

ZEOLİT, UÇUCU KÜL VE ATIK CAM MALZEMELERİN PORTLAND KOMPOZE ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa DAYI^{a*}, Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ^a, Murat ÇAVUŞ^b, Osman ŞİMŞEK^a

^aGazi Üniversitesi, Teknoloji Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara

^bGaziosmanpaşa Ü. Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, 60150, Tokat

mustafadavi@gazi.edu.tr, aruntas@gazi.edu.tr, murat.cavus@gop.edu.tr, simsek@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 29.08.2012; Kabul/Accepted: 23.05.2013)

ÖZET

Bu çalışmada, zeolit, uçucu kül ve atık cam malzemelerin Portland kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla zeolit, uçucu kül ve atık cam, ağırlıkça % 5 ve % 10 oranlarında Portland çimentosu klinkeri ile birlikte üçlü katkılı çimentolar elde etmek için kullanılmış ve böylece Portland kompoze çimentolar elde edilmiştir. Üretilen çimentoların öğütme süresi sabit tutulmuştur. Üretilen kompoze çimentoların kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri ile 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları kontrol çimentosu olan CEM I Portland çimentosu numunesi ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, üretilen Portland kompoze çimentoların TS EN 197-1'e uygun olduğunu ve çimento üretiminde zeolit, uçucu kül ve atık camın katkı malzemesi olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Portland kompoze çimento, puzolan, zeolit, uçucu kül, atık cam, fiziksel ve mekanik özellikler

INVESTIGATION OF USABILITY OF ZEOLITE, FLY ASH AND WASTE GLASS MATERIALS IN PORTLAND COMPOSITE CEMENT PRODUCTION

ABSTRACT

In this study, usability of zeolite, fly ash and waste glass materials in the production of Portland composite cement was investigated. For this aim, a Portland cement clinker, a zeolite, a fly ash and a waste glass were used to obtain ternary blended cements that contain 5, and 10 % (by weight) mineral additives and thereby Portland composite cements were obtained. Grinding duration of produced cements was kept constant. Chemical compositions, physical properties and tensile and compressive strengths, at the age of 7, 28 and 90 days, of produced composite cements were compared with control cement sample as called CEM I Portland cement. Obtained test results have shown that, produced composite cements are convenient to related TS EN 197-1 and zeolite, fly ash and waste glass can be used as an additive material in the production of Portland composite cements.

Key words: Portland composite cement, pozzolan, zeolite, fly ash, waste glass, physical and mechanical properties

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Portland çimentosu (PÇ), tüm dünyada en yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Çimentonun ana hammaddesi olan kil, kalker ve alçı taşının maliyeti düşük olmakla birlikte yaklaşık 1400-1500 °C sıcaklıkta elde edilen klinkerden dolayı PÇ üretimi pahalı olmaktadır. Özellikle 1970'li yıllarda yaşanan enerji

krizinin ardından çimentoda kullanılan klinker miktarı azaltılarak hem alternatif bağlayıcı malzemeler ve/veya ikame malzemelerin çimento üretiminde kullanımı hem de farklı ortam ve hava koşullarına dayanıklı çimento araştırmaları bilimsel ve endüstriyel düzeyde sürmektedir [1,2]. Ekolojik sorunların dünyada azaltılması amacıyla çimento endüstrisinde çevreci uygulamalar yürürlüğe konulmaktadır. 1997 yılında Kyoto sözleşmesinin uygulanmasıyla, daha az klinker kullanılarak hem

atmosfere salınan CO₂ miktarı azaltılmış hem de durabilite problemleri çözülmüş çimentoların üretilmesi hedeflenmektedir [3]. Son yıllarda üretimde klinker yerine alternatif malzemeler kullanarak hem maliyeti düşürmeyi hem de hammadde miktarını azaltarak doğayı korumayı hedefleyen çalışmalar önem kazanmıştır [4].

Puzolanlar, kendi başına bağlayıcılığı olmayan veya çok az olan, bununla birlikte ince öğütülmüş halde, rutubetli ortamda ve normal sıcaklıkta Ca(OH)₂ ile birleşerek ilave bağlayıcı bileşikler oluşturan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır [5]. Puzolanların yapısında çok miktarda yer alan silisin ve alüminin yanında, bir miktar da Fe₂O₃, CaO, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir [6]. Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Doğal puzolanlar arasında tras, volkanik kül, volkanik tüf, diyatomit ve pomza; yapay puzolanlar arasında uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC) ve pirinç kabuğu külü sayılabilir [6,7].

Puzolanların ve endüstriyel atıkların çimento üretiminde kullanılması ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalarda atık mermer tozu [8], diyatomit [7,9], volkanik kül ve pomza [10], taban külü ve zeolit (Z) [11], pomza [12,13], zeolit, taban külü ve UK [14,15], bor atığı, volkanik tüf, bentonit ve UK [16, 17], zeolitik tüf [18,19], cam tozu [20] ve perlit [21] kullanılmıştır. Z ve SD içeren çimento harçları ile ilgili bir çalışmada, Z ve SD'nin harcın özelliklerini iyileştirerek kontrol harcına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [22]. Zeolitik tüflü çimento hamurlarında kontrol çimentosuna göre oldukça boşluksuz bir yapı elde edildiği, serbest kirece rastlanmadığı ve puzolanik reaksiyonun bir ürünü olan tetra kalsiyum hidrat varlığının gözlemlendiği belirtilmiştir [23]. Diğer bir çalışmada, çimentoda %20 atık cam (C) kullanımının durabilite açısından optimum değerler verdiği tespit edilmiştir [24]. Son yıllarda puzolanların ikili ve üçlü karışımlar halinde çimentoda kullanılması ile ilgili çeşitli çalışmalar

yapılmaktadır. Bu çalışmalarda PÇ'nin yanı sıra kireçtaşı tozu ve YFC [25], SD, UK ve YFC [26], farklı tipteki UK'ler [27] ile UK ve YFC [28] değişik oranlarda kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, doğal bir puzolan olan zeolit ile hem yapay puzolan hem de atık malzeme olan uçucu kül ve atık camın üçlü karışımlar halinde Portland kompoze çimento (PKÇ) üretiminde kullanılabilirliğinin deneysel olarak araştırılmasıdır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1. Kullanılan Malzemeler (Materials Used)

Deneysel çalışmalarda kullanılan zeolit (Z) 2-3 mm tane iriliğinde Manisa ili Gördes ilçesinden, uçucu kül (UK) toz halinde Muğla ili Kemerköy Termik santralinden ve atık cam (C) kırık düz pencere cam parçaları şeklinde piyasadan toplanarak elde edilmiştir. Kontrol çimentosu olarak kullanılan CEM I ile laboratuarda PKÇ üretiminde kullanılan klinker ve alçıtaşı, Limak Ankara Çimento Fabrikasından sağlanmıştır. Harç üretiminde kum olarak TS EN 196-1'e uygun Limak Trakya Çimento Sanayi ürünü CEN standart kumu ve karışım suyu olarak Ankara şehir içme suyu kullanılmıştır. CEM I, PÇ klinkeri ve puzolanların kimyasal analizi Tablo 1'de verilmiştir.

2.2. Mineralojik Analiz (Mineralogical analysis)

Z, UK ve C'nin mineralojik analizleri, MTA Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi laboratuvarlarında yapılmıştır. Mineralojik birleşim, Bruker D8 Advance X-Ray difraktometre cihazı (CU X-ışın tüp, 40 KV/40 MA, tarama hızı 6 derece/dk, dalga boyu 1.5406 Å, 2-70°) kullanılarak belirlenmiştir.

2.3. Puzolanik Aktivite Deneyi (Test of pozzolanic activity)

Z, UK ve C'nin puzolanik aktivite deneyi, TS 25'e göre yapılmıştır. Deneylerde UK doğal inceliğinde, Z ve C ise bilyalı değirmende 90 dk öğütüldükten sonra

Tablo 1. CEM I, PÇ klinkeri ve puzolanların kimyasal analizleri ve fiziksel özellikler (Chemical analysis and physical properties of PC 42.5 cement, PC clinker and pozzolans)

Oksit (%)	CEM I	Klinker	Z	UK	C
CaO	62,72	64,52	1,77	52,30	7,99
SiO ₂	20,00	21,25	63,84	13,48	68,95
Al ₂ O ₃	4,92	5,54	10,81	4,37	0,53
Fe ₂ O ₃	3,76	3,58	1,43	1,76	0,16
MgO	1,84	1,94	2,25	4,87	6,02
SO ₃	2,65	0,83	0,06	13,67	0,22
K ₂ O	0,73	0,76	3,60	0,52	0,24
Na ₂ O	0,26	0,71	0,05	1,26	13,20
K.K.	2,54	0,30	15,65	-	-
Fiziksel Özellikler					
Yoğunluk (g/cm ³)	3,08	3,15	2,23	2,73	2,51
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3250	3510	-	2256	-
90 µm elek üstü (%)	0,2	0,7	-	40,6	-
40 µm elek üstü (%)	6,5	7,1	-	28,6	-

Tablo 2. Üretilen çimentoların karışım oranları (Mix proportions of cements produced)

Çimento	Karışım oranları (%)	Klinker (g)	Katkı (g)	Alçıtaşı (g)	Toplam (g)
CUKKÇ5	85 K + 5 C + 5 UK + 5 A	2975	350	175	3500
CUKKÇ10	75 K + 10 C + 10 UK + 5 A	2625	700	175	3500
ZUKKÇ5	85 K + 5 Z + 5 UK + 5 A	2975	350	175	3500
ZUKKÇ10	75 K + 10 Z + 10 UK + 5 A	2625	700	175	3500
ZCKÇ5	85 K + 5 Z + 5 C + 5 A	2975	350	175	3500
ZCKÇ10	75 K + 10 Z + 10 C + 5 A	2625	700	175	3500

K = PÇ klinkeri, Z = Zeolit, UK = Uçucu Kül, C = Atık cam, A = Alçıtaşı

90 µm'lik elekten elenerek elek altı malzeme kullanılmıştır. Kireç harçları, CEN standart kumu, sönmüş kireç, Z, UK, C ve su, TS 25'de belirtilen karışım miktarları dikkate alınarak üretilmiş ve TS EN 196-1'e göre eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılarak puzolanik aktiviteleri belirlenmiştir.

2.4. Çimentoların Üretilmesi (Production of cements)

PKÇ'ler PÇ klinkeri, Z, UK ve C % 5 ve % 10 oranında üçlü karışımlar halinde kullanılarak elde edilmiş ve PKÇ'lerin karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Z, UK ve C, çimento üretiminde kullanılmadan önce etüvde 105±2 °C sıcaklıkta 24 saat kurutulmuştur. Deneyler 20±2 °C sıcaklık ve % 40–60 bağıl neme sahip laboratuvar ortamında yapılmıştır. CUKKÇ, ZCKÇ ve ZUKKÇ, PÇ klinkerine Tablo 2'de verilen oranlarda (çimento ağırlığına) Z, UK ve C'nin % 5 alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile üretilmiştir.

Çimento üretimi sırasında izlenen işlem sırası aşağıda verilmiştir:

-İlk olarak UK ve Z hariç iri taneli topraklar ve parçalar şeklinde olan PÇ klinkeri, alçıtaşı ve C uzun çeneli konkasörde kırılmıştır.

-İkinci aşamada çimento karışımına giren Z, UK, C, PÇ klinkeri ve alçıtaşı Tablo 2'de verilen oranlarda bilyalı değirmene konularak öğütülmüştür.

Laboratuvarda üretilen PKÇ'lerde öğütme süresi 90 dk süreyle sabit tutulmuştur. Üretilen PKÇ numuneleri ortamın neminden etkilenmemesi için çift naylon torbaya konularak ağızları bağlanmış ve kodlanarak etiketlenmiştir.

2.5. Çimento Deneyleri (Tests of cement)

Standart kıvam deneyi, TS EN 196-3'e göre Vicat sondası ve halkası kullanılarak yapılmıştır. Priz başı ve priz sonu ile hacim genişmesi deneyi yine aynı standarda göre sırasıyla RMU-Testing Equipment marka otomatik Vicat aleti ve Le Chatelier aleti kullanılarak belirlenmiştir. İncelik deneyi, 105±2 °C'de kurutulmuş çimento numunelerinin 0.1 g duyarlıdaki Memmert marka elektronik terazide 20 g tartılıp 40 µm ve 90 µm eleklerde 2500 Pa emiş gücü ile 3 dk süre ile elenerek tespit edilmiştir. Yoğunluk ve özgül yüzey deneyleri, sırasıyla ASTM C-188'e

göre Le Chatelier balonu kullanılarak ve TS EN 196-6'ya göre Blaine metodu kullanılarak yapılmıştır.

2.6. Harçların Üretimi ve Harç Deneyleri (Production of mortars and tests of mortar)

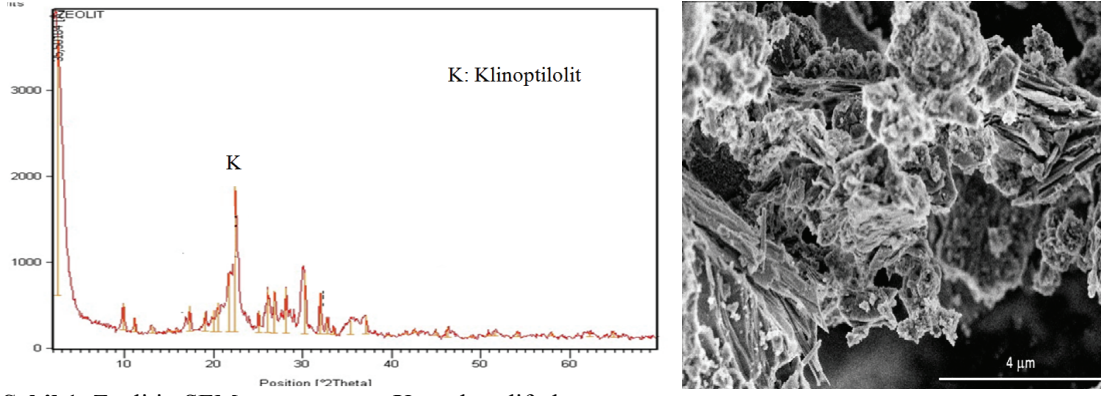
Çimento harçlarının üretiminde çimento, standart kum ve içme suyu, sırasıyla 450 g, 1350 g ve 225 g kullanılmıştır. Harçlar, TS EN 196-1'e göre Ele marka harç mikserinde karıştırılarak elde edilmiştir. Elde edilen çimento harçları, 40×40×160 mm boyutlu çelik kalıplara TS EN 196-1'e göre yerleştirilmiştir. Harç numuneleri, 20±2 °C sıcaklık ve %90'dan fazla bağıl neme sahip kür dolabında 24 saat bekletilmiş ve kalıptan çıkarılan numuneler 7, 28 ve 90 gün 20±2 °C sıcaklığa sahip su havuzunda küre tabi tutulmuştur. Eğilmede çekme dayanımı deneyi, ELE Autotest 250 marka eğilmede çekme deney cihazında TS EN 196-1'e göre yapılmıştır. Cihazın yüklem hızı 0.05 kN/s alınmış ve sonuçlar 3 numunenin aritmetik ortalaması olarak kaydedilmiştir. Basınç dayanımı deneyi, ELE Autotest 250 marka basınç deney cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deney, eğilmede çekme dayanımı deneyinde ikiye bölünen harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyde cihazın yüklem hızı 0.5 kN/s olarak alınmış ve sonuçlar 6 deney numunesinin aritmetik ortalaması olarak kaydedilmiştir.

3.DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA (TEST RESULTS AND DISCUSSION)

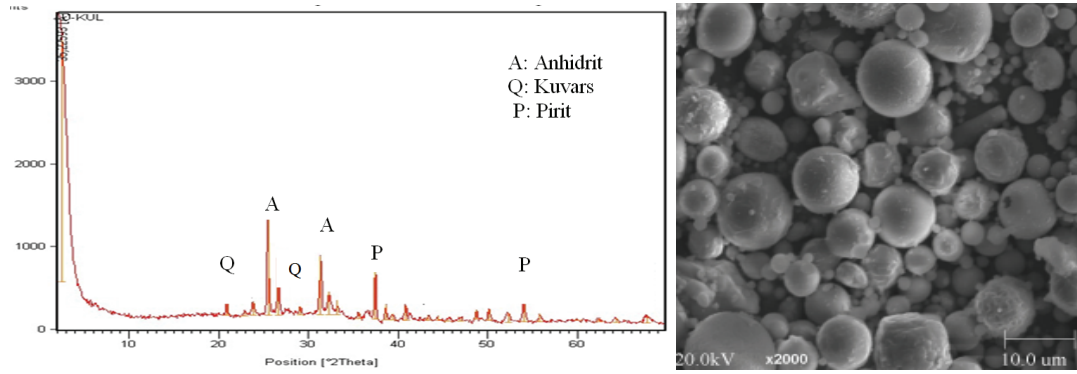
3.1. Z, UK ve C'nin mineralojik özellikleri (Mineralogical properties of Z, FA and WG)

Z, UK ve C'nin X-ışını difraktogramları ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 1'de Z'nin yapısında ana mineral olarak klinoptilolit ve kristobalit, az miktarda amorf madde bulunduğu görülmektedir. SEM görünümünden Z'nin gözenekli ve katmanlı mikro yapıda olduğu söylenebilir [29].

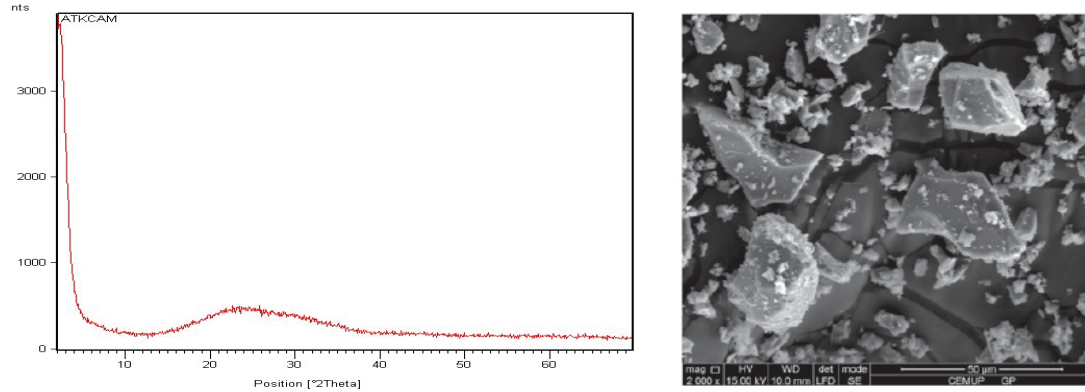
Şekil 2'de UK'de az miktarda amorf madde olduğu, ana mineral olarak anhidrit, kuvars ve pirit bulunduğu gözlenmektedir. Puzolanik özellik dolayısıyla kuvars pikleri aktif silis minerallerinin varlığına işaret etmektedir. UK'nin SEM görünümü incelendiğinde taneciklerin küresel ve pürüzsüz mikro yapıda olduğu söylenebilir [30].



Şekil 1. Zeolitin SEM görünümü ve X-ışınları difraktogramı (XRD patterns and SEM image of zeolite)



Şekil 2. Uçucu külün SEM görünümü ve X-ışınları difraktogramı (XRD patterns and SEM image of fly ash)



Şekil 3. Atık camın SEM görünümü ve X-ışınları difraktogramı (XRD pattern and SEM image of waste glass)

Şekil 3'teki XRD incelendiğinde C'nin amorf maddeden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca SEM görünümünde C taneciklerinin köşeli, yoğun ve prizmatik şekilli mikro yapıda olduğu söylenebilir [31].

3.2. Z, UK ve C'nin Pozolanik Aktivitesi (Pozzolanic activity of Z, FA and G)

Z, UK ve C'nin TS 25'e göre belirlenen pozolanik aktivite deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Pozolanların dayanım sonuçları TS 25'te belirtilen sınır değerlerin üzerindedir. Z, UK ve C'nin yüksek pozolanik aktiviteye sahip olduğu söylenebilir.

Tablo 3. Pozolanik aktivite deney sonuçları (Test results of pozzolanic activity)

Puzolan	Mekanik Özellikler (kgf/cm ²)	
	Eğilme Dayanımı	Basınc Dayanımı
Z	140	460
UK	54	141
C	50	105
TS 25 sınırı	≥10	≥40

3.3. Çimentoların Kimyasal Kompozisyonları ve Fiziksel Özellikleri (Chemical compositions and physical properties of cements)

Üretilen PKÇ'ler ile CEM I çimentosunun kimyasal analizleri TS EN 197-1 sınır değerleri ile birlikte Tablo 4'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

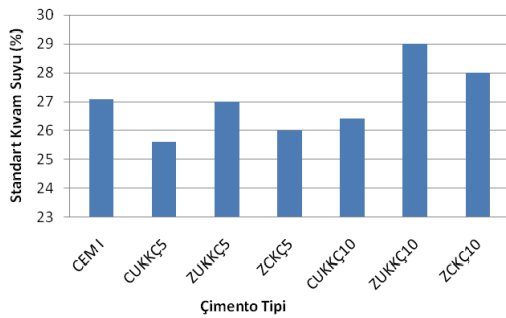
Tablo 4. CEM I ile PKÇ'lerin kimyasal analizleri (Chemical analysis of the CEM I and PCCs)

Oksit (%)	CEM I	CUKKÇ5	ZUKKÇ5	ZCKÇ5	CUKKÇ10	ZUKKÇ10	ZCKÇ10	TS EN 197-1 sınırı
CaO	62,72	59,92	59,25	57,37	56,49	56,83	52,64	-
SiO ₂	20,00	21,87	21,18	24,06	24,15	23,44	29,04	-
Al ₂ O ₃	4,92	5,11	5,51	5,45	4,86	5,97	5,55	-
Fe ₂ O ₃	3,76	3,19	3,30	3,17	3,03	3,24	2,95	-
MgO	1,84	2,05	1,93	2,07	2,20	1,91	2,18	en çok 5,0
SO ₃	2,65	3,56	3,56	2,83	4,4	4,18	2,79	en çok 5,0
K ₂ O	0,73	0,73	0,96	0,86	0,90	1,04	0,89	-
Na ₂ O	0,26	1,28	0,77	1,25	1,76	0,65	1,64	-
K.K.	2,54	2,22	2,46	2,02	2,31	3,34	2,50	en çok 5,0

Magnezi (MgO) ve sülfirik asidi anhidridi, çimentoda hacim sabitliğini bozan maddelerdir. Bu maddeler, çimentoda belirli değerden fazla ise zararlı etkiler oluştururlar [32].

Tablo 4'te, çimentoların hacim sabitliğini bozan bileşenlerin standartta belirtilen sınır değerlerden düşük olduğu görülmektedir. CUKKÇ5 ve CUKKÇ10 ile ZUKKÇ5 ve ZUKKÇ10'daki yüksek miktardaki SO₃ değerinin UK'de bulunan %13.67 gibi yüksek orandaki SO₃'den kaynaklandığı görülmektedir.

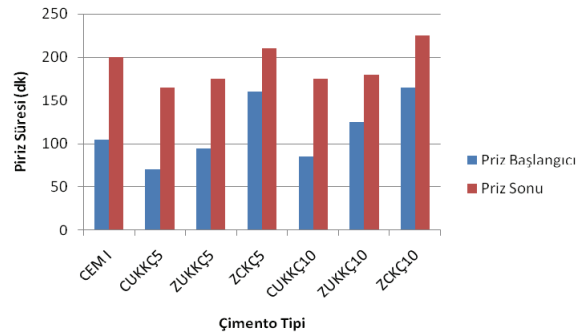
PKÇ'lerin kızdırma kaybı değerleri, ZUKKÇ10 hariç CEM I'e göre azalmıştır. ZUKKÇ5 ve ZUKKÇ10'daki diğer çimentolara göre kızdırma kaybı değerinin yüksek olmasının nedeni, Z'nin kızdırma kaybı değerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak üretilen PKÇ'ler, kimyasal kompozisyon bakımından TS EN 197-1 standardına uygundur.



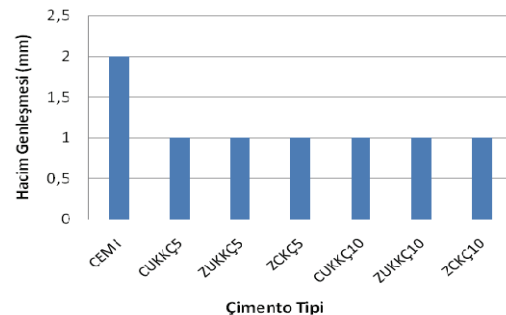
Şekil 4. Çimentolarda çimento tipi-standart kıvam suyu ilişkisi (Relationship between cement type and consistency water in cements)

PKÇ'lerin çimento tipi-standart kıvam suyu ilişkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Aynı katkı oranına sahip PKÇ'lerde, Z miktarının artmasıyla standart kıvam suyu ihtiyacı da artmıştır. PKÇ'ler arasında en yüksek kıvam suyu ihtiyacı ZUKKÇ10'da tespit edilmiştir. Ayrıca PKÇ'lerin standart kıvam suyu ihtiyacının ZUKKÇ10 ve ZCKÇ10 hariç, CEM I'den az olduğu görülmektedir. Bu çimentoların standart kıvam suyunun yüksek olması zeolitinin gözenekli bir yapıya sahip olmasıyla açıklanabilir.

PKÇ'lerin çimento tipi-priz başı ve sonu ilişkisi Şekil 5'te gösterilmiştir. ZCKÇ5, ZCKÇ10 ve ZUKKÇ10 priz başı değerlerinin CEM I'den yüksek olduğu belirlenmiştir. PKÇ'ler içinde en yüksek priz başı değeri ZCKÇ10'da, priz sonu değerlerinde ise ZCKÇ5 ve ZCKÇ10 dışındaki PKÇ'lerin priz sonu değerleri CEM I'e göre azalmıştır. Bununla birlikte bütün çimentoların priz başı ve sonu değerlerinin TS EN 197-1'e uygun olduğu söylenebilir.



Şekil 5. Çimentolarda çimento tipi-priz başı ve priz sonu ilişkisi (Relationship between cement type and setting time in cements)

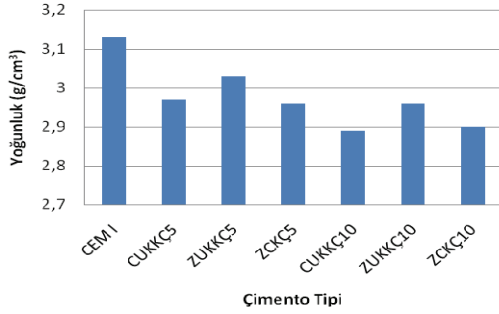


Şekil 6. Çimentolarda çimento tipi-hacim genleşmesi ilişkisi (Relationship between cement type and soundness in cements)

Çimentoda bulunan serbest CaO ve MgO zamanla betonda hacimsel genişlemelere neden olmaktadır. Bu oksitler, hidrasyon olayından sonra betonda iç gerilmeler oluşturarak çatlama ve yüzey kopmalarına sebep olabilir [32]. Şekil 6'da, PKÇ'lerin hacim genleşmesi değerlerinin CEM I'den %50 düşük

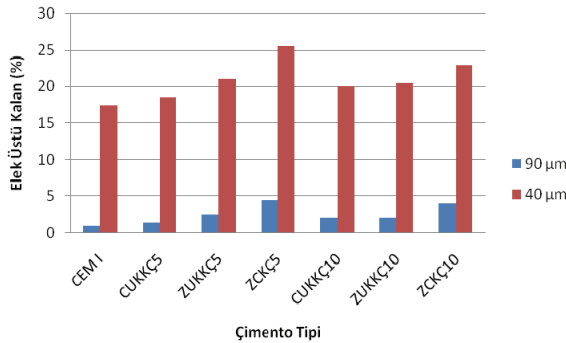
olduğu ve kendi aralarında aynı genişleme değerlerini aldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak PKÇ'ler, hacim genişlemesi bakımından TS EN 197-1'e uygundur.

Şekil 7'de görüldüğü gibi PKÇ'lerin yoğunluk değerleri, CEM I'den düşüktür. Z, UK ve C'nin yoğunlukları klinkerden küçük olduğundan PKÇ'lerin yoğunlukları da azalmıştır. PKÇ'ler arasında en düşük yoğunluk değerleri CUKKÇ10 ve ZCKÇ10'da elde edilmiştir. Bu durum Z ve C yoğunluklarının, klinkerden yaklaşık %25 daha az olması ile açıklanabilir.



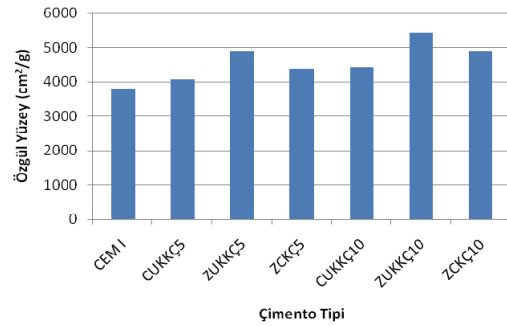
Şekil 7. Çimentolarda çimento tipi-yoğunluk ilişkisi (Relationship between cement type and density in cements)

PKÇ'lerin çimento tipi-elek üstü kalan ilişkisi Şekil 8'de gösterilmiştir. PKÇ üretiminde kullanılan puzolanların elek üstü kalan değerlerini arttırdığı görülmektedir. PKÇ'ler arasında sabit sürede öğütülmelerine rağmen ZCKÇ5 ve ZCKÇ10 elek üstü kalan değerleri yüksektir. CUKKÇ5 ve ZUKKÇ5 40 µm elek üstü değerlerinde ise ZUKKÇ5 değerinin yüksek olduğu, dolayısıyla Z ve C aynı oranda çimentoda kullanılmasına karşılık Z'nin daha sert olduğu belirlenmiştir. Bu iki çimento CEM I ile kıyaslandığında Z ve C'nin klinkerden daha sert olduğu ve çimentonun öğütülmesini zorlaştırdığı söylenebilir. Bununla birlikte ZCKÇ5 ve ZCKÇ10 40 µm elek üstü değerlerinde, karışımdaki Z ve C'nin artışına paralel olarak elek üstü kalan değer ZCKÇ10'da azaldığı ve çimento inceliğinin arttığı görülmektedir. Bu sonuç, Z ve C'nin karışımdaki artışı ile çimentoların öğütülebilirliğinin kolaylaştığını göstermektedir.



Şekil 8. Çimentolarda çimento tipi-elek üstü kalan ilişkisi (Relationship between cement type and retained on the sieve in cements)

PKÇ'lerin çimento tipi-ölgül yüzey ilişkisi Şekil 9'da gösterilmiştir. Puzolanların çimentoların ölgül yüzey değerlerini arttırdığı ve PKÇ'lerin tamamının ölgül yüzey değerlerinin CEM I'den yüksek olduğu belirlenmiştir. En yüksek ölgül yüzey değeri ZUKKÇ10'da elde edilmiştir. Çimentoda puzolan oranı arttıkça ölgül yüzey değerinin de arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, puzolanların öğütülebilirliğinin klinkere oranla yüksek olmasıdır. Bu sonuç 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleriyle benzerlik göstermektedir. Bu duruma neden olarak, UK'nin toz halde karışıma girmesi ve Z'nin çimentonun öğütülebilirliğini kolaylaştırdığı söylenebilir.

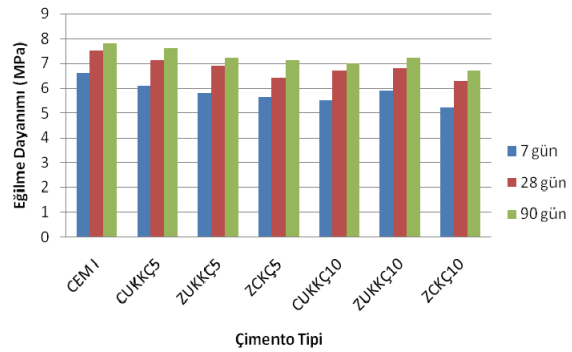


Şekil 9. Çimentolarda çimento tipi-ölgül yüzey ilişkisi (Relationship between cement type and specific surface in cements)

3.4. Eğilmede Çekme Dayanımı (Flexural strength)

PKÇ'ler ile CEM I harçlarının çimento tipi-eğilmede çekme dayanımı ilişkisi Şekil 10'da gösterilmiştir.

PKÇ harçlarının eğilmede çekme dayanımı değerleri ile CEM I ile üretilen kontrol harcının 7 günlük eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla CUKKÇ5 ve ZCKÇ10 harçlarında elde edilmiştir. CUKKÇ5, ZUKKÇ5, ZCKÇ5, CUKKÇ10, ZUKKÇ10 ve ZCKÇ10 harçlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranları sırasıyla %92, %88, %85, %83, %89 ve %79'dur.

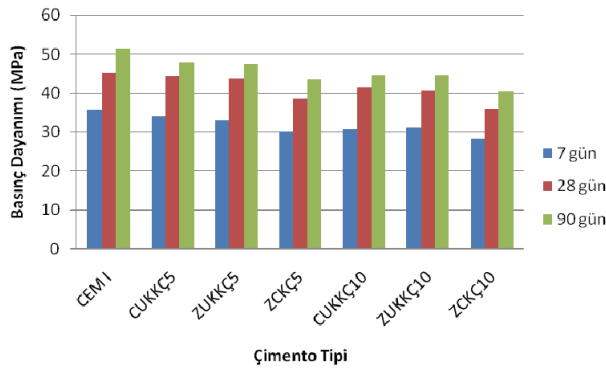


Şekil 10. Çimentolarda çimento tipi-eğilmede çekme dayanımı ilişkisi (Relationship between cement type and flexural strength in cements)

28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla CUKKÇ5 ve ZCKÇ10 harçlarında elde edilmiştir. CUKKÇ5, ZUKKÇ5, ZCKÇ5, CUKKÇ10, ZUKKÇ10 ve ZCKÇ10 harçlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranları sırasıyla %95, %92, %85, %89, %91 ve %84'dür.

90 günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla CUKKÇ5 ve ZCKÇ5 harcında elde edilmiştir. CUKKÇ5, ZUKKÇ5, ZCKÇ5, CUKKÇ10, ZUKKÇ10 ve ZCKÇ10 harçlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranları sırasıyla %97, %92, %91, %90, %92 ve %86'dır.

PKÇ'li harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranları numune yaşı arttıkça göreceli olarak artış göstermiştir. Bu durum PKÇ'li harçlarda beklenen bir sonuç olup çimentoda ikili puzolan karışımları halinde kullanılan Z, UK ve C'nin ilerleyen yaşlarda harç içerisinde açığa çıkan $Ca(OH)_2$ ile puzolanik reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşikler oluşturmasıyla açıklanabilir. PKÇ'li harçların eğilmede çekme dayanımlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranının en yüksek olduğu puzolan karışımı, Z ve UK'nin birlikte kullanıldığı ZUKKÇ5 ve ZUKKÇ10'da tespit edilmiştir. Bu sonuç, her iki puzolanın en yüksek aktiviteyi göstermiş olmasıyla açıklanabilir.



Şekil 11. Çimentolarda çimento tipi-basınç dayanımı ilişkisi (Relationship between cement type and compressive strength in cements)

3.5. Basınç Dayanımı (Compressive strength)

PKÇ'ler ile kontrol çimentosu harçlarının çimento tipi-basınç dayanımı ilişkisi Şekil 11'de gösterilmiştir. PKÇ'li harçların basınç dayanımları ile CEM I ile üretilen kontrol harcının 7 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla CUKKÇ5 ve ZCKÇ10 harçlarında elde edilmiştir. CUKKÇ5, ZUKKÇ5, ZCKÇ5, CUKKÇ10, ZUKKÇ10 ve ZCKÇ10 harçlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranları sırasıyla %95, %92, %84, %86, %87 ve %78'dir. Bu sonuç, ZUKKÇ5 ve ZUKKÇ10 hariç

harçların 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları ile benzerdir.

28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla CUKKÇ5, ZUKKÇ5 ve ZCKÇ10 harcında elde edilmiştir. CUKKÇ5, ZUKKÇ5, ZCKÇ5, CUKKÇ10, ZUKKÇ10 ve ZCKÇ10 harçlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranları sırasıyla %97, %96, %85, %92, %90 ve %79'dur. Bu sonuç üretilen bütün harçların 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları ile benzerdir.

90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla CUKKÇ5 ve ZCKÇ10 harcında elde edilmiştir. CUKKÇ5, ZUKKÇ5, ZCKÇ5, CUKKÇ10, ZUKKÇ10 ve ZCKÇ10 harçlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranları sırasıyla %93, %92, %84, %86, %86 ve %78'dir. Bu sonuç, ZUKKÇ5 ve ZUKKÇ10 hariç diğer harçların 90 günlük eğilme dayanımı sonuçları ile benzerdir.

Eğilmede çekme dayanımlarına benzer şekilde PKÇ'li harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranları 90 gün dışında numune yaşı arttıkça göreceli olarak artış göstermiştir. Harçların 180 günlük basınç dayanımlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranının artacağı ve 360 gün sonunda kontrol harcını yakalayacağı beklenmektedir [33]. Elde edilen deney sonuçları, Yılmaz ve arkadaşları ile Şahmaran ve arkadaşları tarafından yapılan farklı puzolan katkılı çimentolar ile üretilmiş harç deney sonuçları ile benzerlik göstermektedir [34, 35]. Bu durum PKÇ'li harçlarda beklenen bir sonuç olup çimento üretiminde birlikte kullanılan Z, UK ve C'nin ilerleyen yaşlarda harç içerisinde açığa çıkan $Ca(OH)_2$ ile puzolanik reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşikler oluşturmasıyla açıklanabilir.

PKÇ'li harçların basınç dayanımlarının kontrol harcı dayanımını karşılama oranının en yüksek olduğu puzolan karışımı, eğilmede çekme dayanımlarında olduğu gibi Z ve UK'nin birlikte kullanıldığı ZUKKÇ5 ve ZUKKÇ10 olarak belirlenmiştir. Ayrıca C ve UK'nin kullanıldığı CUKKÇ5 ve CUKKÇ10 harçları da benzer bir sonuç göstermiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Z ve UK yapısının az miktarda amorf, C'nin ise amorf yapıdan oluştuğu belirlenmiştir.
2. Çimento üretiminde kullanılan Z, UK ve C'nin yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğu tespit edilmiştir.

3. PKÇ'ler kimyasal kompozisyon bakımından TS EN 197-1'e uygundur.
4. PKÇ'lerde standart kıvam suyu ihtiyacı, zeolit oranı artışı ile artmaktadır.
5. PKÇ'lerin priz başlama ve sona erme süreleri TS EN 197-1'e uygundur.
6. PKÇ'lerin hacim genleşme değerleri TS EN 197-1 sınırından oldukça düşüktür.
7. PKÇ'lerin yoğunluk değerleri puzolanların yoğunluklarının düşük olması sebebiyle azalmıştır.
8. Z ve C'nin karışımdaki artışı ile çimentoların ögütülebilirliği kolaylaşmaktadır.
9. UK ve Z'nin birlikte kullanıldığı çimentolarda UK'nin toz halde karışıma girmesi ile Z çimentonun özgül yüzeyini artırmaktadır.
10. PKÇ'ler arasında bütün numune yaşlarında en yüksek eğilmede çekme ve basınç dayanımları CUKKÇ5 çimentosunda elde edilmiştir.
11. Kontrol çimentosunun eğilmede çekme dayanım değerlerini karşılama oranında en yüksek sonuçlar ZUKKÇ5 ve ZUKKÇ10 harçlarında elde edilmiştir.
12. Zeolit, uçucu kül ve atık cam, % 5 ve % 10 oranında ikili karışımlar halinde PKÇ üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Çalışmaya verdiği destekten dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (GÜBAP) Birimine (Proje No:07/2005-06) ve Limak Ankara Çimento Fabrikası yetkililerine ve laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Aruntaş, H.Y., “Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1996
2. Öztekin, H., Cimilli, T., “History and Use of Blended Cements in Turkey”, **Cement, Concrete and Aggregates**, Vol. 9, 44-48, 1987.
3. Roumain, J.C., Sarkar, S.L., II. International Symposium on Cement and Concrete Technology in the 2000, **Çimento ve Beton Dünyası**, Cilt 5, No 30, 36-45, 2001.
4. Rodríguez, R.E., Uribe, R., “Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability”, **Cement and Concrete Research**, Vol.32, 1851-1858, 2002.
5. Mehta, P.K., **Concrete: Structure, Properties and Materials**, Prentice-Hall, New Jersey, 1986.
6. **ASTM C 618**, Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 1994.
7. Aruntaş, H.Y., Tokyay, M., “Katkılı Çimento Üretiminde Diatomitin Puzolanik Malzeme Olarak

- Kullanılabilirliği”, **Çimento ve Beton Dünyası**, Cilt 1, No 4, 33-41, 1996.
8. Aruntaş, H.Y., Gürü, M., Dayı, M., Tekin, İ., “Utilization of Waste Marble Dust as an Additive in Cement Production”, **Material and Design**, Vol.31, No 8, 4039-4042, 2010.
9. Değirmenci, N., Yılmaz, A., “Use of Diatomite as Partial Replacement for Portland Cement in Cement Mortars”, **Construction and Building Materials**, Vol.23, No 1, 284-288, 2009.
10. Hossain, K.M.A., “Blended Cement Using Volcanic Ash and Pumice”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, No 10, 1601-1605, 2003.
11. Yılmaz, K., Canpolat, F., Arman, H., “Taban Küli ve Doğal Zeolitin Puzolanik Çimentoda Katkı Olarak Kullanımı”, **Beton Kongresi**, İstanbul, 716-725, 2004.
12. Hossain, K.M.A., “Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 34, No 2, 283-291, 2004.
13. Ulusu, H., “**Erzincan ve Nevşehir Yöresi Pomzularının Çimentolu Sistemlerde Kullanılabilirliği**”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006
14. Canpolat, F. ve diğerleri, “Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash as Replacement Materials in Cement Production”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 34, No 5, 731-735, 2004.
15. Aruntaş, H.Y., “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt14, No 1, 193-203, 2006.
16. Abalı, Y., Bayca, S.U., Targan, S., “Evaluation of Blends Tincal Waste, Volcanic Tuff, Bentonite and Fly Ash for Use as a Cement Admixture”, **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 131, No 1-3, 126-130, 2006.
17. Erdoğan, T.Y., Tokyay, M., and Ramyar, K., “Investigations on the Sulfate Resistance of High-Lime Fly Ash Incorporating PC-FA Mortars”, **4th CANMET/ACI Int Conf on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**, V 1, 1992.
18. Okucu, A., “Zeolitik Tüflerin Çimento Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi”, **Beton Kongresi**, İstanbul, 682-687, 2004.
19. Taban, S., Şimşek, O., “Zeolitik Tüf Katkı Oranı ve Deniz Suyunun Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 24, No 1, 145-153, 2009.
20. Shi, C., and et al., “Characteristics and Pozzolan Reactivity of Glass Powders”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, No 5, 987-993, 2005.
21. Erdem, T.K., Meral, Ç., Tokyay, M., Erdoğan, T.Y., “Use of Perlite Pozzolan Addition in

- Producing Blended Cement”, **Cement and Concrete Composites**, Vol. 29, No 1, 13-21, 2007.
22. Bilim, C., “Çimento Harçlarında İkame Malzemesi Olarak Zeolit ve Silis Dumanı Kullanımı”, **Erciyes Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Cilt 27, 339-345, 2011.
 23. Uzal, B., Turanlı, L., “Blended Cements Containing High Volume of Natural Zeolites: Properties, Hydration and Paste Microstructure”, **Cement and Concrete Composites**, Vol.34, No 1, 101-109, 2012.
 24. Khmiri, A., Samet, B., Chaabouni, M., “A Cross Mixture Design to Optimise the Formulation of a Ground Waste Glass Blended Cement”, **Cement and Concrete Composites**, Vol. 28, No 1, 680-686, 2012.
 25. Menendez, G., Bonavetti, V., Irassar, E.F., “Strength Development of Ternary Blended Cement with Limestone Filler and Blast-Furnace Slag”, **Cement and Concrete Composites**, Vol. 25, No 1, 61-67, 2003.
 26. Erdem, T.K., Kırca, Ö., “Use of Binary and Ternary Blends in High Strength Concrete”, **Construction and Building Materials**, Vol.22, No7,1477-1483, 2008.
 27. Antiohos, S.K., Papadakis, V.G., Chaniotakis, E., Tsimas, S., “Improving the Performance of Ternary Blended Cements by Mixing Different Types of Fly Ashes”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 37, No 6, 877-885, 2007.
 28. Final report, “Evaluating Properties of Blended Cements for Concrete Pavements”, The Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology, Iowa State University, 2003.
 29. Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M., “An Experimental Study on Durability Properties of Concrete Containing Zeolite as a Highly Reactive Natural Pozzolan”, **Construction and Building Materials**, Vol. 35, 1023-1033, 2012.
 30. Çelik, Ö., Damcı, E., Pişkin, S., “Characterization of Fly Ash and it Effects on the Compressive Strenght Properties of Portland Cement”, **Indian Journal of Engineering and Materials Science**, Vol. 15, 433-440, 2008.
 31. Matos, Joana Sousa-Coutinho, “Durability of Mortar Using Waste Glass Powder as Cement Replacement”, **Construction and Building Materials**, Vol. 36, 205-215, 2012.
 32. Erdoğan, T.Y., **Beton**, METU Press, Ankara, 2003.
 33. Erdoğan, K., Tokyay, M., Türker, P., “Traslar ve Traslı Çimentolar”, **TÇMB/AR-GE/Y99.2**, Ankara, 1999.
 34. Yılmaz, K., Canpolat, F. ve Arman, H., “Taban Külü ve Doğal Zeolitin Puzolanik Çimentoda Katkı Olarak Kullanımı”, **Beton Kongresi**, 716-725, İstanbul, 2004.
 35. Şahmaran, M., Kasap, O., Duru, K., Yaman, I.O., “Effects of Mix Composition and Water-Cement Ratio on the Sulfate Resistance of Blended Cements”, **Cement and Concrete Composites**, Vol. 29, 159-167, 2007.

