

Proje No: 104M393

Doğal Zeolitlerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı

Doç. Dr. Lutfullah TURANLI
Prof. Dr. Hayrettin YÜCEL
Prof. Dr. M. Cemal GÖNCÜOğLU
Prof. Dr. Ali ÇULFAZ
Araş. Gör. Burak UZAL

EKİM, 2007

ANKARA

ÖNSÖZ

Birçok endüstriyel alanda kullanılan doğal zeolitlerin önemli kullanım alanlarından birisi olan inşaat endüstrisinde kullanımları son yıllarda hem çeşitlilik hem de yaygınlık açısından önemli gelişmeler göstermektedir. Önceleri sadece kesme taş olarak inşaat endüstrisinde kullanılan doğal zeolitlerin, şimdilerde çimento/beton endüstrisinde mineral katkı maddesi olarak ve hafif yapı malzemeleri üretiminde agrega olarak kullanımları daha çok ön plana çıkmaya başlamıştır. Türkiye’deki ve dünyadaki doğal zeolitlerin çimento/beton mineral katkı maddesi olarak kullanımları konusunda kısıtlı teknik veri bulunmakta ve bu durum doğal zeolitlerin çimento/beton endüstrisinde kullanımlarının yaygınlaşmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Oldukça zengin doğal zeolit rezervlerine sahip olan Türkiye’de üretim ve tüketimleri çok düşük düzeyde kalan doğal zeolitlerin, bir çok avantaj sağlayacak şekilde çimento/beton endüstrisinde büyük miktarlarda kullanılarak ekonomiye kazandırılmaları, bu konularda endüstriye ışık tutacak teknik verilerin sağlanmasına bağlıdır. Bu nedenle bu proje raporunda sunulan, Türkiye’deki iki büyük doğal zeolit rezervinden temin edilen doğal zeolitlerin çimento ve beton karışımlarında mineral katkı malzemesi olarak ve hafif agrega olarak kullanımlarına yönelik teknik bilgiler önem taşımaktadır. Proje kapsamında ulaşılan sonuçların, Türkiye’deki doğal zeolitlerin hem sözü edilen endüstrilerde yaygın kullanımları için, hem de bu konularda yapılacak daha ileri araştırmalar için temel teşkil edeceği düşünülmektedir.

ÖZ

İnşaat sektöründe önceleri boyutlandırılmış yapı taşı olarak kullanılan doğal zeolitlerin , son yıllarda çimento/betonda ilave bağlayıcı katkı malzemesi olarak ve bunun yanı sıra hafif agrega olarak kullanımı daha yaygın hale gelmeye başlamıştır. Öte yandan doğal zeolit içeren çimento ve beton sistemlerinin hidratastonu ve özellikleri konusunda literatürde kısıtlı bilgi bulunmaktadır. Özellikle Türkiye'deki başlıca doğal zeolit rezervlerine ait malzemeleri içeren çimento ve beton sistemleri konusunda sistematik bilgi bulunmamaktadır.

Bu projede, Türkiye'deki doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımının yaygınlaştırılması amacıyla, Türkiye doğal zeolitlerinin puzolanik katkı maddesi olarak çimento-beton endüstrisinde ve hafif yapı malzemeleri üretiminde hafif agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılarak bu konuda uygulama için gerekli bilimsel verilerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; öncelikle Türkiye'deki başlıca iki doğal zeolit rezervinden (Manisa/Gördes, Balıkesir/Bigadiç) temin edilen doğal zeolitlerin karakterizasyonu yapılmış ardından bu malzemelerin puzolanik aktiviteleri, değişik (düşük, orta, ve yüksek) miktarlarda doğal zeolit içeren katkılı çimentoların ve beton karışımlarının özellikleri tespit edilerek değerlendirilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin hafif agrega olarak kullanımlarına yönelik özellikleri de tespit edilerek değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda; çalışmalarda kullanılan Gördes ve Bigadiç doğal zeolitlerinin önemli düzeyde puzolanik aktivite gösterdikleri ve bu durumun muhtemelen onların reaktif SiO₂ içerikleriyle ve yüksek BET yüzey alanlarıyla ilişkili olduğu; doğal zeolit katkılı portland çimentolarının normal portland çimentosuna kıyasla daha hızlı ilk ve son priz süreleri gösterdikleri ve bu durumun doğal zeolitlerin yüksek BET yüzey alanlarının bir sonucu olarak ortaya çıktığı; doğal zeolit ikamesinin çimento hamurlarının gözenek boyut dağılımını küçülttüğü ve bunun sonucunda çimento hamurlarının basınç dayanımı ve geçirimsizliğini artırdığı; doğal zeolitler sayesinde sadece 180 kg/m³ portland çimentosu

dozajı kullanılarak 7 günlük basınç dayanımı 25 MPa, 28 günlük basınç dayanımı ise 45-50 MPa düzeyinde olan beton karışımları hazırlanabildiği ve bu beton karışımlarının klor-iyonu geçirgenliklerinin çok düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Gördes doğal zeolitinin temel fiziksel özellikleri açısından hafif agrega olarak kullanılabilereği ancak alkali-silika reaktivitesi açısından, hızlandırılmış metot ile test edildiğinde güvenli görünmesine rağmen bu konuda tedbirli olunması gerektiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton, Doğal Puzolan, Hafif Agregas, Katkılı imento, Puzolanik Aktivite, Zeolitler

ABSTRACT

Use of natural zeolites as supplementary cementing material and lightweight aggregate in building industry has become popular in recent years, which are previously utilized as only dimension stone. On the other hand, there are limited information on properties and hydration of cement and concrete systems containing natural zeolites in published literature. Specifically, there are no systematical information on cementitious systems containing natural zeolites from major zeolite deposits in Turkey.

In this project, in order to promote the widespread use of Turkish natural zeolites in building industry, it was aimed to investigate the potential use of Turkish natural zeolites as pozzolanic admixture in cement/concrete industry and as a lightweight aggregate in production of lightweight materials of construction. For these purposes, a detailed characterization of natural zeolites obtained from two major deposits (Manisa/Gördes, Balıkesir/Bigadiç) in Turkey was made and then their pozzolanic activity as well as the properties of blended cements and concretes containing various amounts of zeolites were determined. In addition, the properties of the natural zeolites as lightweight aggregate were also determined.

Experimental studies indicated that the following conclusions; Gördes and Bigadiç zeolites used in the study exhibited considerable pozzolanic activity probably as a result of their reactive SiO₂ contents and relatively high BET surface area; natural zeolite blended cements showed faster initial and final setting time when compared to ordinary portland cement, which is associated with high BET surface area of natural zeolites; natural zeolite replacement refined the pore size distribution of cement pastes and therefore improves their strength and impermeability; use of natural zeolites provided a concrete mixture, made with only 180 kg/m³ portland cement dosage, having 7-day compressive strength of 25 MPa, 28-day compressive strength of 45-50 MPa, very low chloride-ion permeability. In addition, it was

also determined that Gördes zeolite is proper to use as lightweight aggregate in terms of physical properties, however, it should be taken preventive precautions against alkali-silica reaction in spite of the fact that it appears safe when tested with the accelerated method.

Keywords: Blended Cement, Concrete, Lightweight Aggregate, Natural Pozzolan, Pozzolanic Activity, Zeolites

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
ÖZ.....	iii
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
BÖLÜM	
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel.....	1
1.2 Amaç ve Kapsam.....	3
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	7
2.1 Zeolitik Tüflerin Puzolanik Aktivitesi ve Yardımcı Bağlayıcı Malzeme Olarak Kullanımı.....	7
2.2 Zeolitik Tüflerin Hafif Yapı Malzemelerinde Kullanımı.....	8
3. GEREÇ ve YÖNTEM.....	11
3.1 Malzemeler.....	11
3.1.1 Doğal Zeolitler.....	11
3.1.2 Diğer Puzolanik Malzemeler.....	12
3.1.3 Portland Çimentosu (PÇ).....	12
3.1.4 Süper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Maddesi.....	13
3.1.5 Sönmüş Kireç (Ca(OH) ₂).....	14
3.1.6 Agregalar.....	14
3.2 Yöntemler.....	15
3.2.1 Kimyasal ve Mineralojik/Petrografik Karakterizasyon.....	15
3.2.2 Puzolanik Aktivite Değerlendirmesi için Kullanılan Yöntemler.....	16

3.2.2.1 Portland Çimentosu ile Dayanım Aktivite İndeksi.....	17
3.2.2.2 Termal Analiz Yöntemiyle Ca(OH) ₂ Tüketiminin Ölçülmesi.....	17
3.2.2.3 Elektriksel İletkenlik Ölçümü Yoluyla Puzolanik Aktivite Değerlendirmesi.....	18
3.2.2.4 Kireç-Puzolan Hamurlarının Basınç Dayanımları.....	19
3.2.2.5 Kireç-Puzolan Hamurlarının Gözenek Boyut Dağılımı.....	19
3.2.3 Zeolit Katkılı Çimento Hamurları ve Harçları Üzerinde Gerçekleştirilen Testler.....	20
3.2.3.1 Normal Kıvam ve Priz Süresi.....	22
3.2.3.2 Çimento Hamurlarının Serbest Ca(OH) ₂ İçerikleri.....	22
3.2.3.3 Sertleşmiş Hamurların XRD Analizleri.....	22
3.2.3.4 Sertleşmiş Hamurların Gözenek Boyut Dağılımı Analizi.....	23
3.2.3.5 SEM/EDX İncelemeleri.....	23
3.2.3.6 Harçların Akışkanlaştırıcı İhtiyaçları ve Basınç Dayanımları.....	23
3.2.4 Öğütülmüş Doğal Zeolit İçeren Beton Karışımları.....	23
3.2.4.1 Beton Karışım Oranları.....	25
3.2.4.2. Numuneler ve Saklama Koşulları.....	26
3.2.4.3. Deneysel Yöntemler.....	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	28
4.1 Doğal Zeolitlerin Karakterizasyonu.....	28
4.1.1 Jeokimyasal Özellikler.....	28
4.1.2 Doğal Zeolit Örneklerinin Mineralojik/Petrografik Analizleri.....	32
4.1.2.1 Mineralojik-Petrografik Özellikler.....	32
4.1.2.2 X-Işınları Difraktometresi Özellikleri.....	38
4.1.3 Doğal Zeolitlerin Morfolojik Özellikleri.....	39
4.1.4 İnce Öğütülmüş Doğal Zeolitlerin Fiziksel Özellikleri.....	41
4.2 Diğer Puzolanik Malzemelerin Karakterizasyonu.....	43
4.2.1 Kimyasal Kompozisyon.....	43
4.2.2 XRD Analizleri.....	46
4.2.3 Fiziksel Özellikler ve Reaktif SiO ₂ İçeriği.....	50
4.3 Puzolanik Aktivite.....	52
4.3.1 Portland Çimentosu ile Dayanım Aktivite İndeksi.....	52

4.3.2	Ca(OH) ₂	ile	
Reaktivite.....			54
4.3.3 Elektriksel İletkenlik Ölçümü Yoluyla Puzolanik Aktivite Değerlendirmesi.....			59
4.3.4 Kireç-Puzolan Hamurlarının Basınç Dayanımları.....			63
4.3.5 Kireç-Puzolan Hamurlarının Gözenek Boyut Dağılımları.....			65
4.3.6 Doğal Zeolitlerin Puzolanik Aktivitesi Konusunda Özet Değerlendirme...			67
4.4 Doğal Zeolit Katkılı Portland Çimentoları.....			69
4.4.1 Normal Kıvam ve Priz Süreleri.....			69
4.4.2 Doğal Zeolit Katkılı Portland Çimentosu Hamurlarındaki Ca(OH) ₂ Miktarları.....			70
4.4.3 Çimento Hamurlarının Gözenek Boyut Dağılımları.....			72
4.4.4 Çimento Hamurlarının XRD İncelemeleri.....			74
4.4.5 Sertleşmiş Çimento Hamurlarının Mikro Yapısı (BS-SEM İncelemeleri).			80
4.4.6 Akışkanlaştırıcı İhtiyaçları.....			86
4.4.7 Katkılı Çimento Harçlarının Basınç Dayanımları.....			87
4.5 Öğütülmüş Doğal Zeolit İçeren Beton Karışımlarının Özellikleri.....			92
4.5.1 Taze Beton Özellikleri.....			92
4.5.2. Sertleşmiş beton özellikleri.....			94
4.6 Doğal Zeolitlerin Hafif Agrega Olarak Kullanımı.....			97
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....			101
KAYNAKLAR.....			104
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU.....			109

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Temin edilen doğal zeolit örnekleri ve miktarları.....	11
Tablo 3.2 Diğer puzolanik malzemeler.....	12
Tablo 3.3 PÇ'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri.....	13
Tablo 3.4 Agregta gruplarının tane boyut dağılımı verileri.....	15
Tablo 3.5 Kireç-Puzolan pastalarının karışım oranları.....	17
Tablo 3.6 Katkılı çimentoların etiket isimleri ve açıklamaları.....	21
Tablo 3.7 Beton karışım oranları (SDYK durumdaki agregta için).....	26
Tablo 4.1 Doğal zeolit örneklerinin kimyasal kompozisyonları (MTA, XRF ile ölçülen).....	29
Tablo 4.2. Doğal zeolit örneklerinin kimyasal kompozisyonları (ICP Metodu ile ölçülen).....	29
Tablo 4.3 Doğal zeolit örneklerinin iz ve nadir toprak element içerikleri.....	30
Tablo 4.4 Doğal zeolitlerin reaktif SiO ₂ içerikleri.....	32
Tablo 4.5 Öğütülmüş doğal zeolit örneklerinin özgül ağırlık ve Blaine incelik değerleri.....	42
Tablo 4.6 GZ-80 ve BZ-80'nin fiziksel özellikleri.....	43
Tablo 4.7 Diğer puzolanik malzemelerin kimyasal kompozisyonları (Yaş analiz).....	44
Tablo 4.8 Diğer puzolanik malzemelerin kimyasal kompozisyonları (ACME, ICP-MS Metodu ile ölçülen).....	45
Tablo 4.9 Diğer puzolanik malzemelerin iz ve NTE kompozisyonları (ACME, ICP-MS Metodu ile ölçülen).....	45
Tablo 4.10 Diğer puzolanik malzemelerin temel fiziksel özellikleri.....	50
Tablo 4.11 Seçilmiş puzolanik malzemelerin özellikleri.....	51
Tablo 4.12 Mineral katkı malzemelerinin dayanım aktivite indeksleri (ASTM C 311).	52
Tablo 4.13 Seçilen puzolanik malzemelerin özellikleri.....	55
Tablo 4.14. Çimentoların normal kıvam ve su/bağlayıcı oranları.....	69

Tablo 4.15 Çimento hamurlarının Ca(OH)_2 içerikleri (kızdırılmış numune ağırlığı bazında).....	71
Tablo 4.16 Zeolit katkılı çimento harçlarının akışkanlaştırıcı ihtiyaçları.....	87
Tablo 4.17 Harçların basınç dayanımları.....	88
Tablo 4.18 Taze beton özellikleri.....	92
Tablo 4.19 Beton karışımlarının basınç ve yardama-çekme dayanımları.....	94
Tablo 4.20. Gördes zeoliti agregalarının fiziksel özellikleri.....	98

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 PÇ'nin tane boyut dağılımı (lazer kırınım yöntemi).....	14
Şekil 3.2 Elektriksel iletkenlik ölçüm düzeneği.....	19
Şekil 4.1 Big-A örneği polarizan mikroskop görüntüsü.....	34
Şekil 4.2 Big-B örneği polarizan mikroskop görüntüsü.....	34
Şekil 4.3 Big-B örneği polarizan mikroskop görüntüsü.....	35
Şekil 4.4 Big-B örneği polarizan mikroskop görüntüsü.....	35
Şekil 4.5 GZ feslik tuf örneği polarizan mikroskop görüntüsü.....	36
Şekil 4.6 GZ feslik tuf örneği polarizan mikroskop görüntüsü.....	37
Şekil 4.7 GZ feslik tuf örneği polarizan mikroskop görüntüsü.....	37
Şekil 4.8 GZ feslik tuf örneği polarizan mikroskop görüntüsü.....	38
Şekil 4.9. Doğal zeolit örneklerinin XRD kırınım desenleri.....	39
Şekil 4.10 Gördes zeoliti örneğinin SEM görüntüsü (öğütülmeden önce).....	40
Şekil 4.11 Bigadiç zeoliti örneğinin SEM görüntüsü (öğütülmeden önce).....	41
Şekil 4.12 GZ-80 ve BZ-80'nin tane boyut dağılımları.....	43
Şekil 4.13. AP doğal puzolanik malzemesinin XRD deseni ve tanımlanmış fazları.....	47
Şekil 4.14 BP doğal puzolanik malzemesinin XRD deseni ve tanımlanmış fazları.....	47
Şekil 4.15 SUK (Sugözü Uçucu Külü) uçucu külünün XRD deseni ve tanımlanmış fazları.....	48
Şekil 4.16 ÇTUK (Çatalağzı Uçucu Külü) uçucu külünün XRD deseni ve tanımlanmış fazları.....	48
Şekil 4.17 USD (Yoğunlaştırılmamış Silis Dumanı) silis dumanının XRD deseni.....	49
Şekil 4.18 ÇYUK (Çayırhan Uçucu Külü) uçucu küline ait XRD kırınım deseni ve tanımlanmış fazları.....	49
Şekil 4.19 Seçilmiş puzolanik malzemelerin tane boyut dağılımı eğrileri.....	51
Şekil 4.20 Seçilen puzolanik malzemelerin tane boyut dağılımları.....	55
Şekil 4.21 Puzolanik malzemelerin Ca(OH) ₂ tüketimleri.....	57

Şekil 4.22 Puzolanik malzemelerin reaktif SiO ₂ içeriği ve Ca(OH) ₂ tüketimleri arasındaki ilişki.....	58
Şekil 4.23 GZ80-kireç-su siteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri.....	59
Şekil 4.24 BZ80-kireç-su siteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri.....	60
Şekil 4.25 SUK-kireç-su siteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri.....	60
Şekil 4.26 SD-kireç-su siteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri.....	61
Şekil 4.27 BT80-kireç-su siteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri.....	61
Şekil 4.28 Kireç-puzolan-su sistemlerinin net rölatif iletkenlik-zaman grafikleri.....	62
Şekil 4.29 Kireç-Puzolan hamurlarının basınç dayanımları.....	63
Şekil 4.30 Kireç-zeolit hamurlarının kırılmış yüzeylerinin dijital fotoğrafları.....	64
Şekil 4.31 Kireç-puzolan hamurlarının gözenek boyut dağılımları (28 günlük).....	66
Şekil 4.32 Gözeneklilik-basınç dayanımı ilişkisi.....	67
Şekil 4.33 Çimento hamurlarının gözenek boyut dağılımları.....	73
Şekil 4.34 PÇ hamurunun XRD desenleri.....	75
Şekil 4.35 GZ15 hamurunun XRD desenleri.....	76
Şekil 4.36 GZ55 hamurunun XRD desenleri.....	77
Şekil 4.37 BZ15 hamurunun XRD desenleri.....	78
Şekil 4.38 BZ55 hamurunun XRD desenleri.....	79
Şekil 4.39 PÇ hamurunun BS-SEM fotoğrafı (28 günlük).....	80
Şekil 4.40 PÇ hamurundaki hidrate olmamış çimento taneciğinin ortasından alınan EDX analizi.....	82
Şekil 4.41 GZ15 çimento hamurunun BS-SEM fotoğrafı.....	82
Şekil 4.42 Reaksiyona girmemiş zeolit taneciği ve EDX analizi.....	81
Şekil 4.43 GZ55 hamurunun BS-SEM fotoğrafı (Z: reaksiyona girmemiş zeolit tanecikleri).....	83
Şekil 4.44 GZ55 hamuru içerisinde bir zeolit taneciği (x4000 büyütme).....	83
Şekil 4.45 A ve B noktalarında gerçekleştirilen EDX analizleri.....	84
Şekil 4.46 BZ15 çimento hamurunun BS-SEM fotoğrafı.....	85
Şekil 4.47 BZ55 çimento hamurunun BS-SEM fotoğrafı.....	86

Şekil 4.48 Melamin bazlı kimyasal katkı ile hazırlanan çimento harçlarında, çimentodaki Gördes zeoliti oranının basınç dayanımlarına etkisi (Kirece doygun suda kür).....	89
Şekil 4.49 Melamin bazlı kimyasal katkı ile hazırlanan çimento harçlarında, çimentodaki Gördes zeoliti oranının basınç dayanımlarına etkisi (%99 Bağıl nem ortamında kür).....	90
Şekil 4.50 Melamin bazlı kimyasal katkı ile hazırlanan çimento harçlarında, çimentodaki Bigadiç zeoliti oranının basınç dayanımlarına etkisi (Kirece doygun suda kür).....	90
Şekil 4.51 Melamin bazlı kimyasal katkı ile hazırlanan çimento harçlarında, çimentodaki Bigadiç zeoliti oranının basınç dayanımlarına etkisi (%99 Bağıl nem ortamında kür).....	91
Şekil 4.52 Beton karışımlarının elastiklik modülü değerleri.....	96
Şekil 4.53 Beton karışımlarının klor iyon geçirgenlikleri.....	97
Şekil 4.54. Gördes zeoliti agregalarının elek analiz sonuçları.....	98
Şekil 4.55 Alkali-silika reaksiyonu kaynaklı genleşme (ASTM C 1260 yöntemi).....	99

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Genel

Kristal yapılı yapay yada doğal sulu alüminyum silikat bileşikleri olarak tanımlanan doğal zeolitlerden günümüzde bir çok alanda yararlanılmaktadır. Katalizör, adsorblayıcı ve iyon değiştirici olarak kimya endüstrisinde kullanılan yapay zeolitlerin yanı sıra, henüz yapay zeolitler kadar gelişmiş uygulama alanları bulamamış olan doğal zeolitler ise hafif yapı taşı ve puzolanik çimento katkı maddesi olarak inşaat endüstrisinde, katkı maddesi olarak kağıt sanayinde, toprak düzenleyici ve gübre katkı maddesi olarak tarım sektöründe kullanılmaktadır [YÜCEL, 1987].

Zeolitik tüfler tarih öncesi çağlardan buyana çoğunlukla yapı taşı olarak inşaat alanında kullanıla gelmiştir. Ancak son yıllarda hafif agrega ve çimento katkı malzemesi olarak kullanımı ön plana çıkmaya başlamıştır.

Doğal zeolitlerin çimento katkı malzemesi olarak kullanımı konusundaki bilgiler diğer kullanımlara göre kısıtlıdır. Bunun sebebi zeolitik tüflerin puzolanik malzeme olarak kullanımlarının, camsı yapılı doğal puzolanlar, uçucu kül, silis dumanı vb. diğer mineral katkı malzemelerine kıyasla daha yeni oluşları ve sadece diğer puzolanların kullanılabilirliğinin kısıtlı olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılmalarıdır. Örneğin Çin’de yıllık bazda üretilen mineral katkılı çimentoların yaklaşık 3’te 1’i, %10-%30 oranında doğal zeolit katkısı ile üretilmektedir. Ayrıca Bulgaristan, Küba, Almanya, Ürdün, Rusya, ABD ve Yugoslavya doğal zeolitlerin çimento katkı maddesi olarak kullanıldığı diğer ülkelerdir [COLELLA ve diğerleri, 2001]. Türkiye’de ise doğal zeolitler çimento endüstrisinde sadece işletilmekte olan birkaç madene yakın çimento fabrikasında (Ege bölgesi) doğal puzolan olarak (tras adı

altında) kullanılmaktadır. Bu tür bir kullanımda zeolitin karakteristik özellikleri detaylı olarak incelenmemekte ve bu özelliklerinin geniş kapsamda çimento ve beton özellikleri üzerindeki olumlu veya olumsuz etkileri ile diğer puzolanik malzemelerle benzerlik ve farklılıkları tam olarak bilinmemektedir.

Çimento ve betonda yardımcı bağlayıcı malzemelerin kullanımı son günlerde geçmişte olduğundan daha büyük bir önem kazanmıştır. Bu önem yardımcı bağlayıcı malzemelerin kullanımının sağladığı enerji tasarrufu ve çimento üretimi sırasında atmosfere salınan sera etkisi gazlarının azaltılmasından ileri gelmektedir. 1 ton portland çimentosu üretimi sırasında, bir kısmı ham maddelerin kalsinasyonundan bir kısmı ise kullanılan fosil yakıtlarında kaynaklanan yaklaşık 1 ton CO₂ gazı atmosfere salınmaktadır. Dünyadaki toplam CO₂ gazı emisyonunun yaklaşık %7'sinin çimento endüstrisinden kaynaklandığı bilinmektedir [News, 1997]. Dolayısıyla inşaat sektörü için gerekli çimento üretimi azaltmaksızın portland çimentosu klinkeri üretiminin azaltılabilmesi, belirli miktarlarda yardımcı bağlayıcı malzeme içeren katkı çimentoların veya beton karışımlarının yaygın olarak kullanımıyla sağlanabilecektir. İlave bağlayıcı malzemelerin çimento veya betondaki kullanım oranının mümkün olduğu kadar yüksek olmasının bahsedilen yararı artıracığı açıktır. Ancak ilave bağlayıcı malzemeler, özellikle de doğal puzolanlar, bağlayıcı sistemlerin su ihtiyacını artırdığından ve dayanım kazanma hızlarını düşürdüğünden dolayı, bu malzemelerin çimento veya betondaki kullanım miktarları sınırlı kalmaktadır. Özellikle yüksek miktarlarda yardımcı bağlayıcı malzeme içeren çimentoların veya beton karışımlarının, sadece portland çimentosu içeren sistemlere benzer mühendislik özelliklerine sahip olacak şekilde elde edilebilmeleri, kullanılan yardımcı bağlayıcı malzemenin performansına bağlıdır. Diğer yaygın kullanılan doğal puzolanlara kıyasla daha yüksek puzolanik özellik gösterdiği bilinen doğal zeolitlerin, çimento veya betonda özellikle yüksek miktarlarda kullanılabilirliklerinin araştırılması çimento endüstrisi kaynaklı sera etkisi gazlarının azaltılabilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Doğal zeolitlerin çimento esaslı hafif yapı malzemesi üretiminde hafif agrega olarak kullanımı konusunda ise; çimento-beton katkısı olarak kullanımına kıyasla daha az bilgi bulunmaktadır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Türkiye'deki doğal zeolitlerin inşaat endüstrisindeki kullanımının yaygınlaştırılması amacıyla, Türkiye doğal zeolitlerinin puzolanik katkı maddesi olarak çimento-beton endüstrisinde ve hafif yapı malzemeleri üretiminde hafif agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılarak bu konuda uygulama için gerekli bilimsel verilerin elde edilmesi, bu çalışmanın genel amacını oluşturmaktadır.

Literatürde doğal zeolitlerin katkılı çimento üretiminde kullanılması ve bu katkılı çimentoların performans özellikleri ile ilgili olarak sınırlı sayıda ulusal ve uluslararası çalışma bulunmaktadır. Ancak bazı doğal zeolitlerin veya yüksek miktarda doğal zeolit içeren tüflerin puzolanik aktivitesinin, neden zeolitik olmayan doğal puzolanlardan daha yüksek olabildiğine dair literatürde tatmin edici düzeyde açıklama bulunmamaktadır. Bu çalışmada doğal zeolitlerin puzolanik aktivitelerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri ile ilişkilendirilerek incelenip, yüksek puzolanik aktivitelerinin açıklanması amaçlanmıştır. Ayrıca doğal zeolit içeren beton karışımları için, elde edilecek betonun kullanım yerine bağlı olarak en uygun zeolit ikame oranının ne olması gerektiğine dair de literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır. Çalışmanın bu konuda da uygulamaya yönelik bilgi sağlaması amaçlanmıştır.

Doğal zeolitlerin hafif yapı malzemeleri üretiminde hafif agrega olarak kullanımını da Türkiye'de doğal zeolitlerin endüstriyel kullanımlarına yönelik yenilikçi bir yaklaşım içermektedir ve bu tür kullanım konusunda literatürde çok az bilgi bulunmaktadır.

Türkiye genelinde bir çok bölgede doğal zeolit rezervi bulunduğu bilinmekle birlikte bunlardan pek azı ticari olarak işletilmekte ve farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Bunun çeşitli sebeplerinden birisi doğal zeolitlerin özellikle iç pazar açısından tüketim alanlarının ve bu alanlarda kullanılan miktarların az oluşudur. Bu çalışmanın doğal zeolitlerin yapı malzemeleri sektöründe daha yaygın kullanımının sağlanması için gerekli teknik bilgilerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Yukarıda bahsedilen amaçların gerçekleştirilmesi için, çalışmalar beş ana başlık altında gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Temin edilen doğal zeolitlerin karakterizasyonu

- Doğal zeolitlerin puzolanik aktiviteleri
- Düşük, orta ve yüksek miktarda doğal zeolit içeren katkılı çimentoların özellikleri
- Düşük, orta ve yüksek miktarda doğal zeolit içeren beton karışımlarının özellikleri
- Doğal zeolitlerin hafif agrega olarak kullanımına yönelik özellikleri

Belirtilen her bir başlık altında gerçekleştirilen çalışmalara ait alt başlıklar aşağıda belirtilmiştir.

Çalışmada kullanılan doğal zeolitlerin karakterizasyonu

Türkiye'deki başlıca iki doğal zeolit rezervinden (Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç) temin edilerek çalışmada kullanılan doğal zeolitlerin aşağıdaki özellikleri tespit edilmiştir.

- Kimyasal kompozisyon
- Mineralojik ve petrografik analiz (X-Işını kırınım analizi ve ince kesit incelemeleri)
- Morfolojik özellikler (Tarayan elektron mikroskobu- SEM incelemeleri)

Doğal zeolitlerin puzolanik aktiviteleri:

Belirli bir inceliğe öğütülmüş doğal zeolitlerin puzolanik aktiviteleri, daha yaygın olarak kullanılan bazı mineral katkıları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle 3 farklı incelik düzeyine kadar öğütülmüş doğal zeolitlerin dayanım aktivite indeksleri (ASTM C 311), yine aynı üç incelik düzeyine kadar öğütülmüş iki farklı doğal puzolan (zeolitik olmayan) ve ayrıca üç farklı uçucu kül ve bir silis dumanının aktivite indeksleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Daha sonra seçilen bir incelik düzeyi için iki farklı doğal zeolit ve bir doğal puzolan (zeolitik olmayan) ile bir uçucu kül ve bir silis dumanı detaylı anlamda gerçekleştirilen puzolanik aktivite çalışmalarında kullanılmıştır. Bu çalışmaların kapsamı aşağıda listelenmiştir;

- Sertleşmiş Ca(OH)_2 – puzolan pastalarının belirli yaşlardaki Ca(OH)_2 miktarlarının thermo-gravimetrik analiz yöntemiyle ölçülerek, Ca(OH)_2 tüketim miktarının belirlenmesi,
- Ca(OH)_2 – deionize su karışımının içerisine belirli miktarda puzolanik malzeme eklendikten sonra, karışımın elektriksel iletkenlik değerinde meydana gelen değişimin ölçülmesi,

- Sertleşmiş Ca(OH)_2 – puzolan pastalarının belirli yaşlardaki basınç dayanımlarının ölçülmesi,

Doğal zeolit içeren katkılı çimentolar

Portland çimentosunun düşük, orta ve yüksek miktarlarda (ağırlıkça %15, %35 ve %55) ince öğütülmüş doğal zeolit ile yer değiştirilmesi (ikamesi) sonucunda elde edilen katkılı çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri ile bazı hidrasyon özellikleri normal portland çimentosu ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmalarda, karakterizasyonu yapılan ve puzolanik aktiviteleri detaylı anlamda tespit edilen, ince öğütülmüş Gördes ve Bigadiç zeolitleri kullanılmıştır. Gördes ve Bigadiç zeoliti katkılı çimentolar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda listelenmiştir;

- Normal kıvam için gerekli su miktarı ve priz süreleri
- Sertleşmiş çimento hamurlarında çeşitli yaşlardaki serbest Ca(OH)_2 miktarları
- Sertleşmiş çimento hamurlarının çeşitli yaşlarda X-Işını kırınım analizleri
- Sertleşmiş çimento hamurlarının civa porozimetresi ile tespit edilmiş gözenek boyut dağılımları
- Sertleşmiş çimento hamurlarının elektron mikroskobu ve EDX (energy dispersive X-ray) incelemeleri
- Katkılı çimentoların süper akışkanlaştırıcı ihtiyaçları ve bu çimentolar ile hazırlanan harçların basınç dayanımları

Doğal zeolit içeren beton karışımları

Tipik bir beton karışımındaki portland çimentosunun düşük, orta ve yüksek miktarlarda (ağırlıkça %15, %35 ve %55) doğal zeolitle yer değiştirilmesi ile hazırlanan beton karışımlarının aşağıda listelenen özellikleri tespit edilmiştir;

- Süper akışkanlaştırıcı ihtiyacı
- Priz süreleri
- Basınç ve yarmada-çekme dayanımları
- Elastiklik modülü
- Klor-iyonu geçişine karşı direnç (ASTM C 1202)

Doğal zeolitlerin hafif agrega olarak kullanımları

Doğal zeolitlerin hafif agrega olarak kullanımlarıyla ilgili bazı fiziksel özellikleri ile, böyle bir kullanımda önemli olan alkali-silika reaktivitesi incelenmiştir. Bu çalışmalar; çeşitli tane boyut sınıflarında malzeme temin etme imkanı bulunduğundan sadece Gördes zeoliti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Gördes zeolitinin hafif agrega olarak belirlenen özellikleri aşağıda listelenmiştir;

- Elek analizi
- Kuru ve suya doygun-yüzey kuru özgül ağırlık değerleri
- Su emme oranı
- ASTM C 1260 hızlandırılmış test metoduyla potansiyel alkali-silika reaksiyonu ve bunun sonucunda oluşabilecek genleşmeler açısından değerlendirilmesi,

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Zeolitik Tüflerin Puzolanik Aktivitesi ve Yardımcı Bağlayıcı Malzeme Olarak Kullanımı

1912 yılında Kalifornia’da 386 km’lik bir su yolu inşasında kullanılan katkıli çimentoların %25 oranında zeolitik tüf içerdiği 1983 yılında yapılan araştırmalar sonucunda anlaşılmıştır ve bu zeolitik tüflerin çimento endüstrisinde en eski kullanımı olarak bilinmektedir. Daha sonra zeolitik tüfler 20. yüzyılın ilk yarısından itibaren ABD’de ve Almanya’da ticari olarak katkıli çimento üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Zeolitlerin puzolanik özelliği konusunda ki ilk araştırmaların 1960’lı yılların başında Sersale tarafından yapıldığı bilinmektedir. Sersale İtalya, Almanya ve İspanya’dan temin edilmiş zeolitleşmiş tüflerin puzolanik özelliklerini zeolitik olmayan tipik bir puzolanla, günümüzde standartlaşmış olan yöntemler kullanarak karşılaştırmıştır. Puzolanik maddelerin bağladıkları (reaksiyona girdikleri) kireç-Ca(OH)₂- miktarının ölçülmesi esasına dayanan deneysel çalışmalar sonucunda, zeolitleşmenin orijinal puzolanik malzemenin kireç bağlama kapasitesini düşürmediği, tam tersine alüminosilikat yapının reaktivitesini artırdığı bildirilmiştir [COLELLA ve diğerleri, 2001].

1985’te Sersale Portland çimentosunun farkı oranlarda zeolitik tüfle yer değiştirilmesiyle yapılan çimento harçlarının basınç dayanımlarını incelemiştir. Çalışmada %50-%80 oranında zeolit minerali içeren çeşitli İtalyan zeolitik tüfleri %40 yer değiştirme oranına kadar kullanılmış ve zeolitik olmayan bir puzolanla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda zeolitik

tüflerle yapılan harçların zeolitik olmayanlara göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu gösterilmiştir [SERSALE ve FRIGIONE, 1985].

Zeolitik tüflerin zeolitik olmayan doğal puzolanlara göre daha aktif olmaları genel olarak zeolitlerin micro-gözenekli yapısıyla ilişkilendirilmektedir[SERSALE, 1995]. Mikro-gözeneklilikten dolayı zeolitler muhtemelen difüzyon-kontrollü topokimyasal reaksiyon yoluyla ortamdaki kireçle etkin bir şekilde reaksiyona girerek bağlayıcı jeller oluşturmaktadır [DRZAJ ve diğerleri, 1978].

Çimento içerisindeki alkali oksitlerin agregada bulanabilen reaktif silis ile reaksiyona girmesi olarak tanımlanabilen alkali-silika reaksiyonun ve bu reaksiyon sonucu oluşan genişmelerin önlenmesinde/azaltılmasında doğal zeolitlerin oldukça etkin olduğu yapılan deneysel çalışmalar sonucunda gösterilmiştir[FRIGIONE, 1987, FENG ve diğerleri, 1998, UZAL ve diğerleri, 2003]. Bu etkinlik doğal zeolitlerin yüksek puzolanik aktivitesi ve alkali bağlama özellikleri ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, sodyum sülfat veya magnezyum sülfat gibi sülfat bileşiklerinin çimentolu sistemlerle teması sonucunda meydana gelen ve sertleşmiş sistemde genişleme meydana getirerek çatlamalara yol açan sülfat etkisinin de azaltılmasında, portland çimentolarına doğal zeolit ilavesinin yararlı olduğu bilinmektedir [UZAL ve diğerleri, 2003].

Doğal zeolitlerin çimento ve beton için puzolanik katkı malzemesi olarak kullanımı konusunda çok yeni bir gelişme mevcuttur. 2002 yılında Alberta/Kanada'daki iki şirket ZeoFume adını verdikleri, çok aktif ve pahalı bir mineral katkı malzemesi olan silis dumanına (silica fume) karşı daha ucuz bir alternatif olarak gösterdikleri, şabazit türü doğal zeolitin ön işleme tabi tutulmasıyla elde edilen yeni bir mineral katkı malzemesi üreteceklerini duyurmuşlardır. Bu konuda herhangi bir bilimsel yayın veya detaylı bilgi bulunmamakla birlikte, üretim ile ilgili genel proses hakkında kısa bilgiler mevcuttur. Ürün şabazitin kurutulup ısı ile işleme tabi tutulmasıyla elde edilmektedir. Şirketler yılda 5000 tonu ABD'de 4000 tonu ise Kanada'da olmak üzere toplam 9000 ton üretim hedeflemektedir [VIRTA, 2002].

2.2 Zeolitik Tüflerin Hafif Yapı Malzemelerinde Kullanımı

Perlit ve diğer camsı yapılu hidrate volkanik malzemelerde olduğu gibi, zeolitik tüflerde ısı ile işleme genişletirilerek yüksek gözenekliliğe sahip hafif malzemelere dönüştürülebilmektedir.

Perlitin geliştirilmesi için gereken sıcaklık yaklaşık 800°C iken, bu değer zeolitler için yaklaşık 1100-1200°C'dir. Öte yandan geliştirilmiş zeolit ürünleri perlit ürünlerine kıyasla daha sert ve dolayısıyla aşınmaya karşı daha dirençli olmaktadır [COLELLA ve diğerleri, 2001].

Stajanovic tarafından yapılan bir çalışma sonucunda, klinoptilolite minerali içeren doğal zeolitlerin 1200-1400 °C'de ısıtılarak uygulanarak %65 gözenekliliğe ve 0.8 g/cm³ yoğunluğa sahip hafif malzemeler elde edilmiştir. Başka bir çalışmada yılda 1500 ton mordenit içerikli doğal zeolitlerin Japonya'da yüksek asit ve alkali direncine sahip hafif tuğla (0.7-1.0 g/cm³ yoğunluklu) üretiminde kullanıldığı bildirilmiştir [COLELLA ve diğerleri, 2001].

Ayrıca doğal zeolitler hafif yapı malzemelerinde başka bir tür kullanımı da zeolitlerin ısıtılma davranışlarından ileri gelmektedir. Zeolitler 400°C ve daha fazla sıcaklıklara kadar ısıtılarak dehidrate edildiklerinde yüksek miktarda termal enerji depolayabilmektedirler. Dehidrate zeolit tozu, çimento ve su ile karıştırıldığında su absorpsiyonu sonucu önemli miktarda sıcak hava ortaya çıkmakta bu durum genişleme ve gözenekli bir malzeme oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Böyle bir kullanımda genellikle döküm sonrası malzemelere, gaz beton üretimine benzer şekilde yüksek sıcaklık ve basınç (otoklav) kürü uygulanmaktadır. Bu konuda yapılan bir çalışmada 550°C'de kalsine edilmiş klinoptilolit türü zeolit kullanılarak otoklav kürü sonucu elde edilen malzemelerin 4.7 MPa basınç dayanımına ve 0.75 g/cm³ yoğunluğa sahip oldukları tespit edilmiştir [COLELLA ve diğerleri, 2001].

1995'te Fu ve diğerleri zeolit esaslı, %25-%50 oranında, ısıtılma görmüş (400-600°C'de) doğal zeolit ve 0-5% oranında kireç içeren bir hafif beton konusunda patent almışlardır. Kullanılan doğal zeolit türü patente bahsedilmemekle birlikte, %50-80 oranında zeolit minerali içerdiği belirtilmiştir. 3-6 saatlik, 170-180 °C'de otoklav kürü sonucunda 2-10 MPa basınç dayanımına ve 0,4-1 g/cm³ yoğunluğa sahip bir ürün elde edilmiştir [COLELLA ve diğerleri, 2001].

Daha yakın tarihli bir çalışmada (1997), araştırmacılar Siberfoam adını verdikleri, klinoptilolitçe zengin bir kayacın 1120-1220°C'de geliştirilmesi ve ayrıca uygun bir gaz

oluşturucu malzeme ile birlikte kullanılarak (ağırlıkça 0,3-1% silikon karbid) elde edilen hafif bir ürün geliştirmişlerdir. Siberfoam yaklaşık 0,2-0,9 g/cm³ yoğunluğa ve yüksek basınç dayanımına sahiptir (< 18 MPa) [COLELLA ve diğerleri, 2001].

BÖLÜM 3

GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Malzemeler

3.1.1 Doğal Zeolitler

Proje önerisinde, temin edilebilmesi durumunda farklı zeolit minerali içeren örnekler kullanılmasının planlandığı belirtilmişti. Ancak gösterilen çabalara rağmen yeterli miktarda, klinoptilolit haricinde bir mineral içeren doğal zeolit örneği temin edilememiştir. Bu yüzden çalışmalar Gördes ve Bigadiç yöreleri olmak üzere iki farklı lokasyondan temin edilen doğal zeolit örnekleri üzerinde gerçekleştirilmektedir.

Projede kullanılmak üzere; Gördes bölgesinde faaliyet gösteren Enli Madencilik San. Ve Tic. A.Ş.'den 4 farklı tane boyutu fraksiyonunda Tablo 1'de belirtilen miktarlarda doğal zeolit örneği laboratuvarımıza getirtilmiştir. Çalışmalarda kullanılan ikinci doğal zeolit örneği ise ETİ Holding Bigadiç Maden İşletmeleri'nden temin edilmiş olup, irili ufaklı karışık tane boyutunda olup miktarı yine Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Temin edilen doğal zeolit örnekleri ve miktarları

Örnek Kodu	Kaynağı	Boyut aralığı	Miktar
GZ-1	Gördes-Enli Madencilik	0-0.8 mm	325 kg
GZ-2	Gördes-Enli Madencilik	1-4 mm	500 kg
GZ-3	Gördes-Enli Madencilik	4-7 mm	1000 kg
GZ-4	Gördes-Enli Madencilik	15-80 mm	1000 kg
BG-1	Bigadiç-ETİ Holding	Karışık	2500 kg

4 farklı fraksiyondaki Gördes örneklerinin görsel olarak, homojen sayılabilecek şekilde beyaz renkli olduğu gözlenmiştir.

Bigadiç örneğinin gözle muayenesinde ise, örneğin irili ufaklı karışık tane boyutlu malzemeden oluştuğu ve gözle seçilebilir başlıca iki farklı renkte malzeme içerdiği gözlenmiştir. Bunlardan birisi beyazımsı diğeri ise açık yeşil/yeşilimsi bir renktedir. Bigadiç örneğinin yaklaşık %80-85 oranında yeşilimsi fraksiyondan, %15-20 oranında da beyazımsı fraksiyondan oluştuğu gözlenmiştir. Karakterizasyon çalışmalarında yeşilimsi olan fraksiyon Big-A, beyazımsı renkte olan fraksiyon ise Big-B olarak isimlendirilmiştir. Puzolanik aktivite ve katkılı çimento ve beton çalışmaları için Gördes ve Bigadiç doğal zeolitleri belirli incelik düzeylerine öğütülerek (bilyeli değirmende) kullanılmışlardır.

3.1.2 Diğer Puzolanik Malzemeler

Doğal zeolitlerin puzolanik aktiviteleri ile karşılaştırmak amacıyla iki doğal puzolan (zeolitik olmayan), üç uçucu kül ve bir yoğunlaştırılmamış sili dumanı kullanılmıştır. Bu malzemelerin etiket isimleri ve açıklamaları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Diğer puzolanik malzemeler.

Numune	Tanım
AP	Aşkale doğal puzolanı
BP	Bursa doğal puzolanı (tras)
ÇTUK	Çatalağzı uçucu külü
ÇYUK	Çayırhan uçucu külü
SUK	Sugözü uçucu külü
SD	Silis dumanı

Bu malzemelerden doğal puzolanlar; puzolanik aktivite karşılaştırmalarında doğal zeolitler ile benzer ölçüde 45- μ m elekten geçen % değerlerine öğütülerek, uçucu küller ve silis dumanı ise doğrudan temin edildiği incelikte kullanılmışlardır.

3.1.3 Portland Çimentosu (PÇ)

Katkılı çimento, beton çalışmaları CEM I 42.5R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri ile tane boyut dağılımı sırasıyla Tablo 3.3 ve Şekil 3.1’de verilmiştir. Fiziksel özellikler ilgili ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarına göre tespit edilmiştir.

3.1.4 Süper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Maddeleri

Öğütülmüş doğal zeolit ikamesi ile hazırlanan harç karışımlarında etkinliklerini test etmek amacıyla bir naftalin bazlı (sulfonated naphthalene formaldehyde) ve bir melamin bazlı (sulfonated melamine condensate) süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı maddesi kullanılmıştır. Bunlardan performanslarına göre seçilen bir tanesi zeolit içeren beton karışımlarında da kullanılmıştır.

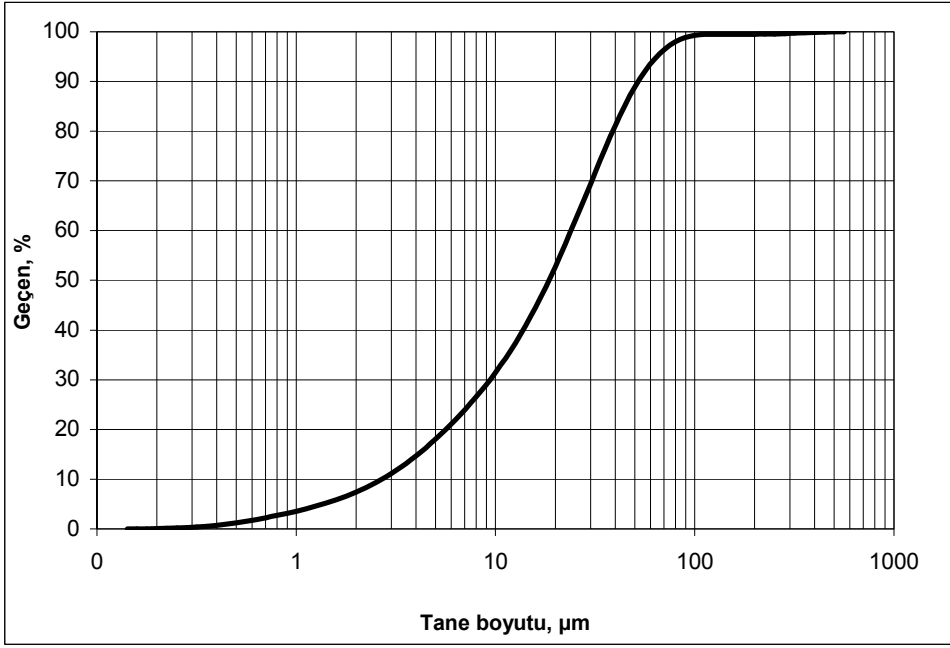
Tablo 3.3 PÇ'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Kimyasal kompozisyon

SiO ₂ , %	19.94
Al ₂ O ₃ , %	5.34
Fe ₂ O ₃ , %	3.72
CaO, %	63.02
MgO, %	2.44
SO ₃ , %	2.95
Na ₂ O, %	0.52
K ₂ O, %	0.81
Kızdırma kaybı, %	1.02
Çözünmeyen kalıntı, %	0.51

Fiziksel özellikler

Özgül ağırlık	3.03
Blaine inceliği, m ² /kg	313
Priz başlama süresi, dak.	140
Priz sonu süresi, dak.	205
Basınç dayanımı, MPa	
3 günlük	26.8
7 günlük	33.5
28 günlük	51.1



Şekil 3.1 PÇ'nin tane boyut dağılımı (lazer kırınım yöntemi)

3.1.5 Sönmüş Kireç (Ca(OH)_2)

Puzolanik aktivite çalışmaları içinde yer alan kireç-puzolan karışımlarının hazırlanmasında teknik saflıkta sönmüş kireç kullanılmış ve bunun Ca(OH)_2 içeriğinin kızdırılmış numune ağırlığının %84'ü kadar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca elektriksel iletkenlik yöntemiyle puzolanik aktivite ölçümü çalışmalarında analitik saflıkta Ca(OH)_2 kullanılmıştır.

3.1.6 Agregalar

Beton karışımlarında en büyük tane boyutu 20 mm olan kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Agregalar 0-4 mm, 4-12 mm, 12-20 mm olmak üzere üç boyut grubunda temin edilmiş ve bunlar uygun tane boyut dağılımı elde edebilmek için belirli oranlarda karıştırılarak kullanılmıştır. Agregalar grublarının tane boyut dağılımı verileri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Agregat gruplarının tane boyut dağılımı verileri

Elek boyutu, mm	Kümülatif Geçen, %		
	0-4 mm	4-12 mm	12-20 mm
19.1	100.0	100.0	100.0
12.7	100.0	100.0	31.2
9.5	100.0	91.4	1.2
4.75	100.0	17.0	-
2.36	71.4	1.4	-
1.19	45.5	-	-
0.60	29.6	-	-
0.30	20.0	-	-
0.15	10.7	-	-

3.2 Yöntemler

3.2.1 Kimyasal ve Mineralojik/Petrografik Karakterizasyon

Zeolit örneklerinin kimyasal kompozisyonlarının tespiti için; çapraz kontrol amacıyla üç farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar XRF (X-ray fluorescence), yaş analiz ve ICP (inductively coupled plasma) yöntemleridir. XRF analizleri MTA Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında, yaş analizler ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri laboratuvarında ve ICP analizleri ise Kanada ACME laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Gördes zeolitinin farklı boyut fraksiyonları arasında, kimyasal kompozisyon farklılığı bulunup bulunmadığını gözlemlemek amacıyla, Gördes zeolitinin dört boyut grubunun her birinin kimyasal kompozisyonu XRF yöntemiyle tespit edilmiştir.

Doğal zeolit örneklerinin X-Işını (Cu-Alfa1-40kV) kırınım desenleri GZ-1, Big-A ve Big-B örneklerinin 800 µm'dan küçük boyuta kırılıp elenmiş halleri pelet haline getirildikten sonra 5-55° 2-teta açıları arasında elde edilmişlerdir.

Mineralojik-petrografik karakterizasyon için örnekler GZ-4, Big-A ve Big-B numunelerinden makroskopik özellikleri dikkate alınarak seçilmiş, seçilen el örnekleri ODTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümünü laboratuvarlarında balzam impregnasyonu uygulandıktan sonra yapılan ince kesitlerde polarizan mikroskop yardımı ile incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan Gördes ve Bigadiç zeolitlerin mikro morfolojik özellikleri JEOL JSM-6400 model EDX eklentili tarayan elektron mikroskobu ile farklı büyütme oranlarında incelenmiştir.

Karıştırma amacıyla kullanılan diğer puzolanik malzemelerin de kimyasal kompozisyonları ve X-Işını kırınım desenleri, doğal zeolitler ile benzer yöntem ve şartlarda tespit edilmiştir.

3.2.2 Puzolanik Aktivite Değerlendirmesi için Kullanılan Yöntemler

Öncelikle ince öğütülmüş doğal zeolitlerin beton karışımlarında mineral katkı malzemesi olarak kullanımları açısından standart bir değerlendirme parametresi olan Dayanım Aktivite İndeksi (DAİ), farklı incelik düzeylerine kadar öğütülmüş doğal zeolitler ve çalışmada kullanılan diğer puzolanik malzemeler için ASTM C 311 standardında belirtilen yöntem ile tespit edilmiştir. Daha sonra bu malzemelerden seçilen belirli incelikteki Gördes ve Bigadiç zeoliti ile bir silis dumanı , bir uçucu kül ve bir zeolitik olmayan doğal puzolanının (toplam 5 ayrı malzeme) puzolanik aktiviteleri üç farklı yaklaşımla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bunlar;

- a) Sertleşmiş Ca(OH)_2 – puzolan pastalarının belirli yaşlardaki Ca(OH)_2 miktarlarının thermo-gravimetrik analiz yöntemiyle ölçülerek, Ca(OH)_2 tüketim miktarının belirlenmesi,
- b) Ca(OH)_2 – deionize su karışımının içerisine belirli miktarda puzolanik malzeme eklendikten sonra, karışımın elektriksel iletkenlik değerinde meydana gelen değişimin ölçülmesi;
- c) Sertleşmiş Ca(OH)_2 – puzolan pastalarının belirli yaşlardaki basınç dayanımlarının ölçülmesi,

şeklindedir. puzolanik malzemeler için tespit edilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca sertleşmiş kireç-puzolan hamurlarının gözenek boyut dağılımları cıva porozimetresi ile tespit edilerek, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemlere ilişkin detaylar aşağıda sunulmuştur.

3.2.2.1 Portland Çimentosu ile Dayanım Aktivite İndeksi (ASTM C 311)

ASTM C 311'e göre hazırlanan referans harç numunesi 500 gram Portland çimentosu, 1375 gram standart kum ve 242 ml su kullanılarak hazırlanmıştır. Dayanım aktivite indeksi tespit edilecek her bir mineral katkı malzemesi için hazırlanan test harçları ise 400 gram Portland çimentosu, 100 g mineral katkı, 1375 gram standart kum içermektedir. Test harçlarına, referans harç ile eşit akma (flow) değerine sahip olacak kadar su ilave edilmiştir. ASTM C 311'de test harcı için kullanılan su miktarının referans harç için kullanılan su miktarına (242 ml) yüzde olarak oranı, mineral katkı malzemesinin su ihtiyacı olarak tanımlanmıştır. Aynı standartta, dayanım aktivite indeksi ise; belli bir yaştaki test numunelerinin basınç dayanımının, aynı yaştaki referans harcının basınç dayanımına yüzdesel olarak oranı şeklinde tanımlanmaktadır.

3.2.2.2 Termal Analiz Yöntemiyle Ca(OH)₂ Tüketiminin Ölçülmesi

Çalışmada belirli saflıktaki (teknik saflıkta) Ca(OH)₂ ile Tablo 3.5'de belirtilen miktarlarda puzolanik malzeme ve saf su karıştırılarak kireç-puzolan hamurları hazırlanmış ardından nem kaybını ve karbonasyonu engellemek amacıyla plastik şırıngalar içerisine yerleştirilmiş ve 50 °C sıcaklıkta test gününe kadar saklanmıştır. 3, 7 ve 28. günlerde plastik kaplardan çıkarılan sertleşmiş hamurlar kırılarak 800-µm elekten geçirilmiş ve hamur içerisindeki Ca(OH)₂ miktarını belirlemek üzere bu haliyle termo-gravimetrik analize tabi tutulmuştur.

Tablo 3.5 Kireç-Puzolan pastalarının karışım oranları

Bileşen	Miktar
Ca(OH) ₂	250 gram
Puzolanik malzeme	250 gram
Saf Su	275 mL

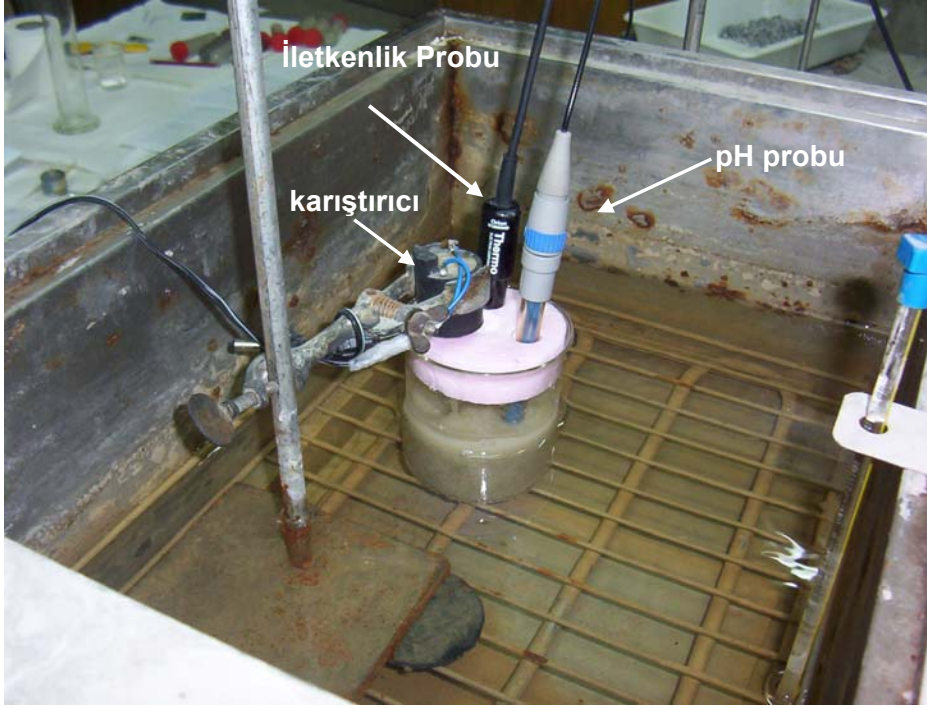
Thermo-gravimetrik analiz (TGA) belirli miktarda numunenin (20-25 mg) belirli bir hızda ısıtıldığında numune ağırlığında meydana gelen değişikliği ölçerek, ısı ile bozulan fazların miktarlarını tespit edebilmeye olanak tanıyan bir ısı analiz yöntemidir ve sertleşmiş çimento sistemlerindeki Ca(OH)₂'in ölçülmesinde sıkça başvurulan bir metottur [ROSZCZYNSKI, 2002, UBBRIACCO ve TASSELLI, 1998].

Öncelikle çalışmada kullanılan kirecin Ca(OH)_2 içeriği TGA metoduyla belirlenmiş ve böylelikle pastanın başlangıç anındaki Ca(OH)_2 içeriği hesaplanmıştır. Daha sonra belirli yaşlarda test edilen sertleşmiş numunelerin Ca(OH)_2 içerikleri tespit edilmiş ve başlangıç miktarına göre ne kadar Ca(OH)_2 tüketmiş olduğu hesaplanmıştır. Termal analizlerde Perkin Elmer Pyris TGA&FTIR analiz sistemi oda sıcaklığı ve 950°C sıcaklıklar arasında, $10^\circ\text{C}/\text{dak}$. sıcaklık artış hızıyla kullanılmıştır.

3.2.2.3 Elektriksel İletkenlik Ölçümü Yoluyla Puzolanik Aktivite Değerlendirmesi

İlk olarak Luxan ve diğerleri tarafından [LUXAN ve diğerleri, 1989] önerilen ve daha sonra Paya ve diğerleri tarafından [PAYA ve diğerleri, 2001] geliştirilen yöntemine göre; 400 mL beher içerisine 250 mL deiyonize su konulmakta ve beher sabit sıcaklıklı su banyosu içerisinde sıcaklığı $40\pm 1^\circ\text{C}$ de tutularak içerisine 0.2 gr saf Ca(OH)_2 eklenmiştir. Elektrikli bir karıştırıcı ile sürekli olarak karıştırılan çözeltinin iletkenlik değeri ve pH değeri sürekli olarak ölçülerek çözeltinin iletkenliği sabit bir düzeye gelene kadar beklenip bu iletkenlik değeri başlangıç değeri olarak kaydedilmiştir. Daha sonra çözelti içerisine 5 g puzolanik malzeme ilave edilerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Puzolanik malzemenin ilave edilmesinin ardından iletkenlik ve pH değeri belirli zaman aralıklarında 240 dakikaya kadar kaydedilmiştir. Aynı prosedür, su içerisine Ca(OH)_2 eklenmeden sadece su-puzolan sistemi için uygulanarak puzolanik malzemenin tek başına sistemin iletkenlik ve pH değerlerine etkisi ölçülmüştür. Her bir ölçüm anı için, kireç-puzolan-su sisteminin iletkenlik değerlerinden puzolan-su sisteminin iletkenlik değeri çıkarılarak, yani puzolanik malzemenin elektriksel iletkenliğe olan katkısı çıkarılarak, net elektriksel iletkenlik değeri elde edilmiştir. Bu net elektriksel iletkenlik değerinde zamanla meydana gelen azalma puzolanik aktivite sonucunda tüketilen kalsiyum iyonlarının miktarı ile orantılı olduğu varsayımına dayanılarak puzolanik aktivite değerlendirilmiştir.

Bu deneysel yöntem sırasında kullanılan düzenek Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Elektriksel iletkenlik ölçüm düzeneği

3.2.2.4 Kireç-Puzolan Hamurlarının Basınç Dayanımları

Karışım oranları ve kür şartları 3.2.2.1 bölümünde belirtilen şekilde hazırlanan kireç-puzolan hamurları 2.5 cm boyutunda küp kalıplara yerleştirilmiş, havayla teması engellemek amacıyla plastik film ile kaplanmış ve 50 °C sıcaklıkta test gününe kadar saklanmıştır. Sertleşmiş hamurların basınç dayanımları 3, 7 ve 28. günlerde tespit edilmiştir.

3.2.2.5 Kireç-Puzolan Hamurlarının Gözenek Boyut Dağılımı

28 günlük sertleşmiş kireç-puzolan hamurlarının gözenek boyut dağılımları puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan jel miktarının, jel boşluklarının miktarıyla ilişkilendirilerek dolaylı olarak değerlendirilmesi amacıyla cıva porozimetresi kullanılarak tespit edilmiştir.

Cıva porozimetresi ile sertleşmiş bağlayıcı sistemlerin gözenek boyut dağılımının tespit edilebilmesi için numunelerdeki serbest suyun tamamen kurutulmasını gerektirmektedir. Bu tür numunelerin 100-110 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulmaları aşırı kuruma büzölmeleri sonucunda mikro yapıya zarar vereceğinden, bazı özel kurutma teknikleri uygulanmaktadır [GALLE, 2001]. Bu çalışmada metanol ikamesi ve ardından 55°C sıcaklıkta vakumlu fırında kurutma uygulanmıştır.

Sertleşmiş hamurlar öncelikle 3-5 mm boyutlara kırılmış ve ardından 24 saat boyunca metanol içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra numuneler 55°C sıcaklıktaki vakum fırınında 24 saat süresince kurutulmuştur. Bu şekilde hazırlanan örnekler Quantachrome Corporation Poremaster 60 model maksimum 55000 psi enjeksiyon basıncı kapasiteli cıvalı porozimetre ile 3-10000 nm (0.003-10 µm) boyut aralığındaki gözenek dağılımı için analiz edilmişlerdir. Tüm numuneler için tamamen aynı numune hazırlama prosedürü uygulanmıştır.

Karışım oranları ve kür şartları 3.2.2.1 bölümünde belirtilen şekilde hazırlanıp plastik şırıngalarda saklanan kireç puzolan hamurları 28. günde şırıngalardan çıkarılarak yukarıda belirtilen ön işlemlerden geçirildikten sonra cıvalı porozimetre ile gözenek boyut dağılımları analiz edilmiştir.

3.2.3 Zeolit Katkılı Çimento Hamurları ve Harçları Üzerinde Gerçekleştirilen Testler

Çalışmanın bu bölümünde düşük (ağırlıkça %15), orta (35%) ve yüksek (55%) miktarlarda doğal zeolit içeren katkılı çimentoların özelliklerinin ve hidratasyonunun incelenmesi amaçlanmıştır.

Proje önerisinde doğal zeolit içeren katkılı çimentoların, bileşenlerin birlikte öğütülmeleri ile elde edileceği belirtilmişti. Ancak proje sürecinde çeşitli çimento fabrikalarıyla yapılan görüşmelerde, son yıllarda çimento sektörünün katkılı çimento üretiminde, bileşenlerin ayrı ayrı öğütülerek sonradan karıştırılmasını tercih ettiği ve bu şekilde üretim yapamaya başladığı bilgisine ulaşılmıştır. Bu yöntemin tercih edilmesinin sebebi olarak da, birlikte öğütme durumunda bileşenlerin her birinin tane boyut dağılımının kontrol edilemediği, ancak ayrı ayrı öğütme durumunda katkılı çimento içerisindeki klinker ve mineral katkı fazlarının inceliklerinin kontrol edilerek karıştırılmasının, üretimin optimize edilmesini kolaylaştırması olduğu belirtilmiştir. Bundan dolayı çalışmalarda, portland çimentosunun belirli miktarlarda öğütülmüş doğal zeolit ile yer değiştirilmesi ile elde edilen katkılı portland çimentoları kullanılmıştır.

Doğal zeolit katkılı portland çimentolarının elde edilmesinde, puzolanik aktivite çalışmalarında da kullanılan, 45-µm elekten geçen malzeme miktarı %80 olacak şekilde öğütülmüş ve fiziksel özellikleri puzolanik aktivite çalışmaları sırasında tespit edilmiş olan

Gördes ve Bigadiç zeolitleri kullanılmıştır. İnce öğütülmüş bu malzemeler Gördes ve Bigadiç zeoliti için sırasıyla GZ-80 ve BZ-80 olarak isimlendirilmiştir. Elde edilen katkıli portland çimentolarının etiket isimleri ve içerikleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 Katkıli çimentoların etiket isimleri ve açıklamaları

Çimento	Açıklama
PÇ	CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu (kontrol çimentosu)
KÇ-GZ15	Ağırlıkça %15 oranında öğütülmüş Gördes zeoliti (GZ-80) içeren katkıli çimento
KÇ-GZ35	Ağırlıkça %35 oranında öğütülmüş Gördes zeoliti (GZ-80) içeren katkıli çimento
KÇ-GZ55	Ağırlıkça %55 oranında öğütülmüş Gördes zeoliti (GZ-80) içeren katkıli çimento
KÇ-BZ15	Ağırlıkça %15 oranında öğütülmüş Bigadiç zeoliti (BZ-80) içeren katkıli çimento
KÇ-BZ35	Ağırlıkça %35 oranında öğütülmüş Bigadiç zeoliti (BZ-80) içeren katkıli çimento
KÇ-BZ55	Ağırlıkça %55 oranında öğütülmüş Bigadiç zeoliti (BZ-80) içeren katkıli çimento

Katkıli çimento hamurlarının normal kıvam için gerekli su miktarları, priz süreleri, belirli yaşlardaki serbest $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içerikleri (termal analiz yöntemiyle), kristal hidrasyon ürünleri (XRD analizi ile), gözenek boyut dağılımları (cıva porosimetresi ile), mikro yapıları (SEM/EDX incelemesi ile) tespit edilmiş ve bu özellikler portland çimentosu ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışmalardaki genel amaç, doğal zeolit ikamesinin katkıli çimento hamurlarının sözü edilen özellikleri üzerine olan etkisini incelemek ve bunlardan elde edilen sonuçları harç ve betonların mekanik özellikleri ve dayanıklılık karakterlerini açıklamakta kullanmaktır.

Ayrıca katkıli çimentoların basınç dayanımı performanslarını incelemek amacıyla hazırlanan harç numunelerinin basınç dayanımları 2 ayrı süper akışkanlaştırıcı ve 2 farklı kür koşulu için (kirece-doygun suda kür ve %99 nemli ortamda kür) tespit edilmiştir.

Katkıli çimentolar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ilişkin detaylar aşağıda sunulmuştur.

3.2.3.1 Normal Kıvam ve Priz Süresi

Farklı oranlarda doğal zeolit içeren katkılı çimentoların ve kontrol çimentosunun normal kıvam su ihtiyacı ve priz süreleri sırasıyla ASTM C 187 ve ASTM C 191 standart metotlarına göre tespit edilmiştir.

3.2.3.2 Çimento Hamurlarının Serbest Ca(OH)₂ İçerikleri

Doğal zeolit ikamesinin çimento hamurlarındaki puzolanik aktivitesi, çimento hamurlarının çeşitli yaşlardaki Ca(OH)₂ içerikleri ölçülerek değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla deionize su kullanılarak 0.5 su/bağlayıcı oranıyla hazırlanan çimento hamurlarının Ca(OH)₂ içerikleri 3, 7 ve 28 günlük yaşlar için termal analiz yöntemiyle (TGA) tespit edilmiştir. Hamurlar mikserde karıştırılmış ve ardından hava ile temas sonucu oluşabilecek karbonasyonu ve nem kaybını engellemek amacıyla plastik şırıngalara doldurulmuş ve test gününe kadar 23±1 °C sıcaklıkta kür edilmiştir.

Sertleşmiş çimento hamurları belirtilen yaşlarda plastik şırıngalar kesilerek çıkarılmış ve küçük bir çekiç yardımıyla kırılıp daha sonra 800-µm elekten geçirilmiştir. Bu şekilde elde edilen örnekler Perkin Emler Pyris TGA&FTIR termal analiz sisteminde, oda sıcaklığı ve 1000 °C sıcaklık aralığında ve 10°C/dak. sıcaklık artış hızında analiz edilmişlerdir. Sertleşmiş çimento hamurlarındaki Ca(OH)₂ miktarı, yaklaşık 450 °C sıcaklıkta Ca(OH)₂'in yapısındaki suyun buharlaşması sonucunda meydana gelen ani ağırlık kaybı miktarından hesaplanarak tespit edilmiştir.

3.2.3.3 Sertleşmiş Hamurların XRD Analizleri

Kristal yapıyı hidrasyon ürünlerinin kalitatif olarak incelenmesi ve çimentolar içerisindeki zeolit tipi ve miktarına bağlı olarak oluşabilecek benzerlik ve farklılıkların gözlenmesi amacıyla, Bölüm 3.2.3.2'de belirtildiği şekilde hazırlanan çimento hamurlarının XRD (X-Ray Diffraction) analizleri yapılmıştır. Bu analizler %15 ve %55 zeolit ikamesi ile hazırlanan katkılı çimentolar ve kontrol portland çimentosu için 7 ve 28 günlük yaşlarda gerçekleştirilmiştir. XRD kırınım desenleri Cu-Alpha1/40kV şartlarında çalışan x-ışını difraktometresi kullanılarak, 5°-65° 2-teta açıları arasında elde edilmişlerdir.

3.2.3.4 Sertleşmiş Hamurların Gözenek Boyut Dağılımı Analizi

Sertleşmiş çimento hamurlarının gözenek boyut dağılımları %15 ve %25 zeolit ikame oranları ve kontrol numunesi için, hamurların 28 ve 91 günlük yaşlarında, cıva porozimetresi kullanılarak tespit edilmiştir. Numunelerin ön şartlandırmasında ve analizlerinde 3.3.2.5 bölümünde kireç-puzolan hamurları için açıklanan prosedür takip edilmiştir.

Sertleşmiş hamurların gözenek boyut dağılımları; doğal zeolit ikamesinin çimento hamurlarının gözenek boyut dağılımında, puzolanik reaksiyon sonucu meydana getirdiği değişiklikleri gözlemlemek ve bu değişiklikleri mekanik özellikler ve geçirgenlik özellikleri ile ilişkilendirmek amacıyla tespit edilmiştir.

3.2.3.5 SEM/EDX İncelemeleri

Sertleşmiş çimento hamurlarının mikro yapıları ve hidrasyon ürünleri %15 ve %55 zeolit ikame oranları ve kontrol numunesi için, hamurların 28 günlük yaşlarında elektron mikroskobu altında ("backscattered-mode scanning electron microscopy-BS-SEM) incelenmiştir. Bunun için EDX (energy dispersive X-ray analysis) sistemi eklentili JEOL JSM-6400 model elektron mikroskobu kullanılmıştır.

28 günlük sertleşmiş çimento hamurları yaklaşık 15-20 mm boyutlara kırıldıktan sonra, içlerindeki serbest suyun alınarak hidrasyonun durdurulması amacıyla 48 saat süreyle metanol içerisinde tutulmuşlardır. Backscattered-mode elektron mikroskobu çalışmaları parlatılmış yüzeyler gerektirdiğinden, sertleşmiş hamurlar epoksi reçine içen batırılıp sertleşme sonrasında yüzey parlatma işlemi uygulanmıştır.

3.2.3.6 Harçların Akışkanlaştırıcı İhtiyaçları ve Basınç Dayanımları

Düşük (%15), orta (%35) ve yüksek(%55) miktarlarda doğal zeolit içeren katkı çimentoların basınç dayanımı performansları, doğal zeolit kullanımından oluşan su ihtiyacı artışı, su azaltıcı kimyasal katkı malzemesi kullanılarak giderilen harç numunelerinde değerlendirilmiştir.

Bunun için toplam 500 gr bağlayıcı malzeme (PÇ+öğütülmüş doğal zeolit) 1375 gr standart kum ve 250 ml su kullanılarak harç karışımları hazırlanmıştır. Öncelikle sadece PÇ içeren

kontrol harcı hazırlanmış ve kıvam değerlendirmesi olarak harcın akış (flow) değeri ölçülmüştür. Daha sonra farklı oranlarda doğal zeolit yer değiştirmesi ile hazırlanan harçlarda eşit miktarda su kullanılmış ve bu harçlarının akış değerini kontrol harcının akış değerine $\pm\%10$ aralığında yakın olmasını sağlayacak kadar akışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave edilmiştir. Böylelikle doğal zeolit içeren harçlar kontrol harcı eşit miktarda su/bağlayıcı oranına ve benzer bir işlenebilirliğe sahip olacak şekilde hazırlanmış, buradan harçların doğal zeolit miktarı ve akışkanlaştırıcı ihtiyacı arasındaki ilişki gözlenmiştir.

Yukarıda bahsedildiği öğütülmüş iki ayrı doğal zeolit örneğinin her biri için %15, %35 ve %55 yer değiştirme oranlarıyla hazırlanan harç karışımları, 5 cm'lik küp kalıplara yerleştirilmiş ve 1 gün süreyle ıslak bez altında nemli kür uygulanmıştır. Ardından numuneler kalıptan çıkarılarak, test gününe kadar, 23 ± 1 °C'de kirece doymuş su içerisinde (ASTM C 109'da önerilen) ve 23 ± 1 °C'de %99 relatif nem sağlayan kür kabini içerisinde olmak üzere iki farklı şekilde kür uygulanmıştır.

Sertleşmiş harçların basınç dayanımları 3, 7, 28, 91, 180 ve 360 günlük yaşlar için tespit edilmiştir.

3.2.4 Öğütülmüş Doğal Zeolit İçeren Beton Karışımları

Doğal zeolitlerin, beton karışımlarında mineral katkı maddesi olarak kullanımı projenin bir diğer ana başlığıdır. Mineral katkı malzemesi olarak doğal zeolit içeren beton karışımlarının özelliklerinin; portland çimentosunun, düşük (%15), orta (%35) ve yüksek (%55) miktarda doğal zeolitle ikamesi durumları için tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu oranlar seçilirken; düşük miktarda doğal zeolit ikamesiyle yüksek dayanımlı betonlar, orta ve yüksek düzeyde zeolit içerikleriyle ise göreceli olarak daha düşük dayanımlı ancak daha az miktarda portland çimentosu içeren ve yüksek dayanıklılık (dürabilite) özelliklerine sahip bir beton karışımı hedeflenmiştir. Yüksek miktarda (55%) doğal zeolit kullanımıyla elde edilecek ve betonarme yapılarda kullanıma uygun özelliklerdeki beton karışımları, yapı sektöründe kullanılan çimento miktarının azaltılarak, çimento endüstrisinden kaynaklanan ve başlıca sera etkisi gazlarından olan CO₂ emisyonunun düşürülmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Doğal zeolit içeren beton karışımları için yapılan çalışmalarda, puzolanik aktivite ve katkı çimento çalışmalarında kullanılan ve fiziksel özellikleri önceki çalışmalardan bilinen, ince öğütülmüş Gördes ve Bigadiç zeolitleri kullanılmıştır.

3.2.4.1 Beton Karışım Oranları

Doğal zeolitlerin, beton karışımlarında portland çimentosunu (PÇ) ikame etmek amacıyla kullanılmalarını incelemek amacıyla, toplam bağlayıcı içerisinde düşük (15%), orta (35%) ve yüksek (%55) oranda doğal zeolit içeren beton karışımlarının hazırlanarak, taze ve sertleşmiş beton özellikleri tespit edilmesi uygun görülmektedir. Bu amaçla belirtilen oranlarda öğütülmüş doğal zeolit içeren, 400 kg/m^3 toplam bağlayıcı (PÇ+zeolit) miktarı ve 0.45 su/bağlayıcı oranıyla beton karışımları hazırlanmıştır.

Taze beton karışımlarının, yapısal uygulamalar için ortalama bir değer olan yaklaşık 15 cm çökme değerine sahip olmaları amacıyla, bu çökme değerini sağlamak için yeterli miktarda melamin tabanlı toz haldeki akışkanlaştırıcı katkı maddesi karışım suyuna ilave edilerek kullanılmıştır.

Ayrıca doğal zeolit ikamesinin beton özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, doğal zeolit içermeyen, 400 kg/m^3 portland çimentosu kullanılarak, iki farklı kontrol beton karışımı hazırlanmıştır. Bunlardan birisi herhangi bir akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmaksızın, beton karışımını yaklaşık 15 cm çökme değerine getirecek kadar su/çimento oranı kullanılarak hazırlanmış, diğer bir kontrol karışımı ise 0.45 su/çimento oranında 15 cm çökme değerine ulaşması için akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Bu şekilde iki farklı kontrol karışımı kullanılmasında amaç; doğal zeolit içeren beton karışımlarını akışkanlaştırıcısız geleneksel bir kontrol betonu ile ve ayrıca akışkanlaştırıcı ile su/çimento oranı düşürülmüş bir beton karışımı ile karşılaştırmaktır.

Hazırlanan 7 ayrı beton karışımına ilişkin karışım oranları Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7 Beton karışım oranları (SDYK durumdaki agrega için)

Karışım kodu	C1	C2	GZ15	GZ35	GZ55	BZ15	BZ35	BZ555
Zeolit tipi	-	-	GZ-80	GZ-80	GZ-80	BZ-80	BZ-80	BZ-80
Portland çimentosu, kg/m ³	400	400	340	260	180	340	260	180
Öğütülmüş Zeolit kg/m ³	-	-	60	140	220	60	140	220
Su, kg/m ³	212	180	180	180	180	180	180	180
Su/Çimento oranı	0.53	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
0-4 mm Agrega, kg/m ³	847	890	882	875	861	882	875	861
4-12 mm Agrega kg/m ³	425	447	442	439	432	442	439	432
12-19 mm Agrega kg/m ³	425	447	442	440	432	442	439	432
Akışkanlaştırıcı kg/m ³	-	2.8	4.4	6.0	10.0	3.6	4.8	4.9

3.2.4.2. Numuneler ve Saklama Koşulları

Hazırlanan her bir beton karışımından, basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı ve klor iyon geçirgenliği testlerinde kullanılmak üzere yeterli sayıda 10x20 cm boyutlarında silindir numuneler alınmıştır. Ayrıca beton karışımlarının kuruma büzülme miktarlarının tayini için, her bir beton karışımından 7.5x7.5x32 cm boyutlarında 3 adet prizmatik numune alınmıştır. Taze beton karışımları kalıplara yerleştirildikten sonra vibratör yardımıyla sıkıştırılmıştır.

Döküm sonrasında üzerleri ıslak bezle kapatılan numuneler, 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılarak, su havuzuna yerleştirilmiş ve 22±2°C sıcaklığındaki suda test gününe kadar saklanmıştır.

3.2.4.3. Deneysel Yöntemler

Hazırlanan taze beton karışımlarının ilk ve son priz süreleri ASTM C 403'e göre tespit edilmiştir.

Basınç dayanımı testi için her bir karışımdan 3 adet 10x20 cm'lik silindir numune, su k r nden çıkarılarak, oda koŐularında kurumasa beklenip, daha sonra kükürt baŐıklama yapıldıktan sonra ASTM C39'a göre 3, 7, 28 ve 91 günlük yaşlarda teste tabi tutulmuŐ ve her bir yaş için 3 adet numunenin ortalama değeri basınç dayanımı olarak kaydedilmiştir.

Silindir numunelerin yarmada-çekme dayanımları ise yine 3 adet numune üzerinde ve basınç dayanımı ile aynı yaşlarda ASTM C 496'a göre tespit edilmiştir.

Sertleşmiş betonların basınç gerilmesi altında elastiklik modülleri ise 91 günlük yaş için ASTM C 469'a göre her bir beton karışımı için 3 ayrı numune üzerinde tespit edilerek ortalama değer kullanılmıştır.

Sertleşmiş beton numunelerinin klor iyon geçirgenlikleri, 28 ve 91 günlük yaşlar için ASTM C 1202'e göre iki ayrı paralel numune üzerinde tespit edilerek, iki numunenin ortalaması klor iyon geçirgenliği olarak kaydedilmiştir.

BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Doğal Zeolitlerin Karakterizasyonu

4.1.1 Jeokimyasal Özellikler

Doğal zeolitlerin başlıca oksit kompozisyonları öncelikle XRF yöntemiyle tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir. Gerek zeolitli örneklerin gerekse diğer puzolanik maddelerin kimyasal karakterizasyonunda tekdüzelik sağlamak amacı ile kullanılan bileşenler Kanada da ACME laboratuvarlarında majör oksitler, iz ve nadir toprak elementleri açısından ICP tekniği ile yeniden analiz ettirilmiştir.

Doğal zeolitli örneklerin majör element birleşimleri (Tablo 4.2) bir önceki analizlerden az da olsa farklılık göstermektedir. Bu farklılık SiO_2 , K_2O ve Kızdırma kaybı değerlerinde daha belirgindir. Bu değerler dikkate alınırsa SiO_2 içeriği açısından Gördes Zeolitleri yaklaşık %70 ile en yüksek değerlere ulaşmakta, bunu Big-A ve Big-B kodlu Bigadiç zeolitleri takip etmektedir. Benzer biçimde Gördes zeolitleri toplam alkaliler ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) bakımından sırası ile Big-B ve Big-A doğal zeolitlerinden daha zengindir. Buna karşılık, Bigadiç zeolit örnekleri CaO açısından belirgin olarak daha zengin olup daha yüksek miktarda nem ve uçucular (CO_2 vs) içermektedir. Diğer ana oksit içerikleri (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, MnO, TiO_2 ve P_2O_5) bakımından her iki alana ait doğal zeolitli örnekler arasında önemli bir fark görülmemektedir.

Tablo 4.1 Doğal zeolit örneklerinin kimyasal kompozisyonları (MTA, XRF ile ölçülen)

Örnek / %	GZ-1	GZ-2	GZ-3	GZ-4	Big-A	Big-B
SiO ₂	71.7	70.8	71.1	71.1	70.1	70.2
Al ₂ O ₃	11.9	10.9	12.1	12.1	11.2	11.9
Fe ₂ O ₃	2.5	2.1	2.3	2.1	2.3	1.9
CaO	1.9	2.1	2.4	2.4	3.5	3.3
Na ₂ O	0.8	0.7	0.3	0.3	0.2	0.2
K ₂ O	4.4	4.8	4.2	4.3	2.6	2.7
Kızdırma Kaybı	8.9	8.8	8.8	8.9	11.0	10.4
TOPLAM	102.1	100.2	101.2	101.2	100.9	100.6

Tablo 4.2. Doğal zeolit örneklerinin kimyasal kompozisyonları (ICP Metodu ile ölçülen)

GZ: Gördes zeoliti, Big-A: Bigadiç zeoliti (yeşilimsi fraksiyon), Big-B: Bigadiç zeoliti (beyazımsı fraksiyon).

Bileşen	GZ	Big-A	Big-B
SiO ₂ , %	69.32	66.05	64.47
Al ₂ O ₃ , %	11.35	11.04	11.23
Fe ₂ O ₃ , %	1.28	1.08	1.19
MgO, %	0.82	0.96	1.4
CaO, %	1.72	3.71	3.56
Na ₂ O, %	0.95	0.19	0.13
K ₂ O, %	3.96	1.75	2.24
TiO ₂ , %	0.09	0.06	0.07
P ₂ O ₅ , %	0.04	0.02	0.02
MnO, %	0.03	0.01	<.01
Cr ₂ O ₃ , %	0.02	0.001	0.002
K.K, %	10.4	14.6	14.8
Toplam, %	99.98	99.47	99.11

Doğal zeolitli örneklerin iz ve nadir toprak elementi içeriklerindeki (Tablo 4.3) değişiklikler ise genelde majör oksit içerikleri ile oldukça uyumludur. Bu kapsamda Ca ile Sr ve Ba birlikte davranmaktadır. Rb, genelde K ile birlikte davranırken irdelenen örneklerde bu belirginleşmemektedir. Tüm örneklerdeki metal elementlerine bakıldığında ise Gördes doğal zeolitli örneklerinde Cu, Pb ve Ni değerlerinin oransal olarak daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3 Doğal zeolit örneklerinin iz ve nadir toprak element içerikleri

Element	İçerik,ppm		
	GZ	Big-A	Big-B
Ba	170.9	276.8	322.9
Be	3	3	3
Co	1.1	<.5	<.5
Cs	23.1	41.2	35.3
Ga	11.6	12.9	13.3
Hf	3.5	4.1	3.8
Nb	12.1	13	15
Rb	146.6	111.9	149.9
Sn	3	4	4
Sr	259.4	4595	7346.8
Ta	1.2	1.4	1.5
Th	31	31.3	33.3
U	6	5.8	8.2
V	14	8	10
W	1.3	0.3	0.8
Zr	92.2	88.7	81.5
Y	15.6	17.3	11.3
La	28.3	23.5	21.2
Ce	56.8	44.6	40.4
Pr	6.37	5.33	5.03
Nd	22.8	20.8	18.9
Sm	4.2	4	3.7
Eu	0.35	0.23	0.19
Gd	3.05	3.37	3.02
Tb	0.59	0.66	0.51
Dy	3.08	3.53	2.7
Ho	0.56	0.61	0.49

Tablo 4.3 (devam ediyor)

Element	İçerik, ppm		
	GZ	Big-A	Big-B
Er	1.57	1.71	1.33
Tm	0.25	0.27	0.21
Yb	1.67	1.88	1.4
Lu	0.28	0.27	0.18
Mo	2.1	0.1	<.1
Cu	4	1.6	2.2
Pb	40.8	17.3	7.9
Zn	26	28	33
Ni	7.1	1	4.9
As	10.4	19.9	2.7
Cd	0.1	0.1	<.1
Sb	0.3	0.9	0.2
Bi	0.3	0.3	0.3
Ag	<.1	<.1	<.1
Au	1	0.8	0.7
Hg	<.01	<.01	0
Tl	0.4	0.7	0.8
Se	<.5	<.5	<.5

Doğal zeolitlerin tespit edilen toplam SiO₂ miktarlarına ek olarak, puzolanik reaksiyon açısında “reaktif SiO₂” miktarları tespit edilmiştir. TS EN 197-1’de reaktif SiO₂; “Silisyum dioksitin hidroklorik asit (HCl) ile muamele edilmesinden sonra kaynar potasyum hidroksit (KOH) çözeltisinde çözünebilen kısmı” olarak tarif edilmekte ve toplam silisyum dioksitin puzolanik reaksiyonda etkili kısmı olarak değerlendirilmektedir. Malzemelerin reaktif SiO₂ içerikleri TS EN 197-1 ve TS EN 196-2 standartlarına göre Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği laboratuvarlarında tespit ettirilerek, sonuçlar Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 4.4 Doğal zeolitlerin reaktif SiO₂ içerikleri

Puzolanik Malzemeler	Tanımlama	Toplam SiO ₂ , %	Reaktif SiO ₂ , %
GZ	Gördes zeoliti	69.32	51.29
BZ	Bigadiç zeoliti	66.05	54.93

4.1.2 Doğal Zeolit Örneklerinin Mineralojik/Petrografik Analizleri

Deneylerde Big A, Big B ve G kodlu zeolit içeren doğal tüfler kullanılmıştır. Bunlardan Big-A ve Big-B Bigadiç'deki zeolit yataklarından, G kodlu örnek ise Gördes yöresindeki zeolit yataklarından sağlanmıştır.

Mineralojik-Petrografik incelemelerde kullanılan örnekler makroskopik özellikleri dikkate alınarak seçilmiş, seçilen el örnekleri Jeoloji Mühendisliği bölümünde balzam impregnasyonu uygulandıktan sonra yapılan ince kesitlerde polarizan mikroskop yardımı ile incelenmiştir. Bu malzemenin özellikleri aşağıda sunulmuştur.

4.1.2.1 Mineralojik-Petrografik Özellikler

Örnek Big A: Felsik Tüf (Bigadiç)

İrdelenen örnek makroskopik olarak uçuk yeşil renkli, çok ince taneli, zayıf laminalanmalı gevşek ve dağınık tüf malzemesidir.

Mikroskop altında örnek ilksel mineral fazı olarak çok ince taneli-kriptokristalen bir hamur içindeki paralel dizilmiş 0.04mm uzunluğa ulaşan, kahverengimsi biyotit taneleri ve 0.01 mm büyüklüğe varan, köşeli kuvars taneleri içerir (Şekil 4.1).

Yer yer birkaç milimetreye varan kalınlıkta daha ince ve daha kalın bantlaşma görülür. Bantların bir bölümündeki çok ince taneli ve saçılmış hematit pulcukları nedeni ile bu bantlar daha koyu renklidirler. Açık renkli bantlarda ise seyrek karbonat ve kil topanları bulunur.

Örnekte söz konusu edilen kriptokristalen hamur içinde ince kesitin alanca %65'ini oluşturan, 0.05 mm ye ulaşan büyüklükte köşeli volkanik cam kıymıkları (glass chards) yer alır. Bu cam kıymıkları çok ince taneli (<0.004mm) düşük çift kırılmalı, 2. Dizi gri renklere sahip mikroçubuksu zeolit ile doldurulmuştur. Hamurda yer alan zeolitler ise kriptokristalen olup sadece çevrelerindeki farklı çift kırılmaları ile seçilebilmektedir.

Örnekte zeolit dışında ikincil mineral gözlenmemiştir. Örnekteki Zeolit içeriği kestirme yöntemi ile % 80 +- %5 olarak belirlenmiştir. Örnekte yer alan zeolit mineralleri çok ince taneli olduklarından türleri optik mineralojik yöntemlerle belirlenemez. Ancak aşağıda sözü edileceği gibi X-Işınları Diffraktometresi yöntemi ile klinoptilolit olarak saptanmıştır.

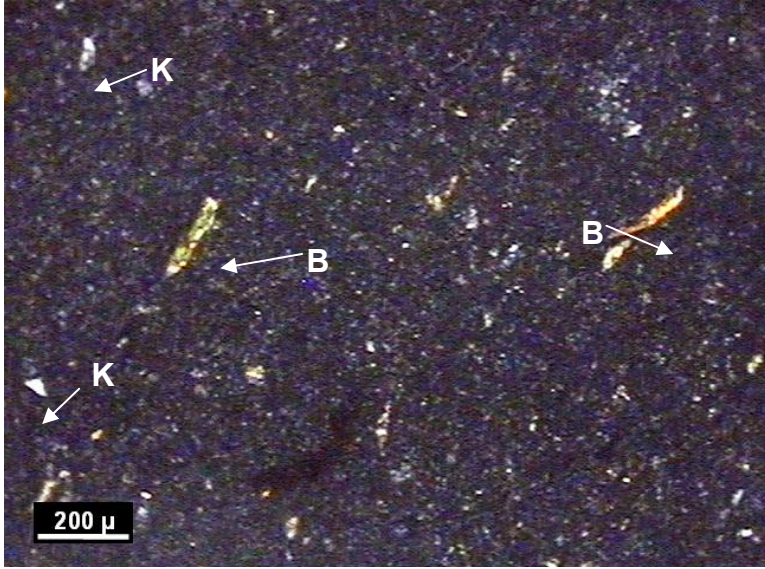
Örnek Big B: Felsik Tüf (Bigadiç)

Genel özellikleri ile Big-A kodlu örnek ile benzeşen bu kaya daha ince taneli ve beyaz renkli ve laminasız olması ile farklılaşır.

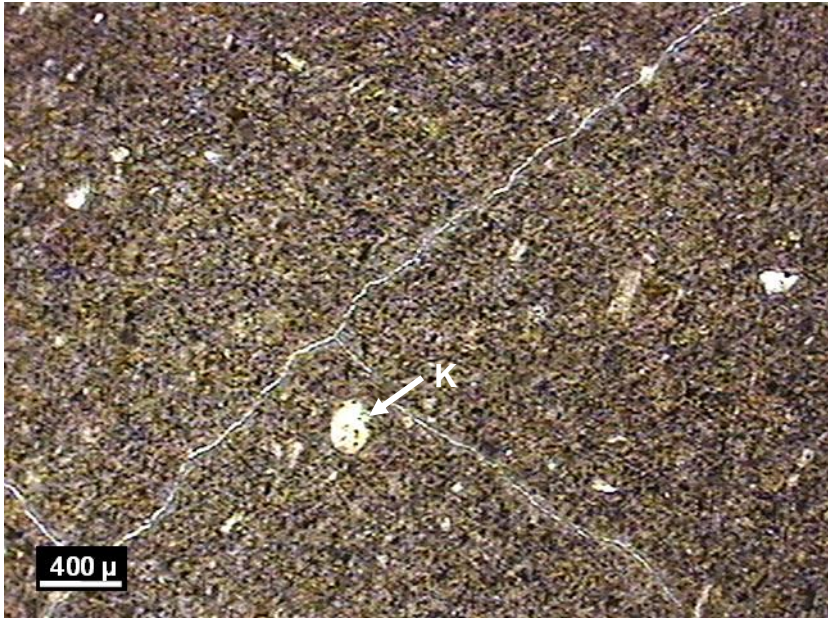
Örnekte hamur kriptokristalen olup yukarıdaki örnekte olduğu gibi çok ince taneli, zayıf alterasyonlu biyotit (0.035mm) ve kuvars (0.01mm) içerir (Şekil 4.2). Bu örnekte cam kıymıkları gözlenmez (Şekil 4.3) ancak ince kil topanları seçilebilir (Şekil 4.4).

Örneğin hamuru kriptokristalen zeolitlerle replase edilmiştir. Bu zeolitler submikroskopik boyutta olduklarından türleri optik mikroskopik yöntemlerle tayin edilememiş, ancak X-Işınları Diffraktometresi yöntemi ile klinoptilolit oldukları saptanmıştır.

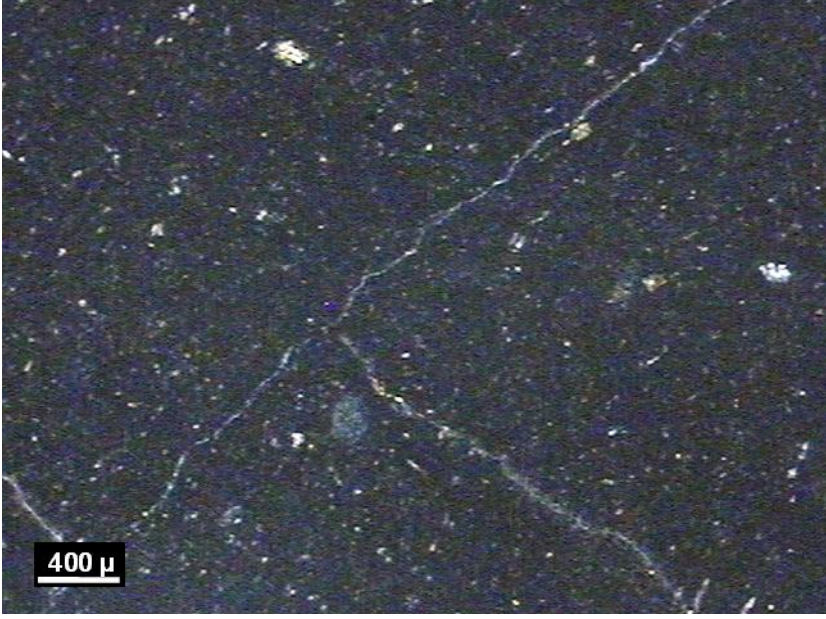
Örnekteki zeolit içeriği %75 dolayındadır.



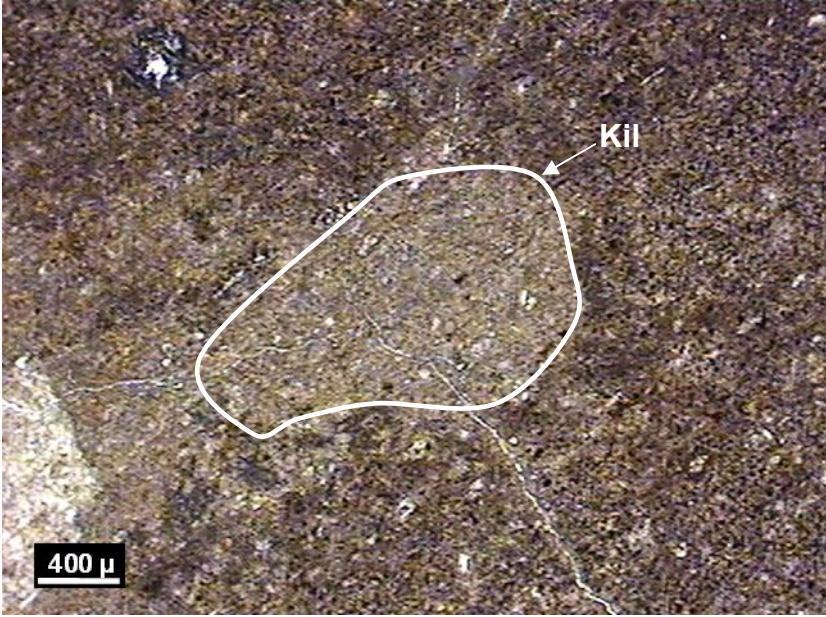
Şekil 4.1 Big-A örneği polarizan mikroskop görüntüsü. Çok ince taneli örnekte Biyotit (B) ve Kuvars (K) kristalleri



Şekil 4.2 Big-B örneği polarizan mikroskop görüntüsü. Kuvars (K) kristali



Şekil 4.3 Big-B örneği polarizan mikroskop görüntüsü. Cam kıymıkları gözlenmiyor.



Şekil 4.4 Big-B örneği polarizan mikroskop görüntüsü. Kil topanları

Örnek GZ: Felsik Tüf (Gördes)

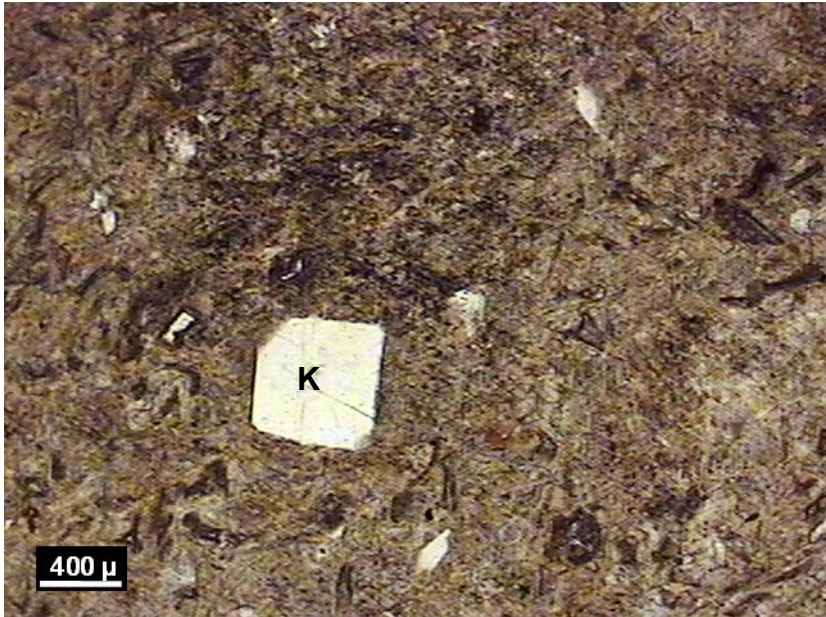
Big-A ve Big-B nolu örneklerden farklı olarak bu örnek daha büyücek taneli, 3-4 mm ye ulaşan volkanik kaya klastlı ve beyaz renklidir.

Mikroskop altında ince taneli bir hamur içinde az yuvarlak-köşeli camsı tuf parçaları, 2-3 mm büyüklüğe ulaşan magmatik korozyonlu kuvars, ikizlenmeli sanidin, 0.5-1 mm uzunluğa ulaşan kahve renkli biyotit taneleri gözlenir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Örneğin yaklaşık %55 kadarı 0.2 mm büyüklüğe ulaşan, köşeli camsı kıymıklardan oluşur (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).

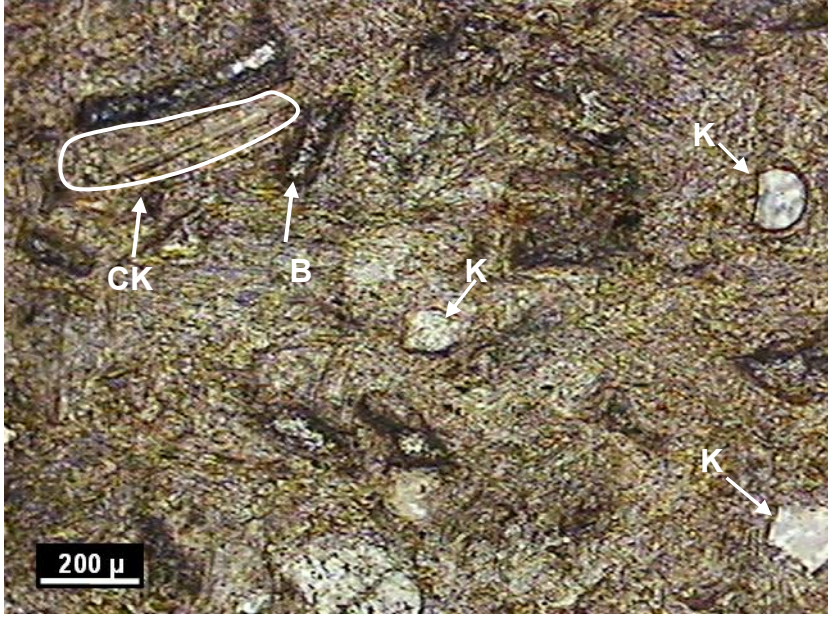
Gerek camsı kıymıklar gerekse hamur mikroskopta seçilebilen büyüklükte zeolit ile replase edilmişlerdir (Şekil 4.8). Zeolitler camsı kıymıklarının ve camsı tuf parçaların kenarında daha iri taneli olmak üzere tüm ince kesit alanında izlenebilir. Bazı camsı parçaların iç bölümünde tipik devitrifiye volkanik cam dokusu korunmuştur.

Diğer örneklerde olduğu gibi örneğin içerdiği zeolit türü X-Işınları Diffraktometresi yöntemi ile klinoptilolit olarak belirlenmiştir.

Örnekteki zeolit içeriği %75 dolayındadır.



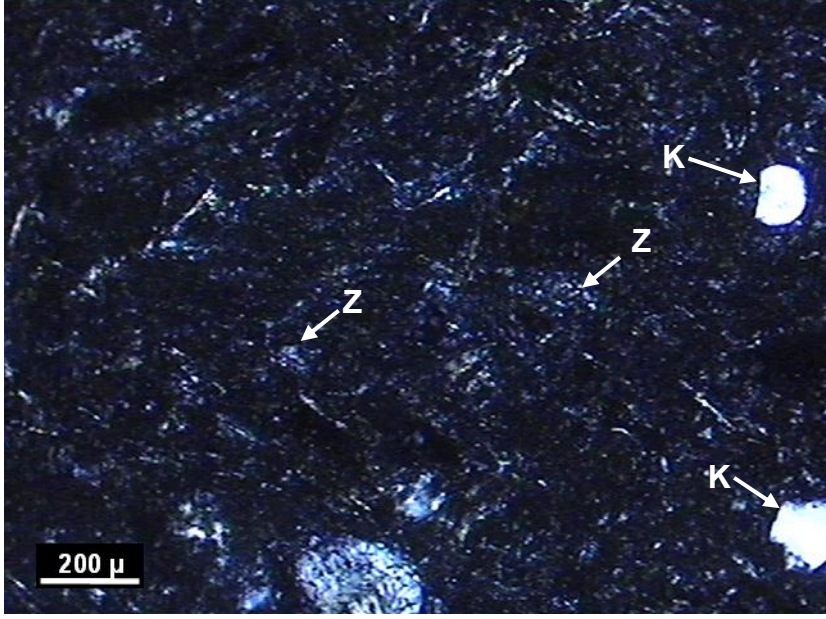
Şekil 4.5 GZ feslik tuf örneği polarizan mikroskop görüntüsü. Köşeli Kuvars (K) tanesi



Şekil 4.6 GZ feslik tuf örneği polarizan mikroskop görüntüsü.. Biyotit (B), Kuvars (K) ve zeolitleşmiş cam kıymığı (CK) (glass chard).



Şekil 4.7 GZ feslik tuf örneği polarizan mikroskop görüntüsü. Kuvars (K) ve zeolitleşmiş cam kıymığı (CK).



Şekil 4.8 GZ feslik tuf örneği polarizan mikroskop görüntüsü (Çapraz Nikol'de) . Kuvars (K) ve zeolit (Z) kristalleri.

4.1.2.2 X-Işınları Difraktometresi Özellikleri

X-Işını kırınım desenlerinin tespiti için, yukarıda numune kodları belirtilen örneklerin her birisinden bir miktar kırılmış ve 800 μm elekten geçen malzeme kullanılmıştır. Örnekler sıkıştırılıp pelet haline getirildikten sonra aşağıda verilen şartlar altında X-Işını kırınım desenleri tespit edilmiştir;

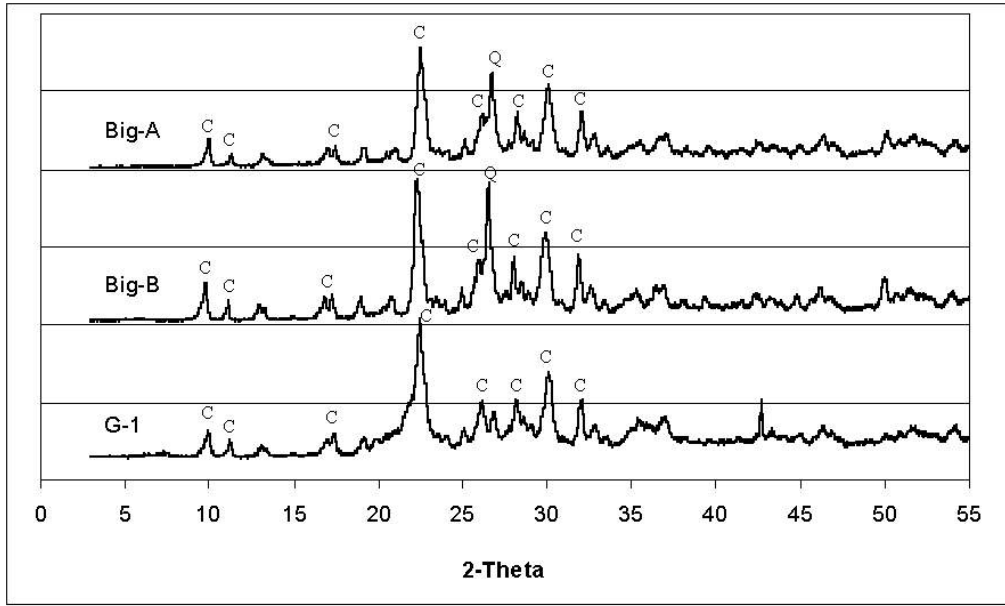
X-Işını: Cu / 40kV / 40mA

Dalga boyu: 1.540562 Å (Alfa-1)

İrdelenen üç örneğin x ışınları difraktometresi analizi Şekil 4.9'da sunulmuştur.

Bu grafikte görüleceği gibi Big-A ve Big-B nolu örneklerde zeolit minerali olarak klinoptilolit ve bunun yanında örnekteki ana orijinal fazı oluşturan kuvars belirlenebilmekte, örnekteki ikinci çokluktaki orijinal fazı oluşturan biyotit gözlenmemektedir.

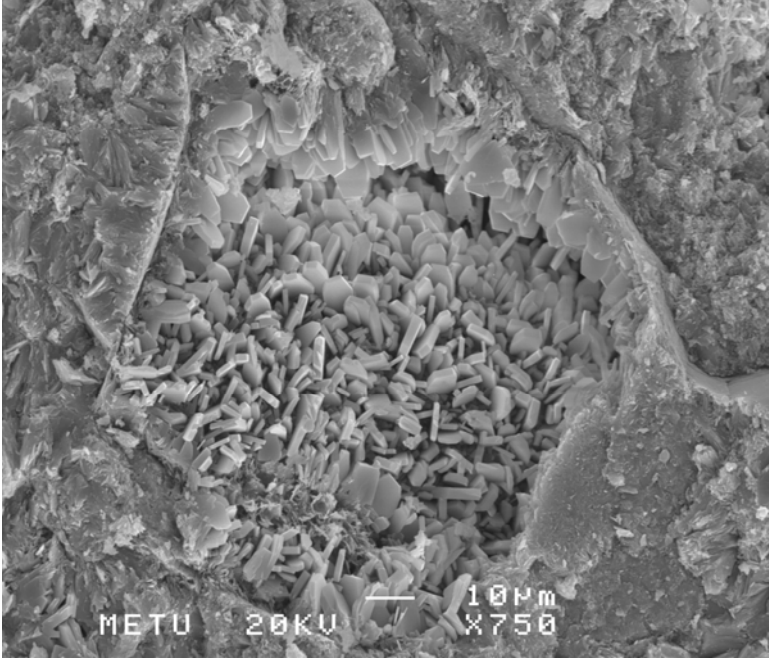
G-1 kodlu örnekte de yine klinoptilolit mineralinin en yaygın mineral olduğu saptanabilmekte, örnekte mikroskopik olarak gözlenen kuvars, biyotit ve sanidin mineralleri ise x-ışınları difraktometresinde tespit edilememektedir.



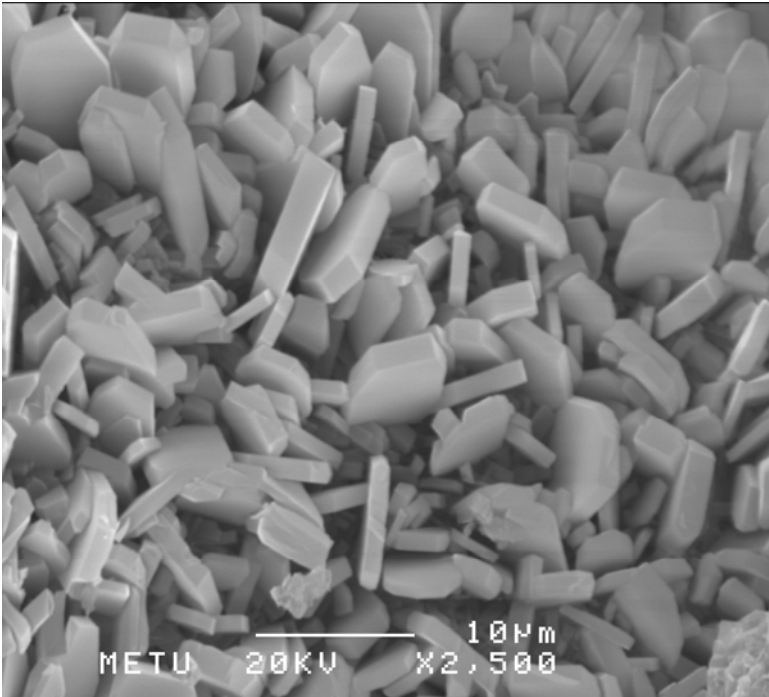
Şekil 4.9. Doğal zeolit örneklerinin XRD kırınım desenleri (Cu /40 kV) (Gördes numunesi G-1 ile gösterilmiştir. C: Klinoptilolit, Q: Kuvars)

4.1.3 Doğal Zeolitlerin Morfolojik Özellikleri

Doğal zeolit örneklerinin mikro morfolojik özellikleri elektron mikroskobu altında incelenmiş ve elde edilen görüntüler Gördes ve Bigadiç zeoliti örnekleri için sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de bazı EDX analizi sonuçları ile birlikte verilmiştir. Gördes zeoliti örneğinde prizmatik şekilli klinoptilolit kristalleri açıkça gözlenmiştir. (Figure 4.10). Bigadiç zeoliti örneğinde ise prizmatik şekilli olanlara (Figure 4.11a) ek olarak yapraksı şekilli klinoptilolit kristalleri de gözlenmiştir (Figure 4.11b).



a) x750 büyütme (Prizmatik klinoptilolit kristalleri)

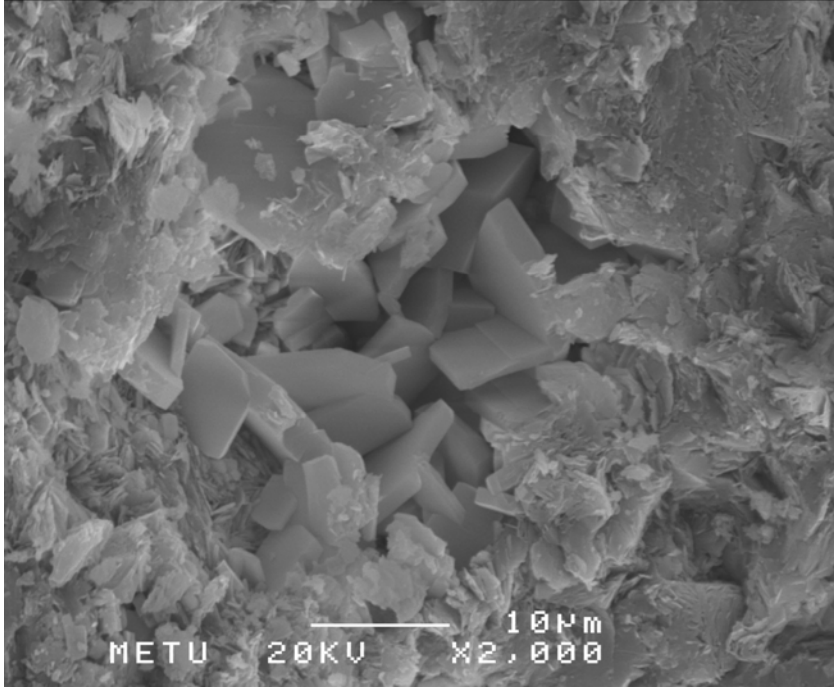


b) x2500 büyütme (Prizmatik klinoptilolit kristalleri)

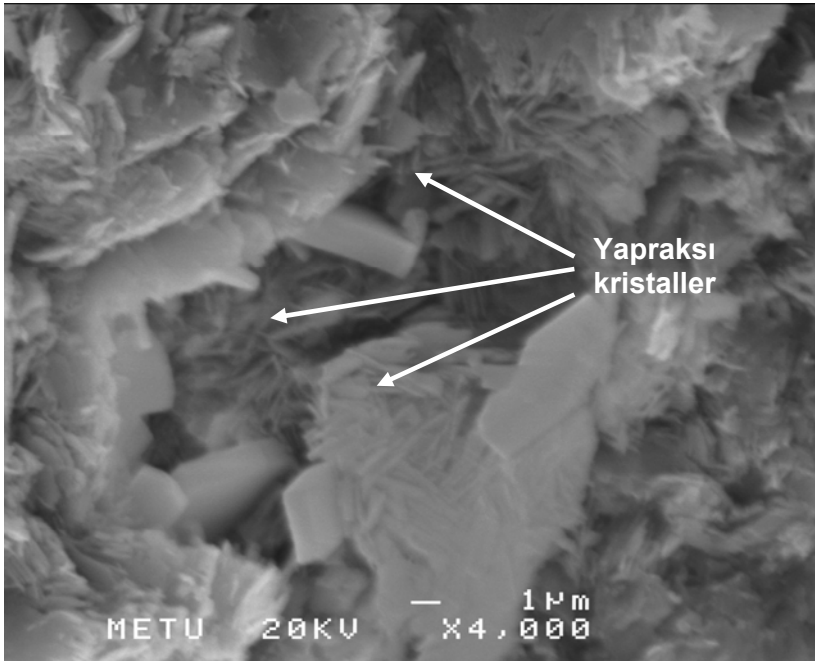
**Oksit Kompozisyonu
(EDX analizi)**

SiO₂: 78.85%
Al₂O₃: 12.99%
CaO: 3.52%
K₂O: 4.64%

Şekil 4.10 Gördes zeoliti örneğinin SEM görüntüsü (öğütülmeden önce)



a) Prizmatik klinoptilolit kristalleri



b) Yapraksı klinoptilolit kristalleri

Şekil 4.11 Bigadiç zeoliti örneğinin SEM görüntüsü (öğütülmeden önce)

**Oksit Kompozisyonu
(EDX analizi)**

SiO₂: 80.09%
Al₂O₃: 12.19%
CaO: 4.27%
K₂O: 2.12

4.1.4 İnce Öğütülmüş Doğal Zeolitlerin Fiziksel Özellikleri

Çalışmanın ilk aşaması olan puzolanik aktivite ile ilgili çalışmalarda kullanılmak üzere iki farklı doğal zeolit örneğinin her birinden, üç farklı inceliğe sahip olacak şekilde toplam 6

numune, örneklerin bilyeli öğütücüde öğütmesi ile elde edilmiştir. İncelik parametresi olarak 45- μ m elekten ASTM C 430 standardına uygun olarak ıslak eleme sonrasında elekten geçen malzeme yüzdesi kullanılmıştır. Her bir örnekten 45- μ m elekten geçen malzeme %70, %80 ve %90 olacak şekilde 3 ayrı incelikte numune elde edilmiştir.

Gördes zeolitinin öğütme işlemlerinde 0-0.8 mm'lik fraksiyon kullanılırken, Bigadiç örneğinin öğütülmesinde; örnek önce kırıcıda kırılmış ve ardından 1.7 mm 'lik elekten geçirildikten sonra öğütücüye yerleştirilmiştir.

Yukarıda bahsedilen yöntemle öğütülerek elde edilen ve dayanım aktivite indeksleri tespit edilecek kullanılacak olan numunelerin özgül ağırlıkları ile Blaine incelikleri ölçülmüş ve Tablo 4.5'de verilmiştir. Hazırlanan numuneler doğal zeolitinin orijinine ve 45- μ m elekten geçen malzeme yüzdesine göre isimlendirilmişlerdir (Örneğin GZ-70: 45- μ m elekten geçen miktarı %70 olan Gördes zeolitini temsil etmektedir.)

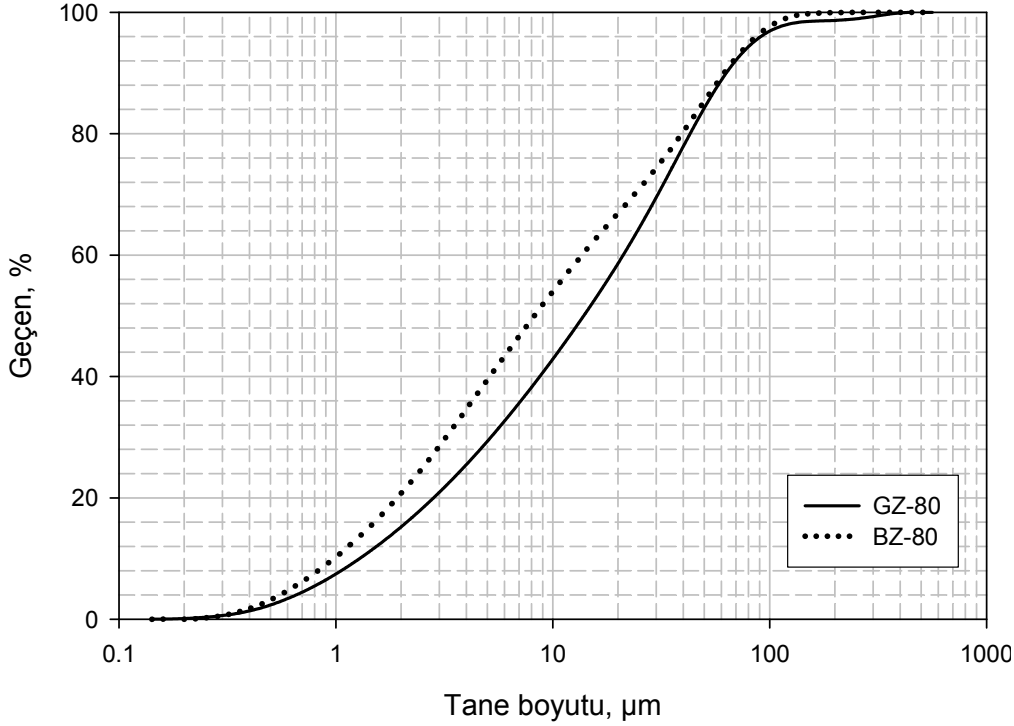
Tablo 4.5 Öğütülmüş doğal zeolit örneklerinin özgül ağırlık ve Blaine incelik değerleri

Numune	Özgül ağırlık	Blaine İnceliği, m^2/kg
GZ-70	2.19	821
GZ-80	2.16	995
GZ-90	2.21	1520
BZ-70	2.19	1031
BZ-80	2.19	1288
BZ-90	2.20	1782

Tablo 4.5'de gösterilen ince öğütülmüş doğal zeolitlerden GZ-80 ve BZ-80 etiketli numuneler, dayanım aktivite indeksi haricindeki detaylı puzolanik aktivite çalışmalarında kullanılmak üzere seçilmiş ve bu numunelerin BET yüzey alanları ve lazer kırınım tekniği ile tane boyut dağılımları tespit edilmiştir. BET yüzey alanları ile tane boyut dağılımından elde edilmiş medyan tane boyutları Tablo 4.6'da, tane boyut dağılımı eğrisi ise Şekil 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.6 GZ-80 ve BZ-80'nin fiziksel özellikleri

	GZ-80	BZ-80
BET yüzey alanı, m ² /kg	35500	26870
Medyan tane boyutu, µm	13.9	8.2



Şekil 4.12 GZ-80 ve BZ-80'nin tane boyut dağılımları

Tablo 4.5 ve Şekil 4.12'den görüldüğü gibi, eşit “45-µm dan geçen %” değerlerine sahip olacak şekilde öğütülmüş Gördes ve Bigadiç zeolitlerinden, Gördes zeoliti (GZ-80) Bigadiç zeolitine kıyasla daha kaba bir tane boyut dağılımına sahipken, GZ-80 göreceli olarak daha yüksek bir BET yüzey alanına sahiptir. Bu durum muhtemelen Gördes zeolitinin Şekil 4.10'da gösterilen SEM görüntüsünde görülen prizmatik kristallerden oluşan yapısıyla ilintilidir.

4.2 Diğer Puzolanik Malzemelerin Karakterizasyonu

4.2.1 Kimyasal Kompozisyon

İncelenen örneklerin kimyasal karakterizasyonunun somutlaştırılması ve bundan sonra bu alanda yapılacak çalışmalarda bir standardizasyonun sağlanabilmesi için doğal zeolit örnekleri yanında en önemli girdiyi oluşturan puzolanik malzemenin de kimyasal birleşimi belirlenmiştir. Kimyasal birleşimin belirlenmesinde önce geleneksel yaş kimyasal analiz

yöntemleri kullanılmış, ardından doğal zeolit örnekleri ile korelasyon açısından bu örnekler de Kanada da ACME jeokimya laboratuvarlarında majör oksitler, iz ve nadir toprak elementleri açısından analiz ettirilmişlerdir.

Bu analizler (Tablo 4.7 ve Tablo 4.8) karşılaştırıldığında ilk dikkati çeken unsur, yaş analizde bazı fazların büyük ölçüde çözülmeden kalmış olmasıdır. Bu durum, analizlerin sağlığı bakımından kuşku uyandırmaktadır.

Tablo 4.7 Diğer puzolanik malzemelerin kimyasal kompozisyonları (Yaş analiz)

	Ağırlıkça %					
	AP	BP	ÇTUK	ÇYUK	SUK	SD
SiO ₂	54.98	62.23	55.9	49.8	57.86	a.e
Al ₂ O ₃	16.38	15.16	27.20	15.78	22.62	a.e
Fe ₂ O ₃	6.32	3.27	6.16	9.72	6.88	a.e
CaO	8.10	4.93	2.20	12.04	4.08	a.e
MgO	0.59	1.51	3.03	4.6	4.32	a.e
SO ₃	0.50	0.50	0.36	3.13	0.63	a.e
Na ₂ O	1.50	3.50	a.e	a.e	a.e	a.e
K ₂ O	2.10	2.40	a.e	a.e	a.e	a.e
Kızdırma kaybı	9.61	6.12	1.23	0.37	2.75	a.e
Çözünmeyen kalıntı	61.73	86.18	92.72		70.03	a.e

a.e: Analiz edilmedi

AT: Aşkale doğal puzolanı, BP: Bursa doğal puzolanı, CTUK: Çatalağzı termik santrali uçucu külü, CYUK: Çayırhan termik santrali uçucu külü, SUK: Sugözü termik santrali uçucu külü, USD: Yoğunlaştırılmamış silis dumanı (Elkem Marka)

İki farklı yöntem ile sağlanan veriler birlikte değerlendirildiğinde, Aşkale ve Bursa doğal puzolanlarının silis içerikleri yanında Fe₂O₃, CaO, toplam alkali (K₂O+Na₂O) ve uçucu içerikleri arasında farklılıklar bulunduğu gözlenmektedir.

Uçucu küllerde Çatalağzı örnekleri diğer iki örneğe göre yüksek SiO₂, Al₂O₃ ve K₂O içeriğine karşılık düşük MgO ve çok düşük CaO içeriği ile karakteristiktir. İncelenen uçucu küllerde en düşük alumina, ve en yüksek demir, toplam alkali değerlerini ise Çayırhan örnekleri vermektedir.

Tablo 4.8 Diğer puzolanik malzemelerin kimyasal kompozisyonları (ACME, ICP-MS Metodu ile ölçülen)

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	K.K	Toplar
Örnek	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
AT	53.55	14.01	5.61	2.06	6.22	1.02	1.32	0.73	0.28	0.08	14.8	99.68
BP	61.56	15.46	2.96	1.42	2.9	3.76	2.39	0.41	0.12	0.06	8.8	99.85
CYUK	49.8	14.31	9.87	3.73	11.67	5.09	2	0.76	0.48	0.09	1.8	99.65
CTUK	56.46	26.03	5.97	2.35	1.8	0.42	4.49	1.11	0.14	0.08	0.9	99.77
SUK	49.47	21.36	6.23	2.48	10.54	0.77	1.82	0.99	0.74	0.06	5.2	99.68
USD	95.25	0.55	0.17	0.55	0.21	0.17	1.03	<.01	0.11	0.02	1.9	99.96

AT: Aşkale doğal puzolanı, BP: Bursa doğal puzolanı, CTUK: Çatalağzı termik santrali uçucu külü, CYUK: Çayırhan termik santrali uçucu külü, SUK: Sugözü termik santrali uçucu külü, USD: Yoğunlaştırılmamış silis dumanı (Elkem Marka)

Silis dumanı (fume) için analizi yapılan örnek ise %95 kadar SiO₂ içermekte, K₂O'ü %1 dolayında olup diğer birleşenleri ise < % 1 olarak belirlenmektedir.

Öte yandan, doğal puzolan, uçucu kül ve silis dumanı örneklerinin iz element ve nadir toprak element içerikleri de araştırılmıştır (Tablo 4.9).

Tablo 4.9 Diğer puzolanik malzemelerin iz ve NTE kompozisyonları (ACME, ICP-MS Metodu ile ölçülen)

ELEMENT	Ba	Be	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr
Numune	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
AT	1139.3	2	8.3	1.4	13.6	4.5	9.4	33.1	1	1850.8
BP	1024.6	2	3.3	6	14.2	5.1	7.6	81.7	2	314.3
CYUK	556.6	2	27.3	8.7	19.4	6.5	21.2	58.7	4	442
CTUK	1219.1	6	31.5	31.8	37.7	6.6	20.8	214.1	8	348.3
SUK	1280.7	6	26	6.8	40.9	6.7	20.1	78.2	6	1062.2
USD	14.7	<1	1.1	2	9.3	<.5	<.5	31.2	2	30.1

AT: Aşkale doğal puzolanı, BP: Bursa doğal puzolanı, CTUK: Çatalağzı termik santrali uçucu külü, CYUK: Çayırhan termik santrali uçucu külü, SUK: Sugözü termik santrali uçucu külü, USD: Yoğunlaştırılmamış silis dumanı (Elkem Marka)

Tablo 4.9 (Devam ediyor)

ELEMENT	Sm	Eu	Gd	Th	U	V	W	La	Y	Zr	Ce	Pr
Numune	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
AT	5	1.36	4.64	10.2	2.5	92	1.3	26.2	25.6	153.3	52	6.62
BP	5.6	1.24	4.65	24.3	6	17	3	36.8	29	167.4	69.2	8.01
CYUK	4.3	1	3.64	15.3	11.4	175	13.3	25.6	19.5	239.9	49.6	5.89
CTUK	9.4	2.01	7.7	31.8	11.3	266	6.1	52.9	43.4	225	107.4	13.15
SUK	9.3	1.9	8.09	22.1	10.6	300	4.5	57.7	47.5	224.3	116.4	13.71
USD	0.1	<.05	0.07	0.1	0.1	<.5	0.1	<.5	0.2	1.4	0.5	0.07

Tablo 4.9 (Devam ediyor)

Elm.	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Mo	Cu	Pb	Zn
Num.	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
AT	0.84	4.72	0.88	2.61	0.4	2.56	0.41	0.5	17.5	13.2	58
BP	0.89	5.02	0.95	3	0.44	3.17	0.5	0.8	8.7	7.7	28
CYUK	0.64	3.56	0.68	1.9	0.29	1.95	0.3	11	44.4	28.4	78
CTUK	1.44	7.79	1.49	4.37	0.6	4.33	0.67	5.9	24.2	10.6	20
SUK	1.56	8.26	1.6	4.7	0.69	4.23	0.66	17	29.5	21.2	91
USD	0.01	0.06	<.05	<.05	<.05	0.25	0.01	0.1	6.7	33	639

Tablo 4.9 (Devam ediyor)

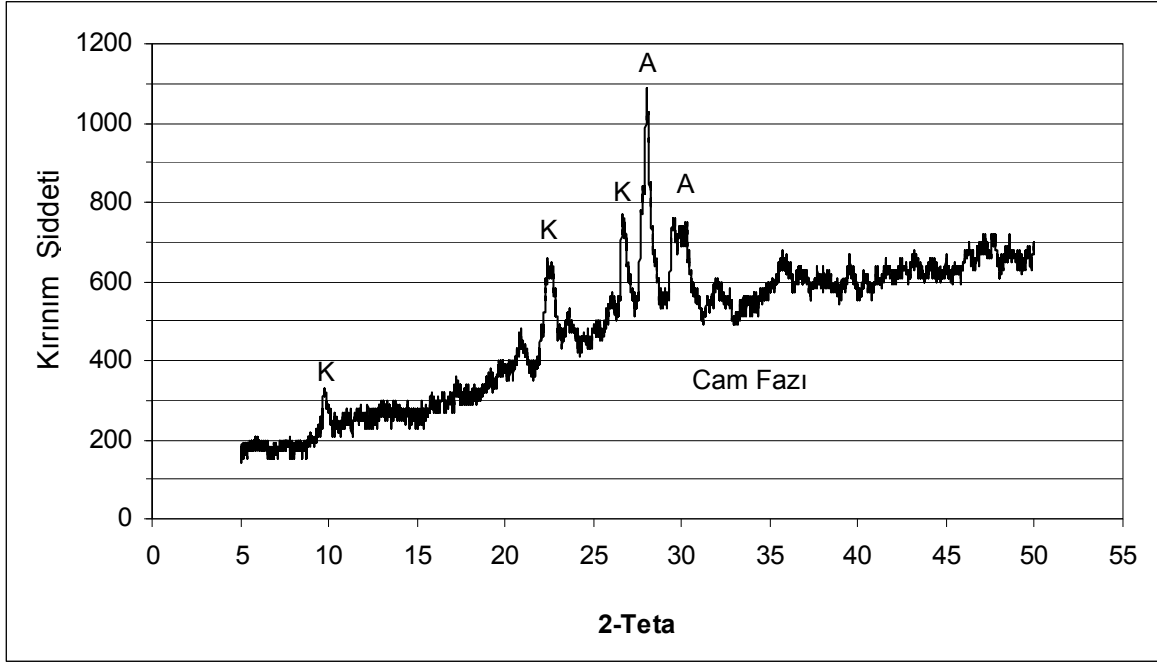
Elm.	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au	Hg	Tl	Se	Nd	Ni	Ta
Num.	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
AT	10.7	0.1	0.1	0.1	<.1	2.1	0	0.2	<.5	27.4	4.6	0.7
BP	1.9	0.1	0.1	0.1	<.1	0.9	0	0.1	<.5	31.1	3.9	0.4
CYUK	240.3	0.4	2	0.7	<.1	1.1	0	0.3	2.9	24.1	421	1.2
CTUK	25.1	0.1	2.4	0.4	<.1	1.9	0.1	0.2	1.6	53.1	15.3	1.6
SUK	27.4	1.4	2.6	1.2	<.1	<.5	0.3	0.5	21.1	53.5	46.6	1.5
USD	8.5	0.2	0.8	0.5	<.1	<.5	0	0.3	2.2	<.4	1	<.1

Bu analitik veriler değerlendirildiğinde Çayıralan Uçucu Külü göreceli yüksek ağır metal (As, Ni, Cu, Pb) ve düşük Sr ve Ba içerikleri ile diğer örneklerden ayrılmaktadır.

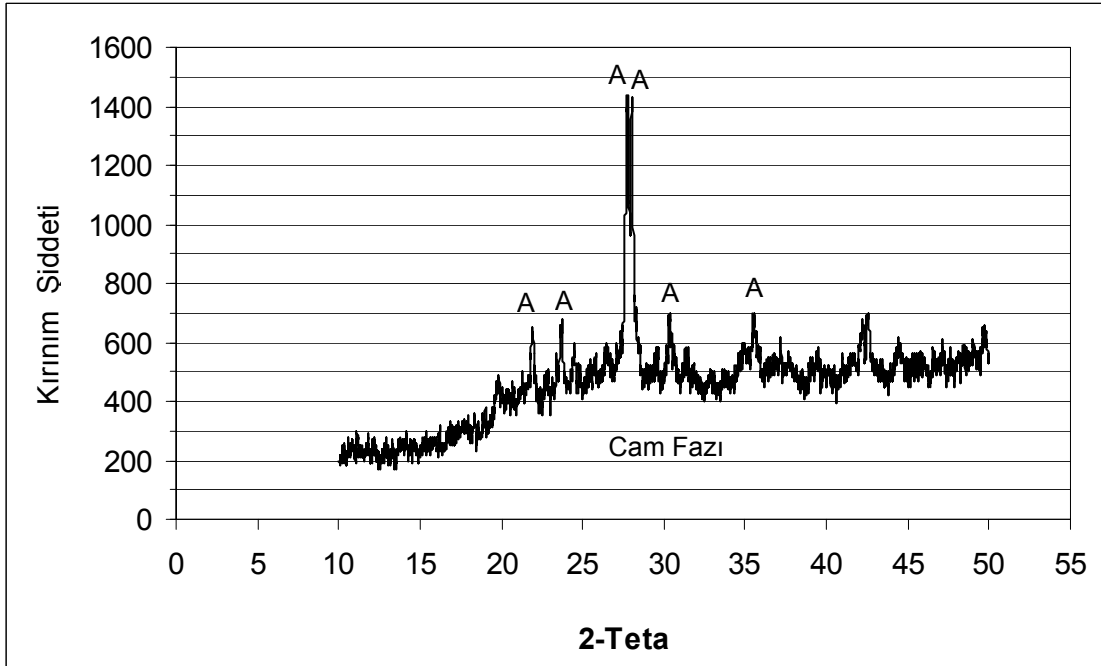
İz ve NTE lerin henüz betondaki davranışları üzerinde bir çalışma yapılmamıştır ancak bu analizlerin ilerideki çalışmalar için bir kaynak olabileceği düşünülmektedir.

4.2.2 XRD Analizleri

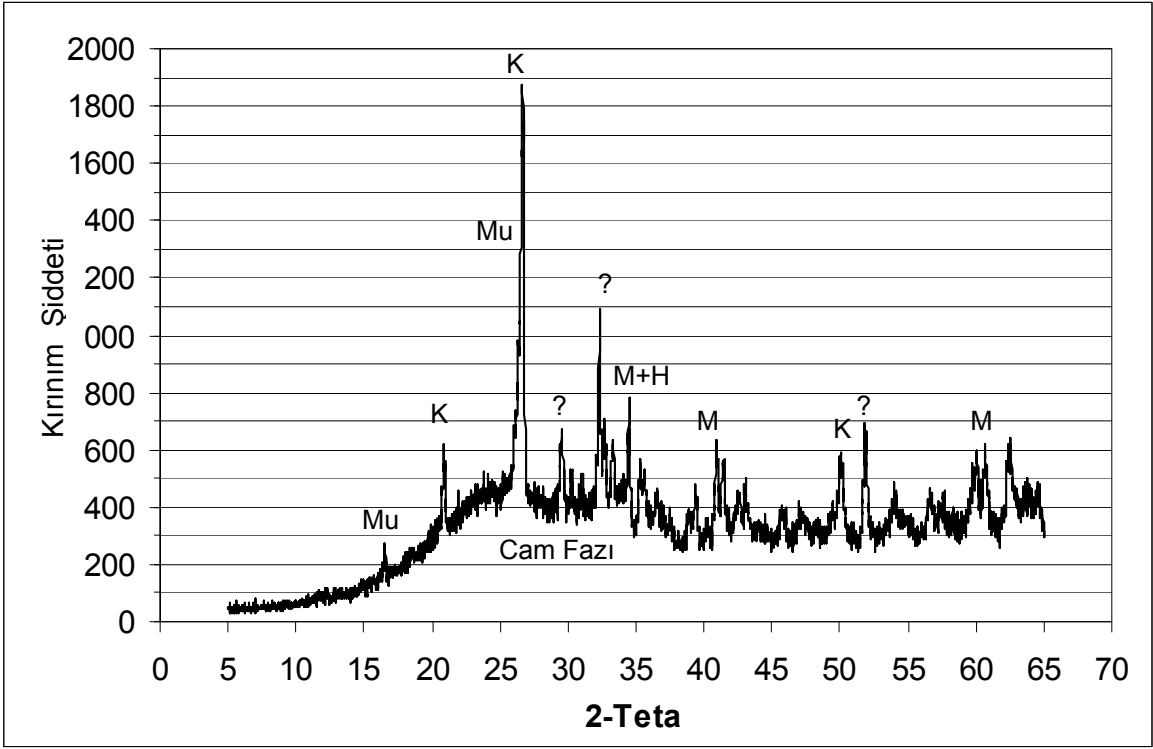
AT, BP, SUK, CTUK, ve USF'nin mineralojik kompozisyonları XRD (X-Ray Diffraction, X-Işını Kırınımı) metoduyla tespit edilmiş ve X-Işını kırınım desenleri, tanımlanmış fazlarla birlikte Şekil 4.13-Şekil 4.17'de verilmiştir. XRD kırınım desenlerinde piklerin tabanını oluşturan arka plandaki yükselme cam fazına işaret ettiği için, arka plan yükselmelerinin bulunduğu bölgeler "cam fazı" olarak işaret edilmiştir.



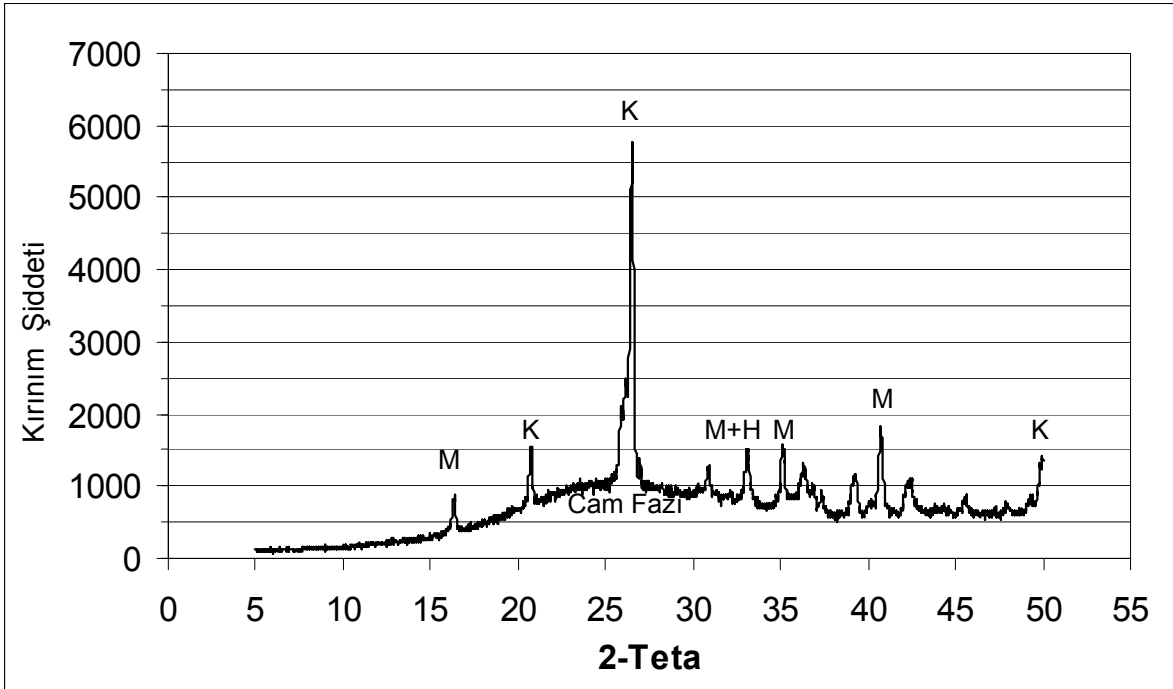
Şekil 4.13. AP doğal puzolanik malzemesinin XRD deseni ve tanımlanmış fazları (K: Klinoptilolit, A: Albit)



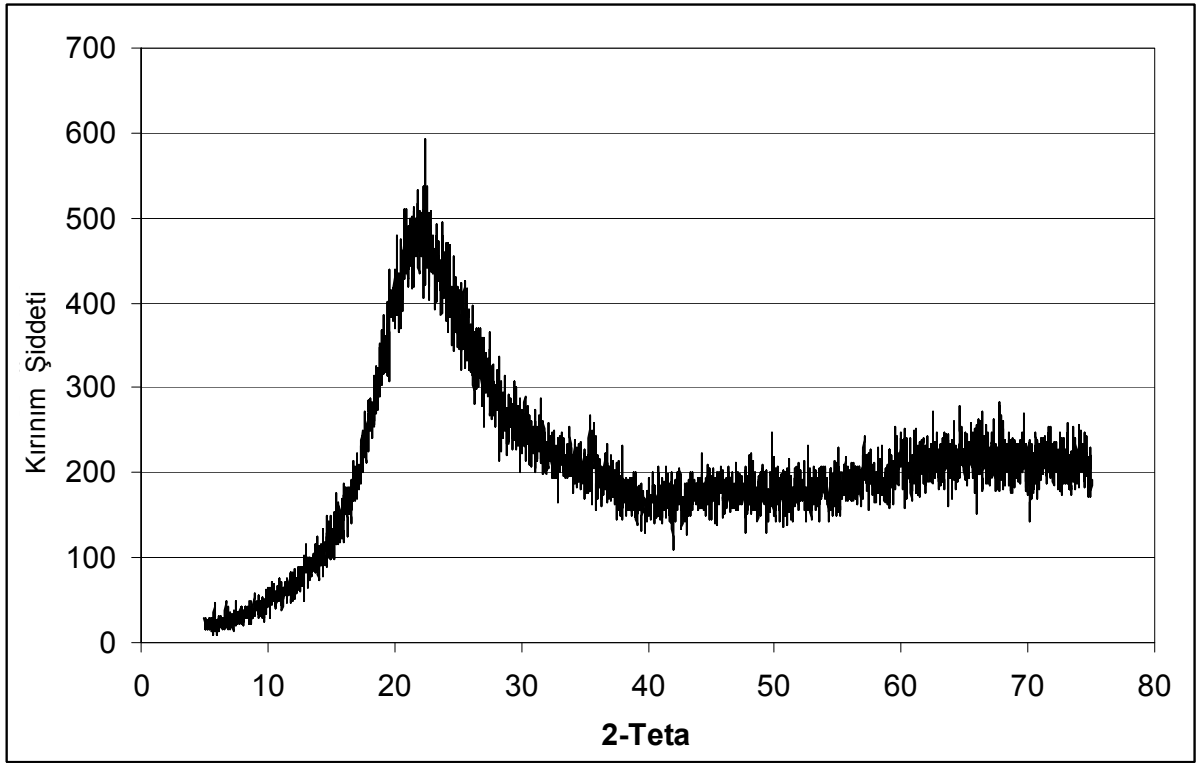
Şekil 4.14 BP doğal puzolanik malzemesinin XRD deseni ve tanımlanmış fazları (A: Albit)



Şekil 4.15 SUGÖZÜ UÇUCU KÜLÜ (SUGÖZÜ UÇUCU KÜLÜ) uçucu külünün XRD deseni ve tanımlanmış fazları (K: Kuvars, M: Mullit, H:Hematit,?: Tanımlanamadı)

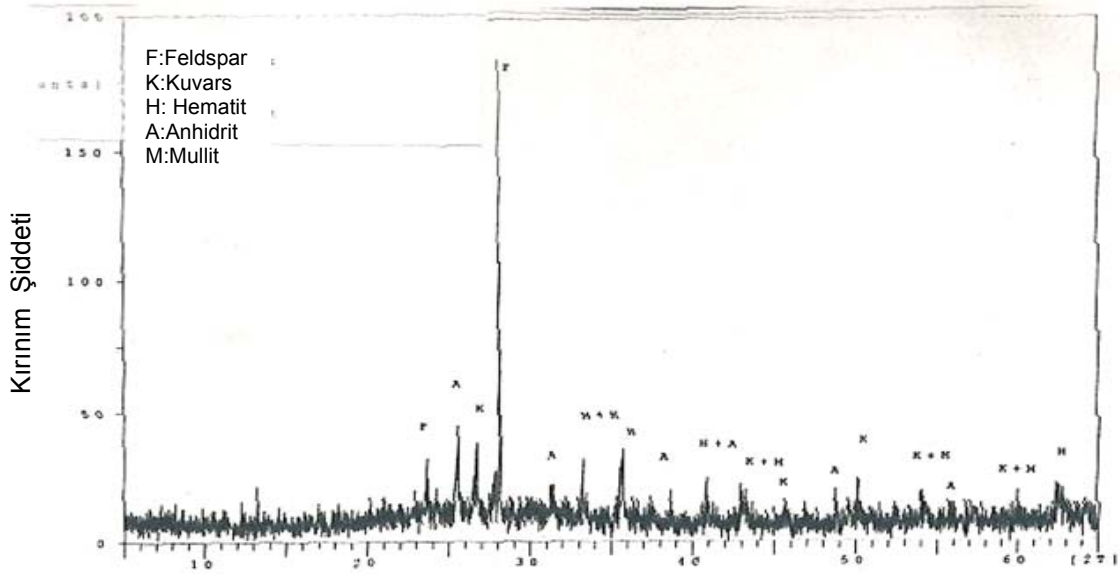


Şekil 4.16 ÇATALAĞZI UÇUCU KÜLÜ (ÇATALAĞZI UÇUCU KÜLÜ) uçucu külünün XRD deseni ve tanımlanmış fazları (K: Kuvars, M: Mullit, Hematit)



Şekil 4.17 USD (Yoğunlaştırılmamış Silis Dumanı) silis dumanının XRD deseni

ÇYUK uçucu küllünün mineralojik analizine yönelik XRD deseni, ilgili termik santrale ait uçucu küller hakkındaki literatürden alınarak Şekil 4.18’de gösterilmiştir [TÜRKER ve diğerleri, 2004].



Şekil 4.18 ÇYUK (Çayırhan Uçucu Külü) uçucu külüne ait XRD kırınım deseni ve tanımlanmış fazları [TÜRKER ve diğerleri, 2004].

Yukarıda verilen X-ışını kırınım desenlerine göre doğal puzolanların cam fazının (amorf) yanı sıra bazı kristal fazlar içerdiği gözlenmiştir.

Uçucu kül örneklerin ise cam fazının yanı sıra, uçucu küllerde genellikle gözlenen kuvars, mullit, hematit gibi fazlardan oluştuğu gözlenmiştir.

Tamamen reaktif silisyumdan oluşan silis dumanının(SD) amorf yapısı sadece yükselip alçalan arka plandan oluşan ve herhangi bir kristal pikin yer almadığı x-ışını kırınım deseniyle (Şekil 4.17) açıkça gözlenmiştir.

4.2.3 Fiziksel Özellikler ve Reaktif SiO₂ İçeriği

Karşılaştırma amacıyla kullanılan puzolanik malzemelerin etiket isimleri ve 45-µm elekten geçen % değerleri ve Blaine incelikleri, malzemelerin açıklamaları ile birlikte Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

Tablo 4.10 Diğer puzolanik malzemelerin temel fiziksel özellikleri

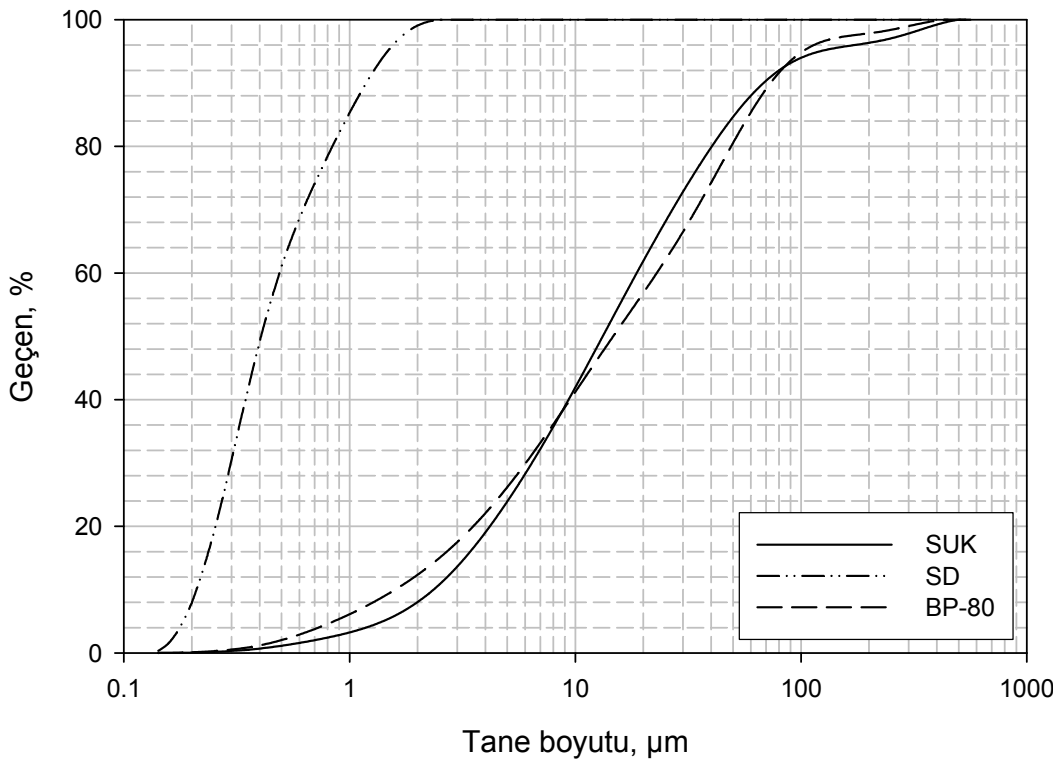
Numune	Tanım	Özgül Ağılık	Blaine m ² /kg	45-µm Geçen %
AP-70	Öğütülmüş Aşkale doğal puzolanı , 45-µm elekten geçen: %70	2.35	576	71
AP-80	Öğütülmüş Aşkale doğal puzolanı , 45-µm elekten geçen: %80	2.26	670	80
AP-90	Öğütülmüş Aşkale doğal puzolanı , 45-µm elekten geçen: %90	2.25	977	90
BP-80	Öğütülmüş Bursa doğal puzolanı, 45-µm elekten geçen: %80	2.36	615	79
ÇTUK	Çatalağzı termik santrali uçucu külü	1.93	262	64
ÇYUK	Çayırhan termik santrali uçucu külü	1.92	218	55
SUK	Sugözü termik santrali uçucu külü	2.37	388	84
SD	Yoğunlaştırılmamış silis dumanı (Elkem Marka)	2.18	5684	88

Tablo 4.9 da verilen malzemelerin tümü Dayanım Aktivite İndeksi açısından doğal zeolitler ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, ancak detaylı puzolanik aktivite değerlendirmesini kapsayan testler bu malzemelerde seçilen bir uçucu kül (SUK), bir silis dumanı (SD) ve bir zeolitik olmayan doğal puzolan (BP-80) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Detaylı puzolanik aktivite karşılaştırmasında kullanılan bu malzemelerin reaktif SiO₂ içerikleri, BET yüzey

alanları ve tane boyut dağılımından hesaplanan medyan tane boyutları Tablo 4.11’de, tane boyut dağılımı eğrileri ise Şekil 4.15’de gösterilmiştir.

Tablo 4.11 Seçilmiş puzolanik malzemelerin özellikleri

	SD	SUK	BP-80
Reaktif SiO ₂ içeriği, %	94.26	49.47	61.56
BET yüzey alanı, m ² /kg	18780	3380	24650
Medyan tane boyutu, µm	0.4	13	15



Şekil 4.19 Seçilmiş puzolanik malzemelerin tane boyut dağılımı eğrileri

Tablo 4.10 ve Şekil 4.19’da yer alan verilerden, silis dumanının, ince öğütülmüş doğal zeolitlere kıyasla (Tablo 4.6, Şekil 4.12) çok daha ince bir tane dağılımına sahip olmasına rağmen, doğal zeolitlerin BET yüzey alanının silis dumanından daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bunu yanı sıra, ince öğütülmüş zeolitik olmayan BP-80 doğal puzolanının BET yüzey alanının BZ-80 zeolitine benzer ve GZ-80 zeolitinden daha düşük olduğu gözlenmektedir. Öte yandan, SUK uçucu kül numunesinin BET yüzey alanının doğal zeolitlere kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir.

4.3 Puzolanik Aktivite

4.3.1 Portland Çimentosu ile Dayanım Aktivite İndeksi (ASTM C 311)

Doğal zeolitler ile çalışmada kullanılan diğer mineral katkı malzemelerinin su ihtiyaçları ve 7 günlük,28 günlük dayanım aktivite indeksleri Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12 Mineral katkı malzemelerinin dayanım aktivite indeksleri (ASTM C 311)

Mineral Katkı Malzemesi	Su İhtiyacı, %	7-günlük Dayanım Aktivite İndeksi,%	28-günlük Dayanım Aktivite İndeksi,%
GZ-70	118	67	82
GZ-80	120	71	84
GZ-90	118	72	99
BZ-70	110	78	82
BZ-80	112	79	100
BZ-90	113	83	107
AP-70	107	75	91
AP-80	110	79	99
AP-90	114	75	101
BP-80	113	71	80
ÇTUK	103	80	90
ÇYUK	97	76	87
SUK	101	86	93
SD*	145*	73*	91*

*ASTM standartları silis dumanının aktivitesinin tespiti için farklı bir test metodu önermesine rağmen (ASTM C 1240), karşılaştırma amacıyla diğerleriyle aynı test metodu uygulanmıştır

Su İhtiyacı

Önemli miktarda camsı faz içerdiği XRD kırınım deseninden anlaşılan AP doğal puzolanının inceliği arttıkça su ihtiyacında fark edilir ölçüde artışlar gözlenirken, Gördes ve Bigadiç zeolitleri için incelik artışının su ihtiyacını çok fazla artırmadığı gözlenmiştir. Eşdeğer “45-µm elekten geçen yüzde” değerlere sahip AP puzolanları ile karşılaştırıldıklarında, öğütülmüş doğal zeolitlerin su ihtiyacının daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durum eşdeğer “45-µm elekten geçen yüzde” değerine öğütülmüş doğal zeolitlerin çok daha fazla yüzey alanına (Tablo 4.6 ve Tablo 4.11) sahip olmalarıyla ilişkilendirilebilir.

Eşdeğer “45-µm elekten geçen yüzde” değerleri için, öğütülmüş Gördes zeolitinin su ihtiyacının Bigadiç zeolitinkinden daha fazla olduğu gözlenmektedir ve bunun Bigadiç

zeolitinin Gördes zeolitine kıyasla daha düşük olan BET yüzey alanıyla ilgili olabileceği düşünülmektedir.

Öğütülmüş doğal zeolitlerin su ihtiyacının, çalışmada kullanılan uçucu küllerden çok daha fazla olduğu gözlenmiştir. Uçucu küller genellikle düzgün küresel taneciklerden oluştukları için, uçucu kül içeren harç ve betonların su ihtiyaçlarını çok fazla artırmadıkları, hatta belli kullanım miktarlarına kadar bağlayıcı sistemlerin su ihtiyacını azaltabildikleri iyi bilinmektedir.

Dayanım Aktivite İndeksi

Öncelikle dayanım aktivite indeksinin direkt olarak sadece puzolanik aktiviteyi (yani Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcı jeller oluşturma) ölçen bir test metodu olmadığını, aynı zamanda harç sistemine eklenen ince öğütülmüş malzemenin mikro-yapı içerisinde (özellikle çimento hamuru-agrega arayüzünde) dolgu malzemesi (filler) olarak çalışmasıyla, basınç dayanımına sağladığı katkıyı da içerdiğini belirtmek gerekir. Yani dayanım aktivite indeksi puzolanik aktivite ve dolgu etkisini birlikte içeren ve mineral katkıların genel performansını ölçmede kullanışlı bir parametredir.

Öğütülmüş doğal zeolitlerin her ikisi için de özellikle 28 günlük dayanım aktivite indekslerinin incelik artışı ile birlikte önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Dayanım aktivitelerinde önemli yükselmeler sağlayan incelik artışının, su ihtiyaçlarında fazla artışlara sebep olmaması ve doğal zeolitlerin rölatif olarak kolay öğütülebilir olmaları, bu malzemelerin mümkün olduğu kadar yüksek incelik değerlerine öğütülerek kullanılmasının daha avantajlı olabileceğini göstermektedir.

Öğütülmüş Bigadiç zeoliti numuneleri, eşdeğer “45- μm elekten geçen yüzde” değerleri için, Gördes numunelerinden bir miktar daha fazla dayanım aktivitesi göstermiştir. Bu durum muhtemelen, öğütülmüş Bigadiç zeoliti numunelerinin daha ince tane boyut dağılımına sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. GZ-80 ve BZ-80 numunelerinin tane boyut dağılımları ve medyan tane boyutları arasındaki fark sırasıyla Şekil 4.12 ve Tablo 4.5’den açıkça görülmektedir. Daha ince bir tane boyut dağılımı BZ-80 numunesinin filler etkisi kaynaklı basınç dayanımı katkısını artırmaktadır.

Öğütülmüş doğal zeolitlerin dayanım aktivite indekslerinin çalışmada kullanılan diğer doğal puzolanlar ve uçucu küllerle karşılaştırılabilir düzeylerde olduğu görülmüştür. 45-µm elekten geçen yüzde değerleri %80 ve %90 olacak şekilde öğütülmüş Bigadiç ve Gördes zeolitleri diğer doğal puzolanlar ve uçucu küller ile benzer veya daha yüksek dayanım aktivite indeksi göstermişlerdir.

GZ-90, BZ-80 ve BZ-90 öğütülmüş zeolitlerinin yoğunlaştırılmamış silis dumanı örneğinden (SD) daha yüksek 28-günlük dayanım aktivitesi gösterdiği gözlenmiştir. Tamamen aynı prosedürler uygulanarak test edilen silis dumanının bazı doğal zeolitlerden daha düşük dayanım aktivitesi göstermesi, silis dumanın aşırı su ihtiyacı sonucunda doğan yüksek su/bağlayıcı oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak mineral katkıların su ihtiyacı ve dayanıma olan katkılarının bir arada değerlendirildiği bir bakış açısından, yüksek inceliklere öğütülmüş doğal zeolitlerin silis dumanını geçebilen bir performans göstermeleri projenin önemli bulgularından biri olarak ifade edilebilir.

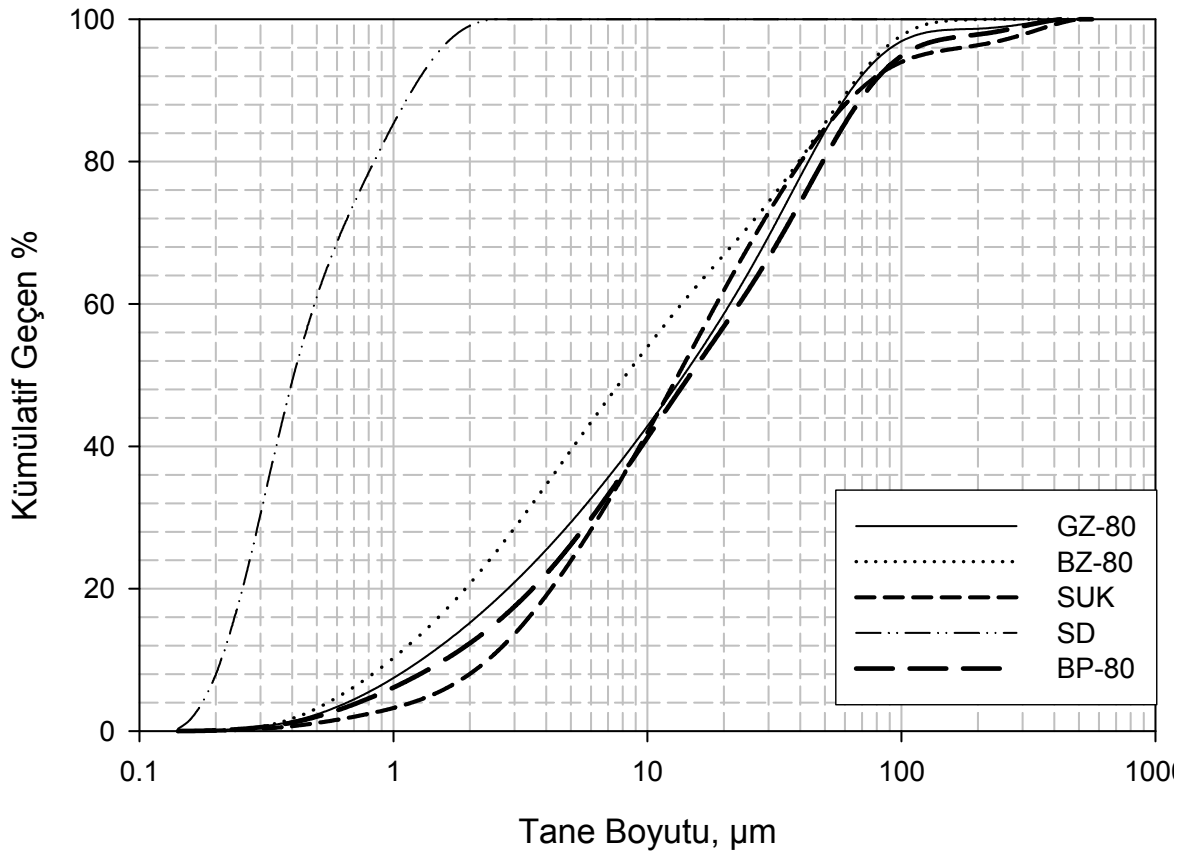
Camsı fazın yanı sıra bir miktar zeolitik faz içerdiği (klinoptilolit) XRD analizinden anlaşılan AP puzolanı da yüksek incelik değerlerinde (AP-80 ve AP-90) silis dumanından daha fazla dayanım aktivitesi göstermiştir. Herhangi bir zeolitik faz içermeyen BP-80 doğal puzolanik malzemesinin dayanım aktivite indeksi ise silis dumanının oldukça altında kalmıştır.

4.3.2 Ca(OH)₂ ile Reaktivite

Detaylı puzolanik aktivite değerlendirmesi için seçilen 2 ayrı öğütülmüş doğal zeolit ve 3 ayrı puzolanik malzemenin, puzolanik aktivite açısından önem taşıyan özellikleri bir arada Tablo 4.13'de yeniden gösterilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin tane boyut dağılımı eğrileri kolay karşılaştırma için bir arada Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

Tablo 4.13 Seçilen puzolanik malzemelerin özellikleri

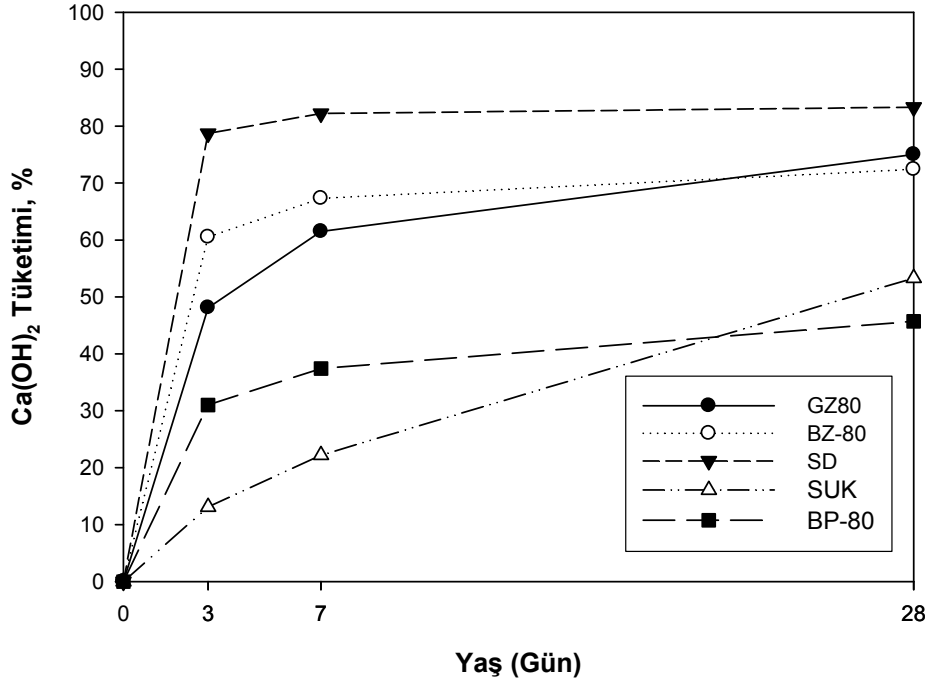
Puzolanik Malzeme	Özgül Ağırlık	45- μm geçen,%	Blaine m^2/kg	Medyan Tane Boyutu, μm	BET Yüzey Alanı, m^2/kg	Reaktif SiO_2 , %
GZ-80	2.16	80	995	13.9	35500	51.29
BZ-80	2.19	80	1288	8.2	26870	54.93
SD	2.18	100	5684	0.4	18780	94.26
SUK	2.37	84	388	13.2	3380	41.15
BP-80	2.36	79	615	14.7	24650	45.63



Şekil 4.20 Seçilen puzolanik malzemelerin tane boyut dağılımları

Doğal zeolitlerin ve karşılaştırma amacıyla kullanılan diğer puzolanik malzemelerin, kireç-puzolan hamurları üzerinde belirli yaşlarda yapılan termal analizler sonucu elde edilen, reaksiyona girerek tükenen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı değerleri Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Şekil 4.21’de gösterilen veriler ışığında aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır;

- Test edilen mineral katkı malzemeleri arasında çalışılan tüm yaşlar için, öğütülmüş Gördes ve Bigadiç zeolitlerinin silis dumanından (SD) sonra en fazla miktarda kireç tüketen mineral katkı malzemeleri olduğu tespit edilmiştir. 28 günlük değerler ele alındığında, silis dumanı ortamdaki Ca(OH)_2 'in yaklaşık %83'ünü tüketirken, bu değerler Gördes (GZ-80) ve Bigadiç (BZ-80) zeolitleri için sırasıyla %75 ve %72, Sugözü uçucu külü (SUK) ve zeolitik olmayan doğal puzolan (BP-80) için ise sırasıyla %53 ve %46 olduğu gözlenmiştir.
- İlk yaşlarda Bigadiç zeoliti, Gördes zeolitinden daha fazla Ca(OH)_2 tüketmesine rağmen, 28. güne kadar Gördes zeoliti aradaki farkı kapatarak Bigadiç zeolitinden bir miktar daha fazla Ca(OH)_2 tüketmiştir. Bigadiç zeolitinin (BZ-80) daha yüksek olan erken yaş puzolanik aktivitesi, Gördes zeolitine kıyasla bir miktar daha fazla olan reaktif SiO_2 içeriğiyle ve daha ince tane boyut dağılımıyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca Ca(OH)_2 tüketim eğrilerinin eğiminden, 28. günden daha ileriki yaşlarda Gördes zeolitinin Bigadiç zeolitinden daha fazla Ca(OH)_2 tüketebileceği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak Ca(OH)_2 tüketimi açısından Gördes zeolitinin daha fazla puzolanik aktiviteye sahip olduğu anlaşılmıştır.
- Uçucu külün ilk yaşlarda diğer mineral malzemelere göre Ca(OH)_2 tüketimi açısından oldukça zayıf kaldığı, ancak 7. gün ile 28. gün arasında daha hızlı bir aktivite göstererek diğer malzemeler ile arasındaki farkın azaldığı ve zeolitik olmayan doğal puzolanı geçtiği görülmektedir. Uçucu küle ait Ca(OH)_2 tüketim eğrisinin 7 ile 28. gün arasındaki eğiminden, uçucu külün doğal zeolitlerle arasındaki farkı daha ileriki yaşlarda kapatabileceği veya onları geçebileceği anlaşılmaktadır.

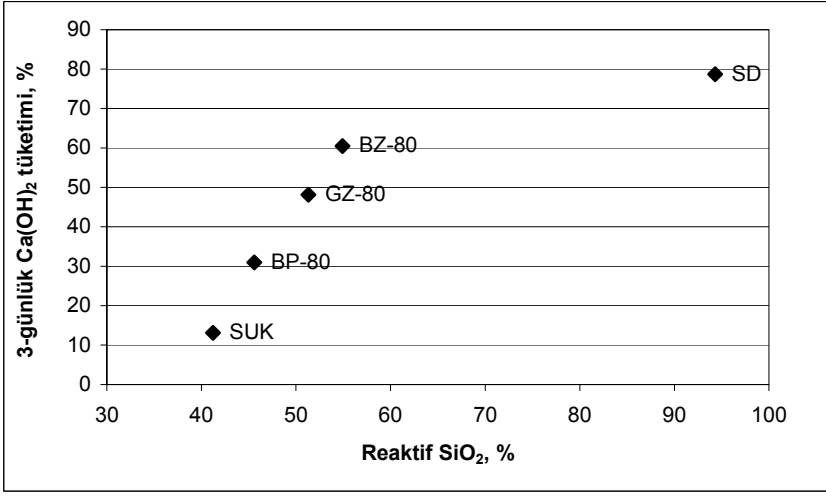


Şekil 4.21 Pozzolanik malzemelerin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketimleri

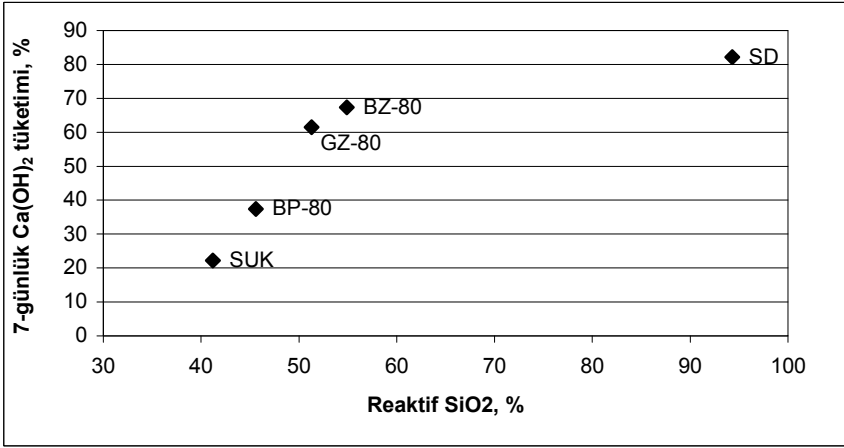
Test edilen pozzolanik malzemelerin özellikleri ile $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketimleri arasındaki muhtemel ilişkiler irdelendiğinde, malzemelerin reaktif SiO_2 içerikleri ile erken yaşlardaki (3 günlük ve 7 günlük) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketimleri arasında belirli bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.22a ve Şekil 4.22b). Ancak bu tür bir ilişkinin 28 günlük $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketimleri için geçerli olmadığı görülmüştür (Şekil 4.22c). Dolayısıyla doğal zeolitlerin ilk yaşlarda gösterdikleri yüksek reaktivitelerinin reaktif SiO_2 içerikleri ile ilgili olduğu, ancak geç yaşlarda diğer başka özelliklerin de etkili olduğu sonucuna varılabilir. Veriler üzerinde gerçekleştirilen iki değişkenli doğrusal regrasyon analizleri sonucunda, 28 günlük $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketim miktarlarının sadece reaktif SiO_2 içeriği ile değil aynı zamanda BET yüzey alanıyla da ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Regrasyon analizi sonucunda elde edilen ilişki şöyledir;

$$28 \text{ günlük kireç tüketimi, \%} = 0.4361 R\text{-SiO}_2 + 0.7025 \text{ BET} + 28.6448 \quad (1)$$

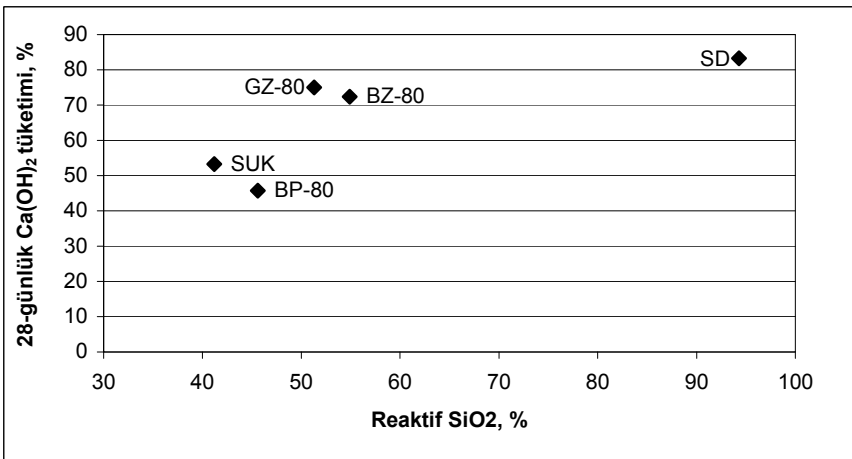
burada $R\text{-SiO}_2$ reaktif SiO_2 içeriğini (%); BET ise BET yüzey alanını (m^2/g) işaret etmektedir.



a) 3 günlük



b) 7 günlük

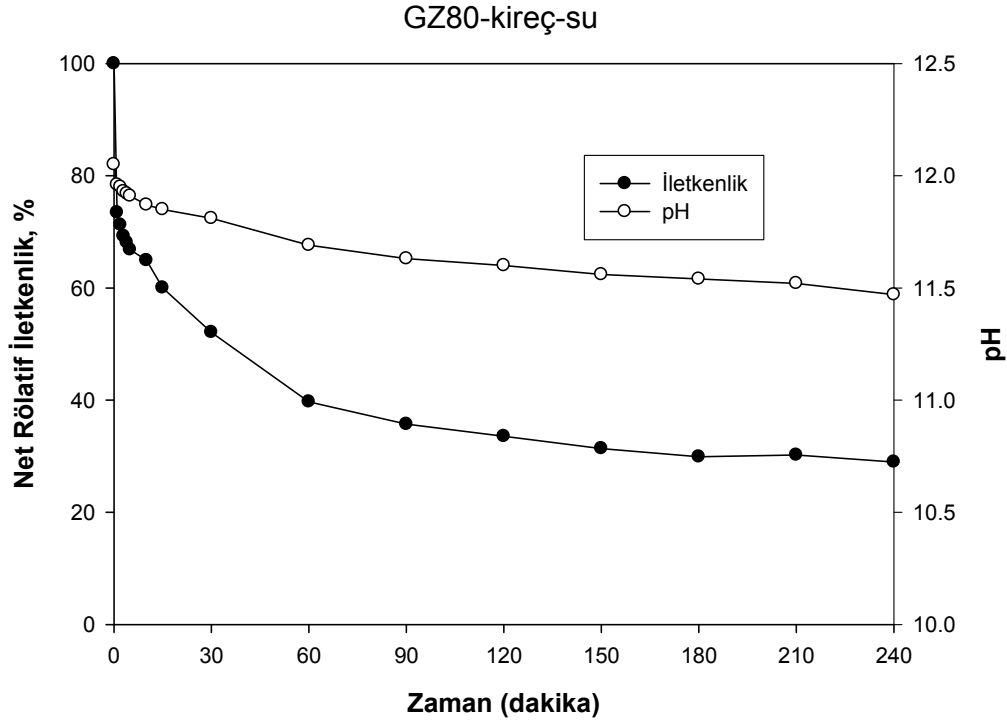


c) 28 günlük

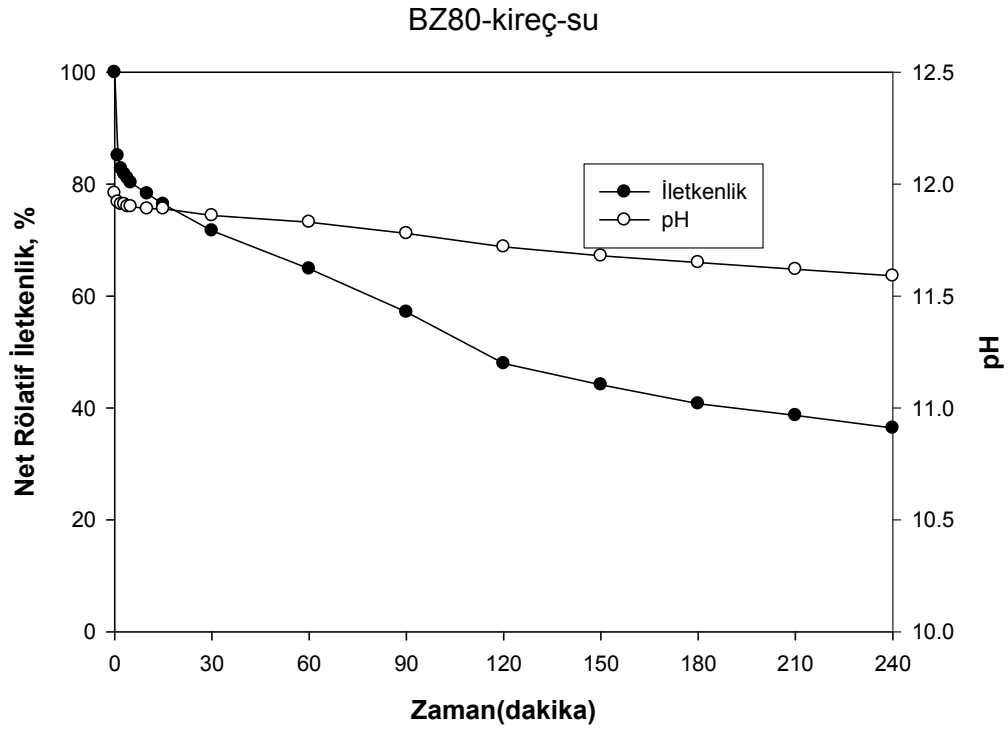
Şekil 4.22 Pozzolanik malzemelerin reaktif SiO₂ içeriği ve Ca(OH)₂ tüketimleri arasındaki ilişki

4.3.3 Elektriksel İletkenlik Ölçümü Yoluyla Puzolanik Aktivite Değerlendirmesi

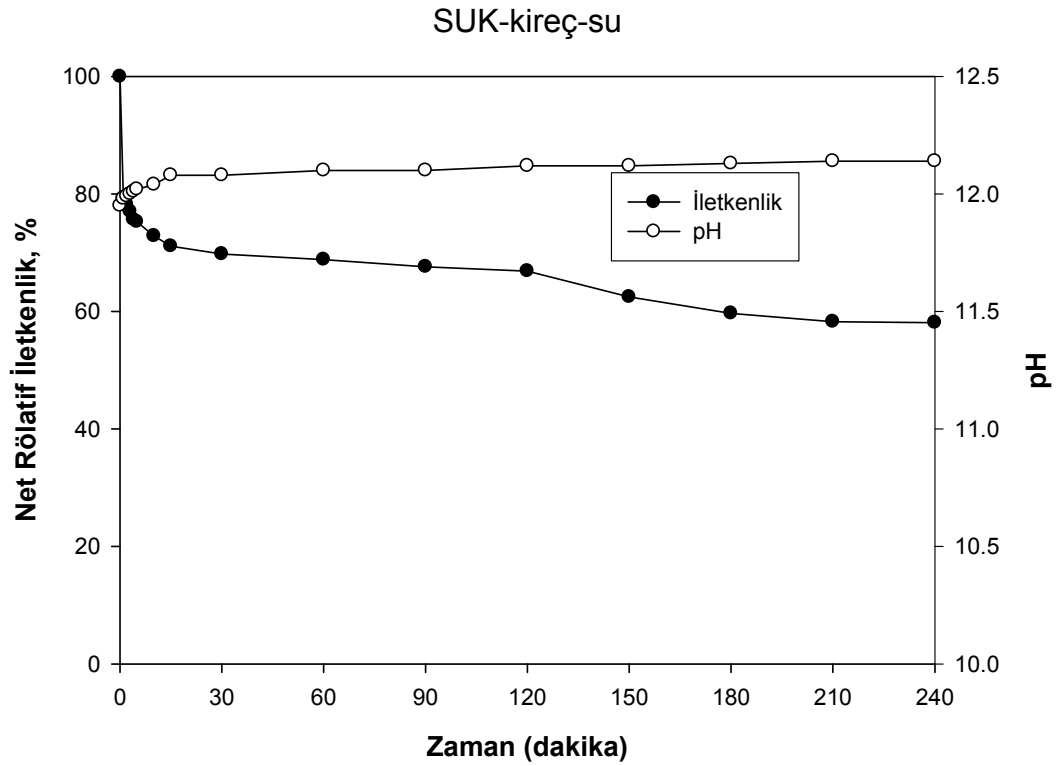
Seçilen 5 puzolanik malzemenin her biri için kireç-puzolan-su sisteminin net iletkenlik değerinin zamanla değişimi, başlangıç anındaki değer %100 kabul edilerek hesaplanan bağıl değerler olarak Şekil 4.23-Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Ayrıca karşılaştırma kolaylığı açısından, puzolanik malzemelerin net rölatif iletkenlik-zaman grafikleri bir arada Şekil 4.28’de sunulmuştur.



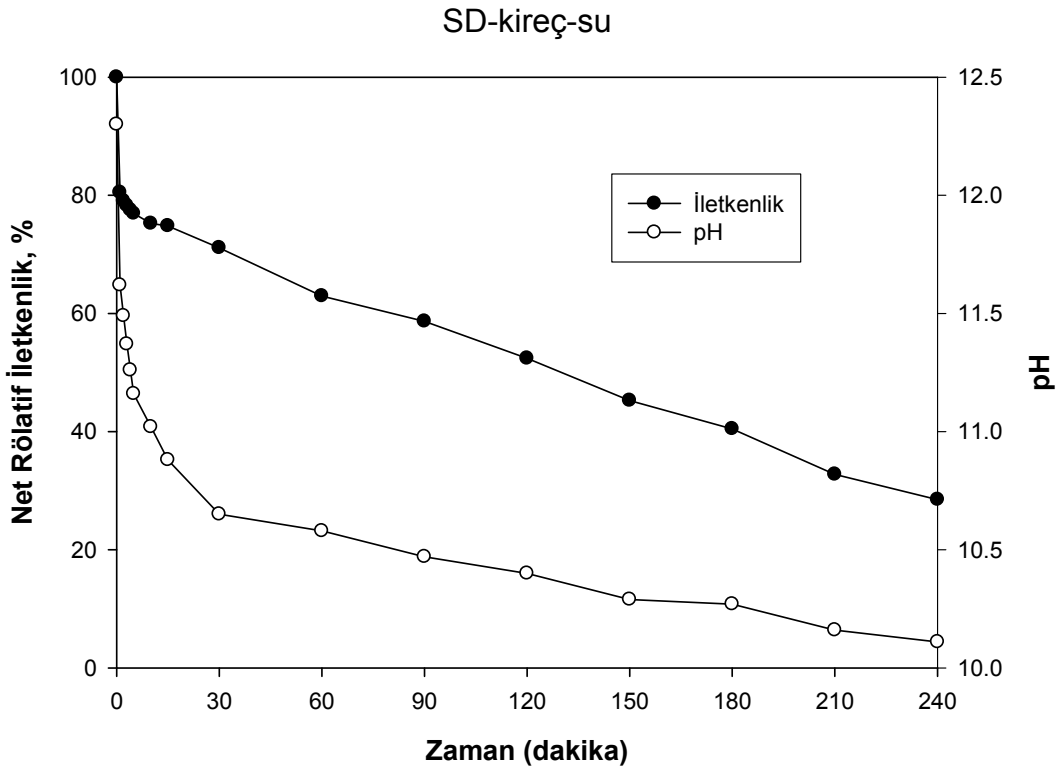
Şekil 4.23 GZ80-kireç-su sisteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri



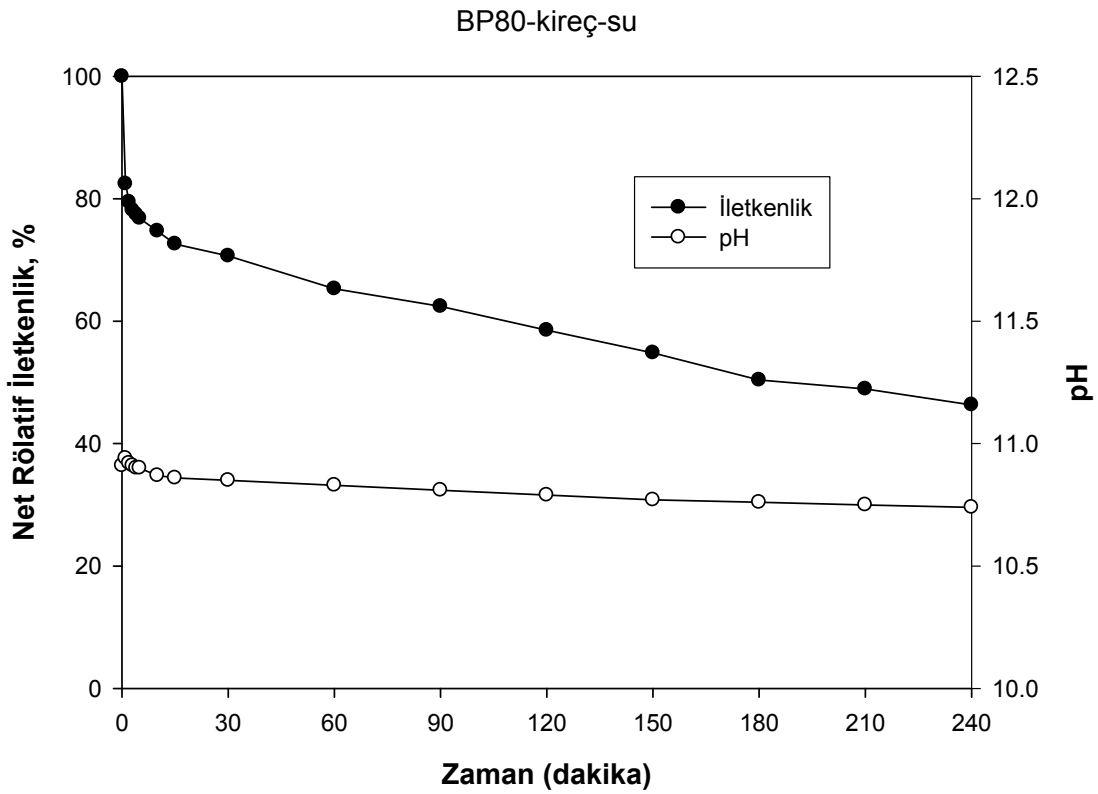
Şekil 4.24 BZ80-kireç-su siteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri



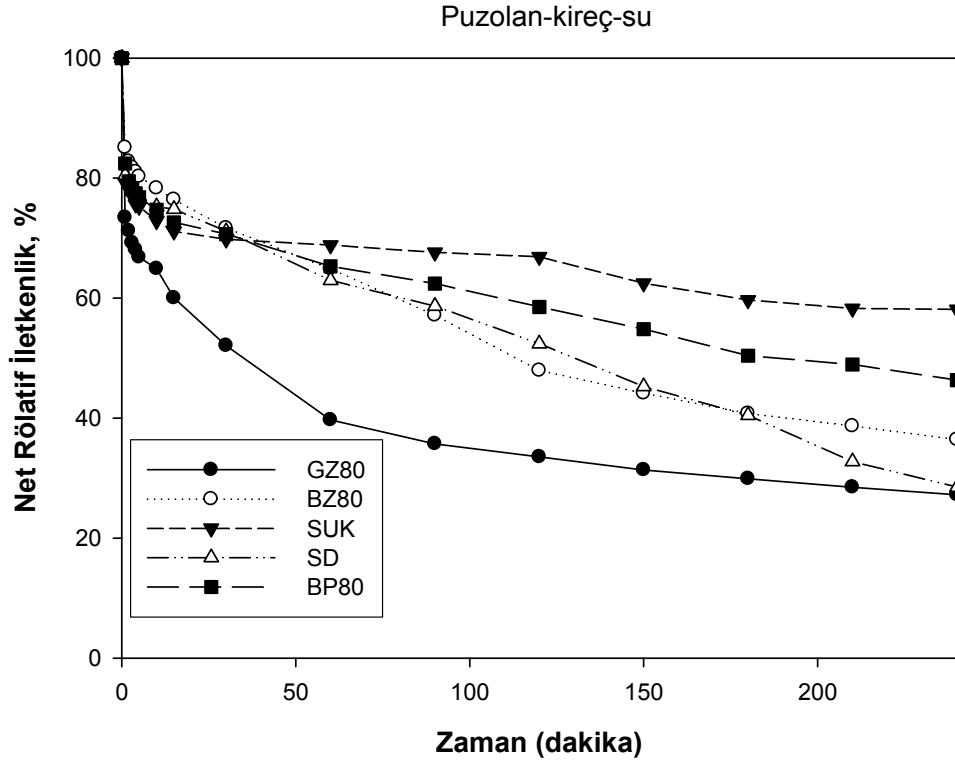
Şekil 4.25 SUK-kireç-su siteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri



Şekil 4.26 SD-kireç-su siteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri



Şekil 4.27 BP80-kireç-su siteminin net rölatif iletkenlik-zaman ve pH-zaman grafikleri



Şekil 4.28 Kireç-puzolan-su sistemlerinin net rölatif iletkenlik-zaman grafikleri

Bu deneysel metotta sistemin net iletkenlik değerindeki azalma puzolanik reaksiyon ile tüketilen kalsiyum iyonları ile ilişkilendirildiğinden, iletkenlik değerindeki azalma miktarı puzolanik aktivitenin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır.

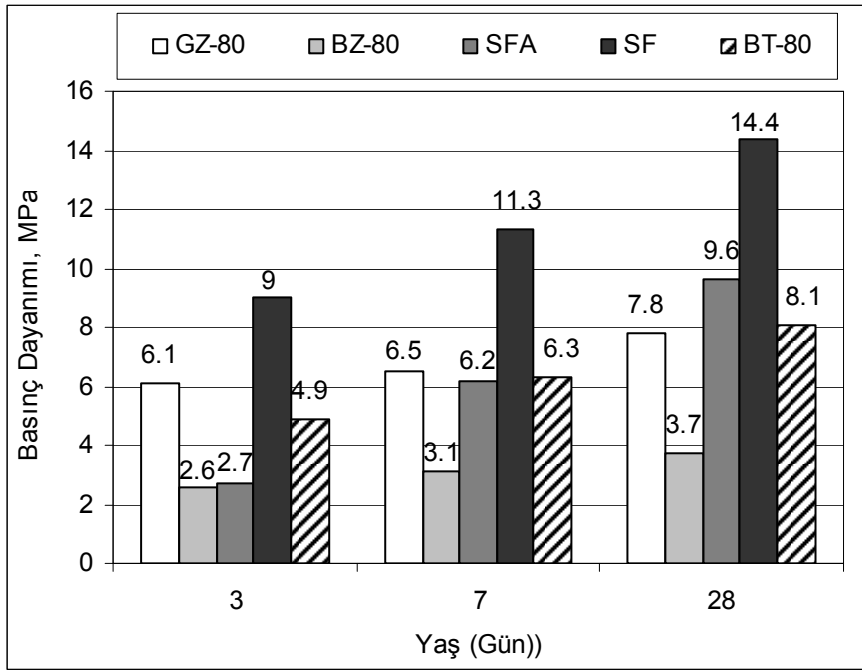
Şekil 4.28'den görüldüğü gibi GZ80 içeren puzolan-kireç-su sistemi diğer puzolanik malzemeler ile karşılaştırıldığında daha düşük net rölatif iletkenlik değeri göstermiştir. 90 dakikadan sonraki ölçüm süreleri için GZ80 ile silis dumanı (SD) içeren sistemin net rölatif iletkenlik değerleri birbirine yaklaşmış ve 240 dakika için benzer bir değer göstermiştir. GZ80 ve SD'ye ait eğrilerden, bu çalışmada ölçülmeyen daha ileriki dakikalarda SD'ye ait eğrinin GZ80'nin altına geçeceği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla uzun süreli bir değerlendirme için silis dumanının puzolanik aktivitesinin daha yüksek olarak gözleneceği anlaşılmaktadır ve bu sonuç $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketim değerleri ile ölçülen puzolanik aktivite sonuçlarıyla örtüşmektedir.

BZ80'li sistem GZ80'e kıyasla daha yüksek net rölatif iletkenlik göstererek, daha düşük bir aktivite sergilemiştir. Bu durum 28 günlük $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketim değerleriyle uyumlu bir sonuç doğurmaktadır.

Uçucu kül örneğinin (SUK) diğer tüm puzolanik malzemelere kıyasla en düşük aktiviteyi gösterdiği gözlenmiştir. Bu sonuç iletkenlik metodunda uygulanan göreceli olarak kısa deney süresince, uçucu külün yavaş puzolanik aktivite göstermesi ile açıklanabilir. Bu durum aynı zamanda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketim değerlerinden de görülmektedir.

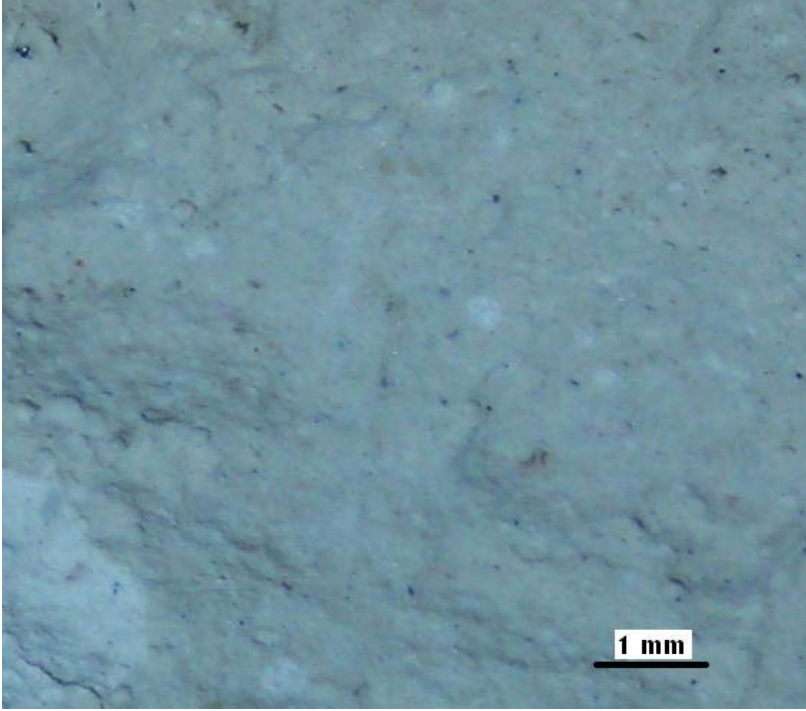
4.3.4 Kireç-Puzolan Hamurlarının Basınç Dayanımları

Seçilmiş beş puzolanik malzeme için kireç-puzolan hamurlarının 3, 7, ve 28 günlük basınç dayanımları tespit edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.29’da gösterilmiştir.

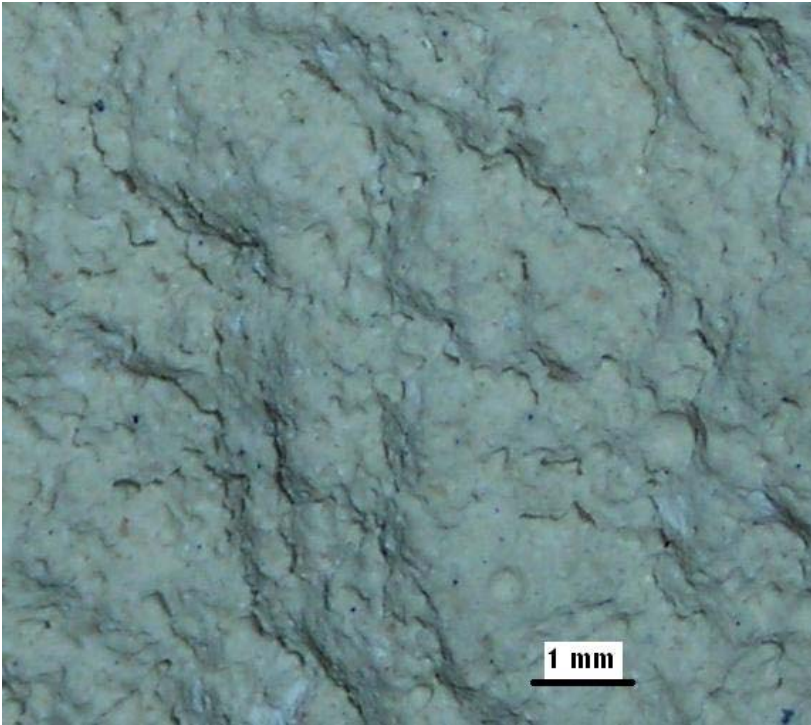


Şekil 4.29 Kireç-Puzolan hamurlarının basınç dayanımları

Gördes zeoliti (GZ-80) ile hazırlanmış kireç-puzolan hamurları, test edilen tüm yaşlarda Bigadiç zeoliti (BZ-80) ile hazırlanan hamurların yaklaşık iki katı basınç dayanımı göstermişlerdir. BZ-80 ve GZ-80 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketimleri açısından çok da farklı olmayan bir aktivite göstermelerine rağmen, BZ80-kireç hamurunun basınç dayanımının GZ80-kireç hamurunun yaklaşık yarısı kadar gerçekleşmesi beklenmeyen bir sonuçtur. Bu durumunun açıklaması kireç-puzolan hamurlarının çıplak gözle görülebilen makro yapılarında yatmaktadır. GZ80 ve BZ80 ile hazırlanan kireç puzolan hamurlarının kırılmış yüzeylerine ait dijital fotoğraf görüntüleri Şekil 4.30’da gösterilmiştir.



a) GZ80-kireç hamuru (28 günlük)



b) BZ80-kireç hamuru (28 günlük)

Şekil 4.30 Kireç-zeolit hamurlarının kırılmış yüzeylerinin dijital fotoğrafları

Şekil 4.30'dan açıkça görüldüğü gibi BZ-80-kireç hamuru oldukça büyük sayılabilecek çok sayıda hava boşluğu içermektedir. Doğal zeolitlerin yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 350-400 °C) kurutulduktan sonra su ile temas ettiklerinde gaz oluşturu bir etkiye sahip oldukları ve bu sayede hafif yapı malzemeleri elde edilmesinde kullanıldıkları bilinmektedir [COLELLA ve diğerleri, 2001]. Ancak öğütülmüş Bigadiç zeolitinin belirtilen kadar yüksek sıcaklıklarda işlem görmediği halde neden böyle bir davranış gösterdiği, bu projenin kapsamında elde edilen verilerle açıklanamamaktadır.

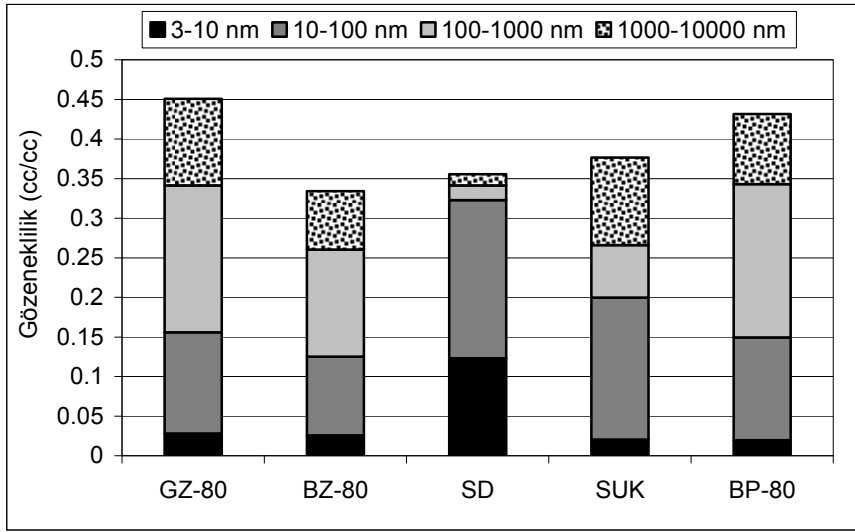
Çalışmada kullanılan silis dumanı (SD) diğer tüm puzolanik malzemelere kıyasla en yüksek kireç-puzolan hamuru basınç dayanımını gösteren malzeme olmuştur. GZ-80 zeoliti, silis dumanı ile kıyaslandığında, basınç dayanımları arasındaki farkın ilk yaşlarda daha az olduğu, 28 günlük değerler karşılaştırıldığında aradaki farkın arttığı ve silis dumanının 28. günde, GZ-80'li hamurun yaklaşık iki katı basınç dayanımı gösterdiği görülmektedir.

GZ-80 puzolanik malzemesi, çalışmada kullanılan uçucu kül ile karşılaştırıldığında 3-günlük basınç dayanımlarına göre GZ-80'nin uçucu külden (SUK) daha fazla basınç dayanımı gösterdiği, 7. günde uçucu külün GZ-80'e yaklaştığı ve 28.günde GZ-80'i geçtiği gözlenmiştir. Bu durum göreceli olarak düşük yüzey alanına sahip uçucu külün ilk yaşlarda gösterdiği, uçucu kül taneciklerinin yüzeyinde gerçekleşen yavaş puzolanik reaksiyonun ardından ileriki yaşlarda, uçucu kül taneciklerinin daha iç kısımlarındaki camsı fazların puzolanik reaksiyonunun başlaması olarak açıklanabilir [PAYA ve diğerleri, 2001].

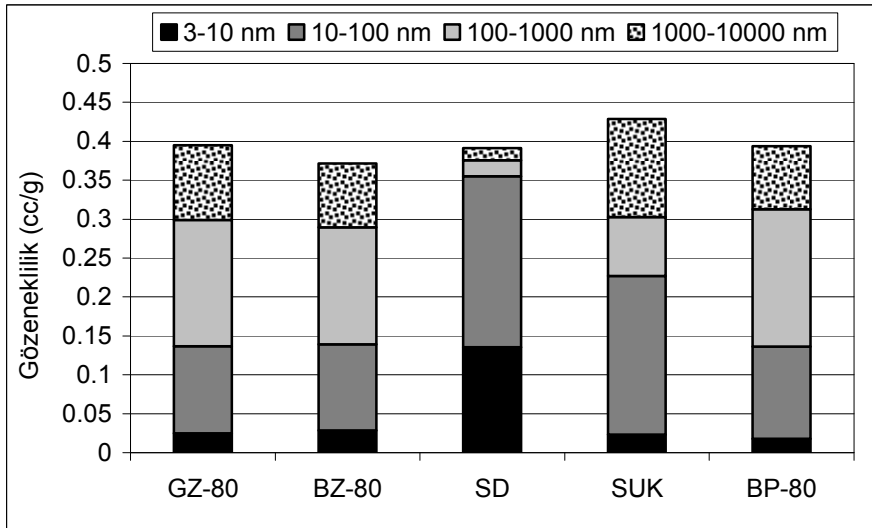
GZ-80 zeolitik puzolanı, zeolitik olmayan BP-80 doğal puzolanı ile karşılaştırıldığında, 3 günlük basınç dayanımı için GZ-80'nin daha yüksek olduğu, 7. ve 28. günler için ise basınç dayanımlarının benzer olduğu gözlenmiştir.

4.3.5 Kireç-Puzolan Hamurlarının Gözenek Boyut Dağılımları

Seçilmiş puzolanik malzemelerle hazırlanan kireç-puzolan hamurlarının 28 günlük yaşta cıva porozimetresi ile tespit edilen gözenek boyut dağılımlarına ilişkin sonuçlar Şekil 4.31'de verilmiştir.



a) Birim hacme göre gözenek boyut dağılımı (cc/cc)

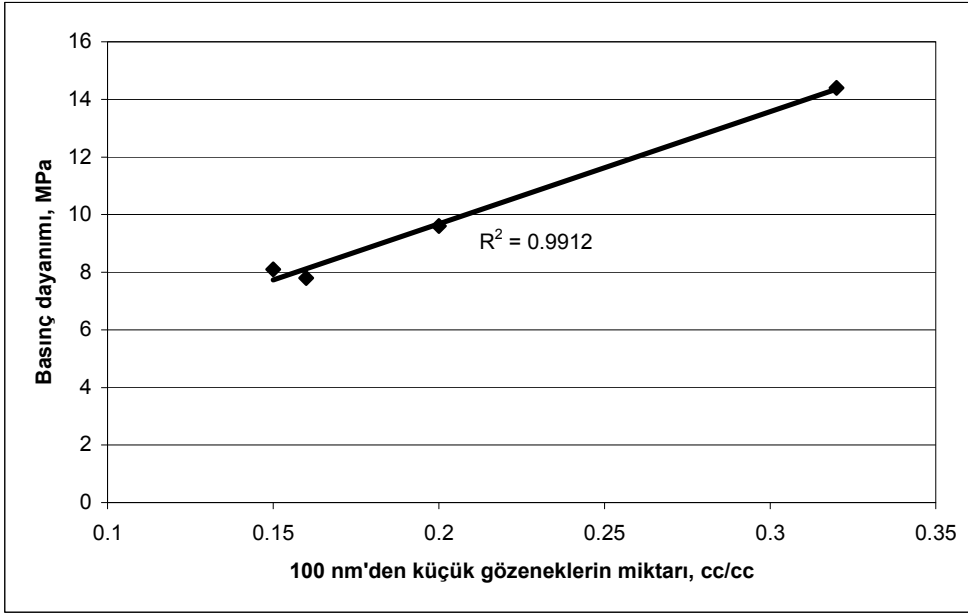


b) Birim kütle göre gözenek boyut dağılımı (cc/g)

Şekil 4.31 Kireç-puzolan hamurlarının gözenek boyut dağılımları (28 günlük)

100 nm'den daha küçük gözenek boyutlarının jel gözenekliliği olduğu varsayılırsa, bu boyuttaki gözeneklerin miktarı puzolanik aktiviteyle ilişkilendirilebilir. Bu noktadan hareketle, GZ-80 ve BZ-80 ile hazırlanan kireç-puzolan hamurlarının benzer jel miktarlarına sahip oldukları sonucuna varılabilir. BZ-80 ile hazırlanan kireç-puzolan hamurunun basınç dayanımı büyük hava boşluklarının oluşumundan dolayı düşük olduğundan, BZ-80 hamuru hariç tutularak diğer hamurların 28 günlük basınç dayanımları ile 100 nm küçük gözenek miktarları arasında görülen lineer ilişki (Şekil 4.32) yukarıdaki varsayımı desteklemektedir

çünkü basınç dayanımının jel miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla GZ-80 ile BZ-80 arasında puzolanik reaksiyonlar sonucunda oluşan jel miktarı arasında bir fark olmadığı tezi güçlenmekte, BZ-80'nin kireç hamurundaki düşük basınç dayanımı performansının sadece büyük hava boşluklarından kaynaklandığı görüşü netlik kazanmaktadır.



Şekil 4.32 Gözeneklilik-basınç dayanımı ilişkisi

4.3.6 Doğal Zeolitlerin Puzolanik Aktivitesi Konusunda Özet Değerlendirme

Yukarıda dayanım aktiviteleri ve puzolanik aktiviteleri, diğer bazı mineral katkı malzemeleri ile karşılaştırmalı olarak çeşitli deneysel yöntemlerle incelenen Gördes ve Bigadiç doğal zeolitlerine ilişkin elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir;

- 1) Mineral katkı malzemelerinin puzolanik aktiviteleri ve dolgu malzemesi etkisini bu malzemelerin su ihtiyaçlarıyla bir arada yansıtan “dayanım aktivite indeksi” testine göre, çalışmada kullanılan doğal zeolitler, diğer yaygın kullanılan mineral malzemelere kıyasla oldukça iyi bir performans göstermişlerdir. Seçilen 5 puzolanik malzemenin 28. günlük dayanım aktivite indeksleri karşılaştırıldığında, sıralamanın BZ80>SUK>SD>GZ80>BP80 olduğu görülmüştür. Burada görülen BZ80'nin üstün performansının puzolanik aktivite ile birlikte dolgu malzemesi etkisinin birleşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- 2) Kireç-puzolan hamurlarının erken yaştaki (3 günlük) basınç dayanımları açısından, aktivite sıralamasının SD>GZ80>BP80>BZ80≈SUK şeklinde olduğu, bu sıralamanın 28. günde SD>SUK>BP80≈GZ80>BZ80 şeklinde değiştiği gözlenmiştir. Buradaki sıralamanın Ca(OH)₂ tüketimi hakkında bilgi vermediği, ancak Ca(OH)₂ tüketimi sonucunda oluşan ürünlerin basınç dayanımına olan katkısı hakkında fikir verdiği unutulmamalıdır.
- 3) Elektriksel iletkenlik ölçümü yoluyla yapılan puzolanik aktivite karşılaştırmasında, seçilen 5 malzeme için 90 dakikalık ölçümler esas alındığında sıralamanın GZ80>BZ80≈SD>BP80>SUK şeklinde olduğu, bu sıralamanın 240 dakikalık değerlere göre GZ80≈SD>BZ80>BP80>SUK şeklinde değiştiği görülmüştür. Buradaki sıralamaların ise çok erken yaşlardaki Ca(OH)₂ tüketimini ile ilgili bilgi verdiği, bu tüketim sonucunda oluşan ürünlerin basınç dayanımına olan katkısı konusunda bilgi veremeyeceği açıktır.
- 4) Seçilen 5 malzemenin termal analiz yöntemiyle hesaplanmış 3 günlük Ca(OH)₂ tüketim değerlerine göre sıralamanın SD>BZ80>GZ80>BP80>SUK şeklinde olduğu, bu sıralamanın 28. günde SD>GZ80>BZ80>SUK>BP80 olarak değiştiği gözlenmektedir. Elektriksel iletkenlik ölçümü sonuçlarında olduğu gibi GZ80'nin diğerlerine kıyasla daha fazla miktarda Ca(OH)₂ tüketebildiği burada da doğrulanmış olmaktadır.
- 5) Elde edilen deneysel sonuçlar ışığında, doğal zeolitlerin, çalışmada kullanılan diğer mineral malzemelere kıyasla daha yüksek Ca(OH)₂ tüketim kapasitesine sahip oldukları (elektriksel iletkenlik sonuçlarından ve mevcut termal analiz sonuçlarından) anlaşılmıştır. Ancak Ca(OH)₂ tüketimi sonucunda oluşan bağlayıcı ürünlerin basınç dayanımları açısından değerlendirildiğinde, Gördes zeolitinden elde edilen GZ80'nin ilk yaşlarda, Bigadiç zeolitinden elde edilen puzolana (BZ80), uçucu küle (SUK) ve zeolitik olmayan doğal puzolana (BP80) göre daha iyi performans gösterdiği, geç yaşlarda ise uçucu külün gerisinde kaldığı gözlenmiştir.
- 6) Doğal zeolitlerin kristal yapılarına rağmen puzolanik aktivite gösterebilmelerinin sebebinin, yüksek pH ortamında kristal yapının belirli ölçülerde bozunması (dissolution) sonucunda serbest kalan silisli ve alüminli bileşenlerin Ca(OH)₂ ile reaksiyonu olabileceği düşünülmektedir. Literatürde, doğal zeolitlerin düşük veya yüksek pH ortamlarında kristal yapılarının bozunduğuna dair bazı çalışmalar bulunmaktadır. [YAMOMOTO ve diğerleri, 1996, CIZMEK ve diğerleri, 1997].

4.4 Doğal Zeolit Katkılı Portland Çimentoları

4.4.1 Normal Kıvam ve Priz Süreleri

Farklı oranlarda, öğütülmüş Gördes ve Bigadiç zeoliti içeren katkılı çimentoların normal kıvam için gerekli su miktarları ve priz süreleri ilgili ASTM standardına göre tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 4.14’de verilmiştir.

Tablo 4.14. Çimentoların normal kıvam ve su/bağlayıcı oranları

Çimento	Normal Kıvam için Gerekli su/bağlayıcı oranı	İlk Priz Süresi, dakika	Son Priz Süresi, dakika
PÇ	0.27	218	245
KÇ-GZ15	0.31	135	185
KÇ-GZ35	0.37	120	180
KÇ-GZ55	0.43	112	185
KÇ-BZ15	0.29	109	150
KÇ-BZ35	0.34	57	154
KÇ-BZ55	0.38	54	164

Tablo 4.14’de sunulan verilere göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır;

- Doğal zeolit içeren katkılı çimentoların normal kıvam suyu ihtiyaçları, içeriklerindeki doğal zeolit miktarıyla lineer olarak artmaktadır.
- Bigadiç zeolitli katkılı çimentoların normal kıvam suyu ihtiyacının, eşit doğal zeolit içerikleri için , Gördes zeolitli çimentolara kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Öğütülmüş BZ-80 Bigadiç zeolitinin, GZ-80 Gördes zeolitine kıyasla daha yüksek olan yüzey alanı ve daha ince tane boyut dağılımına rağmen, normal kıvam su ihtiyacının daha düşük olması, dayanım aktivite indeksi tespitinde bulunan su ihtiyacı verilerini (Tablo 4.11) doğrular niteliktedir. Bu durumun Gördes zeolitin daha yüksek olan BET yüzey alanıyla ilişkili olabileceği belirtilmişti.
- Her iki doğal zeolit için, katkılı çimentolardaki doğal zeolit miktarı arttıkça ilk priz süresinin kısaldığı gözlenmiştir. Bu durum yüksek yüzey alanına sahip doğal puzolan içeren katkılı çimentolarda, proje araştırmacılarından bazılarının daha önceki

- Doğal zeolit katkılı çimentoların son priz süreleri ise zeolit oranına ve zeolit türüne göre değişik şekilde davranış göstermiştir. Gördes zeoliti içeren çimentolarda son priz süresi doğal zeolit miktarına göre çok fazla değişim göstermemiştir. Bigadiç zeoliti içeren çimentolar da ise zeolit oranındaki artışla son priz süresi bir miktar uzamıştır.
- Katkılı çimentoların tümünün priz başlangıç ve bitiş sürelerinin kontrol amacıyla kullanılan portland çimentosundan daha kısa olduğu gözlenmiştir. Çalışmada değerlendirilen tüm doğal zeolit katkılı çimentolar ASTM C 595 VE ASTM C 1157’de katkılı çimentolar için verilen priz süresi limitleri dahilinde olduğu gözlenmiştir.

4.4.2 Doğal Zeolit Katkılı Portland Çimentosu Hamurlarındaki Ca(OH)₂ Miktarları

Çimento hamurlarının 3, 7 ve 28. günlerde tespit edilen Ca(OH)₂ içerikleri ve bunların çimentodaki Portland çimentosu oranına normalize edilmiş durumdaki değerleri Tablo 4.15’de verilmiştir.

Portland çimentosu belirli miktarda mineral katkı malzemesi ile yer değiştirildiğinde, bir yandan bağlayıcı sistemdeki portland çimentosu miktarının azalmasından dolayı Ca(OH)₂ üretimi azalmakta, diğer yandan puzolanik reaksiyon ile Ca(OH)₂ tüketimi oluşmakta, mineral katkı malzemesinin miktarı artıkça bu her iki etkide artmaktadır. Dolayısıyla çimento pastalarında mineral katkı ikamesiyle oluşan puzolanik reaksiyonu, daha kolay izleyebilmek amacıyla, Ca(OH)₂ miktarı bağlayıcı sistemdeki Portland çimentosu oranına (yani Ca(OH)₂ üreten kısmına) normalize edilmiştir (Çimentodaki PÇ oranı %65 ise, Ca(OH)₂ miktarı 0.65’e bölünmüştür).

Tablo 4.15 Çimento hamurlarının Ca(OH)_2 içerikleri (kızdırılmış numune ağırlığı bazında)

Cement	% Ca(OH)_2			% Ca(OH)_2 (Portland çimentosu miktarına göre normalize edilmiş)		
	3-day	7-day	28-day	3-day	7-day	28-day
PC	18.1	18.9	21.6	18.1	18.9	21.6
KÇ-GZ15	13.0	15.7	16.0	15.3	18.5	18.8
KÇ-GZ35	4.6	9.7	8.9	7.1	14.9	13.7
KÇ-GZ55	4.2	5.3	0.8	9.3	11.8	1.7
KÇ-BZ15	15.6	16.2	17.4	18.4	19.1	20.5
KÇ-BZ35	12.0	12.1	9.1	18.5	18.6	14.0
KÇ-BZ55	6.9	7.1	2.8	15.3	15.8	6.2

Tablo 4.15’de görüldüğü gibi, zeolit katkılı çimento hamurlarının test edilen tüm yaşlarda portland çimentosundan daha düşük miktarda Ca(OH)_2 içerdikleri açıkça görülmüştür. Bu durum hem bağlayıcıdaki portland çimentosu miktarının azalmasına bağlı olarak hidrasyon sonucunda oluşan Ca(OH)_2 üretiminin azalmasından, hem de puzolanik reaksiyon tarafından belirli miktarda Ca(OH)_2 ’nin tüketilmesinden kaynaklanmaktadır. Katkılı çimentodaki doğal zeolit miktarı arttıkça çimento hamurundaki Ca(OH)_2 miktarı azalmaktadır. Gördes zeoliti içeren katkılı çimento hamurlarının, aynı miktarda Bigadiç zeoliti içeren çimento hamurlarına kıyasla, daha düşük Ca(OH)_2 içeriğine sahip oldukları görülmektedir. Bu durumun daha önce puzolanik aktivite çalışmalarında tespit edildiği gibi, Gördes zeolitinin daha yüksek Ca(OH)_2 tüketme kapasitesinden kaynaklandığı açıktır.

Doğal zeolitlerin katkılı çimento içerisinde, portland çimentosu hidrasyonu sonucunda ortaya çıkan Ca(OH)_2 ’i tüketerek gösterdikleri puzolanik aktiviteyi değerlendirmek için, çimento hamurlarındaki Ca(OH)_2 miktarı yerine, bu miktarın çimentonun Ca(OH)_2 üreten kısmı olan portland çimentosuna oranını (PÇ oranına göre normalize edilmiş halini) kullanmak daha doğru olacaktır. Tablo 4.15’de gösterilen normalize edilmiş değerler incelendiğinde, Ca(OH)_2 üretim ve tüketim durumu daha kolay değerlendirilebilmektedir. Katkılı çimentolarda, puzolanik reaksiyonun Ca(OH)_2 tüketici etkisi burada da açıkça görülmektedir. Gördes zeolitinin Ca(OH)_2 tüketici etkisi normalize edilmiş değerlerde 3. günden itibaren görülmeye başlanmıştır. Ancak Bigadiç zeolitinin %15 oranı için 3. ve 7.

güne kadar, %35 oranı için ise 3. güne kadar Ca(OH)_2 tüketimine başlamadığı, aksine Ca(OH)_2 miktarında az bir miktar artış olduğu görülmektedir. Bu küçük artış, bağlayıcı sistemdeki ince öğütülmüş malzemenin, portland çimentosu fazının hidrasyon reaksiyonlarını çekirdeklenme etkisi (LAWRENCE ve diğerleri, 2003, RAHHAL VE TALERO, 2005) ile artırmasından kaynaklanabilir. Muhtemelen aynı etki belirli bir ölçüde Gördes zeoliti içinde gerçekleşiyor olabilir, ancak Gördes zeolitinin göreceli olarak yüksek puzolanik aktivitesi sonucunda erken yaşlarda meydana gelen Ca(OH)_2 tüketimi bu etkinin görülmesini engelliyor olabilir.

Çeşitli oranlarda Gördes zeoliti içeren katkılı çimento hamurlarının Ca(OH)_2 içeriklerinin, proje araştırmacılarından bazıları tarafından, çoğunlukla camsı faz içeren doğal puzolan ile daha önce gerçekleştirilen ve eşit oranlarda puzolan içeren örneklerden oluşan bir çalışmada elde edilen sonuçlarla [TURANLI ve diğerleri, 2005] karşılaştırıldığında, çok daha düşük olduğu, yani zeolitik puzolanların çok daha aktif olduğu anlaşılmaktadır.

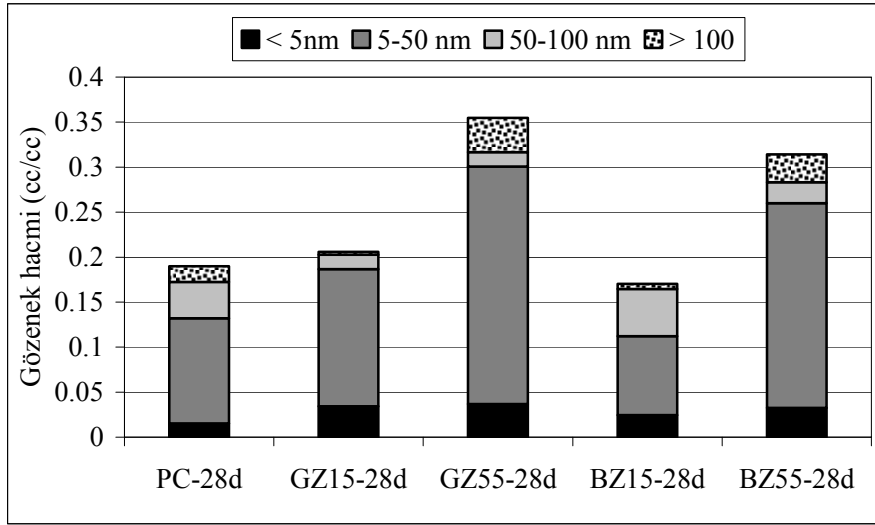
Sonuç olarak;

- Gördes zeoliti içeren katkılı çimentoların, belirli bir yaş ve zeolit içeriği için, Bigadiç zeoliti içeren çimento hamurlarına kıyasla daha düşük Ca(OH)_2 içerdikleri,
- %15 ve %35 oranları için katkılı çimentolardaki Bigadiç zeolitinin, Gördes zeolitine kıyasla daha geç yaşlarda puzolanik aktiviteye başladığı,
- Zeolitik puzolanların, zeolitik olmayan doğal puzolana kıyasla [4], çok daha fazla miktarda Ca(OH)_2 'i tükettiği tespit edilmiştir.

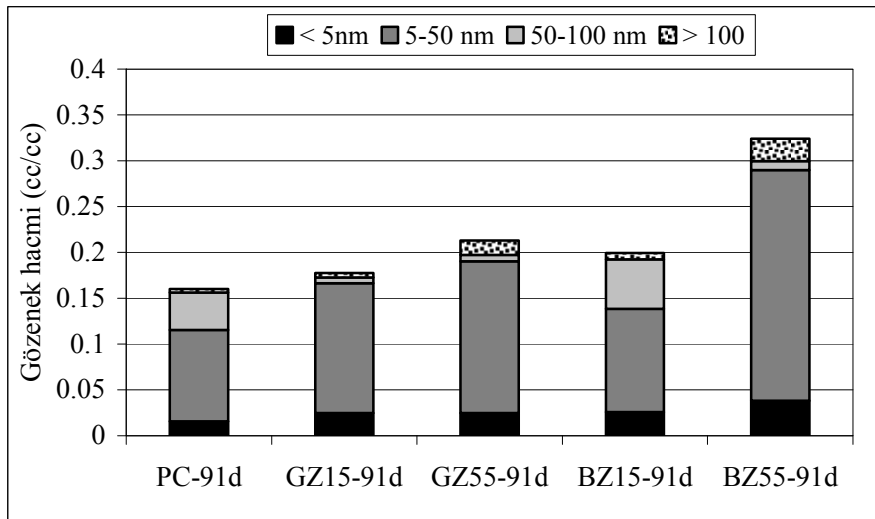
Doğal zeolitlerin bu yüksek Ca(OH)_2 tüketim kabiliyetleri (puzolanik aktiviteleri), doğal zeolit içeren çimento sistemlerinin sadece dayanım özelliklerinin iyi olmasına değil, aynı zamanda Ca(OH)_2 odaklı dayanıklılık özelliklerinin de (sulfat hücumu vb.) iyileşmesini sağlayacağı açıktır.

4.4.3 Çimento Hamurlarının Gözenek Boyut Dağılımları

%15 ve %55 oranında doğal zeolit içeren katkılı çimento ve kontrol çimentosu hamurlarının cıva porozimetresi ile 28 günlük ve 91 günlük yaşlar için tespit edilen gözenek boyut dağılımları Şekil 4.33'de gösterilmiştir.



a) 28 günlük



b) 91 günlük

Şekil 4.33 Çimento hamurlarının gözenek boyut dağılımları

Gözenek boyut dağılımı ile ilgili veriler değerlendirilmeden önce, sertleşmiş çimento hamurlarında geçirgenlik ve basınç dayanımı gibi özelliklerin çimento hamurunun toplam gözenekliliğiyle değil, gözenek boyut dağılımıyla ilgili olduğu gerçeği unutulmamalıdır.

Şekil 4.33a'da görüldüğü gibi 28 günlük yaş için %15 zeolit ikamesi kontrol çimentosuna kıyasla 50 nm'den daha büyük kapiler gözeneklerin azalmasını ve 50 nm'de küçük jel gözeneklerinin artmasını sağlamıştır. Bu sonucun hem puzolanik aktiviteyle hem de dolgu

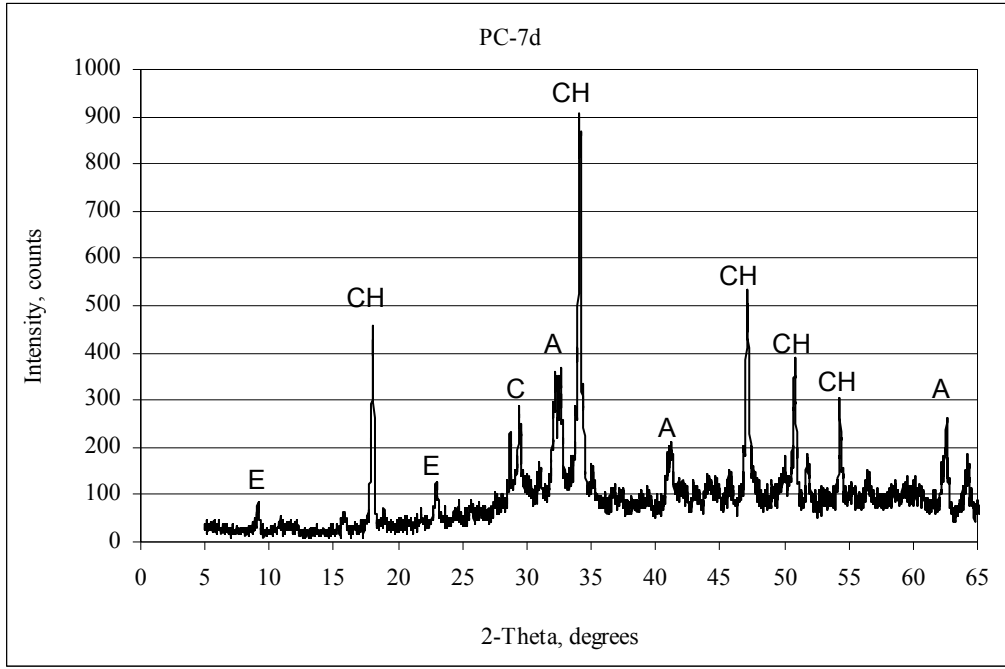
etkisiyle ilgili olduğu düşünülmektedir ve geçirgenliğin azalmasını, basınç dayanımının ise artmasını sağlayacağı açıktır. %55 ikame oranında ise, her ne kadar toplam gözeneklilik kontrol çimento hamurundan fazla olsa da bu gözenekliliğin küçük gözeneklerden kaynaklandığı ve bu yüzden geçirgenliği ve basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemeyeceği anlaşılmaktadır.

Şekil 4.33b'de gösterilen 91 günlük verilerden, GZ15, BZ15 ve BZ55 çimento hamurlarının gözenek boyut dağılımlarında 28 günlük dağılımlara kıyasla önemli ölçüde bir değişiklik görülmezken GZ55 hamurunun toplam gözenekliliğinde, özellikle 5-50 nm gözeneklerin miktarının azalmasından kaynaklanan bir düşüş görülmektedir ve bu durumun Gördes zeolitinin daha etkin olan ve uzun süre devam eden puzolanik aktivitesinin bir sonucu olabileceği düşünülmektedir.

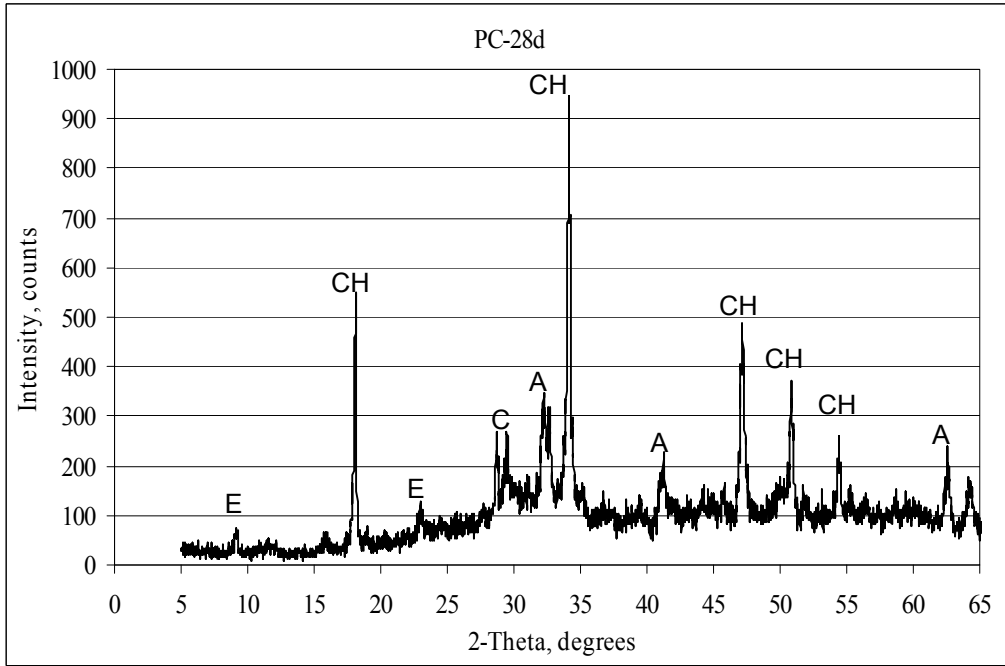
Sonuç olarak, gözenek boyut dağılımı verilerinden, öğütülmüş Gördes ve Bigadiç zeoliti ikamesin katkılı çimento hamurlarının gözenek boyut dağılımının küçülmesini sağlayarak, geçirimsizlik ve mekanik özellikleri olumlu yönde etkileyeceği anlaşılmıştır.

4.4.4 Çimento Hamurlarının XRD İncelemeleri

%15 ve %55 oranında doğal zeolit içeren katkılı çimento ve kontrol çimentosu hamurlarının 7. ve 28. günlerde elde edilen XRD desenleri tanımlanmış kristal fazlarla birlikte Şekil 4.34-Şekil 4.38'da gösterilmiştir. XRD incelemeleri zeolit içeren çimento hamurlarında Ca(OH)_2 tüketimlerini doğrulamış ve zeolit (klinoptilolit) kristal yapısının çimento hamurlarında bozunduğunu (küçülen ve/veya kaybolan klinoptilolit pikleri) göstermektedir. Ayrıca tetra kalsiyum alüminat hidrat (C_4AH_{13}) doğal zeolitlerin puzolanik reaksiyonu sonucunda oluşan bir ürün olarak XRD desenlerinde gözlenmiştir.

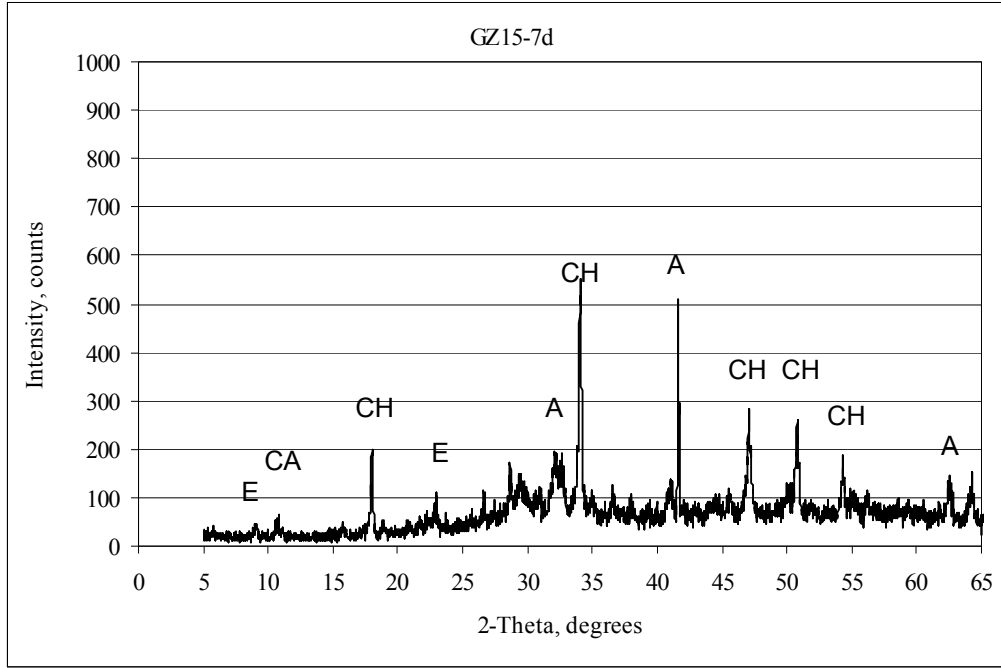


a) 7-günlük

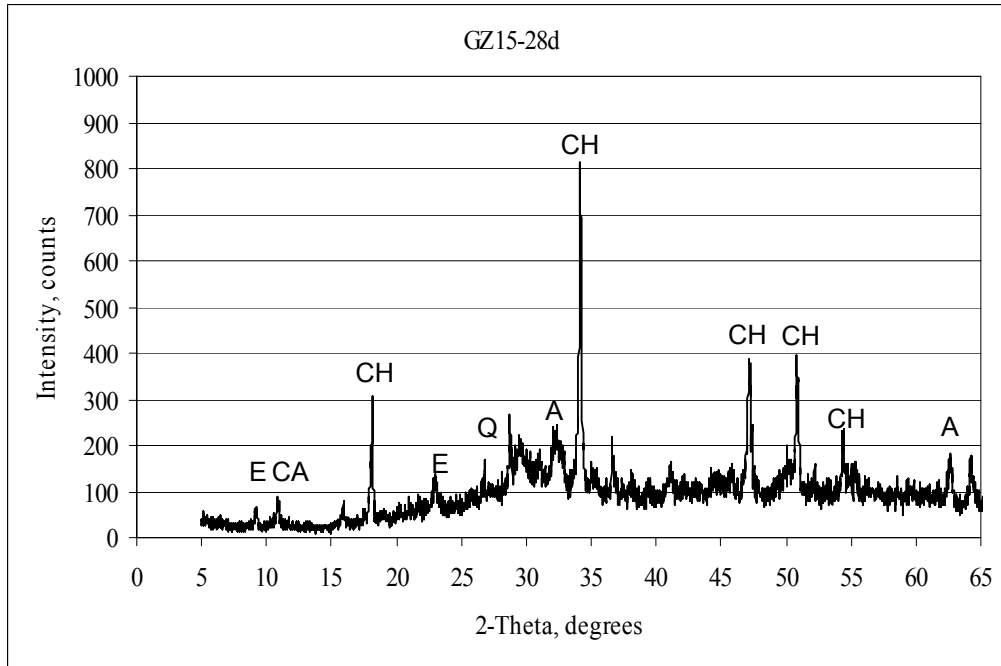


b) 28-günlük

Şekil 4.34 PÇ hamurunun XRD desenleri
(A: Alit, C: kalsit, CH: kalsium hidroksit, E: Etrenjit)

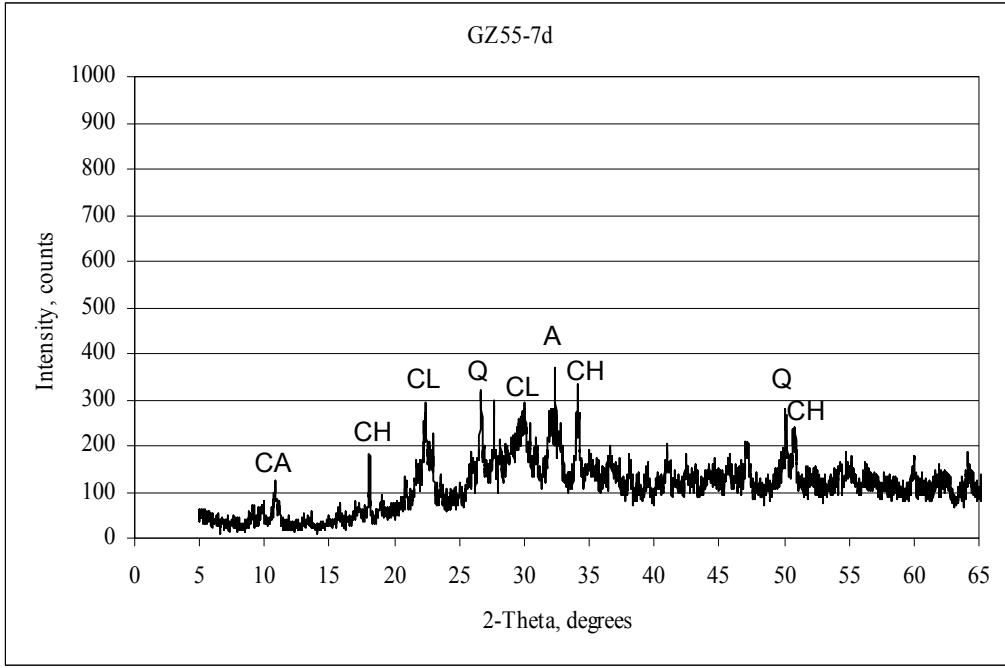


a) 7-günlük

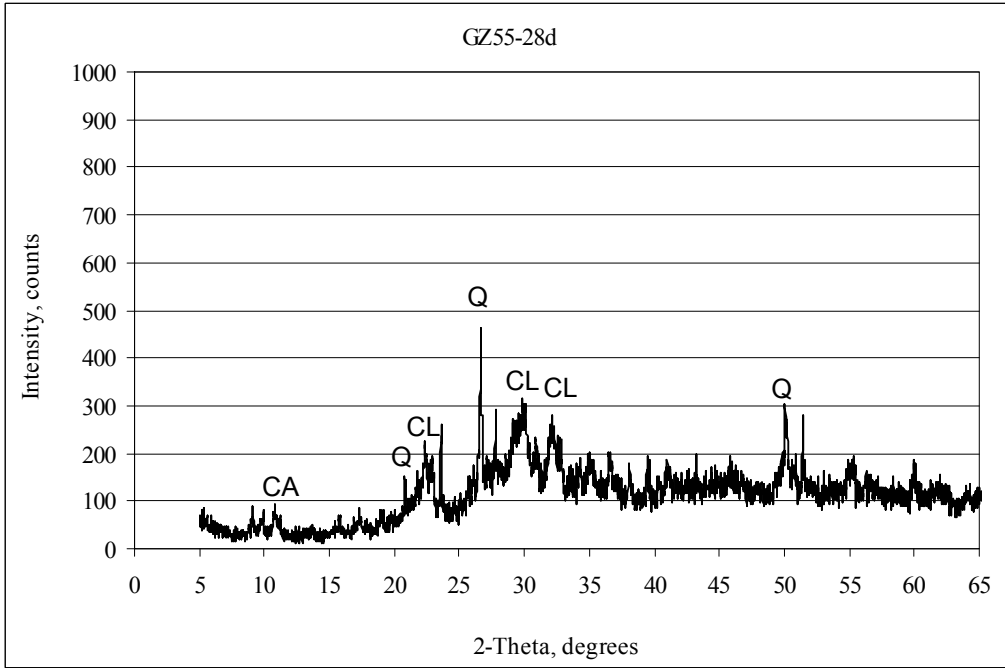


b) 28-günlük

Şekil 4.35 GZ15 hamurunun XRD desenleri (A: Alit, C: Kalsit, CA: Kalsiyum aluminat hidrat (C_4AH_{13}), CH: Kalsiyum hidroksit, E: Etenanjit, Q: Kuvars)

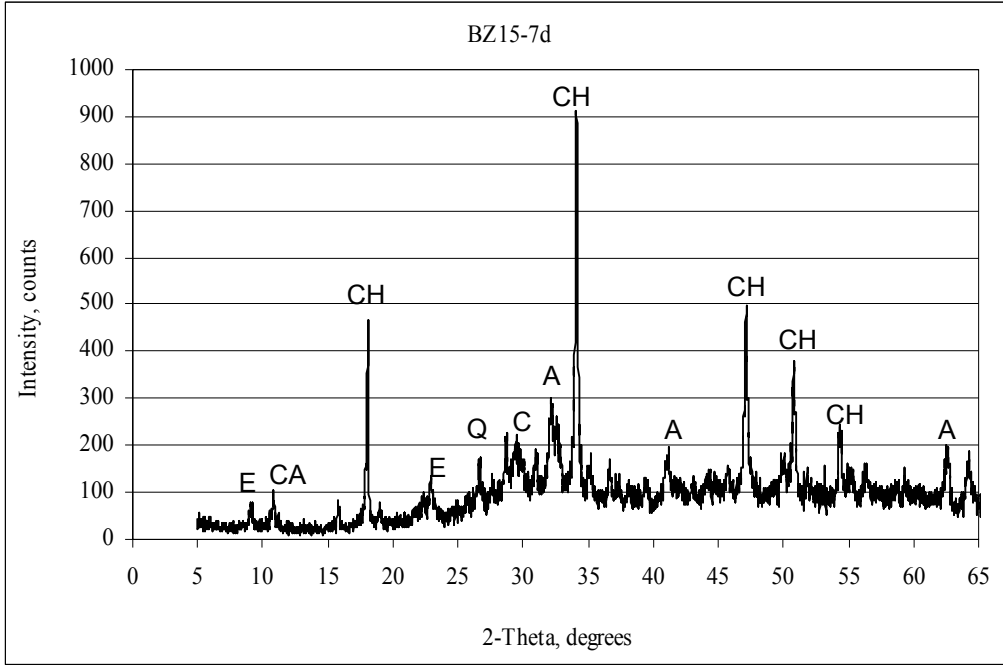


a) 7-günlük

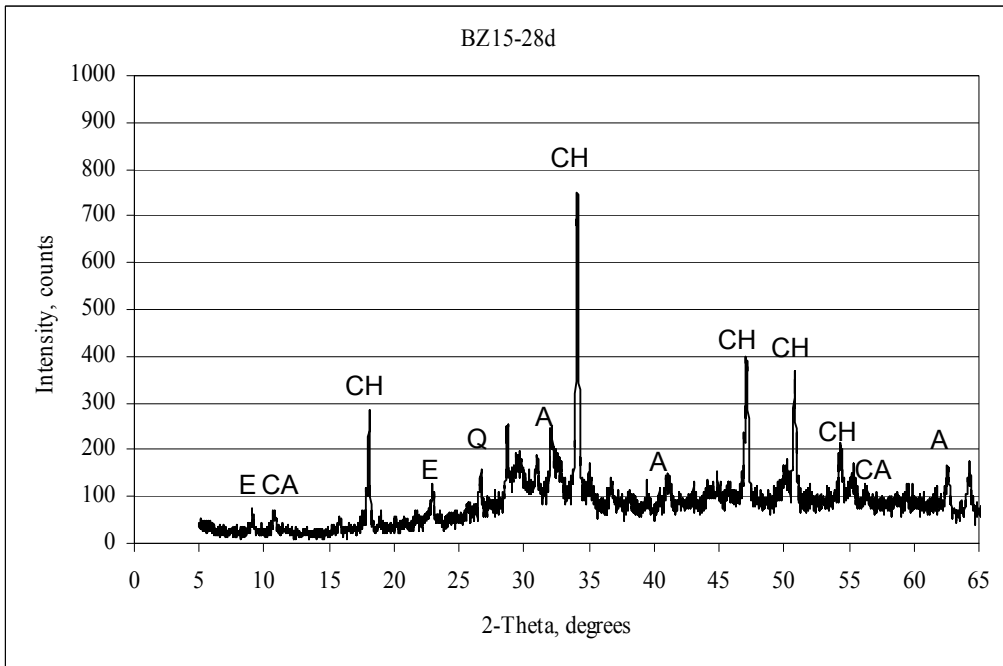


b) 28-günlük

Şekil 4.36 GZ55 hamurunun XRD desenleri (A: Alit, CA: Kalsiyum aluminat hidrat (C_4AH_{13}), CH: Kalsiyum hidroksit, CL: Klinoptilolit, Q: Kuvars)

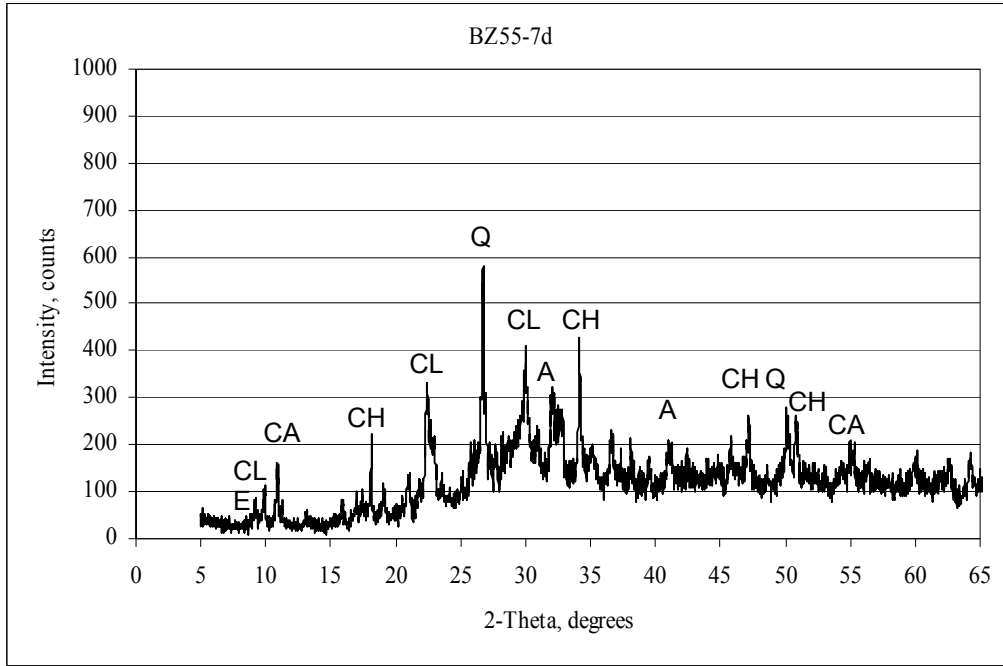


a) 7-günlük

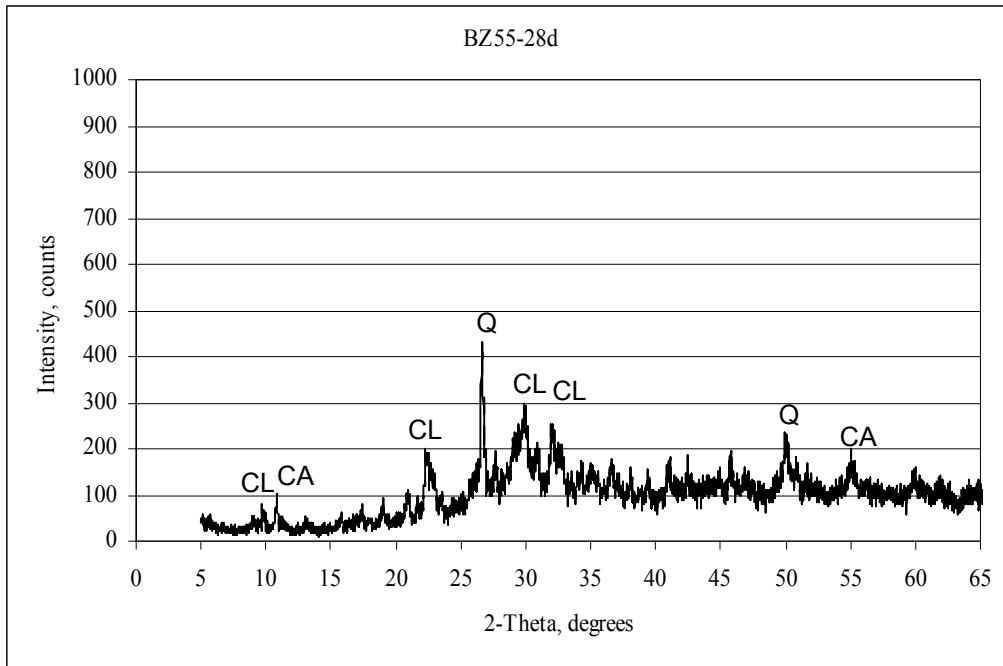


b) 28-günlük

Şekil 4.37 BZ15 hamurunun XRD desenleri (A: Alit, CA: Kalsiyum aluminat hidrat (C_4AH_{13}), CH: Kalsiyum hidroksit, E: Etenjit, Q: Kuvars)



a) 7-günlük



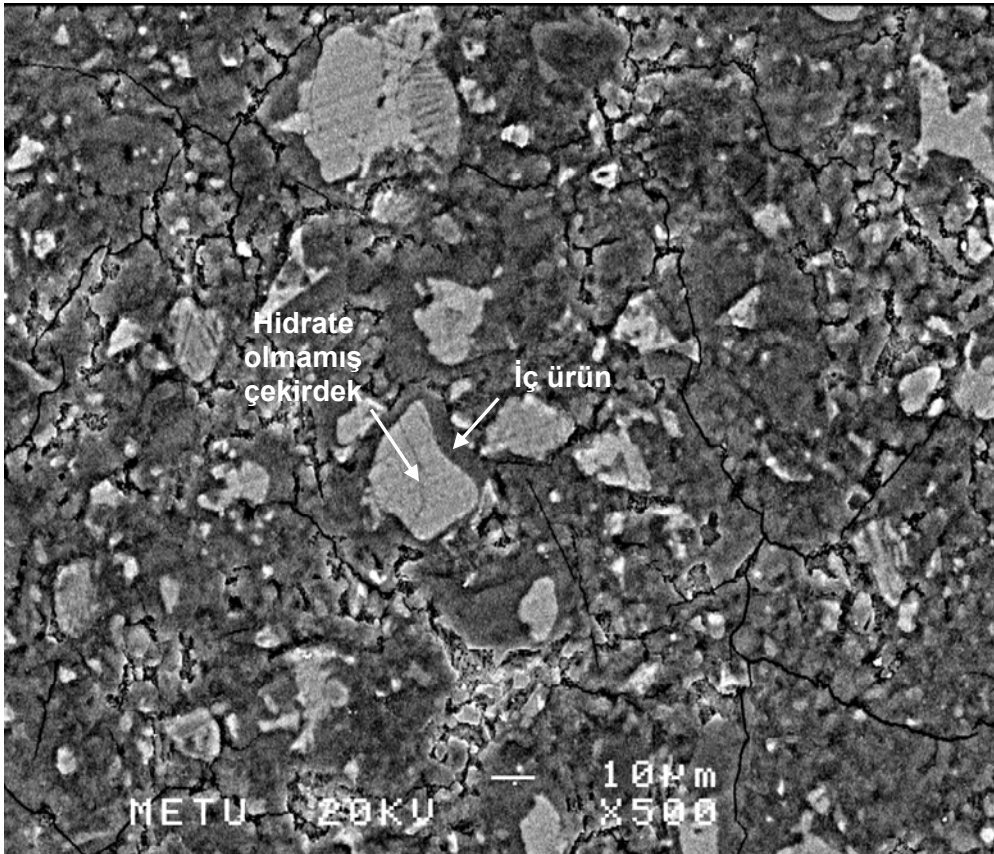
b) 28-günlük

Şekil 4.38 BZ55 hamurunun XRD desenleri (A: Alit, CA: Kalsiyum aluminat hidrat (C_4AH_{13}), CH: Kalsiyum hidroksit, CL: Klinoptilolit, E: Etrenjit, Q: Kuvars)

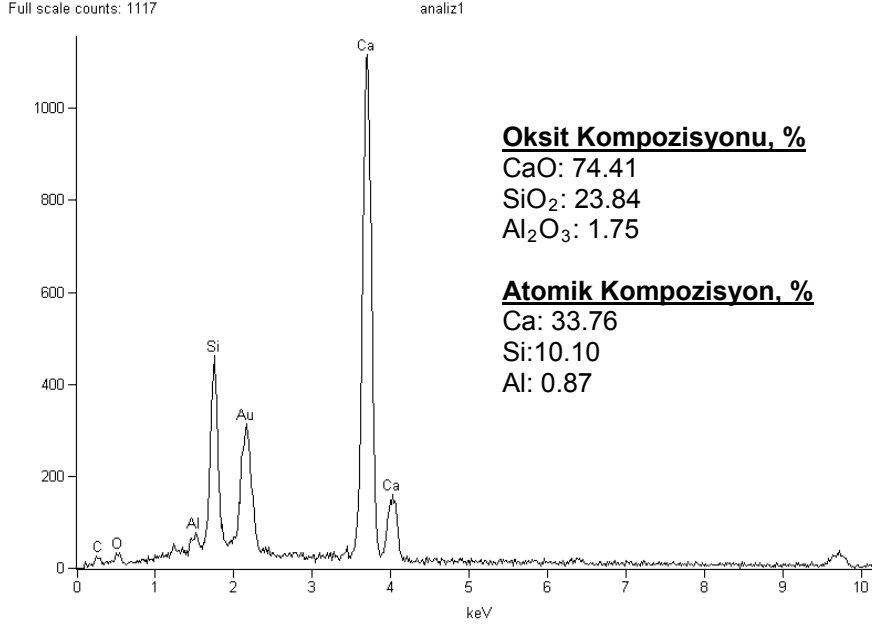
4.4.5 Sertleşmiş Çimento Hamurlarının Mikro Yapısı (BS-SEM İncelemeleri)

%15 ve %55 oranında doğal zeolit içeren katkılı çimento ve kontrol çimentosu hamurlarının mikro yapıları 28 günlük yaşları için Backscatter mode elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

Kontrol numunesinin mikro yapısı Şekil 4.39’de görünmektedir. Literatür bilgilerine dayalı olarak, Şekil 4.39’de görülen açık renkli taneciklerin hidrate olmamış veya kısmi olarak hidrate olmuş portland çimentosu tanecikleri olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.39’de gösterilen hidrate olmamış taneciğin ortasında yapınla EDX analizi sonucu Şekil 4.40’da verilmiştir ve bu oksit analizi değerleri portland çimentosunun tipik kompozisyonu yansıtmaktadır. Taneciğin etrafında ise daha koyu bir renkte görünen ve iç ürün (inner product) olarak adlandırılan, taneciğin yüzeyinde meydana gelen hidrasyon sonucu oluşmuş ürünlerin yer aldığı kısım görülmektedir.



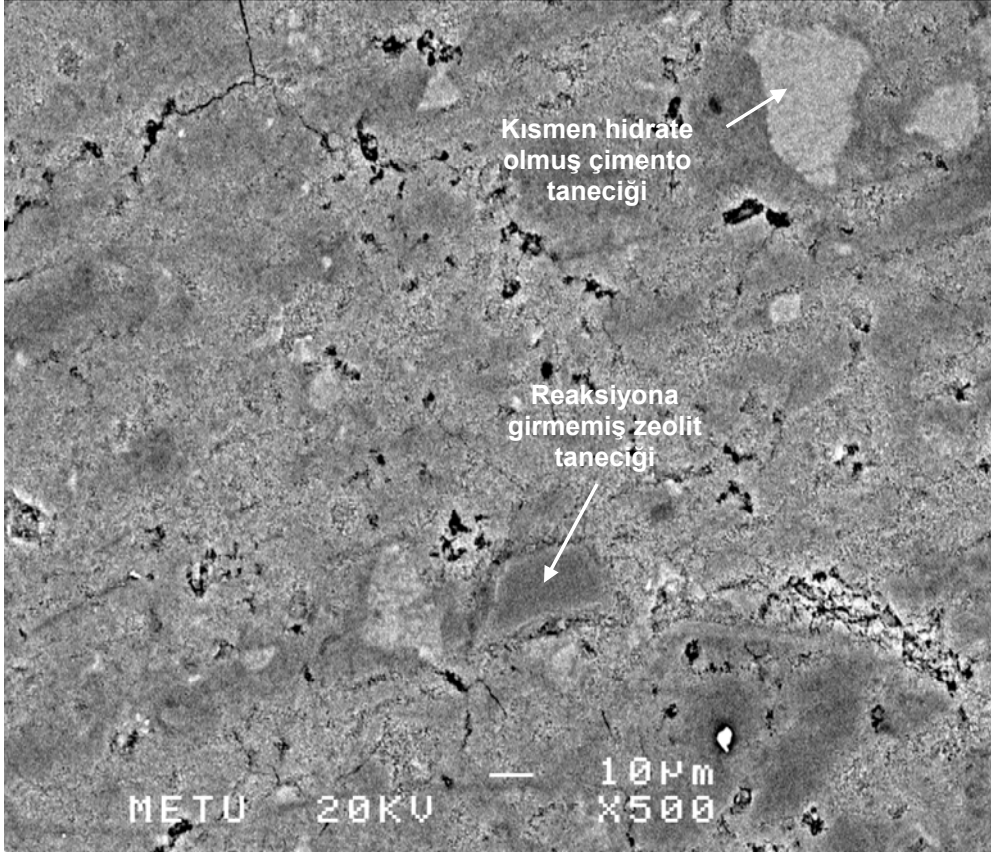
Şekil 4.39 PÇ hamurunun BS-SEM fotoğrafı (28 günlük)



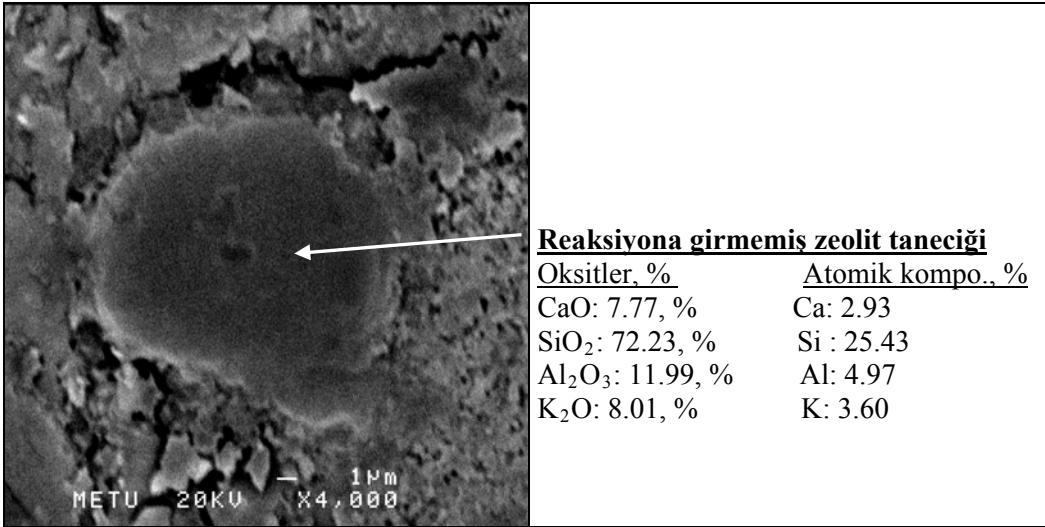
Şekil 4.40 PÇ hamurundaki hidrate olmamış çimento taneciğinin ortasından alınan EDX analizi

GZ15 çimento hamurundan x500 büyütmede alınana BS-SEM fotoğrafı Şekil 4.41’de gösterilmiştir. Öncelikle GZ15 hamurunun Şekil 4.39’da görülen PÇ hamuruna kıyasla daha yoğun ve az boşluklu bir yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir. Yine burada hidrate olmamış PÇ taneciklerine ek olarak, koyu renkte görülen taneciklerin ise muhtemelen reaksiyona girmemiş zeolit tanecikleri olduğu düşünülmektedir. Göreceli olarak daha yüksek bir büyütme oranında (x4000) yine böyle bir koyu tanecik ve bu tanecikten alınan EDX analizi Şekil 4.42’de gösterilmiştir. Oksit kompozisyonun yaklaşık olarak zeolit kompozisyonunu yansıttığı görülmektedir (özellikle CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ açısından).

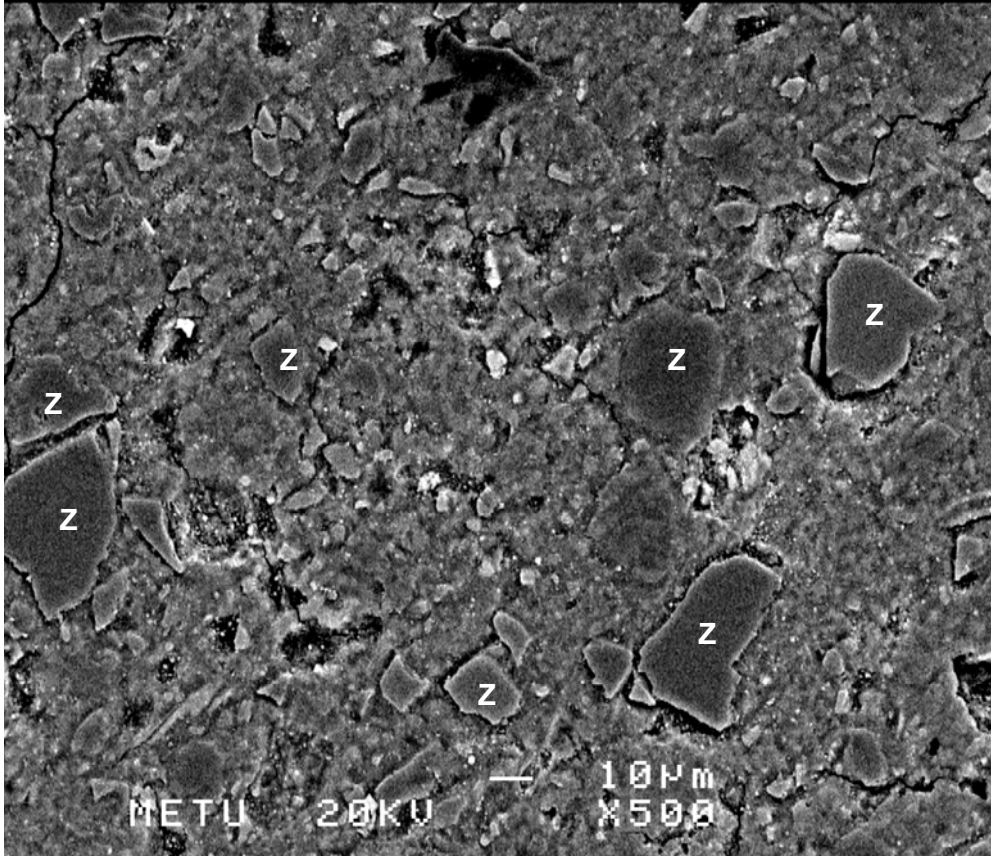
%55 Gördes zeoliti içeren katkılı çimento (GZ55) hamurundan x500 büyütmede alınan ve Şekil 4.43’de gösterilen BS-SEM fotoğrafında gözlenen mikro yapının, PÇ ve GZ15 hamurlarında gözlenen mikro yapıdan oldukça farklı olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi koyu renkte görülen reaksiyona girmemiş zeolit taneciklerinin sayısı daha bol ve genel mikro yapı GZ15 hamuruna kıyasla daha boşlukludur. Back scatter elektron mikroskobu görüntülerinde açık-koyu renk farklılıkları kimyasal kompozisyon farklılıklarını gösterdiğinden, Şekil 4.43’de reaksiyona girmemiş zeolit taneciklerinin kenarlarında görülen açık renkli ince bölgeler dikkat çekicidir. Bundan dolayı böyle bir tanecik x4000 büyütme oranında görüntülenerek (Şekil 4.44), taneciğin iç ve kenar kısmında EDX analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.45).



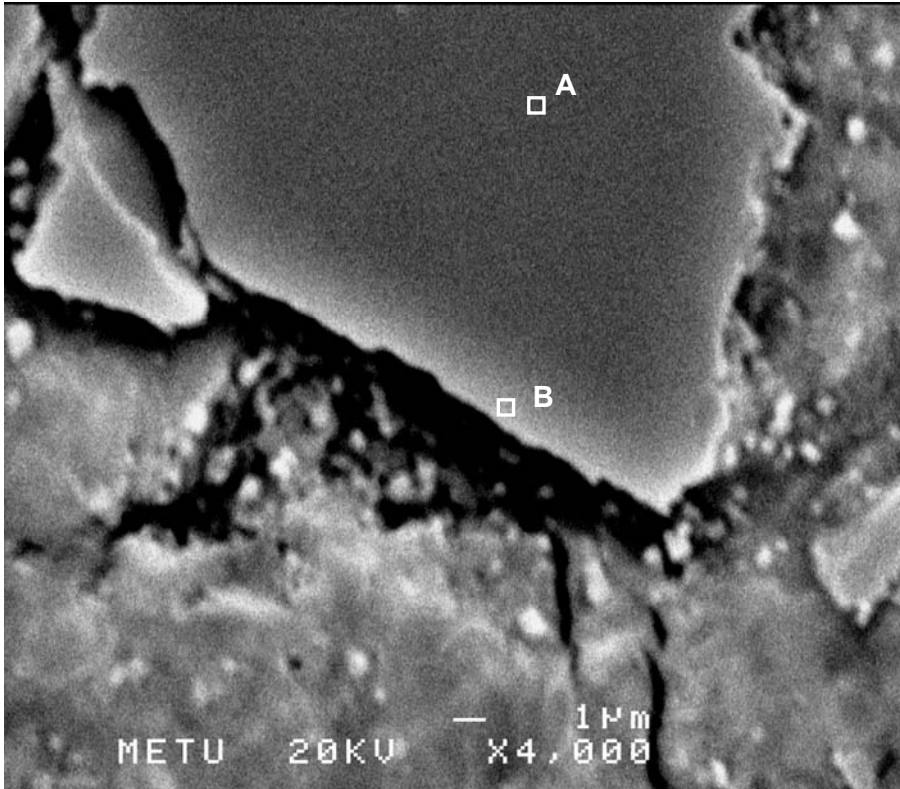
Şekil 4.41 GZ15 çimento hamurunun BS-SEM fotoğrafı



Şekil 4.42 Reaksiyona girmemiş zeolit taneciği ve EDX analizi

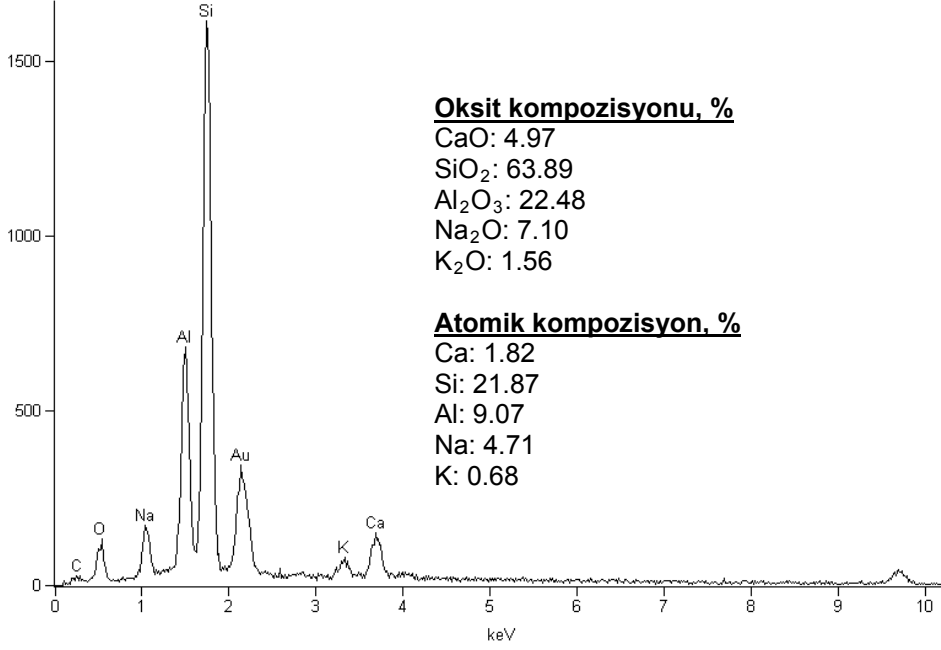


Şekil 4.43 GZ55 hamurunun BS-SEM fotoğrafı (Z: reaksiyona girmemiş zeolit tanecikleri)



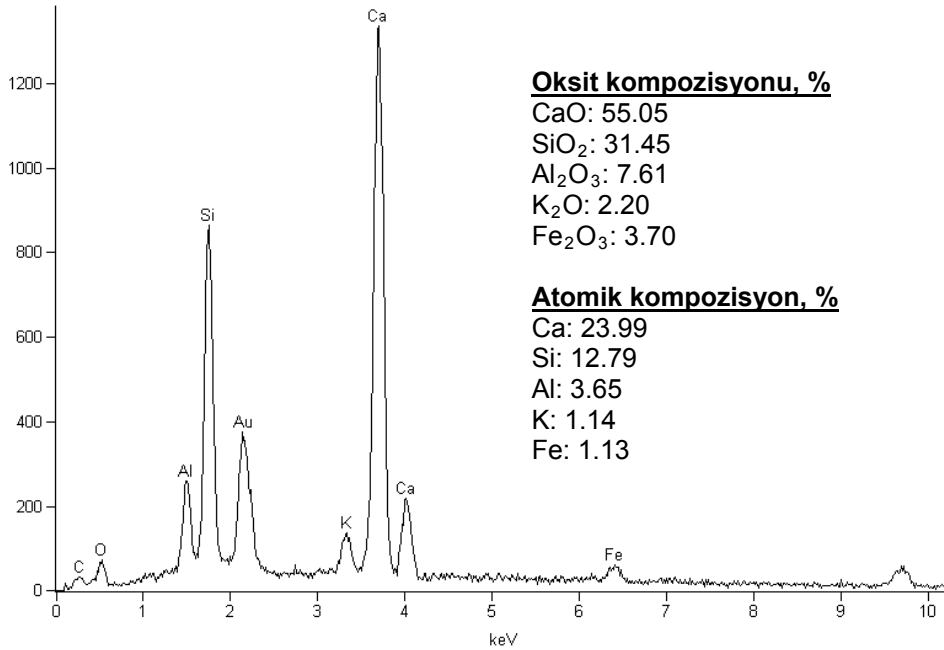
Şekil 4.44 GZ55 hamuru içerisinde bir zeolit taneciği (x4000 büyütme)

Full scale counts: 1615



a) A noktası

Full scale counts: 1335

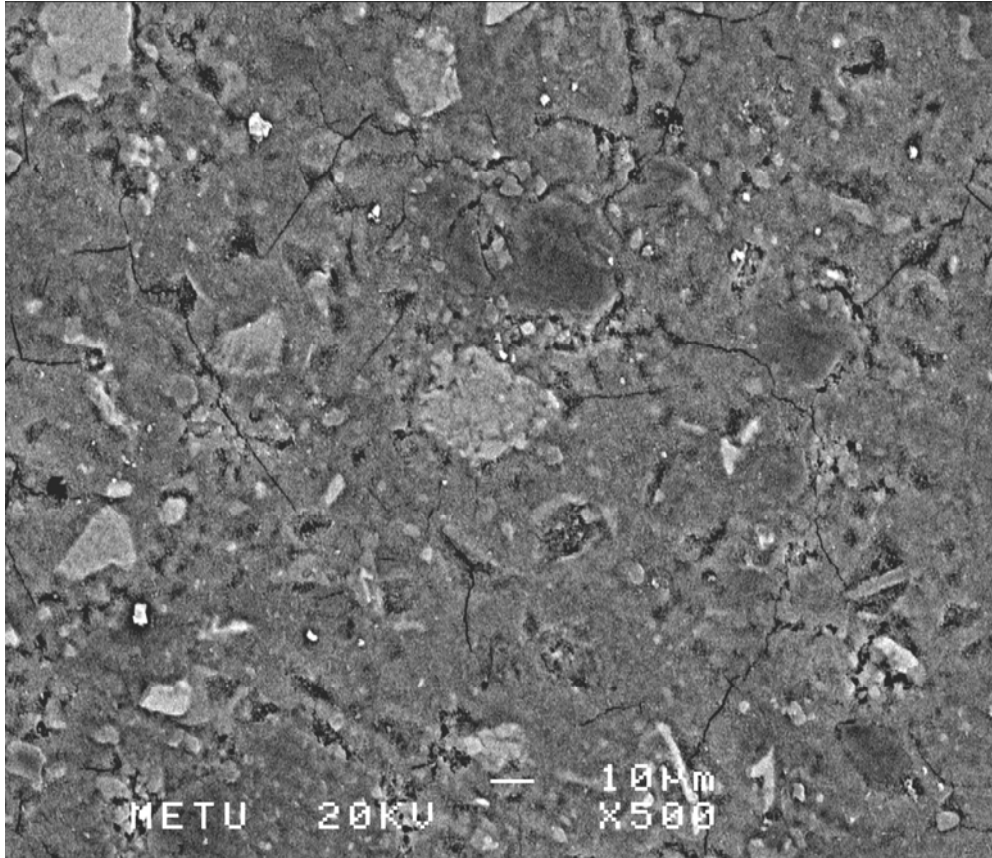


b) B noktası

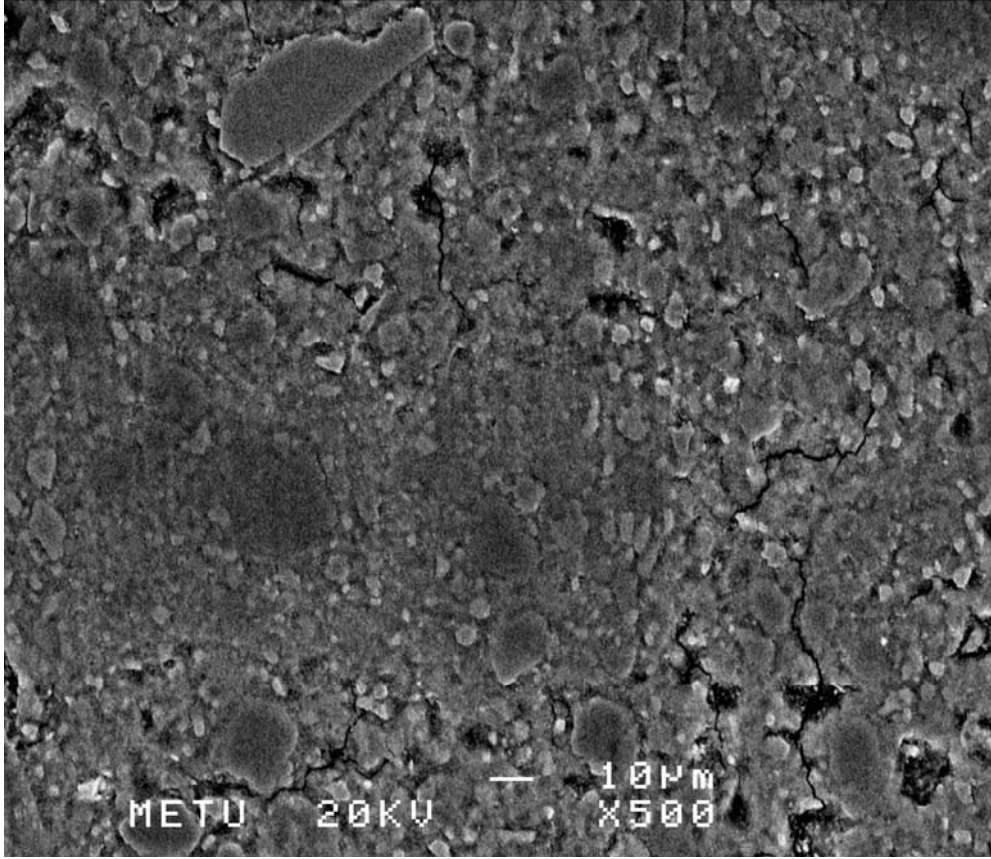
Şekil 4.45 A ve B noktalarında gerçekleştirilen EDX analizleri

Şekil 4.32'deki BS-SEM fotoğrafı ve Şekil 4.33'deki EDX analizleri incelendiğinde A ve B noktalarının kimyasal kompozisyonları arasındaki en önemli farklılıkların CaO ve SiO₂ kompozisyonlarında olduğu görülmektedir. Tanecığın kenar kısmında (B noktası) iç kısma kıyasla çok daha yüksek miktarda CaO ve daha düşük miktarda SiO₂ olduğu gözlenmekte ve bu durum tanecik kenarlarında gerçekleşmiş kısmi bir puzolanik reaksiyonu düşündürmektedir.

%15 ve %55 Gördes zeoliti içeren çimento hamurlarının mikro yapılarında görülen genel özellikler, Bigadiç zeoliti içeren çimento hamurlarında da benzer şekilde gözlenmektedir (Şekil 4.34 ve Şekil 4.35).



Şekil 4.46 BZ15 çimento hamurunun BS-SEM fotoğrafı



Şekil 4.47 BZ55 çimento hamurunun BS-SEM fotoğrafı

4.4.6 Akışkanlaştırıcı İhtiyaçları

Öğütülmüş doğal zeolit içeren çimento harçlarının, kontrol harcınıninkine benzer bir akış (flow) değerine sahip olabilmeleri için gerekli kimyasal katkı maddesi miktarları iki farklı tür akışkanlaştırıcı için Tablo 4.16'da verilmiştir. Tablo 4.16'dan görüldüğü gibi Gördes zeoliti içeren çimentolar için melamin bazlı katkı maddesi naftalin bazlı olana göre daha düşük dozajlarda aynı akış değerini verebilmektedir. Bigadiç zeoliti için ise %35 ve %55 doğal zeolit içeren çimentolarda naftalin bazlı akışkanlaştırıcının melamin bazlı olana göre daha az miktarlarda aynı akışkanlığı sağlayabildiği gözlenmiştir. Ancak hangi tip akışkanlaştırıcının katkılı çimento sistemiyle daha uyumlu olduğu hususu, bu katkıların basınç dayanımına olan etkileri de göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir.

Tablo 4.16 Zeolit katkılı çimento harçlarının akışkanlaştırıcı ihtiyaçları

Çimento	Akışkanlaştırıcı Miktarı, Bağlayıcı Malzeme Miktarının Ağırlıkça %'si	
	Melamin Bazlı	Naftalin Bazlı
KÇ-GZ15	0.4	0.5
KÇ-GZ35	1.1	1.2
KÇ-GZ55	2.5	3.0
KÇ-BZ15	0.3	0.4
KÇ-BZ35	0.8	0.7
KÇ-BZ55	1.2	1.0

4.4.7 Katkılı Çimento Harçlarının Basınç Dayanımları

Melamin ve naftalin bazlı akışkanlaştırıcılar ile ayrı ayrı hazırlanarak iki farklı kür koşulunda saklanan harçların basınç dayanımları Tablo 4.17’de verilmiştir.

Tablo 4.17’de iki farklı kür ortamı için verilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, %99 bağıl nem ortamında kür edilen, doğal zeolit katkılı numunelerin basınç dayanımlarının, kirece doymuş su içerisinde kür edilen numunelerden daha düşük olduğu gözlenmektedir. Her ne kadar kirece doymuş su içerisinde kür etme, ASTM C 109’a göre standart bir metot olsa da, %99 nem ortamında kür edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki düşüklük altı çizilmesi gereken bir durumdur. Ancak kür şartlarının etkisinin incelenmesi projenin ana kapsamı dışında olduğundan ve başlı başına ayrı bir çalışma gerektirdiğinde burada detaylı bir irdeleme yapılmamıştır. Çimento hamuru, harç veya beton numunelerinin test yaşlarına kadar kirece doymuş suda saklanması, yaygın olarak kullanılan ve sertleşmiş numunelerden dışarı kalsiyum hidroksit çıkışını engellemeyi amaçlayan bir metottur. Ancak, özellikle puzolanik reaksiyonun gerçekleştiği, mineral katkılı çimento/beton sistemlerini kirece doymuş su içerisinde kür yapmak durumunda, puzolanik reaksiyonu etkiyecek ölçüde dışarıdan numune içerisine kalsiyum hidroksit difüzyonunun olup olmayacağı tartışma konusudur.

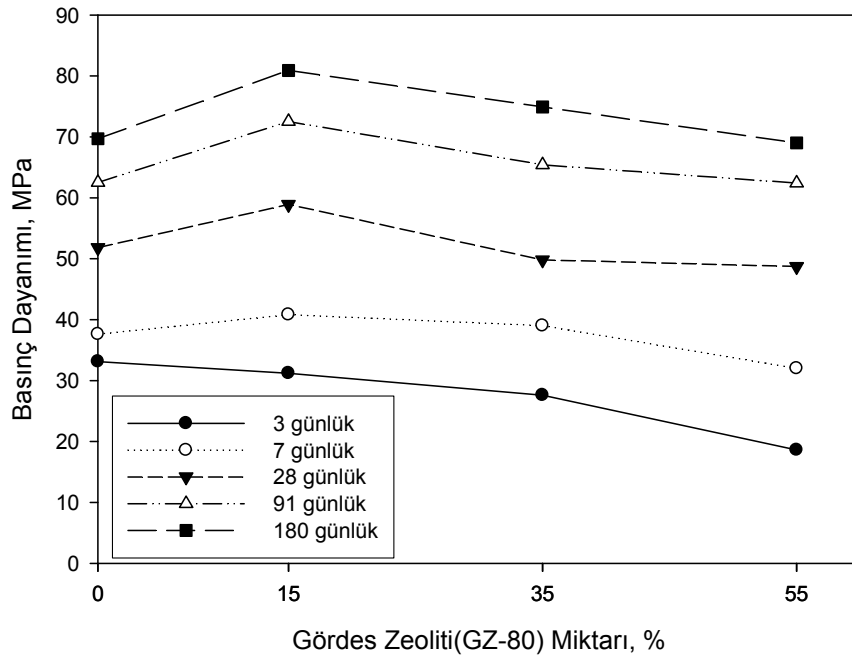
Tablo 4.17 Harçların basınç dayanımları

SA* Tipi	Çimento	Kirece Doygun Suda Kür					Nemli Kür				
		3 günlük	7 günlük	28 günlük	91 günlük	180 günlük	3 günlük	7 günlük	28 günlük	91 günlük	180 günlük
-	PC	33.1	37.6	51.8	62.5	69.7	32.6	40.9	56.1	67.1	71.1
NS	KÇ-GZ15	28.6	40.8	51.1	63.1	66.9	25.1	32.1	52.2	63.5	68.1
	KÇ-GZ35	20.2	31.5	49.2	56.7	60.6	21.1	30.7	50.7	58.5	59.1
	KÇ-GZ55	10.9	19.6	44.0	48.9	55.6	13.4	24.8	42.8	45.9	47.5
	KÇ-BZ15	28.3	38.8	61.2	66.6	67.6	26.0	35.5	45.7	61.6	63.6
	KÇ-BZ35	19.5	31.9	54.7	60.7	63.7	15.7	24.9	34.8	37.5	40.2
	KÇ-BZ55	11.7	24.8	39.1	54.1	56.7	11.2	19.9	27.6	28.1	33.6
MS	KÇ-GZ15	31.2	40.8	58.9	72.5	80.9	30.7	41.4	50.6	61.4	67.5
	KÇ-GZ35	27.6	39.0	49.8	65.4	74.9	24.2	32.7	42.1	52.4	57.9
	KÇ-GZ55	18.6	32.0	48.7	62.4	69.0	16.8	26.8	35.5	52.6	66.2
	KÇ-BZ15	36.5	43.7	65.2	72.7	83.6	33.0	42.5	61.0	73.3	76.2
	KÇ-BZ35	23.8	34.4	54.3	64.1	65.7	21.8	34.9	49.9	58.2	66.4
	KÇ-BZ55	17.6	28.6	51.5	60.7	64.3	13.8	25.0	31.5	43.6	53.4

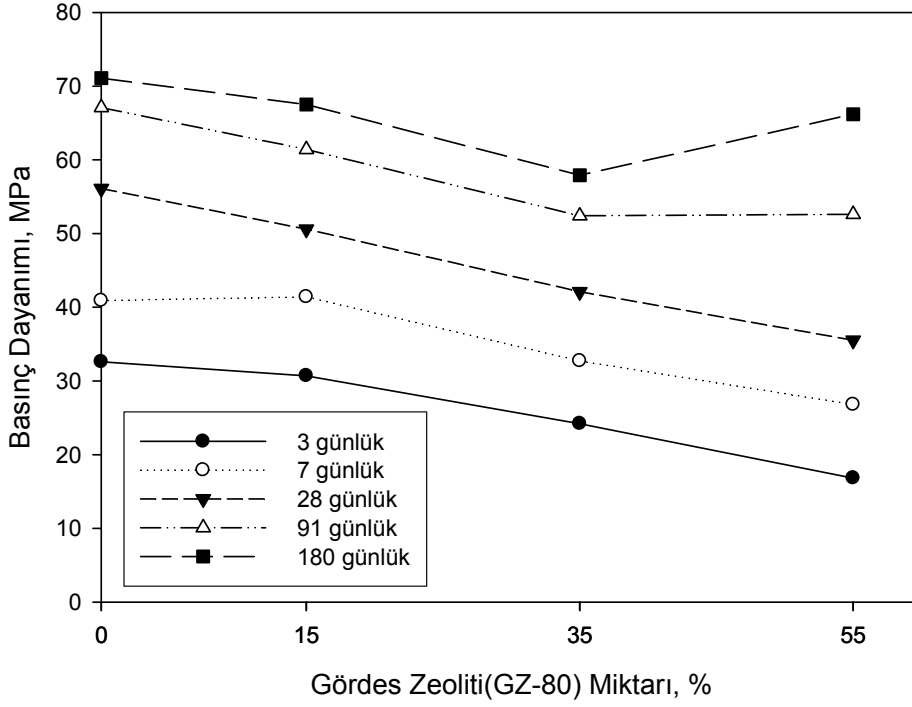
*SA:Süper akışkanlaştırıcı

Daha az miktarda kullanım dozajı gerektiren melamin bazlı süper akışkanlaştırıcının, naftalin bazlı akışkanlaştırıcıya kıyasla basınç dayanımı değerlerinde de daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bundan dolayı basınç dayanımı değerlendirmeleri melamin bazlı akışkanlaştırıcı kullanıldığında elde edilen değerler esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

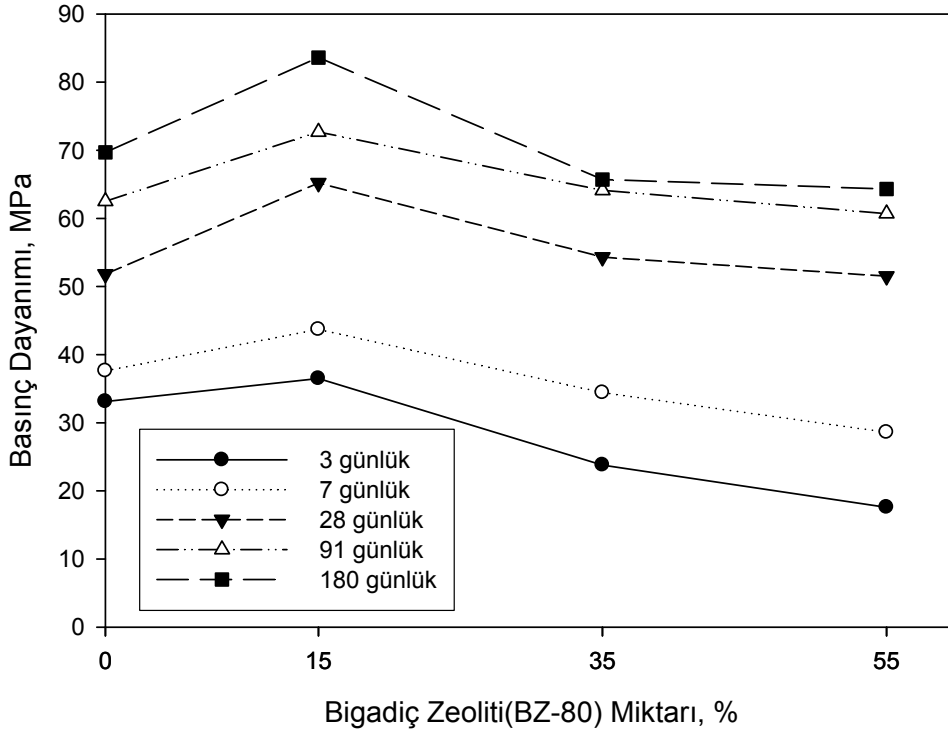
Melamin bazlı akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan harçlara ait değerlerden elde edilen, katkıli çimentolardaki doğal zeolit miktarının, çimento harçlarının basınç dayanımlarına etkisi Gördes ve Bigadiç zeolitleri için ve iki farklı kür koşulu için Şekil 4.48-Şekil 4.51’de gösterilmiştir.



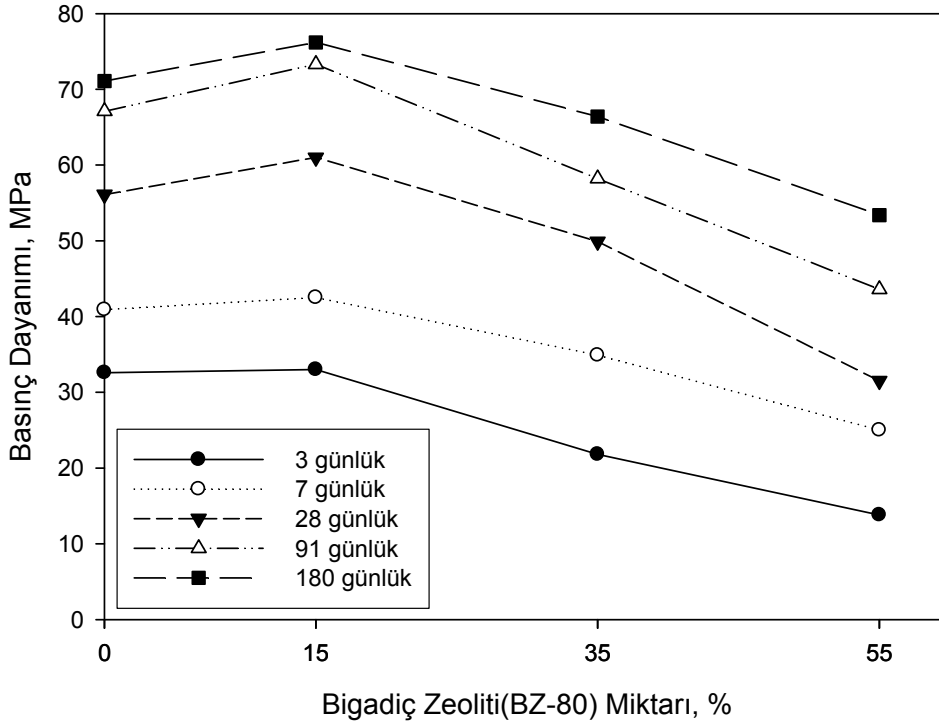
Şekil 4.48 Melamin bazlı kimyasal katkı ile hazırlanan çimento harçlarında, çimentodaki Gördes zeoliti oranının basınç dayanımlarına etkisi (**Kirece doymun suda kür**)



Şekil 4.49 Melamin bazlı kimyasal katkı ile hazırlanan çimento harçlarında, çimentodaki Gördes zeoliti oranının basınç dayanımlarına etkisi (%99 Bağıl nem ortamında kür)



Şekil 4.50 Melamin bazlı kimyasal katkı ile hazırlanan çimento harçlarında, çimentodaki Bigadiç zeoliti oranının basınç dayanımlarına etkisi (Kirece doymun suda kür)



Şekil 4.51 Melamin bazlı kimyasal katkı ile hazırlanan çimento harçlarında, çimentodaki Bigadiç zeoliti oranının basınç dayanımlarına etkisi (**%99 Bağlı nem ortamında kür**)

Kütlece %15 oranında Bigadiç zeoliti (BZ-80) içeren çimentolar, test edilen tüm yaşlarda Portland çimentosundan daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. %55 oranında doğal zeolit içeren ve standart şekilde (kirece doymuş su içerisinde) kür edilen harçların 28 günlük basınç dayanımları ise Bigadiç ve Gördes zeoliti için sırasıyla Portland çimentosunun basınç dayanımının %94 ve %99'u olarak gerçekleşmiştir. Yüksek oranda doğal zeolit içeren katkıli çimentoların, Portland çimentosuna neredeyse eşdeğer 28-günlük basınç dayanımı göstermeleri projenin önemli sonuçlarından birisi olarak elde edilmiştir. Ancak bu yüksek dayanım performansının, %99 nemli ortamda kür edilen numunelerde gözlenmemiş olması, proje kapsamı dışında olan, kür koşullarının bu tip harç ve betonların mekanik özellikleri üzerine etkisinin detaylı olarak araştırılması gerekliliğini ortaya koymuştur.

Melamin ve naftalin bazlı su azaltıcı kimyasal katkı maddeleriyle hazırlanan harçların basınç dayanımları karşılaştırıldığında, melamin bazlı akışkanlaştırıcının kullanıldığı harçların basınç dayanımlarının naftalin bazlı akışkanlaştırıcıyla hazırlananlardan daha yüksek olduğu

gözlenmektedir. Buradan melamin bazlı akışkanlaştırıcının, doğal zeolit içeren katkılı çimentolar ile daha uyumlu olduğu söylenebilir.

Yukarıdaki şekillerden de açıkça görüldüğü gibi, %99 bağıl nem ortamında kür etme durumunda, doğal zeolit içeren harçların basınç dayanımı performanslarının önemli derecede düştüğü gözlenmektedir. Bu durum normalde mineral katkı içeren çimento sistemlerinin, sadece portland çimentosu içeren sistemlere kıyasla daha fazla kür suyuna ihtiyaç duymalarından ve %99 bağıl nem ortamında bu su ihtiyacının yeterince karşılanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu etkinin yüksek yüzey alanına sahip doğal zeolitlerde daha baskın hale geldiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla doğal zeolit içeren çimento sistemlerinde ıslak kür koşullarının, sadece portland çimentolu sistemlere ve diğer mineral katkı içeren sistemlere göre daha büyük bir önem taşıdığı, bundan dolayı daha uzun süreli ve etkin bir ıslak kür gerektireceği görülmektedir.

Düşük, orta ve yüksek miktarlarda doğal zeolit içeren katkılı çimentoların basınç dayanımı performanslarının (kirece-doygun suda kür edilen), zeolitik olmayan doğal puzolanlarla daha önceden yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara kıyasla [UZAL ve TURANLI, 2003, TURANLI ve diğerleri, 2005] oldukça yüksek olduğu açıkça gözlenmiştir ve bu sonuç projenin önemli çıktılarında birisi olarak belirtilebilir.

4.5 Öğütülmüş Doğal Zeolit İçeren Beton Karışımlarının Özellikleri

4.5.1 Taze Beton Özellikleri

Hazırlanan karışımlar için taze beton özellikleri, ilgili ASTM standartlarına göre tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 4.18'de gösterilmiştir.

Tablo 4.18 Taze beton özellikleri

Karışım kodu	C1	C2	GZ15	GZ35	GZ55	BZ15	BZ35	BZ55
Zeolit tipi	-	-	GZ-80	GZ-80	GZ-80	BZ-80	BZ-80	BZ-80
Akışkanlaştırıcı İhtiyacı, (Bağlayıcının ağırlıkça %'si)	-	0.7	1.1	1.5	2.5	0.9	1.2	1.3
Birim ağırlık, kg/m ³	2403	2424	2401	2406	2371	2421	2391	2381
Çökme, cm	14	15	14	15	15	16	15.5	16
Hava muhtevası, %	1.9	2.2	1.6	1.3	1.6	1.8	1.7	1.2
İlk priz süresi, saat:dakika	4:13	5:20	3:55	2:45	4:25	4:45	4:40	3:25
Son priz süresi, saat:dakika	6:12	7:50	7:05	7:30	10:40	6:50	6:20	7:55

Akışkanlaştırıcı ihtiyacı: Son yıllarda beton endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleri, özellikle düşük su/bağlayıcı oranına sahip, yüksek dayanımlı ve iyi dayanıklılık özelliklerine sahip, mineral katkılı veya katkısız beton karışımlarının ayrılmaz bir parçası haline gelmişlerdir. Düşük su/çimento oranıyla (yaklaşık 0.33-0.40) hazırlanan, yüksek miktarda mineral katkı malzemesi içeren (yüksek oranda uçucu kül ve/veya yüksek fırın cürufu içeren beton karışımları gibi) beton karışımlarında ise süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir.

Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı, belirli miktarda doğal zeolit içeren beton karışımlarını, özellikle düşük su/çimento (s/ç) değerlerinde yeterli işlenebilirlikte olacak şekilde hazırlayabilmek için süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanımı tercih edilmiştir.

Düşük, orta ve yüksek miktarlarda doğal zeolit içeren ve 0.45 su/çimento oranına sahip beton karışımlarını yaklaşık 15 cm çökme değerine sahip olacak işlenebilirlikte elde edebilmek için gerekli akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarları, toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %'si olarak Tablo 4.18'de gösterilmiştir. Tablo 4.18'den görüldüğü gibi, mineral katkı içermeyen beton karışımının 0.45 s/ç oranında istenilen işlenebilirliğe sahip olabilmesi için %0.7 akışkanlaştırıcı dozajı yeterli olurken, bu değer %55 Gördes ve Bigadiç zeoliti içeren beton karışımları için sırasıyla %2.5 ve %1.3'e kadar artış göstermiştir.

Hava muhtevası: Tablo 4.18'den görüldüğü gibi, zeolit içeren beton karışımlarının hava muhtevalarının, kontrol karışımlarından bir miktar düşük olduğu, zeolit miktarındaki artışın hava muhtevası değerini düşürdüğü gözlenmiştir. Hemen tüm mineral katkı malzemeleri için geçerli olan bu durumun, doğal zeolitler için de gözlenmesi beklenen bir sonuçtur. Dolayısıyla donma-çözünme etkilerine maruz kalacak, zeolit içeren beton karışımlarının normal beton karışımlarından bir miktar daha fazla hava sürükleyici katkı maddesine ihtiyaç duyacağı anlaşılmaktadır.

Priz süreleri: Doğal zeolit içeren katkılı çimentoların, normal portland çimentosundan daha kısa sürede priz aldıklarına ilişkin deneysel sonuçlar önceki bölümlerde sunulmuştu. Tablo 4.18'den görüldüğü gibi, benzer durumun beton karışımları için de geçerli olduğu görülmektedir. Doğal zeolit içeren beton karışımları eşit s/ç oranına sahip kontrol karışımından (C2) daha kısa ilk priz süreleri göstermişlerdir. Özellikle ilk priz süresinin,

doğal zeolit miktarına bağlı olarak önemli derecede kısaldığı ancak betonun yerleştirilebilmesine olanak sağlayacak düzeyde yeterli olduğu görülmektedir. Bu durum muhtemel sebeplerinden daha önce çimento hamuru priz süreleri için bahsedilmiştir.

4.5.2. Sertleşmiş beton özellikleri

Basınç ve yarmada-çekme dayanımları:

Hazırlanan beton karışımlarının 3, 7 ve 28 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımları Tablo 4.19’da gösterilmiştir.

Tablo 4.19 Beton karışımlarının basınç ve yarmada-çekme dayanımları

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı, MPa				Yarmada-çekme dayanımı, MPa			
	3 gün	7 gün	28 gün	91 gün	3 gün	7 gün	28 gün	91 gün
C1	32.2	35.3	42.4	48.5	2.9	3.5	3.5	3.5
C2	38.6	43.2	50.3	54.5	3.1	3.9	4.0	4.1
GZ15	32.5	41.3	65.6	73.3	2.5	3.2	5.1	5.3
GZ35	20.4	33.5	54.3	62.1	2.6	3.6	4.4	4.7
GZ55	11.8	27.6	53.0	62.4	1.1	3.1	3.4	3.6
BZ15	34.2	44.5	67.5	73.8	1.7	3.6	4.3	4.7
BZ35	22.6	38.7	60.0	64.5	2.1	3.5	3.7	3.8
BZ55	10.5	26.3	46.3	54.9	1.3	3.3	3.4	3.5

Tablo 4.19’deki değerlerden görüldüğü gibi, %15 Gördes ve Bigadiç zeoliti ikamesiyle hazırlanan beton karışımları (GZ15 ve BZ15) 7.günde eşit su/bağlayıcı oranıyla hazırlanan kontrol karışımına (C2) benzer basınç dayanımı göstermişlerdir. Bu karışımların 28 günlük basınç dayanımları ise kontrol karışımından sırasıyla %30 ve %34 daha yüksek olarak gerçekleşmiştir. Düşük miktarda doğal zeolit ikamesiyle hazırlanan karışımların bu denli yüksek dayanım performansı göstermeleri, doğal zeolitlerin çalışmanın önceki bölümlerinde tespit edilen ve tartışılan yüksek puzolanik aktiviteleriyle ve dolgu etkisiyle ilişkilendirilebilir.

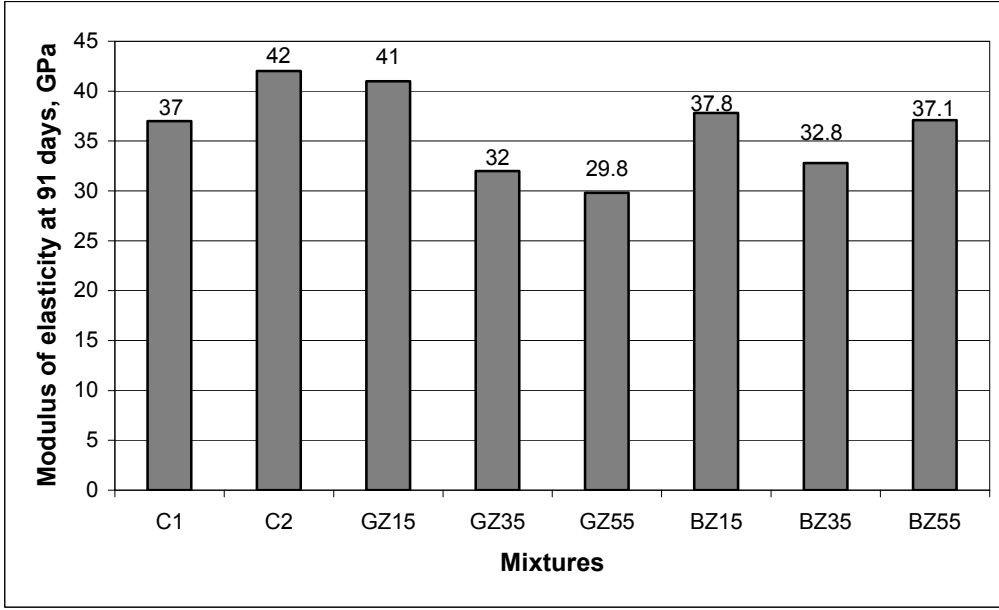
%35 doğal zeolit ikamesi ile hazırlanan beton karışımları 7.günde eşit su/bağlayıcı oranıyla hazırlanan kontrol karışımına (C2) kıyasla %15-20 daha düşük basınç dayanımı göstermişler, ancak 28. günde GZ35 ve BZ35 karışımları kontrol karışımından sırasıyla %8 ve %19 daha yüksek basınç dayanımı sergilemişlerdir. Bir başka deyişle, 1 m³ beton için sadece 260 kg/m³ portland çimentosu kullanılarak 28 günlük basınç dayanımı 55-60 MPa olan bir beton karışımının elde edilmesi başarılmıştır.

Yüksek miktarda (%55) doğal zeolit ikamesi ile hazırlanan beton karışımları ise C2 kontrol karışımına benzer C1 kontrol karışımından ise daha yüksek basınç dayanımı performansı göstermişlerdir. Bu durum %55 daha az portland çimentosu kullanılarak (180 kg/m³) 7. günde 25 MPa, 28. günde ise 45-50 MPa basınç dayanımı gösteren bir beton karışımı elde edilmiş olmaktadır.

C1 ve C2 kontrol karışımlarıyla karşılaştırıldığında, %15 ve %35 zeolit ikamesi ile hazırlanan beton karışımlarının 28. ve 91. günlerde daha yüksek yarmada-çekme dayanımı gösterdikleri gözlenmekte ve bunun puzolanik reaksiyon sonucunda mikro yapısı gelişen çimento hamuru-agrega ara yüzü ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Elastiklik modülü:

Beton karışımlarının 91 günlük yaşları için ölçülen elastiklik modülü değerleri Şekil 4.40'da gösterilmiştir. C2 kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında, doğal zeolit ikamesi ile hazırlanan beton karışımlarının elastiklik modülü değerlerinin karşılaştırılabilir ölçüde veya bir miktar düşük olduğu görülmektedir. Gördes zeoliti içeren beton karışımlarının elastiklik modülü değerlerinin zeolit ikame oranı attıkça düştüğü görülmekte, ancak bu durumun Bigadiç zeoliti içeren karışımlar için tamamıyla geçerli olmadığı gözlenmektedir. %55 oranında Bigadiç zeoliti içeren karışım (BZ55) yaklaşık olarak %15 zeolit içeren karışıma benzer bir elastiklik modülü değeri göstermiştir. Karışımların hava muhtevası elastiklik modülü etkileyen faktörlerden birisi olduğundan, BZ55 karışımının diğerlerine kıyasla daha yüksek olan elastiklik modülü değerinin, düşük olan hava muhtevasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Çimento hamuru matrisi ve hamur-agrega ara yüzünün gözenekliliği elastiklik modülünü etkileyen diğer önemli faktörler olduğundan, doğal zeolit içeren beton karışımlarının elastiklik modülü değerlerinin tam olarak nasıl etkilendiğini açıklamak oldukça zordur.

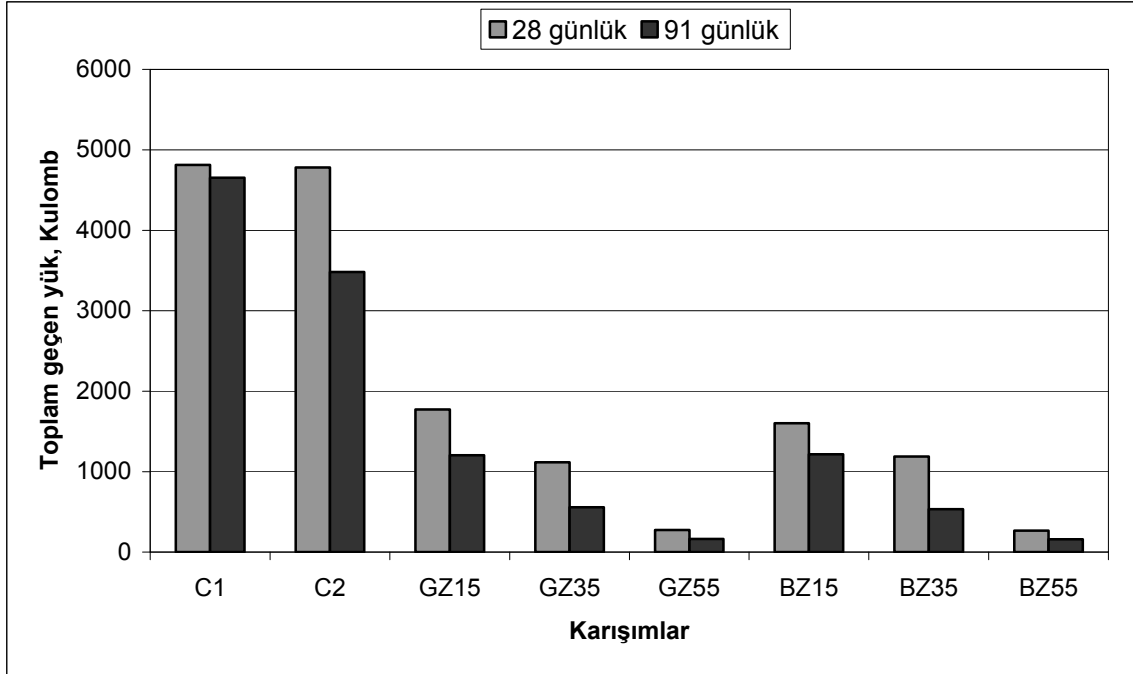


Şekil 4.52 Beton karışımlarının elastiklik modülü değerleri

Klor iyon geçirgenlikleri: ASTM C 1202 sertleşmiş beton numunelerinin elektriksel yolla, klor iyonu geçirgenliklerinin ölçülerek, deney sonucunda elde edilen toplam geçen yük değerine göre, test edilen numunenin klor iyonu geçirgenliğini, ihmal edilebilir (yük<100), çok düşük (100<yük<1000), düşük (1000<yük<2000), orta (2000<yük<4000) ve yüksek (yük>4000) olarak sınıflandırılması esasına dayanmaktadır. Standart hızlandırılmış klor iyon geçirgenliği testi, betonların direkt olarak geçirimsizliğine ölçmese de, genel olarak boşluk oranı ve geçirgenliği konusunda, dolayısıyla da dayanıklılığı konusunda fikir veren bir parametre olarak kabul görmektedir.

Beton karışımlarının bu yolla ölçülen klor iyon geçirgenliklerine karşılık gelen toplam yük değerleri Şekil 4.41’de gösterilmiştir. Şekil 4.41’den görüldüğü gibi, doğal zeolit ikamesiyle elde edilen beton karışımları, kontrol karışımlarına kıyasla çok daha düşük klor geçirgenliği göstererek, ASTM C 1202 sınıflandırmasına göre “düşük” geçirgenlik sınıfına girdikleri gözlenmiştir. Doğal zeolit ikame oranı arttıkça klor iyonu geçirgenliği azalmaktadır. Bu durumun doğal zeolitlerin puzolanik reaksiyonu sonucunda oluşan puzolanik ürünlerin, hem çimento hamuru matrisinde hem de çimento hamuru-agrega arayüzünde meydana getirdiği boşluk azalması sonucunda oluştuğu düşünülebilir. Dolayısıyla, hazırlanan doğal zeolit içeren

beton karışımlarının kontrol karışımlarına kıyasla, dış etmenlerden kaynaklanabilecek olumsuz etkilere karşı (sülfat hücumu, tuz hücumu vb.) daha dayanıklı olacağı beklenebilir.

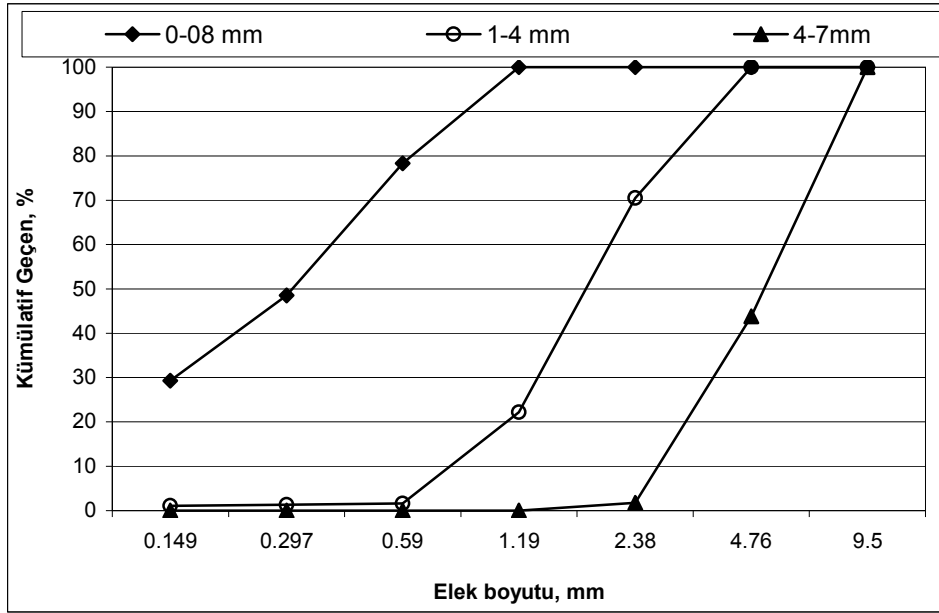


Şekil 4.53 Beton karışımlarının klor iyon geçirgenlikleri

4.6 Doğal Zeolitlerin Hafif Agregada Olarak Kullanımı

Doğal zeolitlerin hafif agregada olarak kullanılabilirliklerini araştırmak amacıyla, Gördes bölgesi doğal zeolit rezervlerinden temin edilmiş olan belirli boyut gruplarındaki malzemenin fiziksel özellikleri tespit edilmiş ve zeolit agregası alkali-silika reaktivitesi açısından değerlendirilmiştir.

Gördes bölgesi doğal zeolit rezervlerinden temin edilmiş olan 0-0.8mm, 1-4 mm, 4-7 mm nominal boyut aralıklarındaki agregada gruplarının elek analizleri yapılmış ve beton/harç karışım hesaplamalarında kullanılan parametreleri tespit edilmiş ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.54 ve Tablo 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.54. Gördes zeoliti agregalarının elek analiz sonuçları

Tablo 4.20. Gördes zeoliti agregalarının fiziksel özellikleri

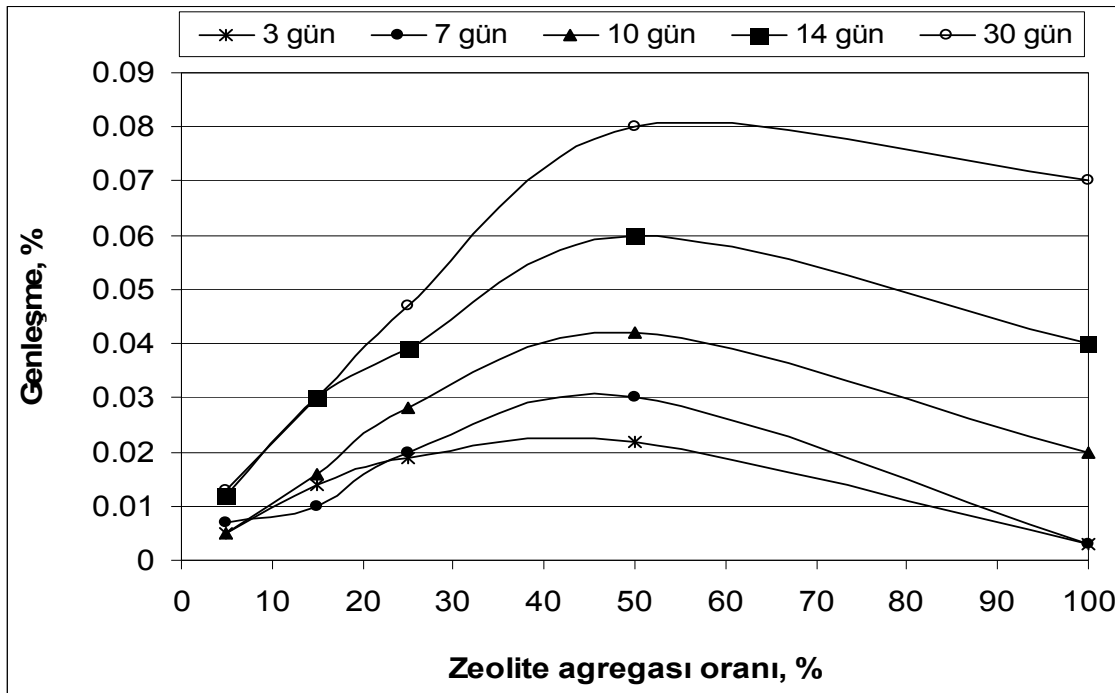
Özellik	0-0.8 mm	1-4mm	4-7mm
Özgül ağırlık (kuru)	1.63	1.41	1.26
Özgül ağırlık (SDYK)	1.97	1.81	1.72
Su emme, % (24 saat)	20.6	28.7	37.2
Mevcut nem,%	5.5	5.8	6.2

SDYK:Suya doygun-yüzey kuru

Tablo 4.20’de gösterilen özgül ağırlık değerlerinin TS 1114 EN 13055’te hafif agregalar için belirtilen 2.0 değerinin altında olduğu, dolayısıyla Gördes zeoliti agregalarının hafif agregaya tanımına uyduğu tespit edilmiştir. Gördes zeoliti agregalarının 24 saatlik su emme oranlarının ise yaygın olarak kullanılan hafif agregalardan (pomza vb.) daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Gördes zeoliti agregası ayrıca ASTM C 1260’a göre hızlandırılmış harç çubukları yöntemiyle alkali-silika reaktivitesi açısından değerlendirilmiştir. Agregaların zararlı alkali-silika reaksiyonuna ilişkin literatür verilerinden, bazı aşırı reaktif agregaların tek başlarına kullanıldıklarında hızlandırılmış metot ile yapılan testte az miktarda genleşme

gösterebildikleri bilinmektedir. Bu tür bir davranış aşırı alkali-silika reaksiyonu sonucunda oluşan bol miktarda jelin harcın gözenekli yapısını tıkayıp, reaksiyonu hızlandırmak için kullanılan NaOH çözeltisinin harcın içine nüfuz ederek reaksiyonun devamını önlediği şeklinde açıklanmaktadır. Bu yüzden böyle bir durum için agregalar reaktif olmayan (örneğin kireç taşı) ile belirli oranlarda karıştırılarak hızlandırılmış metotla test edilmekte ve daha fazla genleşme gösterip göstermediği incelenmektedir. Bundan dolayı Gördes zeoliti agregası böyle bir durum için belirli oranlarda kireç taşı ile karıştırılarak test edilmiştir. Ölçülen genleşme değerleri Şekil 4.55’de gösterilmiştir.



Şekil 4.55 Alkali-silika reaksiyonu kaynaklı genleşme (ASTM C 1260 yöntemi)

Şekil 4.55’de görüldüğü gibi sadece zeolit agregası tek başına test edildiğinde (%100 zeolit agregası) genleşme değerleri %50 zeolit+%50 kireç taşının karıştırılarak kullanıldığı durumdan daha düşük olarak gerçekleşmektedir. Ancak %50 zeolit agregası durumunda dahi 14 günlük genleşme değeri ASTM C 1260’da belirtilen limit değer olan %0.1’den daha düşüktür. Buna rağmen %100 zeolit agregası durumu yerine %50 zeolit agregası durumunda daha yüksek genleşme oluşuyor olması, Gördes zeoliti agregasının alkali-silika reaksiyonu açısından dikkatle kullanılması gerektiğini göstermektedir. Çünkü zeolit agregasının gözenekli yapısı alkali-silika reaksiyonu sonucunda oluşan jelin yayılması için uygun bir hacim teşkil ederek genleşme değerlerinin düşük olmasına sebebiyet veriyor olabilir. Bundan

dolayı zeolit agregasının alkali-silika reaktivitesi açısından ayrı bir çalışma kapsamında daha detaylı (mikro yapı incelemelerini de içeren) bir çalışma ile değerlendirilmesi uygun olacaktır.

Sonuç olarak Gördes doğal zeolitinin incelenen fiziksel özellikleri açısından hafif agrega olarak kullanılabilmesi, muhtemel bir alkali-silika reaksiyonu açısından her ne kadar ASTM C 1260'da belirtilen limit değeri açısından zararsız görünse de bu durumun uzun dönem (hızlandırılmamış) testler ile teyit edilmeden kullanılmaması gerekliliği ortaya konmuştur.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye'deki doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımlarına yönelik bilimsel veri sağlamayı amaçlayan bu proje kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

1. Çalışmada kullanılan Gördes ve Bigadiç zeolitlerinin Ca(OH)_2 ile olan puzolanik aktivitelerinin çalışmada kullanılan uçucu kül ve zeolitik olmayan doğal puzolandan daha fazla olduğu, silis dumanından ise bir miktar daha az olduğu tespit edilmiştir. Doğal zeolitlerin erken yaşlardaki reaktiviteleri, yüksek olan reaktif SiO_2 içerikleriyle; geç yaşlardaki reaktiviteleri ise reaktif SiO_2 içeriklerine ek olarak yüksek BET yüzey alanlarının bir sonucudur.
2. Ca(OH)_2 tüketimi açısından Gördes zeolit Bigadiç zeolitine kıyasla bir miktar daha fazla aktif bulunmuştur.
3. Kristal yapılı doğal zeolitler ile camsı yapılı puzolanik malzemeler arasında puzolanik aktivite açısından gözlenen en belirgin fark, doğal zeolitlerin kireç hamurlarında yüksek miktarda Ca(OH)_2 tüketmelerine rağmen eşdeğer oranda basınç dayanımı oluşturmamaları olarak gözlenmiştir. Ancak bu durumun doğal zeolitlerin portland çimentosu ile birlikte kullanıldığında düşük dayanım performansı sergileyeceği anlamına gelmemektedir. Nitekim ince öğütülmüş Bigadiç zeoliti diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında en yüksek dayanım aktivite indeksini göstermiştir.
4. Doğal zeolit katkılı portland çimentoları, normal portland çimentosuna kıyasla daha hızlı ilk ve son priz süreleri göstermişlerdir ve bu durum doğal zeolitlerin yüksek BET yüzey alanlarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.
5. Doğal zeolitlerin katkılı çimentolarda kullanıldıklarında puzolanik aktivite açısından sağladıkları yararları ek olarak, katkılı çimentodaki portland çimentosu fazının da hidrasyon derecesini artırdıkları, Ca(OH)_2 üretimindeki artış ile tespit edilmiştir. Bu durum muhtemelen ayrıca bir dayanım artışı sağlamaktadır.

6. Katkılı çimentolarda doğal zeolitlerin varlığı sertleşmiş bağlayıcı sistemin gözenek boyut dağılımının küçülmesini sağlayarak bağlayıcı sistemin geçirgenlik ve basınç dayanımı özelliklerini iyileştirmektedir. Doğal zeolitlerin puzolanik aktiviteleri sonucunda sertleşmiş bağlayıcı sistemde 50 nm'den daha büyük kapiler gözeneklerin hacmi azalmaktadır.
7. Sertleşmiş katkılı çimentoların XRD analizleri sonucunda, doğal zeolitlerin puzolanik reaksiyonları sonucunda kristal bir ürün olarak tetra kalsiyum aluminat hidrat ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13 \text{H}_2\text{O}$) olduğu tespit edilmiştir. Kristal ürünler açısından Gördes ve Bigadiç zeolitleri arasında önemli bir fark gözlenmemiştir.
8. Sertleşmiş çimento hamurlarının XRD analizleri ilerleyen yaş ile birlikte zeolitlerin kristal yapılarının bozunduğunu yani çözünerek puzolanik reaksiyona girdiklerini göstermiştir. Literatür verilerine dayanılarak bu bozunma sürecinin muhtemelen yüksek pH ortamından kaynaklandığı düşünülmektedir.
9. Mikro yapı çalışmaları (BS-SEM), %15 doğal zeoliti içeren çimento hamurlarının, puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan ekstra bağlayıcı jeller sonucunda, normal portland çimentosu hamuruna kıyasla daha yoğun bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. %55 oranında doğal zeolit içeren katkılı çimento hamurlarında göreceli olarak büyük zeolit taneciklerinin 28.günde daha reaksiyona girmeden kaldıklarını gözlenmiştir. Bu tanecikler üzerinde gerçekleştirilen EDX analizleri, taneciklerin yüzeylerinde meydana gelmiş muhtemel puzolanik reaksiyona işaret etmektedir.
10. Doğal zeolit katkılı çimentoların, naftalin bazlı akışkanlaştırıcıya kıyasla, melamin bazlı akışkanlaştırıcı ile daha uyumlu oldukları sonucuna varılmıştır.
11. Doğal zeolit katkılı çimentolar, doğal puzolanlı bir çimentodan beklenmeyecek kadar yüksek bir basınç dayanımı performansı göstermişlerdir. %55 Bigadiç zeoliti ikamesi ile hazırlanan katkılı çimento, kontrol numunesine benzer bir 28 günlük basınç dayanımı göstermiştir. Bu sonuç zeolitik olmayan doğal puzolanlarla karşılaştırıldığında sıra dışı bir performans anlamına gelmektedir.
12. Katkılı çimentolarda olduğu gibi, ince öğütülmüş doğal zeolitler mineral ikame malzemesi olarak kullanıldıkları beton karışımlarında da üstün bir dayanım performansı sergilemişlerdir. Doğal zeolitlerin çok yüksek dayanım performansları sayesinde, sadece 180 kg/m^3 portland çimentosu dozajı kullanılarak (220 kg/m^3 zeolit ile); 7 günlük basınç dayanımı 25 MPa, 28 günlük basınç dayanımı ise 45-50 MPa

13. Doğal zeolitlerin düşük ikame oranlarında oldukça yüksek dayanımlı (60-70 MPa) beton üretimde, yüksek ikame oranlarında bile (%55) yüksek dayanımlı (>40 MPa) beton üretiminde kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bu sonuç çimento ve beton endüstrisi orijinli CO₂ gazı emisyonlarının, portland çimentosu klinkeri üretiminde azalma sağlayarak dürülmesi açısından çok büyük bir önem taşımaktadır.
14. Doğal zeolitlerin temel fiziksel özellikler açısından inşaat endüstrisinde hafif agrega olarak da kullanılabilirliği gösterilmiştir. Gördes zeoliti her ne kadar hızlandırılmış bir metot olan ASTM C 1260 metoduna göre alkali-silika reaksiyonu açısından zararsız olarak tespit edilmiş ise de, bu sonucun uzun dönem testler ile teyit edilmesi ihtiyacı vardır.
15. Projenin yukarıda sıralanan sonuçlarının çalışmada kullanılan ve karakterizasyonları detaylı şekilde verilen doğal zeolitleri kapsadığı, aynı rezerv bölgelerinden temin edilse dahi başka doğal zeolit örneklerinin düşük ihtimalde olsa bu projede elde edilen sonuçlardan farklı sonuçlar verebileceği akıldan çıkarılmamalıdır. Dolayısıyla doğal zeolitlerin proje konusu kullanımlarında karakterizasyonlarının bu projede verilen karakterizasyonlara benzer olup olmadığının kontrol edilmesi, kullanılacak doğal zeolitin performansı hakkında bilgi verebilir.

Doğal zeolit içeren bağlayıcı sistemlerle ilgili olarak ilave çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu projede gerçekleştirilen çalışmalara benzer çalışmalar, özellikle Türkiye’de rezervi bulunan farklı tür doğal zeolitler (örn: analsim) için de gerçekleştirilmeli ve sonuçlar bu projedeki klinoptilolit zeolitleriyle karşılaştırılmalıdır. Ayrıca kullanılan zeolitlerin saflığının bağlayıcı sistemlerin özelliklerine etkileri araştırılmalıdır. İnce öğütülmüş doğal zeolitlerin diğer mineral katkı malzemeleri ile birlikte çimento-beton sistemlerinde kullanımları yine araştırılması gerekli konulardan birisi olarak akla gelmektedir.

KAYNAKLAR

ASTM C 109, “Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens)”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 39, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 187, “ Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 191, “Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 311, “Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 403, “Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 430, “Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μm (No. 325) Sieve, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 469, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 496, “Standard Test Method for Splitting-Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 595, “ Standard Specifications for Blended Hydraulic Cements”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 1157, “Standard Performance Specifications for Hydraulic Cements”, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 1202, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 1240, “Standard Specification for Use of Silica Fume as a Mineral Admixture in Hydraulic Cement Concrete, Mortar, and Grout, American Society for Testing and Materials, 2005.

ASTM C 1260, “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)”, American Society for Testing and Materials, 2005.

Cizmek, A., Subotic, B., Smit, I., Tonejc, A., Aiello, R., Crea, F., Nastro, A., Dissolution of high-silica zeolites in alkaline solutions II. Dissolution of ‘activated’ silicate-1 and ZSM-5 with different aluminum content, *Microporous Materials* 8, (1997), pp:159-169.

Colella, C., Gennaro, M. de’, Aiello, R., Use of Zeolitic Tuff in Building Industry , *Reviews in Mineralogy and Geochemistry; Natural Zeolites*, ed: D.L. Bish, D.W. Ming, Mineralogical Society of America, Vol. 45, Chapter 16, (2001), pp:551-587.

Drzaj, B., Hocevar, S., Slokan, M., Kinetics and Mechanism of Reaction in the Zeolitic Tuff-CaO-H₂O Systems at Increased Temperature, *Cement and Concrete Research.*, Vol.8, No.6, (1978), pp:711-720.

Feng, N., Jia, H., Chen, E., Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 50, (1998), pp:17-24.

Frigione, G., Portland-Zeolite Cement for Minimizing Alkali-Aggregate Expansion, *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, (1987), pp:404-410.

Galle, C., Effect of Drying on Cement-Based Materials Pore Structure as Identified by Mercury Intrusion Porosimetry A Comparative Study between Oven-, Vacuum-, Freeze-Drying, *Cement and Concrete Research*, Vol.31. No.10, (2001), pp:1467-1477.

Lawrence, P., Cyr, M., Ringor, E., Mineral Admixtures in Mortars Effect of Inert Materials on Short Term Hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, No.12, (2003), pp:1939-1947.

Luxan, M.P., Madruga, F., Saavedra, J., Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity Measurement, *Cement and Concrete Research*, Vol.19, No.1, (1989), pp:63-68.

News, CO₂ Emission from Cement Manufacture Have Been Underestimated, *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol.13, No. 2, (1997), pp:N12-N13.

Paya, J., Borrachero, M.V., Monzo, J., Peris-Mora, E., Amahjour, F., Enhanced Conductivity Measurement Techniques for Evaluation of Fly Ash Pozzolanic Activity, *Cement and Concrete Research*, Vol.31. No.1, (2001), pp:41-49.

Rahhal, V., Talero, R., Early Hydration of Portland Cement with Crystalline Mineral Additions, *Cement and Concrete Research*, Vol.35, No.7, (2005), pp:1285-1291.

Roszczyński, W., Determination of Pozzolanic Activity of Materials By Thermal Analysis, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol.70, (2002), pp:387-392.

Sersale, R., Frigione, G., Blended cements manufactured with activated zeolitic additions, *La Chimica E L'Industria*, Vol. 67, (1985), pp:537-541.

Sersale, R., Frigione, G., Natural zeolites as constituents of blended cements, *La Chimica E L'Industria*, Vol. 67, (1985), pp:177-180.

Sersale, R., Zeolite tuff as a pozzolanic addition in the manufacture of blended cements, Natural Zeolites '93, (ed: D. W. Ming and F. A. Mumpton), (1995), pp:603-612.

TS 1114 EN 13055-1, Hafif Agregalar-Bölüm 1: Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin, Türk Standartları Enstitüsü, 2004.

TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, 2002.

TS EN 196-2, Çimento-Deney Metotları – Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, Türk Standartları Enstitüsü, 2002.

Turanlı, L., Uzal, B., Bektaş, F., Effect of Large Amounts of Natural Pozzolan Addition on Properties of Blended Cements, Cement and Concrete Research, Vol.35, No.6, (2005), pp:1106-1111.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, Ankara, (2004).

Ubbriacco, P., Tasselli, F., A study of the Hydration of Lime-Pozzolan Binders, Journal of Thermal Analysis , Vol. 52, (1998), pp:1047-1054.

Uzal, B., Bektaş, F., Turanlı, L., Öğütölmüş Doğal Zeolitin Alkali-Silika Reaksiyonu ve Sülfat Reaksiyonu Etkisi ile Genleşmesinin İncelenmesi, 5. Ulusal Beton Kongresi (Betonun Dayanıklılığı), (2003), İstanbul.

Uzal, B., Turanlı, L., Studies on Blended Cements Containing a High Volume of Natural Pozzolans, Cement and Concrete Research, Vol.33, No.11, (2003), pp:1771-1781.

Virta, R. L. , U.S. Geological Survey Report: Zeolites, (2002)

Yamamoto, S., Sugiyama, S. , Matsuoka, O., Kohmura, K., Honda, T., Banno, Y., Nozoye, H., Dissolution of Zeolite in Acidic and Alkaline Aqueous Solutions As Revealed by AFM Imaging, Journal of Physical Chemistry 100, (1996), pp:18474-18472.

Yücel, H., Zeolitler ve Uygulama Alanları, III. Ulusal Kil Sempozyumu, (1987), pp:391-402

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje No: 104M393
Proje Başlığı: Doğal Zeolitlerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Doç.Dr. Lutfullah Turanlı, Prof.Dr. Hayrettin Yücel, Prof.Dr.Cemal Göncüoğlu, Prof.Dr. Ali Çulfaz, Araş. Gör. Burak Uzal
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü , İnönü Bulvarı 06531, ODTÜ/ANKARA
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.07.2005 – 01.07.2007
Öz (en çok 70 kelime) Bu projede, Türkiye'deki doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımının yaygınlaştırılması amacıyla, Türkiye doğal zeolitlerinin puzolanik katkı maddesi olarak çimento-beton endüstrisinde ve hafif yapı malzemeleri üretiminde hafif agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılarak bu konuda uygulama için gerekli bilimsel verilerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda; çalışmalarda kullanılan Gördes ve Bigadiç doğal zeolitlerinin önemli düzeyde puzolanik aktivite gösterdikleri ve doğal zeolit içeren içeren çimento ve beton sistemlerinin, normal beton karışımlarına kıyasla oldukça üstün özellikler gösterdikleri tespit edilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Beton, Doğal Puzolan, Hafif Agrega, Katkılı Çimento, Puzolanik Aktivite, Zeolitler
Projeden Yapılan Yayınlar: Yayınlar yazım aşamasındadır

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 104M393
Proje Başlığı: Doğal Zeolitlerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Doç.Dr. Lutfullah Turanlı, Prof.Dr. Hayrettin Yücel, Prof.Dr.Cemal Göncüoğlu, Prof.Dr. Ali Çulfaz, Araş. Gör. Burak Uzal
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü , İnönü Bulvarı 06531, ODTÜ/ANKARA
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.07.2005 – 01.07.2007
Öz (en çok 70 kelime) Bu projede, Türkiye'deki doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımının yaygınlaştırılması amacıyla, Türkiye doğal zeolitlerinin puzolanik katkı maddesi olarak çimento-beton endüstrisinde ve hafif yapı malzemeleri üretiminde hafif agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılarak bu konuda uygulama için gerekli bilimsel verilerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda; çalışmalarda kullanılan Gördes ve Bigadiç doğal zeolitlerinin önemli düzeyde puzolanik aktivite gösterdikleri ve doğal zeolit içeren içeren çimento ve beton sistemlerinin, normal beton karışımlarına kıyasla oldukça üstün özellikler gösterdikleri tespit edilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Beton, Doğal Puzolan, Hafif Agrega, Katkılı Çimento, Puzolanik Aktivite, Zeolitler
Projeden Yapılan Yayınlar: Yayınlar yazım aşamasındadır