

Elazığ Ferrokrom Cürufunun Alkali Aktive Edilmiş Harç Üretiminde Kullanım Potansiyelinin Araştırılması

Oğuz Mahmut^a, Mehmet Emiroğlu^b

^a, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce/Türkiye

^b, Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye

oguz-mahmut@hotmail.com, mehmetemiroglu@duzce.edu.tr

(Geliş/Received:09.02.2016; Kabul/Accepted:16.02.2016)

Özet

Bu çalışmada, çimento inceliğinde öğütülmüş Elazığ ferrokrom cürufunun NaOH - Na₂SiO₃ kullanılarak 40, 65 ve 90°C aktivasyon sıcaklığında alkali aktive edilmiş harç üretim potansiyelinin araştırılması amaçlanmıştır. Kullanılan alkali aktivatörler 6, 9 ve 12 mol olacak şekilde kullanılmış olup aktivasyon sıcaklıkları ise 1, 2 ve 4 gün süreyle uygulanmıştır. Üretilen harçlar üzerinde; piriz başlangıç ve sona erme süreleri ile kıvam deneyleri yapılmıştır. sertleşmiş harç numunelerinde ise her bir aktivasyon sıcaklığında ve etüvde kalma süresi sonunda; birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, çimento kullanmaksızın bağlayıcı olarak Elazığ ferrokrom cürufunun kullanıldığı 15 MPa dayanım değerinin üzerinde alkali aktive edilmiş harç üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar sözcükler: Elazığ ferrokrom cürufu, Alkali aktive edilmiş harç, NaOH, Na₂SiO₃

Investigation of Usage Potentials for Elazığ Ferrochrome Slag with Alkaline Activated Production Mortar

Abstract

In this study, the alkali activated mortar production potential of Elazığ ferrochrome slag pulverized as cement granules with using NaOH - Na₂SiO₃ has been investigated for the at the activation temperatures of 40, 65 and 90°C. Alkali activators have been selected as 6, 9 and 12 mols and activation temperatures have been implemented through 1, 2 and 4 days. On the produced mortar, the consistency test initial and setting times has been performed on the paste specimens. In the hardened mortar samples after each activation temperature and residence time in the drying oven; unit weight, ultrasonic pulse velocity, capillary water suction and compressive strength tests have been performed. Consequently, without using the cement, alkali activated mortar with 15 MPa above the strength value using Elazığ ferrochrome slag as binder is concluded to be produced.

Keywords: Elazığ ferrochrome slag , Alkali activated mortar, NaOH, Na₂SiO₃

1. Giriş

Geopolimerler bir inorganik polimer karışım elde etmek amacıyla alüminosilikat içeren malzemelerin alkaliler ile reaksiyonunun sonucunda ortaya çıkan ürünlerdir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklar düşük maliyetleri ve kolay elde edilebilirlikleri sayesinde alüminosilikat kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Diğer sanayi atıklarının da kullanımı sonucunda geopolimer bağlayıcılar normal Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında gömülü CO₂ miktarını %80 azaltabilecektir [11]. (Castel ve Foster 2014). Geopolimerlerin sıfır çimento yaklaşımı çevreyle dost bir bağlayıcı olması birçok araştırmacıyı beton içerisinde agrega bağlayıcı malzeme olarak değerlendirilmesine sevk etmiştir [13]. (Embong ve diğ. 2016).

1982 yılında Davidovits tarafından Fransa’da, alkalilerin kaolinit, kireç taşı ve dolomit ile karıştırılması sonucunda elde edilen ve “Geopolymer”, “Pyrament”, “Geopolycem”, “Geopolymite” gibi ticari isimlere sahip olan geopolimerler üretilmiştir [30]. (Shi ve diğ. 2006).

Geopolimerler, hızlı basınç dayanımı gelişimi, asit ve yanmaya karşı direnci, hızlı priz alma, donma-çözölmeye karşı direncinin yeterli olması gibi birçok faydalı özelliğe sahiptirler [23]. (Luukkonen ve diğ. 2016).

Mekanik dayanım değerlerine çok hızlı ulaşması nedeniyle inşaat uygulamalarında karşılaşılabilecek aksaklıkları azaltma potansiyeli bulunan alkali aktive edilmiş harçlar üzerinde uzun yıllardır çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [18]. (İlkentapar 2013).

Elazığ ferrokrom cürufu; Elazığ yöresinde bulunan ferrokrom işletmesinde demir-çelik üretimi esnasında ortaya çıkan atık bir maddedir. Bu cüruf, madenden gelen metal malzeme içeren kayaç ve büyük kaya moloz agregaların yüksek fırınlarda 1500–1700 °C sıcaklıkta eritilerek cevherin ve cürufun ayrıştırılması şeklinde olmaktadır [41]. (Yazıcıoğlu ve diğ. 2005).

Elazığ yöresinde üretimi gerçekleştirilen bu atık malzeme devlet tarafından işletildiği zamandan kalan cüruflar ile birlikte mevcut ferrokrom üretim sürecinden çıkan cüruflar fabrika sahası içerisinde düzenli depolanmaktadır. Bu işletme, uzun vadede mevcut fazla cüruf stoklarının tahmini tüketim

aralığını 2015-2020 olarak planlamaktadır [8]. (Anonim 2012). İşletmenin faaliyette olduğu yıl itibarı ile yaklaşık 700 bin ton granüle yüksek fırın cürufu atıl durumda bulundurmaktadır ve her yıl bu değere ek olarak 100 bin ton yüksek fırın cürufu eklenmektedir. Bu nedenle Elazığ Ferrokrom cürufunun çimento üretiminde hammadde olarak kullanımı veya geopolimer beton ya da harç üretiminde değerlendirilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan katkılar sağlayacaktır. Elazığ ferrokrom cürufunun geri kazanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmış olup genel olarak araştırmacılar bu cürufun çimento hammaddesi olarak kullanımı ile beton ya da asfalt karışımlarında agrega olarak değerlendirilmesi üzerine yoğunlaşmışlardır.

Yazıcıoğlu vd. (2002), Elazığ ferrokrom cürufu ile üretilmiş betonlarda karbonatlaşma etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, deney numuneleri %55 bağıl nemde karbonatlaşmaya maruz bırakılarak numunelerin karbonatlaşma derinliği, basınç dayanımları ve su emme miktarları belirlenmiştir. Sonuç olarak, %3’e kadar Elazığ ferrokrom cürufunun kullanılması ile basınç dayanımında artış gözlenmiş olup, %5 cüruf katkısı ardından dayanımda %3’lük orana göre düşüş meydana gelmiş ancak referans ile hemen hemen aynı seviyede basınç dayanımı değerleri yakalanmıştır. Numunelerde cüruf içeriğindeki artışa bağlı olarak ise basınç dayanımı değerleri azalmıştır. Numunelerin cüruf miktarının artması ile karbonatlaşma derinliği de artmıştır.

Yazıcıoğlu vd. (2005), Elazığ ferrokrom işletmesinden temin edilen cürufunun betonun basınç dayanımı ve çarpma enerjisi üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, çimento inceliğinde öğütülen cüruf, beton karışımına Portland çimentosu (CEM I 32,5) ile ağırlıkça % 1, % 3, % 5, % 7 ve % 10 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışmada 28 günlük kür işlemi ardından, basınç dayanımı ve çarpma enerjilerindeki değişim incelenmiştir. Çalışmada maksimum agrega tane çapı arttıkça betonun basınç dayanımında ve çarpma enerjisinde artış olduğu gözlenmiştir. Cüruf katkısı % 3 olan betonların mukavemeti kontrol betonundan yüksek ve % 5 katkılı betonlarda ise kontrol betonuna denk mukavemetler elde edilmiştir. Sonuç olarak, maliyeti azaltmak açısından cüruf katkısının % 5’e kadar çimento

katkı malzemesi olarak betonda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Canbaz (2007) sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum silikat kullanarak alkali aktive ettiği yüksek fırın cürufu harçları üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak karışımlarda yüksek fırın cürufu miktarındaki artışa bağlı olarak ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Ayrıca $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ ve $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ kombinasyonlu alkali aktivatör seçeneklerinin yüksek fırın cürufu kullanılarak elde edilecek alkali aktive edilmiş harçlar için en uygun aktivatör tipi olduğu tespit edilmiştir.

Perna ve Hanzlıcek (2016) kil-cüruf matrisli geopolimerlerin priz sürelerini araştırdığı çalışmalarında, 0-1 mm boyutlarında öğütülmüş fırın cürufu kullanılarak sulu potasyum silikat çözeltisi ile geopolimerizasyon sağlanmıştır. Sonuç olarak, yüksek fırın cürufunun geopolimer karışımlarının priz sürelerini hızlandırdığını, ayrıca yüksek oranda cüruf kullanımı ile de priz süresi değerlerinin azalması gösterdiğini bildirmişlerdir.

Erdoğan (2011), öğütülmüş ferrokrom cürufu kullanılarak geopolimer ürünleri elde etmişlerdir. Bu çalışmada, sodyum hidroksit (NaOH) ve sıvı halde sodyum silikat malzemelerini kullanarak Elazığ ferrokrom cürufu ile geopolimer üretimi yapılmıştır. Çalışmada 1100 °C sıcaklığa iki saat süreyle bırakılan numuneler de dahi bozulmaların olmadığı, en olumlu sonuçların yaklaşık 80-100 °C sıcaklıkta kür işleminde elde edildiği belirtilmiştir.

Karakoç vd. (2014), ferrokrom cürufu içeren geopolimer harçların ve pastaların mekanik özellikleri ile priz sürelerini tayin etmişlerdir. Çalışmada geopolimer oluşturmak için aktivatör madde olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır. Deney için 3 farklı silis modülü (0.50, 0.60, 0.70) ve 4 farklı Na_2O (%4, %7, %10 ve %12) konsantrasyonu kullanılarak hazırlanan numunelerin 7 ve 28 gün sonundaki basınç dayanımlarına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 7 günlük numuneler incelendiğinde en yüksek dayanım değeri 20,76 MPa değeri ile %12 sodyum oksit karışımında elde edilmiştir. 28 günlük numunelerde ise en yüksek dayanım değeri 13,82 MPa ile %7 sodyum oksit içeren seriden elde edilmiştir.

Vapur vd. (2013), Elazığ ferrokrom tesisi cürufularının agrega özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada ferrokrom cürufunun temel kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirledikten sonra cürufuların agrega özelliklerini belirlemek üzere araştırmacılar; Los Angeles aşınma deneyi, Schmidt çekici sertlik deneyi, nokta yük dayanımı deneyi, alkali agrega reaktivitesi, asitte çözünen sülfat, donma-çözünme deneylerini yapmışlardır. Çalışmada sonuç olarak Elazığ ferrokrom cürufularının agrega olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Erdoğan vd. (2014), Elazığ ferrokrom tesisinden temin edilen cüruf kullanılarak cürufun aşındırıcı özellikleri belirlenmeye çalışılmışlardır. Aşınma deney yöntemi olarak mikro-abrazyon yöntemi kullanılmıştır. Deneylerde cürufun aşındırma özelliklerinin değerlendirmesi amacıyla SiC ve Al_2O_3 tozları ile de numuneler mikro-aşınma testlerine tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler sonucunda oluşan aşınma izleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile krater çapları ise optik mikroskop ile ölçülmüş ve sonuç olarak cürufun aşındırma özelliğinin olduğu tespit edilmiştir.

Maraş (2013), cüruf çimento inceliğinde öğütülüp, alkali ile aktive edildikten sonra, bağlayıcı özelliğe sahip bir geopolimer malzeme oluşturulmasını amaçlamış ve geopolimer hamur numunelerinde priz süresi, hidrasyon ısı ve basınç dayanımı değerlerini incelemiştir. Çalışmada sonuç olarak farklı Na_2O içeriğine bağlı olarak priz süreleri 120 ve 870 dakika arasında değişim gösterdiği saptanmıştır. Araştırmacı 28 günlük maksimum basınç dayanımı Na_2O içeriği %7 ve silis modülü 0.70 olan numuneden elde etmiştir. En yüksek basınç dayanım değerini ise 35 MPa olarak tespit etmiştir. Çalışmada, geopolimer harç numunelerin su / bağlayıcı oranının artmasına paralel olarak basınç dayanımlarının azaldığını belirtilmiştir. Ayrıca numunelerin magnezyum sülfata karşı iyi direnç gösterdiği tespit etmiştir.

Kantarıcı (2013), Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımı Araştırılmıştır. Bu çalışmada araştırmacı, cürufu çimento inceliğinde öğütülmüş ve aktivatör olarak ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanmıştır. Üretilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları, fiziksel

özellikleri, yangın dayanımları ve mikro yapıları incelenmiştir. Araştırmacı çalışmada sonuç olarak, numunelerde 28 günlük basınç dayanımı değerinin yaklaşık 35 MPa olduğunu belirlemiştir. Yangın sonrası basınç dayanımlarında ise kontrol numunelerine göre basınç dayanımı değerlerinde artış olduğunu tespit etmiştir.

Karataş (2008), Elazığ ferrokrom tesisinden elde edilen cürufun betonda basınç ve eğilme dayanımı üzerine etkilerini incelemiş olup, hazırlanan beton karışımlarına çimento ağırlığının %3, %5, %7 ve %10'u şeklinde olmak üzere değişen oranlarda cüruf ikame etmiştir. Deney numunelerinin 3, 7 ve 28. kür günleri ardından basınç ve eğilme dayanımı değerlerini belirlemiştir. Araştırmacı bu çalışmada sonuç olarak % 3 cüruf katkılı betonların en yüksek basma ve eğilme dayanımına ulaştığını belirleyerek cürufun betonda çimento katkı maddesi olarak %5'e kadar kullanılabileceğini tespit etmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada alkali aktive edilmiş harç üretiminde, CEN standart kumu, su, Elazığ ferrokrom cürufu, alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır (Tablo 1). Kullanılan Na_2SiO_3 (sodyum silikat) sıvı fazda, NaOH (sodyum hidroksit) ise katı fazda temin edilmiştir. Elde edilen Na_2SiO_3 ve NaOH'ın özgül ağırlıkları sırasıyla 1.38 ve 2.1'dir. Karışımların hazırlanmasında dolgu malzemesi olarak kullanılan kum CEN standart kum olup Limak Trakya Çimento Sanayi AŞ'den temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan Elazığ ferrokrom işletmesinden elde edilmiş ve Los Angeles cihazı ile öğütülerek 0,212 mm'lik elekten elenmiştir.

Çalışmada geopolimer üretiminde 6, 9 ve 12 mol olacak şekilde alkali aktivatör kullanımı tercih edilmiştir. Karışımda %50 NaOH ve %50 Na_2SiO_3 kullanılarak istenilen molaritede hazırlanmış karışım suyuna Tablo 1'deki oranlardaki silis kumu ve Elazığ Ferrokrom cürufu eklenmiştir. Harcın homojen karıştırılması için otomatik karıştırma aleti

haznesine önce sulu karışımı takiben Elazığ ferrokrom cürufu ve son olarak silis kumu eklenip 30 saniye aralıklarla 2 aşamada karışım gerçekleştirmiştir. Elde edilen taze harç karışımı 5 x 5 x 5'lik küp kalıplara sarsma tablasında iki tabaka halinde yerleştirilmiştir. Beton numuneler 3 gün kalıpta bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmış ve 4 gün daha laboratuvar ortamında bekletilmesi sağlandıktan (toplamda 7 gün bekleme süresi) sonra 40, 65 ve 90 °C'lık sıcaklıklarda aktivasyona tabi tutulmuştur. 6, 9 ve 12 mol alkali aktivatör kullanılarak hazırlanmış numuneler üzerinde 40, 65 ve 90 °C derecelerde 1, 2 ve 4 günlük ısıtma işlem uygulanması ardından fiziksel ve mekanik deneylere geçilmiştir.

İnce öğütülmüş Elazığ ferrokrom cürufunun pasta fazında kıvam değerini tayin etmek amacıyla, [39]. TS EN 196-3'e uygun olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra belirlenen kıvam değeri için priz başlangıç ve priz sona erme süreleri de [39]. TS EN 196-3'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan alkali aktive edilmiş harç karışımları üzerinde ise sertleşmiş halde, birim ağırlık ultrases geçiş hızı, kapiler su emme ve basınç dayanımı deneyleri sırasıyla [35]. TS EN 3529, [34]. TS EN 12504-4, [36]. TS EN 3526, [38]. TS EN 196-1 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kıvam, Priz Başlangıç ve Priz Sona Erme Deney Sonuçları

İnce öğütülmüş Elazığ Ferrokrom cürufu harç fazında yapılan kıvam deneyi sonucunda 6, 9 ve 12 mol alkali aktivatör kullanımı ile numunelerin yayılma çaplarının sırasıyla 157, 154 ve 151 mm değerlerini aldığı gözlenmiştir. Molaritenin artmasıyla yayılma çapı değerlerinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Hazırlanan harç üzerinde yapılan priz başlangıç ve priz sona erme süresi deney sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Karışım oranları

Malzemeler	Ağırlık (g)		
	6mol	9mol	12 mol
YFC	400	400	400
Kum	1350	1350	1350
Saf Su	120	120	120
NaOH	14.2	21.6	28.8
Na ₂ SiO ₃	43.92	65.88	87.84

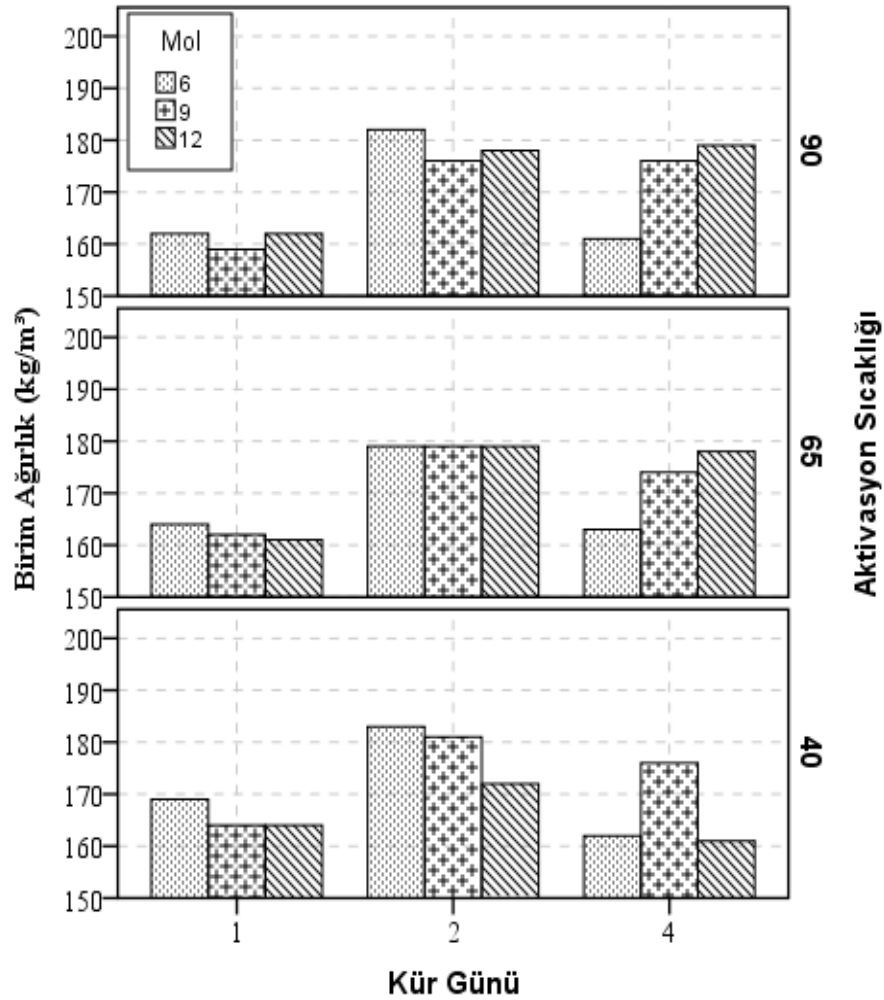
Tablo 2. Piriz başlama ve sona erme süresi deney sonuçları

MOLARİTE (mol)	Piriz başlangıç süresi (dk)	Piriz sona erme süresi (dk)
6 Mol	70-135	510-600
9 Mol	60-120	480-600
12 Mol	50-100	450-550

3.2. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Elazığ Ferrokrom cürufu kullanılarak üretilmiş alkali aktive edilmiş harçlara ait birim ağırlık deney sonuçları Şekil 1’de verilmiştir. Bir gün süresince aktivasyon sıcaklığına maruz kalmış numuneler incelendiğinde, aktivasyon sıcaklığındaki artışa bağlı olarak birim ağırlık değerleri azalmıştır. Bu durumun numunelerin bünyesindeki suyu kaybetmesinden kaynaklanmış olacağı düşünülmektedir. Yine benzer şekilde 6 ve 9 molariteye sahip 2 gün süresinde aktivasyon sıcaklığına maruz kalmış numunelerin birim ağırlık değerleri sıcaklıktaki artışa bağlı olarak azaldığı Şekil 1’den görülmektedir.

4 gün aktivasyon sıcaklığı ardından 40, 65 ve 90 °C aktivasyon sıcaklığına maruz kalmış numunelerin birim ağırlık değerleri incelendiğinde, kullanılan alkali aktivatörün mol değerlerindeki artışa bağlı olarak birim ağırlık değerleri de artış göstermiştir. 6 mol alkali aktivatör kullanılmış numunelerde en yüksek birim ağırlık değeri 1.63 g/cm³ ile 65 °C’de etüvlenmiş numunede elde edilirken 9 ve 12 mollük numunelerde en yüksek birim ağırlık değerleri sırasıyla 1,76 ve 1,80 değerleri ile 40 °C’de etüvlenen numunede elde edilmiştir.



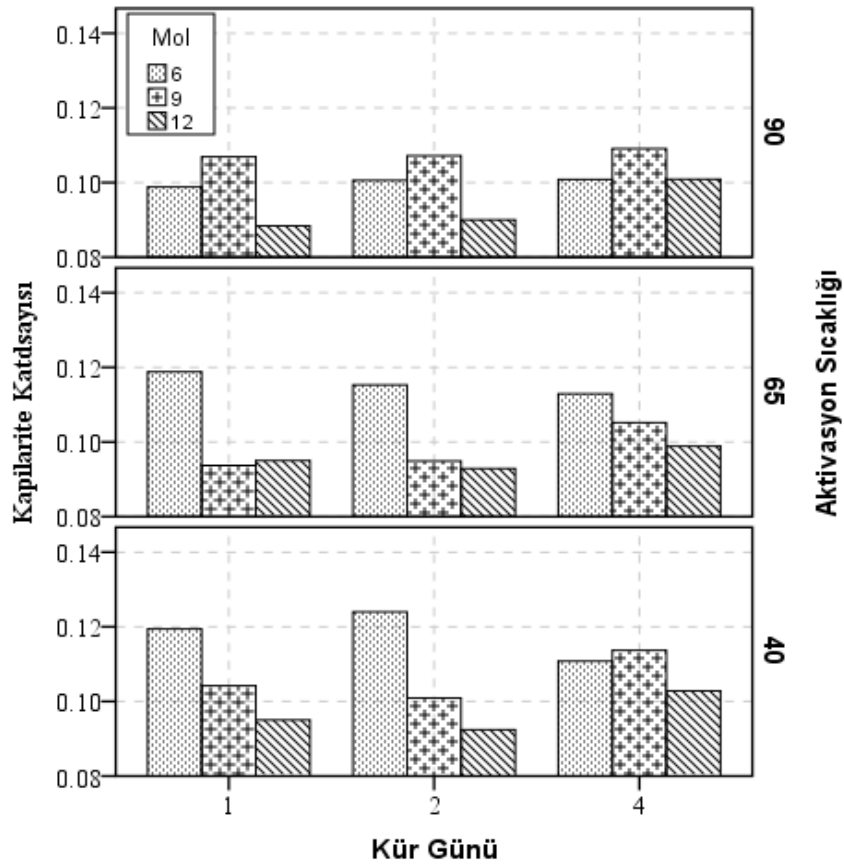
Şekil 1. Birim ağırlık deney sonuçları

3.3. Kapiler Su Emme Deney Sonuçları

Elde edilen alaki aktive edilmiş harçlara ait kapilarite katsayısı deney sonuçları Şekil 2’de verilmiştir. Bir gün süresince sıcaklık ile aktive edilmiş numuneler incelendiğinde, sıcaklıktaki artışa bağlı olarak kapilarite katsayısı değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Alkali aktivatör karışımının mol değerindeki artışa bağlı olarak da numunelerin kapilarite katsayısı değerleri azalma göstermiştir. En yüksek kapilarite katsayısı değerleri 6 mol

molariteye sahip numunelerinden elde edilirken en düşük kapilarite katsayısı değerleri 12 mol molariteye sahip numunelerden elde edilmiştir.

Benzer şekilde 2 gün süresince etüvde sıcaklık uygulanan numunelerin kapilarite değerleri sıcaklık ve mol değerlerindeki artışa bağlı olarak azalma gözlenmiştir.



Şekil 2. Kapilarite katsayısı deney sonuçları

Benzer şekilde, en yüksek kapilarite katsayısı değerleri 6 mol molariteye sahip numunelerinden elde edilirken en düşük kapilarite katsayısı değerleri 12 molluk numunelerden elde edilmiştir. 4 gün sıcaklığa maruz kalmış numune için kapilarite deney sonuçları incelendiğinde, 1 ve 2 günlük kür sürelerinde elde edilen değerlere göre daha düşük kapilarite değerleri elde edilirken, mol ve sıcaklık değişimine göre deney sonuçlarının değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Mol değerindeki artışa göre kapilarite katsayısı değerinde meydana gelen azalmanın 65°C’de etüvlenen numunelerde daha net gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu numuneler incelendiğinde, 6 mol değeri referans alındığında, mol değerinin 9 ve 12’ye çıkması durumunda numunelerin kapilarite katsayısı değerleri sırasıyla %6.82 ve %11.24 oranında azalma göstermiştir.

3.4. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

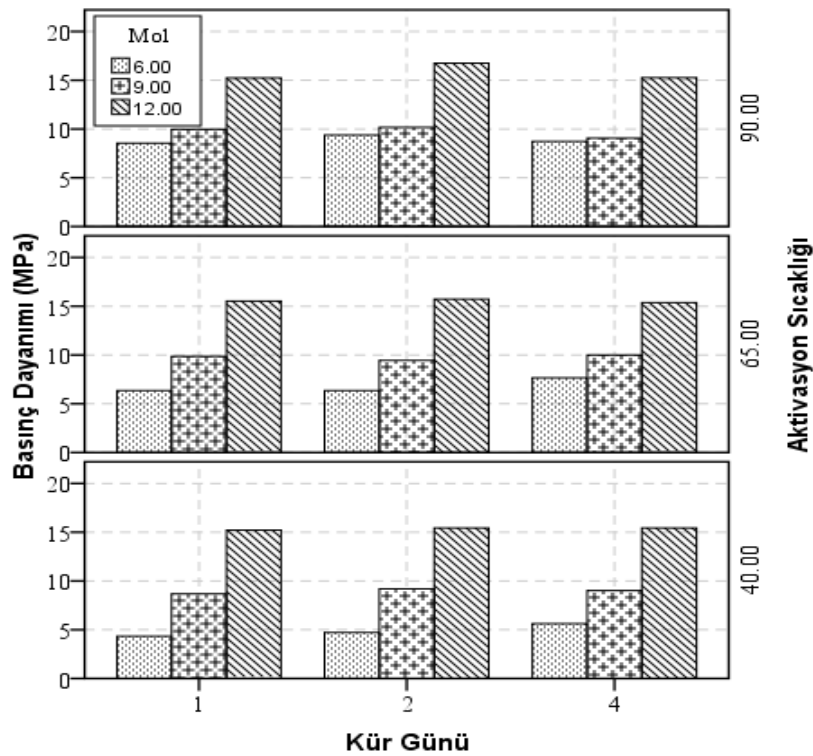
Ultrases geçiş hızı deney sonuçları Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’deki sonuçlar değerlendirildiğinde mol değerindeki artışa bağlı olarak ultrases geçiş hızı değerleri azalma göstermiştir. Bu durum mol değerindeki artışın numunelerin boşluk oranlarında azalmaya neden olduğu şeklinde yorumlanabilir. En yüksek ultrases geçiş hızı değerine 90°C de ve 12 molaritedeki numunelerde rastlanmıştır (2,94 km/sn). En düşük ultrases geçiş hızı değerine ise 65°C ve 12 molaritedeki numunesinde rastlanmıştır (1,78 km/sn).

3.5. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Şekil 3’de kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molariteye göre Elazığ Ferrokrom cürufu ile üretilmiş alkali aktive edilmiş harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri görülmektedir.

Tablo 3. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları

Ultrases Geçiş Hızı Değerleri (km/s)				
°C	Gün	6 Mol	9 Mol	12 Mol
40°C	1.	2.52	1.91	1.85
	2.	2.34	2.08	2.23
	4.	2.47	2.31	2.84
65°C	1.	2.52	2.50	1.78
	2.	2.00	2.50	2.47
	4.	2.25	2.51	2.41
90°C	1.	2.21	2.31	2.94
	2.	2.46	2.21	1.93
	4.	2.14	2.06	2.11

**Şekil 3.** Basınç dayanımı değerlerinin kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molariteye göre değişimi.

Genel olarak her kür sıcaklığında molarite değerlerindeki artışa bağlı olarak numunelerin basınç dayanımları artış göstermiştir. 6 ve 9 molluk numunelerin basınç dayanımları kür gününe bağlı olarak artış eğilimi göstermektedir. 6 molluk karışımlarda sıcaklığın artması ile basınç dayanımı değerleri artış göstermiştir. Ayrıca basınç dayanımındaki değişimin 12 molluk numunelerde kısıtlı kaldığı ve sıcaklık ile kür günündeki artışın numunelerin basınç dayanımı değerlerini daha az etkilediği gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı

değerine 90°C de ve 12 molaritedeki 2 gün süresince kürlenmiş numunelerde ulaşılmıştır (16,76 MPa). En düşük basınç dayanımı değeri ise 90°C de ve 6 molaritedeki 4 günlük geopolimer numunesinden elde edilmiştir (3,72 MPa). Basınç dayanımı ile, kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molarite arasındaki ilişkiyi modellemek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Çoklu regresyon modelinde Eşitlik 1'deki denklem kullanılmıştır.

$$BD = a + b \times AS + c \times KG + d \times Mol \quad (1)$$

Burada; BD, basınç dayanımı (MPa), KG, kür günü, Mol, molarite, AS, Aktivasyon sıcaklığı (°C) ve a, b, c, d ise model sabitleridir.

Çoklu doğrusal regresyon analizi model sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Çoklu doğrusal regresyon analizi model özeti

Regresyon İstatistikleri					
Pearson Korelasyon Katsayısı (R)	0.950				
Regresyon Katsayısı (R²)	0.903				
Düzeltilmiş R²	0.899				
Tahminin Standart Hatası	1.22003				
Varyans Analizi					
Varyansın Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Testi	Anlamlılık Düzeyi
Regresyon	3	1062.922	354.307	238.035	0.000
Rezidüel	77	114.612	1.488		
Toplam	80	1177.534			
Regresyon Analizi					
Kaynak	Katsayılar	Standart Hata	T İstatistiği	Anlamlılık Düzeyi	
a	-4.817	0.719	-6.699	0.000	
b	0.034	0.007	5.184	0.000	
c	0.068	0.109	0.623	0.535	
d	1.450	0.055	26.208	0.000	

Regresyon modeli ardından tahmin edilen basınç dayanımları ile deneysel basınç dayanımı deney sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4’de verilmiştir. Sonuç olarak çoklu doğrusal regresyon analizi doğrultusunda, Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak elde edilen geopolimer harçların basınç dayanımlarının kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molarite değerleri ile yüksek derecede ilişkili olduğu ve elde edilen regresyon modelinin yüksek korelasyona sahip olduğu (R=0.950) tespit edilmiştir.

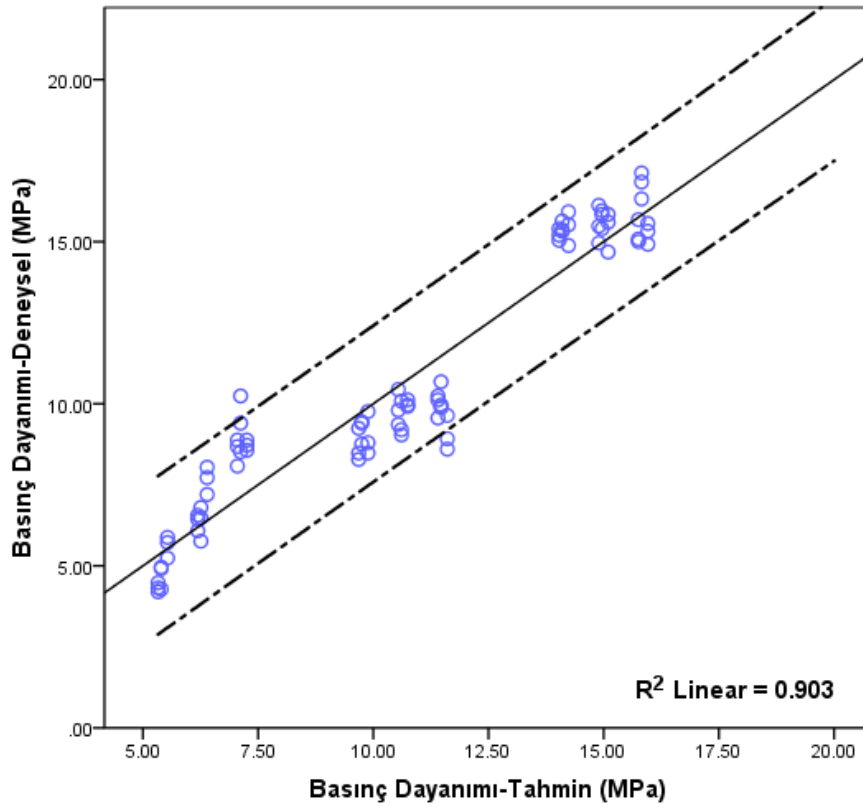
4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında yapılan deney ve analizler sonucunda elde edilen veriler genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Na₂SiO₃ (sodyum silikat- sıvı halde) ve NaOH’in (sodyum hidroksit- katı halde) belirtilen molar değerlerinde kullanılması

sonucu tepkime oluşturup bağlayıcılık kazanarak geopolimer oluşumunun sağlandığı tespit edilmiştir.

- Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak elde edilen alkali aktive edilmiş pasta karışımlarda aktivatör malzemelerinin mol değerlerinin artması ile yayılma çapı değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir.
- Yine pasta karışımlarında molarite miktarlarındaki artışa bağlı olarak priz başlangıç ve priz sona erme süreleri azalmıştır.
- Alkali aktive edilmiş pasta karışımların yoğunluklarının 1800 kg/m³ değerinden düşük olduğu gözlenmiştir.
- Karışımların bir günlük birim ağırlık değerlerinin molarite ve sıcaklık değerlerindeki artışa bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. Deneysel ve tahmini basınç dayanımları arasındaki ilişki

- Tüm kür günlerinde en düşük kapilarite değerleri 12 mol aktivatör kullanılan numunelerden elde edilmiştir.
- Ultrases geçiş hızı değerleri sıcaklık ve molar değerlerinin artmasına bağlı olarak artış göstermiştir.
- Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak, çimento kullanmaksızın 15 MPa'nın üzerinde alkali aktive edilmiş harç karışımlarının elde edildiği gözlenmiştir.
- Genel olarak molaritenin artması ile geopolimer numunelerin basınç dayanımları artış göstermiştir. En yüksek ve en düşük basınç dayanımı değerleri sırasıyla en yüksek değere 90°C de ve 12 molaritedeki 2 gün numunelerinde, en düşük değere ise 90°C de 6 molaritedeki 4 günlük numunelerinden elde edilmiştir.
- Kür günü, aktivasyon sıcaklığı ve molarite değerleri kullanılarak geopolimer betonların basınç dayanımlarını tahmin etmek için kullanılan çoklu doğrusal regresyon analizi sonucunda basınç dayanımı değerlerinin yüksek korelasyon ile tahmin edilebildiği tespit edilmiştir.
- Sertleşmiş harç numunelerinin nemli veya sulu ortamlarda bekletildiğinde yüzeylerinde beyaz renkte kabarmış leke olduğu deneyimlenmiştir.
- Elazığ ferrokrom cürufunun kullanılacağı alkali aktive edilmiş harç karışımlarında uçucu kül ve silis dumanı gibi puzolanların birlikte kullanımının fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi araştırılabileceği düşünülmektedir.
- Silis kumu dışında dane çapı farklı olan agregaların kullanılması araştırmacılar tarafından çalışılabilecek konulardandır
- Numunelerin daha yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun sürelerde bekletilmesinin olumlu etki sağlayacağı düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

- [1]. Akman M.S., Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi, TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 426 - 2003/4 (32-33), (2003).
- [2]. Allahverdi A., Kani E.N., Yazdanipour M., Effects Of Blast-Furnace Slag On Natural

- Pozzolan-Based Geopolymer Cement. , *Ceramics-Silikaty*, 55(1):68–78 (2011).
- [3]. Alpaslan L., Atık Lastik Ve Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yüzey Özelliklerinin Çimento Harçlarının Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi*, (2012).
- [4]. Anonim, <https://M.kutluhanErgin.wordpress.com/2014/11/21/geopolimer-beton/>, (Erişim Tarihi: 15 mayıs 2015), (2014a).
- [5]. Anonim, http://kisi.deu.edu.tr/burak.felekoglu/08_geopolimer.pdf, (Erişim Tarihi: 13 mart 2015), 4-5 (2014b).
- [6]. Anonim, <https://plus.google.com/9zLgq8oXBKZ#ASKimyaSanayi/posts/9zLgq8oXBKZ>, (Erişim Tarihi: 28 mart 2015), (2014c).
- [7]. Anonim, https://tr.wikipedia.org/wiki/Sodyum_hidroksit, (Erişim Tarihi: 28 mart 2015), (2014d).
- [8]. Anonim, http://tr.etikrom.com/uploads/pdf/etikrom_cevre_durum_raporu_2012.pdf, *etikrom cevre durum raporu*, (Erişim Tarihi: 12 nisan 2015), (2012).
- [9]. Anonim, http://www.limak_bati_cimento.com, (Erişim Tarihi: 8 nisan 2015), (2015).
- [10]. Binici H., Eken M., Aksoğan O., Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik Ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi-Toros Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*, (2012).
- [11]. Castel A., Foster S. J., Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement, *Materials and Design* 56 833–841, (2014).
- [12]. Canbaz M., Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçların Özellikleri, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, DOKTORA TEZİ*, Tez No: 199133, Subat (2007).
- [13]. Embong R., Kusbiantoro A., Shafiq N., Nuruddin M. F., Strength and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete containing high-calcium and water-absorptive aggregate, *Journal of Cleaner Production*, 112 816-822, (2016).
- [14]. Erdoğan A., Gök M.S., Kocabaş F., Ferrokrom Cürufunun Mikro Ölçekli Abrasyon Testi İle Aşındırma Özelliklerinin Araştırılması, *Mühendislik ve Teknolojik Bilimler Dergisi*, (2014).
- [15]. Erdoğan T.S., Erdoğan T.Y., Kimyasal Katkı Maddeleri ve Tarihi Geçmişleri, *II Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 23-34. (2007).
- [16]. Erdoğan S.T., Öğütülmüş Ferrokrom Cürufu Kullanılarak Jeopolimer Harç ve Hamur Yapımı. 8. *Ulusal Beton Kongresi proceedings*, İzmir, Turkey, pp.631-640. (2011).
- [17]. Erdoğan T.Y., Beton, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ.*, Ankara, (2010).
- [18]. İlkentapar S., Kimyasal Katkı İçeren Alkali İle Active Edilmiş Cüruf Harçlarının Farklı Kür Koşulları Altındaki Özellikleri, *Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi*, Temmuz (2013).
- [19]. Koluçolak M., Yüksek Fırın Cürufu Ve Bazaltik Pomza Katkılı Beton Boruların Tepe Yüğü Dayanımları Ve Durabilite Özellikleri, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, (2012).
- [20]. Karakoç M.B., Türkmen İ., Maraş M.M., Kantarcı F., Demirbag R., Toprak M.U., Ferro Krom Cürufu İçeren Geopolimer Harçların Ve Pastaların Mekanik Özellikleri İle Piriz Süreleri Taini, *İnönü üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya*, (2014).
- [21]. Kantarcı F., Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması, *İnönü Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Tez No:341550*, (2013).
- [22]. Karataş S., Beton Harcının Basma Ve Eğme Davranışlarına Ferro-Krom Cüruf Katkısının Etkisi, *Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Tez No:232098*, (2008).
- [23]. Luukkonen T., Sarkkinen M., Kemppainen K., Lassi J. R.U., Metakaolin geopolymer characterization and application for ammonium removal from model solutions and landfill leachate, *Applied Clay Science* 119 266–276, (2016).
- [24]. Lind B.B., Fallman A. M., Larsson L. B., “Environmental Impact of Ferrochrome Slag in RoadConstruction”, *Waste Management*, 21, 255-264 (2001).
- [25]. Mane S., Jadhav H.S., Investigation of Geopolymer Mortar and Concrete Under High Temperature, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 2, Issue 12, December, 384-390 (2012).
- [26]. Maraş M.M., Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması, *İnönü*

- Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi , Tez No:341546, Temmuz, (2013).*
- [27]. Özkan Ş., Kimyasal Etkilere Dayanıklı Çimento Üretimi Üzerine Bir Araştırma, *Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2009).*
- [28]. Öner M., Yüksek Fırın Curuflarının Çimento Üretiminde Kullanımında Öğütmeyle İlgili Parametrelerin Etkilerinin Belirlenmesi, *Hacettepe niversitesi, M.hendislik Fak. Maden M.hendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, (2001).*
- [29]. Perna I., Hanzlıcek T., The setting time of a clay-slag geopolymer matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method, *Journal of Cleaner Production* ,112 1150-1155 **(2016).**
- [30]. Shi C., Roy D., Krivenko P., Alkali-Activated Cements and Concretes, *CRC Press*, 392, ISBN 0203390679, 9780203390672, **(2006).**
- [31]. Toprak M.U., Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXII, Sayı:2, DOKTORA TEZİ, Tez No: 285352, Nisan (2011).*
- [32]. TS EN 1097-2, ASTM C 131. Los Angeles Aşındırma test cihazı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (Erişim Tarihi: 27 Temmuz 2015), **(2000).**
- [33]. TS EN 1008, Beton Karma Suyu Standardı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (Erişim Tarihi: 27 Temmuz 2015), **(2003).**
- [34]. TS EN 12504-4, Beton Deneyleri-Bölüm 4: Ultrases Geçiş Hızının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (Erişim Tarihi: 18 Temmuz 2015), **(2004).**
- [35]. TS EN 3526, Beton Agregalarında Özgül Ağırlık Ve Su Emme Oranı Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (Erişim Tarihi: 18 Temmuz 2015), **(2002).**
- [36]. TS EN 3529, (ASTM C 29), Beton Agregalarının Sıkışık ve gevşek birim ağırlık tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara **(1980).**
- [37]. TS EN-197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 3, 5, 8-10. **(2002).**
- [38]. TS EN-196-1, 1.Baskı, Çimento Deney Metotları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, **(2002).**
- [39]. TS EN-196-3 Çimento Deney Metodları-Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini, *Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Ankara.(2010).*
- [40]. Yang T., Yao X., Zhang Z., Geopolymer prepared with high-magnesium nickel slag: Characterization of properties and microstructure. *Construction and Building Materials* 59 188–194, **(2014).**
- [41]. Yazıcıoğlu S., Gönen T.ve Çobanoğlu Ö. C., Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betonun Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.* 17 (4), 681-685, **(2005).**
- [42]. Yazıcıoğlu S., Arıcı E., Gönen T., Elazığ Ferrokrom Curufunun Betondaki Karbonatlaşmaya Etkisi, *F.Ü.Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Elazığ , (2002).*
- [43]. Vapur H., Top S., Teymen A., Turkmenoğlu M., Elazığ Ferrokrom Tesisi Curuflarının Agregat Özelliklerinin Araştırılması, *Cukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), ss.77-88, Haziran **(2013).**