

Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu İkameli ve Uçucu Kül Bağlayıcı Geopolimer Harçlarda Eğilme Dayanımı Özellikleri

Osman ULUSU¹, İlhami DEMİR², Özer SEVİM³ ve Emre TATAR⁴

¹ Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye

² Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye

³ Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye

⁴ İktisat ve İdari Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Finansman Bölümü, Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye

*(ulukale71@gmail.com)

Özet – Bu çalışmada uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile alkali ve su ile polimerleştirilerek ikame olarak geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Geopolimer harçlar Çayırhan C sınıfı uçucu kül, CEN referans kumu ile sodyum hidroksit ve içme suyu kullanılarak geopolimer 4M,6M,8M olarak aktive edilmiştir. Karışım oranları ağırlıkça, kum/uçucu kül oranı 3, su/uçucu kül oranı 0,44 ve sodyum/uçucu kül oranı 0,08 olarak referans alınmış olup bu değerler öğütülmüş yüksek fırın cürufunun %5, %10, %15, %20, %25 ikamesiyle karışım molaritesi 4M,6M,8M olacak şekilde teste alınmıştır. Hazırlanan karışımlar, 3 gün, 7 gün ve 28 gün süresince gün ışığı kürü ve 47°C sıcaklıkta kür edilerek deneylere tabi tutulmuştur. Ayrıca eşdeğer karışımlar 3 gün, 7 gün, 28 gün süresince gün ışığı sıcaklığında küre tabi tutulduktan sonra toplamda kür süresi 7 gün olacak şekilde laboratuvar ortamında (25±2°C ve bağıl nemi %35±5) havada kür edilmiş olup, deneylere tabi tutulmuştur. Sodyum hidroksit ile aktive edilen uçucu kül referanslı ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun %5, %10, %15, %20, %25 ikamesiyle elde edilen harçların;

Eğilme Dayanım Testleri (3 Günlük)

Eğilme Dayanım Testleri (7 Günlük)

Eğilme Dayanım Testleri (28 Günlük)

özellikleri ölçülmüştür.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun artmasıyla dayanımların önemli oranda etkilenecek arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, 47°C'lik ısı kürü ile 6,333 MPa mertebesinde eğilme dayanımına ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Geopolimer Beton, Eğilme Dayanımı, Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül

1. GİRİŞ

Beton, dünyada sudan sonra yeryüzünde en çok kullanılan madde olarak bilinmektedir.

Beton kullanımının avantajları kadar olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Betonarme yapıların yıkılması sonucu oluşan inşaat yıkıntı atıkları yeniden kullanıma uygun değildir. Ayrıca bu atıklar buldukları çevreyi de olumsuz yönde etkilemektedir. Bu etkenler araştırmacıları atıklarının değerlendirilmesi konusunda çalışmalar yapmaya teşvik etmiştir (Mak vd., 2019; Liu vd., 2022; Lai vd., 2016; Yuan vd., 2013; Liu vd., 2020).

Yapı malzemeleri alanında yapılan bu vb. araştırmalar ve teknolojik gelişmelere rağmen beton hala yapı endüstrisinde en önemli rolü oynamaktadır. Ancak bu önemli rolü sürdürebilmek için aynı zamanda çevre dostu özelliklere sahip olması gerekmektedir. Çünkü beton üretiminde, hammaddelerin elde edilmesi, betonun taşınması ve betonun yerleştirilmesine kadar her aşamada betonun karbon izi ortaya çıkmaktadır. Örneğin, beton hammaddelerinden olan çimentonun üretim sürecinde bir ton klinker elde edebilmek için yaklaşık 850 kg CO₂ doğaya salınmaktadır (Puertas vd., 2008). Bu etkiyi biraz olsun azaltabilmek için

çimento yerine ikame edilen malzemeler kullanılmaktadır. İkame malzemeler, yalnızca doğal kaynakları korumakla kalmaz aynı zamanda kentsel ve endüstriyel atıkları betona dahil ederek atık yönetimine de yardımcı olurlar. İkame yönetiminin yanında günümüzde araştırılan önemli konulardan birisi de geopolimer üretimi konusudur.

Geopolimerler, daha yeşil bir beton arayışındaki ilk çabalardan birini temsil eder. İlk olarak Joseph Davidovits tarafından önerilen geopolimer beton terimi, şimdi alüminosilikattan daha geniş bir alkali aktive bağlayıcı çeşidi ile ilgilidir (Zhang vd., 2013). Uçucu kül, atık cam tozu, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi yüksek hacimli endüstriyel atığın entegrasyonu nedeniyle, geopolimerler hem yöntem hem enerji hem de CO₂ emisyonları açısından beton üretiminin çevresel ayak izini önemli ölçüde azaltmanın bir yolu olarak görülmektedir. (Collivignarelli vd., 2021).

Geopolimerler alüminosilikat esaslı malzemelerin çeşitli alkali aktivatörler ile aktive edilmesi sonucu üretilirler. Bu aktivatörler genellikle sodyum silikat (Na₂SiO₃), sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) zaman zaman birlikte ya da tekil olarak kullanılırlar (Somna vd., 2011; Ravikumar and Neithalath, 2012; Silva de Vargas vd., 2014).

Geopolimerlerin diğer ana bileşenleri ise alüminyum silikat (bağlayıcı), kum ve beton üretimi için agregalardır (Huseien vd., 2017).

Geopolimer karışımlarda alümina silikat olarak genelde puzolanik özellik gösterme potansiyeli bulunan malzemeler kullanılmaktadır. Geopolimerlerin özellikleri puzolanın kimyasal içeriğinden etkilenir. Örneğin puzolan içerisinde bulunan CaO su ile reaksiyona girebilir ve geopolimerlerin mekanik özelliklerini artıran kalsiyum silikat hidratlı bileşikler oluşturabilir (Diaz, 2010). Kalsiyum içeriğine göre farklı jel yapıları oluşabilmektedir. Düşük kalsiyum içeriğinde (sodyum alümina silikat hidrat) N-A-S-(H) jelleri, yüksek kalsiyum içeriğinde de (kalsiyum alümina silikat hidrat) C-A-S-H jelleri oluşmaktadır. Geopolimer üretiminde puzolan kullanıldığı için reaksiyon sürecinde hidratasyon ısıları portland çimentosu ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Ayrıca geopolimerler yüksek basınç dayanımı ve asitlere karşı yüksek direnç göstermesi

nedeniyle birçok alanda kullanılmaktadır (Patankar vd., 2015; Al-Akhras, 2006). Yine de günümüzde beton kadar tanınmamakta ve yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu kapsamda molarite olarak en uygun şekilde hazırlanmış geopolimer yapı içerisine uçucu kül ve çelik lif ikamesiyle elde edilecek karışımın lego kalıplarına yerleştirerek uygun sıcaklıkta (40–100 °C) ve sürede ısı kürü uygulanmasıyla oluşturulacak betonların dayanım ve darbe emici özelliklerini normal portland çimento ile üretilmiş malzemelere göre ekonomik, çevreci ve mukavemeti yüksek olacağı görülmektedir. Bu sayede askeri amaçlı güvenliği sağlanmak istenilen konumlarda hızlı bir şekilde kurulmak istenilen yapı inşa edilecektir.

Uçucu küller kalsiyum oksit içeriklerine ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarına göre sınıflandırıldığı bilinmektedir. Kalsiyum oksit içeriği %10'dan fazla ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃: %50 olan küllere C sınıfı, kalsiyum oksit içeriği %10'dan düşük ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ %70 olan küller de F sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılır. C sınıfı külün bir miktar bağlayıcılık özelliği de bulunmaktadır. Uçucu küller, bu özellikleri nedeni ile son zamanlarda birçok ülkede yaygın olarak, mineral katkı malzemesi olarak çimento ile beraber beton üretiminde kullanılmaktadır. Ancak, ülkemizde uçucu külün kullanım yaygınlığı oldukça düşüktür.

Bu çalışmada yerel Çayırhan C sınıfı uçucu külünün alkali ile aktivasyonu ile çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılabilirliği ve geopolimer bağlayıcının lego beton imalatında kullanılabilirlik amacıyla araştırması yapılmıştır. Özellikle uçucu kül referanslı öyfc katkılı karışımın alkali ve gün ışığı ısısı ile aktifleştirilerek geopolimer harcın mekanik özellikleri üzerine dayanım etkisi araştırılmıştır.

Geopolimer betonun uygun koşullarda ve doğru malzeme ve molarite karışım hesabı yapılarak normal portland çimentoya kıyasla ekonomik çevreci ve daha fazla dayanım gösterdiği yapılan araştırmalar sonucu görülmektedir. Aktivatörle yapılan beton üretimlerinde genel olarak molarite hesabı ve agrega çözelti karışım hesabı dayanımı etkileyen en önemli durum olmaktadır. Geopolimer betonun doğru karışım hesabı ve ısı kürü uygulandığında 90 mPa basınç dayanımlarına

ulaştığı araştırmalarda görülmektedir. Ancak dezavantaj olarak 4 oluşturulan yapının su ile sürekli temasında dayanımının oldukça gerilediğini gösteren durumlarda mevcuttur. Lego şeklinde oluşturulacak geopolimer betonun yapısı itibariyle birleşim bölgelerinde zayıflık görülebileceği aşıkardır. Bu dezavantajlara rağmen, doğru karışım ve molarite hesabı ile oluşturulan geopolimer betona uygulanacak çelik lif ikamesi (%1-

%2) ile darbe dayanımının arttığı, uçucu kül ikamesi ile basınç dayanımını artırıp suya karşı oluşabilecek zararların azaldığı ortaya konmuştur. F tipi uçucu kül ikameli geopolimer betonun yüksek sıcaklıklarda yapılmış kürleri ile oluşturulan betonlarda yangın dayanımı uçucu kül ikameli Portland çimentoya göre daha üstün gözükmektedir. Geopolimer betonlar çimentosuz beton olarak bilinmektedir. Normal Portland çimentoya göre önemli avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Karbondioksit salınımını azaltmakta, önemli görülecek düzeyde yaklaşık 2 katına kadar basınç dayanımı verebilmekte ve maliyet açısından daha ekonomik görülmektedir. Basınç dayanımının bu denli yüksek çıkması ve hızlı bir şekilde uygulamaya geçirilebilmesi adına lif katkı ile birlikte çekme dayanımının artırılabilmesi ve bu sayede basınç çekme dayanımının normal betonlara göre daha iyi sonuçlar sunabilmesi lego şeklinde kalıplara basılarak hazır hale getirilmesi sayesinde zaman açısından hızlı yapımı askeri ve güvenlik anlamında karakollarda ve koruma kalkan amaçlı her türlü sahada oldukça verimli ve etkili olacaktır. Böylece kullanılan malzemenin ekonomik, çevreci, yüksek dayanımlı ve lego şeklinde hazır kullanımıyla zamandan tasarruf, güvenlik ve koruma açısından maksimum performans göstereceği görülmektedir.

1. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

2.1.1. Uçucu Kül

Uçucu kül Çayırhan Termik Santralinden temin edilmiştir. C sınıfı uçucu külün kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Sugözü uçucu külü, $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ değerinin %70'nin üzerinde olması ve CaO miktarının %10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir. Uçucu külün tanecik yoğunluğu 2390

kg/m³ ve inceliği (>45µm) %12 dir. 28 ve 90 günlük aktivite endeksi sırasıyla %78,20 ve %93,80 dir.

Tablo 1. Uçucu Külün Kimyasal Kompozisyonu (%).

Kimyasal Kompozisyonlar	Uçucu Kül
SiO ₂	41,49
Al ₂ O ₃	16,34
Fe ₂ O ₃	0,61
CaO	29,26
S.CaO	0,90
SO ₃	2,12
Na ₂ O	0,88
Cl-	0,0108
K.K	0,40

2.1.2. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Çalışmada Ereğli Demir Çelik İşletmesinden temin edilmiş Yüksek Fırın Cürufu (YFC) kullanılmıştır.

Tablo 2. ÖYFC'nin Kimyasal Kompozisyonu (%).

Kimyasal Kompozisyonlar	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	41,49
Al ₂ O ₃	16,34
Fe ₂ O ₃	0,61
CaO	29,26
MgO	7,68
SO ₃	1,90
Na ₂ O	0,80
K ₂ O	1,10
Cl-	0,01
K.K	0,17

2.1.3. Karışım Suyu

Geopolimer harcın karışımında TS EN 196-1 standartlarına uygun şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.4. Kum

TS EN 196-1 standartına uygun maksimum agrega boyutu 2 mm olan Rilem Cembureau standart kumu kullanılmıştır.

Tablo 3. Kum Granülometrisi ve Sınır değerleri

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0,08	0,16	0,5	1,0	1,6	2,0
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Sınır (%)	99±1	87±5	67±5	33±5	7±5	0

2.1.5. Aktivatör

Geopolimer karışımın aktivatörü olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Su ile NaOH karıştırılarak 4,6 ve 8 molaritede ayarlanmıştır.

Tablo 4. Sodyum Hidroksit (NaOH) Kimyasal Özellikleri

Özellikler	Sodyum Hidroksit
Molekül Formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40
NaOH (%)	>97
Na ₂ CO ₃ (%)	<1
Cl (%)	<0.01
SO ₄ (%)	<0.01
Pb (%)	<0.002
Al (%)	<0.002
Fe (%)	<0.002

2.2. Yöntem

2.2.1 Geopolimer Karışımı

Harçlar CEN referans kumu, Çayırhan C sınıfı uçucu külü, sodyum hidroksit ve içme suyu kullanılarak çimentosuz olarak üretilmişlerdir. Harç karışımları referans olarak ağırlıkça, kum/uçucu kül oranı 3, su/uçucu kül oranı 0,44 ve sodyum/uçucu kül oranı 0,08 olacak şekilde hazırlanmış ve Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5 Geopolimer Harç Karışım Malzeme Miktarları (g).

Molarite	Kum	Uçucu Kül	Öyfc	NaOH	Su
4M	1350	450	0	36	216,9
4M	1350	427.5	22.5	36	216,9
4M	1350	405	45	36	216,9
4M	1350	382.5	67.5	36	216,9
4M	1350	360	90	36	216,9
6M	1350	450	0	54	212,9
6M	1350	427.5	22.5	54	212,9
6M	1350	405	45	54	212,9
6M	1350	382.5	67.5	54	212,9
6M	1350	360	90	54	212,9
8M	1350	450	0	72	208,8
8M	1350	427.5	22.5	72	208,8
8M	1350	405	45	72	208,8
8M	1350	382.5	67.5	72	208,8
8M	1350	360	90	72	208,8

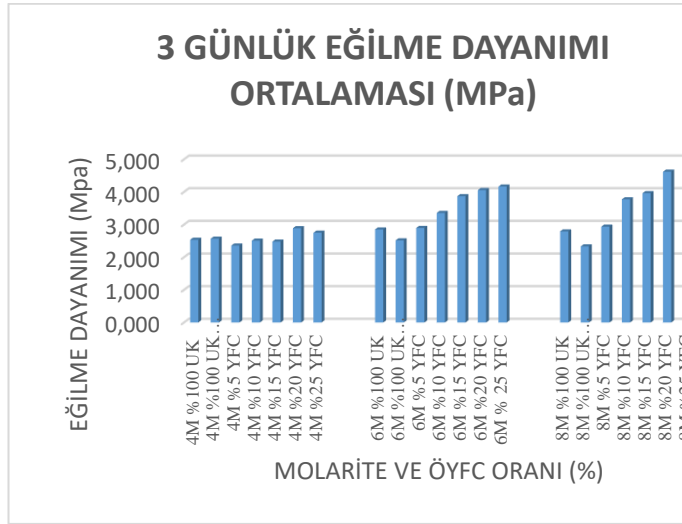
Hazırlanan karışımlar harç kalıpları ile birlikte 3 gün, 7 gün, 28 gün ve 90 gün süresince gün ışığı ve 47°C sıcaklıkta 8 saat kür edilerek, kalıptan çıkarılan numuneler oda sıcaklığına kadar soğuması beklenerek deneylere tabi tutulmuştur. Ayrıca eşdeğer karışımlar 3 gün, 7 gün ve 28 gün süresince gün ışığı ve 47°C sıcaklığında küre tabi tutulduktan sonra kalıptan çıkarılarak toplamda kür süresi 28 güne tamamlanacak şekilde laboratuvar ortamında (25±2°C ve bağıl nemi %35±5) havada kür edildikten sonra deneylere tabi tutulmuştur.

Alkali ile aktive edilen uçucu kül harçların üzerinde basınç dayanımı, eğilme çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. TS EN 1015-11 doğrultusunda 40x40x160 mm numuneler üzerinde yürütülen dayanım ölçümlerinde, tek noktadan yükleme deneyi altında harç numunenin kırıldığı gerilme değeri, eğilme dayanımı olarak alınmış; eğilme deneyinden çıkan kırılmış numunelerin çimento test presinde 40x40 mm başlık altındaki kırılma değeri ise basınç dayanımı olarak değerlendirilmiştir. Eğilme deneylerinde her bir karışım için 3 adet prizma numune kullanılırken, basınç deneylerinde ise eğilme deneyinden geriye kalan 6 adet yarım prizma teste tabi tutulmuştur.

3.BULGULAR

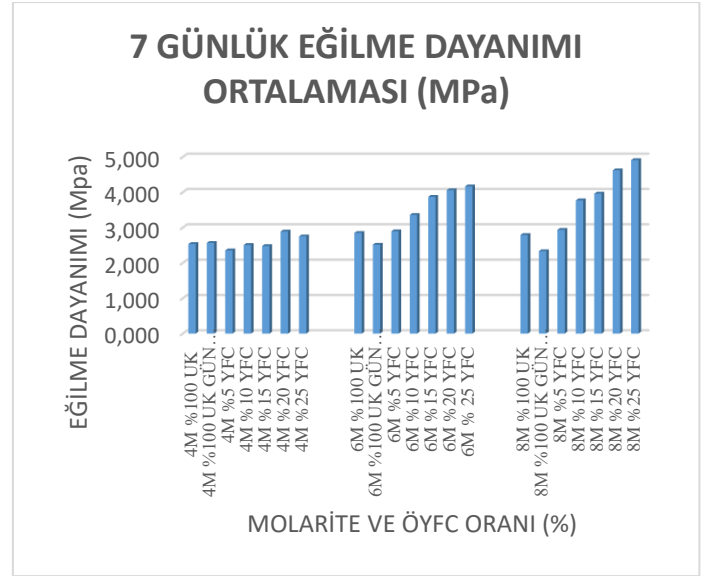
3.1.Eğilme Dayanımı

Çalışmada hazırlanan geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımları Şekil 4, 5 ve 6' da sunulmuştur. Tabloların tümünden görüleceği üzere molarite ve ÖYFC katkısı arttıkça geopolimer harcın basınç dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. 4M,6M ve 8M'lık 8 saat ısıl kür süresinden sonra %25 ÖYFC katkılı harç karışımının 1.11 MPa olan harç eğilme dayanımı, 3 , 7 ve 28 günlük beklemeden sonra sırasıyla en yüksek değerleri , 2.221, 3.864, 4,618 MPa değerlerine ulaşmıştır.



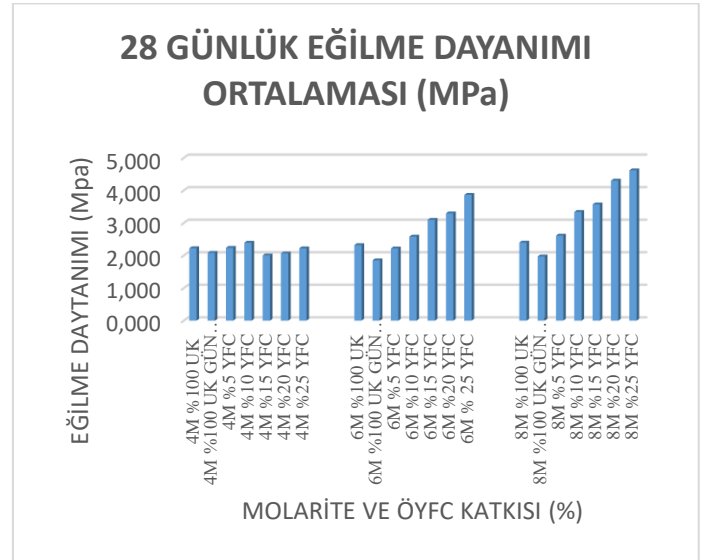
Şekil 1: Molarite, ısıl kür ve öyfc katkısının 3 günlük eğilme dayanımına etkisi.

Şekil 1'den de görüldüğü üzere 3 günlük ortalamalarda öyfc katkısı ve molarite arttıkça eğilme dayanımların yükseldiği görülmektedir. Bununla birlikte zaman içerisinde bu artışların da önemli ölçüde arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2 Molarite ve ÖYFC katkısının 7 günlük eğilme dayanımına etkisi.

Aynı eşdeğer numunelerin uygulanan 4M,6M ve 8M 'lık 8 saat ısıl kür süresinden sonra %25 ÖYFC katkılı harç karışımının 1.24 MPa olan harç eğilme dayanımı Şekil 2'den görüleceği üzere, 7 günlük beklemeden sonra sırasıyla en yüksek değerleri , 2.751, 4.166, 4.911 MPa değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 3 Molarite ve ÖYFC katkısının 28 günlük eğilme dayanımına etkisi.

4M,6M ve 8M'lık 8 saat ısıl kür süresinden sonra %25 ÖYFC katkılı harç karışımının 1.34 MPa olan harç eğilme dayanımı Şekil 3'ten görüleceği üzere, 28 günlük beklemeden sonra sırasıyla en yüksek değerleri, 4.620, 5.342, 6.333 MPa değerlerine ulaşmıştır.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada C sınıfı uçucu külün bağlayıcılık özelliğinin fazla olması çalışmada kullanılan öyfc ikamesiyle beraber daha da arttığı ve bu sayede eğilme dayanımı testlerinde referans bağlayıcıya göre oransal olarak daha fazla bağlayıcılık özelliği göstererek tüm dayanımlarda yadsınamaz bir artış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca testler esnasında C sınıfı uçucu külün eksik olan Al₂O₃ takviyesinin Labaratuvar ortamında alüminyum ve sodyum hidroksit reaksiyonuyla oluşturulan Alüminat ile %5 oranında ilavesiyle dayanımlarda önemli ölçüde artış sağlandığı ortaya çıkmıştır. C sınıfı uçucu külün eksik içerik maddelerinin araştırılması ile daha fazla dayanım elde edilebileceği öngörülmüştür.

5. SONUÇLAR

Uçucu kül ile üretilen geopolimer harcın eğilme dayanımlarının molarite ve ÖYFC katkısının artmasıyla genel olarak arttığı görülmüştür. Bunun nedeninin ise geopolimerizasyon reaksiyonlarında ÖYFC nin içerisinde barındırdığı yüksek CaO bileşiği ve reaksiyonda molaritenin reaksiyon sentezini artırmasıyla devam etmesinden kaynaklanması olarak gösterilmektedir. Bununla birlikte test süresi arttıkça bu dayanım artışlarının da önemli ölçüde arttığı ve belli bir zaman sonra durduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi ise alkali aktivatörlerin jelleri oluşturacak malzemelerinin ortamda kalmaması ile açıklanabilir. C sınıfı uçucu kül bağlayıcısının eksik yönleri olan alüminat ve kalsiyum oksit ayrıca karışıma ikame edilerek daha yüksek eğilme dayanımı elde edilebileceği çalışmalarda görülmüştür.

Sonuç olarak, sodyum hidroksit ile uçucu külü aktive ederek elde edilen geopolimer, 47°C'lik 8M %25 ÖYFC ikameli 8 saat ısıtma kürü ile 28 günlük 6,333 MPa mertebesinde eğilme dayanımına ulaşmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada her zaman desteklerini sunan ve çalışmalarımda ilham kaynağım olan değerli hocam Prof. Dr. İlhami DEMİR ve danışman hocam Doç. Dr. Özer SEVİM' e teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Al-Akhras, N. M. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and concrete research*, 36(9), 1727-1734.
- [2] Altan, E., & Erdoğan, S. T. (2012). Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 131-139.
- [3] Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Miino, M. C., Cillari, G., & Ricciardi, P. (2021). A review on alternative binders, admixtures and water for the production of sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126408.
- [4] de Vargas, A. S., Dal Molin, D. C., Masuero, Â. B., Vilela, A. C., Castro-Gomes, J., & de Gutierrez, R. M. (2014). Strength development of alkali-activated fly ash produced with combined NaOH and Ca (OH) 2 activators. *Cement and concrete composites*, 53, 341-349.
- [5] Diaz, E. I., Allouche, E. N., & Eklund, S. (2010). Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. *Fuel*, 89(5), 992-996.
- [6] Hussein, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Hussein, A. A. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 54-74.
- [7] Lai, Y. Y., Yeh, L. H., Chen, P. F., Sung, P. H., & Lee, Y. M. (2016). Management and recycling of construction waste in Taiwan. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 723-730.
- [8] Liu, J., Gong, E., & Wang, X. (2022). Economic benefits of construction waste recycling enterprises under tax incentive policies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(9), 12574-12588.
- [9] Somna, K., Jaturapitakul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindaprasart, P. (2011). NaOH activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6), 2118-2124.
- [10] Yuan, H., Lu, W., & Hao, J. J. (2013). The evolution of construction waste sorting onsite. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 483-490.
- [11] Zhang, Q., Ye, G., & Koenders, E. (2013). Investigation of the structure of heated Portland cement paste by using various techniques. *Construction and Building Materials*, 38, 1040-1050.
- [12] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, IEEE Std. 802.11, 1997.