden önce, çimento ve toz halindeki pomza şişirilmiş bir naylon torba içerisinde homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Harçlar Ele marka otomatik karıştırıcıda TS EN 196-1’e göre üretilmiştir (99). Ayrıca EPKÇ 20, EPKÇ 40, NPKÇ 20 ve NPKÇ 40 grubu çimentolardan ASTM C 348-97’ye (111) göre de numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında her çimento grubu için 500 g çimento, 1375 g standart kum ve $\%110 \pm 5$ akma sağlayacak kadar su kullanılmıştır.

Numunelerin karıştırılmasında ASTM C 305-99'a (118) uyulmuştur. Her çimento tipi için üç adet numune hazırlanmıştır.

Harç numunelerinin kalıplanması ve bakımı

Eğilme ve basınç dayanımlarının tespit edilmesi için kullanılacak numunelerin hazırlanmasında, Ele marka TS EN 196-1'e (99) ve ASTM C 348-97'ye (111) uygun 160x40x40 mm boyutlarında üçlü çelik harç kalıpları kullanılmıştır. TS EN 196-1 ve ASTM C 109/C 109M-01'e (103) göre hazırlanan harçlar kalıplara yerleştirilmiştir. Numunelerin TS EN 196-1'e uygun olarak kalıplara yerleştirilmesinde, saniyede 1 vuruş yapabilen Alfa marka otomatik sarsma tablası kullanılmıştır. Yüzeyi düzeltildikten sonra üzerine bir cam kapatılan kalıp, sıcaklığı 20 ± 1 °C ve %90'dan fazla bağıl nem bulunan kür odasında 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda kalıplardan çıkarılan harç prizmaları, karıştırılmamaları için kodlandıktan sonra, teste tabi tutulacağı güne kadar, sıcaklığı otomatik olarak kontrol edilen kür tankında 20 ± 1 °C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir. Kür tankında, Ankara Büyük Şehir Belediyesi içme suyu şebekesinden temin edilen su kullanılmıştır. TS EN 196-1'e (99) uygun olarak kür tankında kullanılan su 360 günlük kür süresince hiç değiştirilmemiştir.

Eğilmede çekme dayanımı

Eğilmede çekme dayanımı deneyleri 25 kN kapasiteli Ele Auto Test marka beton test presini kullanarak, TS EN 196-1 (99) ve ASTM C 348-97'ye (111) göre gerçekleştirilmiştir. Herbir çimentodan üretilen harç grubu için, üç adet deney numunesi kırılmış ve bunların aritmetik ortalamaları eğilmede çekme dayanımı değeri olarak alınmıştır. TS EN 196-1'e (99) göre test edilen numunelerde 7, 28, 90, 180 ve 360 gün yaşlarındaki eğilmede çekme dayanımı değerleri; ASTM C 348-97'ye (111) göre test edilen numunelerde ise 28, 90 ve 180 gün yaşlardaki eğilmede çekme dayanımı değerleri belirlenmiştir.

Basınç dayanımı

Basınç dayanımı deneyleri, 250 kN kapasiteli Ele Auto Test marka beton test presini kullanılarak, TS EN 196-1 (99) ve ASTM C 349-97'ye (112) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney, eğilmede çekme dayanımı deneyi uygulanarak ortadan ikiye bölünen harç prizmaları üzerinde, bu deneylerden hemen sonra yapılmıştır. Çimento tiplerine ait basınç dayanım değerleri, altı deney numunesi kırıldıktan sonra aritmetik ortalamaları alınarak belirlenmiştir. TS EN 196-1'e (99) göre test edilen numunelerde 7, 28, 90, 180 ve 360 gün yaşlarındaki basınç dayanımı değerleri; ASTM C 349-97'ye (112) göre test edilen numunelerde ise 28, 90 ve 180 gün yaşlardaki basınç dayanım değerleri belirlenmiştir.

Rötre

Rötre deneyi kontrol numunesi olarak PÇ 42,5'ğa, PKÇ'lerden ise EPKÇ 10, EPKÇ 20, NPKÇ 10 ve NPKÇ 20'ye uygulanmıştır. Deney 285x25x25 mm boyutlarında ikili harç kalıpları kullanılarak ASTM C 157 "Standart test method for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete" (116) standardına göre yapılmıştır. Harç karışımları TS EN 196-1'e (99) göre hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında kullanılacak su miktarı ise TS 3322'ye "Çimento harcı ve beton numunelerinde boy değişim tayini" (113) göre akma tablası kullanılarak $\% 110 \pm 5$ yayılma sağlayacak şekilde deneme karışımları ile belirlenmiştir. Akma testinde ASTM C 230/C 230M-98'in (119) gereksinimlerini karşılayan bir akma tablası kullanılmıştır. Her harç grubu için üç adet 285x25x25 mm boyutunda çubuk numune hazırlanmıştır. Numunelerin köşelerinde ve ölçüm çivilerinin etrafında boşluk kalmaması için gereken özen gösterilmiştir. Kalıba yerleştirilen numunelerin başlangıçtaki boy değişimleri nedeniyle ölçüm çivilerinin bir zorlamaya maruz kalmaması için, ölçüm çivilerinin tutucuları hafifçe gevşetilmiştir. Üzeri cam plakalarla kapatılan numuneler kür odasına yerleştirilmiştir. Karışıma su katılmasından $23,5 \pm 0,5$ saat sonra, numuneler kalıplardan ölçüm çivileri

hasar görmeden dikkatli bir şekilde çıkarılıp, karıştırılmaması için kodlandıktan sonra $23 \pm 0,5$ °C sıcaklığına sahip kür tankına konulmuştur. 15 dakikanın sonunda kür tankından çıkarılan numuneler, ıslak bir bezle kurulandıktan sonra komparatörde ilk boy okumaları yapılmış ve bu ölçümler 0 gün yaş okumaları olarak kaydedilmiştir. Ölçüm işlemi tamamlanan numuneler, ilgili standartta belirtilen şartlara haiz kür odasındaki raflara yerleştirilmiştir. Hava sirkülasyonunun sağlanması için numunelerin dört tarafında yeteri kadar boşluk bırakılmıştır. Numuneler üzerinde 4, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 90, 112, 140, 180, 210, 240, 270, 300, 330 ve 360 gün yaşlarında boy değişimi ölçümleri tekrarlanmıştır. Her okuma öncesinde komparatör kalibrasyon çubuğu ile kontrol edilmiştir. Her harç grubu için hazırlanan 3 deney numunesinden elde edilen okuma değerleri ASTM C 157'de verilen formülde yerine konularak, rötre deneyinden sonra ölçüm yapılan yaşlarda her bir numunede oluşan birim deformasyonlar hesaplanmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. Ayrıca PÇ 42,5, EPKÇ 10, EPKÇ 20, NPKÇ 10 ve NPKÇ 20 çimentoları ASTM C 596-01'e (114) görede teste tabi tutulmuştur. Burada farklı olarak, numunelerin hazırlanmasında 750 g çimento, 1500 g standart kum ve $\%110 \pm 5$ akma sağlayacak kadar su kullanılmıştır. Numuneler ASTM C 305-99'a (118) göre karıştırılmıştır. Numuneler kalıpla birlikte 24 saat ± 30 dak. buhar kürüne tabi tutulduktan sonra, kalıptan çıkarılıp 48 saat kirece doygun suda bekletilmiştir. Toplam 72 saat ± 30 dak. sonunda sudan çıkarılan numuneler, kurularak sıfır yaş komparatör okumaları yapıldıktan sonra havada bekletilmeye başlanmıştır. Bu numunelerin 4, 11, 18 ve 25 gün yaşlarındaki boy değişimleri belirlenmiştir. Ayrıca, rötre deneyi süresince numunenin iç yapısında meydana gelen değişimleri gözlemleyebilmek ve rötreyi etkileyen nedenleri belirleyebilmek için; su ile çimentonun karıştırılmasını takip eden 7. ve 28. günlerde (rötre deneyi boy değişim okumalarına göre 4. ve 25. gün) numunelerden alınan küçük parçalar üzerinden SEM ile görüntüler alınmıştır.

Sülfat genleşmesi

PÇ 42,5 ile EPKÇ 10, EPKÇ 20, NPKÇ 10 ve NPKÇ 20 kullanılarak üretilen beş harç grubu üzerinde, sülfat genleşmesi deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney ASTM C 1012-95a'ya "Standart Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution" (115) uygun olarak yürütülmüştür. Deneyde kullanılacak çubuk numunelerin üretilmesinde, rötre numunelerinin hazırlanmasında da kullanılan 285x25x25 mm boyutlarındaki ikili çelik kalıplar kullanılmıştır. Harçlar ASTM C 109'da (103) tarif edildiği gibi 500 g çimento ve 1375 g standart kum kullanılarak hazırlanmıştır. Portland çimentosu için s/ç oranı 0,485 olarak alınmış, PKÇ'ler için ise Portland çimentosunun bu s/ç oranı ile gösterdiği akmanın, ± 5 'i kadar akma sağlayacak su kullanılmıştır. Her bir çimento tipi için 6 adet çubuk, 9 adet küp numune hazırlanmıştır. Çubuk numuneler ASTM C 157'ye (116), küp numuneler ise ASTM C 109'a (103) göre kalıplara yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Köşelerin ve ölçüm çivilerinin çevresinin tamamen sıkışması ve bu kısımlarda boşluk kalmaması için azami gayret sarf edilmiştir. Kalıplar, numune yerleştirilmesinin hemen ardından, üzerleri cam plakalarla örtülüp birleşme yerleri çekomastikle kapatıldıktan sonra, 35 ± 3 °C sıcaklıktaki kür tankında $23\frac{1}{2}$ saat ± 30 dakika bekletilmiştir. Daha sonra kalıplar sökülmüş ve numuneler $23 \pm 1,7$ °C sıcaklıktaki kirece doymun suya konulmuştur. Bu arada ikincil küre başlandığı andan itibaren, her gün üç numune ASTM C 109'a göre basınç testine tabi tutulmuş ve basınç mukavemeti 20 MPa'ya ulaşan veya aşan çimento tipine ait çubuk numuneler, komparatörde ilk boy ölçümleri yapıldıktan sonra %5'lik sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisine konulmuştur. Her bir litre çözelti için, 50 gr Na_2SO_4 900 ml suda çözölmüş ve kalan kısmı distile su ile tamamlanmıştır. Çözeltiiler kullanılacağı gün hazırlanmış, kullanılmadan pH'ları ölçölerek 6-8 arasında olmasına dikkat edilmiştir (genellikle 7,4-7,8 arasında ölçölümüştür). Kullanılan çözelti miktarı, her bir çubuk numune için çubuk hacminin 4 katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Sülfat çözeltisi ve çubuk numunelerin bulunduğı kabın ağzı kapatılarak, hava ile teması kesilmiştir. 7, 14, 21 ve 28 gün yaşlarında

numune kabının ağızı açılmış ve boy değişim ölçümleri yapıldıktan sonra, çözelti yenilenerek tekrar kapatılmıştır. Her harç grubuna ait altı deney numunesinin komparatör okumaları ASTM C 157’de (116) verilen formülde yerine konularak, ölçüm yapılan yaşlarda oluşan birim deformasyonlar hesaplanmış ve bunların aritmetik ortalaması alınarak her bir yaştaki sülfat genleşmeleri belirlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Pomzaların Özellikleri

Kimyasal bileşimleri

Her iki yöreye ait pomzaların kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçlarına göre Erzincan pomzasının $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı %75’den, Nevşehir pomzasının ki ise %85’ten büyüktür. Bu da her iki pomzanın da puzolanik özellik gösterebileceği anlamına gelmektedir (5).

Doğal nemleri

Erzincan pomzasının doğal nemi %45, Nevşehir pomzasının doğal nemi %64 olarak tespit edilmiştir (Çizelge 4.1). Nevşehir pomzasının doğal neminin daha yüksek olması, daha boşluklu bir iç yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Tane büyüklükleri

Her iki pomzanın 40 μm , 90 μm , 200 μm ’lik elek üzerinde kalan miktarları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Ayrıca, Lazer Kırınım Cihazı kullanılarak, toz halindeki her iki yöre pomzasının tane büyüklüğü dağılımı analizi yapılmış ve eğrileri Şekil 4.1’de sunulmuştur. Her iki pomza içinde elek üzerinde kalan miktarlar, Şekil 4.1’de verilen tane büyüklüğü dağılım eğrileri ile uyum göstermektedir. Her iki pomzanın da yaklaşık %90’ı 1-100 μm arasındadır.

Özgül ağırlıkları

Her iki yöre pomzasının özgül ağırlıkları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Nevşehir pomzasının özgül ağırlığı, Erzincan pomzasının özgül ağırlığından daha düşüktür. Bunun nedeni, Nevşehir pomzasının Erzincan pomzasına göre

daha gözenekli bir iç yapıya sahip olmasıdır. Her iki pomzanın SEM resimleri (Resim 4.1-Resim 4.8) incelendiğinde bu durum kolaylıkla görülebilir. Öğütülmüş pomza tanelerinin büyüklüğü 1-100 μm arasında değişirken, pomza içerisinde 10 μm 'den bile daha küçük çok sayıda boşluk bulunmaktadır (Resim 4.1-Resim 4.8). Bu da pomzaların öğütölseler bile bünyelerinde çok sayıda gözenek ihtiva ettiklerini göstermektedir.

Özgöl yüzey alanları

Her iki pomzaya ait özgöl yüzey alanlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ancak, Çizelge 4.1 de görüldüğü gibi pomzaların incelikleri ile, elek üzerlerinde kalan miktarları arasında bir uyumsuzluk söz konusudur. Nevşehir pomzası Erzincan pomzasına nazaran daha ince görünmekle birlikte, hem 40 μm , hem 90 μm , hem de 200 μm 'lik elek üzerinde Nevşehir pomzası daha fazla kalmıştır. Elek üzerinde kalan miktarlar Şekil 4.1'de verilen tane dağılımı eğrileriyle uyumlu olduğu için, problem incelik değerlerinde demektir. Blaine metodu malzemelerin inceliklerini direk değil, dolaylı olarak ölçen bir yöntemdir ve hava geçirgenlik esasına dayanır. Nevşehir pomzası da Erzincan pomzasına göre daha poröz bir yapıya sahip olduğundan, hava geçiş süresini artırmıştır. Bu da Nevşehir pomzasının inceliğinin olması gerekenden daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca, her iki pomza da poröz bir iç yapıya sahip olduğundan, ikisinin inceliğinin de olması gerekenden daha yüksek çıktığını söylemek yanlış olmaz.

Çizelge 4.1. Pomzaların kimyasal bileşimleri ve bazı fiziksel özellikleri

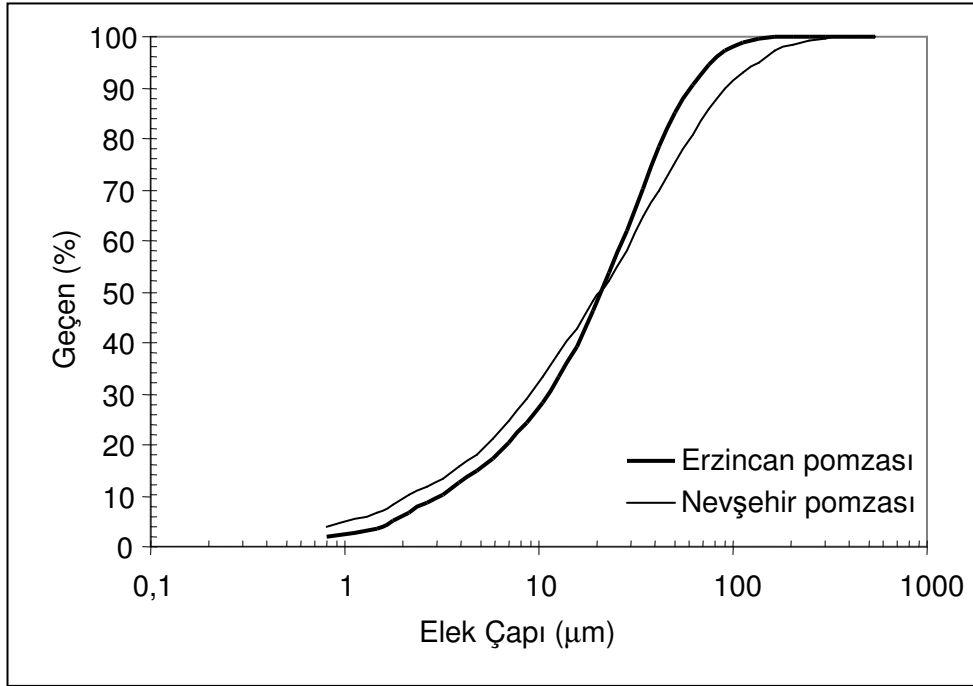
Bileşenler, (%)	Erzincan Pomzası	Nevşehir Pomzası
Na ₂ O	4,39	4,10
MgO	6,30	0,73
Al ₂ O ₃	15,96	13,14
SiO ₂	58,44	71,93
SO ₃	0,04	0,02
K ₂ O	2,64	4,42
CaO	5,20	0,76
Fe ₂ O ₃	4,69	1,07
K. K.	3,02	4,11
Fiziksel özellikler		
Doğal nem, %	45	64
Özgül ağırlık, g/cm ³	2,50	2,39
Özgül yüzey alanı, cm ² /g	3697	4749
200 µm elek üstü, %	0,50	2,95
90 µm elek üstü, %	9,25	16,75
40 µm elek üstü, %	29,95	36,35

Puzolanik aktiviteleri

Erzincan ve Nevşehir pomzalarına TS 25'e göre uygulanan puzolanik aktivite deneyinden elde edilen sonuçlar, TS 25'de verilen sınır değerlerle birlikte Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu sonuçlar, her iki yöre pomzasında puzolanik aktivitesinin olduğunu göstermektedir. Önemli bir fark olmamakla birlikte, Erzincan pomzasının puzolanik aktivitesi Nevşehir pomzasının puzolanik aktivitesinden daha yüksektir.

Çizelge 4.2. Puzolanik aktivite deneyi sonuçları

	Nevşehir Pomzası	Erzincan Pomzası	TS 25
Eğil. Çek. Day., MPa	1,96	2,53	> 1
Basınç Day., MPa	7,44	8,38	> 4



Şekil 4.1. Erzincan ve Nevşehir pomzalarının Lazer Kırınım Cihazıyla belirlenen tane büyüklüğü dağılım eğrileri

Puzolanik aktivite indisleri

Erzincan ve Nevşehir pomzalarının puzolanik aktivite indislerinin belirlenmesi için, ASTM C 595'e göre yapılan testlerden elde edilen sonuçlar, ilgili standartta verilen sınır değerle birlikte Çizelge 4.3'te verilmiştir. Sonuçlar sınır değere çok yakın olmakla birlikte, her iki pomza türünde puzolanik aktivitesinin olduğu söylenebilir. Burada da puzolanik aktivite deneyinde olduğu gibi önemli bir farklılık olmamakla beraber, Erzincan pomzasının puzolanik aktivitesinin daha iyi olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.3. Pomzaların puzolanik aktivite indisi deney sonuçları

	PÇ 42,5	Erzincan Pom.	Nevşehir Pom.	ASTM C 595
Bas. Day., MPa	47,88	37,07	35,95	---
Puz. Akt. İnd., %	---	77,42	75,08	> 75

Mineralojik özellikleri

Nevşehir ve Erzincan pomzalarına ait X-Işını difraktogramları sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Nevşehir pomzasında hakim faz amorf silika olup başka minerallerin varlığı göze çarpmamaktadır. Ancak 3,22 ve 3,70'lik piklerin feldspat olma ihtimali mevcuttur. Erzincan pomzasında da hakim faz amorf silika olmakla birlikte amfibol, quartz ve feldspat üç kristal faz olarak az miktarda bulunmaktadır. Ayrıca 2,88'lik pikin dolomite, 3,02'lik pikin de kalsite ait olma ihtimali mevcuttur.

Mikroskopik analiz

Nevşehir yöresi pomzasının mikro yapısını gösteren SEM resimleri, Resim 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te; Erzincan yöresi pomzasının mikro yapısını gösteren SEM resimleri ise, Resim 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de verilmiştir. Her iki yöre pomzasıda, birbirleriyle bağlantısı olmayan (camsı bir zarla ayrılmış) düzensiz veya oval çok sayıda farklı büyüklüklerdeki boşluklardan oluşan, poröz bir mikro iç yapıya sahiptir.

4.2. Pomzaların Standart Kıvam Suyuna Etkileri

PKÇ ve POİÇ'lerin standart kıvam için ihtiyaç duydukları su miktarları, çimento + pomza (ç+p) ağırlığının %'si olarak Çizelge 4.4'te verilmiştir. PKÇ ve POİÇ'lerde, pomza miktarı ile standart kıvam suyu arasındaki ilişki Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Şekil 4.4'ten anlaşılabacağı üzere, PKÇ'lerde ve POİÇ'lerde standart kıvam suyundaki artış, pomza katkı oranının doğrusal bir fonksiyonu şeklindedir. Yani, kıvam suyu ihtiyacı pomza katkı oranındaki artışla doğru orantılı olarak artmıştır. Ayrıca, standart kıvam için ikameli çimentoların katkılı çimentolara göre, daha fazla suya ihtiyaç duyduğuda açıkça görülmektedir.

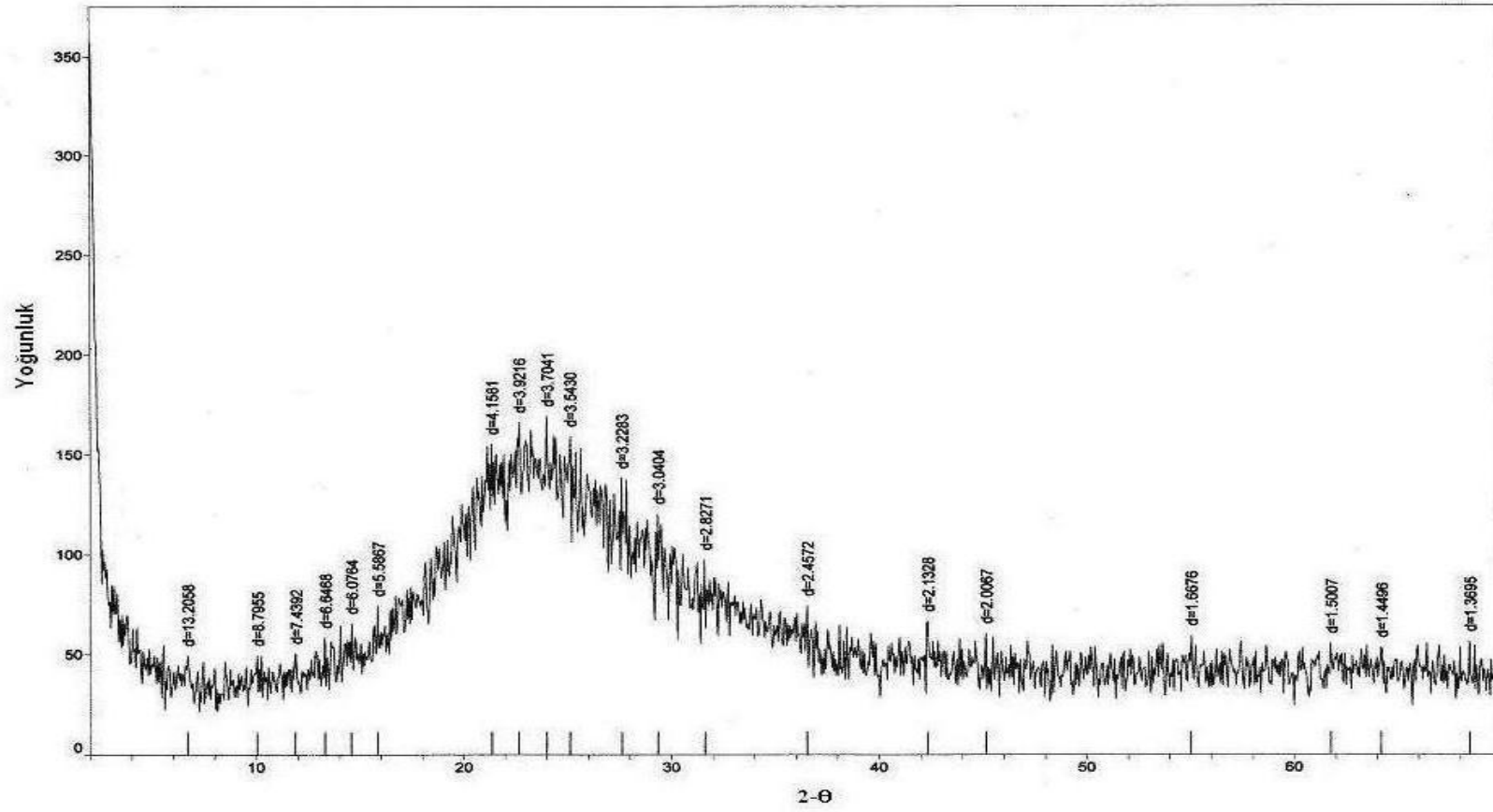
Çizelge 4.4. PKÇ ve POİÇ'lerin standart kıvam suyu miktarları

Pomza miktarı, %	Su ihtiyacı, % (ç+p)			
	EPKÇ	NPKÇ	EPOİÇ	NPOİÇ
0 (PÇ 42,5)	30,00	30,00	30,00	30,00
0 (PKÇ 32,5)	29,00	29,00	29,00	29,00
10	28,50	29,00	31,00	31,50
20	29,50	30,00	32,50	33,50
25	30,50	31,50	33,50	35,00
30	32,00	33,50	35,00	37,00
40	34,00	36,00	37,00	39,50

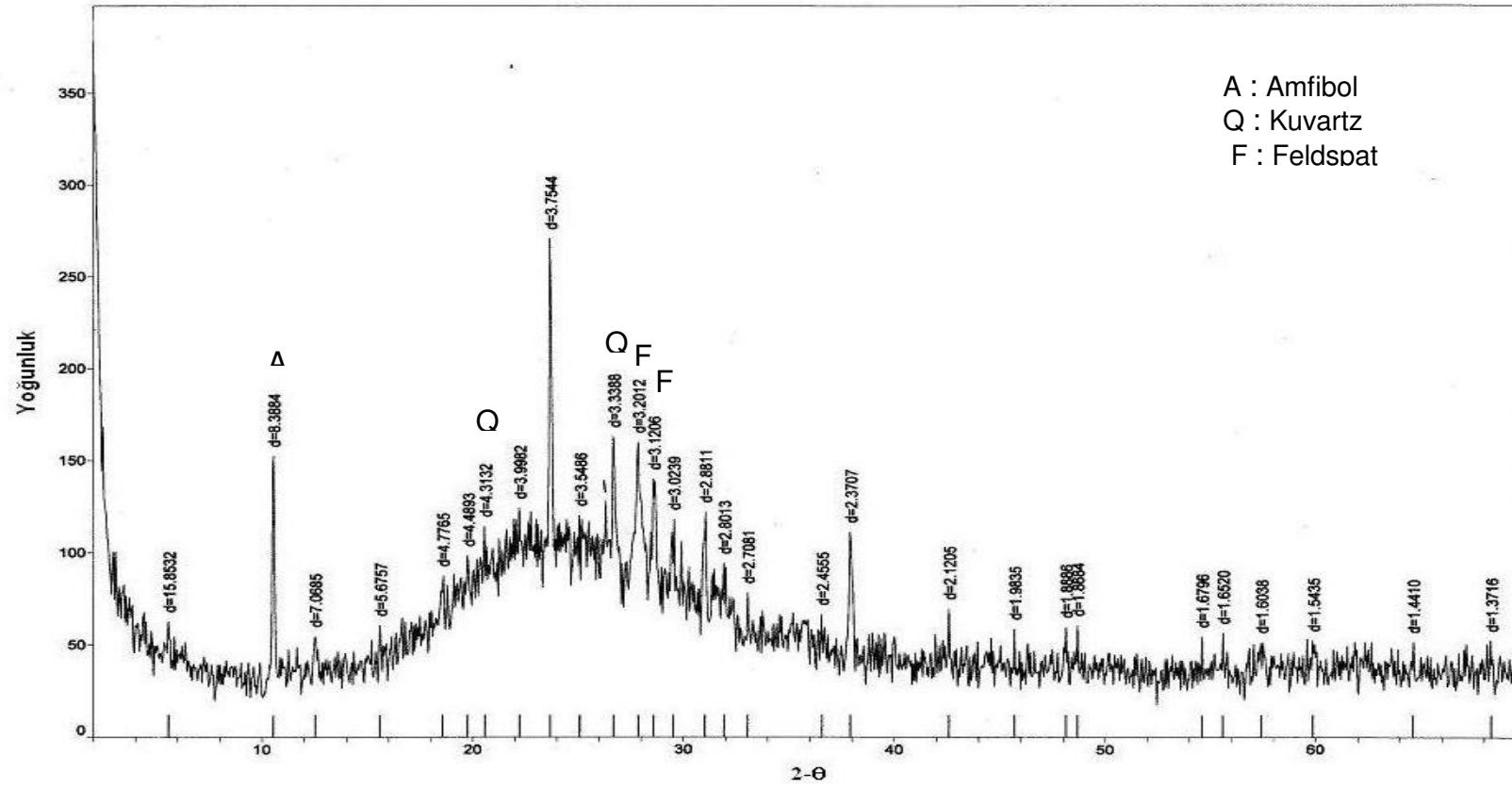
Aslında, öğütme işlemi özgül yüzey alanı artıracığından normal olarak katkılı çimentoların su ihtiyacının ikameli çimentolara göre daha fazla olması gerekirken; birlikte öğütme sırasında pomzanın pürüzlü yapısı aşınma nedeniyle daha düzgün ve yuvarlak bir hal aldığından, doğrudan çimentoya katılmaya göre daha az suya ihtiyaç göstermektedir.

Pomzanın çimentoların kıvam suyu ihtiyacını artırmasının muhtemel sebeplerinden biri, pomzanın özgül ağırlığının çimentonun özgül ağırlığından daha düşük olmasıdır. İkame ağırlık türünden yapıldığından çıkarılan çimentonun yerine ikame edilen pomzanın hacmi daha fazla olacaktır. Bu da standart kıvam için ihtiyaç duyulan su miktarının artmasına neden olacaktır.

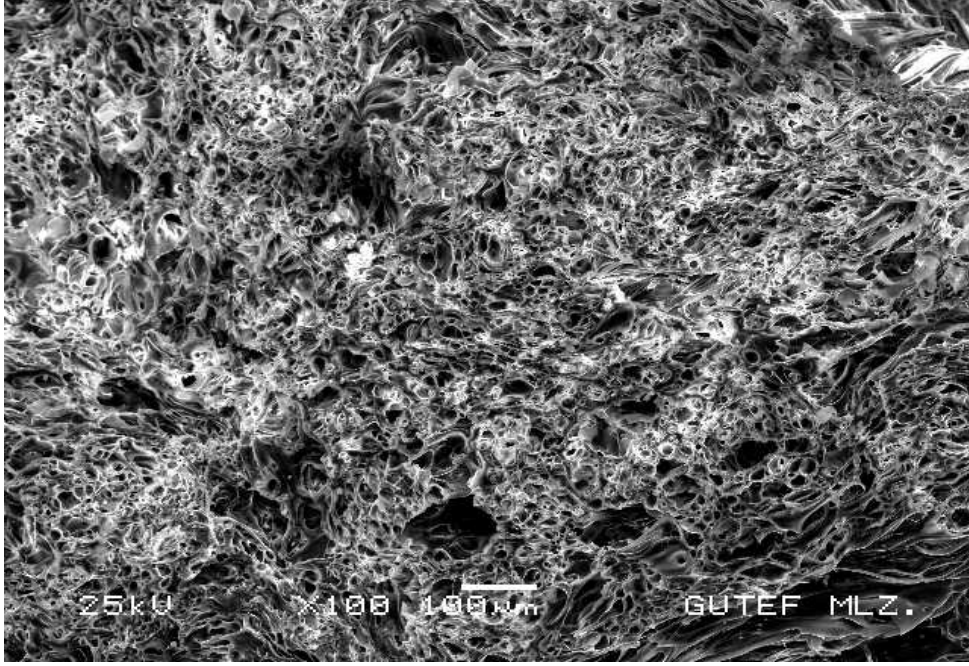
Bu durumun bir diğer nedeni ise, ikame edilen pomza tozlarının çimento partiküllerine nazaran gözenekli bir iç yapıya sahip olmasıdır. Böylece, çimento kıvam suyunun bir kısmı pomzalar tarafından emilip, iç yapılarında mevcut olan gözeneklerde muhafaza edilmekte ve çimentoların kıvamlarına herhangi bir katkıları olmamaktadır.



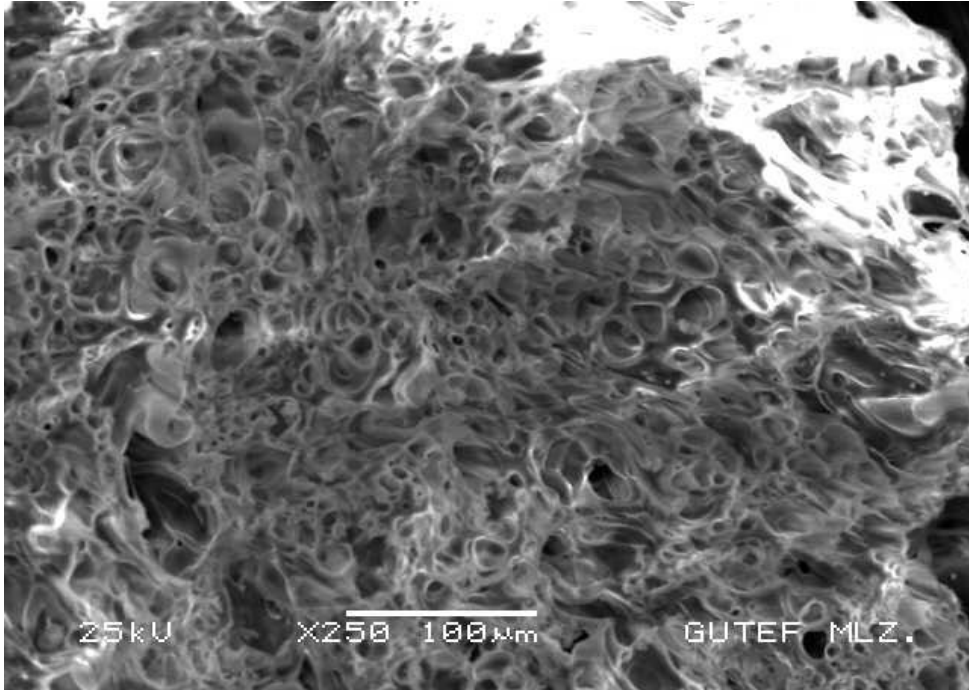
Şekil 4.2. Nevşehir pomzası X-Işınları difraktogramı



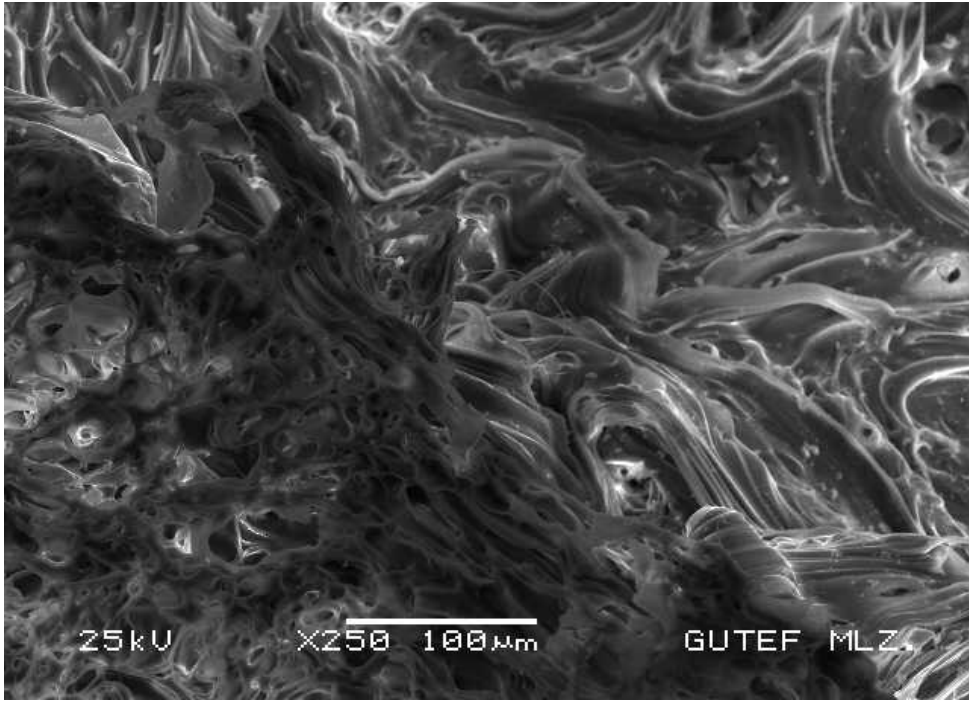
Şekil 4.3. Erzincan pomzasi X-Işınları difraktogramı



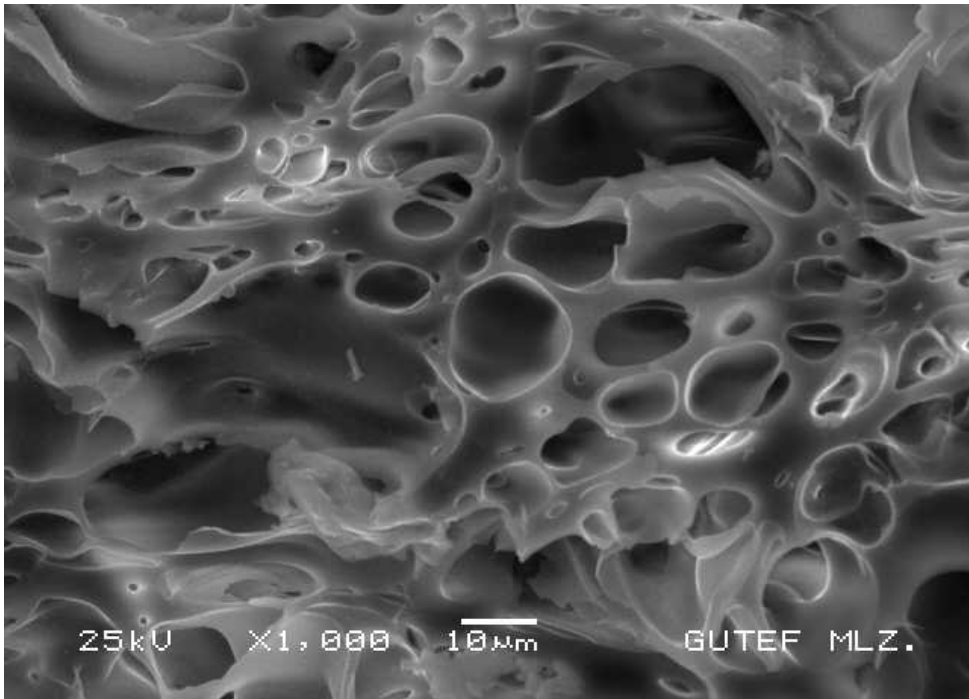
Resim 4.1. Nevşehir pomzasının mikro yapısı-1



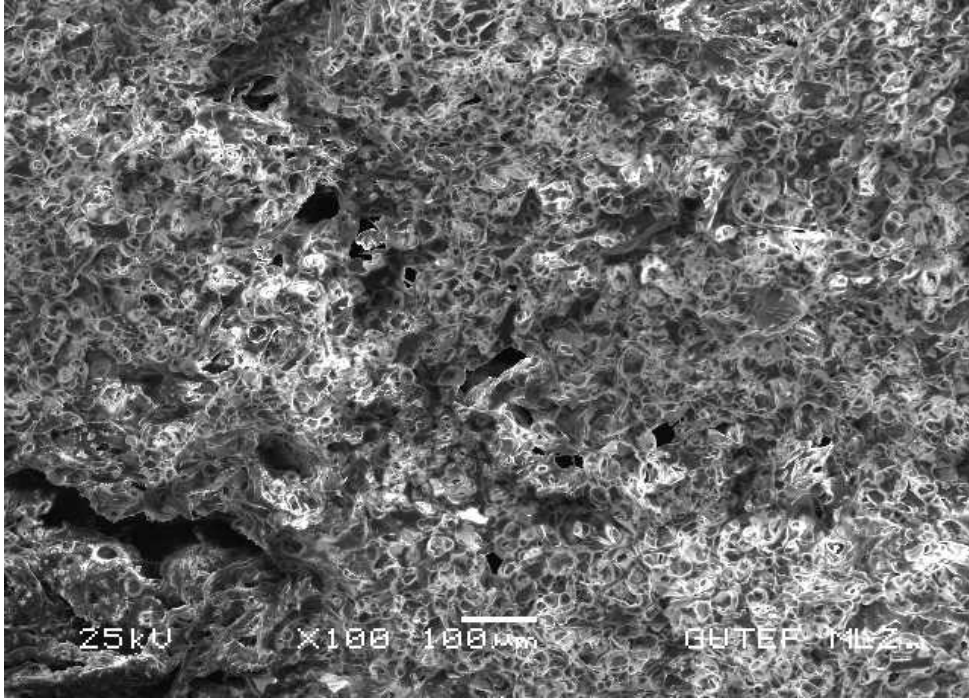
Resim 4.2. Nevşehir pomzasının mikro yapısı-2



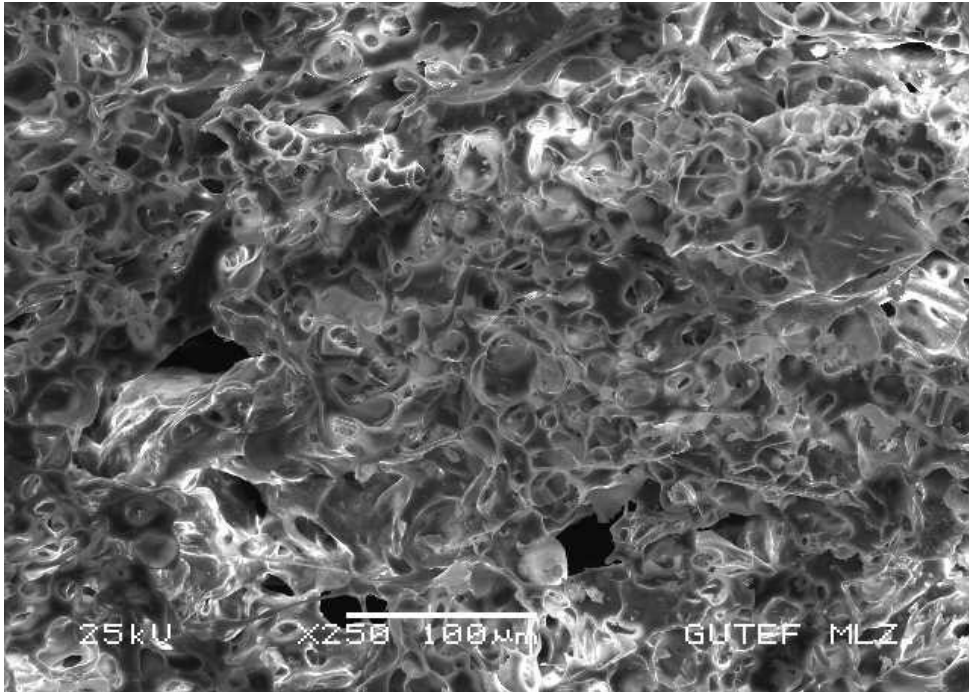
Resim 4.3. Nevşehir pomzasinın mikro yapısı-3



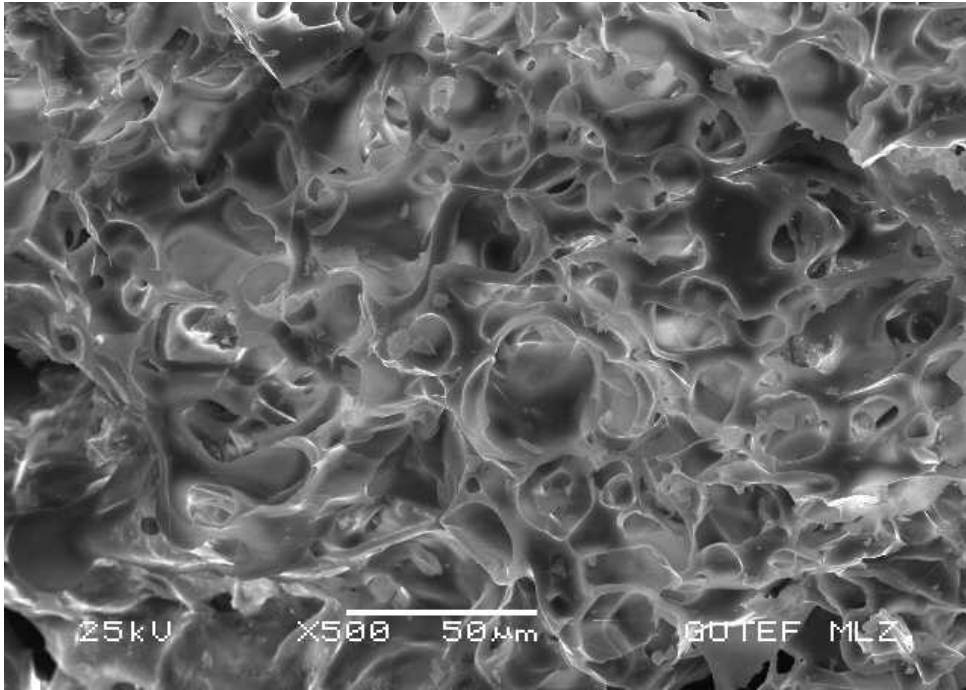
Resim 4.4. Nevşehir pomzasinın mikro yapısı-4



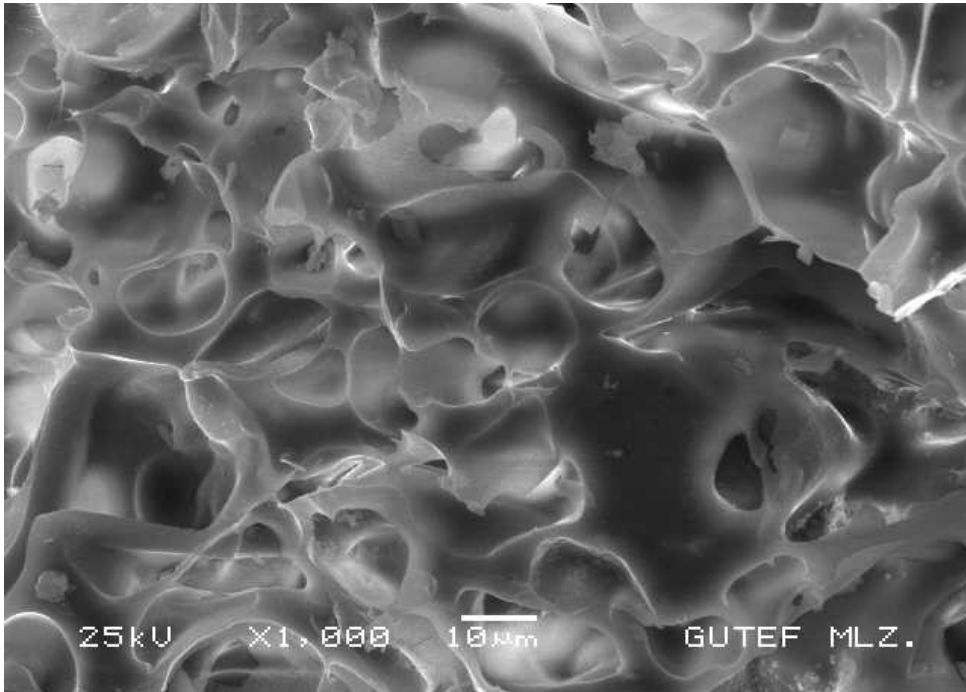
Resim 4.5. Erzincan pomzasinin mikro yapısı-1



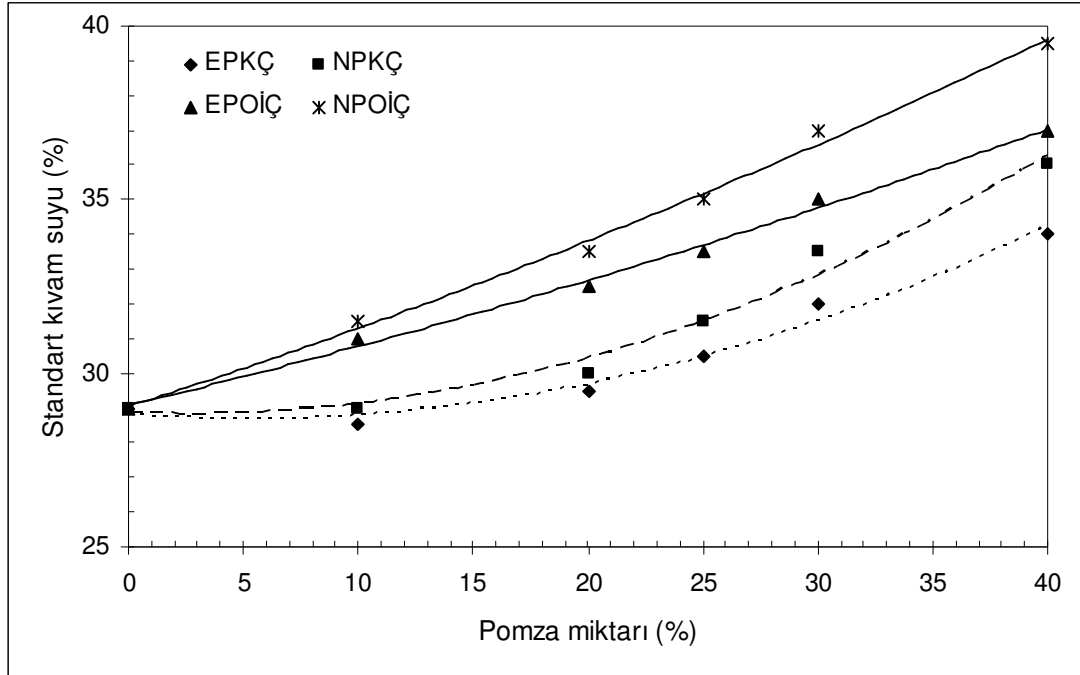
Resim 4.6. Erzincan pomzasinin mikro yapısı-2



Resim 4.7. Erzincan pomzasinin mikro yapısı-3



Resim 4.8. Erzincan pomzasinin mikro yapısı-4



Şekil 4.4. PKÇ ve POİÇ'lerde standart kıvam için gerekli su miktarı – pomza miktarı ilişkisi

EPKÇ ve NPKÇ'lerin kimyasal kompozisyonları, bazı fiziksel ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir. Ayrıca PKÇ'lerin 40 μ m elekten geçen ve kalan kısımlarına ayrı ayrı kimyasal analiz yapılmış ve sonuçları EK-1'de verilmiştir.

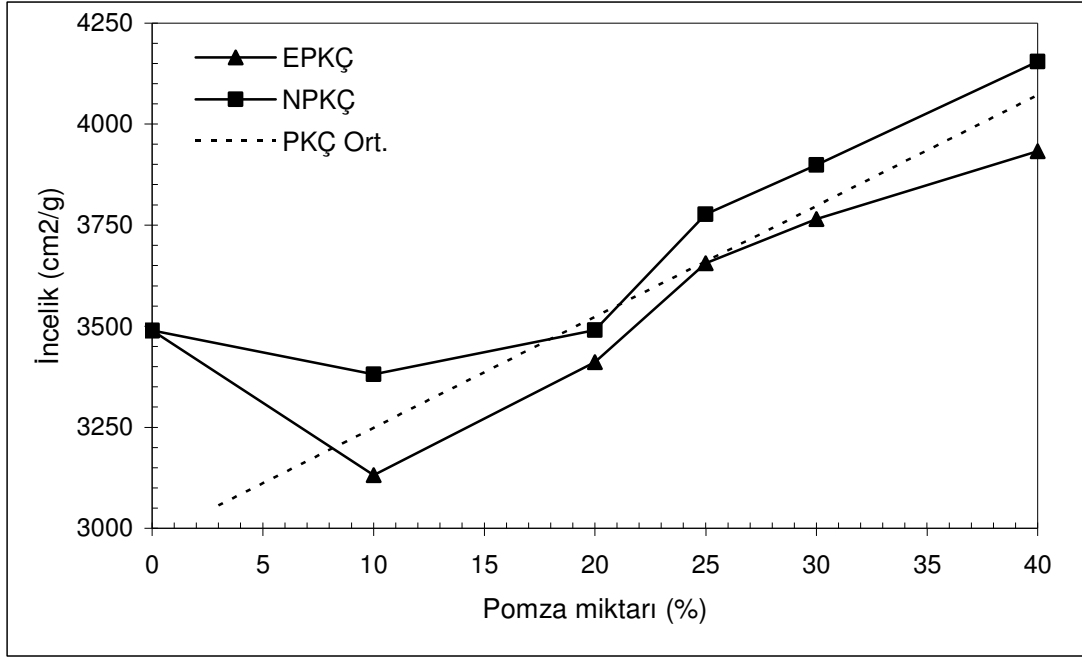
PKÇ'lerin özgül yüzey alanları ile pomza katkı oranları arasındaki ilişki, Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, öğütme süresi sabit olduğundan %10 katkıda her iki yöre pomzası ile üretilen PKÇ'lerin özgül yüzey alanları kontrol çimentosu PÇ 42,5'tan daha küçük olsa bile; yinede her iki yöre pomzası içinde, pomza katkı oranındaki artış pomzanın kolay öğütülebilir olması nedeniyle, PKÇ'lerin özgül yüzey alanlarında doğrusal sayılabilecek bir artışa neden olmuştur. Daha önce de ifade edildiği gibi, pomzanın çimentoların özgül yüzey alanlarının artırmalarının asıl nedeni, gözenekli bir iç yapıya sahip olması nedeniyle, hava geçiş süresini uzatması ve özgül yüzey alanı olması gerekenden daha yüksek göstermesidir.

Çizelge 4.5. EPKÇ'lerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal bileş. (%)	EPKÇ10	EPKÇ20	EPKÇ25	EPKÇ30	EPKÇ40
CaO	57,96	52,40	48,40	46,02	39,39
SiO ₂	24,08	27,45	29,24	31,46	34,90
Al ₂ O ₃	6,46	7,36	7,86	8,41	9,34
Fe ₂ O ₃	3,41	3,60	3,65	3,77	3,87
MgO	1,83	1,95	2,00	2,21	2,32
SO ₃	2,97	2,86	2,61	2,80	2,72
K ₂ O	0,92	1,10	1,18	1,29	1,47
Na ₂ O	0,84	0,98	0,95	1,10	1,19
Kız. Kay.	1,52	1,66	1,99	2,12	2,38
Fiziksel Özellikler					
Özgül ağırlık, g/cm ³	3,03	2,97	2,94	2,92	2,85
Özgül yüz. alanı, cm ² /g	3132	3411	3656	3765	3933
200 µm elek üstü, %	---	---	---	---	---
90 µm elek üstü, %	0,90	0,80	0,75	0,65	0,60
40 µm elek üstü, %	24,15	23,60	22,45	21,60	19,35
Priz başlangıcı, dakika	150	160	175	190	215
Priz sonu, dakika	240	260	280	310	360
Hacim genleşmesi, mm	1	1	1	---	---
Mekanik Özellikler (MPa)					
Basınç dayan., 7 gün	27,69	25,28	21,57	18,31	16,55
28 gün	34,58	31,55	25,90	24,92	22,87
90 gün	39,38	36,07	34,11	31,20	29,00
180 gün	44,17	42,42	41,83	36,24	34,48
360 gün	46,64	44,52	44,18	41,07	37,03
Eğilme dayan., 7 gün	5,04	4,76	3,69	3,51	3,10
28 gün	6,09	5,45	5,20	4,99	4,60
90 gün	6,33	6,17	6,14	5,91	5,78
180 gün	7,55	7,20	7,33	7,48	7,13
360 gün	7,96	7,63	8,04	7,74	7,97

Çizelge 4.6. NPKÇ'lerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal bileş. (%)	NPKÇ10	NPKÇ20	NPKÇ25	NPKÇ30	NPKÇ40
CaO	57,35	50,62	48,50	45,02	38,29
SiO ₂	25,34	29,84	32,42	35,14	40,05
Al ₂ O ₃	6,12	6,72	7,06	7,40	8,06
Fe ₂ O ₃	3,02	2,77	2,74	2,57	2,34
MgO	1,53	1,48	1,50	1,40	1,38
SO ₃	2,92	2,75	2,58	2,78	2,62
K ₂ O	1,12	1,45	1,61	1,84	2,20
Na ₂ O	0,85	0,91	0,98	1,09	1,16
Kız. Kay.	1,47	1,86	2,18	2,26	2,67
Fiziksel Özellikler					
Özgül ağırlık, g/cm ³	3,02	2,95	2,92	2,86	2,74
Özgül yüz. alanı, cm ² /g	3381	3490	3777	3899	4155
200 µm elek üstü, %	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
90 µm elek üstü, %	0,85	0,90	1,70	1,55	1,45
40 µm elek üstü, %	24,95	25,85	27,70	26,25	24,55
Priz başlangıcı, dakika	150	160	170	185	220
Priz sonu, dakika	230	255	270	295	330
Hacim genleşmesi, mm	1	1	---	---	---
Mekanik Özellikler (MPa)					
Basınç dayan., 7 gün	29,69	23,14	20,43	20,02	11,41
28 gün	36,15	30,87	27,90	26,59	21,62
90 gün	43,99	37,01	35,33	31,82	26,01
180 gün	48,66	44,65	42,53	38,98	30,11
360 gün	51,49	47,39	44,24	41,04	33,80
Eğilme dayan., 7 gün	5,44	23,14	20,43	20,02	11,41
28 gün	6,25	5,10	5,00	4,93	4,10
90 gün	6,99	5,88	6,13	5,59	4,99
180 gün	8,13	7,35	7,36	7,14	6,14
360 gün	8,43	7,77	7,82	7,66	6,29

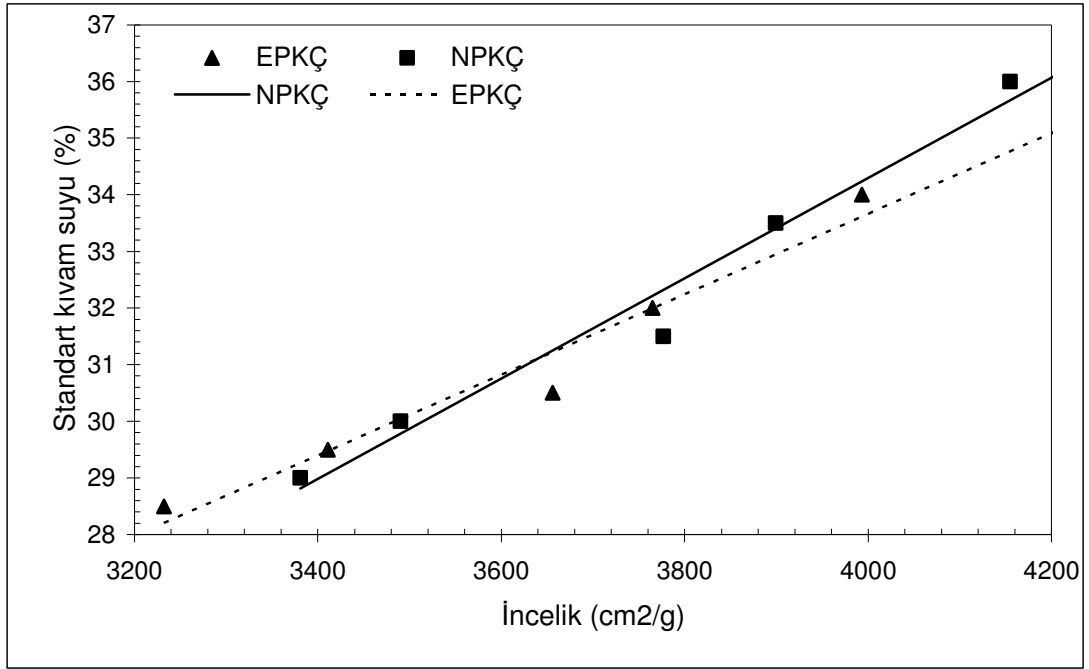


Şekil 4.5. PKÇ'lerde pomza miktarı-incelik (ölgül yüzey alan) ilişkisi

Bunun yanında tüm katkı oranlarında Nevşehir pomzası içeren çimentoların ölgül yüzey alanları, Erzincan pomzası içeren çimentoların ölgül yüzey alanlarından daha yüksektir. Ayrıca bu farklılık pomza katkı oranı arttıkça daha da belirginleşmektedir. Ancak pomzalara ait tana büyüklüğü dağılım eğrileri bu sonuçları desteklememektedir. Dolayısıyla bu durumun, Nevşehir pomzasının Erzincan pomzasına göre daha boşluklu bir iç yapıya sahip olmasının, bir sonucu olduğu anlaşılmaktadır.

Bu da, NPKÇ'lerin standart kıvam için EPKÇ'lere kıyasla daha fazla suya ihtiyaç göstermesini açıklayabilir. Ancak, katkılı çimentolar için kullanılan her iki pomza türünün su ihtiyacına olan etkisini belirleyebilmek için, çimento inceliğini sabit tutmak gerekir. Bunun için Şekil 4.6'da verilen standart kıvam suyu – ölgül yüzey alan grafiğinden yararlanılmıştır. Şekil 4.6'ya göre pomza türlerinin kıvam suyuna etkisi hakkında net bir şey söylemek mümkün olmamakla birlikte, çimento inceliğinin 3500-3600 cm²/g veya daha da üzerinde olduğu düşünüldüğünde, Nevşehir pomzasının Erzincan pomzasına

göre su ihtiyacını bir miktar artırdığını, incelik arttıkça da bu farkın daha da büyüdüğünü söylemek yanlış olmaz.



Şekil 4.6. PKÇ'lerde standart kıvam suyu-incelik ilişkisi

Standart kıvam için EPKÇ'lerin NPKÇ'lere göre daha az suya gereksinim duymalarının bir diğer nedenide Erzincan ve Nevşehir pomzalarının özgül ağırlıkları arasındaki farktır. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi, Nevşehir pomzasının özgül ağırlığı Erzincan pomzasının özgül ağırlığından daha düşük olduğundan, aynı ağırlık için Nevşehir pomzasından hacimce daha fazla pomza kullanılması, bu su artışının bir diğer nedeni olarak gösterilebilir.

EPOİÇ'lerin ve NPOİÇ'lerin tamamında standart kıvam için ihtiyaç duyulan su miktarı, tüm ikame oranları için her iki kontrol çimentosundan da daha fazladır. Her iki ikameli grup içinde, standart kıvam için gerekli olan su miktarı pomza ikame oranındaki artışa bağlı olarak artış göstermektedir (Şekil 4.4).

Tüm ikame oranları için, NPOİÇ'ler EPOİÇ'lere göre standart kıvam için daha fazla suya ihtiyaç duymaktadırlar. Aradaki fark, ikame oranındaki artışa bağlı

olarakta artış göstermektedir (%10 ikame oranında aradaki fark %1 iken, %40 ikame oranında bu fark %3,5'e kadar çıkmıştır). Bu durum Şekil 4.4'te de gözlemlenmektedir.

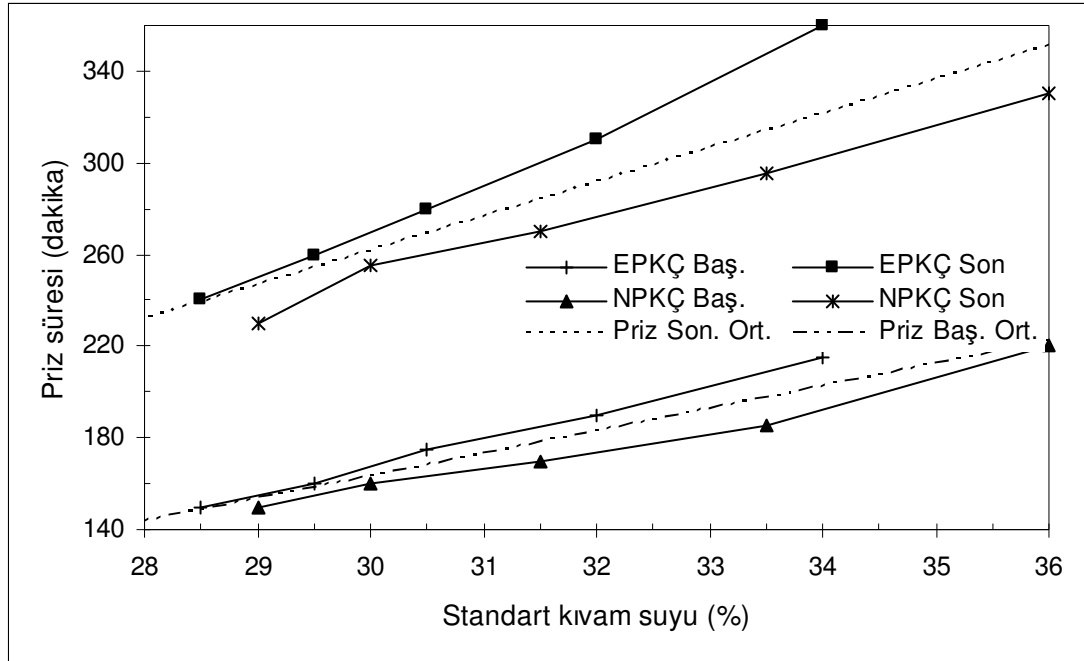
Bu farklılığın iki sebebi olduğu düşünülmektedir. Sebeplerden biri Çizelge 4.1'den de görüldüğü gibi, Nevşehir pomzasının özgül ağırlığının Erzincan pomzasının özgül ağırlığından daha düşük olmasıdır. Diğer sebep ise, Nevşehir pomzasının Erzincan pomzasına göre daha gözenekli bir iç yapıya sahip olmasıdır.

4.3. Pomzaların Priz Sürelerine Etkileri

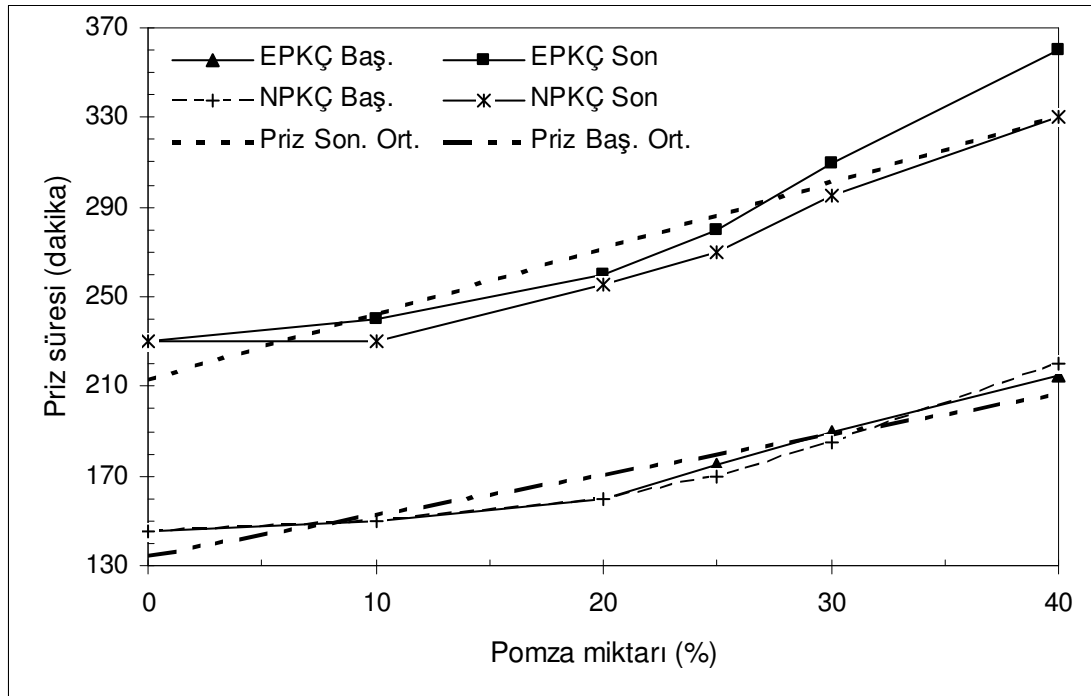
Pomza ile üretilen katkılı çimentolara ait priz başlangıç/sona erme süreleri EPKÇ'ler için Çizelge 4.5'te, NPKÇ'ler için ise Çizelge 4.6'da verilmiştir. Tüm PKÇ'lerin ve POİÇ'lerin priz sürelerinin TS EN 197-1'de (96) verilen sınır değerlere uygun olduğu görülmüştür.

PKÇ'lere ait priz süresi-standart kıvam suyu ilişkisi Şekil 4.7'de verilmiştir. PKÇ'lerin hem priz başlama, hemde priz sona erme süreleri standart kıvam suyundaki artışlarla hemen hemen doğru orantılı olarak artmaktadır.

Şekil 4.8'de priz süreleri pomza katkı oranları ile ilişkilendirilmiştir. Burada, pomza katkısının çimentoların hem priz başlangıcı hem de priz sonu sürelerini artırdığı görülmektedir. Bu durum katkı oranına bağlı olarak daha da belirginleşmekte, yani pomza katkı oranı arttıkça priz süreleri daha da uzamaktadır (özellikle pomza katkı oranı %20'yi geçtiğinde priz sürelerindeki artış oranı daha da yükselmektedir).



Şekil 4.7. PKÇ'lerde standart kıvam suyu-priz süresi ilişkisi



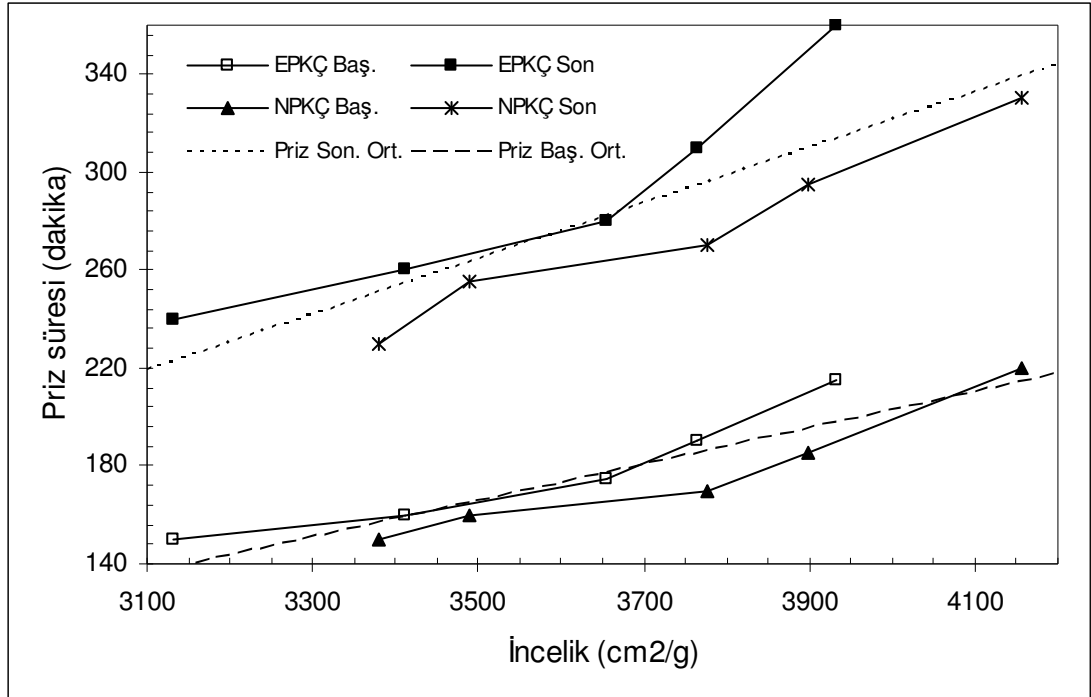
Şekil 4.8. PKÇ'lerde priz süresi-pomza miktarı ilişkisi

Ayrıca priz sonu sürelerindeki artış miktarı priz başlangıç sürelerindeki artış miktarına göre daha yüksektir. Bu durumda yine pomza katkı oranı %20'yi aştığında daha belirgin hale gelmektedir.

Şekil 4.9'da pomza katkılı çimentoların priz süreleri incelikleri ile ilişkilendirilmiştir. Bu ilişki, PKÇ'lerin priz sürelerinin incelikleri ile doğru orantılı olarak arttığını ve priz sonu süresindeki artış eğiliminin priz başlangıç sürelerindeki artış eğiliminden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Priz sürelerinin İncelikle doğru orantılı olarak artmasının sebebi PKÇ'lerde inceliği pomzanın artırmasından kaynaklanmaktadır. Pomza çabuk öğündünden incelik yüksek olmakta fakat, PKÇ içerisindeki klinker kaba (özellik yüzey alanı düşük) kalmaktadır. Bu durum EK-2'de verilen kimyasal analizlerde de görülmektedir. 40 µm'luk elek üstünde kalan malzemenin kimyasal kompozisyonu klinkerin kimyasal kompozisyonuna benzerken, 40 µm'luk elek altına geçen malzemenin kimyasal kompozisyonu pomzanın kimyasal kompozisyonuna benzemektedir. Bu da hidrasyonu yavaşlatmakta ve priz sürelerini artırmaktadır. Burada unutulmaması gereken bir diğerk unsur da, boşluklu bir iç yapıya sahip olan pomzanın çimentonun inceliğini olduğundan daha yüksek göstermesidir.

Priz sürelerindeki bu artışın bir diğerk nedeni ise; pomza içeriğinin artışının karışımındaki çimento miktarını ve bunun sonucu olarakta çimentonun yüzey alanını azaltmasıdır. Bu durum hidrasyon işleminin yavaşlamasına ve priz sürelerinin artışına neden olmaktadır.

POİÇ'lerin priz başlangıç/sona erme süreleri ve hacim genleşme değerkleri Çizelge 4.7'de verilmiştir. Priz süresi – pomza miktarı ilişkisi Şekil 4.10'da, priz süresi–standart kıvam suyu ilişkisi Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, POİÇ'lerde de PKÇ'lerde olduğu gibi, katkı oranındaki artışa bağılı olarak priz başlangıç ve sona erme süreleri artmıştır. Bunun nedeni de PKÇ'lerde olduğu gibi çimento miktarındaki ve dolayısıyla çimentonun özgül yüzey alanındaki azalmadır.



Şekil 4.9. PKÇ'lerde incelik-priz süresi ilişkisi

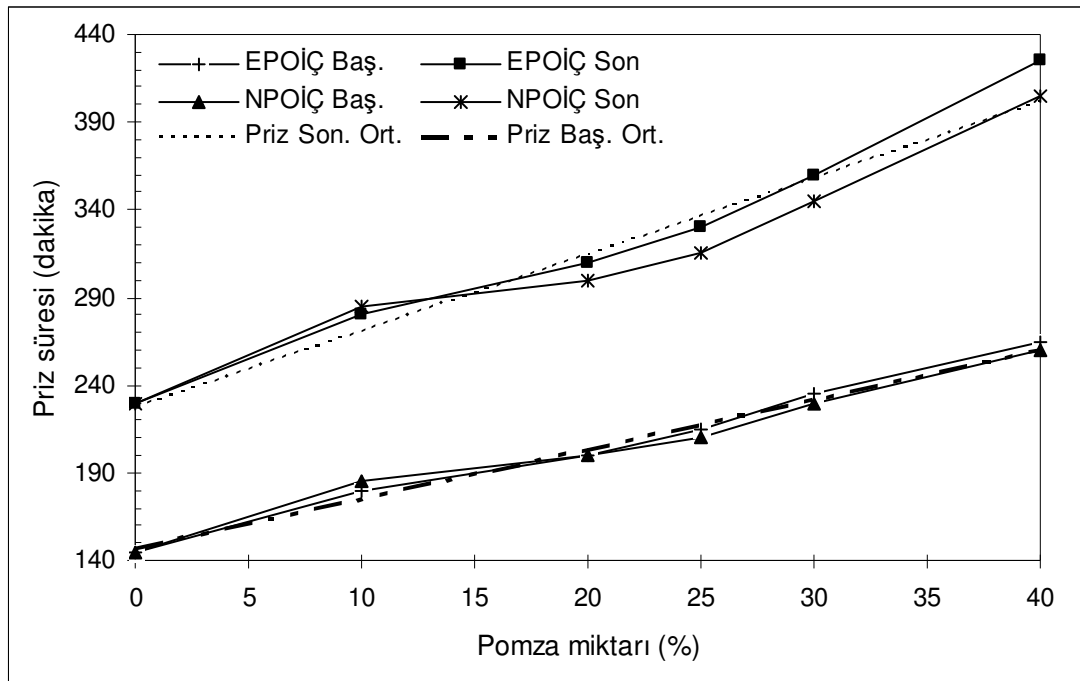
Çizelge 4.7. POİÇ'lerin priz süreleri ve hacim genleşme değerleri

Pomza miktarı (%)	EPOİÇ			NPOİÇ		
	Priz başl. (dakika)	Priz sonu (dakika)	Hacim gen. (mm)	Priz başl. (dakika)	Priz sonu (dakika)	Hacim gen. (mm)
0 (PÇ42,5)	145	230	2	145	230	2
10	180	280	1	185	285	1
20	200	310	1	200	300	1
25	215	330	1	210	315	-
30	235	360	1	230	345	-
40	265	425	-	260	405	-

Ancak, POİÇ'lerin priz sürelerindeki artış PKÇ'lerin priz sürelerindeki artıştan daha fazladır. Bunun nedeni ise PKÇ'lerde pomza ile klinkerin birlikte öğütülmesi sırasında, pomzaların klinkeri çok az da olsa aşındırmasıdır. Böylece, aşınan klinkerin özgül yüzey alanı bir miktar artmış ve bu da

hidratasyon işleminin hızlanmasına ve dolayısıyla da PKÇ'lerin priz sürelerinin, POİÇ'lerin priz sürelerinden daha kısa olmasına neden olmuştur.

Bu veriler ışığında, kullanılan pomza türlerinin priz sürelerine etkileri bakımından aralarında bir farklılık olduğu söylenemez.

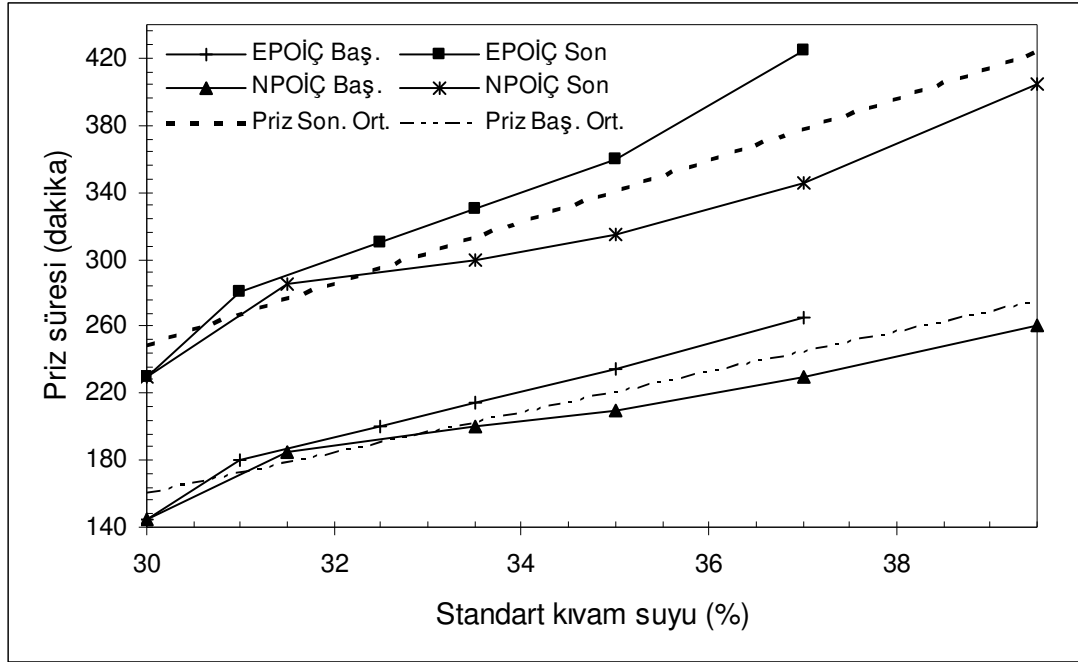


Şekil 4.10. POİÇ'lerin priz süresi-pomza miktarı ilişkisi

4.4. Pomzaların Hacim Genleşmesine Etkileri

Kontrol çimentoları PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5, EPKÇ, NPKÇ ve POİÇ'lerin hacim genleşme değerleri sırasıyla Çizelge 3.1, Çizelge 3.2, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilmiştir. Çizelgelerden de görüldüğü gibi, PKÇ ve POİÇ'lerin hacim genleşme değerlerinin tamamı TS EN 197-1'de verilen sınır değerinin altında kalmaktadır. Ayrıca PKÇ ve POİÇ'lerin tamamı kontrol çimentosu PÇ 42,5'ten daha düşük hacim genleşme değerleri vermişlerdir. PKÇ ve POİÇ'lerin tamamı PKÇ 32,5 kontrol çimentosundan daha düşük veya ona eşit genleşme değerleri vermişlerdir. Dolayısıyla, pomzanın

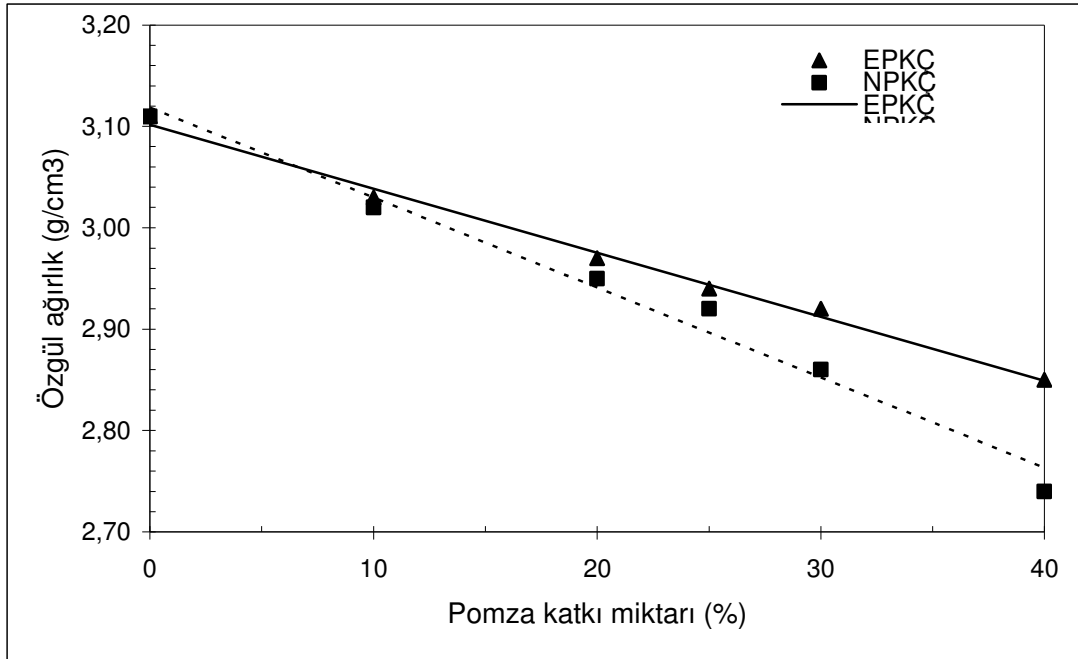
çimento katkı maddesi olarak kullanılmasının, çimentoya hacim genleşmesi yönünden olumlu katkı sağladığı söylenebilir.



Şekil 4.11. POİÇ'lerin priz süresi-standart kıvam suyu ilişkisi

4.5. Pomzaların Özgül Ağırlığa Etkileri

EPKÇ'lerin, NPKÇ'lerin özgül ağırlık değerleri ve PKÇ'lerin özgül ağırlıklarının pomza miktarı ile değişimi sırasıyla Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.12'den de görüldüğü gibi Erzincan ve Nevşehir pomzalarının her ikisi de katkı oranındaki artışa bağlı olarak, çimentoların özgül ağırlıklarını azaltmaktadırlar. Bunun muhtemel sebebi ise poröz bir iç yapıya sahip olan pomzaların her ikisinin de özgül ağırlığının klinkerin özgül ağırlığından daha düşük olmasıdır. Nevşehir pomzası Erzincan pomzasına göre daha boşluklu bir iç yapıya sahip olduğundan, özgül ağırlığı Erzincan pomzasının özgül ağırlığından daha düşüktür. Bundan dolayı, NPKÇ'lerin özgül ağırlıkları EPKÇ'lerin özgül ağırlıklarından daha düşüktür.



Şekil 4.12. PKÇ'lerde özgül ağırlık-pomza miktarı ilişkisi

4.6. Pomzaların Çimentoların Kimyasal Kompozisyonları Üzerindeki Etkileri

Her iki yöre pomzasının katkı maddesi olarak kullanılması ile elde edilen çimentoların kimyasal kompozisyonları sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir. EPKÇ'lerin ve NPKÇ'lerin kimyasal bileşimleri TS EN 197-1'de istenilen gereksinimleri tamamen sağlamaktadır. Diğer bir ifade ile, Erzincan ve Nevşehir pomzaları ile üretilen katkılı çimentoların tamamı kimyasal bileşenlerinin miktarları bakımından TS EN 197-1'e uygundur.

4.7. Pomzaların Harçların Su İhtiyacına Etkileri

PKÇ'ler, POİÇ'ler ve kontrol çimentoları PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 ile üretilen harçların ASTM C 109'da da istenilen akma testi uygulanarak tespit edilen su ihtiyaçları, Çizelge 4.8'de verilmiştir. PKÇ'ler ve POİÇ'lerle üretilen harçlara sabit bir kıvam için (ASTM C 109'a göre 110 ± 5 akma sağlayacak) gerekli olan su ihtiyacı, pomza içeren çimentoların standart kıvam suyu ihtiyacına

çok benzer bir özelliktir. Bu nedenle çimentoların standart kıvam suyu ihtiyacı üzerinde etkili olan unsurlar, pomza içeren çimentolarla üretilen harçlar içinde geçerlidir.

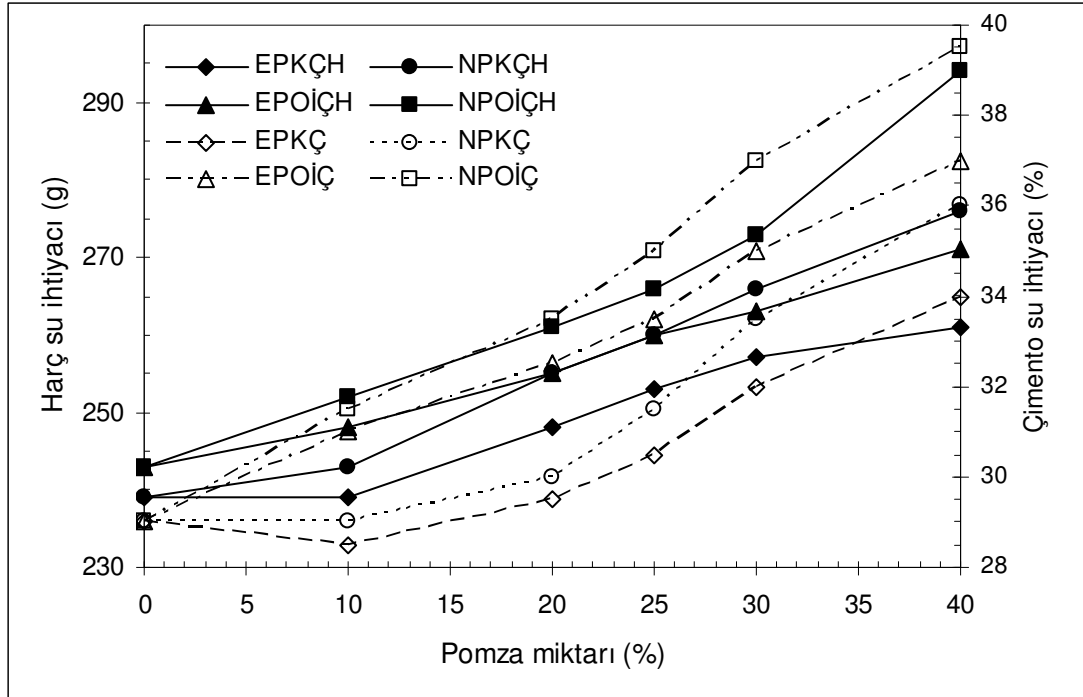
Şekil 4.13'te verilen pomza katkı oranı – harç suyu ilişkisinden de açıkça görüldüğü gibi; harçların üretilmesinde kullanılan pomza katkılı / ikameli çimentoların içerisindeki pomza katkı oranındaki artışla doğru orantılı olarak harç suyu ihtiyacı da artış göstermektedir. Bunun nedeni ise her iki pomzanın da özgül ağırlıklarının klinkerin özgül ağırlığından daha düşük olması ve pomzaların çimento ve klinker partiküllerine göre daha boşluklu bir iç yapıya sahip olmasıdır.

Çimento özgül yüzey alanının harç için ihtiyaç duyulan su miktarına etkisi, çimento standart kıvam suyuna olan etkisiyle benzerlik göstermektedir. Bu durum Şekil 4.14'te verilen PKÇ ve PKÇH'larda incelik – standart kıvam suyu ilişkisinde daha açık olarak görülmektedir. Harç suyu ihtiyaçlarında da, standart kıvam suyuna benzer şekilde NPKÇ'ler ile üretilen harçlar, EPKÇ'ler ile üretilen harçlara göre daha fazla suya ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, Nevşehir pomzasının özgül ağırlığının Erzincan pomzasının özgül ağırlığından daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Yer değiştirme ağırlıkla yapıldığından, aynı katkı oranı için daha fazla Nevşehir pomzası kullanılacaktır. Bu da, daha fazla harç suyuna ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir. Ayrıca Nevşehir pomzasının daha gözenekli bir iç yapıya sahip olmasının, harç suyu ihtiyacını artırıcı etkiside unutulmamalıdır.

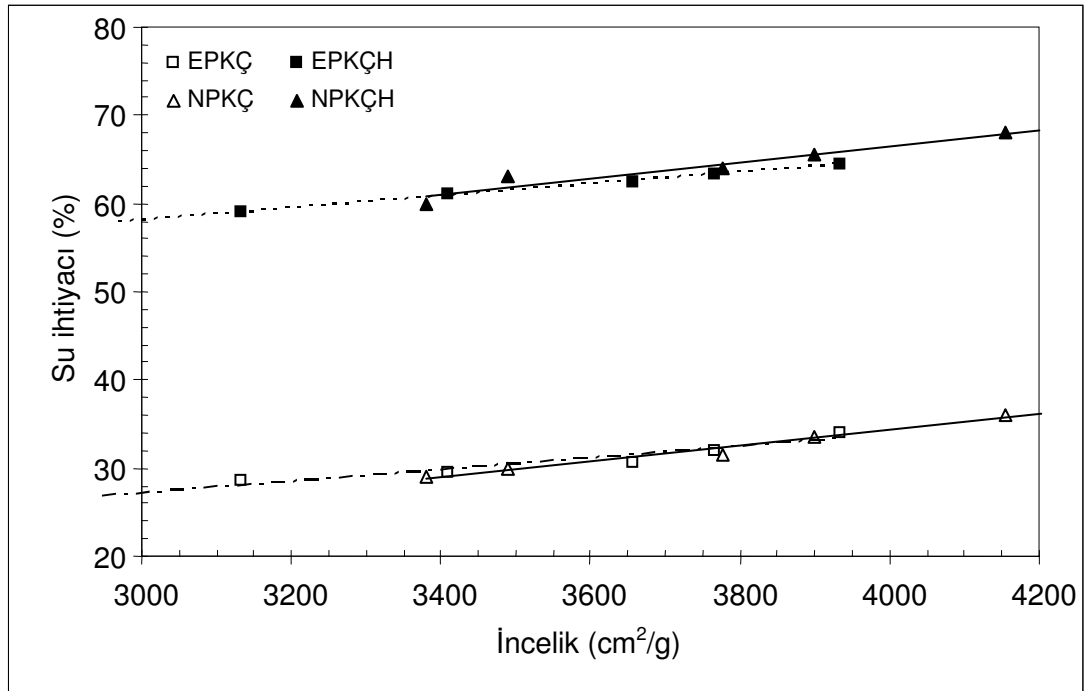
Ayrıca PKÇ'lerle üretilen harçlar, POİÇ'lerle üretilen harçlara göre daha az suya gereksinim duymaktadırlar. Bu durum ise, pomzanın çimentodan daha ince olmasının ve PKÇ grubu çimentoların üretilmeleri esnasında pomzaların klinker ile birlikte öğütölmeleri ile pürüzlü ve köşeli yapısını kaybederek daha pürüzsüz ve küresel bir hal almalarının sonucudur.

Çizelge 4.8. PKÇ'ler, POİÇ'ler, PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 ile üretilen harçların su ihtiyaçları (450 g çimento + 1350 g kum için)

Harç No	Çimento Tipi	Su Miktarı (ml)	Su Miktarı (%)
1	PÇ 42,5	243	54
2	PKÇ 32,5	239	53
3	EPKÇ 10	239	53
4	EPKÇ 20	248	55
5	EPKÇ 25	253	56
6	EPKÇ 30	257	57
7	EPKÇ 40	261	58
8	NPKÇ 10	243	54
9	NPKÇ 20	255	57
10	NPKÇ 25	260	58
11	NPKÇ 30	266	59
12	NPKÇ 40	276	61
13	EPOİÇ 10	248	55
14	EPOİÇ 20	255	57
15	EPOİÇ 25	260	58
16	EPOİÇ 30	263	59
17	EPOİÇ 40	271	60
18	NPOİÇ 10	252	56
19	NPOİÇ 20	261	58
20	NPOİÇ 25	266	59
21	NPOİÇ 30	273	61
22	NPOİÇ 40	294	65



Şekil 4.13. PKÇ ve POİÇ'lerle üretilen harçlarda %110 akma için standart kıvam suyu-pomza miktarı ilişkisi



Şekil 4.14. PKÇ'ler ve PKÇH'larda incelik-standart kıvam suyu ilişkisi

4.8. Pomzaların Çimento Dayanımlarına Etkisi

Pomzaların çimentoların dayanımları üzerine olan etkilerini belirlemek için, iki farklı kontrol çimentosu kullanılmıştır. Bunlardan biri PÇ 42,5, diğeri ise aynı klinker kullanılarak üretilen tras ve kalker katkılı PKÇ 32,5'tur. Böylece, pomza türünün ve miktarının çimento özellikleri üzerine olan etkilerini bir Portland çimentosu ve pomzalı çimentoların muadili olabilecek nitelikteki Portland kompoze çimento ile karşılaştırmak mümkün olmuştur.

Pomzaların hem ikame hem de katkı malzemesi olarak kullanıldığı iki durum içinde, dayanımlar tespit edilerek pomzaların kullanılış şeklinin, miktarının ve cinsinin etkileri gerek birbiriyle, gerekse PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 kontrol çimentolarıyla karşılaştırılmıştır.

4.8.1. Eğilmede çekme dayanımı

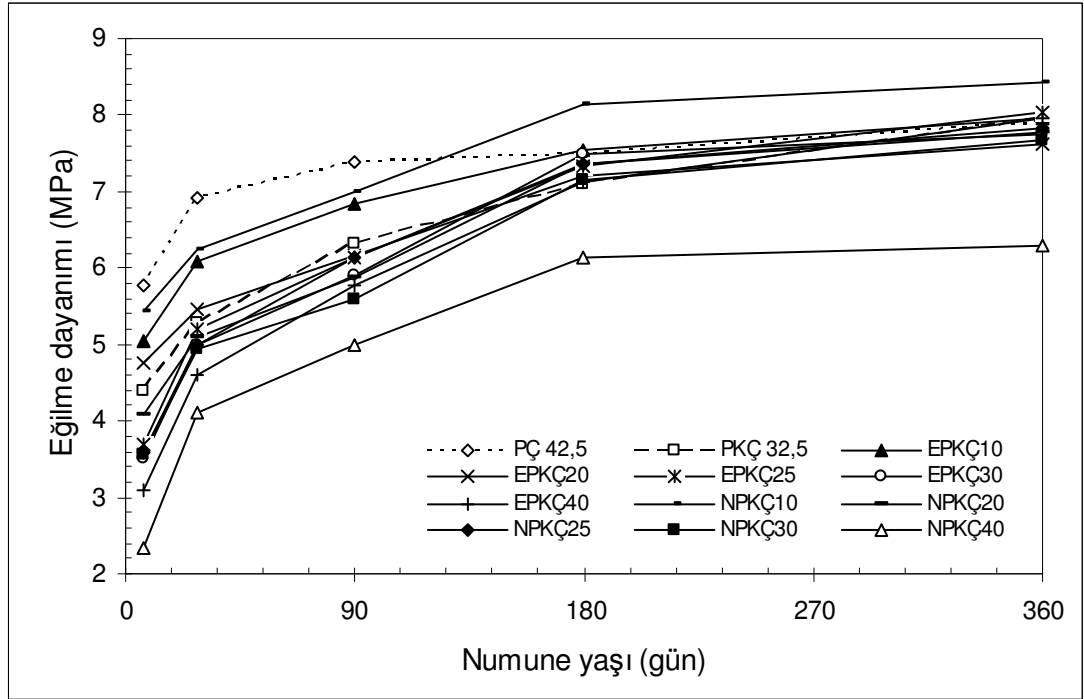
Üretilen numuneler TS EN 196-1'e uygun olarak, eğilmede çekme dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. PKÇ'ler ve POİÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı değerlerini gösteren açıklayıcı istatistikler sırasıyla Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir. PKÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı-pomza katkı oranı ilişkisi Şekil 4.15'te, POİÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı-pomza katkı oranı ilişkisi ise Şekil 4.16'da verilmiştir. Ayrıca NPKÇ'ler, EPKÇ'ler, NPOİÇ'ler ve EPOİÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı – pomza katkı oranı ilişkileri EK-2'te de ayrı grafikler halinde verilmiştir.

Çizelge 4.9. Katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

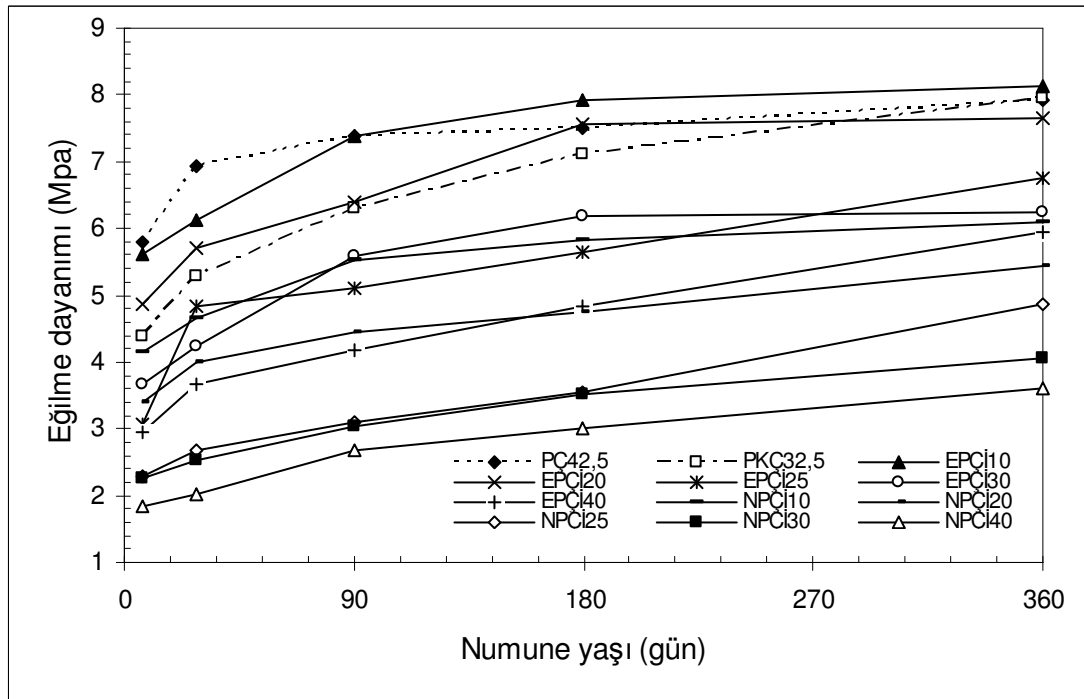
Numune Yaşı (Gün)	Pomza miktarı (%)	Erzincan Pomzası				Nevşehir Pomzası			
		Ortalama (MPa)	Std. Sapma	Min.	Maks.	Ortalama (MPa)	Std. Sapma	Min.	Maks.
7	%0 (PÇ32,5)	4,40	0,2028	4,02	4,71	4,40	0,2028	4,02	4,71
	%10	5,04	0,1660	4,81	5,36	5,44	0,1660	4,81	5,36
	%20	4,76	0,0689	4,68	4,90	4,07	0,1424	3,90	4,35
	%25	3,69	0,0851	3,58	3,86	3,59	0,0896	3,44	3,75
	%30	3,51	0,1093	3,38	3,73	3,56	0,0994	3,36	3,68
	%40	3,10	0,0751	2,97	3,23	2,35	0,1534	2,07	2,60
28	%0 (PÇ32,5)	5,28	0,0617	5,19	5,40	5,28	0,0617	5,19	5,40
	%10	6,09	0,1572	5,84	6,38	6,25	0,1308	6,01	6,46
	%20	5,45	0,0240	5,42	5,50	5,10	0,0058	5,09	5,11
	%25	5,20	0,1058	5,00	5,36	5,00	0,0775	4,85	5,10
	%30	4,99	0,0895	4,88	5,17	4,93	0,0590	4,81	5,00
	%40	4,60	0,2649	4,29	5,13	4,10	0,0674	3,97	4,20
90	%0 (PÇ32,5)	6,31	0,0736	6,16	6,39	6,31	0,0736	6,16	6,39
	%10	6,33	0,0273	6,28	6,37	6,66	0,2950	6,07	6,96
	%20	6,17	0,1186	5,93	6,30	5,88	0,0666	5,79	6,01
	%25	6,14	0,0809	6,00	6,28	6,13	0,2730	5,73	6,65
	%30	5,91	0,1235	5,72	6,14	5,59	0,1124	5,44	5,81
	%40	5,78	0,1590	5,50	6,05	4,99	0,0348	4,93	5,05
180	%0 (PÇ32,5)	7,11	0,1434	6,82	7,26	7,11	0,1434	6,82	7,26
	%10	7,22	0,0991	7,06	7,40	8,13	0,2948	7,69	8,69
	%20	7,20	0,2210	6,89	7,63	7,35	0,1517	7,05	7,51
	%25	7,67	0,0829	7,56	7,83	7,36	0,3636	6,82	8,05
	%30	7,81	0,1317	7,55	7,95	7,14	0,4654	6,36	7,97
	%40	7,13	0,2018	6,84	7,52	6,14	0,2669	5,82	6,67
360	%0 (PÇ32,5)	7,95	0,0797	7,79	8,05	7,95	0,0797	7,79	8,05
	%10	7,96	0,1545	7,74	8,26	8,43	0,3612	8,02	9,15
	%20	7,63	0,0240	7,58	7,66	7,77	0,1082	7,62	7,98
	%25	8,04	0,0436	7,96	8,11	7,82	0,1677	7,52	8,10
	%30	7,74	0,0851	7,63	7,91	7,66	0,2031	7,33	8,03
	%40	7,97	0,1167	7,75	8,15	6,29	0,2346	5,98	6,75

Çizelge 4.10. İkameli numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Numune Yaşı (Gün)	Pomza miktarı (%)	Erzincan Pomzası				Nevşehir Pomzası			
		Ortalama (MPa)	Std. Sapma	Min.	Maks.	Ortalama (MPa)	Std. Sapma	Min.	Maks.
7	%0 (PÇ42,5)	5,78	0,0882	5,61	5,91	5,78	0,0882	5,61	5,91
	%10	5,60	0,0584	5,54	5,72	4,14	0,1391	3,98	4,42
	%20	4,88	0,0433	4,80	4,95	3,40	0,1401	3,20	3,67
	%25	4,08	0,0929	3,91	4,23	2,28	0,0088	2,26	2,29
	%30	3,66	0,1503	3,39	3,91	2,21	0,0203	2,18	2,25
	%40	2,94	0,0788	2,85	3,10	1,84	0,0416	1,78	1,92
28	%0 (PÇ42,5)	6,93	0,0633	6,81	7,02	6,93	0,0633	6,81	7,02
	%10	6,12	0,1233	5,88	6,28	4,65	0,1717	4,31	4,83
	%20	5,71	0,1659	5,38	5,92	3,99	0,1717	3,67	4,26
	%25	4,84	0,1680	4,51	5,06	2,68	0,1115	2,51	2,89
	%30	4,23	0,1202	4,06	4,46	2,54	0,0404	2,47	2,61
	%40	3,66	0,1539	3,36	3,86	2,02	0,0260	1,97	2,06
90	%0 (PÇ42,5)	7,39	0,2463	7,01	7,85	7,39	0,2463	7,01	7,85
	%10	7,37	0,0994	7,23	7,56	5,53	0,2281	5,13	5,92
	%20	6,38	0,1560	6,12	6,66	4,44	0,1396	4,22	4,70
	%25	5,09	0,1235	4,90	5,32	3,09	0,0811	2,94	3,22
	%30	5,58	0,0635	5,47	5,69	3,05	0,0869	2,95	3,22
	%40	4,19	0,1272	3,98	4,42	2,67	0,1136	2,46	2,85
180	%0 (PÇ42,5)	7,49	0,2210	7,06	7,80	7,49	0,2210	7,06	7,80
	%10	8,26	0,0462	8,18	8,34	5,83	0,2210	5,40	6,14
	%20	7,55	0,1378	7,38	7,82	4,74	0,0751	4,61	4,87
	%25	5,65	0,0115	5,63	5,67	3,55	0,1676	3,25	3,83
	%30	6,18	0,2288	5,72	6,43	3,52	0,1485	3,23	3,71
	%40	4,84	0,1835	4,48	5,09	3,00	0,2677	2,57	3,49
360	%0 (PÇ42,5)	7,91	0,0088	7,89	7,92	7,91	0,0088	7,89	7,92
	%10	8,12	0,0954	7,93	8,23	6,10	0,2226	5,84	6,54
	%20	7,64	0,1411	7,43	7,91	5,76	0,0404	5,71	5,84
	%25	6,75	0,2371	6,42	7,21	4,54	0,1202	4,37	4,77
	%30	6,25	0,1587	6,01	6,55	4,01	0,1450	3,77	4,27
	%40	5,95	0,1271	5,73	6,17	3,60	0,2206	3,16	3,87



Şekil 4.15. PKÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı–pomza katkı oranı ilişkisi



Şekil 4.16. POİÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı–pomza katkı oranı ilişkisi

PKÇ'li ve POİÇ'li numunelere ait veriler üzerinde, her bir zaman aralığında çimento tipleri arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, katkılı ve ikameli çimento tiplerine bağlı olarak çekme dayanımı değerlerinin $p=0,05$ anlamlılık düzeyinde, birbirinden farklı olduğunu göstermiştir (Çizelge 4.11, Çizelge 4.12). Yani pomza miktarına bağlı olarak, çekme dayanımı değerlerinin değiştiği görülmüştür (EPKÇ'lerin 360. gündeki grupları hariç).

Çizelge 4.11. Katkılı numunelerin eğilme dayanımı değerlerine göre katkı yüzdelerinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi

Pomza Türü	Numunenin Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık düzeyi (p)
Erzincan Pomzası	7	Gruplar ara	8,753	5	1,7505	35,632	0,000
		Gruplar içi	0,590	12	0,0491		
		Toplam	9,342	17			
	28	Gruplar ara	3,696	5	0,7392	12,479	0,000
		Gruplar içi	0,711	12	0,0592		
		Toplam	4,407	17			
	90	Gruplar ara	0,721	5	0,1442	4,287	0,018
		Gruplar içi	0,404	12	0,0337		
		Toplam	1,125	17			
	180	Gruplar ara	1,380	5	0,2761	3,830	0,026
		Gruplar içi	0,865	12	0,0721		
		Toplam	2,245	17			
	360	Gruplar ara	0,382	5	0,0764	2,853	0,063
		Gruplar içi	0,321	12	0,0268		
		Toplam	0,703	17			
Nevşehir Pomzası	7	Gruplar ara	12,520	5	2,5040	38,398	0,000
		Gruplar içi	,783	12	0,0652		
		Toplam	13,302	17			
	28	Gruplar ara	7,205	5	1,4409	82,392	0,000
		Gruplar içi	,210	12	0,0175		
		Toplam	7,415	17			
	90	Gruplar ara	5,164	5	1,0328	11,149	0,000
		Gruplar içi	1,112	12	0,0926		
		Toplam	6,275	17			
	180	Gruplar ara	6,146	5	1,2292	4,465	0,016
		Gruplar içi	3,304	12	0,2753		
		Toplam	9,450	17			
	360	Gruplar ara	7,768	5	1,5536	11,387	0,000
		Gruplar içi	1,637	12	0,1364		
		Toplam	9,405	17			

Çizelge 4.12. İkameli numunelerin eğilme dayanımı değerlerine göre katkı yüzdelерinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi

Pomza Türü	Numunenin Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık düzeyi (p)
Erzincan Pomzası	7	Gruplar arası	18,898	5	3,7796	149,718	0,000
		Gruplar içi	0,303	12	0,0252		
		Toplam	19,201	17			
	28	Gruplar arası	22,613	5	4,5226	79,983	0,000
		Gruplar içi	0,679	12	0,0565		
		Toplam	23,292	17			
	90	Gruplar arası	24,637	5	4,9273	75,598	0,000
		Gruplar içi	0,782	12	0,0652		
		Toplam	25,419	17			
	180	Gruplar arası	25,823	5	5,1647	66,167	0,000
		Gruplar içi	0,937	12	0,0781		
		Toplam	26,760	17			
	360	Gruplar arası	12,438	5	2,4876	39,279	0,000
		Gruplar içi	0,760	12	0,0633		
		Toplam	13,198	17			
Nevşehir Pomzası	7	Gruplar arası	33,633	5	6,7266	274,680	0,000
		Gruplar içi	0,294	12	0,0245		
		Toplam	33,927	17			
	28	Gruplar arası	49,809	5	9,9618	256,381	0,000
		Gruplar içi	0,466	12	0,0389		
		Toplam	50,275	17			
	90	Gruplar arası	50,217	5	10,0433	126,164	0,000
		Gruplar içi	0,955	12	0,0796		
		Toplam	51,172	17			
	180	Gruplar arası	43,956	5	8,7911	78,109	0,000
		Gruplar içi	1,351	12	0,1125		
		Toplam	45,306	17			
	360	Gruplar arası	38,388	5	7,6776	113,415	0,000
		Gruplar içi	0,812	12	0,0677		
		Toplam	39,200	17			

PKÇ'ler ve POİÇ'lerdeki farklılığın hangi çimento tiplerinden kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen "Student Newman Keuls" (SNK) çoklu karşılaştırma testi sonuçları sırasıyla Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. Katkılı numunelerde eğilme dayanımı değerlerine ait SNK çoklu karşılaştırma testi sonuçları

Numune Yaşı (Gün)	Erzincan Pomzası					Nevşehir Pomzası				
	Katkı miktarı	Farklı olan gruplar (p=0,05)				Katkı miktarı	Farklı olan gruplar (p=0,05)			
		1	2	3	4		1	2	3	4
7	%40	3,10				%40	2,35			
	%30		3,51			%30		3,56		
	%25		3,69			%25		3,59		
	Kontrol			4,40		%20		4,07	4,07	
	%20			4,76	4,76	Kontrol			4,40	
	%10				5,04	%10				5,44
28	%40	4,60				%40	4,10			
	%30	4,99	4,99			%30		4,93		
	%25		5,20			%25		5,00	5,00	
	Kontrol		5,28			%20		5,10	5,10	
	%20		5,45			Kontrol			5,28	
	%10			6,09		%10				6,25
90	%40	5,78				%40	4,99			
	%30	5,91	5,91			%30		5,59		
	%25	6,14	6,14			%20		5,88		
	%20	6,17	6,17			%25		6,13	6,13	
	Kontrol		6,31			Kontrol		6,31	6,31	
	%10		6,33			%10			6,66	
180	Kontrol	7,11				%40	6,14			
	%40	7,13				Kontrol	7,11	7,11		
	%20	7,20				%30	7,14	7,14		
	%10	7,22				%20	7,35	7,35		
	%25	7,67				%25	7,36	7,36		
	%30	7,81				%10		8,13		
360	%20	7,63				%40	6,29			
	%30	7,74				%30		7,66		
	Kontrol	7,95				%20		7,77		
	%10	7,96				%25		7,82		
	%40	7,97				Kontrol		7,95		
	%25	8,04				%10		8,43		

Katkılı numunelerden eğilmede çekme dayanımı deneyi ile elde edilen veriler kullanılarak, çimento tipleri arasında yapılan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

- Erzincan pomzası ile üretilen EPKÇ 10 numunelerinin 7, 28 ve 90. günlerde en büyük, EPKÇ 40 numunelerinin ise en küçük eğilmede çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu,
- 180. ve 360. günlerde ise sırasıyla EPKÇ 30 ve EPKÇ 25'in en büyük, Kontrol ve EPKÇ 20 numunelerinin ise en küçük eğilmede çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu,
- Erzincan pomzası ile üretilen EPKÇ 20 numunesinin bütün yaşlarda Kontrol numunesinden farklı olmadığı,
- Bütün numune yaşlarında EPKÇ 10 numunesinin kontrol numunesine göre daha büyük eğilmede çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu,
- 7. 28. ve 90. günlerde en büyük dayanıma sahip olan EPKÇ 10 numunesinin eğilme çekme dayanımı değerinin kontrol numunesine göre sırasıyla %13, %13, %1 oranlarında daha yüksek olduğu,
- 180. ve 360. günlerde ise eğilmede çekme dayanımı değerleri bakımından bütün çimento türlerinin birbirinden farklı olmadığı,
- Nevşehir pomzası ile üretilen numunelerde, bütün yaşlarda NPKÇ 10 numuneleri en büyük, NPKÇ 40 numuneleri ise en küçük eğilmede çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu ve bütün yaşlarda NPKÇ 10'nun kontrol çimentosundan daha yüksek değer verdiği,
- Eğilmede çekme dayanımı değerleri bakımından, 7. ve 28. günlerde NPKÇ 10 numunesinin kontrol numunelerinden farklı olduğu, diğer günlerde ise kontrol numunesinden farklı olmadığı,
- NPKÇ'lerde de EPKÇ'lerde olduğu gibi ilerleyen yaşlarda (90-360) bütün çimento tiplerinin eğilme dayanımları birbirlerine çok yaklaşmıştır. Bu da pomzaların puzolaniklik özelliklerinin bir sonucudur.
- İstisnalar olmakla beraber, pomza çimentoların eğilme dayanımlarını katkı oranındaki artışa bağlı olarak azaltmıştır. Pomzaların puzolanik

özelliği dolayısıyla, ilerleyen yaşlarda PKÇ'lerin eğilme dayanımları kontrol çimentolarına çok yaklaşmış, bazen da onları geçmiştir.

Çizelge 4.14. İkameli numunelerde eğilme dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma SNK testi sonuçları

Num. Yaşı Gün	Erzincan Pomzası						Nevşehir Pomzası					
	Katkı miktarı	Farklı olan gruplar (p=0,05)					Katkı miktarı	Farklı olan gruplar (p=0,05)				
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
7	%40	2,94					%40	1,84				
	%30		3,66				%30		2,21			
	%25			4,08			%25		2,28			
	%20				4,88		%20			3,40		
	%10					5,60	%10				4,14	
	Kontrol					5,78	Kontrol					5,78
28	%40	3,66					%40	2,02				
	%30		4,23				%30		2,54			
	%25			4,84			%25		2,68			
	%20				5,71		%20			3,99		
	%10				6,12		%10				4,65	
	Kontrol					6,93	Kontrol					6,93
90	%40	4,19					%40	2,67				
	%25		5,09				%30	3,05				
	%30			5,58			%25	3,09				
	%20				6,38		%20		4,44			
	%10					7,37	%10			5,53		
	Kontrol					7,39	Kontrol				7,39	
180	%40	4,84					%40	3,00				
	%25		5,65				%30	3,52				
	%30			6,18			%25	3,55				
	Kontrol				7,49		%20		4,74			
	%20				7,55		%10			5,83		
	%10					7,93	Kontrol				7,49	
360	%40	5,95					%40	3,60				
	%30	6,25					%30	4,01				
	%25		6,75				%25		4,54			
	%20			7,64			%20			5,76		
	Kontrol			7,91			%10			6,10		
	%10				8,12		Kontrol				7,91	

İkameli numunelerden eğilmede çekme dayanımı deneyi sonucunda elde edilen veriler üzerinde, çimento tipleri arasında yapılan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

- EPOİÇ'lerde 90 güne kadar, NPOİÇ'lerde ise tüm yaşlarda, kontrol çimentoları daha yüksek eğilmede çekme dayanımı değerleri vermişlerdir.
- Tüm yaşlarda, NPOİÇ'ler EPOİÇ'lerden daha düşük eğilmede me dayanımı değerleri vermişlerdir. Bunun nedeni, Nevşehir pomzasının Erzincan pomzasına göre daha gözenekli bir iç yapıya sahip olmasıdır. Dolayısıyla kalıplara yerleştirebilmeleri için NPOİÇ'ler EPOİÇ'lere göre daha fazla suya ihtiyaç duymaktadırlar. TS EN 196-1'de s/b oranı sabit olduğundan, NPOİÇ'lere su yetmemiş ve fazla sıkıştırılamamışlardır.
- EPOİÇ'lerin %10-20'lik grupları 180 ve 360 günlerde, kontrol çimentosundan daha yüksek eğilmede çekme dayanımı vermişlerdir. Bu da pomzanın pozolanik özelliğinin bir sonucudur.
- EPOİÇ'ler ve NPOİÇ'lerde, eğilmede dayanımı pomza ikame oranındaki artışla ters orantılı olarak azalmıştır. İlerleyen yaşlarda, PKÇ'lerde olduğu gibi pomzanın pozolanik özelliği devreye girmiş ve özellikle EPOİÇ'lerin %10-20 ikamelileri kontrol çimentosuna çok yaklaşmış veya geçmiştir.

Ayrıca EPKÇ 20, EPKÇ 40, NPKÇ 20, NPKÇ 40 ve kontrol çimentoları kullanılarak ilgili Amerikan standartlarına (ASTM C 109/C 109M ve ASTM C 348-97) göre hazırlanan ve test edilen numunelerden elde edilen eğilmede çekme dayanımı sonuçları Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15. Katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanım değerleri

Çim. Tipi	PÇ 42,5 (Mpa)	PKÇ 32,5 (Mpa)	EPKÇ 20 (Mpa)	EPKÇ 40 (Mpa)	NPKÇ 20 (Mpa)	NPKÇ 40 (Mpa)
Num. Yaşı						
28 gün	6,09	5,18	5,13	4,14	5,16	4,35
90 gün	6,61	6,09	6,01	5,02	5,83	5,12
180 gün	6,94	6,53	6,47	5,99	7,01	6,31

Çizelge 4.15'ten de görüldüğü gibi, eğilmede çekme dayanımı pomza katkı oranındaki artışla ters orantılı olarak azalmaktadır. Bu sonuçlar, TS EN 196-1'e göre hazırlanıp test edilen numunelerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, NPKÇ 40 hariç diğer çimento tiplerinin eğilmede çekme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu da, ASTM'de karışıma giren su miktarının akmaya göre tespit edilmesinden kaynaklanmaktadır. TS'de 0,5 olan s/ç oranı ASTM'de 0,53-0,61 arasında değişmektedir. s/ç oranındaki bu artış eğilme dayanımında düşüşlere neden olmuştur. NPKÇ'de eğilme dayanımında düşüş yerine bir miktar artış olmasının sebebi ise; inceliğinin yüksek olması sebebiyle 0,5'lik s/ç'nin hazırlanan numunelerin sıkıştırılması için yetersiz olmasıdır.

4.8.2. Basınç dayanımı

Üretilen numuneler TS EN 196-1'e uygun olarak, basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. PKÇ'ler ve POİÇ'lere ait basınç dayanımı değerlerini gösteren açıklayıcı istatistikler sırasıyla Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17'de verilmiştir. PKÇ'lere ait basınç dayanımı-pomza katkı oranı ilişkisi Şekil 4.17'de, POİÇ'lere ait basınç dayanımı-pomza katkı oranı ilişkisi ise Şekil 4.18'de verilmiştir. Ayrıca NPKÇ'ler, EPKÇ'ler, NPOİÇ'ler ve EPOİÇ'lere ait basınç dayanımı – pomza katkı oranı ilişkileri EK-3'te de ayrı grafikler halinde verilmiştir.

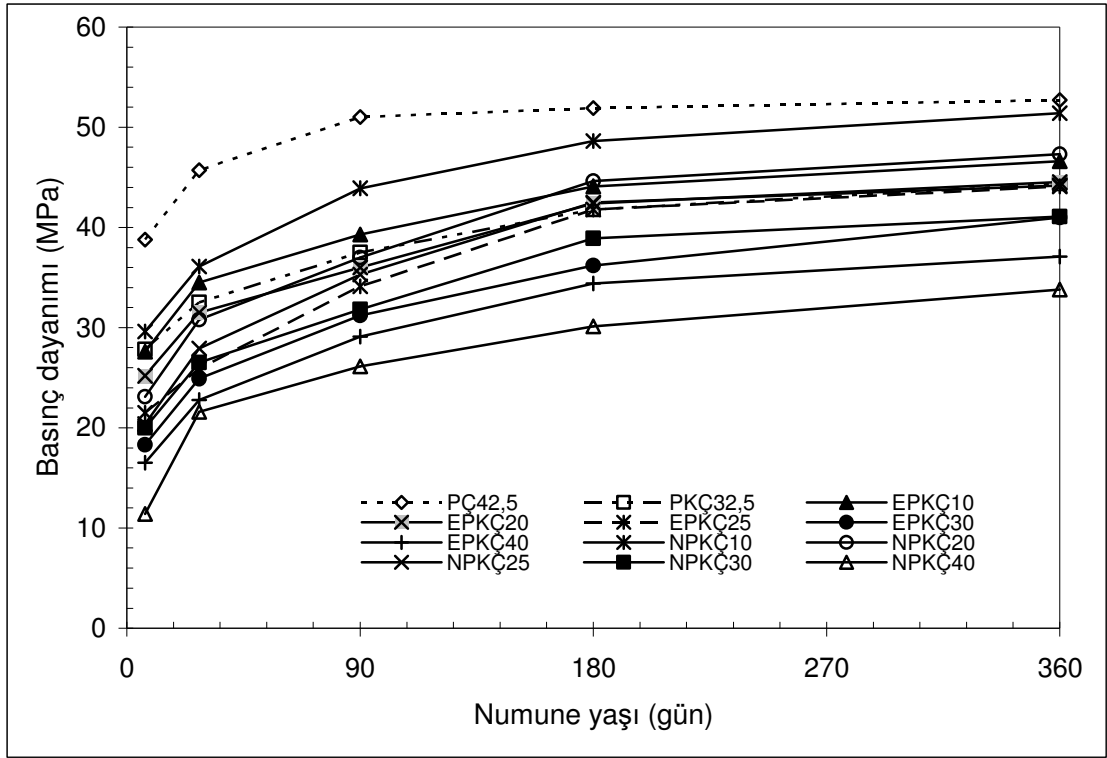
Deney sonucunda elde edilen veriler üzerinde, her bir zaman aralığında çimento tipleri arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonuçlarına göre, katkılı ve ikameli çimento tiplerine bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin $p = 0,05$ anlamlılık düzeyinde birbirinden farklı olduğu görülmüştür (Çizelge 4.18, Çizelge 4.19). Diğer bir ifade ile, pomza miktarına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin değiştiği görülmüştür.

Çizelge 4.16. Katkılı numunelerin basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

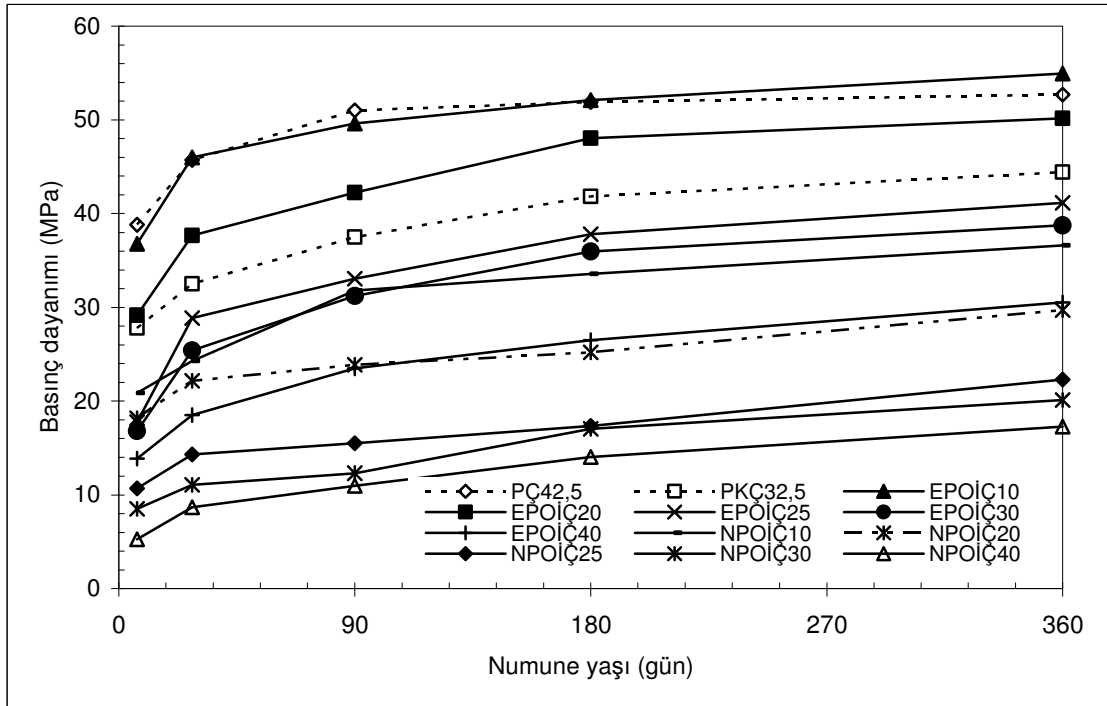
Numune Yaşı (Gün)	Pomza miktarı (%)	Erzincan Pomzası				Nevşehir Pomzası			
		Ortalama (MPa)	Std. Sapma	Min.	Maks.	Ortalama (MPa)	Std. Sapma	Min.	Maks.
7	%0 (PÇ32,5)	27,84	0,3498	26,46	28,90	27,84	0,3498	26,46	28,90
	%10	27,69	0,3587	26,78	28,94	29,85	0,2077	29,19	30,62
	%20	25,27	0,1250	24,84	25,61	23,14	0,1931	22,58	23,74
	%25	21,74	0,0871	21,50	22,10	20,26	0,1358	19,92	20,80
	%30	18,31	0,2969	17,57	19,62	20,02	0,5001	18,47	21,91
	%40	16,38	0,1515	15,80	16,75	11,41	0,3829	10,61	12,79
28	%0 (PÇ32,5)	32,42	0,0859	32,14	32,67	32,42	0,0859	32,14	32,67
	%10	34,57	0,0788	34,40	34,88	36,15	0,3698	34,85	37,08
	%20	31,55	0,4919	29,62	32,67	30,53	0,2523	29,62	31,49
	%25	25,90	0,2244	25,38	26,82	27,90	0,2312	26,92	28,50
	%30	24,92	0,2876	24,23	26,03	26,59	0,2205	26,00	27,36
	%40	22,87	0,3855	21,68	24,19	21,29	0,2775	20,23	22,03
90	%0 (PÇ32,5)	37,56	0,4413	36,19	39,32	37,56	0,4413	36,19	39,32
	%10	39,21	0,1032	38,83	39,52	43,99	0,4076	42,58	45,10
	%20	36,07	0,5040	34,71	37,92	37,01	0,3019	35,75	37,76
	%25	34,11	0,3258	32,66	34,79	35,33	0,4824	34,01	36,80
	%30	31,21	0,4224	29,94	32,84	31,82	0,4401	30,58	33,10
	%40	29,00	0,2631	28,04	29,95	26,01	0,5323	24,12	27,39
180	%0 (PÇ32,5)	41,81	0,3615	40,68	42,90	41,81	0,3615	40,68	42,90
	%10	44,17	0,3822	42,97	45,31	48,65	0,6833	46,67	50,98
	%20	42,42	0,6752	40,85	44,70	44,65	0,4007	43,57	46,30
	%25	41,83	1,0701	39,48	45,29	42,53	0,8102	39,80	45,39
	%30	36,24	0,7802	34,10	38,61	38,98	0,5955	36,53	40,40
	%40	34,48	0,6112	32,25	36,38	30,11	0,5671	28,46	32,04
360	%0 (PÇ32,5)	44,43	0,7546	41,31	45,85	44,43	0,7546	41,31	45,85
	%10	46,64	0,3152	45,40	47,66	51,49	0,6623	49,67	53,74
	%20	44,19	0,2884	43,26	45,26	47,39	0,5447	45,48	48,99
	%25	44,18	0,6148	42,38	46,34	44,24	0,6224	42,08	46,10
	%30	41,07	0,6275	38,98	43,07	41,03	0,6254	38,94	42,51
	%40	37,03	0,7235	34,91	39,72	33,80	0,4288	32,54	35,04

Çizelge 4.17. İkameli numunelerin basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Numune Yaşı (Gün)	Pomza miktarı (%)	Erzincan Pomzası				Nevşehir Pomzası			
		Ortalama (MPa)	Std. Sapma	Min.	Maks.	Ortalama (MPa)	Std. Sapma	Min.	Maks.
7	%0 (PÇ42,5)	38,80	0,5224	36,89	40,53	38,80	0,5224	36,89	40,53
	%10	36,79	0,4018	35,50	37,99	20,86	0,2966	20,17	22,05
	%20	29,15	0,4996	27,70	30,95	18,17	0,5400	16,38	20,21
	%25	17,75	0,2950	16,79	18,47	10,70	0,1622	10,03	11,20
	%30	16,78	0,4907	15,52	18,36	8,69	0,0783	8,40	8,89
	%40	13,83	0,2452	12,90	14,58	5,26	0,1721	4,76	5,84
28	%0 (PÇ42,5)	45,78	0,4662	44,31	47,03	45,78	0,4662	44,31	47,03
	%10	45,98	0,2031	45,24	46,57	24,27	0,4635	22,97	25,82
	%20	37,66	0,5893	35,68	39,42	22,14	0,4149	21,13	23,30
	%25	28,87	0,7320	26,90	31,74	14,30	0,1735	13,89	15,01
	%30	25,39	0,1999	24,58	26,00	10,89	0,0708	10,64	11,11
	%40	18,51	0,3749	17,06	19,86	8,69	0,1661	8,03	9,13
90	%0 (PÇ42,5)	51,02	0,5894	48,93	52,33	51,02	0,5894	48,93	52,33
	%10	49,61	0,4245	48,12	50,73	31,80	0,4872	30,70	33,44
	%20	42,39	0,2058	41,89	43,22	23,86	0,2324	23,17	24,71
	%25	33,06	0,4506	31,75	34,90	15,50	0,2799	14,85	16,58
	%30	31,21	0,5257	29,14	32,64	12,30	0,2300	11,43	13,05
	%40	23,50	0,4004	22,29	24,85	10,97	0,2027	10,30	11,49
180	%0 (PÇ42,5)	51,95	0,6381	50,02	54,57	51,95	0,6381	50,02	54,57
	%10	52,09	0,6478	49,92	54,37	33,22	0,3106	32,36	34,38
	%20	48,03	0,7087	45,41	50,17	25,20	0,5668	23,52	26,83
	%25	37,81	0,6969	35,70	40,27	17,33	0,3260	16,28	18,26
	%30	35,96	0,7891	33,89	39,38	17,04	0,5417	14,85	18,45
	%40	26,48	0,5648	24,63	28,66	14,01	0,2769	13,29	15,11
360	%0 (PÇ42,5)	52,73	0,4025	51,56	54,21	52,73	0,4025	51,56	54,21
	%10	54,94	0,3662	53,32	55,75	36,63	0,6593	34,57	38,82
	%20	50,15	0,4007	48,95	51,60	29,89	0,1800	29,37	30,56
	%25	41,12	0,8216	38,75	43,83	22,29	0,6227	20,17	24,05
	%30	38,74	0,5226	37,01	40,28	20,09	0,4749	18,79	21,99
	%40	30,54	0,5273	29,17	32,46	17,28	0,4982	15,92	18,97



Şekil 4.17. PKÇ'lere ait basınç dayanımı–pomza katkı oranı ilişkisi



Şekil 4.18. POİÇ'lere ait basınç dayanımı–pomza katkı oranı ilişkisi

Çizelge 4.18. Katkılı numunelerin basınç dayanımı değerlerine göre katkı yüzdelерinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi

Pomza Türü	Numunenin Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbes. Derec.	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık düzeyi (p)
Erzincan Pomzası	7	Gruplar arası	707,386	5	141,477	367,151	0,000
		Gruplar içi	11,560	30	0,385		
		Toplam	718,946	35			
	28	Gruplar arası	675,712	5	135,142	251,554	0,000
		Gruplar içi	16,117	30	0,537		
		Toplam	691,829	35			
	90	Gruplar arası	451,427	5	90,285	111,019	0,000
		Gruplar içi	24,397	30	0,813		
		Toplam	475,825	35			
	180	Gruplar arası	445,746	5	89,149	31,172	0,000
		Gruplar içi	85,797	30	2,860		
		Toplam	531,543	35			
	360	Gruplar arası	344,519	5	68,904	33,659	0,000
		Gruplar içi	61,414	30	2,047		
		Toplam	405,933	35			
Nevşehir Pomzası	7	Gruplar arası	1296,786	5	259,357	419,689	0,000
		Gruplar içi	18,539	30	0,618		
		Toplam	1315,325	35			
	28	Gruplar arası	788,834	5	157,767	407,835	0,000
		Gruplar içi	11,605	30	0,387		
		Toplam	800,439	35			
	90	Gruplar arası	1091,561	5	218,312	187,906	0,000
		Gruplar içi	34,855	30	1,162		
		Toplam	1126,415	35			
	180	Gruplar arası	1183,822	5	236,764	113,246	0,000
		Gruplar içi	62,721	30	2,091		
		Toplam	1246,543	35			
	360	Gruplar arası	1080,905	5	216,181	95,354	0,000
		Gruplar içi	68,014	30	2,267		
		Toplam	1148,919	35			

Çizelge 4.19. İkameli numunelerin basınç dayanımı değerlerine göre katkı yüzdelерinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi

Pomza Türü	Numunenin Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbes. Derec.	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık düzeyi (p)
Erzincan Pomzası	7	Gruplar arası	3538,655	5	707,731	660,222	0,000
		Gruplar içi	32,159	30	1,072		
		Toplam	3570,814	35			
	28	Gruplar arası	3813,636	5	762,727	576,830	0,000
		Gruplar içi	39,668	30	1,322		
		Toplam	3853,304	35			
	90	Gruplar arası	3618,624	5	723,725	598,258	0,000
		Gruplar içi	36,292	30	1,210		
		Toplam	3654,915	35			
	180	Gruplar arası	3192,988	5	638,598	231,683	0,000
		Gruplar içi	82,690	30	2,756		
		Toplam	3275,678	35			
	360	Gruplar arası	2687,975	5	537,595	319,438	0,000
		Gruplar içi	50,488	30	1,683		
		Toplam	2738,464	35			
Nevşehir Pomzası	7	Gruplar arası	4428,877	5	885,775	1239,800	0,000
		Gruplar içi	21,433	30	0,714		
		Toplam	4450,310	35			
	28	Gruplar arası	5547,202	5	1109,440	1663,240	0,000
		Gruplar içi	20,011	30	,667		
		Toplam	5567,213	35			
	90	Gruplar arası	7018,272	5	1403,654	1730,611	0,000
		Gruplar içi	24,332	30	0,811		
		Toplam	7042,604	35			
	180	Gruplar arası	6146,812	5	1229,362	944,687	0,000
		Gruplar içi	39,040	30	1,301		
		Toplam	6185,852	35			
	360	Gruplar arası	5277,266	5	1055,453	708,051	0,000
		Gruplar içi	44,719	30	1,491		
		Toplam	5321,986	35			

Katkılı ve ikameli çimentolardaki farklılığın, hangi çimento tiplerinden kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen, SNK çoklu karşılaştırma testi sonuçları sırasıyla Çizelge 4.20 ve Çizelge 4.21’de verilmektedir.

Çizelge 4.20. Katkılı numunelerde basınç dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma SNK testi sonuçları

Num. Yaşı (Gün)	Erzincan Pomzası							Nevşehir Pomzası						
	Katkı mikt.	Farklı olan gruplar (p=0,05)						Katkı mikt.	Farklı olan gruplar (p=0,05)					
		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
7	%40	16,37						%40	11,41					
	%30		18,31					%30		20,02				
	%25			21,73				%25		20,26				
	%20				25,27			%20			23,14			
	%10					27,69		Kont.				27,84		
	Kont.					27,83		%10					29,86	
28	%40	22,87						%40	21,29					
	%30		24,92					%30		26,58				
	%25			25,90				%25			27,90			
	%20				31,55			%20				30,53		
	Kont.					32,42		Kont.					32,42	
	%10						34,58	%10						36,15
90	%40	29,00						%40	26,01					
	%30		31,22					%30		31,82				
	%25			34,11				%25			35,33			
	%20				36,07			%20				37,01		
	Kont.					37,56		Kont.				37,56		
	%10						39,21	%10					43,99	
180	%40	34,48						%40	30,11					
	%30	36,24						%30		38,98				
	Kont.		41,81					Kont.			41,81			
	%25		41,83					%25			42,53			
	%20		42,42					%20				44,65		
	%10		44,17					%10					48,65	
360	%40	37,03						%40	33,80					
	%30		41,07					%30		41,03				
	%25			44,18				%25			44,24			
	%20			44,19				Kont.			44,43			
	Kont.			44,43				%20				47,39		
	%10				46,64			%10					51,49	

Katkılı numunelerden basınç dayanımı deneyi sonucunda elde edilen veriler üzerinde, çimento tipleri arasında yapılan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

- EPKÇ 10, 7 günden sonra tüm yaşlarda kontrol çimentosundan daha yüksek değerler vermiştir.
- NPKÇ 10, tüm yaşlarda kontrol çimentosuna göre daha yüksek değerler vermiştir.
- 28 güne kadar basınç dayanımlarındaki farklılıklara göre 6 farklı grup oluşurken, ilerleyen yaşlarda grup sayısı 4'e düşmüştür. Bu da pomzanın pozolanik özelliğinden dolayı, numunelerin basınç dayanımlarının birbirine yaklaştığını göstermektedir.
- Basınç dayanımları da eğilmede çekme dayanımlarında olduğu gibi, pomza katkı oranındaki artışla ters orantılı olarak azalmıştır. Bu azalma harç suyu ihtiyacının fazla olması dolayısıyla NPKÇ'lerde daha fazla olmuştur. Özellikle yüksek katkı oranlarında, daha poröz bir iç yapıya sahip olan Nevşehir pomzası suyu emip bünyesindeki boşluklarda muhafaza ettiği için, numuneler yeteri kadar sıkıştırılamamış ve daha düşük basınç dayanımı değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur. İlerleyen yaşlarda pomzanın pozolanik özelliğinden dolayı, özellikle %10-20 pomza içeren PKÇ'ler kontrol çimentosundan daha yüksek değerler vermişler; diğerleri ise kontrol çimentosuna daha da yaklaşmışlardır.

Çizelge 4.21. İkameli numunelerde basınç dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma SNK testi sonuçları

Num. Yaşı (Gün)	Erzincan Pomzası						Nevşehir Pomzası					
	Katkı mikt.	Farklı olan gruplar (p=0,05)					Katkı mikt.	Farklı olan gruplar (p=0,05)				
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
7	%40	13,83					%40	5,26				
	%30		16,78				%30		8,69			
	%25		17,75				%25			10,70		
	%20			29,14			%20				18,17	
	%10				36,79		%10					20,86
	Kont.					38,80	Kont.					38,80
28	%40	18,51					%40	8,70				
	%30		25,39				%30		10,89			
	%25			28,87			%25			14,30		
	%20				37,66		%20				22,14	
	Kont.					45,78	%10					24,27
	%10					45,98	Kont.					45,78
90	%40	23,50					%40	10,97				
	%30		31,22				%30		12,30			
	%25			33,06			%25			15,50		
	%20				42,39		%20				23,86	
	%10					49,61	%10					31,80
	Kont.					51,02	Kont.					51,02
180	%40	26,48					%40	14,01				
	%30		35,96				%30		17,04			
	%25		37,81				%25		17,33			
	%20			48,03			%20			25,20		
	Kont.				51,95		%10				33,22	
	%10				52,09		Kont.					51,95
360	%40	30,54					%40	17,28				
	%30		38,74				%30		20,10			
	%25			41,12			%25			22,29		
	%20				50,16		%20				29,89	
	Kont.					52,73	%10					36,63
	%10					54,94	Kont.					52,73

İkameli numunelerden basınç dayanımı deneyi sonucunda elde edilen veriler üzerinde, çimento tipleri arasında yapılan çoklu karşılaştırma SNK testi sonuçlarına göre;

- EPOİÇ 10, 7 günden sonra tüm yaşlarda kontrol çimentosundan daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir.
- NPOİÇ'ler tüm yaşlarda kontrol çimentosundan daha düşük değerler vermişlerdir. Bu durum Nevşehir pomzasının daha gözenekli bir iç yapıya

sahip olmasından kaynaklanmaktadır (karışım suyu yetersiz geldiğinden dolayı numuneler iyi sıkıştırılamamıştır).

- Her iki pomza türünde de basınç dayanımı, pomza ikame oranındaki artışla ters orantılı olarak azalmıştır. İlerleyen yaşlarda EPOİÇ 10 kontrol numunesini geçmiş, EPOİÇ 20 ise hemen hemen kontrol numunesini yakalamıştır. Bir yılın sonunda, 7 günlük basınç dayanımı 16,78 MPa olan EPOİÇ 30 bile %242'lik artış göstererek 38,74 MPa'lık bir basınç dayanımına ulaşmıştır. Benzer artışları NPOİÇ'lerde de görmek mümkündür. Bu da pomzanın puzolanik özelliğinin bir sonucudur.

Ayrıca EPKÇ 20, EPKÇ 40, NPKÇ 20, NPKÇ 40 ve kontrol çimentoları kullanılarak ilgili Amerikan standartlarına (ASTM C 109/C 109M ve ASTM C 348-97) göre hazırlanan ve test edilen numunelerden elde edilen basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.22'de verilmiştir.

Çizelge 4.22. Katkılı numunelerin basınç dayanımı değerleri (ASTM)

Çim. Tipi	PÇ 42,5	PKÇ 32,5	EPKÇ 20	EPKÇ 40	NPKÇ 20	NPKÇ 40
Num. Yaşı	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
28 gün	42,87	32,13	29,41	24,15	29,32	24,12
90 gün	46,16	35,86	34,19	31,04	36,13	30,77
180 gün	47,19	38,06	38,93	35,57	43,07	35,81

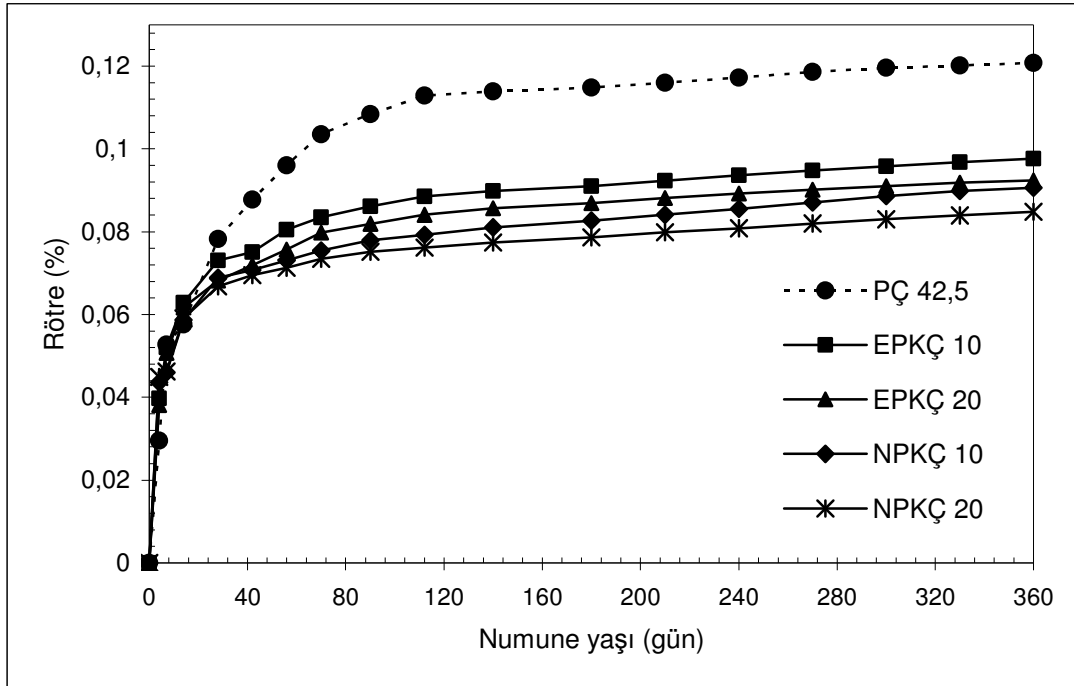
Çizelge 4.22'den de görüldüğü gibi, basınç dayanımı pomza katkı oranındaki artışla ters orantılı olarak azalmaktadır. Bu sonuçlar, TS EN 196-1'e göre hazırlanıp test edilen numunelerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında EPKÇ 40'ta küçük, NPKÇ 40'ta ise %15 civarında bir artış diğerlerinde ise düşüşler olmuştur. Bu durumun sebebi 0,5 olan s/ç oranının 0,61 seviyelerine kadar çıkmasıdır. Böylece %40 pomza içeren çimentolardaki sıkıştırılamama sorunu ortadan kalmış ve artış, diğerlerinde ise s/ç oranı arttığı için daha gözenekli bir iç yapı ve bunun sonucu olarak düşüşler gözlenmiştir.

4.9. Rötire

Rötire deneyi, kontrol numunesi olarak PÇ 42,5 ile PKÇ'lerden EPKÇ 10, EPKÇ 20, NPKÇ 10 ve NPKÇ 20'ye uygulanmıştır. TS 3322'ye göre yürütülen deneylerde okumalar bir yıl boyu devam etmiş, ASTM C 596'ya göre yürütülen deneylerde ise, okumalar 25 gün sonunda tamamlanmıştır. TS'ye göre yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.23'te, rötirenin zamana ve pomza katkı oranına bağlı olarak değişimi ise Şekil 4.19'da verilmiştir. ASTM'ye göre yürütülen deneylerden elde edilen veriler Çizelge 4.24'te, rötirenin zamana ve pomza katkı oranına bağlı olarak değişimi ise Şekil 4.20'de sunulmuştur.

Çizelge 4.23. TS 3322'ye göre hazırlanan numuneler ait rötire değerleri

Çim. Tipi	PÇ 42,5 (%)	EPKÇ 10 (%)	EPKÇ 20 (%)	NPKÇ 10 (%)	NPKÇ 20 (%)
Num. Yaş (gün)					
0	-	-	-	-	-
4	0,0295	0,0397	0,0381	0,0436	0,0449
7	0,0527	0,0520	0,0507	0,0460	0,0462
14	0,0576	0,0629	0,0617	0,0587	0,0591
28	0,0783	0,0731	0,0682	0,0689	0,0668
42	0,0877	0,0751	0,0719	0,0708	0,0695
56	0,0960	0,0805	0,0757	0,0731	0,0713
70	0,1035	0,0835	0,0798	0,0755	0,0735
90	0,1084	0,0861	0,0819	0,0780	0,0752
112	0,1129	0,0885	0,0841	0,0793	0,0762
140	0,1139	0,0898	0,0856	0,0811	0,0774
180	0,1148	0,0910	0,0869	0,0827	0,0787
210	0,1160	0,0923	0,0881	0,0841	0,0799
240	0,1172	0,0936	0,0892	0,0855	0,0808
270	0,1186	0,0948	0,0901	0,0870	0,0820
300	0,1196	0,0958	0,0910	0,0886	0,0830
330	0,1202	0,0968	0,0918	0,0898	0,0839
360	0,1208	0,0976	0,0924	0,0906	0,0848



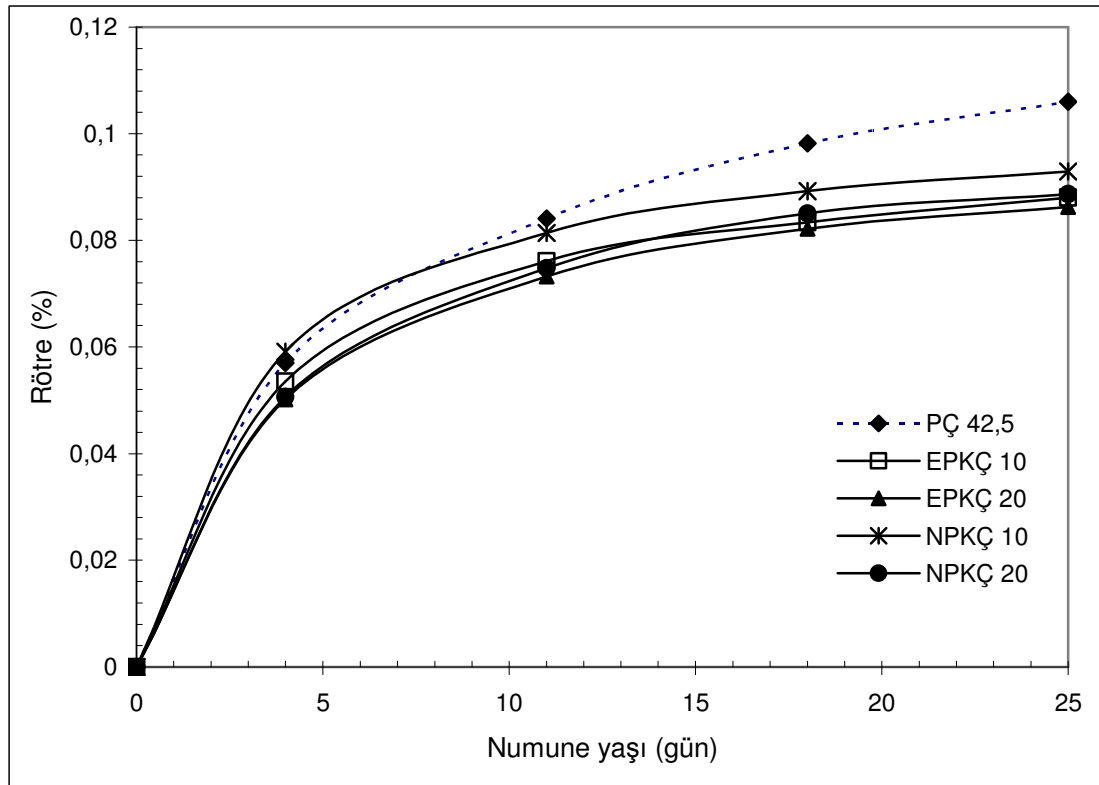
Şekil 4.19. PKÇ'lere ait rötre – numune yaşı ilişkisi (TS 3322)

Çizelge 4.24. ASTM C 596'ya göre hazırlanan numuneler ait rötre değerleri

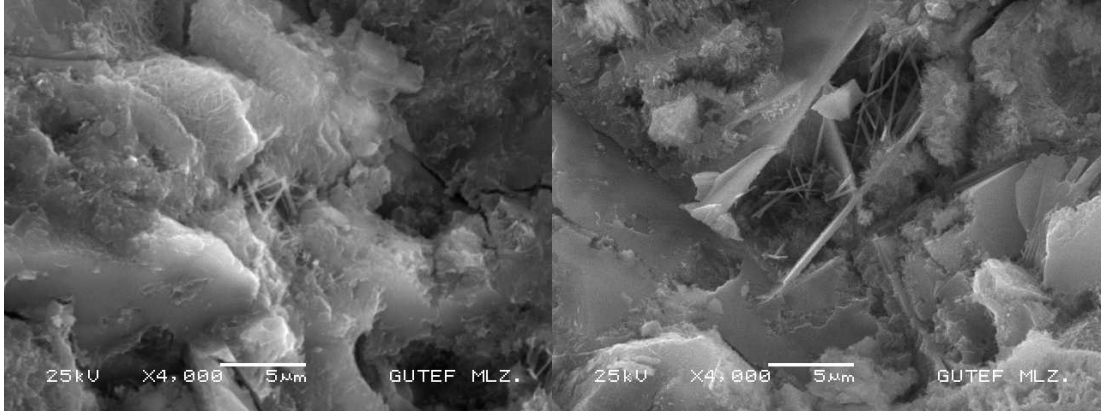
Çim. Tipi	PÇ 42,5 (%)	EPKÇ 10 (%)	EPKÇ 20 (%)	NPKÇ 10 (%)	NPKÇ 20 (%)
Num. Yaş (gün)					
4	0,0570	0,0535	0,0502	0,0591	0,0506
11	0,0841	0,0761	0,0732	0,0814	0,0748
18	0,0982	0,0834	0,0822	0,0892	0,0851
25	0,1060	0,0880	0,0863	0,0929	0,0887

Sonuç olarak, her iki standarda göre yapılan deneylerden elde edilen veriler, çimento içerisinde pomza kullanımının çimentonun rötresini olumlu şekilde etkilediğini (yani azalttığını) göstermiştir. Ayrıca, pomzanın rötreyi azaltma nedenini görebilmek için ASTM'ye göre hazırlanan numunelerden, hazırlanmalarını takip eden 7. ve 28. günlerde birer parça alınarak SEM'de resimleri çekilmiştir (Resim 4.9-4.13). Rötre deneyi için hazırlanan numunelerde kullanılacak su miktarı akma ile belirlendiğinden, çimento

içerisindeki pomza tanelerinin bünyelerindeki gözenekler tamamen suya doymun hale gelmiştir. İlerleyen yaşlarda, kontrol numuneleri içerisindeki su buharlaşma ve hidratasyon yoluyla tüketildiğinden, bu numunelerde önemli miktarda rötre meydana gelmiştir. PKÇ'lerde ise pomza tanelerinin bünyesindeki suyun buharlaşarak ayrılması uzun bir zamana yayılmaktadır. Numuneler içerisinde suyun uzun süre bulunması, ilerleyen zamanlarda puzolanik özelliğe sahip pomzanın serbest CH ile reaksiyona girerek, ilave C-S-H jelleri oluşturmasını sağlamıştır. Bu jeller çimento harcı içerisindeki jel boşluklarını ve kapiler boşlukları doldurmuştur. Bu hem numune içerisindeki suyun buharlaşmasını zorlaştırmış hem de numuneler içerisindeki su hidratasyon ve buharlaşma nedeni ile ayrılrsa bile, çimento harcı içerisinde önemli miktarda rötre oluşmasını engellemiştir.

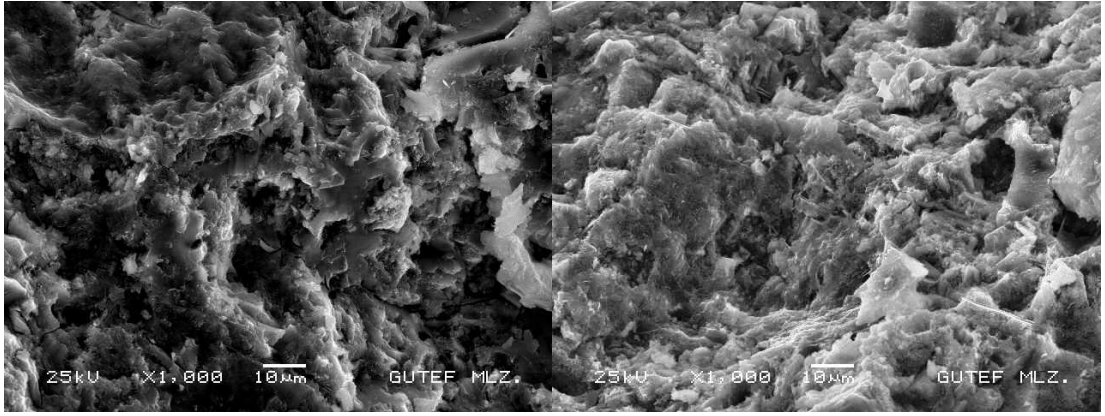


Şekil 4.20. PKÇ'lere ait rötre – numune yaşı ilişkisi (ASTM C 596)



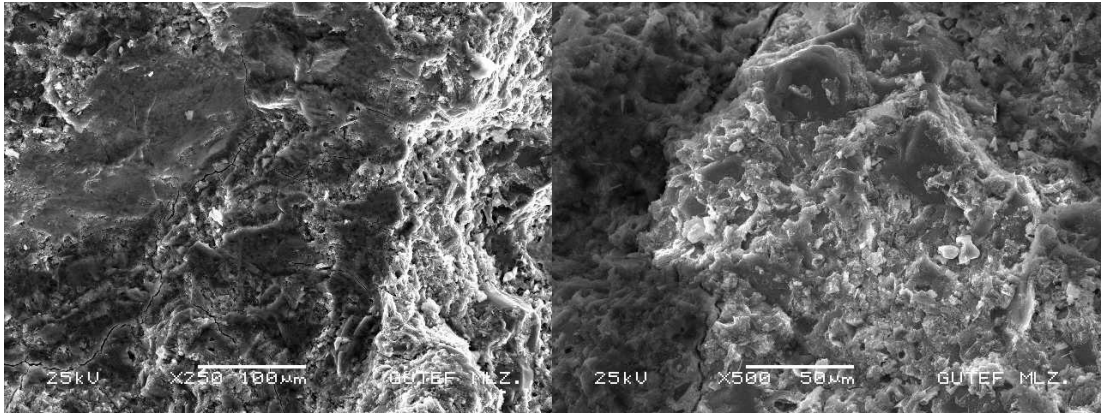
(7)

(28)



(7)

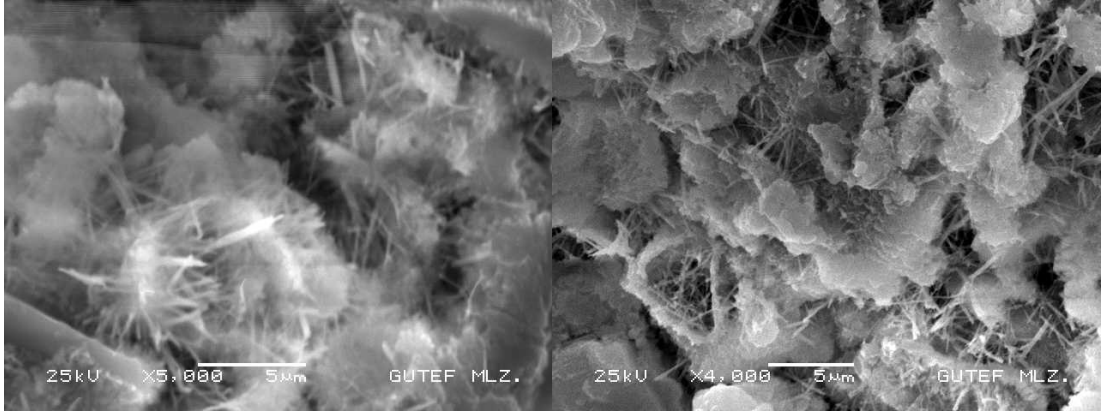
(28)



(7)

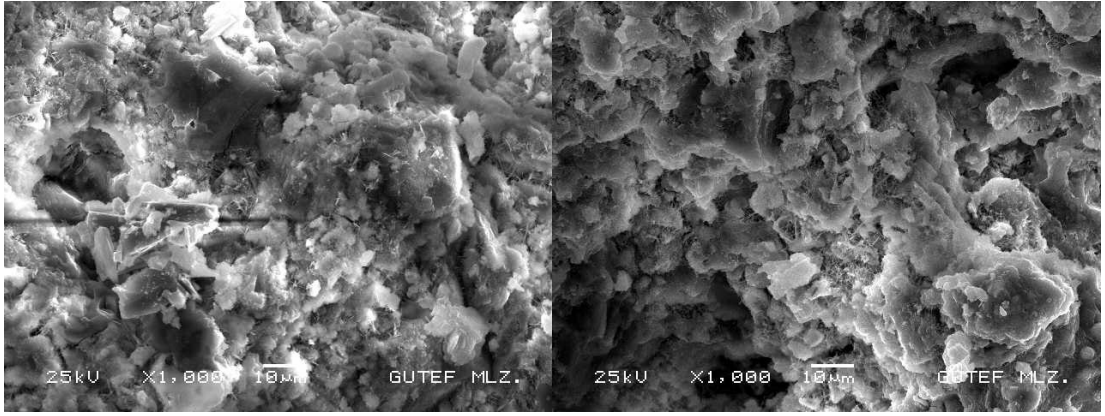
(28)

Resim 4.9. PÇ'nin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri



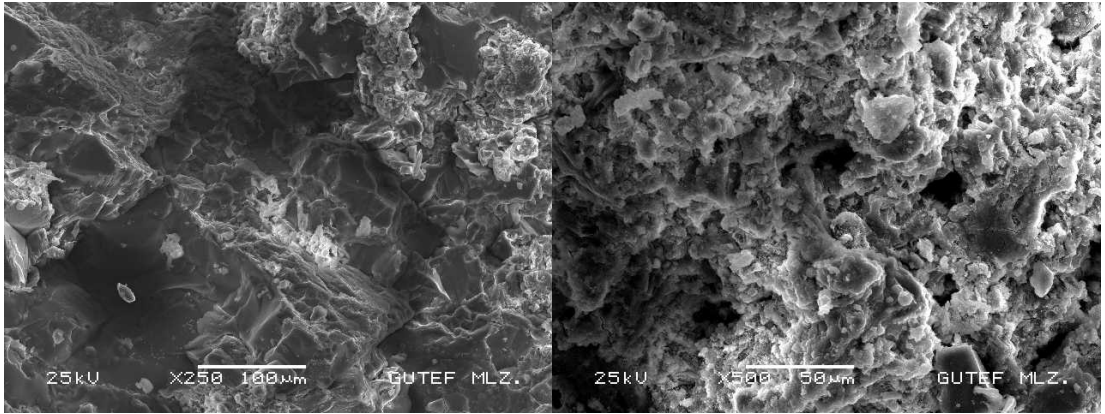
(7)

(28)



(7)

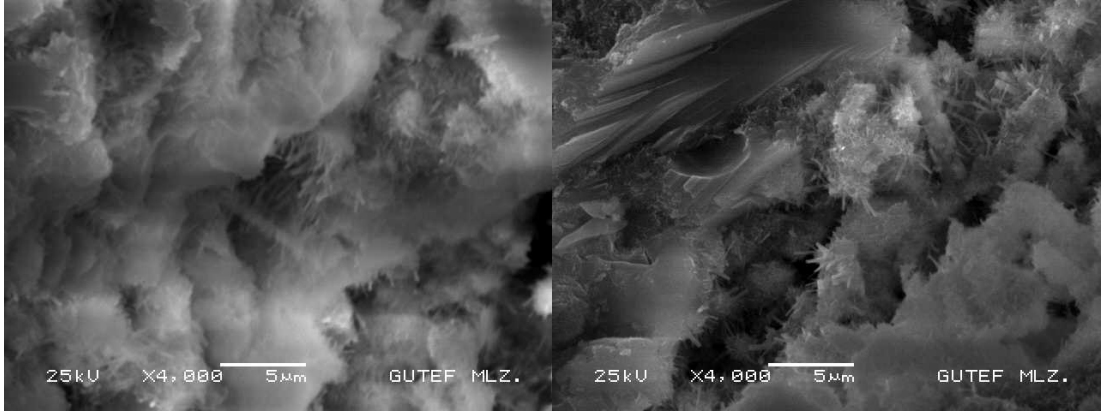
(28)



(7)

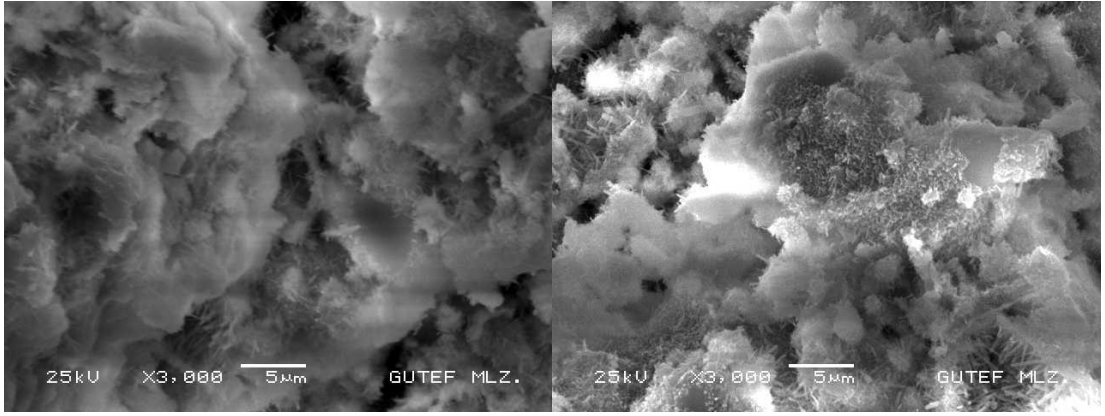
(28)

Resim 4.10. EPKÇ 10'nun 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri



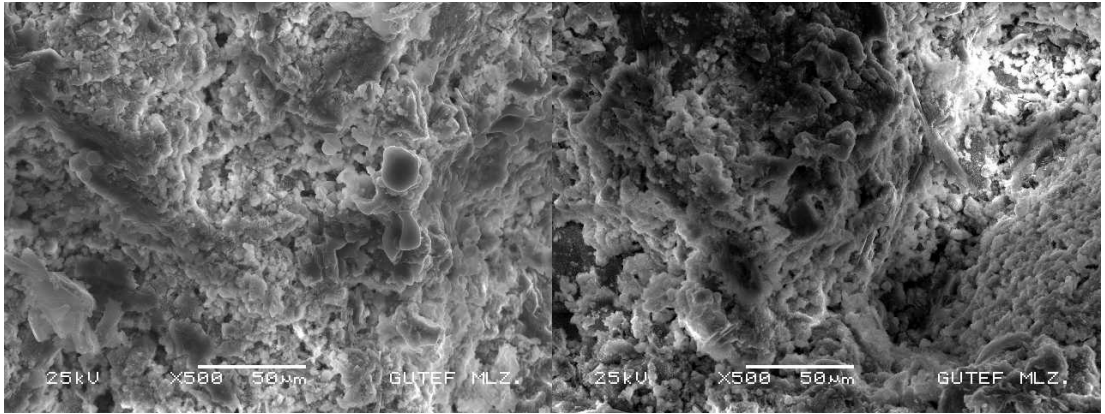
(7)

(28)



(7)

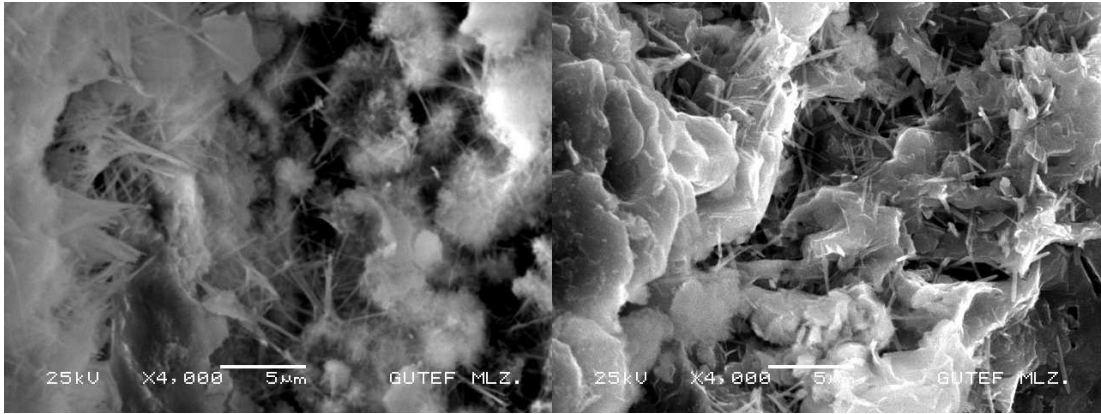
(28)



(7)

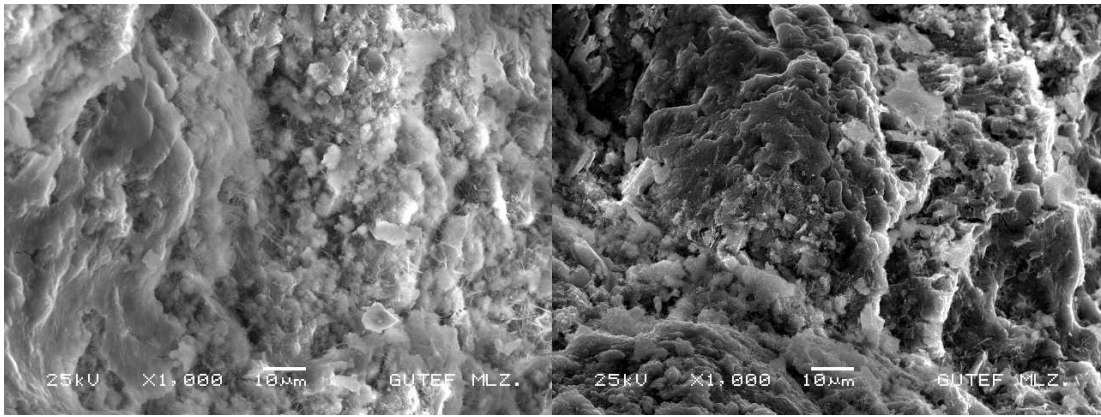
(28)

Resim 4.11. EPKÇ 20'nin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri



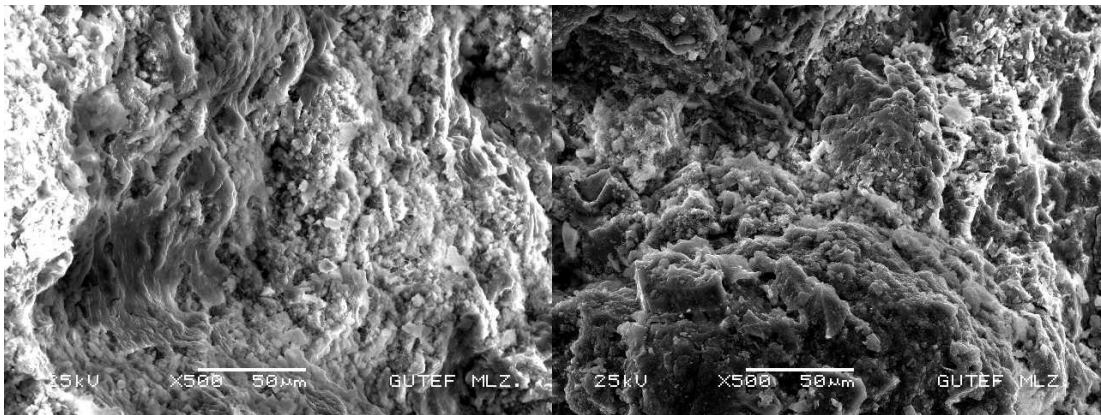
(7)

(28)



(7)

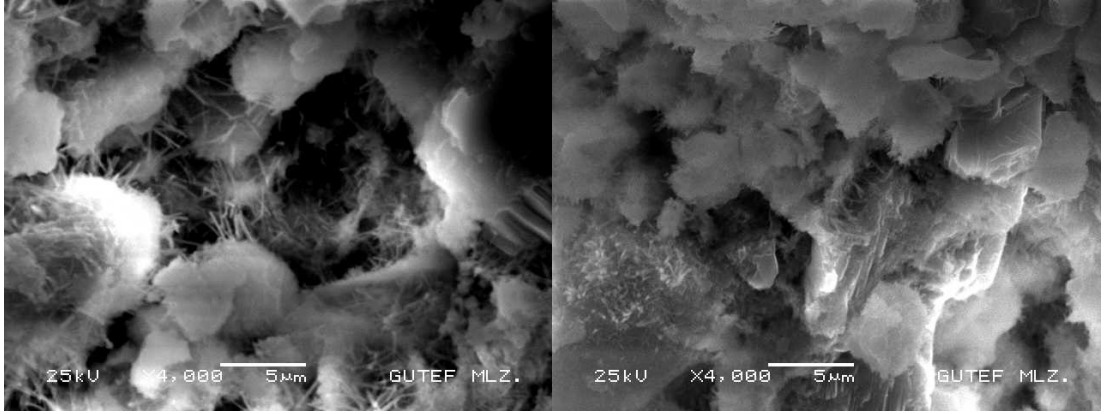
(28)



(7)

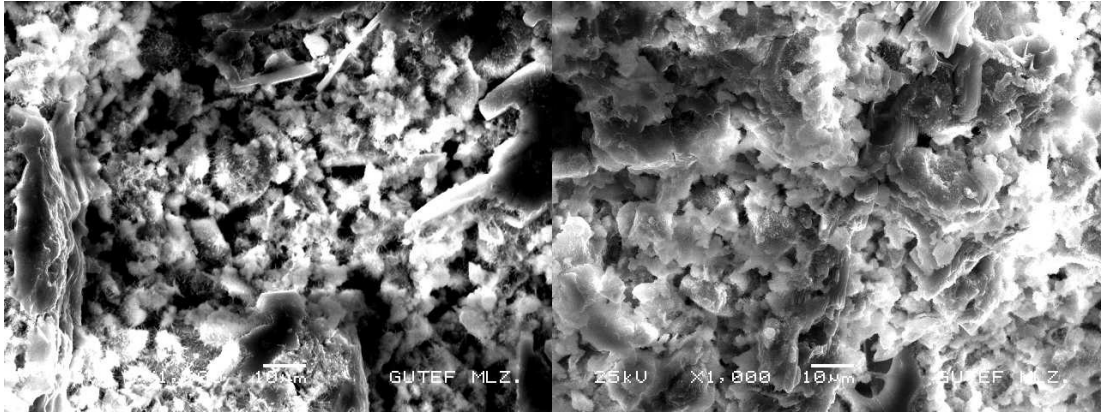
(28)

Resim 4.12. NPKÇ 10'nun 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri



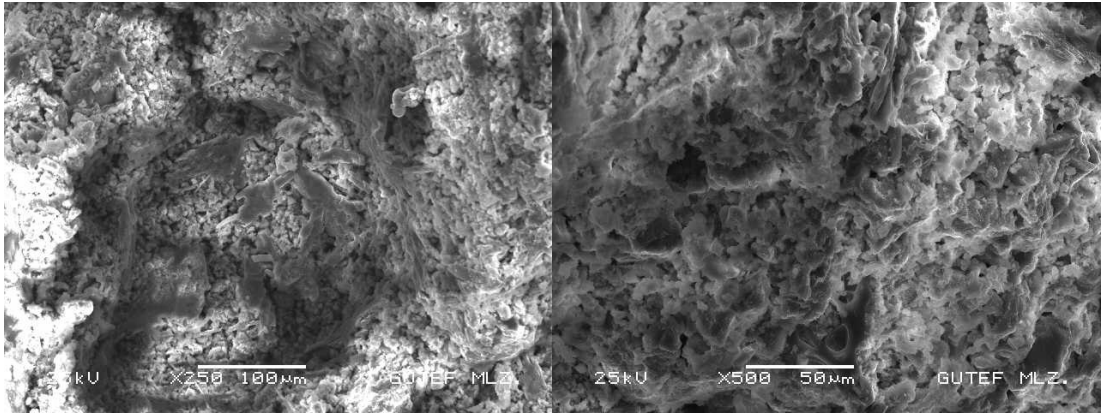
(7)

(28)



(7)

(28)



(7)

(28)

Resim 4.13. NPKÇ 20'nin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri

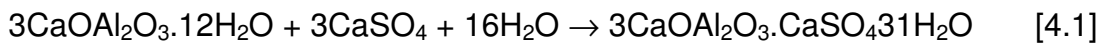
4.10. Sülfat Genleşmesi

Sülfat genleşme deneyide rötre deneyi gibi, kontrol çimentosu olarak PÇ 42,5 ile PKÇ'lerden EPKÇ 10, EPKÇ 20, NPKÇ 10 ve NPKÇ 20'ye uygulanmıştır. 4 hafta %5'lik Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numuneler üzerinde yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar, Çizelge 4.25'te verilmiştir. Numune yaşına ve pomza katkı oranlarına bağlı olarak boy değişimlerini gösteren grafik ise Şekil 4.21'de verilmiştir. Şekil 4.21'den de görüldüğü gibi, PKÇ'ler kontrol çimentosu PÇ 42,5'e göre, pomza katkı oranındaki artışa bağlı olarak sülfat genleşmesini önemli oranda (28 günde ortalama %25 civarında) azaltmıştır. Önemli bir fark olmamakla birlikte, NPKÇ'lerin EPKÇ'lere göre sülfat genleşmesinin azaltılmasında daha etkili olduğu söylenebilir.

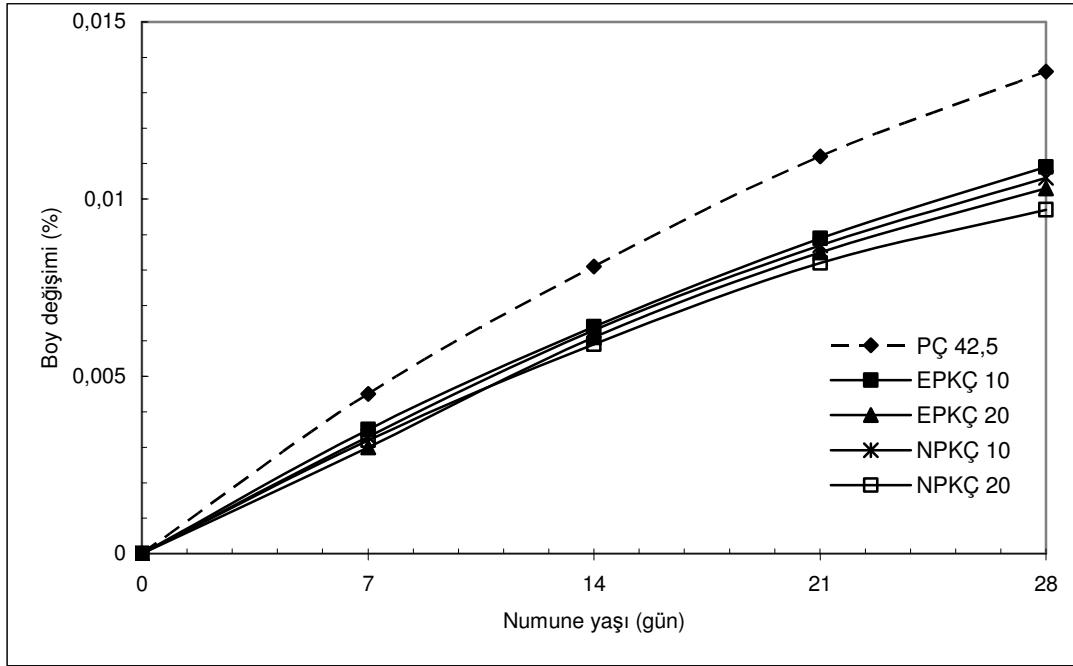
Çizelge 4.25. PKÇ'lere ait sülfat genleşme değerleri

Çim. Tipi	PÇ 42,5 (%)	EPKÇ 10 (%)	EPKÇ 20 (%)	NPKÇ 10 (%)	NPKÇ 20 (%)
Num. Yaş (gün)					
7	0,0045	0,0035	0,0030	0,0033	0,0032
14	0,0081	0,0064	0,0061	0,0063	0,0059
21	0,0112	0,0089	0,0085	0,0087	0,0082
28	0,0136	0,0109	0,0103	0,0106	0,0097

Sülfatın çimento üzerindeki zararlı etkisi, kalsiyum sülfat ile klinker bileşiklerinden C₃A arasında meydana gelen ve aşağıda verilen kimyasal reaksiyon neticesinde ortaya çıkar.



Bu reaksiyon sonunda meydana gelen ve 31 mol kristal suyu içeren trikalsiyumsülfoalüminat (Candlot tuzu veya yaygın bilinen adıyla etrenjit) hiç mukavemeti olmayan bir bileşiktir. Bu bileşik çimento harcı içerisinde büyük hacim genleşmeleri meydana getirir (120).



Şekil 4.21. PKÇ'lere ait sülfat genleşmesi – numune yaşı ilişkisi

Klinker miktarının azaltılması C_3A anabileşeninin azalmasına, bu da daha az etrenjit oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca PKÇ'ler, içerisindeki pomzanın puzolanik özelliğinden dolayı sülfatın zararlı (genleşme) etkilerini azaltmıştır. Pomza çimentonun hidratasyonu ile açığa çıkan serbest CH 'ı bağlayarak, kalsiyum silikatları oluşturmuştur. Böylece çimento harcı içerisindeki boşluklar kısmen doldurulmuş ve permeabilite azaltılmış dolayısıyla da, sülfatın harç içerisine nüfuzu zorlaşmıştır. Bununla birlikte CH 'ın bağlanmış olması, sülfatın kalsiyum sülfat haline gelerek etrenjit oluşturmasını ve harçlarda hacim genleşmesine neden olmasını güçleştirmiştir.

4.11. Otoklav Genleşme Deneyi

Otoklav genleşme deneyi PÇ 42,5 kontrol çimentosu, EPKÇ 10, EPKÇ 20, NPKÇ 10 ve NPKÇ 20 çimentoları üzerinde yapılmıştır. Deneyden elde edilen sonuçlar, ASTM C 595'de verilen katkılı çimentolara ait sınır otoklav genleşme değeri ile birlikte Çizelge 26'da verilmiştir. Sonuçlar her iki yöre

pomzası ile üretilen katkılı çimentoların otoklav genleşme değerlerinin ilgili standartta verilen sınır değerin çok altında olduğunu göstermektedir. Ayrıca PKÇ'ler PÇ 42,5 kontrol çimentosuna göre otoklav genleşme değerlerinde %32-%38 arasında değişen azalmalar sağlamıştır. Bunun nedeni ise, pomzanın puzolanik özelliğinden dolayı, klinkerin bileşenlerinin su ile reaksiyonundan açığa çıkan serbest kalsiyum hidroksiti bağlamasıdır. Böylece çimento içerisinde mevcut olan CaO ve MgO hidratasyonu ile meydana gelebilecek ve çimento pastası içerisinde genleşmelere neden olabilecek reaksiyonlarda kısmen engellenmiş olmaktadır.

Çizelge 4.26. Otoklav genleşme deneyi sonuçları

	PÇ 42,5	EPKÇ 10	EPKÇ 20	NPKÇ 10	NPKÇ 20	ASTM C 595
Ot. Ge, %	0,0850	0,0532	0,0522	0,0577	0,0546	0,8000

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada pomzanın puzolanik aktivitesinin olup olmadığı, çimento içerisinde mineral katkı olarak kullanımının çimentonun,

- standart kıvam suyu ihtiyacına,
- priz sürelerine,
- hacim genleşmesine,
- özgül ağırlığına,
- kimyasal kompozisyonuna ve
- otoklav genleşmesine,

bu çimentolarla üretilen harçların,

- su ihtiyacına,
- eğilmede çekme dayanımına,
- basınç dayanımına,
- sülfat genleşmesine ve
- rötresine etkileri,

PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 kontrol çimentoları ve bunlarla üretilen harçlar ile karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda başlıklar halinde sıralanmaktadır:

5.1. Sonuçlar

5.1.1. Puzolanik aktivite

Hem Türk Standartlarına hem de Amerikan Standartlarına göre yapılan deneyler, hem Erzincan hem de Nevşehir pomzasının puzolanik aktivitesinin olduğunu göstermektedir. Bariz fark olmamakla birlikte, Erzincan pomzasının puzolanik aktivitesinin daha iyi olduğu söylenebilir.

5.1.2. Standart kıvam suyu ihtiyacı

Pomzanın çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılması veya çimentonun bir kısmı ile ikame edilmesi, çimentoların standart kıvam suyu ihtiyaçlarını kullanılan pomza oranına bağlı olarak artırmaktadır. Bu artış, hem PKÇ'lerde hemde POİÇ'lerde hemen hemen pomza katkı oranının doğrusal bir fonksiyonu şeklindedir.

Ayrıca, POİÇ'lerin standart kıvam suyu ihtiyaçları PKÇ'lerin standart kıvam suyu ihtiyaçlarından daha fazladır. Çok belirgin olmamakla birlikte, Nevşehir pomzasının Erzincan pomzasına göre standart kıvam suyu ihtiyacını bir miktar artırdığı da söylenebilir.

5.1.3. Priz süreleri

Çimento içerisinde pomza kullanılması, hem priz başlangıç süresini hem de priz sonu süresini pomza katkı oranı ve standart kıvam suyu ile doğru orantılı olarak artırmaktadır. Bu sonuç katkılı ve ikameli çimentoların her ikisi içinde geçerli olmakla birlikte, ikameli çimentolardaki artış miktarı katkılı çimentolara göre daha yüksek olmuştur.

5.1.4. Hacim genleşmesi

Çimento içerisinde pomza kullanılması, hem PKÇ'lerin hemde POİÇ'lerin hacim genleşmelerini, özellikle PÇ 42,5 kontrol çimentosuna göre oldukça azaltmıştır. PKÇ'lerin ve POİÇ'lerin her ikisinde de pomza miktarı arttıkça, pomzanın hacim genleşmesine olan olumlu katkısı daha da belirginleşmiştir.

5.1.5. Özgül ağırlık

Her iki yöre pomzasıda çimentonun özgül ağırlığını azaltmıştır. Pomza katkı miktarı ile çimento özgül ağırlığı arasında bir ters orantı mevcuttur. Başka bir

ifade ile, pomza katkı oranı arttıkça çimento özgül ağırlığı azalmaktadır. Büyük farklılıklar olmamakla birlikte NPKÇ'lerin özgül ağırlıklarının EPKÇ'lerin özgül ağırlıklarından daha düşük olduğu söylenebilir.

5.1.6. Kimyasal kompozisyon

Yapısında önemli miktarda SiO_2 (%58,44 ~ %71,93) içeren pomza, çimentonun yaklaşık %20 civarında olan SiO_2 miktarını %40'lara (%24,08 ~ %40,05) kadar artırmıştır. Çimento içerisindeki miktarı %64 olan CaO, pomza içerisindeki miktarı %0,76 ~ %5,2 arasında değiştiğinden dolayı, %38'lere (%57,96 ~ %38,29) kadar düşmüştür. Ancak yinede tüm PKÇ'lerin ve POİÇ'lerin kimyasal kompozisyonları TS EN 197-1'de istenilen gereksinimlere uygundur.

5.1.7. Otoklav genleşmesi

Otoklav genleşme deneyi kontrol çimentosu PÇ 42,5 ve %10-%20 PKÇ'lere uygulanmış ve sonuçların ASTM C 595'te verilen sınır değerinin altında olduğu görülmüştür. Ayrıca PKÇ'ler PÇ 42,5 kontrol çimentosuna göre otoklav genleşme değerlerinde %32-%38 arasında değişen azalmalar sağlamıştır. Bununla birlikte pomza katkı oranı arttıkça otoklav genleşme değerlerinde de bir azalma söz konusudur.

5.1.8. Harçların su ihtiyacı

PKÇ'lerin ve POİÇ'lerin kullanılması, kullanılan pomza oranına bağlı olarak harçların su ihtiyacını artırmaktadır. Bu artış, hem katkılı hemde ikameli çimentoların kullanıldığı durumlar için, hemen hemen pomza katkı oranının doğrusal bir fonksiyonu şeklindedir.

Ayrıca, POİÇ'ler ile üretilen harçların su ihtiyaçları, PKÇ'ler ile üretilen harçların su ihtiyaçlarından daha fazladır. Bariz olmamakla birlikte, Nevşehir

pomzasının Erzincan pomzasına göre harçların suyu ihtiyacını bir miktar artırdığı da söylenebilir.

5.1.9. Eğilmede çekme dayanımı

PKÇ'ler ve POİÇ'lerin her ikisinde de çimento içerisinde pomza kullanılması, çimentoların eğilme dayanımlarını, pomza katkı oranındaki artışla ters orantılı olarak azaltmaktadır. Bununla birlikte, ilerleyen yaşlarda, PKÇ'lerin ve POİÇ'lerin eğilme dayanımlarında önemli artışlar olmuştur. %10 ve %20 pomza içeren PKÇ'ler ve POİÇ'ler kontrol çimentolarına çok yakın, bazanda onlardan daha yüksek değerler vermişlerdir.

5.1.10. Basınç dayanımı

PKÇ'ler ve POİÇ'lerin her ikisinde de çimento içerisinde pomza kullanılması, çimentoların basınç dayanımlarını pomza katkı oranındaki artışla ters orantılı olarak azaltmaktadır. Ancak, ilerleyen yaşlarda, PKÇ'lerin ve POİÇ'lerin basınç dayanımlarında önemli artışlar olmuştur. %10 ve %20 pomza içeren PKÇ'ler ve POİÇ'ler kontrol çimentolarına çok yakın, bazen da onlardan daha yüksek değerler vermişlerdir.

5.1.11. Rötire

Rötire deneyi PÇ 42,5 ve %10-%20 pomza içeren PKÇ'lere uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, pomza katılmasının çimentonun rötresini pomza katkı oranındaki artışa bağlı olarak azalttığını göstermektedir.

5.1.12. Sülfat genleşmesi

Sülfat genleşmesi deneyi PÇ 42,5 ve %10-%20 pomza içeren PKÇ'lere uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, pomza katılmasının

çimentonun sülfat genişmesini pomza katkı oranındaki artışa bağlı olarak azalttığını göstermektedir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve çalışma sürecinde karşılaşılan problemler dikkate alınarak, bu alanda çalışma yapacak araştırmacılar için aşağıdaki öneriler yapılabilir:

- Deneylerden elde edilen sonuçlar, her iki yöre pomzasının da çimento üretiminde %10 ve %20 oranında katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.
- PKÇ'lerin rötre ve sülfat genişmesi üzerindeki etkileri sadece %10-20 katkı oranlarında araştırılmıştır. Diğer katkı oranlarında da araştırılması sonuçların güvenilirliğinin artıracaktır. Ayrıca, sülfat genişmesi deneylerinin daha uzun süreli ve farklı çözeltiler kullanılarak ($MgSO_4$) yapılması faydalı olacaktır.
- Pomza ile yapılacak benzeri çalışmalarda, üretilecek katkılı çimentoların öğütme sürelerinin belirlenmesinde çimento inceliğinin referans alınması uygun olacaktır.
- Katkılı çimento üretiminde pomza ile klinker birlikte öğütülecekse, mutlaka klinker bir süre tek başına öğütüldükten sonra pomza ilave edilmelidir. Aksi takdirde, istenilen incelik sağlansa bile çimentonun daha ince olan bölümü pomzadan, kalan kısmı ise klinkerden oluşacaktır. Bu da çimentonun priz süresini artıracak ve kaba kalan klinker hem yavaş reaksiyon verecek hem de tamamının hidrate olamaması gibi bir riske maruz kalacaktır. Bu durum çimentonun hem erken dayanımı hemde ilerleyen yaşlardaki dayanımı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilecektir.
- Bu çalışma sadece iki yörenin pomzasını kapsamaktadır. Pomzanın çimento üretiminde kullanılabilirliği hakkında genel bir yorum yapabilmek

için, diğer yöre pomzaları ile de benzeri çalışmaların yapılması faydalı olacaktır.

- PKÇ'lerle üretilen betonlar üzerinde çalışmalar yapılması, bu ve benzeri çalışmalar açısından yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Erdoğan, T.Y., "Beton", **METU Press**, Ankara, 11-63, 169-208, 572-604 (2003).
2. Yeğınobalı, A., "Portland Çimentosu", **TÇMB Seminer Notları**, Ankara, 1-15 (1999).
3. Philleo, R. E., "Slag or other supplementary materials", **A.C.I. SP 114**, 58, 1197 (1989).
4. Douglas, E. and Mainwaring P. R., "Hydration and pozzolanic activity of non ferrous slag", **Amer. Ceram. Bull.**, 64 (5): 700-711 (1985).
5. ASTM C 618, "Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete", **Annual Book of ASTM Standards**, Pennsylvania (2002).
6. Sersale, R., "Advences in Portland and blended cements", **9 th. ICC.**, New Delhi, India, 261-302 (1992).
7. Sersale, R., "Aspect of Chemistry of Additions", Advences in Cement Technology, Ghosh, S. N., **Tech Books International**, New Delhi, 507-631 (2002).
8. Rousekova, I., Bajza, A. and Zivica, V., "Silica fame-basic blast furnace slag systems activated by an alkali silica fume activator", **Cement and Conrete Research**, 27: 1825-1828 (1997).
9. Dhir, R. K., El-Mohr, M. A. K. and Dyer, T. D., "Developing choloride resisting concrete using PFA", **Cement and Conrete Research**, 27: 1633-1639 (1997).
10. Khatri, R. P. and Sirivivatnunun, "Role of permeability in sulphate attack", **Cement and Conrete Research**, 27: 1179-1189 (1997).
11. Nagla, V. T. and Page, C. L., "Effects of carbonation of pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes", **Cement and Conrete Research**, 27: 995-1007 (1997).
12. Aruntaş, H.Y. ve Tokyay, M., "Katkılı Çimento Üretiminde Diatomitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği", **Çimento ve Beton Dünyası**, Ankara, 1(4): 33-41 (1996).

13. Fragoulis, D. et. al., "Zeollitic tuffs of Kimolos Island, Aegan Sea, Greece and their industrial potential", **Cement and Conrete Research**, 27: 889-995 (1997).
14. Deghhanian, C. and Arjemendi, M., "Influence of slag blended cement concrete on choloride diffusion rate", **Cement and Conrete Research**, 27: 937-945 (1997).
15. Grzeszczyk, S. and Lipouski, G., "Effect of contents and particle size distribution of high calcium fly ash on the rheological properties of cement pastes", **Cement and Conrete Research**, 27: 907-916 (1997).
16. Narang, K. C., "Portland and Blended Cement", **9 th. ICCC**, New Delhi, India, I: 213-266 (1992).
17. Frias, M. and Sanchez de Tojas, M. I., "Microstructural alterations in fly ash mortars: study on phenomena affecting particle and pore size", **Cement and Conrete Research**, 27: 619-628 (1997).
18. Taşkın, C., "Türkiye Çimento Hammadde Kaynakları", **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, Ankara, 1-43 (1999).
19. Leckebush, R., "Türkiye'deki doğal puzolanların çimento katkı maddesi olarak kullanımı üzerine incelemeler", **Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi**, Ankara, 1-27 (1984).
20. Hossain, K. M. A., "Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete", **Cement and Conrete Research**, 34 (2): 283-291 (2004).
21. Hossain, K. M. A., "Blended cement using volcanic ash and pumice", **Cement and Conrete Research**, 33 (10): 1601-1605 (2003).
22. Cavalari, L., Miraglia, N. and Papia, M., "Pumice concrete for structural wall panels", **Engineering Structures**, 25 (1): 115-125 (2003).
23. Sarı, D. and Paşamehmetoğlu, A. G., "The effects of gradation and admixture on the pumice ligtweight aggregate concrete", **Cement and Conrete Research**, 35 (5): 936-942 (2005).
24. Gündüz, L. and Uğur, İ., "The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixture", **Cement and Concrete Research**, 35 (9): 1859-1864 (2005).

25. Batis, G., Kouloumbi, N. and Pantazopoulou, P., "Corrosion protection of steel in pumice lightweight mortar by coatings", **Cement and Concrete Composites**, 27 (2): 261-267 (2005).
26. Yaşar, E., Atış, C. D., Kılıç, A. and Gülsen, H., "Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash", **Materials Letters**, 57 (15): 2267-2270 (2003).
27. Hossain, K.M.A., "Development of volcanic pumice based cement and lightweight concrete", **Magazine of Concrete Research**, 56 (2): 99-109 (2004).
28. Triantatillou, T.C. and Papanicolaou, C.G., "Shear transfer capacity along pumice aggregate concrete and high-performance concrete interfaces", **Materials and Structures**, 34 (248): 237-245 (2002).
29. Ghosh, S. N., "Portland cement: Introduction, composition and properties", *Advances in Cement Technology*, Ghosh, S. N., **Tech Books International**, New Delhi, 1-26 (2002).
30. Lea, F. M., "The Chemistry of Cement and Concrete", **Edward Arnold**, London, 210-293 (1970).
31. Taylor, H. F. W., "Cement Chemistry", **Academic Press**, New York, 5-50 (1990).
32. Moir, G., "Cements", *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials*, Ed. J. Newman, B. S. Choo, Elsevier, 1st ed. **Oxford**, 1-45 (2003).
33. Ertün. T. ve Türker, P., "Çimento Kimyası", **T.Ç.M.B. Yayını**, Ankara, 39-43 (2004).
34. Ramachandran, V. S., Beaudoin James, J., "Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology", **Noyes Publication**, New Jersey, 2-16 (2001).
35. Killoh, D. C., "A comparison of conduction calorimetry and heat of solution methods for measurement of the heat of hydration of cement", **Advances in Cement Research**, 1 (3): 180-186 (1998).
36. Odler, I., "Hydration, setting and hardening of Portland cement", In Hewlet, P. C. (ed.) *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, **Arnold**, London, 260-263 (1998).
37. Taylor, H. F. W., "Cement Chemistry", **Thomas Telford**, London, 113-225 (1997).

38. Taylor, H. F. W., Mohan, K. and Moir, G., "Analytical study of pure and extended Portland cement pastes: I, pure Portland cement pastes", ***Journal of American Ceramic Society***, 68 (12): 680-685 (1985).
39. ASTM C 595-86, "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements", ***American Society for Testing Materials***, Pennsylvania (2005).
40. Aruntaş, H. Y., "Diatomitlerin çimentolu sistemlerde pozolanik malzeme olarak kullanılabilirliği", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-22 (1996).
41. Ramyar, K., Dönmez, H. Ve Andiç, Ö., "Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması", ***T.Ç.M.B., Proje No:UNİPR 00/23***, Ankara, 11-55 (2002).
42. Massazza, F., "Pozzolana and Pozzolanic Cements", Lea's Chemistry of Cement and Concrete 4th ed., ***John Wiley & Sons Inc.***, New York, 471-617 (1998).
43. Turriziani, R., "Aspects of Chemistry of Pozzolanas", The Chemistry of Cements, Taylor, H. F. W. (Edit.), ***Academic Press***, London, 27-83 (1964).
44. Cook, D. J., "Naturel Pozzolanas, Calcined Clay, Shale and Other Soils, Rice Husk Ash – Cement Replacement Materials", Swamy, R. N. (Edit.) ***Surrey University Press***, 1-70 (1986).
45. Swamy, R. N., "Role and Effectiveness of Mineral Admixtures in Relation to Alkali Silica Reaction", The Alkali – Silica Reaction in Concrete, Swamy, R. N. (Edit.), ***Van Nostrand Reinhold***, New York, 96-121 (1992).
46. ASTM C 125, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregate", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
47. Swamy, R. N., "Cement Replacement Materials", ***Surrey Univ. Press***, London, 114-258 (1986).
48. Mehta, P. K., "Pozzolanic and Cementitious By-Products in Concrete", ***Materials and Structures***, 69 (1): 627-632 (1988).
49. RILEM 73 – SBC Committee, "Siliceous By – Products for Use in Concrete", ***Materials and Structures***, 69 (1): 649-658 (1988).

50. Massazza, F. and Costa, U., "Factors determining the development of mechanical strength in lime-pozzolana pastes", ***Proceedings of the XXII Conference on Silicate Industry and Silicate Science***, Budapest, I: 537-552 (1977).
51. Costa, J. and Massazza, F., "Natural pozzolanas and fly ashes: analogies and differences", ***Proceedings of Symposium N on Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete***, Boston, 134-144 (1981).
52. Massazza, F., "Pozzolanas and pozzolanic cements", ***Cement-Br.***, Zagreb, 3-17 (1980).
53. Massazza, F., "Puzolanlı Çimnetolar ve Kullanım Alanları Semineri", ***T.Ç.M.B.***, Ankara, 154-160 (1983).
54. Turanlı, L., "Effects of Naturel Pozzolan Addition on the Properties of Portland – Pozzolan Cement and the Concrete Made with those Cements", Doktora Tezi, ***O.D.T.Ü.***, Ankara, 3-53 (1995).
55. Şimşek, O., "Beton ve Beton Teknolojisi", ***Seçkin Yayınevi***, Ankara, 75-119 (2004).
56. Massazza, F. and Testolin, M., "Trimethylsilylation in the study of pozzolana-containing pastes", ***Il Cemento***, 1:49-62 (1983).
57. Colleparadi, M., Marcialis, A. and Sanna, U., "Low pressure steam curing of compacted lime-pozzolana mixtures", ***Cement and Concrete Research***, 6: 497-506 (1976).
58. Bogue, R. H., "The Chemistry of Portland Cement", ***Reinhold***, New York, 19-46 (1955).
59. Mehta, P. K., "Pozzolan and Cementitious By – Products as Mineral Admixtures for Concrete – a Critical Review, ***ACI SP – 79***, Detroit (1983).
60. Ramyar, K., "Effects of Turkish Fly Ashes on the Portland Cement – Fly Ash Systems", Doktora Tezi, ***O.D.T.Ü.***, Ankara, 3-53 (1993).
61. Takemoto, K. and Uchikawa, H., "Hydration of Pozzolan Cement", ***Proc. 7 th. Int. Cong. On the Chemistry of Cements***, Paris, IV-2, 1, 214-219 (1980).
62. CEN EN 196-5, "Methods of testing cement-pozzolanacity test for pozzolanic cements, ***European Committee for Standardisation***, Brussels (2003).

63. Diamond, S., Sheng, Q. and Olek, J., "Evidence for minimal pozzolanic reaction in afly ash cement during the period of major strength development, pore structure and permeability of cementious materials", ***Materials research Society Symposium Proceedings***, Boston, 437-446 (1989).
64. Feldman, R. F., "Significance of porosity measurements on blended cement performance", In: Malhotra, V ed. Proceedings of the 1st International Congress on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, ***ACI Special Publication***, Canada, I: 415-433 (1983).
65. Dalziel, J. A. and Gutteridge, W. A., "The influence of pulverized-fuel upon the hydration characteristics and certain physical properties of a Portland cement paste", ***Cement and Concrete Association Technical Report 560***, 1-28 (1986).
66. Maula, S. and Odler, I., "Hydration reactions in fly-ash-Portland cement ", In: Malhotra, V ed. Proceedings of Symposium N on Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete, Boston. ***Materials Research Society***, 1: 102-111 (1981).
67. Li, S., Roy, D. M. and Kumar, A. "Quantitative deterrmination of pozzolanas in hydrated systems of cement or Ca(OH)_2 with fly ash or silica fume", ***Cement and Concrete Research***, 15: 1079-1086 (1985).
68. Berry, E.E., Hemmings, R.T., Zhang, M.H., Cornelius, B.J. and Golden, D.M., "Hydration in high-volume fly ash concrete binders", ***American Concrete Institute Materials Journal***, 90(4): 382-389 (1994).
69. Uchikawa, H., "Effect of blending companents on haydration and structure formation", ***Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement***, Rio de Janerio, I: 249-280 (1986).
70. Rodger, S.A. and Groves, G.W., "Electron microscopy study of ordinary Portland cement-pulverised fuel ash blended pastes", ***Journal of the American Ceramic Society***, 72(6): 1037-1039 (1989).
71. Ramyent, P.L., "The effect of pulverised-fuel ash and the C/S molar ratio and alkali content of calcium silicate hydrates in cement", ***Cement and Concrete Research***, 12: 133-140 (1982).
72. Taylor, H.F. and Newbury, D.E., "An electron microscobe study of mature cement paste", ***Cement and Concrete Research***, 14: 565-573 (1984).

73. Rayment, D.L. and Majumdar, A.J., "The composition of the C-S-H phase in Portland cement Pastes", ***Cement and Concrete Research***, 12: 753-764 (1982).
74. Rayment, D.L. and Lachowski, E.E., "The analysis of OPC pastes: a comparison between analytical electron microscopy and electron probe microanalysis", ***Cement and Concrete Research***, 14: 43-48 (1984).
75. Duchesne, J. and Berube, M.A., "Effect of supplementary cementing materials on the composition of cement hydration products", ***Advanced Cement Based Materials***, 2:43-52 (1995).
76. Atkins, M., Lachowski, E.E. and Glasser, F.P., "Investigation of solid and aqueous chemistry of 10-years-old Portland cement pastes; with and without silica modifier", ***Advances in Cement Research***, 5(19): 97-102 (1993).
77. Massazza, F. and Daimon, M., Congress Report: "Chemistry of hydration of cements and cementitious systems", In: ***Proceeding of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement***, New Delhi, 383-446 (1992).
78. Xu, A., Sarkar, S. and Nilsson, L.O., "Effect of fly ash on the mikro structure of cement mortar", ***Materials and Structures***, 26: 414-424 (1993).
79. Berry, E.E. and Malhotra, V., "Fly ash in concrete", In: Malhotra V ed., ***Supplementary cementing materials for concrete***, CANMET, Canada, 93-97 (1987).
80. Bellander, N., "Experiences with silica fume in ready-mixed concrete", ***The Norwegian Institute of Technology, Report BML 82.610, Trondheim***, Norway, 257-264 (1982).
81. Giergiczny, Z. and Werynska, A., "Influence of fineness of fly ashes on their hydraulic activity", In Malhotra, V ed., Proceedings of the 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Naturel Pozzolans in Concrete, Trondheim, ***ACI Special Publication 114***, I: 97-115 (1989).
82. Sybertz, F., "Comparison of different methods for testing the pozzolanic activitiy of fly ashes", In Malhotra, V ed., Proceedings of the 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Naturel Pozzolans in Concrete, Trondheim, ***American Concrete Institute Special Publication 114***, I: 477-497 (1989).

83. Kohno, K., Aihara, F. and Ohno, K., "Relative durability properties and strengths of mortars containing finely ground silica and silica fume" In Malhotra, VM ed., Proceedings of the 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Naturel Pozzolans in Concrete, Trondheim, **ACI Special Publication 114**, I: 815-826 (1989).
84. Costa, U. And Massazza, F., "Some properties of pozzolanic cements containing fly ashes", In Malhotra, V ed., Proceedings of the 1st International Congress on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, Montello, Canada, **ACI Special Publication 79**, I: 235-254 (1983).
85. İnternet: Pomza nedir? Pomza ve Çevre. <http://www.ponzablok.com.tr/indexa.htm> (2005).
86. İnternet: Pomza, oluşumu, türleri ve kullanım alanları <http://www.maden.org.tr/yeni3/bildiriler/ponzanedir.htm> (2005)
87. İnternet: Pomzanın Endüstriyel Kullanım Alanları. <http://www.pomzamer.sdu.edu.tr> (2005).
88. İnternet: Pomzanın tarihçesi ve kullanım alanları. http://www.metaspumice.com/turkish/index_tr.html (2005).
89. Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, İ. ve Cankıran, O., "Pomza Teknolojisi, Cilt I", **SDÜ-ISBAŞ**, Isparta, 14-31 (1998).
90. DPT, "Yapı Malzemeleri (Pomza-Perlit-vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer)", **DPT:2617-ÖİK:628**, Ankara, 1-54 2001.
91. Kalousek, G. L., Porter, L. C. and Benton, E. J., "Concrete for Long-time Service in Sulfate Environment", **Cement and Concrete Research**, 2 (1): 79-89 (1972).
92. Şahin, R., Demirboğa, R., Uysal, H. and Gül, R., "The Effects of Different Cement Dosages, Slumps and Pumice Aggregate Ratios on the Compressive Strength and Densities of Concrete", **Cement and Concrete Research**, 33 (8): 1245-1249 (2003).
93. Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R., And Gül, R., "The Effects of Different Cement Dosages, Slumps and Pumice Aggregate Ratios on the Thermal Conductivity and Densities of Concrete", **Cement and Concrete Research**, 34 (5): 845-848 (2004).

94. Kılıç, A., Atış, C. D., Yaşar, E. And Özcan, F., "High-Strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures", ***Cement and Concrete Research***, 33 (10): 1595-1599 (2004).
95. Demirboğa, R., "Silis Dumanı ve Uçucu Külün Perlit ve Pomza ile Üretilen Hafif Beton Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, ***Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Erzurum (1999).
96. TS EN 197-1, "Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara (2002).
97. İnternet: 2004 yılı iç satışlarının cinslerine göre dağılımı. <http://www.tcma.org.tr/files/WEBCINS2004.xls> (2005).
98. TS 25, "Tras", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara (1975).
99. TS EN 196-1, "Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara (2002).
100. İnternet: Su Kontrol Laboratuvarı ve Ankara'da Suyun Kalitesi. <http://www.aski.gov.tr/m.asp?tid=48&pn=1&tpn=1> (2004).
101. TS 639, "Uçucu küller", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara (1975).
102. ASTM C 595-02, "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
103. ASTM C 109/C 109M-01, "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or 50-mm Cube Specimens)", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
104. ASTM C 150-02, "Specification for Portland Cement", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
105. TS EN 196-2, "Çimento deney metotları-Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara (2002).
106. TS EN 196-3, "Çimento deney metotları-Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara (2002).
107. TS EN 196-6, "Çimento deney metotları-Bölüm 6: İncelik tayini", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara (2002).
108. ASTM C 188-95, "Test Method for Density of Hydraulic Cement", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).

109. ASTM C 151-00, "Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
110. ASTM C 1437-01, "Standart test method for flow of hydraulic cement mortar", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
111. ASTM C 348-97, "Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
112. ASTM C 349-97, "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
113. TS 3322, "Çimento harcı ve beton numunelerinde boy değişim tayini", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara (1979).
114. ASTM C 596-01, "Test Method for Drying Shrinkage of Mortars Containing Cement", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
115. ASTM C 1012-95a, "Test Method for Length Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
116. ASTM C 157/C 157M-99, "Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
117. ASTM C 187-98, "Test Method for Normal Consistency Hydraulic Cement", ***ASTM, Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
118. ASTM C 305-99^{E1}, "Standard Practise for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
119. ASTM C 230/C 230M-98, "Standart specification for use flow table for use in tests of hydraulic cement", ***Annual Book of ASTM Standards***, Pennsylvania (2002).
120. Yalçın, H. ve Koç, T., "Betonarme Demirlerinin Korozyonu ve Önlenmesi", ***CMS Kongre Yönetim Sistemleri Uluslar arası Organizasyon Yayıncılık Bilişim Hizmetleri Ltd. Şti***, Ankara, 90-93 (2004).

EKLER

EK-1 EPKÇ ve NPKÇ'lerin 40 mikronluk elekten geçen ve kalan kısımlarına ait kimyasal analiz sonuçları

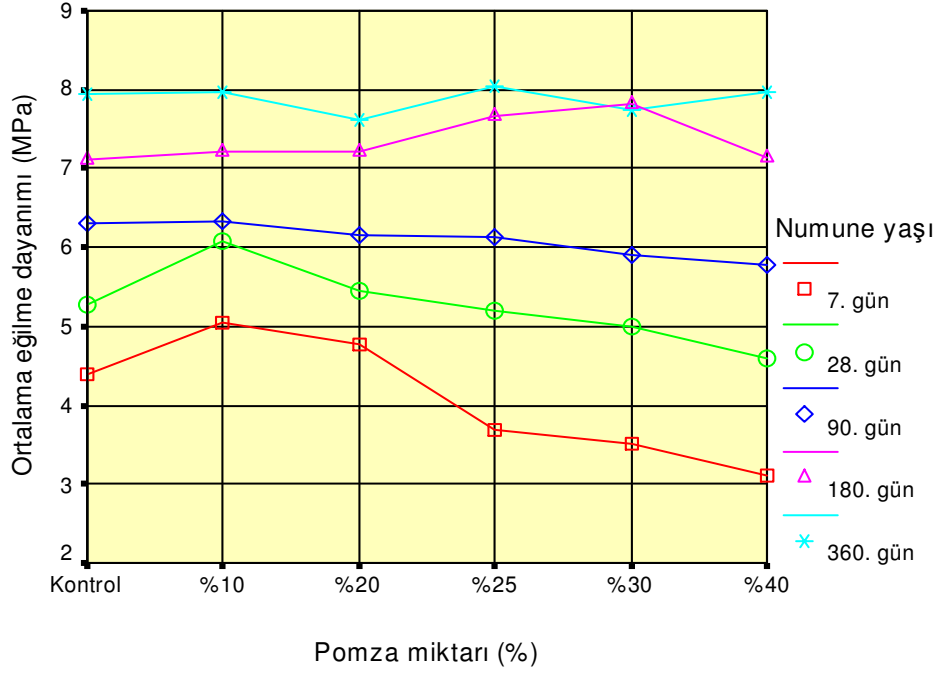
Çizelge 1.1. EPKÇ'lerin 40 µm'lik elekten geçen ve kalan kısımlarına ait kimyasal analiz sonuçları

Elem.	Klinker	Pomza	EPKÇ 10		EPKÇ 20		EPKÇ 25		EPKÇ 30		EPKÇ 40	
			ÜST	ALT	ÜST	ALT	ÜST	ALT	ÜST	ALT	ÜST	ALT
CaO	65,00	5,20	60,07	55,40	55,67	49,06	56,98	46,79	54,77	42,26	52,09	36,38
SiO ₂	20,93	58,44	22,63	24,91	25,63	29,22	25,28	30,91	25,44	33,48	28,07	37,74
Al ₂ O ₃	5,71	15,96	6,29	6,46	7,04	7,62	7,14	8,16	7,28	8,73	8,02	9,80
Fe ₂ O ₃	3,39	4,69	3,53	3,32	3,65	3,51	3,86	3,57	4,02	3,64	4,21	3,81
MgO	1,80	6,30	2,10	1,89	2,21	2,03	2,44	2,09	2,71	2,22	3,07	2,30
SO ₃	0,85	0,04	2,01	3,53	2,19	3,29	1,80	3,51	1,66	3,36	1,70	3,25
K ₂ O	0,69	2,64	0,71	1,09	0,84	1,29	0,72	1,38	0,75	1,53	0,72	1,77
Na ₂ O	0,64	4,39	0,89	0,86	0,78	1,02	0,94	1,29	0,88	1,32	1,02	1,53

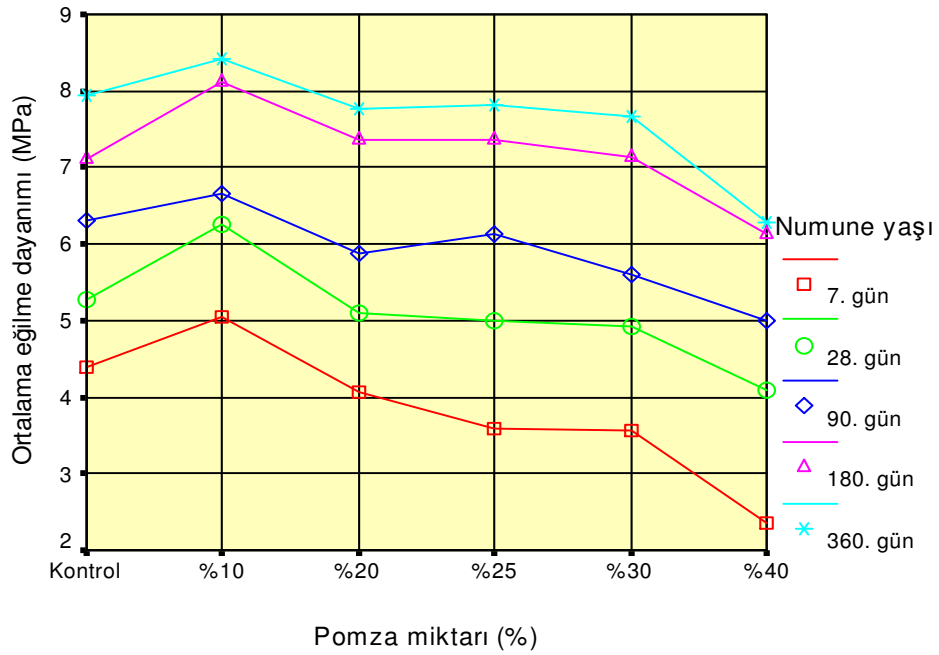
Çizelge 1.2. NPKÇ'lerin 40 µm'lik elekten geçen ve kalan kısımlarına ait kimyasal analiz sonuçları

Elem.	Klinker	Pomza	NPKÇ 10		NPKÇ 20		NPKÇ 25		NPKÇ 30		NPKÇ 40	
			ÜST	ALT	ÜST	ALT	ÜST	ALT	ÜST	ALT	ÜST	ALT
CaO	65,00	0,76	62,26	55,49	52,44	48,72	59,38	48,66	55,29	41,75	52,84	34,37
SiO ₂	20,93	71,93	22,98	25,73	29,03	31,57	25,27	29,86	28,37	37,27	30,06	43,54
Al ₂ O ₃	5,71	13,14	6,05	6,02	6,61	6,81	6,45	6,59	6,73	7,55	6,94	8,42
Fe ₂ O ₃	3,39	1,07	3,36	2,83	2,87	2,63	3,30	2,67	3,07	2,39	2,99	2,15
MgO	1,80	0,73	1,78	1,64	1,63	1,61	1,87	1,63	1,74	1,55	1,71	1,52
SO ₃	0,85	0,02	1,90	3,72	2,82	3,27	1,61	4,06	1,79	3,18	1,66	3,06
K ₂ O	0,69	4,42	0,74	1,24	1,37	1,63	0,89	1,57	1,14	2,04	1,24	2,54
Na ₂ O	0,64	4,10	0,88	0,96	0,89	1,01	0,91	1,16	0,97	1,17	0,99	1,31

EK-2 PKÇ ve POİÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı grafikleri

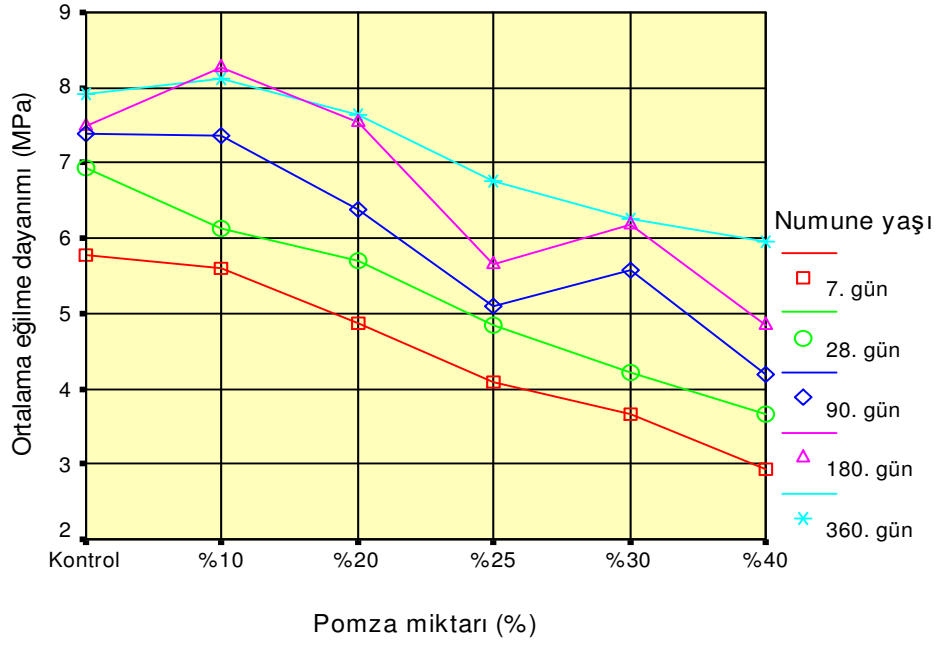


Şekil 2.1. EPKÇ'lere ait ortalama eğilmede çekme dayanımı - pomza katkı oranı ilişkisi

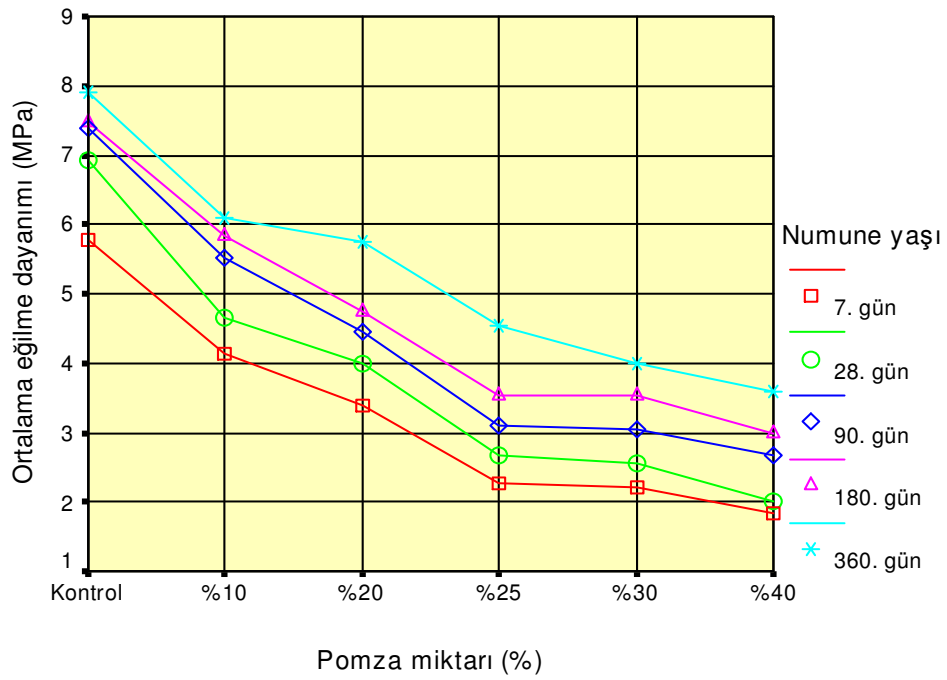


Şekil 2.2. NPKÇ'lere ait ortalama eğilmede çekme dayanımı - pomza katkı oranı ilişkisi

EK-2 (Devam) PKÇ ve POİÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı grafikleri

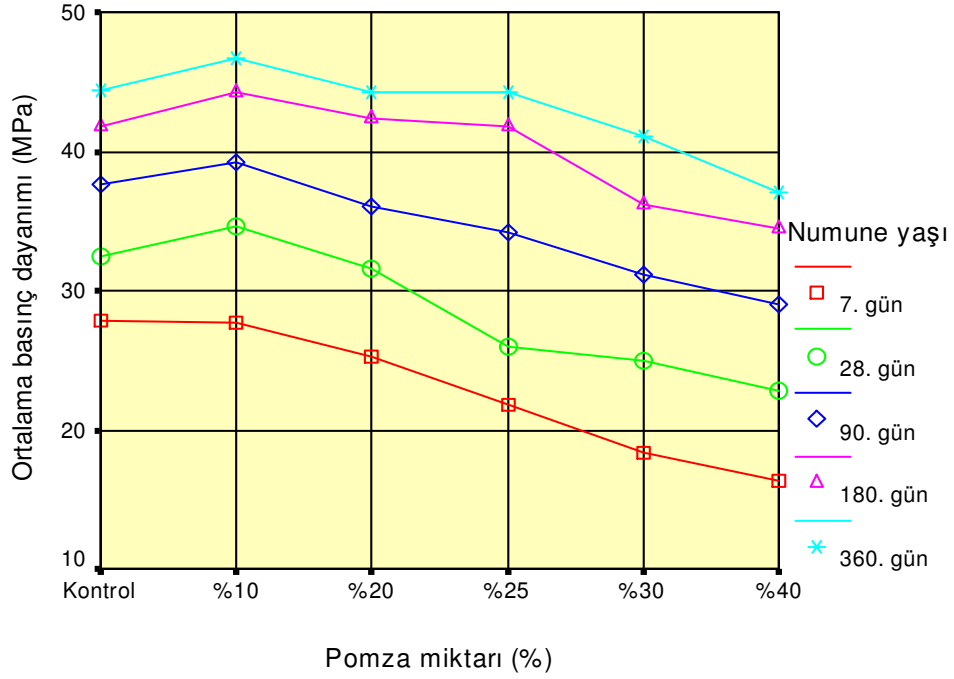


Şekil 2.3. EPOİÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı–pomza katkı oranı ilişkisi

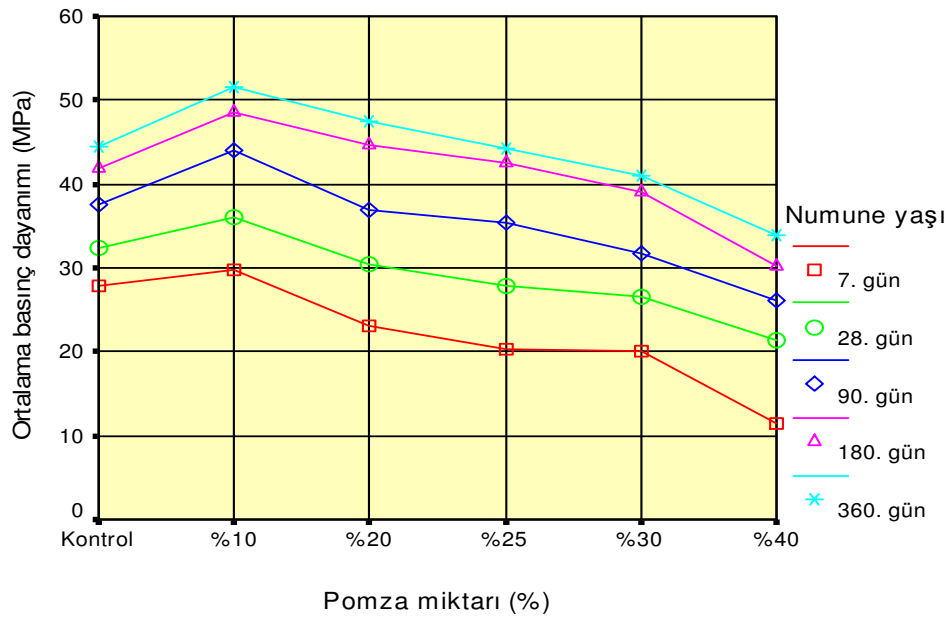


Şekil 2.4. NPOİÇ'lere ait eğilmede çekme dayanımı–pomza katkı oranı ilişkisi

EK-3 PKÇ ve POİÇ'lere ait basınç dayanımı grafikleri

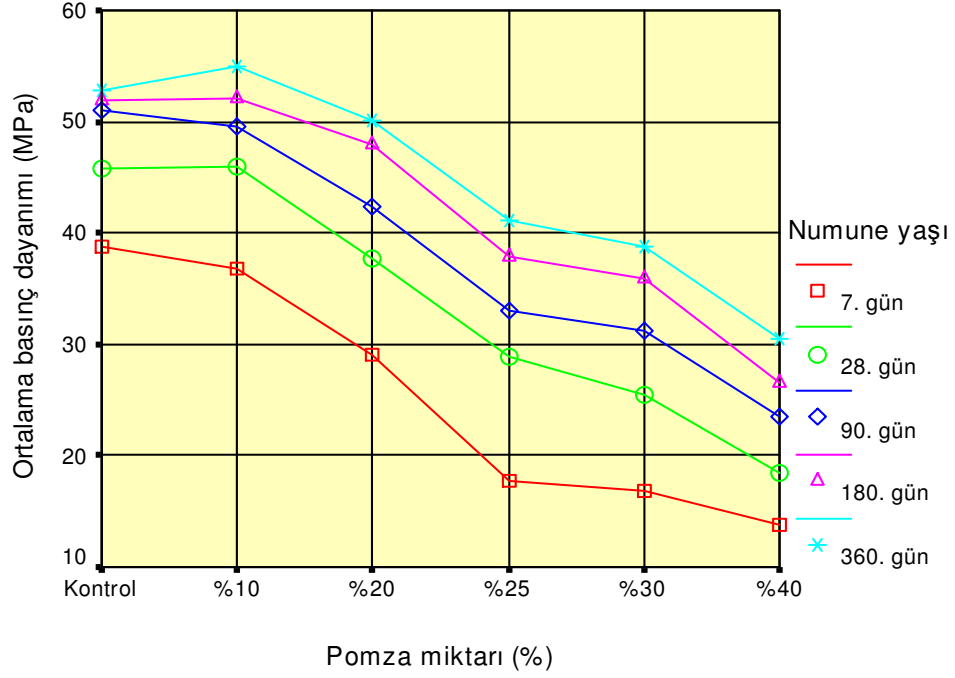


Şekil 3.1. EPKÇ'lere ait ortalama basınç dayanımı - pomza katkı oranı ilişkisi

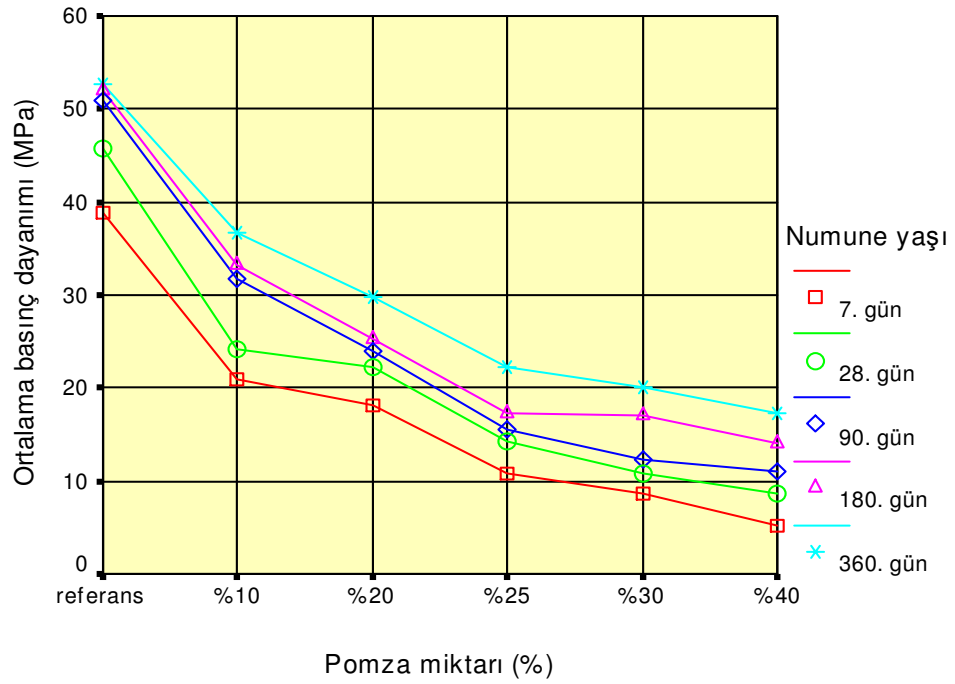


Şekil 3.2. NPKÇ'lere ait ortalama basınç dayanımı - pomza katkı oranı ilişkisi

EK-3 (Devam) PKÇ ve POİÇ'lere ait basınç dayanımı grafikleri



Şekil 3.3. EPOİÇ'lere ait ortalama basınç dayanımı - pomza katkı oranı ilişkisi



Şekil 3.4. NPOİÇ'lere ait ortalama basınç dayanımı - pomza katkı oranı ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ

1970’de Sivas, Kangal’da doğdu. İlkokulu Gürün’de, ortaokulu ve liseyi Sivas’ta bitirdi. Yüksek öğrenimine, 1989-1990 öğretim yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde başladı. Lisans öğrenimini 1994 yılında tamamladıktan sonra, Alsim Alarko A.Ş.’de Saha Mühendisi, Cowi-Temat Konsorsiyum’unda Kontrol Mühendisi olarak çalıştı. 1997’de G.Ü.T.E.F. Yapı Eğitimi Bölümü’nde başladığı Yüksek Lisans çalışmasını 1999 yılında tamamlamıştır. 1996-2003 yılları arasında Atatürk Üniversitesi E.M.Y.O’da Öğretim Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2003’te Doktora çalışmalarını tamamlamak üzere YÖK tarafından, 2547 sayılı kanunun 35. maddesi gereğince, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı’nda görevlendirildi. Evli ve 3 çocuk babasıdır.