

Endüstriyel Atık Kullanılarak Üretilen Geopolimer Harçların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Özlem Çavdar^{1*}, Hülya Temizer^{2*}

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane Üniversitesi, Türkiye

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane Üniversitesi, Türkiye

*(hlytemizer@gmail.com)

Özet – İnşaat sektörü uygulamalarında kullanılan malzemelerin çevreci, ergonomik ve geri dönüşebilir olması beraberinde küresel iklimin korunması, enerji tasarrufu, atık su arıtımı, katı atık yönetimi gibi faydaları getirecektir. Beton üretiminde önemli bir bileşen olan çimentonun çevresel etkileri nedeniyle, günümüzde birçok araştırmacı tarafından kullanımının sorgulandığı bilinmektedir. Sera gazı emisyonlarından biri olan CO₂ gazı salınımında, çimento üretiminin payı oldukça yüksektir. Bu nedenle birçok araştırmacı yeni, alternatif ve sürdürülebilir özellikleri ile ön plana çıkan geopolimer bağlayıcılar konusuna yönelmiştir. Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak Sivas/ Kangal termik santralinden elde edilen uçucu kül ile yine atık bir malzeme olan öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Uçucu kül ve Yüksek Fırın Cürufu bağlayıcı malzeme olarak farklı oranlarda (75YFC25UK, 85YFC15UK, 95YFC5UK VE 100YFC) hazırlanmıştır. Alkali aktivatör olarak 10M ve 12M NaOH ve Na₂SiO₃ (Sodyum Silikat) kullanılmıştır. Na₂SiO₃ / NaOH oranı 2,5 olarak belirlenmiş ve bütün numunelerde sabit tutulmuştur. Hazırlanan numunelere 24 saat süre ile 75°C etüvde kür uygulanmıştır. 7 ve 28 günlük numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi için eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek basınç dayanımı, 28 günlük numunelerde 10M NaOH çözeltisinde %100 yüksek fırın cürufu (100YFC) ve 12M NaOH çözeltisinde %95 yüksek fırın cürufu+ %5 uçucu kül (95YFC5UK), 75°C etüv numunelerinde elde edilmiştir. Eğilmede çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde ise en yüksek sonuçların 28 günlük 10M ve 12M NaOH çözeltisinde %95 yüksek fırın cürufu + %5 uçucu kül (95YFC5UK) numunelerinde, 75°C etüv numunelerinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Alkali Aktivatör, Molarite, Geopolimer harç

I. GİRİŞ

Geopolimer beton sayesinde özellikle inşaat sektöründe hem atık malzemelerin kullanımıyla sürdürülebilirliğin sağlanması, hem de küresel ısınmaya sebep olan karbondioksit emisyonuna önemli derecede katkı sağlaması önemli avantajlar olarak öne çıkmaktadır [1]. Davidovits geopolimer alanında yaptığı çalışmalar doğrultusunda geopolimer betonlar üzerinde kimyasal saldırılara karşı, aşınma ve çözünme, erken ve yüksek dayanım gibi deneyler sonucunda geleneksel betona alternatif olan geopolimer betonun birçok konuda daha iyi sonuç oluşturduğunu gözlemlemiştir. Çalışmasında geopolimer betonun

7 günlük basınç dayanımının 35-40 MPa' ya kadar ulaştığını göstermiştir [2]. Binici vd., (2012) tarafından yapılan bir başka çalışmada, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis kumu ve pomzanın NaOH ile aktive edilerek geopolimer beton üretiminde kullanımı incelenmiştir. Bu amaçla 4x4x16 cm ve 10x10x10 cm boyutlarında geopolimer beton harçlar üretilmiştir. Numuneler 20 saat süresince 100 ve 150 °C sıcaklığındaki etüvde bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimerler en yüksek eğilme ve basınç dayanımlarına sahip olduğu anlaşılmıştır [3]. Chi vd., (2013) yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda yüksek fırın

cürufu/uçucu küllü bağlayıcılar ile aktive edilmiş harçların basınç ve eğilme dayanımı, kuruma büzülmesi, su emme deneylerini incelemiştir. Sodyum oksit (Na_2O) konsantrasyonları ağırlık olarak %4 ve %6 oranlarında ve sıvı sodyum silikat (sodyum oksite kütleli oranda) ilave edilerek aktivatör olarak hazırlanmıştır. Sonuçlara göre Portland çimentoya kıyasla, alkali aktivatörlü uçucu kül/yüksek fırın cürufu harçlarında basınç ve eğilme dayanımı, %4 oranında Na_2O içeren numunelerde eğilme dayanımları 9.32 MPa, % 6 oranında Na_2O içeren numunelerde ise bu değer yaklaşık %10-16 daha fazla olduğu görülmüştür [4]. Adak vd., [5] çalışmalarında, uçucu kül bazlı geopolimer beton/harç aktivatörün molar konsantrasyonuna bağlı olarak erken dayanım geliştirmeleri için ısı aktivasyonuna ihtiyaç duyduğunu raporlamıştır. Görhan vd., [6] termik bir santralden üretilen F sınıfı uçucu külün kullanıldığı geopolimer harçları, farklı NaOH konsantrasyonlarında, farklı sıcaklıklarda ve kür sürelerinde uygulamıştır. Sonuçlar incelendiğinde, kür süresi ve sıcaklığının geopolimer harçlar üzerinde etkili olduğu ve basınç dayanımlarının NaOH konsantrasyonuna bağlı olarak arttığını belirlenmiştir. Uçucu kül bazlı alkali aktive edilmiş harç ile doğal puzolanların özelliklerinin karşılaştırıldığı bir başka çalışmada [7], alkali aktivatör olarak 2.5, 5, 7.5, 10 ve 12.5M farklı konsantrasyonlarda sodyum hidroksit içeren farklı karışımlar kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, alkali ile aktifleştirilen harçlar portland çimento harcına kıyasla daha düşük dayanım gösterirken, 7.5 ile 12.5 M sodyum hidroksit molariteli incelenen harçlar yapısal uygulamalar için daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Geopolimer üretiminde birçok materyal grubunu baz almak mümkün olduğu düşünülen çalışmada [8], Geopolimerler kısa süreli sertleşme süreleri nedeniyle yüksek erken dayanıma sahiptirler. Geleneksel çimentoda sertleşme süresi 10-12 saat civarındayken, geopolimerlerde bu süre genellikle 2-4 saat aralığında gerçekleşir. 4 saatlik kürleme ile dayanımı maksimum dayanımının %70'ine ulaşabilir. Bu yönüyle hızlı sertleşen çimentoya benzer özellik gösterse de, fiziksel özellikleri bakımından hızlı sertleşen çimentodan daha iyi sonuçlar verebilmektedir. CO_2 salınımının ve yüksek enerji tüketiminin en aza indirilmesi amacıyla yapılan çalışmada [9], perlit içeren geopolimer kompozitler üretilmiştir. Bu amaçla

öğütülmüş perlit, sodyum hidroksit ile aktive edilerek, $50 \times 50 \times 50$ mm boyutlarında çimentosuz perlit esaslı kompozit küp numuneler üretilmiştir. En iyi basınç dayanımı çözelti molaritesi 15.5 olan, 24 saat kür süresinde ve 110°C kür sıcaklığında 46.76 MPa olarak bulunmuştur. Termik santralden elde edilen taban külünün (TK) alkali aktivatörlerle aktive edildiği bir başka çalışmada [10], sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) alkali çözeltileri kullanılarak çimentosuz harç karışımları üretilmiştir. Üretilen en iyi harç numunesinde (SHSS) birim ağırlığı $1,59 \text{ gr/cm}^3$, basınç dayanımı 18,51 MPa ve su emmesi %6,58 bulunmuştur.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada, geopolimer harç numuneleri için kullanılan uçucu kül Sivas/Kangal Termik santralinden öğütülmüş yüksek fırın cürufu ise Bolu Çimento Sanayi'nden temin edilmiştir. Bağlayıcı malzemelere ait fiziksel ve kimyasal sonuçlar aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo.1 Uçucu kül'e ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Bileşen	(%)
MgO	3,12
Al_2SO_3	14,2
SiO_3	35,01
SO_3	7,56
Na_2O	1,21
K_2O	1,06
CaO	25,75
Fe_2SO_3	5,42
Çözünmez kalıntı	24,21
Kızdırma kaybı	6,02
TOPLAM	99,35
Fiziksel kompozisyon	
Özgül ağırlık(ton/m^3)	2,72
45 mikron elek bakiyesi(%)	44,3
Blain özgül yüzey (cm^2/gr)	332

Tablo 2. YFC Kimyasal özellikler

Kimyasal Özellikler	Elde edilen değerler	TS EN 197-1 Sınır Değerleri	Deney Metodları
Magnezyum Oksit (MgO) %	6,73	Max. 18,0	TS EN 196-2
Sülfür Trioksit (SO ₃) %	0,66	Max. 2,5	TS EN 196-2
Sodyum Oksit (Na ₂ O) %	1,15	-	TS EN 196-2
Potasyum Oksit (K ₂ O) %	0,84	-	TS EN 196-2
Na (Eq)	1,70	-	TS EN 196-2
Klorür (Cl ⁻) %	0,0130	Max. 0,1000	TS EN 196-2
Düzeltilmiş Kızdırma Kaybı %	2,42	Max.3,0	TS EN 196-2

Tablo 3. Çalışmada kullanılan cürufun fiziksel özellikleri

Fiziksel özellikler			
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,91	-	TS EN 196-6
Özgül Yüzey (cm ² /g)	5384	Min.2750	TS EN 196-6
Rutubet (%)	0,1	Max. 1,0	TS EN 196-6

Tablo 4. Sodyum silikat fiziksel ve kimyasal özellikleri

Sodyum Silikat	Su	Çözünürlük	pH	Yoğunluk (20 °C)	Kaynama Noktası (°C)
%35-40	%60-65	%100	11-12,4	1,3-1,5 g/cm ³	102

Tablo 5. Sodyum hidroksit kimyasalına ait fiziksel ve kimyasal özellikler

NaOH (%)	99
Na ₂ CO ₃ (%)	0,3
SO ₄ (%)	≤0,01
Cl (%)	≤0,01
Al (%)	≤0,002
Fe (%)	≤0,002
pH	14
Yoğunluk (g/cm ³)	2,13
Kaynama Noktası (°C)	1388

Geopolimer Numunelerin Hazırlanması

Çalışmada alkali aktivatör olarak 2 farklı molar oranda 10M ve 12M NaOH çözeltisi ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Na₂SiO₃/NaOH oranı 2,5 olarak belirlenmiş ve tüm numunelerde sabit tutulmuştur. Numunelerin temini gerçekleştirildikten sonra uygun ortamda hava almayacak şekilde beklemeye bırakılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül farklı oranlarda kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak farklı molar oranlarda NaOH çözeltisi ve Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Na₂SiO₃/NaOH oranı 2,5 olarak sabit tutulmuş ve tüm deney serilerinde

kullanılmıştır. Kullanılacak NaOH çözeltisi 1 gün önceden cam kaplar içinde hazırlanıp soğumaya bırakılmıştır. Geopolimer harç numunelerin sıvı/bağlayıcı oranı 0,5 olarak sabit tutulmuştur. Deneysel numuneleri TS EN 196-7 'ye uygun olarak her deney serisi için 3 adet numune 40x40x160 mm³ kalıplarda hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 75 °C de 24 saat süreyle etüvde bekletilmiş daha sonra kalıplardan çıkarılarak Şekil 1 de gösterildiği gibi hava almayacak şekilde muhafaza edilmiştir.



Şekil 1. Numunelerin kür ortamında beklemesi ve muhafaza edilmesi.



Şekil 2. Eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyi

75°C 'de 24 saat bekledikten sonra kalıptan çıkarılıp atmosferik ortama bırakılan numuneler 7 ve 28 gün bekledikten sonra eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımları TSE EN 196- 1 standardında belirtilen deney yöntemlerine göre, eğilmede çekme dayanımı deneyinde 50N/sn, basınç dayanımı deneyi ise 2400 N/sn olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. Harç numunelerinde karışım oranları

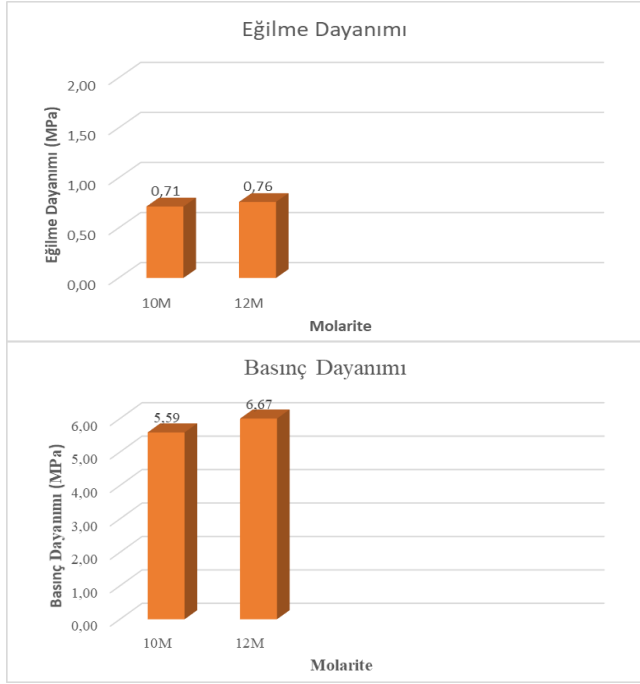
YFC (g)	UK (g)	Molarite (M)	Kum (g)	Sıvı/bağlayıcı	Su (g)	Na ₂ SiO ₃ /NaOH
375	125	10	1350	0,5	50	2,5
425	75	10	1350	0,5	50	2,5
475	25	10	1350	0,5	50	2,5
500	0	10	1350	0,5	50	2,5
375	125	12	1350	0,5	50	2,5
425	75	12	1350	0,5	50	2,5
475	25	12	1350	0,5	50	2,5
500	0	12	1350	0,5	50	2,5

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

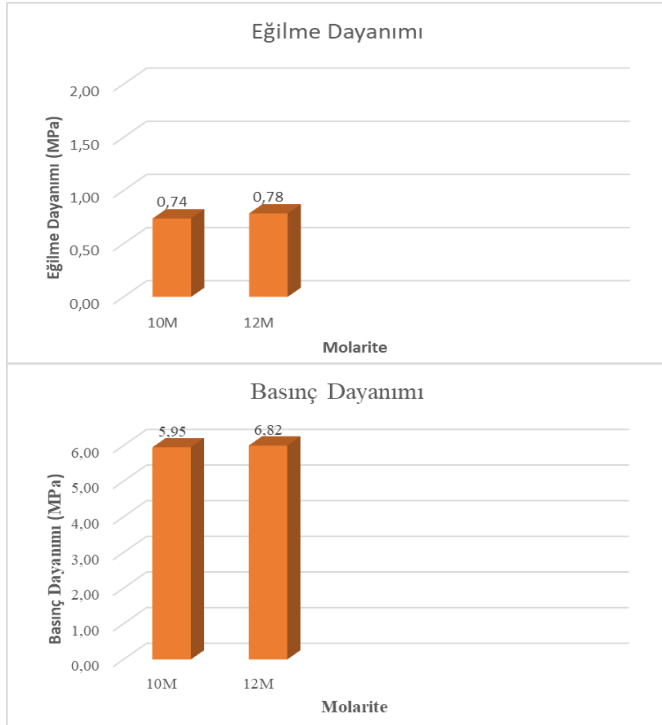
Geopolimer numunelerde molarite etkisi görebilmek amacıyla iki farklı molar oranda (10M, 12M) numuneler hazırlanmıştır. 7 günlük max basınç dayanımları incelendiğinde 75YFC25UK, 85YFC15UK, 95YFC5UK ve 100YFC numunelerinde sırasıyla 6.67 MPa, MPa, 6.80 MPa ve 7.89 MPa, 7.89MPa değerleri elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde ise, 75YFC25UK, 85YFC15UK, 95YFC5UK ve 100YFC numunelerinde sırasıyla 6.82 MPa, 7.34 MPa, 8.00 MPa ve 7.99 MPa değerleri elde edilmiştir. Genel olarak 7 ve 28 günlük karışımlarda (100YFC haricinde) artan YFC oranına bağlı olarak, basınç dayanımlarında olumlu bir etki gözlemlenmektedir. Özellikle YFC'nin uçucu küle oranla yüksek silika ve

alüminyum oksit içeriğinin daha güçlü bir yapı oluşturmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, yüksek kalsiyum oksit içeriğinin polimerizasyon sürecine olumlu katkılar yaptığı söylenebilir. Ancak, uçucu kül içeriğinin çok düşük oranlarda YFC ile kullanımının basınç dayanımları açısından daha olumlu sonuçlar oluşturduğu gerçeğide bu çalışmadaki önemli sonuçlardan biri olmaktadır. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde ise, en yüksek değerler 10M NaOH çözeltisinde hazırlanan 100YFC 7 günlük numunelerde 0,81MPa olarak tespit edilmiştir. 12M NaOH çözeltisinde ise 95YFC5UK 7 günlük numunelerde bu değer 0,85 MPa olarak ölçülmüştür. NaOH konsantrasyonundaki artışla geopolimer yapıdaki reaksiyona girmemiş uçucu küller aktive edildiği için dayanımda artış gözlemlenmiştir [11]. Şekil 3-Şekil 10 farklı

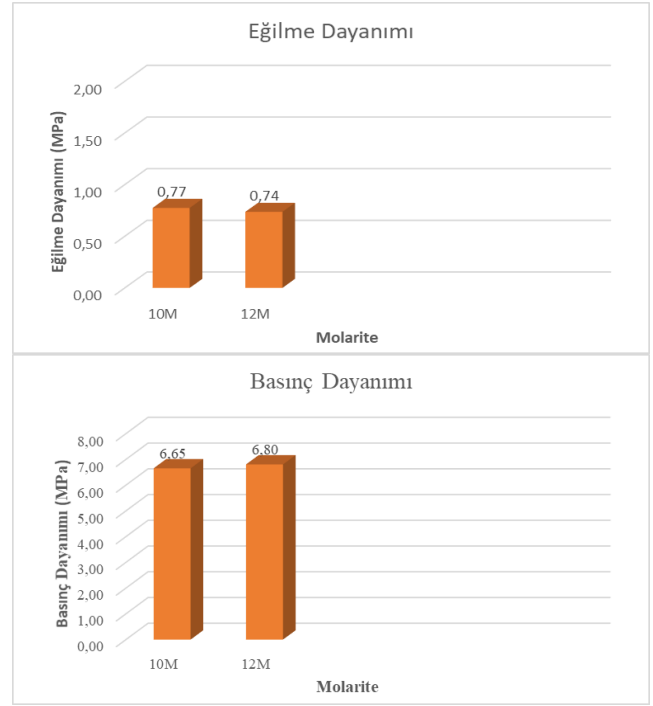
geopolimer numunelerinde elde edilen Eğilme ve Basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir.



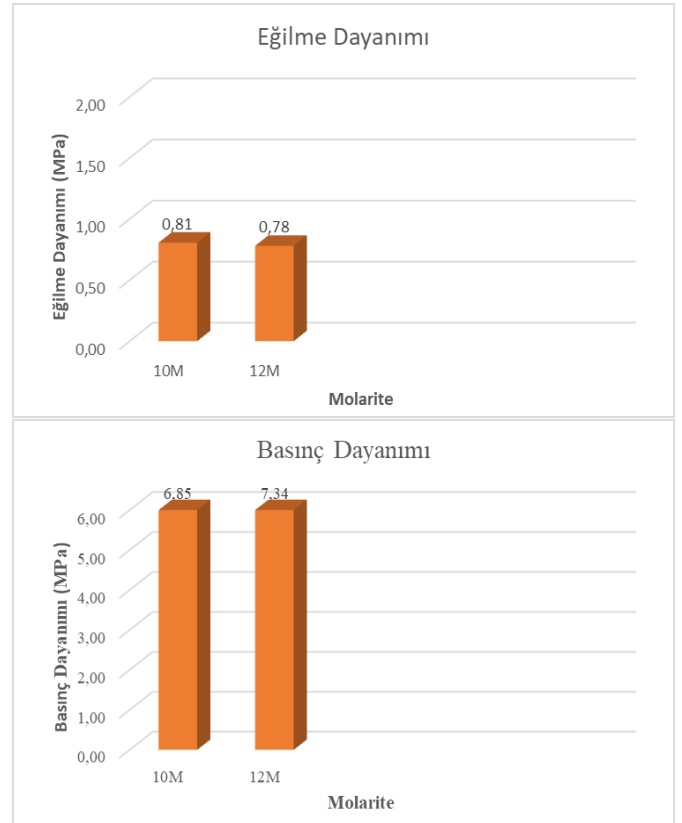
Şekil 3. 75YFC25UK 7 günlük eğilme ve dayanım basınç sonuçları



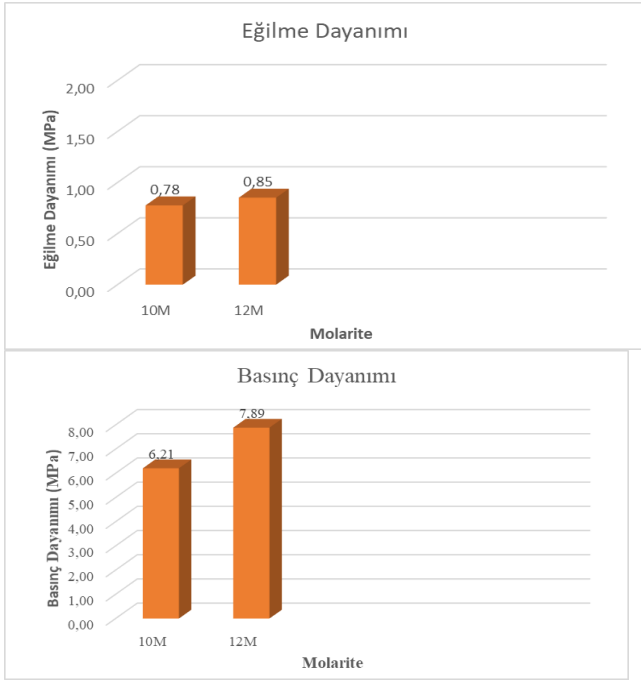
Şekil 4. 75YFC25UK 28 günlük eğilme ve dayanım basınç sonuçları



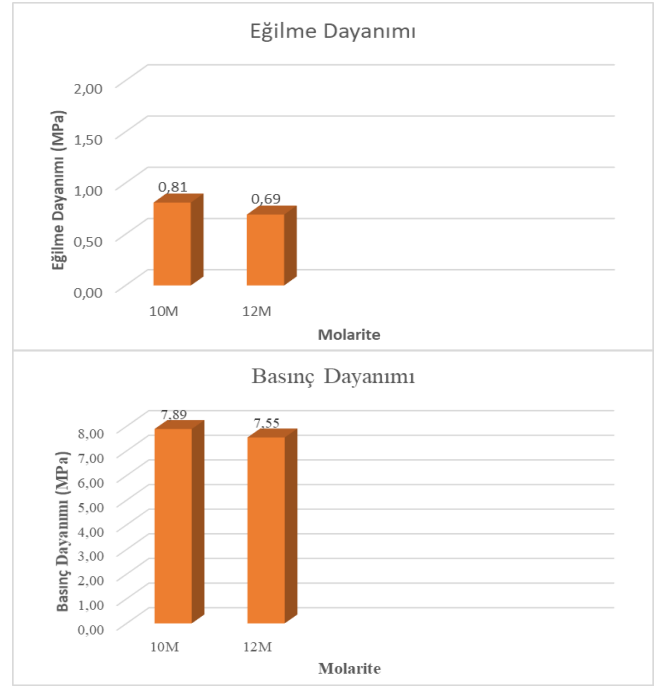
Şekil 5. 85YFC15UK 7 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları



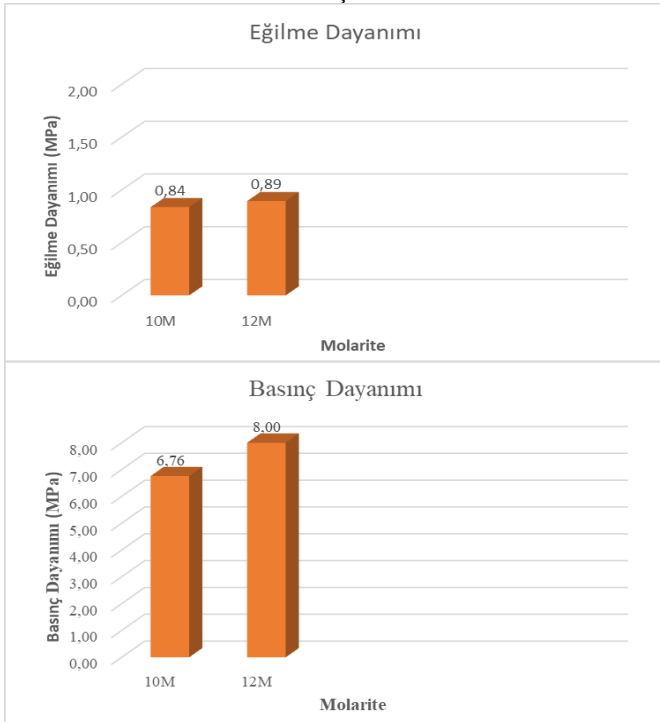
Şekil 6. 85YFC15UK 28 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları



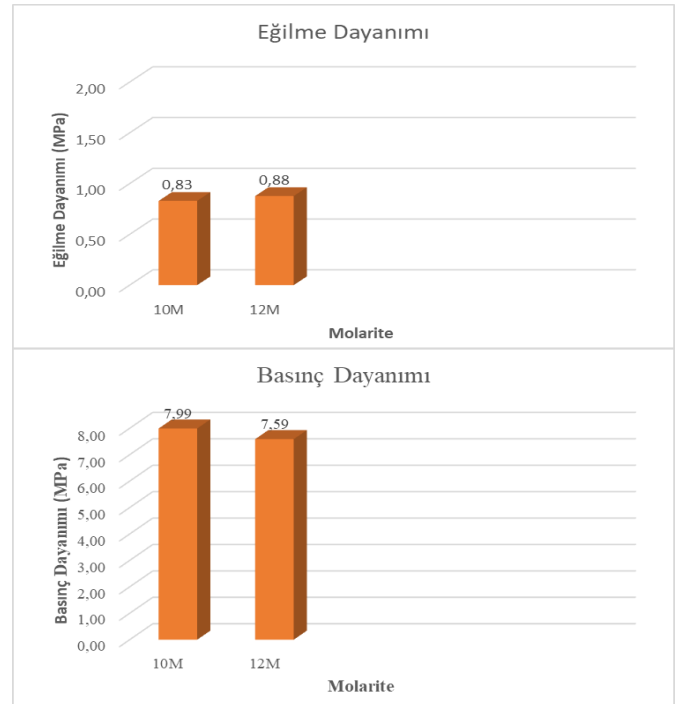
Şekil 7. 95YFC5UK 7 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları



Şekil 9. 100YFC 7 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları



Şekil 8. 95YFC5UK 28 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları



Şekil 10. 100YFC 28 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek fırın cürufu ve uçucu kül farklı oranlardaki karışımların molariteye bağlı mekanik özellikleri incelenmiştir.

- ✓ 7günlük eğilme dayanımı en yüksek karışım 10M konsantrasyonunda 100YF karışımında 0,81 MPa olarak bulunmuştur.
 - ✓ 7 günlük eğilme dayanımı en yüksek karışım 12M konsantrasyonunda 95YFC5UK karışımında 0,85 MPa olarak gösterilmiştir.
 - ✓ 7günlük basınç dayanımı en yüksek karışım 10M konsantrasyonunda 100YFC karışımında 7,89 MPa olarak bulunmuştur.
 - ✓ 7 günlük basınç dayanımı en yüksek karışım 12M konsantrasyonunda 95YFC5UK karışımında 7,89 MPa olarak gösterilmiştir.
 - ✓ 28 günlük eğilme dayanımı en yüksek karışım 10M konsantrasyonunda 95YFC5UK karışımında 0,84 MPa olarak bulunmuştur.
 - ✓ 28 günlük eğilme dayanımı en yüksek karışım 12M konsantrasyonunda 95YFC5UK ve 100YFC karışımlarda 0,89MPa olarak bulunmuştur.
 - ✓ 28 günlük basınç dayanımı en yüksek karışım 10M konsantrasyonunda 100YFC karışımında 7,99 MPa olarak bulunmuştur.
 - ✓ 28 günlük basınç dayanımı en yüksek karışım 12M konsantrasyonunda 95YFC5UK karışımında 8,00 MPa olarak bulunmuştur.
- [4] Chi, M., Huang, R. 2013. "Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars", *Construction and Building Materials*, 40, 291–298.
- [5] Adak, D., Sarkar, M., Mandal S. 2014. "Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar", *Construction and Building Materials* 70, 453–459.
- [6] Görhan, G., Kürklü, G. 2014. "The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, *Composites: Part B* 58, 371-377.
- [7] Najimi, M., Ghafoori, N., Radke, B., Sierra, K., Sharbaf, M. 2016. "Properties of Alkali-Activated Natural Pozzolan and Fly Ash Mortars: A Comparative Study", *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Las Vegas, USA, August 7-11.
- [8] Zhanga, P., Zheng, Y., Wang, K., Zhanga, J. 2018. "A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar", *Composites Part B: Engineering*, 152, 79-95.
- [9] 9.Güzelküçük, S., Demir, İ. 2019."Perlit Esaslı Geopolimer Kompozitlere Kür Süresi ve Sıcaklığın Etkisi", *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), 730-737.
- [10] Topçu, İ.B., Toprak M.U., 2009 "Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 22, 2,154-164.
- [11] Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., Chindaprasit, P., 2014. Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45:9-14.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Kordinasyon Birimi (GÜBAP) tarafından 2907 numaralı proje kapsamında finansal olarak desteklenmiştir. Yazarlar bu katkısından dolayı, GÜBAP'a teşekkürlerini sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Tonyalı, T. 2021."Farklı Tür Atık Malzemeler Kullanılarak Üretilen Geopolimer Harçların Mekanik Ve Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi", *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- [2] Olivia, M. and Nikraz, H. 2013. "Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete in Seawater" *Cement and Concrete Research*.
- [3] Binici, H., Eken, M., Aksoğan, O. 2012. "Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri", *Electronic Journal of ConstructionTechnologies* Vol: 8, No: 2, 12-25.