

POMZA ZEOLİT VE CEM I ÇİMENTOSUNUN MİNEROLOJİK MOLEKÜLER ELEKTROKİNETİK VE TERMAL UYUMUNUN YÜKSEK DAYANIMLI BETONA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Kürşat YILDIZ, Atila DORUM ve Yılmaz KOÇAK*

Yapı Eğitimi Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500 Teknikokullar/Ankara

*Yapı Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce

kursaty@gazi.edu.tr, adorum@gazi.edu.tr, yilmazkocak@duzce.edu.tr

(Geliş/Received: 02.03.2010; Kabul/Accepted: 06.07.2010)

ÖZET

Bu çalışmada pomza ve zeolit gibi yüksek silis içerikli minerallerin yüksek dayanımlı beton (YDB) içerisinde puzolan olarak kullanımının mineralojik, moleküler, elektrokinetik (zeta potansiyel) ve simültane termal açıdan uyumu araştırılmıştır. Bu amaçla bağlayıcılar üzerinde fiziksel, kimyasal, mekanik, mineralojik, moleküler, elektrokinetik ve termal analizler yapılmıştır. Daha sonra yüksek dayanımlı beton tasarımı gerçekleştirilirken çimentoya ikame edilmek suretiyle (0P15Z “%0 Pomza+%15 Zeolit”, 5P10Z, 10P5Z ve 15P0Z) olmak üzere dört tip YDB üretilmiştir. Üretilen YDB’lar üzerinde bir takım taze beton deneyleri ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bağlayıcılar üzerinde yapılan analizlerden alınan veriler ile YDB’lardan alınan verilerin birbiriyle uyum içerisinde olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuçta pomza, zeolit ve CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal, mineralojik, moleküler, elektrokinetik ve termal uyumunun, üretilen YDB türlerinde de ortaya çıktığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Pomza, zeolit, mineralojik analiz, moleküler analiz, zeta potansiyel, simültane termal analiz, yüksek dayanımlı beton.

THE INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MINEROLOGICAL MOLECULAR ELECTROKINETICAL AND THERMAL COMPLIANCE OF PUMICE, ZEOLITE AND CEM I CEMENT ON HIGH STRENGTH CONCRETE

ABSTRACT

In this study, usage of minerals with high silica content such as pumice and zeolite in high strength concrete (HSC) as pozzolans was investigated within the context of mineralogical, molecular, electrokinetic (zeta potential) and simultaneous thermal compliance. For this purpose, physical, chemical, mineralogical, molecular, electrokinetic and thermal analyses were performed on bindings. Subsequently, four types of HSC were produced (0P15Z “0% Pumice+15% Zeolite”, 5P10Z, 10P5Z and 15P0Z) by replacing in cement when designing high strength concrete. Some fresh concrete tests and compressive strength tests were performed on produced HSCs. It was tried to determine the compliance of the data taken from the analyses performed on the bindings and the data from the HSCs. In conclusion, it was determined that the chemical, mineralogical, molecular, electrokinetic and thermal compliance of pumice, zeolite and CEM I 42.5 R cement has also appeared in HSC types.

Key Words: Pumice, zeolite, mineralogical analysis, molecular analysis, zeta potential, simultaneous thermal analysis, high strength concrete.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonun kalitesi çimentoların özelliklerine doğrudan veya dolaylı bağlıdır. Katkılar serbest halde katı veya çözelti olarak çimento yapısında kalabilir, yüzey ile etkileşime girebilir ve çimento hamuru veya çimento bileşenleri ile birleşebilir. Etkileşim tipi ve boyutu; su ihtiyacı, hidrasyon ısı, oluşan hidrasyon ürünlerinin kompozisyonu, priz süresi, mikro yapı ve durabilite gibi betonun fizikokimyasal özelliklerini etkileyebilir [1].

Pomza taşı, volkanik faaliyetler esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi aniden terk etmesi sonucu oluşan, oldukça gözenekli bir yapı içeren ve dünya endüstrisinde yeni olmamakla beraber, ülkemiz endüstrisine son yıllarda girmeye başlayan ve değeri yeni anlaşılan volkanik kökenli bir kayadır. Zeolit ise 1756'da İsveçli mineralog Cronstedt keşfetmiş ve doğal zeoliti sınıflandırmıştır. Keşfettiği zeolit ısıtıldığında çok çabuk su kaybeden yapısından dolayı Latince "zeo" ve kaya parçalarının ısıtılmasına da "lithos" denilmesinden dolayı malzemeye zeolit adını vermiştir. Pomza ve Zeolit ayrı ayrı çimento beton sektöründe kullanımına ilişkin bir dizi çalışma yapılmasına karşın çimento ve beton içerisinde beraber kullanımına ilişkin çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmalar pomza için özetlenecek olursa hafif beton üretiminde kullanılabilirliği, çimento içerisinde değişik oranlarda puzolan olarak kullanılabilirliği, betonun taze ve sertleşmiş bir takım özelliklerine etkileri, yüksek mukavemetli hafif beton üretiminde kullanılabilirliği, beton içerisinde hafif agrega olarak kullanılabilirliği gibi bir takım çalışmalar konu olmuştur. Zeolit ise çimento içerisinde puzolan olarak kullanılabilirliği, hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılabilirliği, zeolit katkılı çimento üretilebilirliği, beton içerisinde alkali silika reaksiyonuna etkisi, yüksek dayanımlı betonlarda kullanılabilirliği gibi bir takım çalışmalara konu olmuştur [2-22].

Moleküler bağ karakterizasyonunu belirlemek için infrared (titreşim) spektroskopisi (IR) kullanılmaktadır. Moleküler analizler FT-IR (Fourier transformlu kızılötesi spektroskopisi) tekniği kullanılarak tanecik yüzeylerindeki molekül gruplarını tanımlamak için kullanılabilir. Bu amaçla yapılan çimento, katkılı çimento ve puzolanlarla ilgili çalışmalarda infrared spektrumu başlıca 4 geniş bant bölgesinde değerlendirilmektedir. Bunlar Si-Al, S, C ve OH titreşim ve deformasyon bağlarındaki titreşim sayılarından oluşmaktadır [23]. Bu dalga boyundaki titreşim sayıları aralarındaki farklar bölgesel olarak değerlendirilmektedir.

FT-IR analizlerindeki birinci bölge 400-1100 cm^{-1} bölgesidir. Bu titreşim dalgaları Si (Si-O ve Si-O-Si) ve Al (Al-O, Al-O-Al) bağlarına karşılık gelmektedir. Çimentonun bileşenlerinden kalsiyum silikatlar 930, 1000-1010 cm^{-1} dalga sayılarında, kalsiyum ve karbon

titreşimleri ise 2920-2930 ve 2850-2855 cm^{-1} dalga sayıları aralığında daha yoğundur. Bu kalsiyum silikat titreşimleri bütün çimentolarda görülmektedir. Fakat referans çimentoların titreşim bandları 1000-1010 cm^{-1} dalga sayısı arasında daha yoğundur [23,24]. İkinci bölge ise S (kükürt) bölgesidir. S titreşim dalgaları üç bölgede (1100-1300, 1620-1685 ve 3100-3600 cm^{-1}) S-O bağı olarak görülmektedir [23,25,26]. Bu bağlar çimento içeriğindeki alçı taşından kaynaklanmaktadır. 700-1500 cm^{-1} titreşim dalgaları üçüncü bölgeyi göstermektedir. Bu bölgede C (C-O) titreşim bağları vardır. Ancak ikinci bağlar 2500-3000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında bulunmaktadır. Bu, çimentonun karbonasyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [26-28].

Su moleküllerini gösteren bölge ise dördüncü bölgedir. Bu bölgedeki titreşim ve deformasyon bağları (O-H) 3400-3450, 1620-1650 cm^{-1} dalga sayılarında bulunmaktadır. Bu bölgede katkısız çimento harçlarında daha düşük dalga sayılarında (3409-3414 cm^{-1}) görülür. Bu susuz bileşiklerin varlığını göstermektedir. Bunun aksine CEM I harçlarında daha yüksek dalga sayılarında (3441-3446 cm^{-1}) oluşmakta ve daha az oranda susuz bileşikler göstermektedir. Hidrate edilmiş çimentolarda portlandit ve tobermorite sırasıyla 3650 ve 3630 cm^{-1} dalga sayılarında görülmektedir [24,26,28].

Elektrokinetik özellikler, elektriksel çift tabakanın çözelti kısmında; mineral tarafındaki sabit tabaka ile diğer hareketli dağılmış iyonlar tabakasını ayıran kayma yüzeyi üzerindeki potansiyel büyüklüğüne bağlıdır. Yüklü mineral tanecikleri ile etrafındaki sulu çözeltinin birbirlerine göre hareketlerinde, çözelti-tane arasındaki kayma yüzeyindeki ölçülebilen potansiyele "Elektrokinetik Potansiyel" veya "Zeta Potansiyel" denir [29,30].

Zeta potansiyel, elektriksel çift tabakanın kontrol altında tutulabildiği ve deneysel olarak ölçülebilen bir büyüklüktür. Özellikle kolloidal sistemlerde, flokülasyon, koagülasyon ve stabilite, flotasyonda reaktiflerin adsorpsiyonu, hava kabarcıklarının mineral tanelerine yapışması olaylarının açıklanması ve zeta potansiyeline göre korelasyonları her zaman yapılmaktadır [29-31].

Simültane termal analiz (STA), sisteminde iki veya daha fazla termal analiz tekniğinin aynı anda tek bir numune üzerine uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu teknikler, fark esaslı termal analizler (DTA) ile termal gravimetri (TG) ya da fark taramalı kalorimetri (DSC) ve termal gravimetri (TG) şeklinde yapılabilir. DTA, uzun zamandan beri kil mineralleri, karbonatlar, sülfatlar ve zeolitler gibi minerallerin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntemle çimentoyu oluşturan ana bileşiklerin, hidrasyonda ısının etkisiyle birlikte meydana gelen dönüşümleri de izlenebilmektedir.

Tablo 1. Bağlayıcıların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (The chemical, physical and mechanical properties of cement)

Özellik	CEM I 42,5 R	Pomza	Zeolit
Fiziksel ve mekanik özellikler			
Blaine İnceliği m ² /kg	314	474,9	290,5
Özgül Ağırlık kg/m ³	3,11	2,39	2,23
Priz (dakika)	Başlangıç	---	---
	Bitiş	230	---
Basınç Dayanımı (MPa)	7 gün	38,80	---
	28 gün	45,78	---
Kimyasal bileşenler			
	(%)	(%)	(%)
SiO ₂	20,31	71,93	77,54
Al ₂ O ₃	5,64	13,14	13,25
Fe ₂ O ₃	3,27	1,07	0,936
CaO	64,02	0,76	2,156
MgO	1,64	0,73	0,945
SO ₃	2,86	0,02	0,06
Na ₂ O	0,87	4,10	0,05
K ₂ O	0,80	4,42	3,39
Kızdırma Kaybı	2,17	4,11	12,77
Bogue Kompozisyonu			
C ₃ S	55,55	-	-
C ₂ S	16,50	-	-
C ₃ A	9,41	-	-
C ₄ AF	1,48	-	-

DTA' de reaktif numune ile reaktif olmayan referans madde arasındaki ısı farkı (°C) zamanın fonksiyonu olarak belirlenmekte ve tepkimelerin sıcaklıkları, termodinamiği ve kinetiği hakkında önemli bilgiler vermektedir. TG ise, sıcaklığın fonksiyonu olarak gaz ayrılması veya adsorbsiyonu nedeniyle yoğun fazların oluşumu veya ağırlık kaybının belirlenmesini sağlamaktadır. DSC sıcaklığın fonksiyonu olarak termal tepkimelerle bir numunedan çıkan veya numune içinden geçen ısı akışı arasındaki farkı ölçmektedir. DSC olarak tanımlanan bu yöntem kalorimetri olarak isimlendirilen analiz farklı bir grubudur. Kalorimetri bir maddenin spesifik ısı veya termal kapasitesini ölçer ve DTA ile yakın bir ilişkisi vardır. DSC, her ikisi de kontrollü şekilde ısıtılan numune ve referans madde arasındaki sıfır sıcaklık farkını tespit etmek için gereken enerji miktarını ölçmektedir. DSC ve DTA eğrileri birbirine benzemektedir. Isıtma işlemi sırasında numunede endotermik ve ekzotermik tepkimeler oluşur. Endotermik reaksiyonda numune enerji almakta, ekzotermik reaksiyonda ise numune enerji vermektedir [25,27].

Yüksek dayanımlı betonlar gerek taze, gerekse sertleşmiş geleneksel betonlardan işlenebilirlik, dayanım, dayanıklılık gibi birçok özelliği daha üstün olan betonlardır. Yüksek dayanımlı betonlar kaliteli agrega, kaliteli çimento, süper akışkanlaştırıcı katkı, düşük S/Ç oranı ve silis dumanı uçucu kül gibi puzolanik madde gerektiren yüksek işlenebilirliğe sahip özel bir betondur [32].

Bu çalışmada yüksek dayanımlı beton tasarımında çoğunlukla tercih edilen silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve bunların kombinasyonları yerine rezerv olarak zengin olduğumuz pomza ve zeolit kombinasyonu kullanılarak yüksek dayanımlı beton tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber tasarımın sağlam temeller üzerine oturabilmesi açısından pomza, zeolit ve CEM I 42,5 R Portland çimentosunun kimyasal fiziksel ve mekanik uyumunun yanı sıra mineralojik, moleküler, elektrokinetik ve termal uyumunun tespitine çalışılmıştır. Bağlayıcılar arasında bu uyumun yüksek dayanımlı beton bünyesinde ortaya çıkıp çıkmadığı belirlenmeye çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Araştırmada CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Agrega olarak 0/2 ve 2/4 kırma kum, 4/8 ve 8/16 kırma taş kullanılan agrega bazalt türü agrega olup, özgül ağırlıkları sırasıyla 2,55, 2,52, 2,50 ve 2,47 olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan pomza Nevşehir yöresine ait olup Zeolit ise Balıkesir-Bigadiç yöresine aittir. Araştırmada karışım suyu olarak, Ankara Büyükşehir Belediyesi içme suyu şebekesinden temin edilen su kullanılmıştır. Ayrıca Degussa yapı kimyasalları sanayi A.Ş. firmasına ait Glenium 51 türü yeni nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkı malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan

çimento, pomza ve zeolite özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

2.2. Metot (Method)

Çimento ve puzolanların kimyasal analizleri ARL marka 8680 S model X-Ray spektrometresi (XRF) ile yapılmıştır [33]. Fiziksel analizler TS EN 196-6’ya göre yapılmıştır. Yüzey alanları, Blaine değerleri olarak Toni Teknik marka 6565 model Blaine cihazı ile özgül ağırlıkları ise Quantachrome marka MVP-3 model cihaz ile belirlenmiştir [34]. Mekanik analizler ise TS EN 196-1’de belirtilen esaslar çerçevesinde belirlenmiştir [35]. Minerolojik özellikler Rikagu marka miniflex model XRD cihazı ile $Cu K_{\alpha}$ ($\lambda=1.54 \text{ \AA}$) ışınması kullanılarak belirlenmiştir. CEM I ve puzolan örneklerinin kafes ve moleküler yapısının belirlenmesi için Fourier transformlu kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizleri yapılmıştır. Bu test Bruker marka Vertex 70 model cihaz kullanılarak $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında 1 cm^{-1} aralığında ölçülmüştür.

ζ potansiyel, elektroforez yöntemine göre çalışan Zeta-Meter System 3.0 + marka cihaz kullanılarak yapılmıştır. Bütün hammaddelerden 0,5 g numuneler, ayrı ayrı beherler içindeki 50 ml saf su içine konulmuş ve 10 dakika karıştırılarak H_2SO_4 ve NaOH ile pH’ları ayarlanmıştır. Daha sonra iri tanelerin çökmesi için 5 dakika dinlendirildikten sonra ζ potansiyelleri ölçülmüştür. Çalışılan her pH değerinde yeteri kadar (en az 10) tanenin hareket hızlarına göre cihazın mikro işlemcisi tarafından hesaplanarak ζ potansiyel değerlerine dönüştürülmüş ve cihaz tarafından ortalama ζ potansiyel değerleri belirlenmiştir.

Numunelerin STA’leri (DTA-TG), $20 \text{ }^{\circ}\text{C/dakika}$

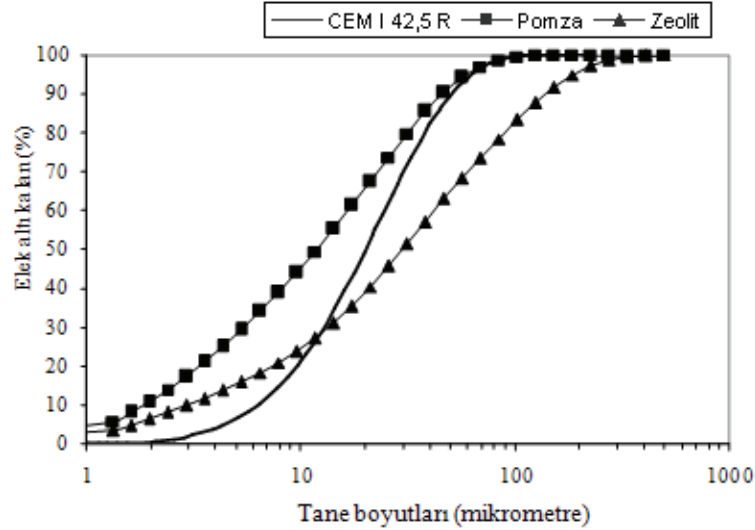
ısıtma hızı ile $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ maksimum sıcaklığa çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde azot gazı ve yaklaşık 50 mg’lık örnekler kullanılmıştır. STA’ler Perkin Elmer marka S II model cihaz kullanılarak D.P.Ü. Seramik Mühendisliği laboratuvarında belirlenmiştir.

YDB karışım dizaynı için TS 802 ve ACI 211,1 standartlarında belirtilen yöntem ve YDB kriterleri literatür ışığında dikkate alınarak karışıma girecek malzeme miktarları, belirlenmiştir. Betona ikame edilmek suretiyle kullanılan mineral katkının, türü ve oranına göre (0P15Z “%0 Pomza + %15 Zeolit”, 5P10Z, 10P5Z ve 15P0Z) dört grup beton tipi üretilmiştir. Üretilen taze beton karışımları üzerinde Taze betonda kıvam tespiti TS EN 12350-2’e göre üretilen her karışım grubu için ayrı ayrı tespit edilmiştir [36]. Kullanılan numunelere ait 1 m^3 karışıma giren malzeme miktarları ve taze beton özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Taze betonda birim ağırlık tespiti TS 2941’e göre üretilen her karışım grubu için ayrı ayrı tespit edilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen betonun ayrışmasına izin vermeyecek şekilde alınarak (10×20) cm’lik sert silindir plastik kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıpta 24 saat bekleyen ve prizini alan betonlar $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kirece doymun suda 28 gün kür edilmiştir. Daha sonra TS EN 12390-3 “Sertleşmiş Beton Numunelerinde Basınç Dayanımı Tayini” standardına uygun olarak basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir [37].

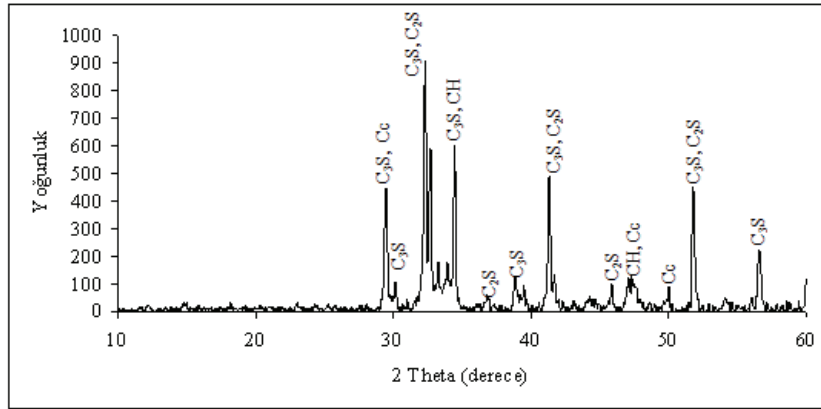
Taze betonda birim ağırlık tespiti TS 2941’e göre üretilen her karışım grubu için ayrı ayrı tespit edilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen betonun ayrışmasına izin vermeyecek şekilde alınarak (10×20) cm’lik sert silindir plastik kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıpta 24 saat bekleyen ve prizini alan betonlar $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kirece doymun suda 28 gün kür edilmiştir. Daha sonra TS EN 12390-3 “Sertleşmiş Beton

Tablo 2. Her bir beton grubu için 1 m^3 karışıma giren malzeme miktarı (Material quantity in the 1 m^3 for each concrete groups)

Malzeme Adı	Tip	Özgül Ağırlık.	Ağırlık 15P0Z (kg)	Ağırlık 10P5Z (kg)	Ağırlık 5P10Z (kg)	Ağırlık 0P15Z (kg)
Kırma Kum	0-2	2,55	543,737	555,99	568,314	580,695
Kırma Kum	2-4	2,52	201,503	206,04	210,611	215,199
Kırma Taş	4-8	2,50	266,538	272,54	278,585	284,655
Kırma Taş	8-16	2,47	329,174	336,59	344,053	351,548
Toplam agrega			1340,95	1371,1	1401,56	1432,09
Çimento	CEM I 42,5	3,08	584,05	567,04	550,02	533,01
Puzolan	Pomza	2,39	103,06	66,71	32,35	0,00
Puzolan	Zeolit	2,23	0,00	33,35	64,70	94,06
SAK (%1,3)	Glm. 51	1,112	8,93	8,67	8,41	8,15
Su	İçme suyu	1	206,13	200,1	194,12	188,12
Hava miktarı						
Toplam malzeme			2243,14	2247,0	2251,1	2255,4



Şekil 1. Bağlayıcıların tane boyut dağılımları (Binding of the particle size distributions)



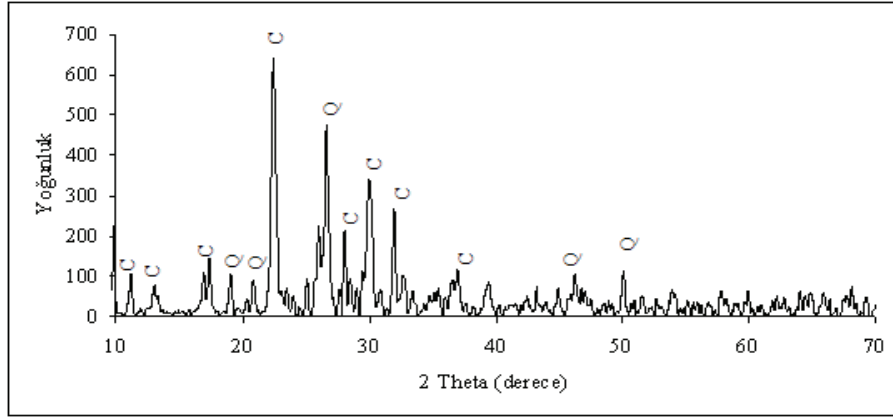
Şekil 2. CEM I 42,5 R çimentosunun XRD analizi (XRD analysis of cement CEM I 42.5 R)

Numunelerinde Basınç Dayanımı Tayini' standardına uygun olarak basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir [37].

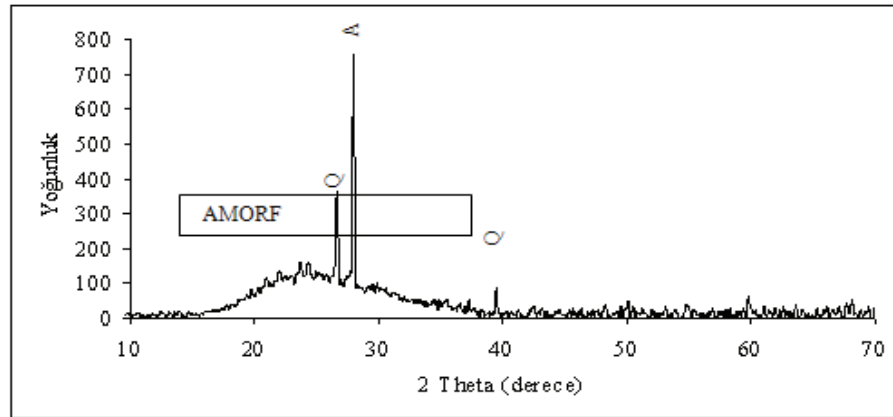
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION) CEM I 42,5 R çimentosu kimyasal olarak yüksek oranda CaO ve SiO₂ düşük oranda Al₂O₃, Fe₂O₃ ve SO₃ bileşiklerinden oluşmaktadır. Pomza'da ana bileşen SiO₂'dir ve ağırlıkça SiO₂/Al₂O₃ oranı (S/A) 5,47'dir. Zeolitin ana bileşen yine SiO₂'dir ve S/A oranı 5,85'dir. Zeolitte K₂O'nun Na₂O den daha yüksek olması K⁺ iyonlarınca zengin olduğunu göstermektedir. Pomzada ise hem K₂O'nun hem de Na₂O'nun yüksek olması K⁺ ve Na⁺ iyonlarınca zengin olduğunu göstermektedir. Blaine değerlerine göre en ince malzemenin pomza daha sonra ise CEM I 42,5 R ve zeolit olarak sıralandığı görülmektedir. Ayrıca minimum %70 olması istenilen S+A+F toplamı pomza'da yaklaşık %86, zeolit'te ise yaklaşık %91 olarak tespit edilmiş ve kimyasal açıdan puzolanik özelliklerinin olumlu olduğu görülmüştür [38]. Fiziksel analizlerde tane boyut dağılımı, Blaine değerleri (özellik yüzey alanları) ve özgül ağırlıkları belirlenmiştir. Puzolan örneklerinden olan pomza ve zeolitin tane büyüklüğü, özgül yüzey alanı ve özgül

ağırlıkları farklı değerler almaktadır. CEM I 42,5 R, pomza ve zeolit mineralinin tane boyut dağılımları Şekil 1'de, verilmiştir. Tane boyut analiz değerlerine bakıldığında, en ince malzemenin pomza olduğu, daha sonra ise CEM I 42,5 R ve zeolit olarak sıralandığı görülmektedir. Pomza, CEM I 42,5 R ve zeolit %50 elek altı oranlarına göre sırasıyla 12, 20 ve 30 tane boyutlarına sahiptirler. Buna göre en küçük boyutlu hammadde pomzadır. Daha sonra sırası ile CEM I 42,5 R ve zeolit gelmektedir. Tane boyu dağılımlarına göre, %20 elek altı oranına göre ise sırasıyla 4, 10 ve 7 µm tane boyutlarına sahiptirler. Bu durumda %20 elek altı oranına göre zeolitin CEM I 42,5 R çimentosundan daha ince tane boyutuna sahip olduğu görülmektedir (Şekil 1). Blaine değerlerine göre en küçük boyutlu hammaddenin yine pomza olduğu görülürken daha sonra CEM I 42,5 R ve zeolit şeklinde sıralandığı görülmektedir (Tablo 1).

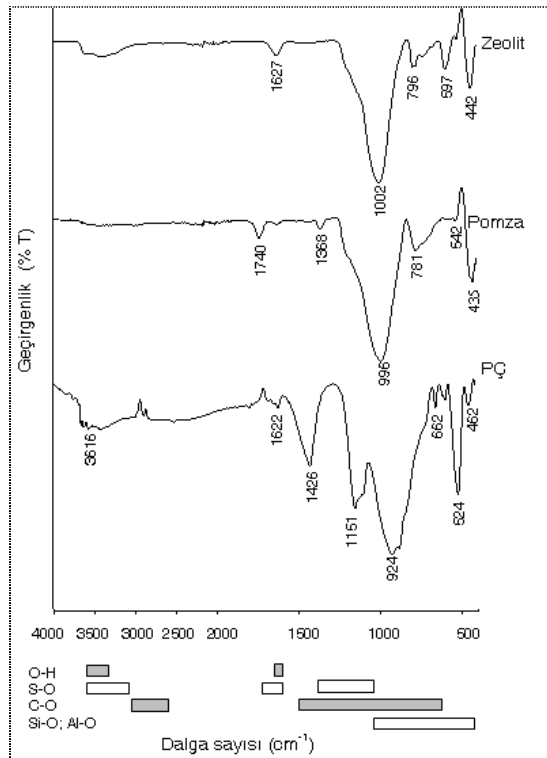
Şekil 2. incelendiğinde CEM I 42,5 R çimentosunun, [C₃S-Alite (3CaOSiO₃), C₂S-Belit (2CaOSiO₃), Cc-Kalsit (CaCO₃) ve CH-Portlandit (Ca(OH)₂)]'lerden oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3. Zeolit'in XRD analizi (XRD analysis of zeolite)



Şekil 4. Pomza'nın XRD analizi (XRD analysis of pumice)



Şekil 5. Bağlayıcıların FT-IR spektrum analizleri (FT-IR spectrum analysis of binding)

Şekil 3. incelendiğinde zeolit, Q: Kuvars [SiO_2], C: Clinoptilolite [$\text{KNa}_2\text{Ca}_2(\text{Si}_29\text{Al}_{17})\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$]’lerden oluştuğu görülmüştür. Zeolitın genel mineralojik yapısının düzenli (kristal) olduğu görülmektedir.

Şekil 4. incelendiğinde pomzanın Q: Kuvars [SiO_2], A: Albite [$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$]’lerden oluştuğu görülmüştür. 17-38° bölgesinde SiO_2 ’den ($\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$) oluşan amorf yapı gözlenmektedir.

Yapılan moleküler analizlerden elde edilen FT-IR sonuçlarından moleküllerin yüzey yapıları belirlenmiş ve Şekil 5’de şematik olarak gösterilmiştir.

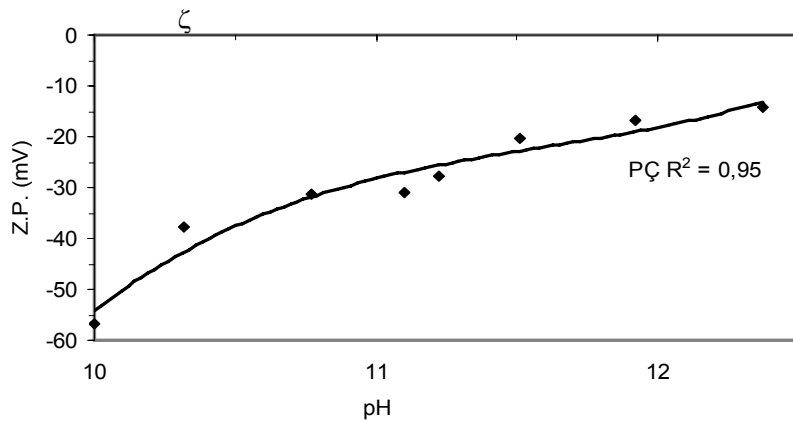
FT-IR spektroskopisinde katı kafeslerini oluşturan atomların titreşimleri $400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ de, moleküler titreşimler ise $1600\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde görülmektedir. Çimentonun FT-IR analizi sonucunda 462, 524, 662, 924, 1151, 1426, 1622, 3400 ve 3616 cm^{-1} dalga sayılarında titreşimler görülmektedir. Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları 462 ve 521 cm^{-1} simetrik titreşimler yapmaktadır [26]. Kafes yapılarındaki Si-O bağları 924 cm^{-1} dalga sayısında simetrik titreşimler şeklindedir [39]. CEM I 42,5 R çimentosunda alçıyı gösteren Kükürt-Oksijen bağları (S-O) 662,1151 ve 1622 cm^{-1} de görülmektedir [26]. 1426 cm^{-1} de ise CO_3^{2-} görülmektedir [26]. Yapısındaki su iyonları ve molekülleri 3400 ve 3616

cm^{-1} dalga sayılarında bulunmaktadır. Zeolitin FT-IR analizi sonucunda 442, 521, 597, 796, 1002, 1627, 3442 ve 3628 cm^{-1} dalga sayılarında titreşimler görülmektedir. Si-O-Si ve Si-O-Al bağları 442 ve 1002 cm^{-1} dalga sayılarında titreşimler yapmaktadır [40]. Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları ise 521 cm^{-1} titreşim yapmaktadır [26]. Yapılarda Al-O-Al bağları 597 cm^{-1} dalga sayısında titreşim şeklindedir. 796 cm^{-1} dalga sayısında Si-O-Si bağı simetrik titreşimler şeklindedir [27]. Zeolitik su (H-OH) 1627 cm^{-1} ve Hidrojen köprüleri ile bağlı su (OH) ise 3442 ve 3628 cm^{-1} dalga sayılarında titreşimler tespit edilmiştir [42].

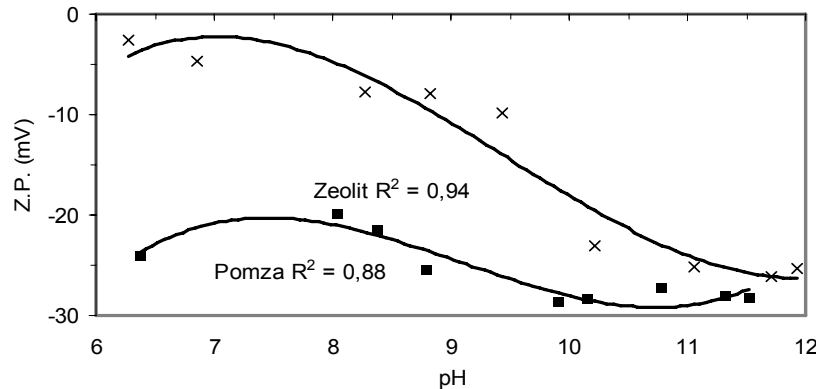
Pomzanın FT-IR analizi sonucunda 435, 542, 781, 996, 1368 ve 1740 cm^{-1} dalga sayılarında titreşimler görülmektedir. Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları 435 ve 542 cm^{-1} görülmektedir [26]. 781 cm^{-1} dalga sayısında su moleküllerinin deformasyonu görülmektedir [41]. O-Si-O bağları 996 cm^{-1} dalga sayısında titreşim yapmaktadır [26]. C-H bağları 1368 cm^{-1} [33] ve C=O bağları ise 1740 cm^{-1} dalga sayılarında tespit edilmiştir [44].

CEM I 42,5 R çimentosuna yapılan ζ potansiyel ölçümleri Şekil 6'da, zeolit ve pomza'ya yapılan ζ potansiyel ölçümleri ise Şekil 7'de verilmiştir. Yapılan araştırmalara göre, çimentonun yüzey yükü genellikle negatif [45,46], ancak yapısına göre pozitif [47,48] de olabilmektedir. Çalışmadaki CEM I

çimentosunun negatif yüklü olmasının nedeni jips'ten (CaSO_4) gelen SO_4^{2-} iyonları ile kendi yapısında bulunan CO_3^{2-} , OH^- ve Si-O bağlarıdır (Şekil 2). Bu nedenle Ca^{2+} , H^+ , OH^- ve SO_4^{2-} CEM I için potansiyel belirleyen iyonlardır. Puzolanik malzemelerin potansiyelleri incelendiğinde bütün pH değerlerinde negatif yüzey yüküne sahip olduğu görülmektedir. Zeolitin yüzey yükü pH 6 civarında $-4,96 \text{ mV}$ 'dan, pH 12 civarında $-27,9 \text{ mV}$ 'a mutlak değer olarak artmıştır. Pomzanın yüzey yükü ise pH'yı 6 ile 12 arasında $-19,6$ ile $-29,7 \text{ mV}$ arasında değişmektedir. Tanelerin birbirlerine olan etkileşimleri, DLVO teorisine [49,50] göre yüzey yüklerine ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. -25 ile $+25 \text{ mV}$ arasında yüzey yüklerine sahip taneler, birbirlerine yaklaştıklarında elektriksel çift tabaka kuvveti ve Van der Waals kuvvetleri nedeni ile birbirlerini çekerler [47,49,51] yani koagüle olurlar. Bunun tersinde ise disperse (dağılırlar) olurlar. Fakat ortamda farklı yüzey yüküne sahip taneler girdiğinde yukarıda belirtilen olaylara ilave olarak devreye zıt yük veya aynı yük olayı da girer. Yani elektrostatik olarak zıt yüklü taneler birbirlerini çekerken aynı yüklü taneler birbirlerini iterler. Burada da ortam pH'sı 12 civarında CEM I 42,5 R ayrı ayrı aynı ortamda bulunan zeolit ve pomzanın birbirlerini itmesi gerekmektedir. Fakat burada puzolanların yüzey yükleri de -25 ile $+25 \text{ mV}$ civarında olduğundan devreye elektriksel çift tabaka kuvvetleri ve çok küçük etkiye sahip Van der Waals kuvvetleri de girmektedir [47,49,52]. Bu nedenle



Şekil 6. CEM I 42,5 R çimentosunun zeta potansiyeli (Zeta potential of cement CEM I 42.5 R)



Şekil 7. Puzolanların zeta potansiyelleri (Zeta potential of pozzolans)

puzolanların CEM I ile uyumlu olduğu genel olarak söylenebilir.

Zeolit, pomza ve CEM I 42,5 R çimentosunun fark esaslı termal analiz (DTA) ve termal gravimetri (TG) eğrileri Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 8’deki TG eğrilerinin verilerinden çeşitli sıcaklık aralıklarındaki ağırlık kayıpları hesaplanmış ve Tablo 3’de verilmiştir.

DTA eğrilerinden CEM I 42,5 R çimentosunda 119, 411 ve 755 °C’de, zeolitte 125 ve 750 °C’de, pomzada ise sadece 275 °C’de belirgin endotermik pikler görülmektedir. TG eğrilerinden çeşitli sıcaklıklardaki ağırlık kayıplarına bakıldığında gözenekler ve yapısındaki fiziksel ve kimyasal suyun dehidrasyonunun en fazla zeolitte, daha sonra pomzada ve CEM I 42,5 R çimentosunda olduğu belirlenmiştir. Karbonat fazlarının (CaCO₃) dekarbonasyonunu gösteren belirgin piklere çimentoda (755 °C) ve zeolitte (750 °C) rastlanırken, pomzada belirgin bir pike rastlanmamıştır. Toplamda en fazla ağırlık kaybının sırasıyla zeolit (% 12,77), pomza (% 3,81) ve CEM I 42,5 R çimentosunda (% 2,49) meydana geldiği hesaplanmıştır.

Çalışmada elde edilen taze beton parametreleri ve bu parametrelerden elde edilen veriler her bir beton türü için Tablo 4’de verilmiştir.

Puzolanların ikame oranları dikkate alındığında, beton içerisinde pomzanın ikame oranı düşmesine karşın zeolit ikame oranının artmasına bağlı olarak betonun çökme değerinde artış başka bir deyişle işlenebilirliği kolaylaştığı gözlenmiştir. Buda pomzanın Blaine inceliğinin çimento ve zeolite göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. İşlenebilirlik özelliğindeki bu artış aynı zamanda pomzanın özgül ağırlığının zeolit’den yüksek olmasının yanı sıra her iki puzolanında özgül ağırlığının çimentodan düşük olmasıyla da açıklanabilir (Tablo 4). Bunun yanı sıra zeolitin bünyesinde bulunan yapısal ve kristal su miktarının pomzaya göre çok daha fazla olması işlenebilirlik özelliğini arttırmaktadır. Karışım içerisinde pomza ikame oranının düşürülmesine karşın zeolit ikame oranının artırılması, teorik ve ölçülen birim ağırlıklarında 15P0Z ve 0P15Z beton türlerinin birim ağırlıkları birbirlerine yakın değerler sergilerken, 10P5Z ve 5P10Z beton türleri diğer beton türlerine nazaran ≈%2,65 oranında artış gözlenmiş ve bu iki beton türünün birim ağırlık değerlerinde birbirine çok yakın değerler sergilemiştir. Bütün beton türlerinde kalıplara yerleştirme esnasında betonun kohezyonu mükemmel olmuş ve herhangi bir ayrışma gözlenmemiştir. 28. güne kadar 23±2 °C kirece doygun suda bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen beton basınç dayanımı verilerine ait açıklayıcı istatistikler Tablo 5’de verilmektedir.

Tablo 3. Zeolit, pomza ve CEM I 42,5 R çimentosunun çeşitli sıcaklık aralıklarında % ağırlık kayıpları (% weight loss in the various temperature ranges of zeolite, pumice and cement CEM 42.5 R)

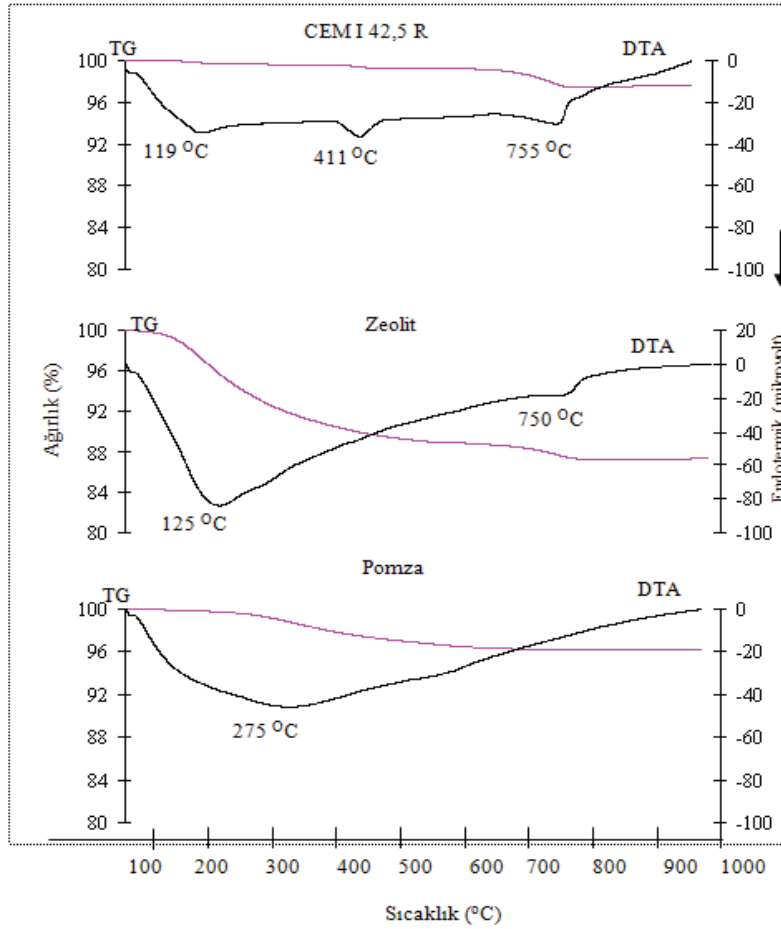
Hammaddeler	25-200°C	200-400°C	400-700°C	700°C üzeri	25-1000°C Toplam
Zeolit	6,63	3,47	1,75	0,92	12,77
Pomza	0,45	2,01	1,29	0,06	3,81
CEM I 42,5R	0,34	0,22	0,78	1,15	2,49

Tablo 4. Taze beton parametrelerine ait veriler (Data belonging fresh concrete parameters)

ÖZELLİK	Beton Türü Kodu			
	15P0Z	10P5Z	5P10Z	0P15Z
S/Ç oranı	0,3	0,3	0,3	0,3
SAK (toplam bağlayıcı miktarı %)	1,3	1,3	1,3	1,3
Çökme (cm)	2	7	11	17
Teorik Birim Ağırlık (kg/m ³)	2243	2247	2251	2255
Ölçülen Birim Ağırlık (kg/m ³)	2295	2357	2356	2293

Tablo 5. 28. gün beton basınç dayanımı verilerine ait açıklayıcı istatistikler (Explanatory statistics belonging data of concrete compressive strength on 28th day)

Beton türü	N	Ortalama (MPa)	Std. hata	Minimum	Maksimum
0P15Z	5	79,456	1,2798	75,56	83,45
5P10Z	5	75,280	1,6289	70,06	80,13
10P5Z	5	64,672	1,7470	60,05	69,42
15P0Z	5	58,202	,9063	55,41	60,26



Şekil 8. Zeolit, pomza ve CEM I 42,5 R çimentosunun DTA ve TG analizleri (DTA and TG analysis of zeolite, pumice and cement CEM 42.5 R)

Tablo 6. 28. gün beton basınç dayanımı verilerine ait varyans çözümleme tablosu (Variance analysis table belonging data of concrete compressive strength on 28th day)

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık Düzeyi (p)
Gruplar arası	3	1417,233	472,411	46,287	0,000
Grup içi	16	163,300	10,206		
Genel	19	1580,533			

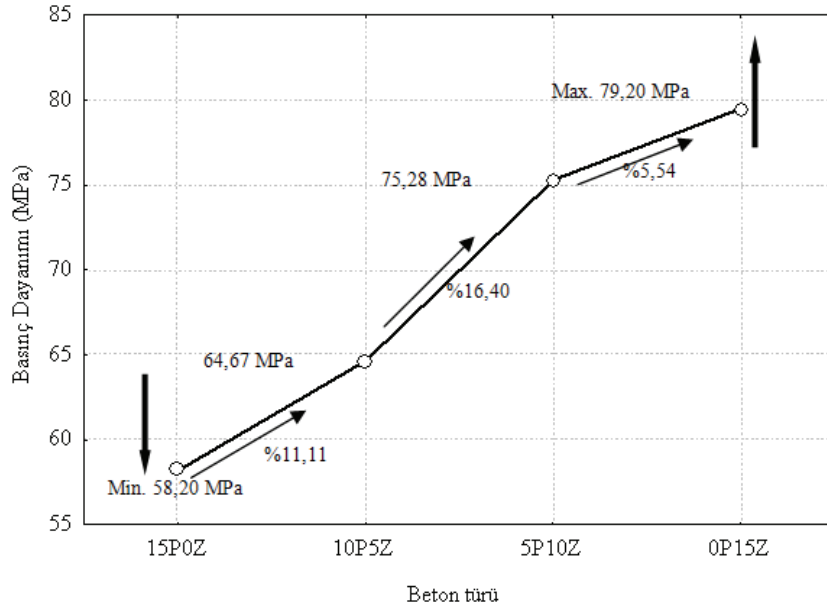
Tablo 7. 28. gün beton basınç dayanımı verilerinin beton türüne bağlı değişimini veren Duncan testi sonuçları (Results of Duncan tests, which gives the changes according to concrete type, belonging data of concrete compressive strength on 28th day)

Beton türü	N	Farklı olan gruplar		
		1	2	3
0P15Z	5	79,46	~	~
5P10Z	5	75,28	~	~
10P5Z	5	~	~	64,67
15P0Z	5	~	58,20	~

28 gün normal su küründe kalmış beton türleri arasında, basınç dayanımı açısından istatistik olarak önemli bir fark olduğu görülmüştür ($p < 0,05$) (Tablo 6). Bu farkın hangi gruplar arasında olduğunun belirlenmesinde çoklu karşılaştırma yöntemlerinden Duncan testi kullanılmıştır (Tablo 7). Ayrıca ortalama

beton basınç dayanımı değerlerine ait grafik Şekil 9'da verilmiştir.

Beton türleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre beton basınç dayanımı bakımından; beton türü faktörünün her



Şekil 9. 28 gün ortalama basınç dayanımı verilerine ait grafik (Graphic belonging data of average compressive strength on 28th day)

düzeyinde istatistik olarak fark olduğu, 0P15Z ve 5P10Z beton türünün istatistiki anlamda birbirinden farklı olmadığı ancak 10P5Z ve 15P0Z beton türlerinin birbirinden ve (0P15Z, 5P10Z) beton türlerinden farklı olduğu, 28. günde 15P0Z beton türünün 58,20 MPa ortalama ile en düşük beton basınç dayanımına sahip olduğu, 28. günde 0P15Z 79,20 beton türünün MPa ortalama ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu, 28. günde beton içerisinde pomza ikame oranının azalmasına karşın zeolit ikame oranının artması ortalama beton basınç dayanımında sırasıyla %11,11, %16,40 ve %5,54 artış sağladığı görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

Yüksek dayanımlı beton içerisinde pomza, zeolit ve her ikisinin değişik kombinasyonlarda kullanımına ilişkin fiziksel, kimyasal, mekanik, minerolojik, moleküler, elektrokinetik ve STA çalışmalarının sonuçları özetlenecek olursa;

Pomza, zeolit ve her ikisinin kombinasyonlarının puzolanik özellikler açısından çimento ve beton sektöründe kullanılabilirliği görülmüştür.

- Pomza mineral katkısının en yüksek özgül yüzey alanına sahip olduğu tespit edilmiştir.
- CEM I 42,5 R çimentosunun ve zeolit mineralinin kristal minerolojik yapılarının kristal, pomza mineralinin minerolojik yapısının ise amorf yani düzensiz bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Beton bünyesinde kullanılacak olan malzemelerin seçiminde malzeme bilimi üzerine araştırma yapan bilim adamlarının en fazla göz önünde bulundukları husus, kullanılan malzemelerin bünyesinde bulunan moleküler su içeriğidir. Bu

bağlamda yapılan moleküler analiz sonuçlarına göre çimento yapısındaki su iyonları ve molekülleri ile zeolit mineralinin bünyesindeki su iyonu ve molekülleri birbirine yakın dalga sayılarında ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra zeolit mineralinde ayrıca 1627 cm^{-1} dalga sayısında zeolitik su tespit edilmiş ve bu su betonun hem taze hemde sertleşmiş özelliklerine olumlu etkiler yapmıştır. Pomza mineralinde ise çimento ve zeolite nazaran daha düşük dalga sayılarında su moleküllerinin deformasyonu söz konusu olmuştur.

- CEM I 42,5 R, pomza ve zeolitin yüzey yükleri açısından uygun olduğu, ancak CEM I 42,5 R ve pomza elektrokinetik açıdan daha uyumlu olduğu görülmüştür. CEM I 42,5 R ayrı ayrı aynı ortamda bulunan zeolit ve pomzanın birbirlerini itmesi gerekmektedir. Fakat burada puzolanların yüzey yükleri de -25 ile +25 mV civarında olduğundan devreye elektriksel çift tabaka kuvvetleri ve çok küçük etkiye sahip Van der Waals kuvvetleri de girmekte ve etkileşimi olumlu kılmaktadır.
- STA sonuçları irdelendiğinde en fazla ağırlık kaybının zeolit mineralinde olduğu görülmüştür. Bunun sebebi zeolit mineralinin bünyesinde bulunan zeolitik su diye tabir edilen moleküler su içeriğinden kaynaklanmaktadır. Zeolitin bünyesinde bulunan bu su betonun taze ve sertleşmiş bir takım özelliklerinde olumlu sonuçlar doğurmuştur.
- Üretilen beton türleri üzerinde gerçekleştirilen taze beton özelliklerine bakıldığında zeolit mineralinin ikame oranı arttıkça, taze betonda çökme değerinin arttığı bununla işlenebilirliği artırdığı tespit edilmiştir. Bu olumlu etkinin zeolit mineralinin bünyesinde bulunan zeolitik sudan

kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun yanı sıra Bütün beton türlerinde kohezyonun mükemmel olduğu, herhangi bir ayrışmanın gözlenmediği görülmüştür.

- Üretilen beton türleri üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı verilerine bakıldığında mineral katkı türüne ve ikame oranına bağlı olarak değiştiği ve bu değişimin, zeolit ikame oranının artışına bağlı olarak sırasıyla %11,11, %16,40 ve %5,54 artış olduğu, 28 gün yaşında 15P0Z betonunun en düşük, 0P15Z betonunun en yüksek sahip olduğu, görülmüştür.

Yapılan bu çalışmada çimento ve beton sektöründe kullanılacak olan gerek mineral (doğal) gerekse yapay puzolanların çimentolarla etkileşiminin belirlenmesinde mineralojik ve moleküler analizlerin üretime geçilmeden yapılmasının isabetli olacağı düşünülmektedir. Ayrıca Çimento ve beton sektöründe kullanılması düşünülen gerek doğal gerekse yapay puzolanların çimento ile elektrokinetik etkileşiminin olup olmadığını önceden tespit etmek, çimento ve beton bahsini konu alan diğer deneysel çalışmalara iyi bir altyapı oluşturacağı düşünülmektedir. Ülkemiz pomza rezervi yaklaşık 3 milyar m³, zeolit rezervi sadece Balıkesir Bigadiç yöresinde 50 milyar ton olduğu göz önünde bulundurulursa, pomza ve zeolitin beton sektöründe kullanılabilirliğinin ortaya konulmasının isabetli olacağı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, SD vb. puzolanlara da alternatif olacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmaya, 07/2007-31 proje kod numarasıyla maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Müdürlüğü'ne ve TÇMB kurumuna teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Aydın S., Ayaç, A. H., Ramyar, K., “Çimento kompozisyonu ve kimyasal katkı kökeninin beton özelliklerine etkisi” *Yapılarda kimyasal katkılar sempozyumu*, Ankara, 1:34 (2005).
2. Tolğay, A., Yaşar, E., Erdoğan, Y., “Nevşehir Pomzasının Agregata Olarak Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması” *5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, (2004).
3. Sarı, D., Paşamehmetoğlu, A. G., “The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, 35 (5): 936-942 (2005).
4. Yazıcıoğlu, S., Demirel, B.,” Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılan Elazığ Yöresi Pomzasının İlerleyen Kür Yaşlarında Betonun Basınç Dayanımına Etkisi” *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 18 (3): 367-374 (2006).
5. Şimşek, O., Aruntaş H.Y., Eroltekin V., “Uçucu Külün Hafif Beton Yapı Elemanı Üretiminde Kullanımı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi” *Teknoloji*, 2 (3-4): 15-23 (1999).
6. Ekici, B. B., Demirel, B., “Determination Of The Effects Of Grounded Pumice On Compressive Strength Of Concrete With Artificial Neural Networks” *E-Journal Of New World Sciences Academy*, 3 (1):169-175 (2008).
7. Uysal, H., Demirboga, R., Sahin, R., ve Gül, R., “The Effects of Different Cement Dosages, Slumps and Pumice Aggregate Ratios on the Thermal Conductivity and Densities of Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 34 (5): 845-848 (2004).
8. Ceylan, H., Saraç, M. S., “Farklı Pomza Agregata Türlerinden Elde Edilen Hafif Betonun Sıcaklık Etkisindeki Bazı Özellikleri Üzerine Bir Araştırma” *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 (3): 413-421(2006).
9. Kılıç, A., Atıs, C. D., Yaşar, E. And Özcan, F., “High-Strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures”, *Cement and Concrete Research*, 33 (10): 1595-1599 (2004).
10. Cavalari, L., Miraglia, N. and Papia, M., “Pumice concrete for structural wall panels”, *Engineering Structures*, 25 (1): 115-125 (2003).
11. Yılmaz, K., Canpolat, F., Arman, H., “Taban Külü Ve Doğal Zeolitin Puzolanik Çimentoda Katkı Olarak Kullanımı” *Beton 2004 Kongresi*, İstanbul, 10-12 (2004).
12. Şişman, C. B., Kocaman, İ., Gezer, E., “Doğal Zeolitten Üretilen Hafif Betonun Tarımsal Yapılarda Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma” *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 5 (2): 20-25 (2008).
13. Kosmatka S.H. and W.C.Panarese., Desing and Control of Concrete Mixture. *Portland Cement Association Publication*, Illinois, USA. 358 (1992).
14. Topçu İ.B., “Beton”, *İnşaat Müh. Odası Eskişehir Odası Yayınları*, Uğur Ofset A.Ş. Eskişehir, 183-185 (2006).
15. Ünal O., Uygunoğlu,T., “Diyatomitin Hafif Beton Üretiminde Kullanılması”. *İMO Teknik Dergisi*, 1: 4025-4034 (2007).
16. Okucu, A., “Bigadiç Ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik Ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri” Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 30-60 (1998).
17. Yıldırım, F. S., “Puzolanik zeolitin çimentoda katkı uygunluğunun araştırılması” Y. Lisans tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, 45-75 (2007).
18. Gürkan, A., “Pomza ve zeolitin alkali silika reaksiyonu üzerine etkisi”, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir 100-115 (2006).

19. Naiqian, F., Hongwei, J. ve Enyi, C. "Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction", *Magazine of Concrete Research*, 50 (1): 17-24 (1998).
20. Uzal B., "Properties And Hydration Of Cementitious Systems Containing Low, Moderate And High Amounts Of Natural Zeolites", Doktora Tezi, *Ortaođu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 40-45 (2007).
21. Feng, N.Q., Li, Z., G., Zang, X. W., "High-strength and Flowing Concrete with a Zeolite Mineral Admixture", *Cement and Aggregates*, ASTM, 12: 61-69 (1990).
22. Albayrak, M., Yörükođlu, A., Karahan, S., Atlıhan, S., Aruntaş, H. Y., and Girgin, İ., "Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete" *Building and Environment*, 42 (9): 3161-3165 (2007).
23. Puertas, F., Fernandez-Jimenez, A., Blanco-Varela, M.T., "Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate", *Cement And Concrete Research*, 34 (1): 139-148 (2004).
24. Puertas, F., Fernandez-Jimenez, A., "Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes", *Cement & Concrete Composites*, 25: 287-292 (2003).
25. Koçak, Y., "Çimento-Puzolan Etkileşiminde Moleküler ve Elektroknetik Davranışların Araştırılması" Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 35-60 (2008).
26. Gomes, C.E.M., Ferreira, O.P., "Analyses of microstructural properties of va/veova copolymer modified cement pastes", *Polimeros: Ciencia E Tecnologia*, 15 (3): 193-198 (2005).
27. Karakaya, M. Ç., "Kil minerallerinin özellikleri ve tanımlama yöntemleri", *Bizim Büro Basımevi*, Ankara, 541- 595 (2006).
28. Varast, M.J., De Buergo, M.A., Fort, R., "Natural cement as the precursor of portland cement: methodology for its identification", *Cement And Concrete Research*, 35: 2055-2065 (2005).
29. Shaw, D. J., "Introduction to colloid and surface chemistry", *Buttenvorths*, Second Edition, 231 (1970).
30. Atak, S., "Kalsit ve şelit in flotasyon özellikleri", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 79 (1979).
31. Fuerstnau, D. N., Chander, S., "Thermodynamics of flotation, advances in mineral processing", *Arbiter Symposium*, New Orleans, Louisiana, 121-136 (1985).
32. E,G. Nawy, P.E., "General performance characteristics", *Fundamentals of High Performance Concrete 2nd ed.*, *John Wiley & Sons, Inc.*, Canada, 2-10 (2001).
33. TS EN 196-2 "Çimento Dene y Metotları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi" *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-7 (2002).
34. TS EN 196-6 "Çimento Dene y Metotları- Bölüm 6: İncelik Tayini" *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2-9 (2000).
35. TS EN 196-1 "Çimento Dene y Metotları- Bölüm 1: Dayanım" *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 3-11 (2009).
36. TS EN 12350-2 "Beton- Taze Beton Dene yleri- Bölüm 2: Çökme (Slamp) Dene yi" *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-9 (2002).
37. TS EN 12390-3, "Beton-Sertleşmiş Beton Dene yleri-Dene y numunelerinde basınç dayanımının tayini", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2-10 (2002).
38. ASTM C 618, "Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, Pennsylvania 1-10 (2002).
39. Govin, A., Peschard, A., and Guyonnet, R., "Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood" *Cement Concrete Composites*, 28 (1): 12-20 (2006).
40. Perraki Th. and Orfanoudaki A. Mineralogical study of zeolites from Pentalofos area, Thrace, Greece. *Applied Clay Science*, 25 (1-2): 9-16 (2004).
41. ACI 211.1, "Standard practice for selecting proportions for normal, Heavyweight, and mass concrete, *ACI Manual of Concrete practice*, Part 1, 1-38 (1994).
42. Blanco Varela, M.T., Martinez Ramirez, S., Erena, I., Gener, M., and Carmona, P., "Characterization and pozzolanicity of zeolitic rocks from two Cuban deposits", *Applied Clay Science*, 33 (2): 149-159 (2006).
43. Bardakçı, B., "Monitoring of monochlorophenols adsorbed on metal (Cu and Zn) supported pumice by Infrared Spectroscopy", *Springer Science*, 148: 353-357 (2009).
44. Akbal, Ö.F., Akdemir, N., Onar N.A., "FT-IR spectroscopic detection of pesticide after sorption onto modified pumice", *Talanta*, 53: 131-135 (2000).
45. Viallis-Terrisse, H., Nonat, A., Petit, J.C., "Zeta-Potential study of calcium silicate hydrates interacting with alkaline cations" *Journal of Colloid and Interface Science*, 244 (11): 58-65 (2001).
46. Yoshioka, K., Tazawa, E., Kawai, K., Enohata, T., "Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals" *Cement and Concrete Research*, 32 (10): 1507-1513 (2002).
47. Nachbaur, L., Nkinamubanzi, P.C., Nonat, A., and Mutin J.C., "Electrokinetic Properties which Control the Coagulation of Silicate Cement Suspensions during Early Age Hydration"

- Journal of Colloid Interface Science*, 202 (2): 261-268 (1998).
48. Termkhajornkit, P., Nawa, T., "The fluidity of fly ash-cement paste containing naphthalene sulfonate superplasticizer" *Cement and Concrete Research*, 34 (6): 1017-1024 (2004).
49. Gabrovsek, R., Vukb, T., Kaucica, V., "Evaluation of the hydration of portland cement containing various carbonates by means of thermal analysis", *Acta Chim.*, 53: 159-165 (2006).
50. Skripkiunas, G., Sasnauskas, V. Dauksys, M., Palubinskaite, D., "Peculiarities of hydration of cement paste with addition of hydrosodalite", *Materials Science*, 25 (3): 627-635 (2007).
51. Drazan, J., Zelic, J., "The effect of fly ash on cement hydration in aqueous suspensions", *Ceramics-Silikaty*, 50 (2): 98-105, 2006.
52. Pan, Z., Cheng, L., Lu, Y., Yang, N., "Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material", *Cement and Concrete Research*, 32: 357-362,(2002).

