

UÇUCU KÜL ESASLI GEOPOLİMER BETONLARIN MEKANİK ÖZELİK VE YÜKSEK SICAKLIK DİRENÇLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Murat TUYAN¹, Onur Can BOYACI²,
Özge ANDİÇ ÇAKIR³, Kambiz RAMYAR⁴

Özet

Bu çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimer betonların mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık dirençleri araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı termik santallerden elde edilen F ve C tipi uçucu küller alkali aktivatör çözeltileri ile aktive edilerek geopolimer beton üretiminde kullanılmıştır. Geopolimer betonlarda alkali aktivatör çözeltisi olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat değerlendirilmiştir. Ayrıca, çimento esaslı betonlarla karşılaştırma yapmak amacıyla geopolimer betonlara benzer basınç dayanımına sahip örnekler hazırlanmıştır. Geopolimer ve çimentolu betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve yüksek sıcaklık direnci belirlenerek karşılaştırılmıştır. F tipi uçucu kül ile üretilen ve yüksek sıcaklıkta kürlenmiş geopolimer betonun benzer dayanıma sahip çimento esaslı betona göre daha üstün mekanik özelliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu karışımın yüksek sıcaklık direncinin çimento esaslı betona göre bir miktar fazla olduğu tespit edilmiştir. C tipi uçucu kül ile üretilen geopolimer betonların mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci,

Investigation of Mechanical Properties and High Temperature Resistance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete

In this study, the mechanical properties and high temperature resistance of fly ash-based geopolymer concrete were investigated. For this purpose, Type F and Type C fly ashes obtained from different thermal power plants were activated with alkaline activator solutions to produce geopolymer concrete. Sodium hydroxide and sodium silicate were used as the alkali activator solution. For the sake of comparison, conventional concrete mixtures with similar compressive strength were prepared. Compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, modulus of elasticity and high temperature resistance of geopolymer and conventional concrete mixtures were determined. It was concluded that the mechanical properties and high temperature resistance of the geopolymer concrete produced with Type F fly ash and cured at high temperature were higher than those of conventional concrete mixtures. The mechanical properties and high temperature resistance of geopolymer concrete produced with Type C fly ash differed by curing at ambient and high temperature. It was found that the mechanical properties and high temperature resistance of geopolymer concrete cured at ambient temperature were similar to those of the conventional concrete. However, the geopolymer concrete cured at high temperature exhibited lower mechanical properties and lower high temperature resistance than those of the conventional concrete.

ortam sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta kürlleme ile farklılık göstermiştir. Mekanik özellikler ve yüksek sıcaklık direnci açısından ortam sıcaklığında kürlleme sonucunda çimento esaslı betonlara benzer, yüksek sıcaklıkta kürlleme sonucunda ise daha düşük performans gösterdiği tespit edilmiştir.

1. GİRİŞ

Geopolimer, son yıllarda yüksek performanslı kompozit ve seramik gibi malzemelerin üretiminde özellikle çimento esaslı bağlayıcılar yerine kullanılabilen ve sentetik alüminosilikat sınıfına giren bir malzemedir [1]. Alüminosilikatlar, ana oksitleri alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum oksit (SiO_2) olan, doğal ya da sonradan ısı işlem sonucu amorf yapıya sahip malzemelerdir. Doğada bulunan ve atık olarak ortaya çıkan pek çok alüminosilikat malzeme bulunmaktadır. Bu açıdan, bu malzemelerin bağlayıcı olarak kullanımı çevre etkisi ve inşaat sektörü açısından daha da önem kazanmaktadır. Geopolimer beton üretiminde en yaygın olarak kullanılan alüminosilikat malzemeleri uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur [2]. Uçucu küllerin alkalilerle aktivasyonu so-

1) murat.tuyan@idu.edu.tr / İzmir Demokrasi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir
2) oncbay@gmail.com 3) ozge.andic@ege.edu.tr 4) kambiz.ramyar@ege.edu.tr / Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir
(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

nucu amorf yapılı inorganik polimerler oluşmaktadır. Farklı uçucu küller çok değişik kimyasal kompozisyonlara sahip oldukları için ortaya çıkan geopolimer bağlayıcının da özellikleri değişkenlik göstermektedir. Geopolimer üretimi için genellikle F tipi uçucu kül tercih edilmektedir. C tipi uçucu küller, daha düşük alüminyum oksit ve silisyum oksit içermesinden ve hızlı priz almasından dolayı daha az tercih edilmektedir. Uçucu küllü geopolimer karışımların özelliklerine etki eden en önemli faktörler, uçucu külün kimyasal ve mineralojik kompozisyonu, kullanılan alkali çözeltisinin konsantrasyonu ve kür koşulu olduğu belirlenmiştir. Normal oda sıcaklığında uçucu külün yavaş reaksiyona girmesi nedeniyle yüksek sıcaklıklarda kür uygulamak, oluşacak geopolimerin reaksiyon derecesi ve kinetik enerjisini arttırmakta ve daha yoğun bir yapı oluşmasını sağlamaktadır. Böylece, oluşan ürünün mekanik özelliklerinde iyileşme görülmektedir [3,4]

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Kullanılan Malzeme

Geopolimer beton üretiminde kullanılan C tipi uçucu kül (CUK) Soma Termik Santrali'nden, F tipi uçucu kül (FUK) ise Biga Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Ayrıca, geopolimer betonlarla performans karşılaştırması yapmak amacıyla geleneksel beton üretimi için İzmir'de üretilen bir tip CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcı toz malzemelerin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Bağlayıcı toz malzemelerin kimyasal analizi

Bileşen (%)	CUK	FUK	Çimento
SiO ₂	39,62	58,85	18,39
Fe ₂ O ₃	4,06	3,99	3,24
Al ₂ O ₃	18,95	25,68	4,20
CaO	27,67	1,81	64,53
MgO	1,95	1,09	1,32
Na ₂ O	0,66	0,18	0,55
K ₂ O	1,33	2,80	0,76
SO ₃	3,83	0,47	3,46
Kızdırma Kaybı	0,97	3,01	1,42

Tablo 2. Bağlayıcı toz malzemelerin fiziksel özellikleri

Özellik	CUK	FUK	Çimento
Özgül ağırlık	2,53	2,19	3,10
Özgül yüzey (cm ² /g)	2460	3030	3210
0,090 mm elek üstü (%)	18,9	6,6	0,5
0,045 mm elek üstü (%)	41,6	23,1	-

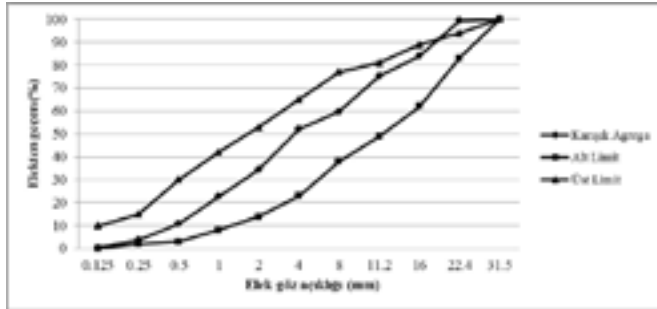
Beton karışımlarında üç farklı tane boyutunda kalker esaslı agrega kullanılmıştır. İnce agrega olarak 0-3 mm tane boyutunda kırma kum, iri agrega olarak ise 5-15 mm ve 15-25 mm tane boyutunda kırma taş kullanılmıştır. Agregalar kapalı ortamda muhafaza edilmiş ve nem içerikleri kontrol edilerek üretilen betonların nem düzeltilmesi yapılmıştır. Agregaların bazı fiziksel özellikleri Tablo 3'te, elek analizi sonuçları ise Tablo 4'te verilmiştir. Karışık agrega, 0-3 mm, 5-15 mm ve 15-25 mm tane boyutundaki agregalar sırasıyla %50, %25 ve %25 kullanılarak elde edilmiştir. Karışık agreganın gradasyon eğrisi Şekil 1'de standart sınırları ile kıyaslanmıştır.

Tablo 3. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Özellik	0-3 mm	5-15 mm	15-25 mm
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	1793	1504	1495
Görünür Özgül Ağırlık	2,73	2,72	2,75
Kuru Özgül Ağırlık	2,67	2,66	2,70
Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık	2,70	2,69	2,72
Su emme (%)	0,70	0,40	0,38

Tablo 4. Kullanılan agregaların elek analizi sonuçları

Elek göz açıklığı, (mm)	Geçen, (%)		
	0-3 mm	5-15 mm	15-25 mm
31,5			100
22,4			98
16		100	37
11,2		99	2
8		39	0
4	100	9	0
2	69	0	0
1	45	0	0
0,50	22	0	0
0,25	7	0	0
0,125	1	0	0



Şekil 1. Karışık agreganın gradasyon eğrisi

Çalışma kapsamında alkali aktivasyonu sağlamak amacıyla sodyum hidroksit ve sodyum silikat kimyasalları kullanılmıştır. Beton karışımlarının oluşturulması için %97 saflıkta ve granül hâlde bulunan sodyum hidroksit ve kimyasal kompozisyonu %8,89 Na₂O, %27,82 SiO₂ ve %63,29 H₂O olan 3 modül (SiO₂/Na₂O 1/3) sodyum silikat kullanılmıştır.

2.2. Karışımların Hazırlanması

Beton karışımları 40 dm³ kapasiteli beton mikserinde hazırlanmıştır. Beton karışımları için tüm malzeme 50 g hassasi-

yetli tartıda tartılmıştır. Öncelikle iri agregası ve ince agregası beton mikserine konulup yaklaşık bir dakika karıştırılmış ve agregaların su emme oranları kadar su ilave edilip agregalar doymuş kuru yüzey durumuna getirilmiştir. Daha sonra bağlayıcı malzeme mikserine eklenmiş ve karıştırma işlemine yaklaşık bir dakika daha devam edilmiştir. Son olarak 1 gün önceden hazırlanan alkali aktivatör çözeltisi kuru karışıma ilave edilip beton karışımı homojen oluncaya kadar yaklaşık iki dakika karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 24 saat sonunda kür işlemine tabi tutulan numuneler, kür süresi bittikten sonra ortam sıcaklığına gelinceye kadar beklenmiştir. Oda sıcaklığına gelen numuneler kalıptan çıkarılmış ve ilgili deneyler gerçekleştirilmiştir.

2.3. Karışım Oranları

Geopolimer betonların mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık dirençlerinin incelenmesi amacıyla dört adet uçucu kül esaslı geopolimer beton üretilmiştir. Kıyaslama amacıyla, geopolimer betonlarla benzer dayanıma sahip iki farklı dayanım sınıfında geleneksel beton üretilmiştir. Geopolimer ve geleneksel betonların karışım oranları ve kür koşulları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Geopolimer ve geleneksel betonların karışım oranları ve kür koşulları

Bileşen (kg/m ³)	FUK (YS)	CUK (YS)	CUK (OS)	50CUK-50FUK (OS)	NB65	NB75
F tipi uçucu kül	300	0	0	150	0	0
C tipi uçucu kül	0	300	300	150	0	0
Çimento	0	0	0	0	300	300
Sodyum hidroksit	168	245	245	220	0	0
Sodyum silikat	20	27	27	24	0	0
İlave su	7	0	0	0	195	225
0-3 mm ince agregası (DYK)	951	905	905	919	929	889
5-15 mm iri agregası (DYK)	475,5	452,5	452,5	459,5	465	444,5
15-25 mm iri agregası (DYK)	475,5	452,5	452,5	459,5	465	444,5
TOPLAM	2397	2382	2382	2382	2354	2303
Su/bağlayıcı oranı	0,38	0,52	0,52	0,46	0,65	0,75
Alkali aktivatör konsantrasyonu	%10 Na ₂ O M _s : 1,6	%14 Na ₂ O M _s : 1,6	%10 Na ₂ O M _s : 1,6	%12 Na ₂ O M _s : 1,6	-	-
Kür koşulu	70°C etüv 5 gün	70°C etüv 5 gün	25°C havada 28 gün	25°C havada 28 gün	Suda 28 gün	Suda 28 gün

Karışımların isimlendirilmesi, etüvde yüksek sıcaklıkta kürlenene numuneler için (YS), ortam sıcaklığında 28 gün boyunca havada kürlenene numuneler için ise (OS) olacak şekilde belirtilmiştir. Ayrıca, iki toz malzeme kullanılan betonun isimlendirilmesi şu şekilde yapılmıştır. 50CUK-50FUK(OS) karışımında toplam toz malzemenin %50'si C tipi uçucu külden, %50'si ise F tipi uçucu külden oluşmaktadır. Çimento esaslı betonlar için ise 0,65 su/çimento oranına sahip karışım NB65, su/çimento oranı 0,75 olan karışım ise NB75 olarak isimlendirilmiştir.

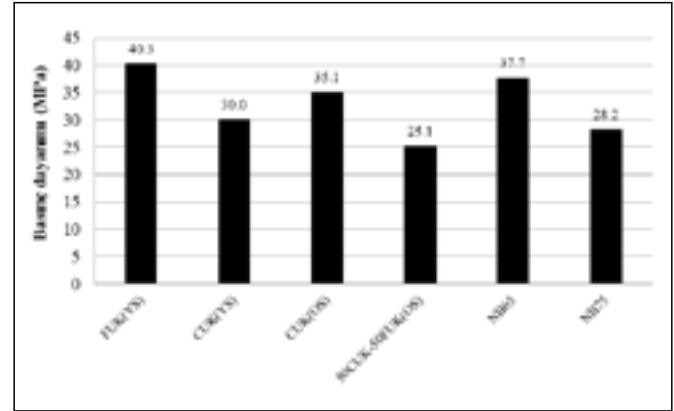
2.4. Deney Yöntemleri

Beton numunelerin basınç dayanımı ise TS EN 12390-3 Standardı'na göre 150 mm boyutlu küp numuneler üzerinde belirlenmiş ve yükleme hızı 6,8 kN/s olarak ayarlanmıştır. Beton numunelerin yarmada çekme dayanımı TS EN 12390-6 Standardı'na göre 100 mm çap ve 200 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler üzerinde belirlenmiş ve yükleme hızı 3 kN/s olarak ayarlanmıştır. Eğilme deneyi TS EN 12390-5 Standardı'na göre gerçekleştirilmiştir. Beton numunelerin eğilme dayanımı 100x100x600 mm boyutlu prizmatik numuneler üzerinde belirlenmiş ve yükleme hızı 3 kN/s olarak ayarlanmıştır. Beton numunelerin elastisite modülü, 100 mm boyutlu küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında yükleme hızı 3 kN/s olarak ayarlanmıştır. Deneyde uygulanan yük değerleri 500 kN kapasiteli yük hücresi ile belirlenmiştir. Numunede meydana gelen deformasyon ise her numune için üç adet düşey olarak yerleştirilen birim deformasyon ölçer (strain-gage) ile ölçülmüştür. Yük ve deformasyon değerleri saniyede iki veri alacak şekilde veri toplama cihazı ile bilgisayara kaydedilmiştir. Beton numunelerin elastisite modülü gerilme-birim deformasyon eğrisinin sıfır noktası ile numunenin basınç dayanımının %40'ına eşit bir gerilme değeri arasındaki doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır. Beton numunelerin ultra ses geçiş hızı ASTM C 597 Standardı'na göre 100 mm boyutlu küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık direnci deneyi, 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat boyunca kurutulan 100 mm boyutlu küp beton numunelerin 5°C/dakika hızla ısıtılarak ve 150°C, 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara üç saat maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra basınç dayanımındaki değişimler ölçülmüştür.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

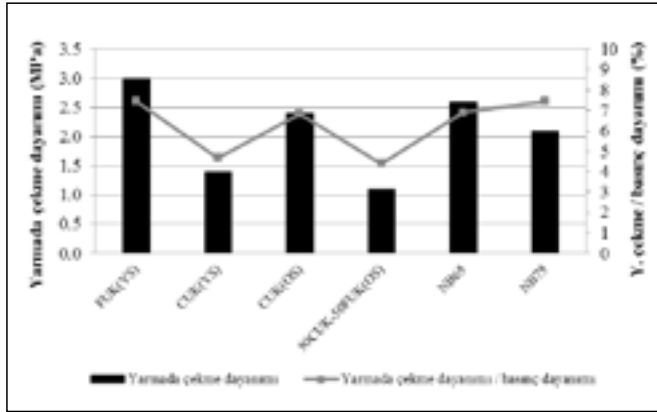
Üretilen betonların basınç dayanımları Şekil 2'de gösterilmiştir. F tipi uçucu kül esaslı geopolimer beton üretilen beton-

lar arasında 40,3 MPa ile en yüksek dayanıma sahiptir. C tipi uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda ise etüv kürüne maruz kalan karışımlar 30 MPa, ortam sıcaklığında 28 gün kürlenene karışımlar ise 35,1 MPa dayanım göstermiştir. 50CUK-50FUK(OS) betonunun basınç dayanımı C ve F tipi uçucu küllerin ayrı ayrı kullanılması ile elde edilen basınç dayanımlarından daha düşük (25,1 MPa) olmuştur. Bunun nedeninin, F tipi uçucu külün ortam sıcaklığında reaksiyona girmemesi sonucu bağlayıcılık özeliği kazanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Geleneksel beton olarak üretilen NB65 ve NB75 betonların basınç dayanımları 37,7 MPa ve 28,1 MPa olarak belirlenmiş ve geopolimer betonların basınç dayanımlarına yakın değerler elde edilmiştir.



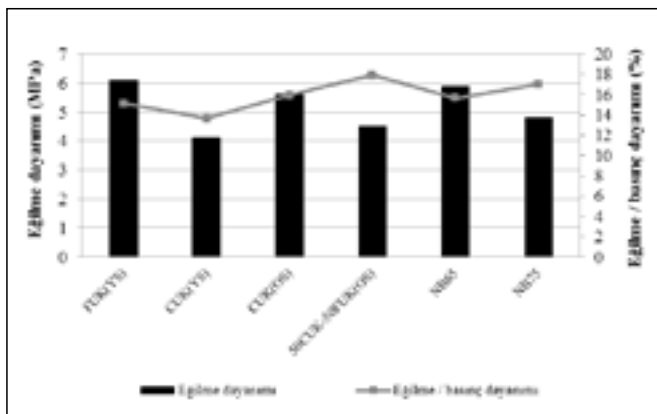
Şekil 2. Betonların basınç dayanımı sonuçları

Betonların yarmada çekme dayanımları Şekil 3'te gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, geopolimer betonlar arasında yarmada çekme dayanımı en yüksek olan betonların sırasıyla FUK(YS) (3 MPa), CUK(OS) (2,4 MPa) olduğu belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı yüksek olan bu karışımların basınç dayanımları da yüksek çıkmıştır. CUK(YS) ve 50CUK-50FUK(OS) betonlarının yarmada çekme dayanımı ise sırasıyla 1,4 MPa ve 1,1 MPa ölçülmüştür. Geopolimer betonların yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı %4,4 ile %7,4 arasında çıkmıştır. Bu oran, CUK(YS) ve 50CUK-50FUK(YS) betonları için diğer geopolimer ve geleneksel betonlara kıyasla daha düşük değerler almıştır. C tipi uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda yüksek sıcaklıkta kürlenene karışımın yarmada çekme dayanımının ortam sıcaklığında kürlenene karışımına göre düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, yüksek sıcaklıkta kürlenene numunelerin sıcaklıktan dolayı yapısında mikro çatlakların oluşması ve agrega ile bağlayıcı arasındaki geçiş bölgesinin zayıflamasından kaynaklanmaktadır [5].



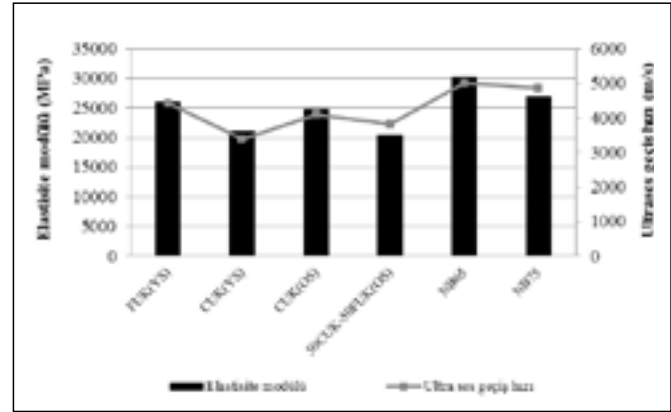
Şekil 3. Betonların yarmada çekme dayanımı sonuçları

Betonların eğilme dayanımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Eğilme dayanımı en yüksek olan betonların sırasıyla FUK(YS) (6,1 MPa), CUK(OS) (5,6 MPa) olduğu belirlenmiştir. 50CUK-50FUK(OS) ve CUK(YS) betonlarının eğilme dayanımı ise sırasıyla 4,5 MPa ve 4,1 MPa ölçülmüştür. Geopolimer betonların eğilme dayanımının basınç dayanımına oranları %13,7 ile %179 arasında değiştiği belirlenmiştir. CUK(YS) betonunun eğilme dayanımı yine yarmada çekme dayanımında olduğu gibi basınç dayanımına göre oldukça düşük değer almıştır. Çimento esaslı betonların eğilme dayanımı ise 4,8 MPa ve 5,6 MPa olarak ölçülmüştür. Bu betonlarda eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı ise %15,6 ile %17 arasında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 4. Betonların eğilme dayanımı sonuçları

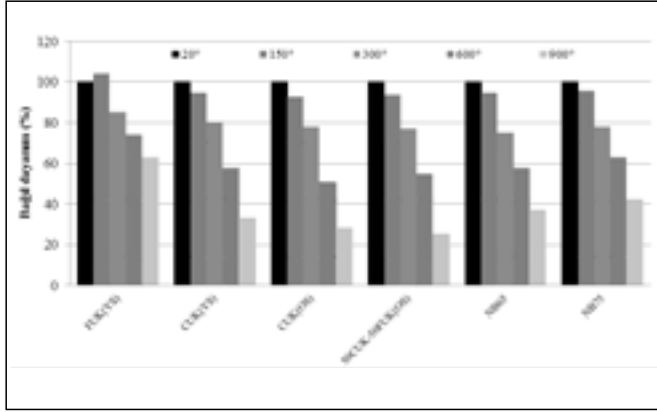
Deneyel çalışma kapsamında üretilen betonların elastisite modülü sonuçları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Betonların elastisite modülü sonuçları

Deney sonuçlarına göre, geopolimer betonların elastisite modüllerinin 20400 MPa ile 26000 MPa arasında olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, geopolimer betonların elastisite modülü değerleri çimento esaslı betonların elastisite modülü değerlerine göre daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Bununla ilgili olarak, benzer basınç dayanımına sahip NB65 (37,7 MPa) ve CUK(OS) (35,1 MPa) karışımlarının elastisite modülleri arasında %21'lik bir fark olduğu tespit edilmiştir. Geopolimer betonların elastisite modüllerinin genel olarak düşük olmasının nedeninin, geleneksel betonlara göre daha boşluklu bir yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Betonların boşluklu yapısı, ultra ses geçiş hızı deneyi ile değerlendirilmiştir. Geleneksel betonların ultra ses geçiş hızları geopolimer betonlarınkine göre daha yüksek değerler almıştır. Ayrıca, deney esnasında geopolimer betonlardaki çatlak oluşumunun geleneksel betonlara göre daha hızlı olması [6] sonucu bu tür betonların elastisite modüllerinde düşüşe neden olduğu belirtilmektedir.

Üretilen betonların yüksek sıcaklık deneyi sonucunda meydana gelen bağıl dayanımları Şekil 6'da gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, tüm karışımlarda yüksek sıcaklık direnci en fazla olan karışımın FUK(YS) olan karışıma ait olduğu belirlenmiştir. 900°C sıcaklığa maruz kalan FUK(YS) betonunun basınç dayanımında %37'lik bir azalma meydana gelmiştir. En düşük yüksek sıcaklık direncine sahip olan karışımın ise 50CUK-50FUK(OS) olduğu tespit edilmiştir. 50CUK-50FUK(OS) betonunun 900°C sıcaklığa maruz kalması sonucu basınç dayanımı %75 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Geleneksel beton ile geopolimer betonların yüksek sıcaklık direnci karşılaştırıldığında F tipi uçucu kül esaslı geopolimer betonların geleneksel betona göre daha dirençli, C tipi uçucu kül esaslı geopolimer betonların ise geleneksel betona göre daha dirençsiz olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Betonların yüksek sıcaklık direnci deney sonuçları

3. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- F tipi uçucu kül ile üretilen ve yüksek sıcaklıkta kürlen geopolimer betonunun mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci benzer dayanıma sahip çimento esaslı betona göre daha yüksektir.
- C tipi uçucu kül ile üretilen ve yüksek sıcaklıkta kürlen geopolimer betonunun mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci benzer dayanıma sahip çimento esaslı betona göre daha düşüktür.
- C tipi uçucu kül ile üretilen ve ortam sıcaklığında kürlen geopolimer betonunun mekanik özellikleri benzer dayanıma sahip çimento esaslı betona göre yakın performans gösterirken, yüksek sıcaklık direnci daha düşüktür.
- Bağlayıcısının %50'si C tipi uçucu kül ve %50'si F tipi uçucu külden oluşan ve ortam sıcaklığında kürlen betonunun mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci, benzer dayanıma sahip çimento esaslı betonla kıyaslandığı zaman, daha düşüktür.

Teşekkür

Yazarlar, 213M506 No.lu proje ile destek veren TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

Kaynaklar

1. Davidovits, J., "Properties of geopolymer cements", 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes (edited by Krivenko), Kiev, Ukraine, 1, 131-149, 1994.
2. Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindaprasart P. (Eds.), "Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes", Woodhead Publishing, Cambridge, 2015.
3. Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T., "Alkali-activated Fly Ashes, A Cement for the Future", Cement and Concrete Research, No.29(8), pp.1323-1329, 1999.
4. Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., "Characterization of Fly Ashes: Potential Reactivity as Alkaline Cements" Fuel, No.82, pp.2259-2265, 2003.
5. Andıç Çakır, Ö., Ramyar, K., Tuyan M., Üzümlü, O., Boyacı, O.C., "Doğal ve Atık Malzemelerle Geopolimer Harç ve Beton Geliştirilmesi", 213M506 No.lu TÜBİTAK Projesi Sonuç Raporu, İzmir, 2016.
6. Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Chindaprasart, P., "Compressive Strength, Modulus of Elasticity, and Water Permeability of Inorganic Polymer Concrete." Materials and Design, No.31, pp. 4748-4754, 2010.