



Polipropilen Liflerin Perlit Esaslı Geopolimerlerin Mekanik Davranışına Etkisi

Mehrzad MOHABBİ YADOLLAHİ¹, Sadık VAROLGÜNEŞ*¹

¹Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl, Türkiye

*Sorumlu yazar: svarolgunes@bingol.edu.tr – ORCID No: 0000-0001-9580-9889

(Alınış: 07.12.2018, Kabul: 17.12.2018, Online Yayınlanma: 31.12.2018)

Anahtar Kelimeler
 Geopolimer,
 Basınç Mukavemeti,
 Eğilme Mukavemeti,
 Polipropilen Lif

Özet: Altyapı çalışmaları dünya çapında büyüdükçe, Normal Portland Çimento (NPC) talebi de katlanarak artmaktadır. Çalışmalar, bir ton çimento üretiminin, kireç taşının kalsinasyonu ve fosil yakıtın yanması nedeniyle bir ton CO₂' i atmosfere saldıgını ortaya koymuştur. Çimento üretimi son derece enerji-yoğun bir süreç olmasının yanında enerji elde etmek için fosil kaynakları tüketen ve sera gazı üreten bir süreçtir. Davidovits (1978), bağlayıcıların, alkali sıvının uçucu kül, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü gibi alümino-silikat materyalleri ile polimerik reaksiyonu ile üretilebileceği yeni bir yol önermiştir. Ayrıca kaya bazlı puzolanlardan üretilen geopolimerlerin güçlü kimyasal bağlar oluşturma yetenekleri vardır. Elyaf takviyeli geopolimer, mukavemet özelliklerini geliştirmek amacıyla, mikro takviye olarak, karışımına fiberlerin sokulduğu, görece yeni bir kompozit malzemedir. Bu çalışmanın amacı eğilme ve basınç mukavemeti yüksek olan ve normal çimentoya alternatif olan bir yapısal bağlayıcı geliştirmektir. Bunun için bu çalışmada polipropilen liflerin, perlit tabanlı geopolimerlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu eksikliklerin giderilmesi ile geopolimerlerin yararlı çevre dostu bir malzeme olduğu da vurgulanmış olacaktır.

36

The Effect of Polypropylene Fibers on Mechanical Behavior of Perlite Based Geopolymers

Keywords
 Geopolymer,
 Compressive
 Strength,
 Flexural Strength,
 Polypropylene Fiber

Abstract: As infrastructure work grows worldwide, the demand for Ordinary Portland Cement (NPC) is growing exponentially. Studies have shown that one ton of cement production releases one ton of CO₂ into the atmosphere due to the calcination of limestone and the combustion of fossil fuel in production process. Cement production is not only an energy-intensive process, but also a process that consumes fossil resources and produces greenhouse gases to obtain energy. Davidovits (1978) proposed a novel route in which binders can be produced by polymeric reaction and by activation of aluminosilicate materials such as fly ash, blast furnace slag, and rice husk ash. In addition, geopolymers produced from rock-based pozzolans have the ability to form strong chemical bonds. The fiber-reinforced geopolymer is a relatively new composite material that composite fiber is introduced into the mixture as micro reinforcement in order to improve the strength properties. The aim of this study is to develop a structural bond with high flexural and compressive strength and an alternative to normal cement. In this study, the effect of polypropylene fibers on the mechanical behavior of perlite-based geopolymers was investigated. With the elimination of these deficiencies, it will be emphasized that geopolymers are a useful environmentally friendly material.

1. GİRİŞ

Kentleşme, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler bir yandan toplumlar için daha iyi yaşam koşulları sağlarken, öte yandan doğal kaynakların tükenmesine, ekolojik dengenin bozulmasına çevre sorunlarının artmasına neden olmaktadır [1]. Binalar, küresel iklim değişikliği ve enerji ile ilgili diğer çevresel konular üzerinde büyük etkisi olan enerji tüketen yapılarıdır. Binalar toplam birincil enerji tüketiminin yaklaşık yüzde 40'ından ve elektrik tüketiminin yüzde 70 inden sorumludur. ABD' de bina kaynaklı enerji tüketimi

sonucunda CO₂'nin yaklaşık yüzde 40 ı, SO₂' nin yüzde 50 si ve NO_x emisyonlarının yüzde 20 si üretilmektedir [2-3]. Normal Portland Çimentosundan yapılan beton, günümüzde insanlığın en çok kullandığı meta olarak ikinci sıradadır. 2008 yılında küresel çimento üretimi 2,6 milyar ton olarak gerçekleşmiş ve küresel antropojenik CO₂ emisyonları içindeki % 5-8 lik payını korumuştur [4]. Kopenhag Anlaşmasına göre, ülkeler küresel ortalama sıcaklık artışını 2°C' nin altında tutmayı kabul etmişlerdir. 2 °C' yi aşan artışlar, iklim değişikliğine neden olan, su temini, tarımsal üretkenlik, deniz seviyesinin yükselmesi, insanın yaşayabilme ve küresel

güvenlik gibi baş edilemez sonuçları içeren tehlikeli bir antropojenik müdahaleyi tetikleyebilir [5-6]. Yüksek alkalinite ve amorf alümino-silikat materyalleri ile olan çözeltiler arasındaki reaksiyonlar, inorganik polimer çimento veya geopolimer olarak da bilinen bir inorganik bağlayıcıyı üretir [7]. Geopolimerler yeşil bir materyal olarak düşünülebilir, çünkü minimum işlenmiş doğal materyallere veya endüstriyel ürünlere dayanır, böylece karbon ayak izini azaltır. Geopolimerler günümüzde hızlı mukavemet kazanımı, korozyon direnci, kimyasal stabilite, düşük büzülme oranı ve donma çözülme direnci açısından büyük ilgi görmektedir. Geopolimerler normal Portland çimentosu ve betonuna alternatif olarak kabul edilmektedir. Geopolimer terimini, jeolojik yapı elemanları olan Al ve Si temelli olması nedeniyle ilk kez Davidovits literatüre kazandırmıştır. Geopolimerleri nasıl değerlendirmeliyiz? Beton için yeni bir malzeme, yeni bağlayıcı veya yeni çimentolar mıdır?

Araştırmacılar tarafından, düşük sıcaklıklı alümino-silikat cam, alkali aktif çimento ve hidroseramik gibi farklı terminolojiler kullanılmış olsa da, “geopolimer” bu teknolojinin genel kabul gören adıdır [3,8-10]. Geopolimerlerin moleküler yapısı bir alümino-silikat ağından oluşur ve bu da alüminosilikat ve alkali-polisisilat arasındaki nispeten yüksek alkali ortamda kimyasal reaksiyonun bir ürünüdür [11]. Doğal puzolanlar, partiden partiye değişen çok çeşitli kimyasal bileşimlere sahip jeolojik tortulardır, ancak bunlar genellikle hâlihazırda SiO₂'de yüksek oranda bulunurlar. [12]. Puzolanlar, düşük çevresel etkiye sahip yüksek performanslı çimentolu yapı malzemelerini sentezlemek için alkali bir ortamda sodyum silikat ile aktive edilebilir ve yoğunlaştırılabilir [13]. Bu çalışma yazarın daha önce yayınlamış olduğu perlit aktivasyonu hakkındaki yayınının devamıdır [14].

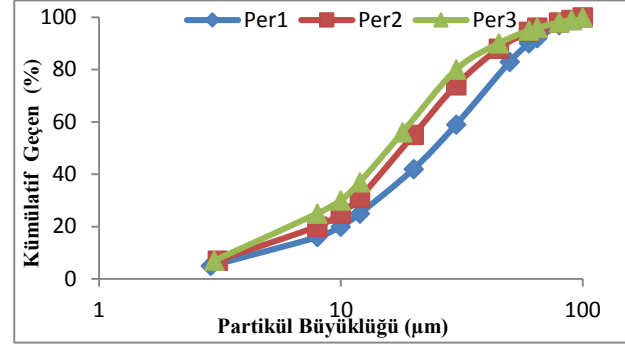
2. MATERYAL VE METOT

2.1. Fiber Takviyeli Geopolimer Yapımında Kullanılan Hammaddeler

2.1.1. Perlit

Çalışmada kullanılan hammadde perlitir. Bu çalışmada, geopolimer üretimi için volkanik tabanlı alüminosilikat malzemesi olan Perlit Kaneh Azar Co.' dan (Tebriz, İran) elde edilmiştir. Hazırlanan doğal perlit değirmende öğütülmüştür. Perlit tozunun partikül büyüklüğü dağılımının geopolimer özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği bilindiğinden “hidrometre analizi” kullanılarak bir partikül boyutu dağılımı analizi gerçekleştirilmiştir [11]. Çalışmada üç farklı partikül büyüklüğü kullanılmıştır. Geopolimerlerin basınç dayanımı da temel olarak puzolan ince partiküllerinin içeriğine bağlıdır. Öğütülmüş perlitin partikül büyüklüğü dağılımları Şekil 1’ de gösterilmiştir. Öğütülmüş perlitin spesifik yüzey alanları sırasıyla Per1, Per2 ve Per3 için 3100, 3580 4300 m²/kg ve öğütülmüş perlit yoğunluğu 2,379 gr/cm³tür. Ölçümler BET N2 adsorpsiyonu ile yapılmıştır. Parçacık boyutu yaklaşık 3 ile 90µm arasında değişmekte olup, her bir dizinin tekdüzelik

faktörü sırasıyla 3,8- 3,78-3,16’dır. X-ışını toz kırınımı (XRD), faz bileşimlerini ve numunelerin kristalliliğini karakterize etmek ve tanımlamak için kullanılmıştır. XRD analizleri sonucunda Tebriz perlit için numunelerinin tamamen amorf malzemeler olduğu tespit edilmiştir [14].



Şekil 1. Öğütülmüş Perlit için partikül büyüklüğü dağılımları

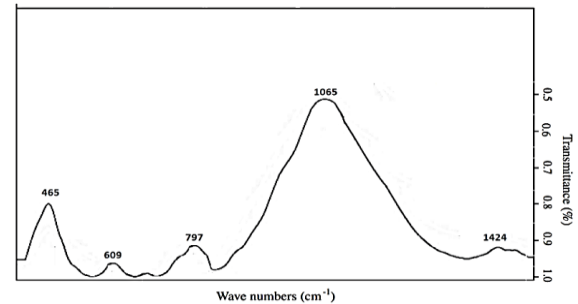
XRF ile belirlenen perlitin kimyasal bileşimi Tablo 1’ de [15] ve Perlitin fiziksel bileşimi ve özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur. Şekil 2’de gösterilen mevcut kimyasal bağların belirlenmesi için FTIR analizi yapılmıştır.

Tablo 1. Öğütülmüş Tebriz Perlit Kimyasal Özellikleri

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	SO ₃	Ti ₂ O	Mn ₂ O	Diğer	LOI
79,6	11,5	0,8	0,8	0,5	5,3	0,2	0,1	0,06	1,13	1,13

Tablo 2. Tebriz Perlitine ait bazı fiziksel özellikler

Parametre	Data
Renk	Beyaz
Yumuşama Noktası	800-1000°C
Erime Noktası	1315-1390°C
pH	6,6-8,0



Şekil 2. Genleştirilmemiş Tebriz Perlit için FTIR spektrumu

Alümino-silikat bağları, yani Si-O-Al, FTIR analizi ile sağlanmıştır [14]. Yaklaşık 1065 cm⁻¹ lik titreşim Si-O & Al-O bağlarının kanıtıdır. Benzer şekilde, 465, 609, 797cm⁻¹ lik dalga boyları sırası ile Al-O & Si-O, Si-O-Si and Si-O-Si bağları ile ilgilidir. Ayrıca, 1424 cm⁻¹ lik dalga boyu O-C-O/CO₃ yani CaCO₃ bağları ile ilgilidir. [16].

2.1.2. Sodyum hidroksit

Geopolimer üretiminde alkali çözelti olarak kullanılan yaygın malzemeler sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksittir (NaOH). Yaygın olarak sodyum hidroksitler, katı halde topaklar ve pullar halinde temin edilebilir. Bu çalışmada sıvı sodyum hidroksit kullanılmış, fiziksel ve kimyasal özellikleri üretici tarafından temin edilmiş ve Tablo 3 te sunulmuştur.

Tablo 3. Sodyum Hidroksit Çözeltisi Konsantrasyonu

KİMYASAL FORMÜL	NaOH*H ₂ O
NaOH	32-33 %
H ₂ O	67-68 %
Görünüm	Jel
Özgül Ağırlık (20°C)	1,35

2.1.3. Sodyum silikat

Sodyum silikat cam suyu olarak bilinir ve jel formunda bulunur. Bu çalışmada, SiO_2 ile Na_2O arasındaki oran 1,95 ile 2,30 dur. Kullanılan sodyum silikatın kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Sodyum Silikat Solüsyonunun Yoğunluğu

Kimyasal Formül	Renksiz Na ₂ O*SiO ₂
SiO ₂	22-24 %
Na ₂ O	11-12 %
H ₂ O	64-67 %
Görünüm	Jel
Özgül Ağırlık (20°C)	1,38-1,397

2.1.4. Süper plastikleştirici

Bu çalışmada, Glenium C303 süper plastikleştirici olarak kullanılmış ve özellikleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Glenium C 303 Teknik Özellikleri

Adı	Glenium C 303
Yoğunluk (gr/cm ³) (20°C)	1,023-1,063
Klorin % (En 480-10)	< 0,1
Renk	Yeşil
Homojenlik	Homojen
Kimyasal İçerik	Sentetik Polimer Bazlı

2.1.5. Polipropilen lifler

Polipropilen liflerin özellikleri Tablo 6 da verilmiştir.

Tablo 6. Çalışmada kullanılan Polipropilen Liflerin Özellikleri

Özellikler	A tipi Lif
Şekil	Stabil Fiber
Boyut (mm)	15
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	0,92
Elastisite Modülü (GPa)	3,15
Çekme Dayanımı (MPa)	620
En Büyük Uzama (%)	22
Elektrik Geçirgenliği	Düşük

Erime Noktası (°C)	160
Yanma Noktası (°C)	590
Isıl İletkenlik	Düşük
Alkali Direnci	Yüksek
Asit Direnci	Yüksek
Tuz Direnci	Yüksek

2.2. Deneysel Teknikler ve Numune Hazırlama

Tebriz perlitinin aktivasyon özelliklerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek için Tablo 7 de gösterilen üç incelik sınıfı için dokuz karışım oranı tasarlanmıştır. Palomo ve arkadaşları tarafından bildirilen pilot bir çalışmaya göre, doğal puzolanlara, çözelti halinde, alkalın ve sodyum silikat karışımı katılarak yapılmış geopolimerlere oranla alkalın hidroksit solüsyonu katılarak yapılmış geopolimerlerdeki basınç mukavemetinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir [17]. İlk olarak alkali hidroksit çözeltisi eklenerek Al-Si bağları kırılmış ve böylece Al-Si bağlarının çözülmesine neden olunmuştur. Daha sonra, cam suyu ile yani sodyum silikat ile yeni reaksiyonlara girmiş ve yeni alüminosilikat bağlarının oluşumuna neden olunmuştur. Bununla birlikte, karışık bir çözelti olarak alkalın ve sodyum silikatın eklenmesi, iki karşıt reaksiyon yaratır. Bu nedenle, karışım, doğal puzolanlara hidroksit çözeltilerinin eklenmesi ve önce 15 dakika karıştırılması ile hazırlanmıştır. Karışıma Sodyum Silikat katıldıktan sonra 3 dakika daha karıştırılmaya devam edilmiştir [18]. Ortaya çıkan harç 50*50*50 mm³ lük çelik kalıplara aktarılmıştır ve daha sonra 2 dk boyunca sarsma tablası ile sarsılmıştır. Daha sonra, ilk kurutma aşamasında numuneler, fırında 65 °C de 48 saat bekletilmiştir. Kalıpların açık olan yüzeyleri kür aşamasında polietilen film ile kaplanmıştır. Bu işlem, kür sırasında alkali ile aktive edilmiş numunelerde aşırı su buharlaşmasını önler ve polimerizasyon için suyun gerekli olması nedeniyle önemli bir adımdır. 48 saat sonra kalıptan çıkarma işlemi yapılmış ve daha sonra numuneler ASTM C39'a göre basınç testine hazır hale getirildikten sonra oda (yaklaşık 25 °C) şartlarında, kaplanmış olduğu film tabakası sökülerek 28 inci güne kadar laboratuvarında bırakılmıştır. Basınç dayanımı, 1mm/dk'lık bir yer değiştirme oranına sahip test cihazı ile test edilerek değerlendirilmiştir. Numunelerin iki ucu, düz ve paralel yüzeyler elde etmek için zımpara kâğıdı ile pürüzsüz hale getirilmiş, ardından numune uç yüzeyleri ve cilalı paslanmaz çelik arasındaki sürtünmeyi (ve dolayısıyla kesme gerilmesini) en aza indirmek için ince bir yağlama tabakası uygulanmıştır. Kurutulmuş bütün geopolimer karışımlar için ASTM C39'a göre basınç dayanımı test edilmiştir. Yazarın önceki çalışmasındaki her test karşılık bu çalışmadaki 3 numunenin sonuçlarının ortalaması kullanılmıştır [19-21].

Tablo 7. Polipropilen İçermeyen Tebriz Perlit Bazlı Geopolimerlerin Karışım Oranları

Karışım Tasarımı	Perlit (g)	NaOH Solüsyonu (g)	Na ₂ SiO ₃ Solüsyonu (g)	H ₂ O (g)	Süper Plastikleştirici (g)	MS**	Na ₂ O (%)	Su/Bağlayıcı
1	1214,08	142,68	109,59	258,38	48,56	0,52	4	0,36
2	1152,81	237,08	182,11	164,19	46,11	0,52	7	0,40
3	1096,27	322,08	247,40	80,02	43,85	0,52	10	0,44
4	1205,65	234,74	220,42	137,80	48,22	0,60	7	0,36
5	1144,11	317,93	298,52	24,25	45,76	0,60	10	0,40
6	1302,08	107,20	136,20	197,29	52,08	0,60	4	0,44
7*	1186,83	260,94	352,63	14,24	47,47	0,68	10	0,36
8	1173,49	122,93	138,91	270,46	46,94	0,68	4	0,40
9	1127,00	206,61	233,47	161,53	45,07	0,68	7	0,44

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Perlit Bazlı Fiber Geopolimerlerin Basınç Dayanımı ve Eğilme Momenti

Perlit bazlı geopolimer basınç dayanımını belirlemek için bu çalışmada hidrolik çimentonun basınç dayanımı için ASTM C109 standart test yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 8. Tebriz Perlitli Yük-Gerilme İlişkileri

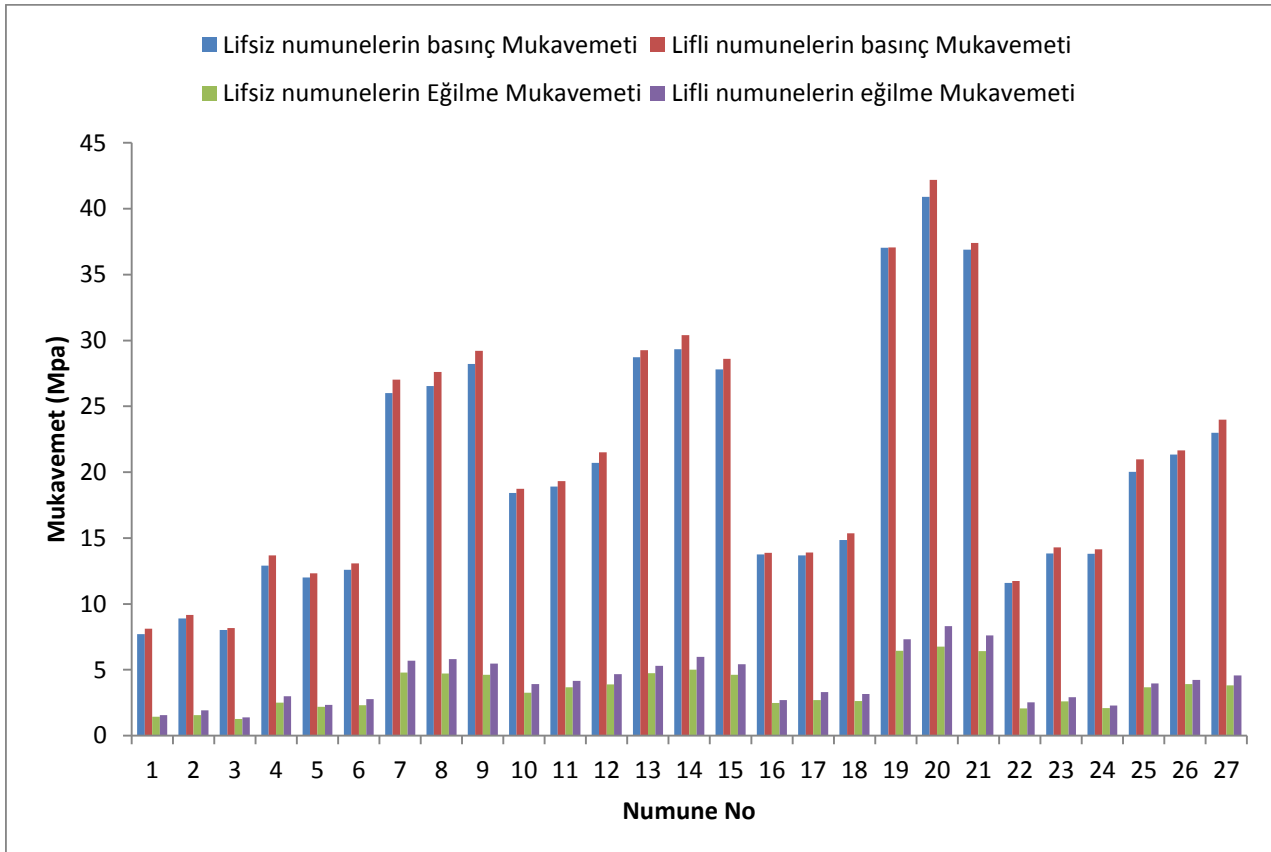
No	*Numune No	Kullanılan perlitin inceliği	Polipropilen fiber içermeyen 28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Polipropilen fiber içeren 28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Mukavemetinde Polipropilen Lif eklenmesiyle oluşan Artış Yüzdesi	Polipropilen fiber içermeyen 28 günlük eğilme mukavemeti (MPa)	Polipropilen fiber içermeyen 28 günlük eğilme mukavemeti (MPa)	Eğilme Mukavemetinde Polipropilen Lif eklenmesiyle oluşan Artış Yüzdesi
1	Geo 1-1	Per1	7,70	8,11	5,32%	1,43	1,57	9,79%
2	Geo 1-2	Per2	8,90	9,16	2,92%	1,57	1,93	22,93%
3	Geo 1-3	Per3	8,01	8,16	1,87%	1,26	1,39	10,32%
4	Geo 2-1	Per1	12,90	13,68	6,05%	2,51	2,98	18,73%
5	Geo 2-2	Per2	12,01	12,32	2,58%	2,18	2,34	7,34%
6	Geo 2-3	Per3	12,60	13,07	3,73%	2,30	2,78	20,87%
7	Geo 3-1	Per1	26,01	27,02	3,88%	4,80	5,70	18,75%
8	Geo 3-2	Per2	26,54	27,60	3,99%	4,71	5,81	23,35%
9	Geo 3-3	Per3	28,21	29,22	3,58%	4,61	5,48	18,87%
10	Geo 4-1	Per1	18,43	18,74	1,68%	3,26	3,91	19,94%
11	Geo 4-2	Per2	18,90	19,32	2,22%	3,66	4,17	13,93%
12	Geo 4-3	Per3	20,70	21,52	3,96%	3,90	4,66	19,49%
13	Geo 5-1	Per1	28,73	29,27	1,88%	4,74	5,29	11,60%
14	Geo 5-2	Per2	29,33	30,40	3,65%	5,01	5,99	19,56%
15	Geo 5-3	Per3	27,80	28,60	2,88%	4,61	5,42	17,57%
16	Geo 6-1	Per1	13,75	13,88	0,95%	2,49	2,71	8,84%
17	Geo 6-2	Per2	13,69	13,89	1,46%	2,70	3,31	22,59%
18	Geo 6-3	Per3	14,84	15,35	3,44%	2,62	3,16	20,61%
19	Geo 7-1	Per1	37,03	37,06	0,08%	6,43	7,31	13,69%

Tablo 8. Tebriz Perliti Yük-Gerilme İlişkileri - devamı

No	*Numune No	Kullanılan perlitin inceliği	Polipropilen fiber içermeyen 28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Polipropilen fiber içeren 28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Mukavemetinde Polipropilen Lif eklenmesiyle oluşan Artış Yüzdesi	Polipropilen fiber içermeyen 28 günlük eğilme mukavemeti (MPa)	Polipropilen fiber içermeyen 28 günlük eğilme mukavemeti (MPa)	Eğilme Mukavemetinde Polipropilen Lif eklenmesiyle oluşan Artış Yüzdesi
20	Geo 7-2	Per2	40,91	42,18	3,10%	6,77	8,31	22,75%
21	Geo 7-3	Per3	36,90	37,41	1,38%	6,42	7,61	18,54%
22	Geo 8-1	Per1	11,60	11,73	1,12%	2,06	2,53	22,82%
23	Geo 8-2	Per2	13,83	14,30	3,40%	2,61	2,91	11,49%
24	Geo 8-3	Per3	13,80	14,14	2,46%	2,09	2,29	9,57%
25	Geo 9-1	Per1	20,03	20,97	4,69%	3,66	3,97	8,47%
26	Geo 9-2	Per2	21,33	21,66	1,55%	3,91	4,23	8,18%
27	Geo 9-3	Per3	23,00	23,98	4,26%	3,82	4,56	19,37%
Min değer					0,08%			7,34%
Maksimum değer					6,05%			23,35%
Ortalama Değer					2,79%			16,29%

*Numune No açıklaması: örneğin Geo1-1 deki ilk numara mix dizaynı, ikinci numara ise numunedeki materyalin inceliği ile ilgilidir ve Şekil 2 de gösterilmiştir.

Sonuçlar, Tablo 8' de verilmiştir. Basınç dayanımı ve eğilme momenti mühendislik uygulamalarındaki bariz önemi nedeniyle geopolimerlerin en çok incelenen özelliğidir.

**Şekil 3.** 28 günlük lifli ve lifsiz numunelerin basınç ve eğilme dayanımları

4. SONUÇLAR

Sunulan araştırma sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Tüm karışım ve numuneler için polipropilen liflerin eklenmesiyle basınç dayanımı ve eğilme mukavemeti artmaktadır.
- Polipropilen lif eklendikten sonra her biri 3 adet farklı inceliğe sahip numuneden oluşan 9 gruptaki toplam 27 adet numune için **basınç mukavemetinde ortalama olarak % 2,79 artış** meydana gelmiştir.
- Polipropilen lif eklendikten sonra her biri 3 adet farklı inceliğe sahip numuneden oluşan 9 gruptaki toplam 27 adet numune için basınç mukavemetinde maksimum artış Geo 2-1 numunesinde gözlenmiştir ve % 6,05 olarak kaydedilmiştir.
- Polipropilen lif eklendikten sonra her biri 3 adet farklı inceliğe sahip numuneden oluşan 9 gruptaki toplam 27 adet numune için **eğilme mukavemetinde ortalama olarak % 16,29 artış** meydana gelmiştir.
- Polipropilen lif eklendikten sonra her biri 3 adet farklı inceliğe sahip numuneden oluşan 9 gruptaki toplam 27 adet numune için basınç mukavemetinde maksimum artış Geo 3-2 numunesinde gözlenmiştir ve % 23,35 olarak kaydedilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Canan F, KürümVaroğlu F. Mimari Tasarımda Yerel-Ekoloji İlişkisi "Gökçeada Penceresinden Bakmak", Local-Ecological Relation in Architectural Design "From The Viewpoint of Gökçeada". Yapı dergisi. 2017;422:122-7.
- [2] Komnitsas KA. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineer*. 2011;21:1023-32.
- [3] Davidovits J. Geopolymers - Inorganic Polymeric New Materials. *J Therm Anal*. 1991;37(8):1633-56.
- [4] Scrivener KL, Kirkpatrick RJ. Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*. 2008;38(2):128-36.
- [5] van Deventer JSJ, Provis JL, Duxson P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Miner Eng*. 2012;29:89-104.
- [6] Rockstrom J, Steffen W, Noone K, Persson A, Chapin FS, Lambin EF, et al. A safe operating space for humanity. *Nature*. 2009;461(7263):472-5.
- [7] Kamseu E, Cannio M, Obonyo EA, Tobias F, Bignozzi MC, Sglavo VM, et al. Metakaolin-based inorganic polymer composite: Effects of fine aggregate composition and structure on porosity evolution, microstructure and mechanical properties. *Cement Concrete Comp*. 2014;53:258-69.
- [8] Davidovits J. Fast-Curing Cement. *Chem Eng News*. 1989;67(27):4-5.
- [9] Davidovits J. Geopolymers and Geopolymeric Materials. *J Therm Anal*. 1989;35(2):429-41.
- [10] Gimeno D, Davidovits J, Marini C, Rocher P, Tocco S, Cara S, et al. Development of silicate-based cement from glassy alkaline volcanic rocks: interpretation of preliminary data related to chemical-mineralogical composition of geologic raw materials. *Bol Soc Esp Ceram V*. 2003;42(2):69-78.
- [11] Allahverdi A, Mehrpour K, Kani EN. Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzolan in production of geopolymer cement. *Ceram-Silikaty*. 2008;52(1):16-23.
- [12] Bondar D, Lynsdale CJ, Milestone NB, Hassani N, Ramezani-pour AA. Effect of adding mineral additives to alkali-activated natural pozzolan paste. *Constr Build Mater*. 2011;25(6):2906-10.
- [13] He JA, Zhang GP, Hou SA, Cai CS. Geopolymer-Based Smart Adhesives for Infrastructure Health Monitoring: Concept and Feasibility. *J Mater Civil Eng*. 2011;23(2):100-9.
- [14] Yadollahi MM, Benli A. Stress-strain behavior of geopolymer under uniaxial compression. *COMPUTERS AND CONCRETE*. 2017;20(4):381-9.
- [15] M. Torab-Mostaedi* HG, M. Ghannadi-MaraghehI, S. J. AhmadiI and H. TaheriI. Removal of cadmium and nickel from aqueous solution using expanded perlite. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2010;27(2).
- [16] Cătănescu I, Georgescu M, Melnescu A. Synthesis and Characterization of Geopolymer Binders From Fly Ash. *Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. 2012;74(1).
- [17] Palomo A, Fernández-Jiménez A, Criado M. "Geopolymers": same basic chemistry, different microstructures. *Materiales de Construcción*. 2004;54(275):77-91.
- [18] Bondar D, Lynsdale CJ, Milestone NB, Hassani N, Ramezani-pour AA. Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. *Cement Concrete Comp*. 2011;33(2):251-60.
- [19] Yadollahi MM, Demirboga R, Polat R. Effect of heat treatment temperature on ground pumice activation in geopolymer composites. *Sci Eng Compos Mater*. 2014;21(3):377-82.
- [20] Yadollahi MM, Benli A, Demirboga R. Effects of elevated temperature on pumice based geopolymer composites. *Plast Rubber Compos*. 2015;44(6):226-37.
- [21] Yadollahi MM, Benli A, Demirboga R. The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Constr Build Mater*. 2015;94:767-74.