

Uçucu Kül ve Tüf Karışımı Katkının Harçlarda Çimento Yerine Kullanılabilirliğinin Araştırılması

¹Sunay Beyhan, ²Günay Beyhan, ²Ayhan Keskinsezer
¹Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye
²Sakarya Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, termik santral atığı uçucu kül ve volkanik tüf karışımının puzolan özelliğinden yararlanılarak çimento harçlarında çimentoya ikame olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Uçucu kül ve tüf aynı oranlarda olmak kaydıyla uygun şekilde karıştırılmıştır. Karışımlar; toplam bağlayıcı miktarı sabit tutularak çimento ağırlığının %10, %20, %30 ve %40'ı oranlarında çimentoya ikame olarak kullanılmıştır. Katkılı çimento karışımlarından standartlara uygun olarak harç hazırlanmıştır. Hazırlanan harç içerisinde standart kum kullanılmış ve su/çimento oranı 0,5 olarak alınmıştır. Hazırlanan harçlar 40x40x160 mm ebatlı kalıplara dökülerek 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri uygulanmıştır. Kür sonunda numunelere eğilme, basınç ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Aynı deneyler hazırlanan şahit numunelere de uygulanmıştır. Yapılan çalışmada yapay (uçucu kül) ve doğal (volkanik tüf) puzolan maddesi aynı oranlarda karıştırılarak harç içerisinde kullanılmıştır. Sonuçta; puzolan katkı miktarına bağlı olarak meydana gelen değişimler incelenmiş ve uçucu kül + tüf karışımının harçta çimento yerine kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Uçucu kül, tüf, dayanım

1. Giriş

Linyit ve taş kömürü gibi organik kökenli fosil yakıtlardan elektrik enerjisi üretmek amacıyla çalışan termik santrallerden “taban külü (TB)” ve “uçucu kül (UK)” atık malzeme olarak açığa çıkmaktadır. Bu atıklardan UK’ün çevreyi olumsuz olarak etkilememesi için termik santrallerde mekanik ve elektrostatik yöntemle toplanarak havaya karışmaları önlenmektedir. Dünya genelinde, termik santrallerden çıkan UK miktarı yıllık yaklaşık 600 milyon ton civarındadır. Dolayısıyla tamamen atık malzeme olarak nitelendirilen bu ürün zamanla birikerek doğada geniş alanları kaplamaya başlamakta ve çevre için ciddi bir problem olarak ortaya çıkmaktadır.

Kireç veya çimento ile karıştırıldığında su ile yaptığı reaksiyon sonunda bağlayıcı özelliğini kazanan maddelere puzolan denilmektedir [1]. Puzolanlar, doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Doğal puzolanlar; volkanik tüf, pomza taşı, tras gibi volkanik kökenli malzemelerdir. Yapay puzolanlar ise genellikle bir ısıl işlem neticesinde elde edilen silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerdir [2, 3].

Beton özelliklerini geliştirmek ve çimentodan tasarruf etmek amacıyla çimentoya ikame edilen birçok malzeme türü günümüzde yaygın şekilde kullanılmaktadır [4]. Çimento ve beton üretiminde

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering Dumlupınar University, 43700, Kütahya TURKEY. E-mail address: sunay.beyhan@dpu.edu.tr, Phone: +9027425652031

kullanılan yapay puzolanlardan biri de uçucu küllerdir. UK gibi puzolanik malzemelerin yeterli puzolanik aktiviteyi gösterebilmesi için, ince taneli ve amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içermesi gerekmektedir [4]. Yapılan çalışmalar, uçucu külün genel olarak betonun özelliklerini geliştirdiğini göstermektedir [4, 5, 6].

Doğal puzolanlar, Portland Çimentosuna (PÇ) katkı malzemesi ya da ikame malzemesi olarak kullanılması durumunda birçok avantaj sağlayabilmektedir. Doğal puzolan özelliğine sahip maddelerin ince öğütülebilmeleri sayesinde çimento hamurundaki mikro boşluklara girebilmekte ve çimento hamurunun iskelet yapısını değiştirerek dayanıklılığını artırmaktadırlar [7, 8, 9]. İnce taneli durumdaki doğal puzolan katkıları, betonda işlenebilmeyi ve sülfat dayanıklılığını arttırırken, terlemeyi, hidrasyon ısısını, su geçirimsizliğini ve alkali silika reaksiyonunu azaltmaktadır [4, 10].

UK'lerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla bir yandan malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken diğer taraftan çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da mümkün olmaktadır [11]. UK'ler çimentoda; hammadde, katkı maddesi, ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır [12, 13, 14].

PÇ üretiminde enerji maliyeti önemli bir yer tutmaktadır. UK, çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve kalkere hammadde olarak karıştırılarak klinker üretiminde kullanılmaktadır. UK çimentoda katkı ve ikame malzemesi olarak kullanıldığında enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Dolayısıyla daha ucuz çimento elde edilmekte ve böylece ekonomi sağlanmaktadır [11]. Katkılı çimento, portland çimentosuna göre çok daha az enerji tüketimi sağlaması ve bazı özelliklerinin getirdiği ilave katkılardan dolayı yapı sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Beton uygulamalarında tras katkılı çimentoların kullanılması çeşitli teknolojik avantajlar da sağlamaktadır [15].

Çimentoların basınç dayanımları standartlara uygun üretilen harç numuneler üzerinde tayin edilmektedir. Bu çalışmada, çevresel sorunlara neden olan termik santrallerden atık malzemesi olarak çıkan uçucu küllerin, çimento harcı içerisinde çimento yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu anlamda daha önceki çalışmalar sadece uçucu kül katkılı çimento karışımları üzerine yürütülmüştür. Bu çalışmada ise, uçucu külün bu özelliğinin volkanik tüf katkısı ile daha da artırılabilirliği amaçlanmıştır. Bu amaçla UK ve tüf aynı oranlarda olmak kaydıyla uygun şekilde karıştırılmıştır. Karışımlar; toplam bağlayıcı miktarı sabit tutularak çimento ağırlığının %10, %20, %30 ve %40'ı oranlarında çimentoya ikame olarak kullanılmıştır.

2. Uçucu Kül ve Volkanik Tüf

2.1. Uçucu kül

Termik santrallerde en önemli atık malzeme; toz kömürün yanmasıyla meydana gelen, baca gazlarıyla sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Bu ince kül parçacıkları elektrostatik

yöntemlerle elektro filtrelerde ve siklonlarda yakalanmakta ve baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir. UK olarak isimlendirilen bu atık malzemenin tanecikleri genellikle küresel yapıda olup büyüklükleri 1-200µm arasında değişmektedir. UK'in tane boyutları termik santraldeki kül toplama yöntem ve ekipmanlarına bağlıdır. Siklonlarda toplanan küller, elektro filtrelerde toplananlardan daha iri tanelidirler.

2.1.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları temel alınmaktadır. ASTM C 618 standardına göre UK, F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ yüzdesi %70'den fazla olan UK girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı UK, puzolanik özelliğe sahiptir. C sınıfı UK ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. C sınıfı uçucu küllerde CaO > %10 olduğu için bu küller yüksek kireçli UK olarak da adlandırılırlar. C sınıfı UK, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler [16, 22].

TS EN 197-1'e göre yapılan sınıflandırmada ise UK silisli (V) ve kalkerli (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı UK, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının % 25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı UK ise, hidrolik veya puzolanik özellikleri olan çok ince boyuta sahip olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu UK'de, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir [17].

2.2. Volkanik tüf ve özellikleri

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan mineral malzemelerin en az çimento boyutunda yani ince taneli olması gerekmektedir. UK ve silis dumanı gibi yapay puzolanlar ince taneli malzemelerdir. Ancak, volkanik tüf, granüle yüksek fırın cürufu, pişirilmiş kil gibi bazı malzemelerin beton katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için, öğütülmeleri ve tanelerinin inceliğinin en az portland çimentosu boyutuna getirilmeleri gerekmektedir. Doğada bulunan ve ince taneli duruma getirildikten sonra kalsiyum hidroksit ve su ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren silisli ve alüminli malzemelere doğal puzolanlar denilmektedir. Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar ve bazı killer doğal puzolanlardır [19]. Doğal puzolanlar, diğer adıyla traslar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine sahip olmasalar da çok ince öğütüldüklerinde, normal sıcaklıklarda, sulu ortamlarda kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanabilen, silis ve alümin oksitce zengin tüf çeşidi malzemelerdir [18].

Doğal puzolanlar, ince taneli olmaları sayesinde çimento harcı ve beton üzerinde kayganlaştırıcı etkisi sayesinde taze betonun kıvamını ve dolayısıyla işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Ancak

doğal puzolanlar, çimentonun toplam özgül yüzeyini artırdıkları için su ihtiyacını da artırmaktadırlar. Portland çimentosunun ve doğal puzolanın bir karışım halinde uygulandığı harçlarda ve betonlarda katılma sürelerinin, puzolanın katılım oranına, inceliğine ve reaktivitesine bağlı olarak gelişme gösterdiği ifade edilmektedir [18].

CaO, MgO ve SO₃ gibi bazı zararlı maddelerin çimentoda hacim genişlemesini tetikledikleri için bu maddelerin çimentoda belli sınırların altında olması gerekmektedir. CaO miktarı kütlece %3, MgO miktarı ise kütlece %4,5'ten fazla olmamalıdır. Doğal puzolanlar, inceliklerine bağlı olarak bu zararlı maddelerle tepkimeye girmekte ve bunların çimento içerisindeki oranlarını düşürmektedir [18].

3. Malzeme ve Yöntem

Deneylerde kullanılan CEM I 42,5 R çimentosunun, uçucu külün ve volkanik tufün kimyasal özellikleri Tablo 1'de, standart kumun granülometrik bileşimi ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo1. Uçucu kül, CEM I 42,5 R çimentonun ve tufün kimyasal analiz değerleri

Numune No	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	KK	Toplam
Uçucu Kül (UK)	50.97	19.30	12.89	4.21	4.31	0.57	2.31	1.77	0.82	2.26	99.41
Tuf (T)	65.22	16.03	1.75	2.70	1.80	1.97	3.40	-	0.22	6.43	99,52
CEM I 42.5R	18.90	5.15	3.36	1.57	63.59	0.40	0.77	2.65	-	3.59	99.98

Tablo 1'den görüldüğü üzere uçucu kül SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ değeri %70'den büyük ve CaO değeri de <%10 gibi bir değere sahip olduğu için ASTM C618'e göre F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül kategorisine, TS EN 197-1'e göre yapılan sınıflandırmada ise reaktif kireç miktarının < %10 olması nedeniyle V (silisli uçucu kül) grubuna girmektedir.

Tablo 2. Rilem Cembureau standart kumunun granülometrisi

Kare göz açıklığı (mm)	2.00	1.60	1.00	0.50	0.16	0.08
Kümülatif elekte kalan (%)	0	7 ± 2	33 ± 2	67 ± 2	87 ± 2	99 ± 1

3.1. Harçların hazırlanması

Bu çalışmada harç üretimi TS EN 196-1'e göre yapılmıştır. Buna göre kütlece bir kısım çimento, üç kısım standart kum ve ½ kısım su (su/çimento oranı 0,50) olacak şekilde malzemeler belirlenmiştir. Şahit harç karışımında 450 g çimento (CEM I 42,5R Portland çimento), 1350 g CEN standart kumu ve 225 g şebeke suyu kullanılmıştır. Çimento harç numunelerinin hazırlanmasında TS EN 196-1 uygun Rilem-Cembureau standart kumu kullanılmıştır [20]. Katkılı çimento harcı hazırlanmasında ise çimentoya ikame olarak kullanılan UK ve tuf, toplam bağlayıcı miktarı sabit tutularak çimento ağırlığının %10, %20, %30 ve %40'ı oranlarında kullanılmıştır. Katkılı çimento harcı için standart kum ve su/katı oranı (0,5) sabit kalmak şartıyla, çimento miktarı değiştirilmiştir. UK ve tuf -90µm boyutunda kullanılmıştır. Şahit harç

ve çimentoya ikame numunelerin miktar ve oranları Tablo 3’de verilmiştir. Çimento harçları, 40×40×160mm boyutlu çelik kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 1). Harç numuneleri, 20±2 °C sıcaklık ve %90’dan fazla bağıl neme sahip kür dolabında 24 saat bekletilmiş ve daha sonra 2, 7 ve 28 gün 20 ± 2 °C sıcaklığa sahip su havuzunda küre tabi tutulmuştur (Şekil 2). Kür havuzundan alınan numunelerin önce ağırlıkları belirlenmiş ve daha sonra sırasıyla TS EN 196-1’e uygun hazırlanan harç numuneleri üzerinde ultrases geçiş süresi, eğilmede çekme ve basınç deneyleri yapılmıştır.

Tablo 3. Harç malzemesi oranları ve karışım miktarları

Karışım oranları	Karışım miktarları					
	Çimento (gr)	UK (gr)	T (gr)	Kum (gr)	Su (gr)	Toplam (gr)
Şahit numune	450	-	-	1350	225	2025
%10 (%5 UK+%5 T)	405	22.5	22.5	1350	225	2025
%20 (%10 UK+%10 T)	360	45.0	45.0	1350	225	2025
%30 (%15 UK+%15 T)	315	67.5	67.5	1350	225	2025
%40 (%20 UK+%20 T)	270	90.0	90.0	1350	225	2025

UK: Uçucu kül, T: Tüf



Şekil 1. Kalıplara dökülmüş harç numuneleri



Şekil 2. Numunelerin kür havuzunda bekleme durumları

4. Deneysel Çalışmalar

4.1. Eğilme dayanımı deneyi

Harç numunelerin eğilme deneyi, numunenin ortasına gelecek şekilde tek noktadan yükleme yapılarak uygulanmıştır. Yükleme hızı saniyede 0,4 kN/sn olacak şekilde ayarlanmış ve eğilme dayanımı (R_f), Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır [20].

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (1)$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı (N/mm²)

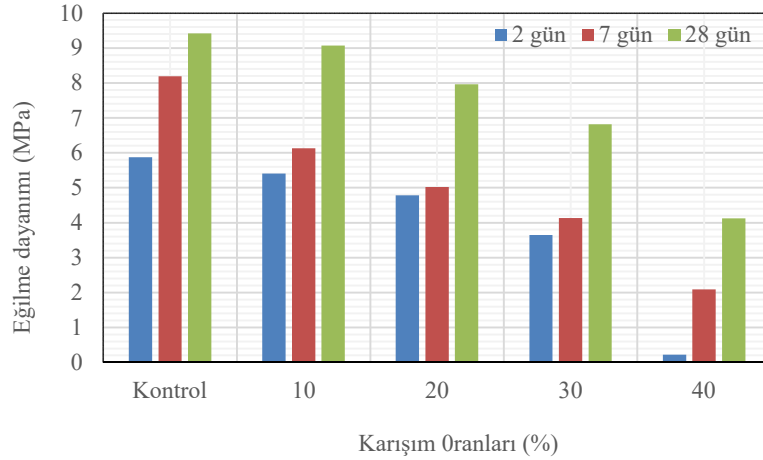
b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)

F_f : Prizmanın kırıldığı anda uygulanan kuvvet (N) L : Mesnet silindirleri arası uzaklık (mm)

4 farklı karışım oranına ait ve her bir karışım için 40x40x160 mm'lik kalıplarda hazırlanan harç numuneleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak deney cihazına yerleştirilmiştir. Yük, hidrolik pres ile numunenin karşı yan yüzünden dik olarak ve 0,4 kN/sn sabit hızda olacak şekilde numune yenilineye kadar yük uygulanmıştır (Şekil 3). Deney sonuçları grafiksel olarak Şekil 4'de verilmektedir.



Şekil 3. Eğilme dayanımı deneyi düzeneği



Şekil 4. Eğilme dayanımı deney sonuçlarının grafiksel gösterimi

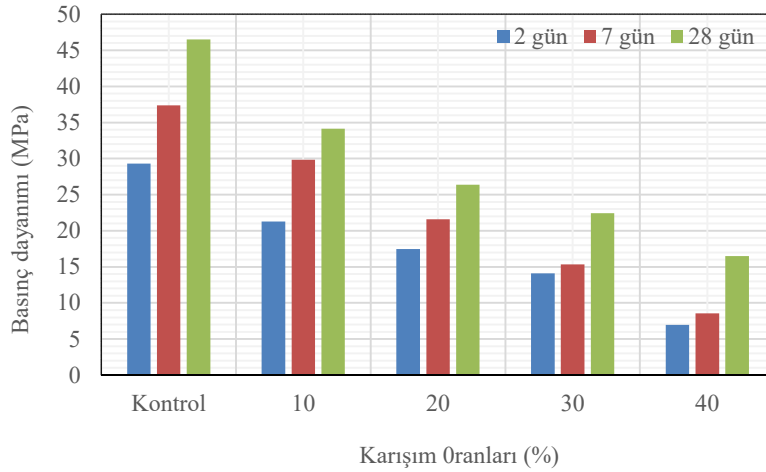
4.2. Basınç dayanımı deneyi

Puzolanlar, betonda klinkerin hidrasyonu sonucu oluşan portlandit ($Ca(OH)_2$) ile tepkimeye girmekte ve bu nedenle betona su karıştırıldıktan sonra, bir süre ortamda portlandit'in toplanma süresince portland çimentoya seyreltici bir etki yapmaktadır. Ancak zamanla ortamda portlandit birikmesi, puzolanların da sistemin dayanımını artıran etkilerinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, puzolan kullanımıyla betonun erken dayanımında bir düşüş olması beklenmekte, ancak zamanla dayanımlarının PÇ ile yapılan harçların sonuçlarına erişebileceği ifade edilmektedir [18].

Basınç dayanımı deneyinde, eğilme deneyinde iki parçaya bölünmüş olan yarım numuneler kullanılmıştır. Her bir parça 40x40 mm'lik iki aparatın arasında basınç cihazının yükleme plakaları arasına yerleştirilerek, yan yüzeylerinden yüklemek suretiyle deneye tabi tutulmuştur. Yükleme hızı 1,5 MPa/sn hızda olmak üzere sabit şekilde, numune yenilinceye kadar yük uygulanmıştır (Şekil 6). Eşitlik 2 yardımıyla her bir numunenin basınç dayanımı değerleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak belirlenmiştir [21]. Deney sonuçları grafiksel olarak Şekil 5'de verilmektedir.

$$R_c = \frac{f_c}{1600} \quad (2)$$

R_c : Basınç dayanımı (N/mm²) f_c : Numuneye uygulanan yük (N)
1600 : Plakaların veya yardımcı plakaların (40mm x 40mm) alanı (mm²)



Şekil 5. Basınç dayanımı deney sonuçlarının grafiksel gösterimi



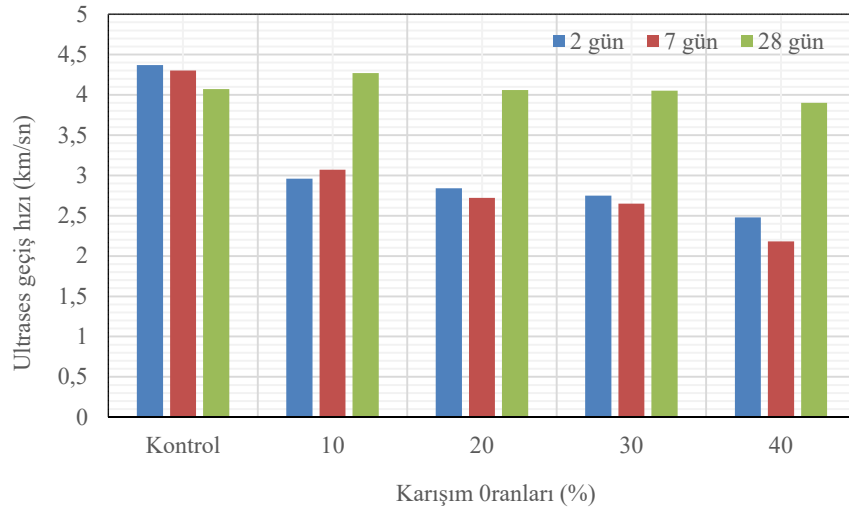
Şekil 6. Basınç dayanımı deneyi düzeneği ve basınç deneyi başlığı

4.3. Ultrases geçiş süresinin belirlenmesi

Belli oranlarda çimentoya ikame olarak kullanılan uçucu kül ve tuf karışımının karışım oranlarına ve kür sürelerine bağlı olarak Ultrases Geçiş Hızı değerleri hesaplanmıştır. Deneyler de Proceg marka Pundit Lab Ultrases Hız cihazı kullanılmıştır (Şekil 7). Deney sonuçları grafiksel olarak Şekil 8’de verilmektedir. Yapılan bu çalışma da, puzolan katkıli harçlarda kür süresinin artmasıyla ultrases geçiş hızının arttığı, puzolan oranının artmasıyla da ultrases geçiş hızının az da olsa düştüğü görülmüştür.



Şekil 7. Numunelerin ultrases geçiş hız değerlerinin belirlenmesi



Şekil 8. Ultrases geçiş hızı deney sonuçlarının grafiksel gösterimi

5. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada, uçucu kül ve volkanik tufün aynı oranlarda karıştırılıp harç içerisinde çimentoya

ikame edilerek, harçlarda çimento yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; uçucu külün kimyasal analiz sonucunda $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ değeri %70'den büyük (%83) ve CaO değerinin de $< \%10$ (%1,80) gibi bir değere sahip olduğu için ASTM C618'e göre F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül kategorisine, TS EN 197-1'e göre yapılan sınıflandırmada ise reaktif kireç miktarının $< \%10$ olması nedeniyle V (silisli uçucu kül) grubuna girdiği, dolayısıyla bu oranlarda uçucu külün puzolanik olarak istenilen özellikte olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmalarda kullanılan volkanik tüfün CaO miktarının kütlece %3'den az (%1,80), MgO miktarının ise kütlece %4,5'ten fazla olmadığı (%2,70) belirlenmiştir.

Bu çalışmada; şahit numunelerin deney sonuçları, UK + T katkılı numunelerin deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, UK + T katkılı çimento harç örneklerinin dayanım kazanma hızlarının, portland çimentoya göre daha yavaş olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin, deney süresinin 28 günle sınırlandırılmış olması ve puzolanın henüz tamamen hidrate olamamasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla deney sonuçlarına bu doğrultuda bakıldığında, artan kür sürelerine bağlı olarak dayanım değerlerinin arttığı görülmektedir. Çalışmaların daha uzun kür sürelerinde de yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, bu çalışma mevcut sonuçlar doğrultusunda değerlendirildiğinde puzolan oranının %10 olduğunda çimento harçlarının TS EN 197-1'de en düşük dayanım olan 32,5 MPa değerinin (34,14 MPa) üzerinde sağlandığı görülmektedir. Bu durumda özellikle yüksek dayanım gösteren çimentolara puzolan katılmasıyla, ilk aşamada daha düşük dayanımlı bir standart çimento elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak uzun sürede bu yöntemle puzolanların özelliklerinden dolayı dayanım değerlerinin artacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak; uçucu kül atık olarak çevreyi tehdit eden bir malzeme olduğundan en başta inşaat sektörü olmak üzere daha birçok sektörde de değerlendirilmesi ile hem önemli oranda katma değer sağlanacak hem de çevreye olan olumsuz etkisi azaltılmış olacaktır. Ayrıca ülkemizde geniş alanlarda bulunan volkanik tüf gibi doğal puzolan malzemelerinin de değerlendirilmesiyle daha düşük maliyetli çimentolar elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Kaplan H, Binici H. Tras ve Traslı Çimentolar, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Pamukkale Üniversitesi, 1995, Cilt 1, Sayı 2-3, sy: 121
- [2] Aruntaş H. Y. Diatomitlerin Çimentolu Sistemlerde Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1996, 1-55
- [3] Baltacı F. İnşaatlarda Traslı Çimentonun Kullanılabilirliği., DSİ, TAKK yayın, 1989, 55-57.
- [4] Erdoğan, T. Y. Beton, Metu Press, 1. Baskı, 2007
- [5] Marthong C, Agrawal T.P. Effect of Fly Ash Additive on Concrete Properties, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) Vol. 2, Issue 4, 2012, pp.1986-1991
- [6] Ünal O, Güçlüer K, Öz V. Yatağan Uçucu Külünün Yapısal Alanda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, AKÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15 (2015) 025601 (1-7)
- [7] Shannag, M.J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. Cement & Concrete Composites. 2000, 22: 399-406.
- [8] Pan S, Tseng D, Lee C.C and Lee C. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties, Cem. Concr. Res., 33, 1749-1754, 2003.
- [9] Sabir B, Wild S, Bai J. Metacaolin and calcined clays as pozzolan for concrete: a review, Cem. & Concr. Comp., 23, 2001, 441-454.

- [10] Türkmenoğlu A.G. ve Tankut, A. Use of tuffs from central Turkey as admixture in pozzolanic cements Assessment of their petrographical properties. *Cement and Concrete Research*. 2002, 32: 629–637.
- [11] Aruntaş H.Y. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 21, No:1, 193-203, 2006
- [12] Neville A.M. *Properties of Concrete*, Longman Scientific & Technical, New York, 1981.
- [13] Erdoğan T.Y. Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı-Uçucu kül ve Yüksek Fırın curufu, *End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp.*, Ankara, 1-8, 1993.
- [14] Ferreira, C, Ribeiro, A., Ottosen, L., Possible Applications for Municipal Solid Waste Fly Ash, *Journal of Hazardous Materials*, Cilt 96, No 2-3, 201-216, 2003.
- [15] Camacho R.E.R, Afif R.U. Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability”, *Cement and Concrete Research*. Elsevier. 32: 1851-1858, 2002.
- [16] ASTM C 618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, *Annual Book of ASTM Standard*, 2000, No. 04.02
- [17] TS EN 197-1. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bilesim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, 2002.
- [18] Yetgin Ş ve Çavdar A. Doğal Puzolan Katkı Oranının Çimentonun Dayanım, İşlenebilirlik, Katılma ve Hacim Genleşmesi Özelliklerine Etkisi, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der. (4)*, 687-692, 2005
- [19] Sarıbyık M. Beton Katkı Maddeleri Sakarya Üniversitesi, Müh. Mim. Fak.
- [20] TS EN 196-1. Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım, 2002.
- [21] Ünsal A, Şen H. Beton ve beton malzemeleri laboratuvar deneyleri, T.C. Ulaştırma Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Bşk. 2008, sy: 236.
- [22] Türker P, Erdoğan B, Katnaş F, Yeğınobal, A. Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, 2009