

## **DOĞAL ZEOLİT VE UÇUCU KÜL KATKILI VE KATKISIZ HARÇLARIN SÜLFAT DAYANIKLILIĞI**

Fethullah CANPOLAT <sup>1</sup> , Kemalettin YILMAZ <sup>2</sup>

**ÖZET :** Puzolanik özelliği deneysel olarak belirlenen doğal zeolitin ve uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığını araştırmak için % 5 ve % 10 'luk sodyum sülfat çözeltileri kullanılmıştır. Deneyler standart harçlarda ve çimento ağırlığının % 20 ve % 30 oranlarında ikameli olarak doğal zeolit , % 15 zeolit + % 5 uçucu kül ve % 25 zeolit + % 5 uçucu kül katılmış harçlarda yapılmıştır. Numuneler 28 gün kirece doygun suda saklanmış ve 28. gün eskitme süreci için başlangıç kabul edilmiştir. Başlangıçta 2, 7, 28, 90. günlerde numunelerde eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve birim ağırlık belirlenmiştir. Çözeltiler 14 gün ara ile yenilenmiş ve bu periyotlarda ağırlıklar ölçülmüştür. Sodyum sülfat çözeltilerinin harç özelliklerine etkileri zeolit oranına göre değerlendirilmiştir. Çimentoya zeolit katılması 90. güne kadar yüksek konsantrasyonda bile harcın sülfata karşı dayanıklılığına olumlu etki yapmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER :** doğal zeolit, uçucu kül, dayanıklılık, çimento katkıları, sülfat etkisi.

## **SULFATE DURABILITY OF MORTARS PRODUCED WITH AND WITHOUT NATURAL ZEOLITE AND FLY ASH**

**ABSTRACT :** An investigation was carried out on the effect of sodium sulfate on the sulfate durability of mortars produced with natural zeolite and fly ash having puzzolanic character. Experiments were carried out on the Rilem portland cement standart mortars and cement – natural zeolite mortars where the zeolite replaced 20 %, 30 %, 15 % zeolit + 5 % fly ash and 25 % + 5 % fly ash of the cement by weight. Sodyum sulfate concentrations were 5 % and 10 %. Sulfate exposures of mortars were initiated after 28 days of lime saturated water curing. Flexural strength, compressive strength and density were determined at the beginning of exposure and at the 2, 7, 28, 90th days. Water and solutions were renewed after each period of experimental time which was 14 days. Mass changes were determined at the time of renewing the solutions. The effects of sodium sulfate solutions on the properties of mortars were related to the zeolite ratio. Zeolite replacement caused significant increase in sulfate durability of mortars even at the highest sulfate concentration up to 90 days of exposure.

**KEYWORDS :** Natural zeolite, fly ash, durability, cement additives, sulfate attacks

<sup>1</sup>Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Bölümü, Manisa  
<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, M.Y.O., İnşaat Bölümü, Adapazarı

## ***I. GİRİŞ***

Yirminci Yüzyıl teknolojisinin giderek artan hammadde gereksiniminin en çok yansıdığı alan endüstriyel hammaddeler olmuştur. Bunlar içinde ise yoğun araştırmaların yapıldığı ve en çok zincirleme buluşların birbirini izlediği hammaddelerden biri zeolitlerdir. Zeolitler (Z) kristal yapıları ve kimyasal özellikleri nedeni ile günümüz endüstrisinin yeri tutulmaz hammaddeleridir [1].

Doğal ve yapay Z'lerin endüstride geniş kullanım alanları bulmalarının belli başlı nedenleri, kimyasal ve fiziksel özelliklerinin birçok kullanım alanlarına uygun olmasındandır. Bunlar, yüksek iyon değişim kapasitesi, yüze soğurma ve moleküler elek olma özelliği, kristal yapısının bozulmadan dehidrasyona uygunluğu, düşük yoğunluk, yüksek oranda silis bileşimine sahip oluşu gibi özellikleridir.

Türkiye, her ne kadar özellikle Batı Anadolu Bölgesi'nde zengin Z yataklarına sahip ise de Z'in endüstriyel kullanımı henüz tam olarak geliştirilememiştir. Son yıllarda Türkiye'de Z kullanımı daha çok atık suların sertliğinin giderilmesi ve zirai amaçlar üzerine yoğunlaşmıştır [2].

1970 yılına kadar betonda kullanılan mineral katkıların, kullanım nedeni sadece ekonomik ve ekolojik nedenlerden dolayı olmaktaydı. Betona olan yararlı etkisi henüz keşfedilmemişti. Daha sonraki yıllarda mineral katkıların; betonun geçirgenliğini ve kalsiyum hidroksidi azalttığı, C<sub>3</sub>A oranını düşürerek betonun sülfata olan dayanıklılığını arttırdığı belirlenmiştir [3]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda portland çimentosuna belirli oranlarda mineral katkıların eklenmesinin betonun sülfat dayanıklılığını artırdığı anlaşılmıştır [4-6].

Irassar ve arkadaşları; mineral katkılı betonun sülfat etkisini araştırdıkları çalışmalarında, betonun içerdiği mineral katkıları olarak; uçucu kül (UK), doğal puzolan ve volkanik curuf kullanmışlardır. Hazırladıkları numunelerin bir kısmı atmosferik ortamda sülfat çözeltisinde bekletilmiş, diğer numunenler ise yarısı sülfat yoğunluğu yüksek olan toprağa gömülmüştür. Mineral katkıları % 8.5 C<sub>3</sub>A içeren portland çimentosu ile belli oranlarla yer değiştirilerek numuneler hazırlanmıştır. Sülfat etkisi; görsellik, ağırlık kaybı, basınç dayanımı ve x-ray analizi ile incelenmiştir. Çalışma sonunda mineral katkı içeren beton numunelerin sülfata karşı katkısız olanlara göre daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir [7].

Betonarme yapılarda, sülfatlı suların etkisi ile meydana gelecek hasar, çimentoya puzolan malzeme katılarak azaltılabilir. Beton ile sülfatların etkileşimi, çimento ve betonun yapısına, çözeltilerin yenilenmesine ve hareketine bağlıdır. Beton ile sülfatlı çözeltiler arasında oluşan reaksiyon ürünlerinin miktarı ve özelliği, sülfata bağlı kationlara, farklı sülfat karışımlarına, bunların birbirine oranlarına ve miktarlarına bağlıdır [8]. Reaksiyon ürünleri ayrıca, çimentodaki trikalsiyumalüminat ( $C_3A$ ) miktarına göre değişir. Sülfatların etki mekanizması çok karmaşıktır. Sülfatlı çözeltilerdeki sülfat iyonları, çimentonun hidrasyon ürünü olan CH ile reaksiyona girerek jips ( $CSH_2$ ) meydana getirir. Oluşan jipsin betondaki hacim artışına ve yumuşamaya olan etkisi sınırlıdır ve her zaman zararlı değildir. Fakat reaksiyon sonunda oluşan jips çimentodaki  $C_3A$  ve bunun hidrasyon ürünü olan  $C_3AH_6$ ,  $C_4AH_{13}$ ,  $C_4ASH_{12-18}$  ile Candlot tuzu ( $C_4AS_3H_{32}$ ) oluşturur. Candlot tuzu doğal mineral olan etrinjit'e çok benzer, içerdiği 32 molekül kristal suyu nedeni ile de büyük hacim artışı meydana getirir [9,10]. Oluşan reaksiyon ürünleri boşlukları doldurur ve erken yaşlarda mekanik özelliklerde iyileşmeye yol açabilir [11,12]. Reaksiyon ürünlerindeki hacim artışı nedeni ile yapıda ilave çatlaklar oluşur; bu çatlaklar malzemenin performansını düşürür, kırılmalar ve parça atmalar görülür [8].

Türkiye'de toplam UK üretimi yaklaşık 13 milyon ton/yıl'dır. Bu ölçüde büyük boyutlara varan UK üretimi, ilgili kullanım alanlarında değerlendirilerek atık madde niteliğinden kurtarılmadıkça potansiyel bir problem olmaya devam edecektir. Enerji gereksinimindeki artışa paralel olarak üretim miktarı büyük ölçülere ulaşan UK'leri tarımdan kimyaya, zemin ıslahından çeşitli yapı malzemeleri üretimine kadar çok sayıda potansiyel kullanım alanları vardır [13]. UK'lerin en çok kullanılabileceği alanların başında inşaat sektörü gelmektedir. Bu alanda yapılan çalışmaların çoğunluğu uçucu küllerin çimento, beton, tuğla, hafif agrega üretiminde, zemin stabilizasyonu ve dolgu yapımında kullanılmasına yöneliktir.

UK' li çimento üretimiyle sağlanacak yararlar; (i) üreticinin yararları, (ii) kullanıcının yararları ve (iii) çevresel yararlar olarak üç ana kategoride toplanır. Çimento sektöründe teknolojik gelişmelerin hemen hemen tamamı enerjinin etkin kullanımına yönelik olmuştur. Ön ısıtıcılı, ön kalsinasyonlu sistemlerin geliştirilmesinin yanısıra, en önemli gelişmeler öğütme sistemlerinde olmuştur. Bilindiği gibi, çimento üretiminde kullanılan toplam elektrik enerjisinin % 40' ından fazlası öğütme işlemlerinde harcanmaktadır. Bu

nedenle, yeni öğütücüler, separatörler, değirmenler tasarlanmış ve kullanılmaya başlanmıştır. Öte yandan, tüm dünyada çimentoda daha fazla mineral katkı kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, uçucu küllerin çimentoda kullanılması üreticiler açısından; klinkerizasyon enerjisinde tasarruf, öğütme enerjisinde tasarruf, kurutma enerjisinde tasarruf, çevre dostu çabalarının ve faaliyetlerinin bir diğer göstergesi olması, ürün çeşitliliği sağlaması elde edilecek çimentonun üstün özellikleri bakımından yararlı olacaktır [14-19].

Z , silis dumanı ve volkanik curuf, yüksek fırın curufu gibi puzolanlar bünyesinde aktif silisyumdioksit ( $\text{SiO}_2$ ) sayesinde çimento hidrasyon ürünlerinden serbest kireci bağlar, suda erimeyen kalsiyumsilikathidrate (C-S-H) jeli oluşturur. CH'ın erimesini önler. Kül, çok ince oluşu nedeni ile çimento hamuru-agrega arayüzünü ve kılcal boşlukları tıkar, boşlukların küçülmesine ve kılcal boşlukların kesilmesine neden olur, ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirir. Bunun sonucu olarak su veya sülfat iyonlarının kütle içine difüzyonu zorlaşır, su ve sülfat etkisine karşı dayanıklılık artar [20, 21].

## ***II. DENEYSEL ÇALIŞMA***

Çalışmada, 5 ve % 10 konsantrasyonlu sülfat çözeltilerinin sertleşmiş harç numunelerinde mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri deneylerle araştırılmıştır. Z; Ege bölgesi Gördes/Manisa yöresinden Enli Madencilik Ltd. Şti. Maden ocağından, SDC 32.5; SET Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Ankara Fabrikası ve UK; Soma Termik Santralinden temin edilmiştir. Z; çimentoya % 0, % 20, % 30 , % 15 Z + % 5 UK ve % 25 Z + % 5 UK oranlarında ikameli olarak katılıp TS 24'e uygun harç numuneler üretilmiş ve 28. güne kadar standart koşullarda kür edilmiştir. Boyutları 40x40x160 mm olan numunelerin üretiminde özellikleri Tablo 1'de verilen portland çimentosu, Z ve standart Rilem kumu Kullanılmıştır. Numuneler 28. günde sudan çıkarılmış, bu gün eskitme süreci başlangıcı kabul edilerek laboratuvar koşullarında suya ve % 5 ve % 10 sülfat konsantrasyonu olan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltilerine konulmuştur. Çözeltilerin hazırlanmasında sanayi tipi  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tuzu kullanılmış, belirli konsantrasyonu için gerekli olan malzeme miktarları standard analitik deneylerle belirlenmiştir.

Numuneler üretime göre; standart harçlar Tabo 2'de gösterildiği gibi PÇ, Z katkılı çimentolar katkı oranlarına göre ZKÇ-20, ZKÇ-30, ZUKKÇ-15 ve ZUKKÇ-25 olarak adlandırılmıştır. Üretilen katkılı çimentoların normal kıvam suyu, priz süresi

ve hacimsel genleşme değerleri (Le Chatelier) Tablo 3’de verilmiştir. 28. gün (t=0) başlangıç kabul edilerek bundan sonraki 0, 2, 7, 28 ve 90. günlerde kontrol deneyleri yapılmıştır. Herbir deney grubu için üçer nümune olmak üzere , 40x40x160 mm boyutlu numunelerde eğilme deneyleri, kırılan parçalar üzerinde basınç deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık deneyleri için de üçer adet nümune hazırlanmıştır. Nümunelerin saklandığı su ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltileri 14 gün ara ile değiştirilmiş ve bu günlerde ağırlıklardaki kayıplar belirlenmiştir.

### ***III. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI***

Kontrol deneylerinin yapılacağı güne kadar su ve sülfat çözeltilerinde tutulan numuneler üretimden itibaren 28. gün başlangıç kabul edilerek 0, 2, 7, 28, ve 90. günlerde her grup için üçer numunede eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Su ve çözeltiler 14 gün ara ile yenilenmiş bu günlerde tartımlar yapılarak ağırlık değişimleri belirlenmiştir.

#### ***III.1. EĞİLMEDE ÇEKME DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI***

Belirtilen günlerde 40x40x160 mm boyutlu üçer adet numunelerde yapılan eğilme deneylerinden alınan sonuçlara göre,

##### ***a) Su içinde saklanan gruplar***

Zeolit katkılı çimento harçların eğilmede çekme dayanımları kontrol nümuneleri (PÇ 42.5) ile birlikte Tablo 4’de verilmiştir. Bulunan değerler kontrol nümunelerinin 28. gündeki eğilmede çekme dayanımı - yaş ilişkisi gösterilmiştir. Bu tablolarda görüldüğü gibi Zeolit miktarı % 20 olduğunda, katkısız nümunelere göre dayanım beklenenin aksine artmakta, sonraki yaşlarda dayanımlar birbirine yaklaşmaktadır. Bu grupta her yaş için en uygun katkı oranının % 20 olduğu anlaşılmaktadır.

##### ***b) Sodyum sülfat çözeltilerinde saklanan gruplar;***

% 5 sodyum sülfat konsantrasyonlu çözeltide saklanan grupların eğilme deneyi sonuçları incelendiğinde Tablo 4’de görüldüğü gibi bu serinin tüm gruplarında eğilmede çekme dayanımları 90. güne kadar artış görülmüştür. % 10 sodyum sülfat konsantrasyonlu çözeltide saklanan grupların eğilme deneyi yapılmamıştır.

### ***III.II. BASINÇ DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI***

Eğilmede çekme dayanımı deneyinde kırılan nümune parçalarında TS 24'e göre 40x40 mm'lik çelik başlıklardan yararlanılarak 6 adet nümunedeyapılan küp basınç deneyinden alınan sonuçlara göre,

#### ***a) Su içinde saklanan gruplar***

Basınç dayanımının belirlenmesi için yapılan deneylerden alınan sonuçlara göre, Tablo 5'de görüldüğü gibi suda saklanan gruplardan, zeolit katkılı harçların başlangıçtaki basınç dayanımları, şahit gruptan daha fazladır. Z katkılı harcın basınç dayanımı zamanla artmıştır. Basınç dayanımı bakımından da etkin zeolit oranı % 20 olduğu görülmektedir.

#### ***b) Sodyum sülfat çözeltilerinde saklanan gruplar ;***

% 5 sodyum sülfat çözeltilerinde saklanan grupların basınç deneyi sonuçları incelendiğinde. Basınç dayanımlarında zamanla değişimler gözlenmiş, ancak 90. günde tüm grupların dayanımında artış olmuştur.

% 10 sodyum sülfat çözeltilerinde saklanan grupların basınç dayanımları incelendiğinde, 90. günün sonunda bu serinin de tüm gruplarının basınç dayanımlarında artış görülmüştür. Bu artışların oranı kendi içerisinde az da olsa bir değişkenlik göstermektedir.

Eğilme ve basınç deney sonuçlarına göre UK katkılı harçların başlangıçta şahit harca göre, basınç dayanımının düşük olması beklenen bir sonuçtur. Çünkü puzolan malzemelerin hidratasyon hızı ve ısısı portland çimentosundan düşüktür, ancak zamanla maksimum dayanıma ulaşır [9]. 90. günde ZUKKÇ-15 katkılı harcın basınç dayanımında başlangıçtaki değerine göre % 46 artış, külün puzolanik aktivitesinin iyi olduğunun göstergesidir. Bu artış külün ince oluşu nedeni ile boşlukları azalttığı şeklinde yorumlanabilir.

Montgomery ve arkadaşları [22] uçucu küllü harçlarda, Uçucu kül parçacıklarının çekirdek noktalar olarak hareket edip mikro çatlakları azaltma eğiliminde olan mekanizmalara yardımcı olduğu şeklinde yorumlamışlardır. Sodyum sülfat etkisine tabi tutulan kalan kül katkılı ve katkısız harçların eğilme ve basınç dayanımlarında 90. güne

kadar gözlenen artış; a) sülfat etkisi ile oluşan jips ve etrenjit gibi yeni ürünlerin boşlukları tıkanmasına, b) hidratasyon ürünlerinin oluşumu sırasında açığa çıkan sodyum hidroksitin baz karakterde olması nedeni ile yenilenen sülfatın betona etkisini engellemesine bağlanabilir [13,14]. Ancak, daha ileri günlerde jips ve etrenjit gibi oluşumların neden olacağı hacim artışı ile katı fazda oluşan mikro çatlaklar harcın mekanik dayanımını azaltır.

Bu çalışmadaki deney süresi içinde % 5 ve % 10 gibi yüksek konsantrasyonlarda bile  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  'ın yapıyı bozucu etkisi gözlenmemiştir. Ancak zaman içindeki değişimlerin, bu deney yöntemleri ile belirlenmesi için deney süresinin uzatılması veya iç yapı analizlerinin yapılması gerekir.

### ***III.III. BİRİM AĞIRLIK***

Numunelerin saklandığı su ve sülfat çözeltileri 14 gün ara ile değiştirilmiş ve bu günlerde tartım yapılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Kül katkılı ve katkısız numunelerde belirlenen ağırlık değişimi deneyi sonuçları Şekil 1 ve 2'de gösterilmiştir. Başlangıçta 2, 7, 28, 90. günlerde 40x40x160 mm boyutlu numunelerde yapılan deneylerden alınan sonuçlara göre,

Sodyum sülfat çözeltilerinde saklanan gruplar; Konsantrasyonu % 5 olan sodyum sülfat çözeltilisinde saklanan grupların birim ağırlık deneyi sonuçları incelendiğinde, şahit numunenin başlangıç değerine göre 90. günün sonunda ZKÇ-20 numunelerinde % 0.35, ZKÇ-30 numunelerinde ise % 0.19'lük ağırlık kaybı olmuştur. % 5 uçucu küllü + zeolit katkılı çimentolarda; ZUKKÇ-15 numunelerde % 0.17'lik kayıp ve ZUKKÇ-25 numunelerinde ise ağırlık kaybı meydana gelmemiştir.

Konsantrasyonu % 10 olan sodyum sülfat çözeltilisinde saklanan grupların birim ağırlık deney sonuçları incelendiğinde; 90.gün sonunda şahit harcın birim ağırlığındaki kayıp ile ZKÇ-20 ve ZKÇ-30 numunelerinin aynı süredeki ağırlık kayıpları % 0.18 düzeyinde aynı kalmışlardır. % 5 uçucu küllü zeolit katkılı çimentolarda; ZUKKÇ-15 numunelerinde % 0.17'lik ağırlık kaybı, ZUKKÇ-25 numunelerinde ise ağırlık kaybı meydana gelmemiştir.

#### ***IV. SONUÇ VE ÖNERİLER***

Araştırmada kullandığımız puzolanlar sertleşmiş çimento harçlarında oluşturduğu iyileştirme literatürde verilen sonuçları desteklemektedir; bir kısım Portland çimentosunun belirli bir miktarda puzolan ile ikame edildiği çimento pastalarında toplam gözeneklilik Portland çimentosu içeren kontrol numunelerinden daha fazladır [23]. Bu durumun hem uçucu kül hem de doğal puzolan içeren pastalar için geçerli olduğu tespit edilmiştir [24]. Sertleşmiş çimento harçlarında ve betonda gözeneklilik ve geçirgenliğin azalması için uygun kalitede puzolanın uygun miktarda kullanımıyla mümkündür.

Deneylerden elde ettiğimiz katkılı çimentoların sülfata dayanıklılık göstermesi daha önce yapılan bir araştırmaya [25] göre şu yararlar sağlanmıştır; sülfatlara dayanıklı çimento ile yapılan betonlar, Portland çimentosu ile yapılan betonlara göre, deniz suyu, sülfatlı suların bulunduğu zeminler ve diğer sülfatlı ortamlarda daha büyük dayanıklılık göstermektedir.

Katkılı çimento üretiminde kullandığımız puzolanların betona sağladığı yararlardan biride literatürde belirtildiği gibi alkali silika reaksiyonunu önlemede etkin olacaktır; betonda alkali-silika reaksiyonunu önlemede ise puzolanların etkinliği kesin olarak kanıtlanmıştır [9]. Sonuç olarak, beton ya da çimentoda doğal puzolan bulunması, alkali-silika reaksiyonunun etkilerini önlemede uygun bir yol olarak ortaya çıkmaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre;

Zeolit ve uçucu kül puzolanik özelliğe sahiptir.

Zeolit katkılı numunelerde 90. güne kadar gözle görülür yumuşama, çatlama, dökülme ve parçalanma gözlenmemiştir.

Farklı katkı oranları için sodyum sülfat çözeltilerinin mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından 90. güne kadar olumsuz etkisi görülmemiştir.

Bu ortamlar ve deney süresi için mekanik ve fiziksel özellikler bakımından etkin uçucu kül ve zeolit oranının % 20 ve % 25 olduğu tespit edilmiştir.

Kontrol deneyleri için eskitme süresi daha fazla uzatılmalı, numune sayısı artırılarak bu deneylerin yanı sıra iç yapı araştırması da yapılmalıdır.

Katkılı harç numunelerinin katkısız harç numunesine göre dayanım ve ağırlık kayıpları bir miktar farklılık göstermekle birlikte çok belirgin bir azalma ve artış yönünde bir



değişim gözlenmemiştir. Bu durum daha ileriki yaşlarda zararlı etkinin daha iyi anlaşılabilmesi eskitme süresini 90 günlük süreden daha fazla tutulması ile anlaşılabilir.

### **KAYNAKLAR**

- [1] K. Sarıız, İ. Nuhoglu, “*Endüstriyel Hammadde Yatakları ve Madenciliği*”, Anadolu Üniversitesi. Yayın No:636, Eskişehir, 1992.
- [2] E. Erdem, R. Donat, H. Çetişli, “Hydration and Mechanical Properties of Cement Containing Zeolite”. *Cement and Concrete World* , No:17, 22-28, Ankara, 1999.
- [3] P. K. Mehta, “Effects of Fly Ash Composition on Sulfate Resistance of Cement”. *ACI Journal*, V. 83, 994-1000, 1986.
- [4] P. S. Mangat and J. M. El-Khatip, “Influence of Initial Curing on Sulfate Resistance of Blended Cement and Concrete”. *Cem. Concr. Res.* V. 22, 1089-1100, 1992.
- [5] R. D. Hooton, and J. J.Emery , “Sulfate Resistance of a Canadian Slag Cement”. *ACI Materials Journa*, 87, 547-555, 1990.
- [6] P. J. Tikalsky and R. L. Carrasquillo, “Influence of Fly Ash on The Sulfate Resistance of Concrete”. *ACI Materials Journa*, 89, 69-75, 1993.
- [7] E. F. Irassar, A. Di Maio, O. R. Batic ”Sulfate Attack on Concrete with Mineral Admixtures”. *Cem. Concr. Res.* Vol. 26, No. 1, pp. 113-123, 1996.
- [8] H. Biricik, F. Aköz, “Sodyum Sülfat Çözeltisinin Buğday Sapı Külü Katkılı ve Katkısız Harçlara Etkisi”. *Çimento ve Beton Dünyası*, Yıl 5. Sayı 26 (11-17), Ağustos, 2000.
- [9] A. M. Neville, “*Properties of Concrete Pitman Publishing*”, Singapore, 443-451, 1990.

- [10] M. D. Cohen, A. Bentur, “Durability of Portland Cement Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Solutions”. *ACI Journal*, V. 5, N. 3, May-june, pp 148-157, 1988.
- [11] O. A. Kayyali, “Porosity and Compressive Strength of Cement Paste in Sulfate Solution”. *Cem. Concr. Res*, V. 19, N. 3, pp.423-433, 1989.
- [12] E. F. Irassar, “Sulfate Resistance of Blended Cement Prediction and Relation with Flexural Strength”. *Cem. Concr. Res*, V. 20, N. 2, pp.209-218, ,1990.
- [13] E. A. Abdun-Nur, “Fly Ash in Concrete: An Evulation”, *Highway Research Board Bulletin*, No.28, 138 s, Washington D.C., 1961.
- [14] M. Tokyay, K. Erdoğan, “Uçucu Küllerin Karakterizasyonu”, *TÇMB AR-GE/Y* 98.3, Ağustos, 1998.
- [15] F. Canpolat, K. Yılmaz, R. Ata and M. M. Kose, ”Prediction Ratio of Mineral Substitution in the Production of Low-Clinker Factored Cement by Artificial Neural Network”. *Mathematical and Computational Applications*, 8(2) , 209-218 2003.
- [16] S., Targan, A. Olgun, Y. Erdogan, V. Sevinc, “Influence of Natural Pozzolan, Colemanite Ore Waste, Bottom Ash and Fly Ash On The Properties Of Portland Cement”. *Cem. Concr. Res.* 2304, pp. 1–8, 2003 (In press).
- [17] I. Kula, A. Olgun, V. Sevinc, Y. Erdogan, “An Investigation on The Use Of Tincal Ore Waste, Fly Ash and Coal Bottom Ash as Portland Cement Replacement Materials”, *Cem. Concr. Res.* V. 32. pp.227–232, 2002.
- [18] F. Canpolat, K. Yılmaz and M. M. Kose, “Effects of Natural Zeolite and Fly Ash as Replacement Materials on The Properties of Portland Cement”, *Energy, Education, Science and Technology*, 10 (1), 41-48, 2002.
- [19] A. Demirbas, A. Aslan, “Evaluation of Lignite Combustion Residues as Cement Additives”, *Cem. Concr. Res.* V. 29, pp. 983-987, 1999.

- [20] D. Bonen, "A Microstructural Study of the Effect Produced by Magnesium Sulfate on Plain and Silica - Fume Bearing Portland Cement". *Cem. Concr. Res.*, V. 23, N.3, pp.541-553, 1993.
- [21] P. K. Mehta, O. D. Gjorv, "Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica – Fume". *Cem. Concr. Res.*, V. 12, pp.587-595, 1982.
- [22] D. G. Montgomery, D. C. Hughes and R. I. T. Willaiams, "Fly Ash in Concrete: A Microstructural Study", *Cem. Concr. Res.* V. 11 , pp.591-603, 1981.
- [23] E. E. Berry, "Beneficiated Fly Ash: Hydration, Microstructure and Strength Development in Portland Cement Systems", *Proceeding of 3<sup>rd</sup> International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI Special Publication 114*, Vol.1, pp. 241-273, Troudheim, 1989.
- [24] F. Massazza, "Microstructure of Hydrated Pozzolanic Cements", *1<sup>st</sup> International Workshop on Hydration and Setting*, Dijon, 1991, London E&FN Spon, 1992.
- [25] T. Y. Erdoğan, "Betonu Oluşturan Malzemeler-Çimentolar", *Türkiye Hazır Beton Birliği*, İstanbul, 1995.

### **TEŞEKKÜR**

Yazarlar, bu araştırma için laboratuvar olanaklarını sağlayan ÇİMENTAŞ İzmir Çimento Fabrikası Türk A.Ş., kalite kontrol şefi Günseli Eryiğit ve laboratuvar personeline içten teşekkürlerini sunarlar.

**Tablo 1** Kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

| <b>Kimyasal analiz ( Bileşenler, % ağırlıkça )</b> |         |              |           |
|--|---------|--------------|-----------|
|  | Klinker | Doğal zeolit | Uçucu kül |
| SiO <sub>2</sub>                                   | 19.43   | 62.17        | 42.81     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 5.78    | 9.76         | 23.03     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 3.69    | 2.02         | 5.33      |
| CaO  | 63.34   | 1.43         | 21.60     |
| MgO  | 0.66    | 0.75         | 1.81      |
| SO <sub>3</sub>                                    | 0.74    | 0.07         | 3.39      |
| KK   | 0.20    | 14.06        | 1.28      |
| Na <sub>2</sub> O                                  | 0.29    | 0.46         | 0.34      |
| K <sub>2</sub> O                                   | 0.68    | 3.72         | 1.38      |
| Serbest CaO  | 1.44    | -            | 3.17      |
| <b>Fiziksel özellikler</b>                         |         |              |           |
| Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )                 | 3.18    | 2.19         | 2.43      |
| İncelik(blaine) (cm <sup>2</sup> /g)               | 1860    | 8150         | 3340      |
| +32µ elekte kalan (%)                              | 25.6    | 32.20        | 22.31     |
| +90µ elekte kalan (%)                              | 2.7     | 6.10         | 1.70      |
| <b>Mineralojik bileşimler</b>                      |         |              |           |
| C <sub>3</sub> S                                   | 66.04   | -            | -         |
| C <sub>2</sub> S                                   | 5.90    | -            | -         |
| C <sub>3</sub> A                                   | 9.08    | -            | -         |
| C <sub>4</sub> AF                                  | 11.23   | -            | -         |
| Sıvı faz   | 27.35   | -            | -         |

**Tablo 2.** Üretilen katkılı ve katkısız çimentoların cinsleri ve kodları

| Çimentonun Kodu | Çimentonun Cinsi                            |
|-----------------|---|
| PÇ              | Portland Çimentosu (katkısız çimento)       |
| ZKÇ-20          | % 20 Zeolit katkılı çimento                 |
| ZKÇ-30          | % 30 Zeolit katkılı çimento                 |
| ZUKKÇ-15        | % 15 Zeolit + % 5 Uçucu Kül katkılı çimento |
| ZUKKÇ-25        | % 25 Zeolit + % 5 Uçucu Kül katkılı çimento |

**Tablo 3.**

Üretilen katkılı çimentoların normal kıvam suyu, priz süresi ve hacimsel genleşme değerleri (Le Chatelier)

| Çimento  | Normal Kıvam Suyu % | Priz süresi (saat:dakika) |           | Hacimsel Genleşme (mm) |
|----------|---------------------|---------------------------|-----------|------------------------|
|          |                     | Priz Başlangıcı           | Priz sonu |                        |
| PÇ 42.5  | 25.4                | 2:37                      | 4:37      | 2                      |
| ZKÇ-20   | 31.0                | 2:45                      | 3:37      | 3                      |
| ZKÇ-30   | 33.5                | 1:26                      | 2:26      | 4                      |
| ZUKKÇ-15 | 29.5                | 3:38                      | 4:33      | 2                      |

|                         |      |            |              |           |
|-------------------------|------|------------|--------------|-----------|
| <b>ZUKKÇ-25</b>         | 35.6 | 2:58       | 3:39         | 5         |
| TS 12142 <sup>(1)</sup> | -    | en az 1:00 | -            | en çok 10 |
| TS 12143 <sup>(2)</sup> | -    | en az 1:00 | -            | en çok 10 |
| TS 12144 <sup>(3)</sup> | -    | en az 1:00 | -            | en çok 10 |
| TS 26 <sup>(4)</sup>    | -    | en az 1:00 | en geç 10:00 | en çok 10 |
| TS 10156 <sup>(5)</sup> | -    | en az 1:00 | en geç 10:00 | en çok 10 |

1. Çimento kompoze standardı

2. Çimento Portland kompoze standardı

3. Çimento Puzolonik standardı

5. Katkılı çimentolar standardı

4. Traslı çimentolar standardı

**Tablo 4.** Katkılı çimentolardan elde edilen harçların eğilmede çekme dayanımları

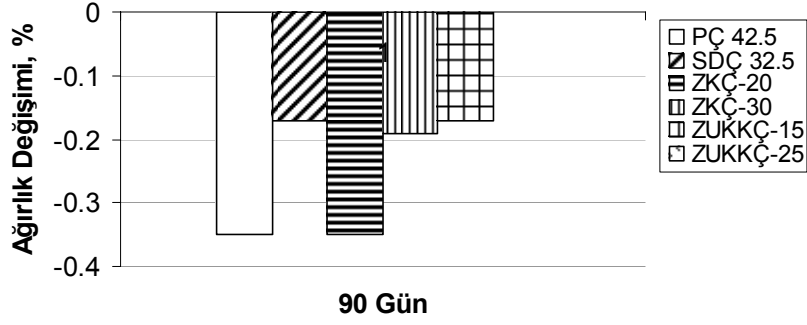
| Çimento         | Eğilmede çekme dayanımı (MPa) |      |       |      |        |        |        |       |   |       |
|-----------------|-------------------------------|------|-------|------|--------|--------|--------|-------|---|-------|
|                 | 2 gün                         | %    | 7 gün | %    | 28 gün | %      | 90 gün | %     | % 5 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>90 gün | %     |
| <b>PÇ 42.5</b>  | 4.1                           | (50) | 5.9   | (72) | 8.2    | (100)* | 8.7    | (106) | 8.7   | (106) |
| <b>SDÇ 32.5</b> | -                             | -    | -     | -    | -      | -      | -      | -     | 9.5   | (115) |
| <b>ZKÇ-20</b>   | 3.5                           | (43) | 5.1   | (62) | 7.0    | (85)   | 8.3    | (101) | 6.7   | (101) |
| <b>ZKÇ-30</b>   | 2.5                           | (30) | 4.6   | (56) | 6.3    | (77)   | 7.8    | (95)  | 7.8   | (95)  |
| <b>ZUKKÇ-15</b> | 3.5                           | (43) | 5.1   | (62) | 7.3    | (89)   | 7.6    | (93)  | 8.8   | (107) |
| <b>ZUKKÇ-25</b> | 2.9                           | (35) | 4.5   | (55) | 6.8    | (83)   | 8.0    | (98)  | 8.7   | (106) |

(\*) Parantez içindeki değerler PÇ 42.5 çimentolu numunelerin 28.gündeki eğilmede çekme dayanımına göre yüzdeleridir.

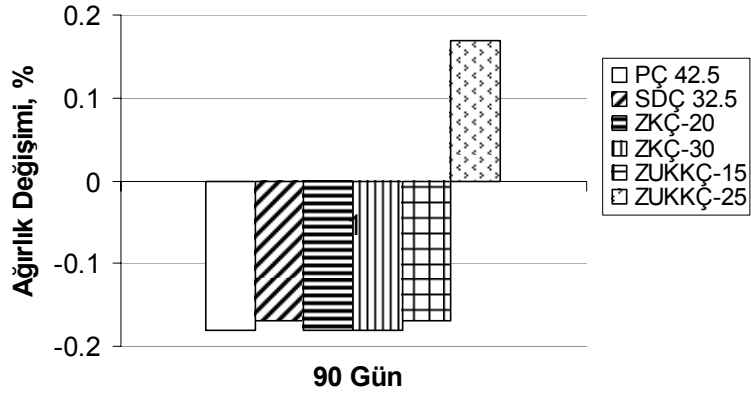
**Tablo 5.** Katkılı çimentolardan elde edilen harçların basınç dayanımları

| Çimento Kodu    | Basınç dayanımı (MPa) |      |       |      | % 5 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |        | %10 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |       |      |       |      |       |
|-----------------|-----------------------|------|-------|------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|
|                 | 2 gün                 | %    | 7 gün | %    | 28 gün                              | %      | 90 gün                              | %     |      |       |      |       |
| <b>PÇ 42.5</b>  | 21.2                  | (47) | 34.4  | (76) | 45.1                                | (100)* | 57.6                                | (128) | 55.7 | (124) | 56.0 | (124) |
| <b>SDÇ 32.5</b> | 9.6                   | (21) | 22.4  | (49) | 35.0                                | (77)   | 68.5                                | (151) | 66.0 | (146) | 64.5 | (143) |
| <b>ZKÇ-20</b>   | 17.8                  | (39) | 30.7  | (68) | 54.2                                | (120)  | 58.5                                | (130) | 57.6 | (128) | 58.1 | (129) |
| <b>ZKÇ-30</b>   | 13.4                  | (30) | 26.8  | (59) | 47.8                                | (106)  | 58.5                                | (130) | 58.5 | (130) | 53.8 | (119) |
| <b>ZUKKÇ-15</b> | 17.8                  | (39) | 28.4  | (63) | 51.0                                | (113)  | 59.4                                | (132) | 66.6 | (146) | 60.7 | (134) |
| <b>ZUKKÇ-25</b> | 14.4                  | (32) | 27.3  | (61) | 50.8                                | (113)  | 58.3                                | (129) | 57.9 | (128) | 58.9 | (130) |

(\*) Parantez içindeki değerler PÇ 42.5 çimentolu numunelerin 28.gündeki basınç dayanımına göre yüzdeleridir.



Şekil 1. % 5 Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen çimento harçlarının birim ağırlık değişimi



Şekil 2. % 10 Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen çimento harçlarının birim ağırlık değişimi