

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ



ALKALİ İLE AKTİFLEŞTİRİLEN UÇUCU KÜL GEOPOLİMER
HARCIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ISIL KÜR SÜRESİNİN ETKİSİ

Proje No: FBA-2014-5380
NORMAL ARAŞTIRMA PROJESİ

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Araştırmacı

Doç. Dr. Okan KARAHAN
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Araştırmacı

Arş. Gör. Serhan İLKENTAPAR
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Mayıs 2016

KAYSERİ

TEŐEKKÖR

Proje yÖrÖtÖcÖsÜ projeje finansal destekleri iÖin Erciyes Üniversitesi Bilimsel AraŐtırmalar birimine teŐekkÖr eder (Proje no: FBA-2014-5380)

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
TABLolar LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL VE METOT	5
2.1. Uçucu Kül.....	5
2.2. Standart Kum	5
2.3. Aktivatör	6
2.4. Su	6
2.5. Deneysel Program	6
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	8
3.1. Birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı	8
3.2. Kapiler su emme.....	10
3.3. Basınç Dayanımı.....	11
3.4. Eğilmede çekme dayanımı	14
3.5. Yarmada çekme dayanımı.....	15
3.6. Aşınma Dayanımı	17
4. SONUÇ.....	18
5. KAYNAKLAR.....	19

Tablolar Listesi

Tablo 2.1 Uçucu külün oksit bileşenleri (%).....	5
Tablo 2.2 Kullanılan kumun tane boyutu dağılımı ve standart sınırı.....	6
Tablo 2.3 NaOH'ın kimyasal içeriği	6
Tablo 2.4 Üç hücreli prizma (160x40x40 mm) kalıbı için gerekli malzeme miktarları (g).....	6
Tablo 3.1 Birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı deney sonuçları.....	9
Tablo 3.2 Kapiler su emme katsayıları.....	11
Tablo 3.3 Alkali ile aktifleştirilen uçucu kül harçların basınç dayanımları	13
Tablo 3.4 Alkali ile aktifleştirilen uçucu kül harçların eğilme dayanımları	15
Tablo 3.5 Alkali ile aktifleştirilen uçucu kül harçların yarıлма dayanımları	16
Tablo 3.6 Aşınma deneyi sonuçları.....	18

Şekiller Listesi

Şekil 3.1 İlave bekleme süresinin basınç dayanımı üzerine etkisi	13
Şekil 3.2 İlave bekleme kür süresinin eğilme dayanımı üzerine etkisi	15
Şekil 3.3 İlave bekleme kür süresinin yırılma dayanımı üzerine etkisi.....	17

ALKALİ İLE AKTİFLEŞTİRİLEN UÇUCU KÜL GEOPOLİMER HARCIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ISIL KÜR SÜRESİNİN ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada alkali ile aktifleştirilen uçucu kül geopolymer harcının mekanik ve transport özellikleri üzerine ısl kür süresi ve ısl kür süresinden sonraki extra kür süresinin etkisi araştırılmıştır. F tipi yerel bir uçucu kül, CEN referans kumu, sodyum hidroksit ve içilebilir su ile çimento içermeyen taze geopolymer harcı hazırlanmıştır. Ağırlıkça karışım oranları kum, çimento, su ve sodyum miktarı için sırasıyla 3, 1, 0.29 ve 0.1 olarak alınmıştır. Hazırlanan karışımların bir kısmı 4 saat, bir kısmı ise 1, 2, 3 ve 7 gün süre ile 75°C sıcaklıkta etüvde kür edilmiş ve deneylere tabii tutulmuştur. Bir kısım numune ise 4 saat, 1, 2, 3 ve 7 günlük ısl kür işleminden sonra laboratuvar ortamında 23±2°C sıcaklık ve 50±5% bağıl nemde 28 inci günde deneylere tabii tutuluncaya kadar bekletilmiştir. Daha sonra 28 inci günde, ısl kür ve ilave beklemeli birleşik küre tabii tutulan numuneler, daha önce yürütülen deneylere tabii tutulmuştur. Deneylerde ölçülen özellikler birim ağırlık, kapiler su emme, su emme kapasitesi, boşluk oranı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarıлма dayanımı ve aşınma direncidir. Hazırlanan F sınıfı uçucu kül geopolymer harçların dayanımlarının ısl kür süresinin artmasıyla oldukça fazla arttığı gözlemlenmiştir. ısl kür süresinden sonra bekletilen ilave süre içinde de anlamlı miktarda dayanımlarda artış olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda yüksek dayanımlı ve aşınmaya karşı dirençli alkali ile aktifleştirilen uçucu kül harcı üretilmiştir.

Anahtar Kelime: NaOH, Uçucu Kül, Geopolimer, ısl kür, İlave kür

INFLUENCE OF HEAT CURING DURATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALKALI ACTIVATED FLY ASH GEOPOLYMER

ABSTRACT

In the study, the influence of heat curing duration and rest period after heat curing duration on the mechanical and transport properties of alkali activated fly ash (AAFA) mortar were investigated. A local class F type fly ash, CEN reference sand; sodium hydroxide and potable water were used to prepare cementless fresh geopolymer mortar. Mixture ratios in mass basis were 3, 1, 0.29, and 0.1 for sand, fly ash, water and sodium hydroxide, respectively. Some samples prepared were cured at 75°C temperature for 4 hours, 1, 2, 3 and 7 days, then, they were tested after heat curing period. Additionally, some of the equivalent samples were kept in laboratory at 23±2°C temperature with 50±5% relative humidity, until 28 days after their heat curing period. Then, they were tested at 28 days for combined curing. The measured properties of AAFA ash mortar were unit weight, porosity, capillary water absorption, water absorption capacity, compressive, flexural tensile and splitting tensile strengths and abrasion resistance. It is concluded that the strengths of mortar were significantly increased with the increase in heat curing duration. A significant strength development was also observed after rest period. As a result of the study, high strength and abrasion resistant AAFA geopolymer mortar was produced.

Keywords: Sodium hydroxide, Fly ash, Geopolymer, Heat curing, Rest period

1. GİRİŞ

Çimento üretimi çevre dostu ve yeşil bir uygulama değildir, çimento üretimi esnasında oldukça fazla enerji kullanılır. Çimento üretimi esnasında sıcaklık 1500 dereceyi bulur. Ayrıca çimento üretiminde kullanılan kalkerli malzemelerin (kalsiyum karbonat isimli taşların) içinde bulunan karbondioksit gazı (CO₂) yüksek sıcaklık nedeniyle açığa çıkarak atmosfere karışır. Yüksek sıcaklığı elde etmek içinde fosil yakıtlar kullanıldığından, yanma esnasında da karbondioksit gazı atmosfere karışır. Bu nedenlerle çimento üretimi endüstrisi toplam %7-10 civarında karbon dioksit emisyonundan sorumlu tutulmaktadır [1,2].

Çevreci hareketlerinin baskısı, enerji tasarrufu ve çimento üretim maliyetiyle ilgili kaygılar nedeniyle; araştırmacılar yeni bağlayıcı veya çimentonun maliyetini ucuzlatmak amaçlı yeni yöntemler bulmaya yönlenmişlerdir. Çimentonun maliyetini azaltmanın yöntemlerinden birisi uygun olan endüstriyel atıkların çimento ile ikamesidir. Bu nedenle genellikle uçucu kül, silis dumanı, çeltik kabuğu külü veya öğütülmüş demir çelik cürufu çimento ile kısmi olarak ikame edilir [3].

Bazı araştırmacılar [3, 4, 5] beton içinde yüksek miktarda uçucu külü çimento ile ikame etme çalışmaları yürütmüştür. Çalışmalarının sonucunda uygun su miktarı ile birlikte oldukça yüksek oranda uçucu külü çimento ile ikame ederek karışımlar üretmişler. Elde ettikleri sonuçlardan, uçucu külün kısmi olarak çimento ile yüksek oranda ikamesinin mümkün olduğunu; betonun mekanik ve durabilite özelliklerinde bozulma olmadan yüksek oranda uçucu külün çimento ile ikame edilerek üretilbileceği bildirilmiştir.

Araştırmacının biri [3] çimento ile uçucu külü %70 oranında ikame etmiştir. Bir diğeri [4] daha ileri giderek çimento ile uçucu külü %80 oranında ikame etmiştir. Benzer şekilde bir başka araştırmacıda çimento ile uçucu külü %80 oranında ikame etmiş ve karışım suyuna fazladan kireç karıştırmıştır.

Bahsi geçen araştırmacıların [3, 4, 5] mümkün olduğunca fazla oranda uçucu külü çimento yerine kullanmaya çalışmakla, çimentoyu tamamen uçucu kül ile ikame etmeyi hedefledikleri

yorumu yapılabilir. Günümüzde, bu amacın ve hedefin uçucu küllerin pH değeri yüksek alkali ortamda aktive edilerek geopolimerik yapıştırıcı formu ile gerçekleştirilmiştir.

Geopolimerizasyon işlemi organik polimer reaksiyonlarına benzer kimyasal bir reaksiyon ve süreçtir, sonucunda yapıştırıcı özelliğine sahip alümina ve silis zincirleri oluşturur. Geopolimerik reaksiyon amorf yapıya sahip silis ve alüminler arasında yüksek pH değerine sahip alkali katalizör ortamında yer alır. Kaynak malzemenin amorf kompozisyonlarını sağlam yapıştırma özelliğine sahip katı bir bileşime dönüştüren bu reaksiyona genellikle alkali ile aktive etme adı da verilmektedir [6, 7, 8, 9].

Uçucu kül kömür ile çalışan elektrik üreten termik santrallerin bir atığıdır. Günümüzde uçucu kül puzolanik özelliğe sahip olmasından dolayı yan bir ürün olarak kabul görmektedir. Uçucu kül içeriğinde yüksek miktarda amorf yapıya sahip silis ve alümin içermektedir; bu nedenle geopolimer üretiminde kullanılacak çok uygun bir kaynak malzeme olarak göz önüne alınmaktadır [10].

Çalışmalar geopolimerik reaksiyonun oluşmasında alkali aktivasyon malzemelerinin molar derişimlerinin rolünün oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Yüksek pH değerine sahip kuvvetli alkali ortamı öncelikle uçucu külün amorf camı fazını ön reaksiyonları başlatmak için çözer, reaksiyonun sonunda sodyum, alümina ve silisten oluşan geopolimer zincirini oluşturur [11, 12, 13, 14].

Daha öncede belirtildiği gibi geopolimer reaksiyonu bir süreç ve zaman içinde yer alır, ayrıca normal sıcaklıklarda uçucu küle dayalı karışımların geopolimerizasyon reaksiyonlarının çok yavaş olduğu bilinmektedir. Bu nedenlerle, kür ortamının sıcaklığı ve kür süresinin zamanı geopolimerik reaksiyonun kinetiğini etkileme açısından önemli yer tutan baskın parametrelerdir [8, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19].

Aşağıda uçucu küle dayalı olarak üretilen geopolimerlerin mekanik özellikleri ve ısı kür süresi hakkında bir kaynak taraması yapılmış olup, kaynak taramasından çıkarılan özet sunulmuştur.

Olivia ve Nikraz [20] Taguchi yöntemini kullanarak uçucu kül tabanlı geopolimerin mekanik özelliklerini optimize etmek için karışım tasarımları yapmıştır. Çalışmalarının sonucu olarak, tasarımını yaptığı geopolimer karışımlarından en yüksek 60 MPa basınç dayanımı değerlerine ulaşabilmişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında NaOH ve cam suyu çözeltisini aktivatör olarak istihdam etmişlerdir. NaOH molar derişimi 14 olarak alınmış ve cam suyunun NaOH'a oranı ise 1.5-2.5 aralığında seçilmiştir. Hazırladıkları taze geopolimer numunelerini bir gün boyunca 75 C derecede etüvde kürelemişlerdir.

Ryu vd [21] uçucu külü alkali ile aktifleştirerek geopolimer betonu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Çalışmasında NaOH ve cam suyunu aktivatör olarak kullanmıştır. Hazırlanan taze geopolimer betonu karışımlarını 24 saat boyunca 60 C derecede küre tabii tutmuş olup, 24 saat sonunda numuneler kalıptan çıkarılmış ve 56 inci güne kadar laboratuvar ortamında tutulmuştur. Çalışma sonucunda en yüksek 45 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır.

Vora ve Dave [22] F sınıfı uçucu külü geopolymerik kaynak olarak kullanıp alkali ile aktifleştirerek, geopolimer betonun dayanımını araştırmıştır. Alkali aktivatör olarak ise NaOH ve cam suyu solüsyonu kombinasyonunu kullanmıştır. Çalışmasında elde ettiği en yüksek basınç dayanımı ise 40 MPa civarında olmuştur.

De Vargas [23] alkali ile aktifleştirilen uçucu kül ile elde edilen geopolimerin dayanımı üzerine çalışmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve sönmüş kireç kombinasyonunu istihdam etmiştir. Taze hazırlanan geopolimer numunelerini bir gün boyunca 80 C derecede ısı küre tabii tutmuştur, ısı küre sonrasında ise numuneleri 7, 28 ve 91 gün olmak üzere laboratuvar ortamında küre etmiştir. Bir karışım 7 günlük küre sonrasında ısı küre göre dayanım kaybetmiştir. Bir başka karışım ise 91 inci güne kadar sürekli dayanım kazanmıştır. Ancak, bir başka karışım ise dayanım uzun süre küre etmekle ne düşmüştür ne de artmıştır. Araştırmacı yaptığı laboratuvar çalışmasının sonucunda en yüksek 30 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır.

Skvara vd [24] kahverengi taş kömüründen elde edilen F tipi uçucu külü NaOH ile birlikte cam suyu solüsyonu ile aktifleştirmiştir. Üretilen uçucu kül geopolimer karışımlarını 12 saat boyunca 80 C derecede küre etmiş ve daha sonra 28 inci güne kadar laboratuvar

bekletmiştir. Çalışma sonucunda 40MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir. Araştırmacıların gözlemlerine göre dayanım gelişmesi dört yıl boyunca devam etmiş ve anlamlı ve önemli artış kaydedilmiştir.

Somna vd [10] tarafından geopolimer betonları için 25 MPa civarında basınç dayanımı bildirmiştir. Hatta alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer betonu için 10 MPa'dan daha düşük basınç dayanımı da Swanepoel and Strydom [7] tarafından raporlanmıştır.

Rownaik [25] kür sıcaklığının alkali ile aktifleştirilen metakaolin geopolimerinin katılmış özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. NaOH ve cam suyunu birlikte aktivatör olarak kullanmıştır. Hazırladığı karışımları 1, 2, 3 ve 4 saat boyunca farklı sıcaklıklarda ısıtma küre tabii tutmuştur. Isıtma küreden sonra ise 1, 3, 7 ve 28 inci güne kadar laboratuvar ortamında bekletmiş ve deneylere tabii tutmuştur. Isıtma kür süresi ile dayanımlarda artış olduğunu bildirmiştir. Araştırmacının raporuna göre ısıtma kür sıcaklık derecesi 50 dereceden fazla olduğunda numunelerin laboratuvar ortamında fazladan kür edilmelerinin dayanımları önemli ölçüde etkilemediği bildirilmiştir. Isıtma kür sıcaklığı 50 C derecenin altında olduğu durumda ise laboratuvar ortamında kür edilmenin süresinin dayanımları önemli ölçüde etkilediği bildirilmektedir. İlave, ısıtma kür süresi 4 saat olması durumunda laboratuvar ortamında fazladan bekletilme süresinin dayanımları oldukça fazla etkilediği bildirilmiştir.

Geopolimer karışımlar için ısıtma kür süresinin genelde 24 saat tutulduğu yayınlanan kaynaklarda görülmekte olup, 24 saatten fazla kür süresi uygulamasının az olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, ısıtma kür süresinden sonraki uygulanan kür süreleri için sistematik olarak yapılmış daha fazla çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenlerle bu proje çalışmasında ısıtma kür süresi 4 saat ten başlayıp sürekli olarak 7 güne kadar çıkmıştır. Isıtma kür uygulamasından sonra da ilave kür süresinin etkilerini araştırmakta çalışmanın diğer yanını oluşturmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Uçucu Kül

Kireç oranı düşük F sınıfı uçucu kül çalışmada istihdam edilmiş olup, istihdam edilen kül Adana sınırları içinde Yumurtalık Kasabası Su gözü köyünde kurulu olan termik elektrik santralini işleten ISKEN firmasından temin edilmiştir. ASTM C618 [26] standardına göre alümin, silis ve demir minerallerinin toplamı %70 ten fazla olup, CaO oranı ise %10 dan az olduğundan, mevcut uçucu kül F tipi uçucu kül sınıfına girmektedir. Bununla ilgili olarak külün kimyasal oksitleri ile sayısal değerler Tablo 2.1 de sunulmaktadır.

Külün özgül ağırlığı 2.39 olup, 45 mikron elek üzerindeki bakiyesi %12 dir. ASTM C618 [26] standardına göre elde edilen puzolanik aktivite indisi ise sırasıyla 28 ve 90 günler için %78.2 ve %93.8 olarak bulunmuştur.

Tablo 2.1 Uçucu külün oksit bileşenleri (%).

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	Serbest CaO	Cl ⁻	KK
Uçucu kül	61.81	19.54	7.01	1.77	0.31	2.43	0.07	0.04	2.20

2.2. Standart Kum

Harç karışımlarının hazırlanmasında kullanılan kum Rilem Cembureau Standardına uygun kum olup, aynı zamanda TS EN 196-1 [27] standardına da uyumludur. İlgili standarda [27] uygun olarak yürütülen elek analizi sonuçlarına göre mevcut kumun tane boyutu dağılımı elde edilmiştir. Bu elek analizi sonuçları ve standarda ait sınırlar Tablo 2.2 de sunulmakta olup, elek analizi sonuçlarının karışımlarda kullanılacak mevcut kumun tane boyutu dağılımının standarda uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 2.2 Kullanılan kumun tane boyutu dağılımı ve standart sınırı

Elek çapı (mm)	0.08	0.16	0.5	1.0	1.6	2.0
Elek üzerinde kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Standart Sınırı (%)	99 ± 1	87 ± 5	67 ± 5	33 ± 5	7 ± 5	0

2.3. Aktivatör

Deneysel çalışmada alkali aktivatör olarak NaOH kullanılmıştır. Temin edilen NaOH ın içeriği %97 saflığa sahiptir. Zülfikarlar Grup Akça Kimyasal firmasından temin edilmiş olup, kimyasal içeriği Tablo 2.3 te özetlenmiştir.

Tablo 2.3 NaOH'ın kimyasal içeriği

NaOH (%)	Na ₂ CO ₃ (%)	Cl (%)	Al (%)	Fe (%)	SO ₄ (%)
≥97	≤1	≤0.01	≤0.002	≤0.002	≤0.01

2.4. Su

Temiz ve içilebilir su şehre dağıtılan şehir şebeke suyundan alınarak alkali ile aktifleştirilen geopolimer karışımlarının içinde kullanılmıştır.

2.5. Deneysel Program

Çalışmada hazırlanan harçlar F sınıfı uçucu kül, standart kum, su ve sodyum hidroksit karışımı ile üretilmiştir. Ağırlıkça karışım oranları ise kum, uçucu kül, su ve NaOH için sırasıyla 3, 1, 0.29 ve 0.1 olarak seçilmiştir. Uzunluğu 160 mm, derinliği ve yüksekliği 40 mm olan 3 adet prizma numune hazırlamak için gerekli malzeme miktarı üç hücreli prizma kalıbı için Tablo 2. 4 te sunulmaktadır.

Tablo 2.4 Üç hücreli prizma (160x40x40 mm) kalıbı için gerekli malzeme miktarları (g)

Standart Kum	Uçucu Kül	NaOH	Su
1350	450	80	130

Tablo 2. 4 te verilen malzeme miktarları karıştırılarak taze uçucu kül geopolimer harç karışımı elde edildikten sonra üç hücreli prizma kalıbının içine birkaç aşmada vibrasyonla doldurularak kalıp içinde üç adet prizma numune hazırlanmıştır. Numuneler kalıp içinde taze haldeyken kalıp 75 C sıcaklığa sahip etüv içine konarak ısı küre tabii tutulmuştur. Numunelerin bir kısmı 4 saat etüvde tutularak kür edilmiştir. Bir kısım numune ise etüvde aynı sıcaklıkta 1, 2, 3 ve 7 gün ısı küre edilmiştir. Isıl küreden sonra numuneler kalıptan çıkarılarak deneylere tabii tutulmuştur. Bazı numuneler yukarıda bahsedilen ısı küreden sonra sıcaklığı $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nemi $50\pm 5\%$ olan laboratuvar ortamında 28'inci güne kadar ilave küre tabii tutulmuştur. Kür zamanı dolan ve 28'inci gününü tamamlayan numuneler üzerinde deneyler yürütülmüştür. Isıl küreden hemen sonra ve ısı küre sonrası laboratuvar ortamında ilave küreden sonra numuneler üzerinde basınç, yarıma ve eğilme dayanımını içeren deneyler yapılmıştır.

Eğilme deneylerinde yukarıda boyutları belirtilen prizma numuneler kullanılarak üç nokta deneyi uygulanmıştır. Eğilme deneyi TS EN 1015-11 [28] standardına uygun olarak üç noktadan yükleme ile yapılmıştır. Eğilme deneyinden sonra elde edilen iki kırık parçanın uçlarına boyutları 40x40 mm olan basınç uygulama aparatı ile basınç uygulanarak basınç dayanımları tayin edilmiştir. Yarıma deneyi de eğilme deneyinde kullanılan boyutlardaki numuneler kullanılarak yürütülmüştür. Yarıma yükü 160mm uzunluk boyunca uygulanmıştır. Yarıma ve eğilme dayanımları için üç numune kullanılarak ortalamaları yarıma ve eğilme çekme dayanımı olarak alınmıştır. Basınç dayanımında ise eğilmeden elde edilen yarım numuneler kullanıldığından ortalama dayanımlar altı ölçüm sonucu olarak alınmıştır.

Benzer şekilde üretilen eşdeğer numuneler üzerinde transport özelliklerini ölçmek için, (her bir kür zamanına ayrı ayrı olmak üzere) kapiler su emme, su emme kapasitesi ve boşluk oranı deneyleri uygulanmıştır. Transport özellikleri de yukarıda boyutları verilen prizma numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler ASTM C642 [29] ve ASTM C1585 [30]'a uygun olacak şekilde yürütülmüştür. Ayrıca numunelerin aşınma direncini ölçmek için yatay Bohme aşınma cihazı kullanılarak aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyi TS 2824 EN 1338 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [31]. Aşınma deneyi için bir kenarı 70mm olan küp numuneler hazırlanmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı

Alkali ile aktifleştirilen uçucu kül geopolimer harçlarının ısıl kür ve ısıl kürden sonra ilave bekleme kürden sonra elde edilen transport özellikleri Tablo 3. 1 de sunulmaktadır. Sadece ısıl küre tabi tutulan ve ısıl kür sonrası ilave bekleme kürü uygulanan harçların birim ağırlıkları arasında yapılan karşılaştırmaya göre birim ağırlıkların fazla değişmediği tespit edilmiştir. Çalışmada üretilen sertleşmiş geopolimer harçların birim ağırlıkları 2137 and 2187 kg/m³ arasında bulunmuştur.

Su emme deneyi ölçümleri ısıl kür sonrası numuneler kalıplarından çıkarılır, çıkarılmaz yürütülmüştür. Isıl kürden sonra ilave bekleme kürü uygulanan numuneler üzerinde ise deneyler 28'inci günde yürütülmüştür. Isıl kür süresindeki artışların üretilen geopolimer harçların su emmelerini artırdığı tespit edilmiştir. Kısa ısıl kür süreleri sonucunda daha düşük su emme değerleri gözlenmiştir. Bu durum harçların içinde bulunan su miktarları ile açıklanmıştır. Isıl kür süresi artıkça harçların içinde bulunan suların ortamı terk ettiği dolayısıyla su emme deneyinde yeri boş kalan suların yerini su emme sonucu içeri giren suların aldığı ve dolayısıyla ısıl kür süresinin artması ile su emmelerin kısa ısıl kür sürelerine göre arttığı düşünülmektedir.

Sadece ısıl kür uygulanan numunelerden elde edilen su emme değerleri ısıl kür süresinden sonra uygulanan ilave bekleme kürü uygulanan numunelerden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. İlave bekleme uygulanan numunelerin su emme değerlerinin diğerine göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Bu durum ısıl kürden sonra ilave kür için laboratuvarında bekletilen numunelerin, bu ilave bekleme süresi içinde kurumaya devam ettiği ve içindeki suyun yerini terk ederek yerlerini boş bıraktığı, dolayısıyla su emme deneyi esnasında bu boşlukların tekrar su ile dolarak, su emme değerinin sadece ısıl kür uygulanan numunelere göre artırdığı, şeklinde açıklanabilir.

Sadece ısı kr ile ısı kürden sonra ilave bekleme tabii tutulan numunelerin su emme değerlerindeki bağıl artış farkı, ısı kr süresi arttıka azalmıştır.

Örneğin, sadece 4 saat ısı küre tabii tutulan numunelerin su emmesi %1.4 iken, ilave bekleme kürü sonrasında bu değerin %9.1 olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, sadece 7 gün ısı küre tabii tutulan numunelerin su emmeleri %5.6 iken ilave bekleme kürü sonrasında su emme değeri %7.5 olmuştur.

Boşluk oranı sonuçlarının da su emme değerlerine benzer şekilde davrandığı grlmştir. Su emme oranı için yapılan açıklamalar, benzer şekilde boşluk oranı sonuçları içinde yapılabilir. Örneğin sadece 4 saat ısı küre tabii tutulan numunelerin boşluk oranı %2.9 iken, bu değer ilave bekleme kürü sonrasında %17.9 olmuştur. Bununla birlikte sadece 7 gün ısı küre tabii tutulan numunelerin boşluk oranı %11.4 iken ilave bekleme kürü sonrasında boşluk oranı %15.3 olmuştur.

Isı kr süresi ve ayrıca ısı kürden sonra ilave kr süresi arttıka su emme değerleri azalarak artmakta olup, sonunda bir değere doğru artarak asimptot olmaktadır. Bu açıklama boşluk oranı içinde geçerli bir açıklamadır. Transport özelliği ile ilgili ilave açıklamalar kapiler su emme kısmında da yapılmaktadır.

Tablo 3.1 Birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı deney sonuçları

Karışım No	Isı Kr Süresi	İlave Kr Süresi	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Su Emme Kapasitesi (%)	Boşluk Oranı (%)
K1	4 saat	+0	2179	1.4	2.9
K2	1 gün	+0	2166	2.3	4.9
K3	2 gün	+0	2162	4.7	9.8
K4	3 gün	+0	2161	5.4	11.0
K5	7 gün	+0	2159	5.6	11.4
K6	4 saat	+28 gün	2137	9.1	17.9
K7	1 gün	+27 gün	2143	8.5	16.7
K8	2 gün	+26 gün	2161	7.6	15.3
K9	3 gün	+25 gün	2170	7.6	15.3
K10	7 gün	+21 gün	2187	7.5	15.3

3.2. Kapiler su emme

Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül ile üretilen harçların ısı kürden sonra ve ısı kür sonrası uygulanan ilave kür sonrasında elde edilen kapiler su emme deney sonuçları Tablo 3. 2 de sunulmaktadır. Kapiler su emme deney sonuçlarının yakın gözlemler ve değerlendirmeleri, ısı kür süresinin artmasıyla kapiler su emme katsayılarının arttığını göstermektedir.

Benzer gözlem ve değerlendirmeler ısı kür sonrası uygulanan ilave kür içinde yapılmıştır. Sadece ısı kür ve ısı kür sonrası ilave kür uygulaması arasında yapılan kıyaslamalar, ilave bekleme süresinin sadece ısı küre göre daha yüksek kapiler su emme katsayısına sebep olmuştur. İki durumda gözlemlenen artış, numunelerdeki buharlaşma nedeniyle su kaybı veya su azalımı ile açıklanmaktadır, geopolimerik reaksiyonların suyu bağlamadığı, suyun sadece reaksiyon sırasında iyon değişimi ve taşınımı için kullanıldığı [32, 33] dolayısı ile numunedeki suyun kuruyarak dışarı çıkması sonucu kapiler su emme katsayısı artmıştır.

Böylece, ısı kür süresinin uzatılmasının daha fazla suyun kuruyarak dışarı çıkmasını sağlayacağı ve dolayısıyla içi boşalan boşlukların kapiler su emme deneyi sırasında daha fazla su emerek yüksek kapiler su emme katsayısı ile sonuçlanacağı yorumu yapılmaktadır.

Benzer şekilde benzer nedenlerden dolayı ısı kür sonrası uygulanan ilave bekleme kuru esnasında da suyun buharlaşacağı ve sadece ısı kür uygulanmış numunelere göre daha yüksek kapiler su emme katsayılarına sahip olacağı yorumu yapılabilir.

Isı kür süresi uzadıkça kapiler su emme katsayılarının giderek stabilize olduğu ve artışının azalarak her iki kür durum içinde belirli sayılara asimptot olduğu anlaşılmıştır.

Su emme, boşluk oranı, kapiler su emme katsayıları sonuçlarının değerlendirilmesinden sonra, alkali aktifleştirilmiş uçucu kül harçların transport özelliklerinin erken yaşta özelliklerinin belirlenmesinin yanlış yorumlar yapmaya açık olduğu kanısına varılmıştır. Bu özelliklerin göz önüne alınabilecek uygun bir zamandan (örneğin 28 gün veya daha uzun bir zaman) sonra ölçülmesinde yarar olduğu görülmektedir.

Tablo 3.2 Kapiler su emme katsayıları

Karışım No	Isıl Kür Süresi	İlave Kür Süresi	Kapiler Su Emme (mm/sn ^{1/2})	Karışım No	Isıl Kür Süresi	İlave Kür Süresi	Kapiler Su Emme (mm/sn ^{1/2})
K1	4 saat	+0	0,00016	K6	4 saat	+28 gün	0.00041
K2	1 gün	+0	0,00038	K7	1 gün	+27 gün	0,00043
K3	2 gün	+0	0,00047	K8	2 gün	+26 gün	0,00079
K4	3 gün	+0	0,00050	K9	3 gün	+25 gün	0,00081
K5	7 gün	+0	0,00057	K10	7 gün	+21 gün	0,00083

3.3. Basınç Dayanımı

Çalışmada üretilen alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer harcının basınç dayanımları ısıl kürden hemen sonra ve ısıl kür sonrası uygulanan ilave kür sonrası için Tablo 3. 3 ve Şekil 3. 1 de sunulmaktadır. Tablo 3.3 basınç dayanımlarının ısıl kür süresinin 4 saat ten 7 güne kadar artmasıyla birlikte önemli oranda arttığını ve geliştiğini göstermektedir. Örneğin dört saatlik ısıl kür sonrasında elde edilen basınç dayanımı 4.41 MPa dır. Bu değer 4,41 MPa dan sırasıyla 1,2,3, ve 7 günlük ısıl kürler için 33.84, 50.50, 63.32, 73.57 MPa basınç dayanımı değerlerine erişmiştir. Bu artış reaksiyon kinetiklerine bağlanmaktadır. Bilindiği üzere ısıl kür kimyasal reaksiyonları artırmaktadır, ayrıca reaksiyonlar bir süreç içinde yer aldığından kür zamanının artması da yüksek pH değerine sahip alkali ortamında amorf silis ve alümina arasındaki reaksiyon sonucu ortaya çıkan ürün miktarlarını artırmaktadır.

Diğer yandan, dört saatlik ısıl kür sonrası 4.41 MPa olan basınç dayanımı ilave bekleme kürü sonrasında %168 oranında iyileşerek ısıl kür süresi sonrası beklemesini 28 güne tamamladığında 11.82 MPa olmuştur.

Bir günlük ısıl kürden sonra 33.84 MPa olan basınç dayanımı ortalaması ilave bekleme küründen sonra %34 oranında artarak 28inci günde 45.3 MPa olmuştur. İki günlük ısıl kürden sonra 50.50 MPa olan basınç dayanımı ortalaması ilave bekleme küründen sonra %28 oranında artarak 28inci günde 64.78 MPa olmuştur. Üç günlük ısıl kürden sonra 63.32 MPa olan basınç dayanımı ortalaması ilave bekleme küründen sonra %11 oranında artarak 28inci günde 70.03 MPa olmuştur. Yedi günlük ısıl kürden sonra 73.57 MPa olan basınç dayanımı

ortalaması ilave bekleme küründen sonra %3 oranında artarak 28inci günde 75.69 MPa olmuştur.

Yukarıda yapılan değerlendirmeler, Tablo 3. 3 ve Şekil 3. 1 den yapılan gözlemlere göre ısıl kür süresinin artmasıyla ısıl kür süresi sonrası uygulanan ilave bekleme kürü nedeniyle oluşan basınç dayanımlarındaki artış oranları %168 den %34, %28, %11 ve %3 değerlerine derece derece düşmüştür.

Isıl kür süresinin artımıyla, ısıl küre ilave edilen bekleme sonrasındaki elde edilen basınç dayanımlarındaki artış değerlendirildiğinde, ilave bekleme sonrasında ortaya çıkan artış oranlarında önemli miktarda azalmalar gözlenmiştir.

Esasen, yedi günlük ısıl kür süresinden sonra uygulanan bekleme kür süresindeki dayanım artışı %3 olmuştur, bu değer reaksiyonların hemen hemen tamamlandığı yorumuna ulaştırabilir.

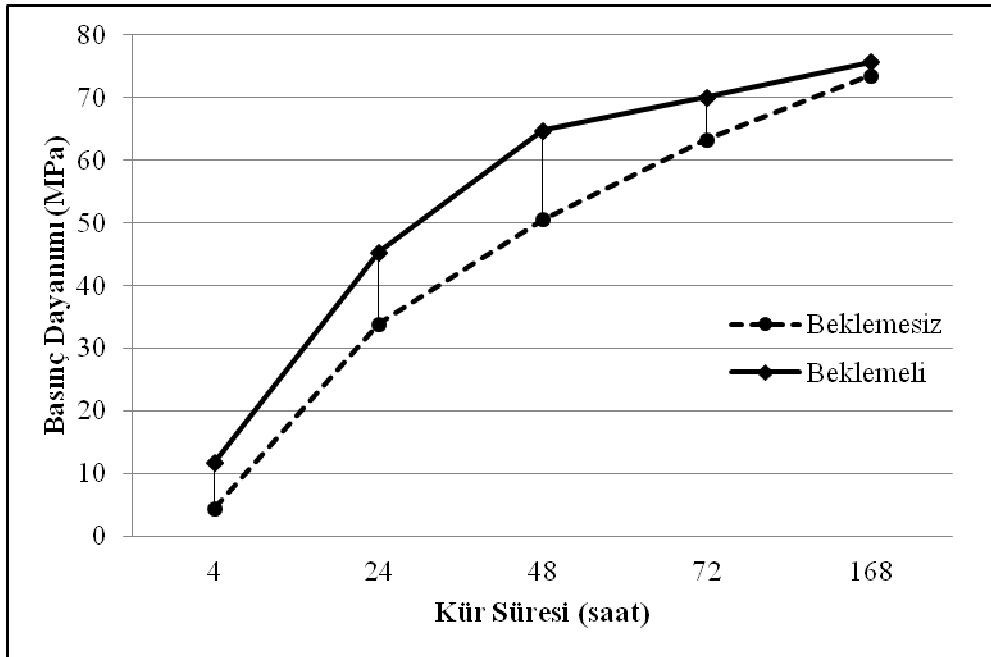
İlave bekleme kür süreleri nedeniyle basınç dayanımlarında ortaya çıkan artışın %168 den %3e kadar düşmesi geopolimerik reaksiyonlar ile açıklanabilir. Isıl kür süresinin artması geopolimerik kaynak malzemelerinin zaman içinde geopolimerik reaksiyon tarafından tüketilmesine ve ısıl kür sonrası uygulanan kür sırasında oluşacak geopolimerik reaksiyon ürünlerinin miktarının azalmasına dolayısıyla dayanım artışlarının azalmasına sebep olmaktadır.

Isıl kür sonrası ortaya çıkan basınç dayanımlarındaki artış iki sebebe dayalı olduğu düşünülmektedir. Bu nedenlerden birisinin ısıl kür süresi esnasında numune kütlesi içine depolanan termik enerji olduğu düşünülmektedir. Isıl kürden sonra laboratuvar ortamına maruz bırakılan numunelerin içine depolanan bu termik enerji ya da ısı laboratuvar ortamına yayılarak numuneler soğumaktadır. Ortam sıcaklığına erişinceye kadar devam eden bu soğuma esnasında geopolimerik reaksiyonlar sıcaklığa bağlı olarak olanca hızları ile devam etmektedirler, numune soğuduğu içinde reaksiyon yavaşlamakta ortaya çıkan geopolimer ürünü de azalmaktadır. Ancak bu süre içinde basınç dayanımına oldukça önemli katkı oluşmaktadır. Soğuma esnasında reaksiyonlar azalır, laboratuvar sıcaklığına erişen

numunelerde reaksiyonlar yavaş ta olsa devam etmektedir. Böylece yavaş ta olsa 28 inci güne kadar reaksiyon devam eder, reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan ürün az olsa da, bu aşamada ortaya çıkan az ürünler numune dayanımlarında önemli miktarda artıma neden olur. Böylece, her iki sebep te dayanımlara ortak olarak katkıda bulunur, ortak katkılarının önemli miktarda olduğu elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Tablo 3.3 Alkali ile aktifleştirilen uçucu kül harçların basınç dayanımları

Karışım No	Isıl Kür Süresi	İlave Kür Süresi	Basınç Dayanımı	Karışım No	Isıl Kür Süresi	İlave Kür Süresi	Basınç Dayanımı
K1	4 saat	+0	4.41	K6	4 saat	+28 gün	11.82
K2	1 gün	+0	33.84	K7	1 gün	+27 gün	45.30
K3	2 gün	+0	50.50	K8	2 gün	+26 gün	64.78
K4	3 gün	+0	63.32	K9	3 gün	+25 gün	70.03
K5	7 gün	+0	73.57	K10	7 gün	+21 gün	75.69



Şekil 3.1 İlave bekleme süresinin basınç dayanımı üzerine etkisi

3.4. Eğilmede çekme dayanımı

Çalışmada üretilen alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer harcının eğilme dayanımları ısıl kürden hemen sonra ve ısıl kür sonrası uygulanan ilave kür sonrası için Tablo 3. 4 ve Şekil 3. 2 de sunulmaktadır. Tablo 3. 4 ve Şekil 3. 2 ısıl kür süresi ile birlikte eğilme dayanımının da arttığını göstermektedir. Eğilme dayanımlarının ısıl kür süresinin 4 saat ten 7 güne kadar artmasıyla birlikte önemli oranda arttığını ve geliştiği anlaşılmaktadır. Örneğin dört saatlik ısıl kür süresinden sonra 1.45 MPa olan eğilme dayanımı, sırasıyla 1, 2, 3 ve 7 günlük ısıl kür sonrasında 1.45 ten 3.87, 5.90, 10.63, 13.83 değerlerine yükselmiştir.

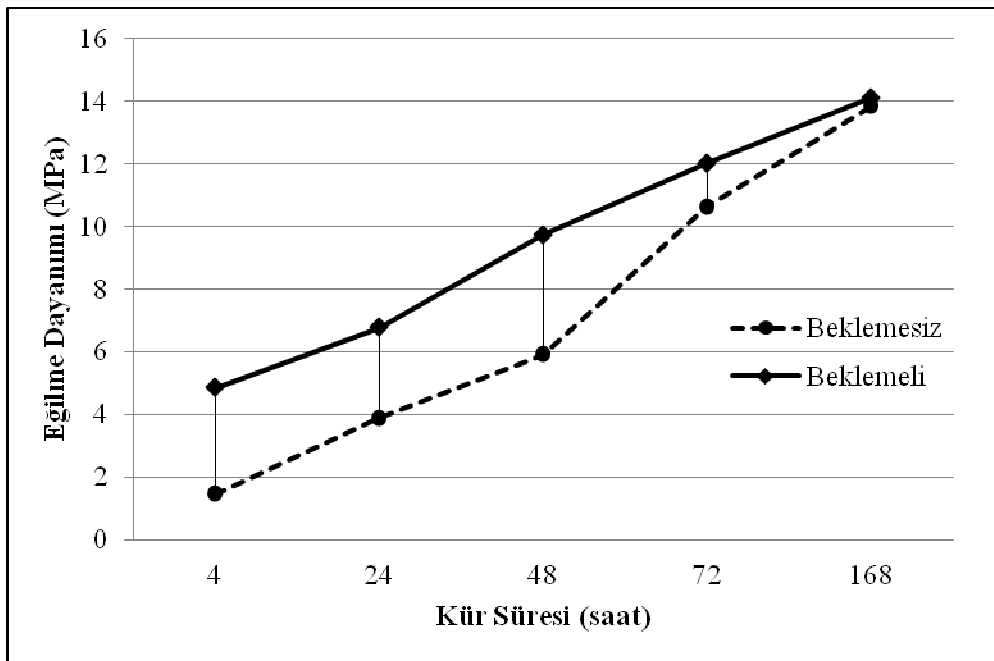
Sadece dört saat ısıl küre tabii tutulan numunelerin eğilme dayanımı 1.45 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %234 oranında artarak 28inci günde 4.48 MPa değerine ulaşmıştır. Sadece bir gün ısıl küre tabii tutulan numunelerin eğilme dayanımı 3.87 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %75 oranında artarak 28inci günde 6.76 MPa değerine ulaşmıştır. Sadece iki gün küre tabii tutulan numunelerin eğilme dayanımı 5.90 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %65 oranında artarak 28inci günde 9.72 MPa değerine ulaşmıştır. Sadece üç gün ısıl küre tabii tutulan numunelerin eğilme dayanımı 10.63 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %13 oranında artarak 28inci günde 12.00 MPa değerine ulaşmıştır. Sadece yedi gün ısıl küre tabii tutulan numunelerin eğilme dayanımı 13.83 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %2 oranında artarak 28inci günde 14.10 MPa değerine ulaşmıştır.

Yukarıda yapılan değerlendirmeler, Tablo 3. 4 ve Şekil 3. 2 den yapılan gözlemlere göre ısıl kür süresinin artmasıyla ısıl kür süresi sonrası uygulanan ilave bekleme kürü nedeniyle oluşan eğilme dayanımlarındaki artış oranları %234 den %75, %65, %13 ve %2 değerlerine derece derece düşmüştür. Yapılan değerlendirmelere göre ısıl kür süresinden sonra uygulanan bekleme kürü sonrasında eğilme dayanımlarında artışlar olmuştur, ancak bu artışlar ısıl kür süresi arttıkça oldukça önemli oranda düşmüştür.

Isıl kür sonrası dayanım ve ilave kür sürelerinde ki basınç dayanımları gelişmelerinde yapılan açıklamaların; eğilme dayanımlarındaki değişim ve gelişimler içinde geçerli olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3.4 Alkali ile aktifleştirilen uçucu kül harçların eğilme dayanımları

Karışım No	Isıl Kür Süresi	İlave Kür Süresi	Eğilme Dayanımı	Karışım No	Isıl Kür Süresi	İlave Kür Süresi	Eğilme Dayanımı
K1	4 saat	+0	1.45	K6	4 saat	+28 gün	4.84
K2	1 gün	+0	3.87	K7	1 gün	+27 gün	6.76
K3	2 gün	+0	5.90	K8	2 gün	+26 gün	9.72
K4	3 gün	+0	10.63	K9	3 gün	+25 gün	12.00
K5	7 gün	+0	13.83	K10	7 gün	+21 gün	14.10



Şekil 3.2 İlave bekleme kür süresinin eğilme dayanımı üzerine etkisi

3.5. Yarımda çekme dayanımı

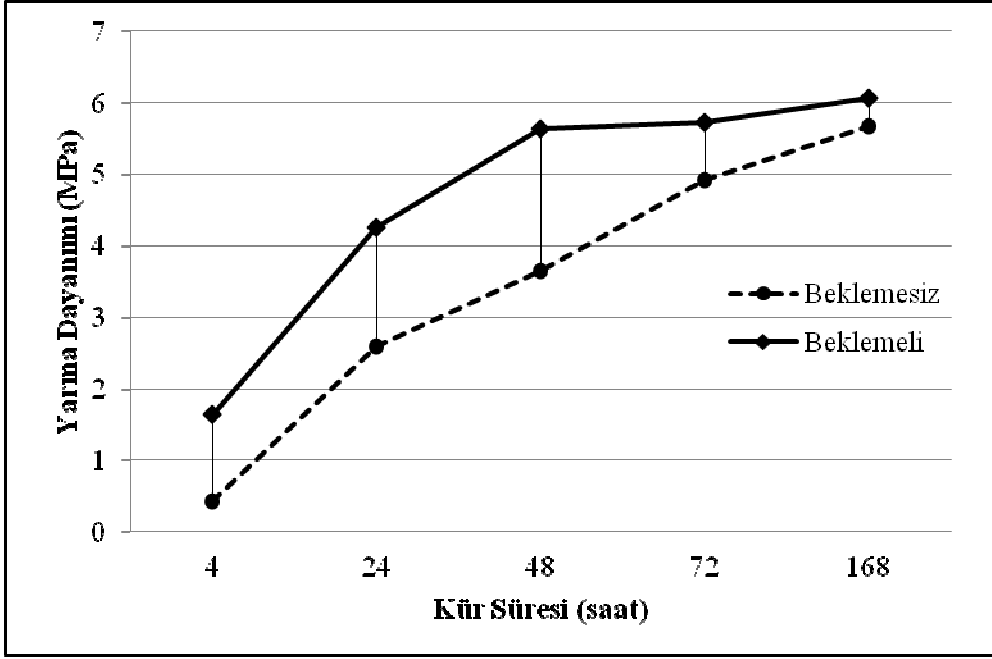
Çalışmada üretilen alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer harcının yarıma dayanımları ısıll kürden hemen sonra ve ısıll kür sonrası uygulanan ilave kür sonrası için Tablo 9 ve Şekil 3 de sunulmaktadır. Tablo 3. 5 ve Şekil 3. 3 ısıll kür süresi ile birlikte yarıma dayanımının da arttığını göstermektedir. Yarıma dayanımlarının ısıll kür süresinin 4 saat ten 7 güne kadar artmasıyla birlikte önemli oranda arttığını ve geliştiği anlaşılmaktadır.

Örneğin dört saatlik ısı k r süresinden sonra 0.42 MPa olan yarıma dayanımı, sırasıyla 1, 2, 3 ve 7 günlük ısı k r sonrasında 0.42 den 2.59, 3.64, 4.91 ve 5.67 MPa değerlerine yükselmiştir. Sadece dört saat ısı küre tabii tutulan numunelerin yarıma dayanımı 0.42 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %288 oranında artarak 28inci günde 1.63 MPa değerine ulaşmıştır. Sadece bir gün ısı küre tabii tutulan numunelerin yarıma dayanımı 2.59 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %64 oranında artarak 28inci günde 4.25 MPa değerine ulaşmıştır. Sadece iki gün ısı küre tabii tutulan numunelerin yarıma dayanımı 3.64 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %55 oranında artarak 28inci günde 5.63 MPa değerine ulaşmıştır. Sadece üç gün ısı küre tabii tutulan numunelerin yarıma dayanımı 4.91 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %16 oranında artarak 28inci günde 5.72 MPa değerine ulaşmıştır. Sadece yedi gün ısı küre tabii tutulan numunelerin yarıma dayanımı 5.67 MPa iken ilave bekleme kürü sonrasında %7 oranında artarak 28inci günde 6.06 MPa değerine ulaşmıştır.

Yukarıda yapılan değerlendirmeler, Tablo 3. 5 ve Şekil 3. 3 den yapılan gözlemlere göre ısı k r süresinin artmasıyla ısı k r süresi sonrası uygulanan ilave bekleme kürü nedeniyle oluşan yarıma dayanımlarındaki artış oranları %288, %64, %55, %16 ve and %7 değerlerine derece derece düşmüştür. Yapılan değerlendirmelere göre ısı k r süresinden sonra uygulanan bekleme kürü sonrasında yarıma dayanımlarında artışlar olmuştur, ancak bu artışlar ısı k r süresi arttıkça oldukça önemli oranda düşmüştür.

Tablo 3.5 Alkali ile aktifleştirilen uçucu kül harçların yarıma dayanımları

Karışım No	Isıl K�r Süresi	İlave K�r Süresi	Yarıma Dayanımı	Karışım No	Isıl K�r Süresi	İlave K�r Süresi	Yarıma Dayanımı
K1	4 saat	+0	0.42	K6	4 saat	+28 gün	1.63
K2	1 gün	+0	2.59	K7	1 gün	+27 gün	4.25
K3	2 gün	+0	3.64	K8	2 gün	+26 gün	5.63
K4	3 gün	+0	4.91	K9	3 gün	+25 gün	5.72
K5	7 gün	+0	5.67	K10	7 gün	+21 gün	6.06



Şekil 3.3 İlave bekleme kür süresinin yırılma dayanımı üzerine etkisi

3.6. Aşınma Dayanımı

Aşınma deneylerinin sonuçları Tablo 3. 6 da sunulmaktadır. Tablo 3. 6 dan da görüleceği üzere etüve kürleme süresi arttıkça aşınma değerlerinde oldukça anlamlı düşüşler elde edilmiştir. Bu düşüş ıslık kür süresinden sonra 28 güne kadar beklenen ilave kür süresi durumu içinde geçerlidir. Elde edilen aşınmadaki düşüş ıslık kür süresinin artışıyla anlamlı miktarda artan dayanımlar ile doğrudan ilişkilidir. Dayanımı yüksek olan malzemenin aşınmasının da düşük olması normal olarak beklenen bir durumdur. Bununla birlikte ıslık kür süresinden sonra ilaveten beklenen kür süresi ile sadece ıslık kür ile yetinilen numunelerin aşınmaları arasında bir farkın olup, olmadığını anlamak için detaylı yakın bir gözlem yapılmıştır. Bu yakın gözleme göre ilave olarak beklenen kür süresinin katkısı aşınma direncine oldukça faydalı olmuş olup, ilave kür süresi sonucunda numunelerin aşınma miktarı değeri düşerek aşınma direncinin anlamlı miktarda arttığı anlaşılmıştır.

İlave kür süresinden sonra, alkali ile aktifleştirilen uçucu kül geopolimer harcının aşınma direncinde oldukça önemli ve ciddi anlamda gelişme gözlenmiştir. Örneğin numunelerin 7 günlük etüv kürünün aşınması ile 7 günlük etüv kürüne ilave 21 günlük laboratuvar kürünün aşınması arasında %26lık bir düşüş elde edilmiştir. İlaveten, sadece 4 saatlik etüv kürüne tabii tutulan numunelerin ortalama aşınması, numuneler 28 inci güne kadar laboratuvar ortamında

kür edilince elde edilen aşınma değerlerinde %55 oranında düşüş gözlenmiştir. Bu gözlemlerden alkali ile aktifleştirilen geopolimer harçları aşınma direncinin önemli olduğu alanlarda uygun bir malzeme olduğu sonuca ulaşılmıştır. Ramuje ve Potharaju [34] da benzer sonuca ulaşarak, uçucu kül ile üretilen geopolimer betonlarının aşınmalarının oldukça düşük olduğu ve Portland çimentosuna göre aşınma karşısında daha dirençli olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 3.6 Aşınma deneyi sonuçları

Karışım No	Isıl Kür Süresi	İlave Kür Süresi	Aşınma (mm ³ /5000 mm ²)	Karışım No	Etüv Kürü Süresi	İlave Kür Süresi	Aşınma (mm ³ /5000 mm ²)
K1	4 saat	+0	5082	K6	4 saat	+28 gün	2267
K2	1 gün	+0	3311	K7	1 gün	+27 gün	2171
K3	2 gün	+0	2693	K8	2 gün	+26 gün	1925
K4	3 gün	+0	2120	K9	3 gün	+25 gün	1913
K5	7 gün	+0	2047	K10	7 gün	+21 gün	1516

4. SONUÇ

Numunelere uygulanan ısıll kür sürelerinin artmasıyla geopolimer harçların su emme değerlerinde artmalar gözlenmiştir. Isıl küre ilave olarak verilen kür sürelerinin sonunda da su emmelerde artış kaydedilmiştir. Benzer şekilde kapiler su emme ve boşluk oranları da artmıştır. Ancak bu artış azalan bir artış olmakla birlikte değişimlerine göre bir değere yaklaşarak bu değere asimptot olmaya doğru meyillidirler.

Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer harcının basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarıma dayanımı ve aşınma dirençleri de ısıll kür süresinin artmasıyla birlikte genel olarak artmıştır. Ancak, ısıll kür süresindeki artışa bağlı dayanım kazancındaki artış azalan bir artıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarıma dayanımlarının ısıll kür süresinden sonra uygulanan kür süresi içinde de arttığı sonucuna varılmıştır, ancak bu artış ta azalan bir artış oranına sahiptir. Proje çalışmasının sonucunda yüksek dayanımlı ve aşınmaya karşı dirençli F sınıfı uçucu kül ile üretilmiş ve NaOH alkalisi ile aktifleştirilmiş ve 75°C derecede kür edilmiş uçucu kül geopolimer harcı elde edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Malhotra, V.M., Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology, *ACI Concrete International*, 2002. 24(7): pp. 22.
- [2] Guo X, Shi H, Dick WA, Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer, *Cement & Concrete Composites* 32 (2010) 142–147.
- [3] CD Atis, 1997, Design and properties of high volume fly ash concrete for pavements, Unpublished PhD thesis, Civil Engineering Department, Leeds University, England.
- [4] Lin, X. H. 2015, “Optimising Short-Term and Long-Term Properties of High-Volume Fly Ash (HVFA) Concrete”, School of Civil Environmental and Chemical Engineering College of Science Engineering and Health RMIT University, PhD Thesis.
- [5] Huang CH, Lin SK, Chang CS, Chen HJ, Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash, *Construction and Building Materials* 46 (2013) 71–78.
- [6] de Vargas AS, Dal Molin DCC, Vilela ACF, Da Silva FJ, Pavao B, Veit H., The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cement & Concrete Composites*, 2011;33:653–60.
- [7] Swanepoel JC, Strydom CA, Utilisation of fly ash in a geopolymeric material, *Applied Geochemistry* 17 (2002) 1143–1148.
- [8] Bing-hui M, Zhu H, Xue-min C, Yan H, Si-yu G, Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers, *Applied Clay Science* 99 (2014) 144-148.

- [9] van Jaarsveld JGS, van Deventer JSJ, Lukey GC, The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers, *Materials Letters* 57 (2003) 1272–1280.
- [10] Sathonsaowaphak A, Chindapasirt P, Pimraksa K, Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar, *Journal of Hazardous Materials* 168 (2009) 44–50.
- [11] Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P, Chindapasirt P., NaOHactivated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel* 2011; 90 : 2118–2124.
- [12] Rattanasak U., Chindapasirt P., Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering* 22 (2009) 1073–1078.
- [13] Komljenovic M, Bascarevic Z, Bradic, V, Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash Geopolymers, *Journal of Hazardous Materials* 181 (2010) 35–42.
- [14] Sukmak P, Horpibulsuk S, Shen SL, Chindapasirt P, Suksiripattanapong C., Factors influencing strength development in clay–fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials* 47 (2013) 1125–1136.
- [15] Chindapasirt P, Rattanasak U, Taebuanhuad S., Role of microwave radiation in curing the fly ash geopolymer, *Advanced Powder Technology* 24 (2013) 703–707.
- [16] Ravikumar D, Peethamparan S, Neithalath N, Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder, *Cement & Concrete Composites* 32 (2010) 399–410.
- [17] Gorhan G, Kurklu G, 2013, The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, *Composites: Part B*, 58 (2014) 371-377.

- [18] Al Bakri AMM, Kamarudin H, Bnhussain M, Nizar IK, Zarina Y, Rafiza AR, The Effect of Curing Temperature on Physical and Chemical Properties of Geopolymers, *Physics Procedia* 22 (2011) 286 – 291.
- [19] Somaratna J, Ravikumar D, Neithalath N, Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing, *Cement and Concrete Research* 40 (2010) 1688–1696.
- [20] Olivia M, Nikraz H., Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method, *Materials and Design* 36 (2012) 191–198.
- [21] Ryu GS, Lee YB, Koh KT, Chung, YS, The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, *Construction and Building Materials* 47 (2013) 409–418.
- [22] Vora PR , Dave UV, Parametric Studies on Compressive Strength of Geopolymer Concrete, *Procedia Engineering* 51 (2013) 210 – 219.
- [23] De Vargas AS, Dal Molin DCC, Masuero AB, Vilela ACF, Castro-Gomes J, de Gutierrez RM, Strength development of alkali-activated fly ash produced with combined NaOH and Ca(OH)₂ activators, *Cement & Concrete Composites* 53 (2014) 341–349.
- [24] Skvara F, Kopecky L, Smilauer V, Bittnar Z, Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash, *Journal of Hazardous Materials* 168 (2009) 711–720.
- [25] Rovnanik P, Effect of curing temperature on the development of hard structure, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1176–1183.
- [26] 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 Standards*; 2005.

[27] TS EN 196-1. Method of testing cement, Part 1.Determination of strength, Turkish Standard, Ankara; 2002.

[28] TS EN 1015-11.Mortar testing method, Part 11.Measurement of compressive and flexural tensile strength of mortar, Turkish Standard, Ankara; 2000.

[29] ASTM C642-06, “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

[30] ASTM C1585-04, “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

[31] TS 2824 EN 1338. Concrete paving bloks – Requirements and test methods. Turkish Standard, Ankara, 2005.

[32] Komljenovic, M., Bascarevic, Z., Bradic, V, 2010, Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash Geopolymers, Journal of Hazardous Materials 181 (2010) 35–42.

[33] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, V. Sirivivatnanon, Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, Cem. Concr. Compos. 29 (2007) 224–229.

[34] Ramujee K, Potharaju M, Abrasion Resistance of Geopolymer Composites, Procedia Materials Science 6 (2014) 1961 – 1966