

Lif boyunun ve içeriğinin geopolimer betonların asit direncine etkisi

The effect of fiber length and content on acid resistance of geopolymer concrete

Fatih KANTARCI*^{1,a}

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya

• Geliş tarihi / Received: 21.01.2021 • Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 19.02.2021 • Kabul tarihi / Accepted: 28.02.2021

Öz

Çimento üretimi beraberinde birçok ekonomik ve çevresel sorunu getirerek yıldan yıla artışını sürdürmektedir. Çimentoya alternatif bağlayıcı arayışları 21. yüzyılın en popüler araştırma konuları arasında yer almaktadır. Yapılan çalışmalarda alkali aktive edilmiş bağlayıcılar olarak da adlandırılan “geopolimer” bağlayıcılar öne çıkmaktadır. Geopolimerler yüksek silis ve alümin içeriğine sahip doğal ve atık puzolanların yüksek alkali ortamlarda aktive edilmesiyle elde edilen yeni nesil üç boyutlu bağlayıcılardır. Geopolimer bağlayıcılar normal Portland çimentolu bağlayıcılar ile kıyaslandığında dayanım, dayanıklılık ve ekonomik açıdan oldukça önemli avantajlara sahiptirler. Ancak geopolimer betonların yaygın kullanımının önündeki en önemli engel, üretiminde ihtiyaç duyulan ısı kütür işlemidir. Lif boyunun ve içeriğinin lifli geopolimer betonların asit direncine etkisi üzerine ise literatürde çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, lif boyunun ve lif içeriğinin ısı kütür işlemi uygulanmadan üretilmiş geopolimer betonların asit direncine etkisi ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla 6 ve 12 mm boylarında polipropilen (PP) lif, hacimce %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında ilave edilmiştir. Alüminosilikat kaynağı olarak yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. Laboratuvar koşullarında 28 gün kütür edilen geopolimer beton numuneleri daha sonra 14 ve 28 gün boyunca %5 HCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Asit etkisi sonrasında, geopolimer betonların basınç dayanımı, ağırlık, ultra ses hızı (UPV), dış görünüş gibi fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Ayrıca SEM analizleri ile mikro yapıları incelenmeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, PP lif katkısının köprüleme etkisiyle çatlak oluşumunu engellediği için geopolimer betonların asit direncini önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Asit direnci, Geopolimer, Lif boyu, Lif içeriği

Abstract

Cement production continues to increase year by year, bringing many economic and environmental problems. The search for alternative binders to cement is among the most popular research topics of the 21st century. In the studies conducted, "geopolymer" binders, also called alkali activated binders, stand out. Geopolymers are the new generation three-dimensional binders obtained by activating natural and waste pozzolans with high silica and alumina content in high alkaline environments. Geopolymer binders have quite important advantages in terms of strength, durability and economy when compared to normal Portland cement binders. However, the most important obstacle to the widespread use of geopolymer concretes is the thermal curing process required in its production. There is no study in the literature on the effect of fiber length and content on acid resistance of fiber reinforced geopolymer concretes. In this study, the effect of fiber length and fiber content on acid resistance of geopolymer concretes produced without heat curing was revealed. For this purpose, 6 and 12 mm length polypropylene (PP) fiber was added at the rate of 0.5%, 1.0% and 1.5% by volume. Blast furnace slag (BFS) was used as an aluminosilicate source. Geopolymer concrete samples cured for 28 days in laboratory conditions were then exposed to 5% HCl solution for 14 and 28 days. The changes in the physical and mechanical properties of geopolymer concrete such as compressive strength, weight, ultrasonic pulse velocity (UPV), visual appearance after acid effect were investigated. In addition, microstructures were examined with SEM analyzes. As a result of the experimental studies, it has been determined that the PP fiber additive significantly improves the acid resistance of geopolymer concretes as it prevents the formation of cracks with the bridging effect.

Keywords: Acid resistance, Geopolymer, Fiber length, Fiber content

*a Fatih KANTARCI; fatih.kantarci@inonu.edu.tr, Tel: (0422) 377 48 81, orcid.org/0000-0001-6863-995X

1. Giriş

Portland çimentosu, 2019 yılı itibarı ile yıllık 4.2 milyar ton üretim kapasitesini aşan vazgeçilmez bir yapı malzemesidir (Ganesh ve Muthukannan, 2021). Artan talep ile paralel olarak çimento üretiminin 2050 yılında 6.1 milyar ton olacağı tahmin edilmektedir (Ranjbar ve Zhang, 2020; Scrivener vd., 2018). Çimento üretimindeki bu artış beraberinde birçok ekonomik ve çevresel sorunu getirmektedir. Kalkerin ve fosil yakıtların yakılmasına bağlı olarak, 1 ton Portland çimentosu imalatı için yaklaşık olarak 1 ton CO₂ salınımı meydana gelmektedir (Davidovits, 1993; Davidovits, 1994; Malhotra, 1999; Kajaste ve Hurme, 2016; Assi vd., 2018; Moradikhou vd., 2020). Dünyada toplam CO₂ salınımının %7'sinin çimento endüstrisinden kaynaklandığı bilinmektedir (Meyer, 2009; Shi vd. 2012). Bu oranının önümüzdeki birkaç yıl içerisinde %17'ye ulaşacağı tahmin edilmektedir (El-Gamal ve Selim, 2017; Damilola, 2013). CO₂ salınımının neden olduğu sera gazı etkisi küresel sıcaklığı arttırmakta ve iklim değişikliklerine neden olmaktadır. İklim değişikliği yeryüzündeki organizmaların varlığını tehdit eden önemli sorunlardan biridir. Ayrıca çimento üretimi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinden 4.8 GJ/t değerinde enerji sarfiyatı gerektirmektedir (Ranjbar ve Zhang, 2020; Worrell vd., 2001). Enerji fiyatlarındaki artışlar ise çimento üretim maliyetini de arttırmaktadır.

Yukarıda bahsedilen ekonomik ve çevresel nedenlerden ötürü Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı arayışları 21. yüzyılda ivme kazanmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, alkali aktive edilmiş ya da geopolimer bağlayıcılar olarak adlandırılan yeni nesil bir bağlayıcı türü üzerine yoğunlaşmıştır. Geopolimer terimi ilk defa 1978 yılında Fransız araştırmacı Davidovits tarafından alüminosilikat esaslı inorganik polimerlerin tanımı için kullanılmıştır. Geopolimerler uçucu kül, yüksek fırın cürufu, tuf, pomza, perlit gibi doğal ve atık puzolanların yüksek alkali çözeltilisi ile sentezlenmesi sonucu elde edilen yeni nesil bir bağlayıcı türüdür. Geopolimer bağlayıcılar Portland çimentosu ile kıyaslandığında ekonomik, çevresel ve durabilite özellikleri açısından birçok avantaja sahiptir. Geopolimerler, reaktivitesi, maliyeti ve miktarı bakımından farklı birçok alüminosilikat hammaddeden üretilbilir (Davidovits, 2008). Çimentoya alternatif olarak önerilen geopolimerler, çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını %80 oranında azaltabilir (Duxson vd., 2007; Davidovits, 2011; Ganesh ve Muthukannan, 2021). Geopolimer

üretiminin Portland çimento üretimine kıyasla %60 oranında enerji tasarrufu sağladığı (Comrie ve Davidovits, 1988; Davidovits vd., 1990) ve %75 oranında daha ekonomik olduğu çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir (Singh, 2018; Ganesh ve Muthukannan, 2021).

Asit etkisi betonun servis ömrünü önemli ölçüde azaltan çevresel etkilerden bir tanesidir. Asidik ortam doğal olarak meydana gelebileceği gibi tarım, endüstriyel ve kentsel faaliyetler sonucunda da oluşabilir (Kwasny vd., 2018). Asit saldırısı sonucunda oluşan tahribatın boyutu, etki eden asitin tipi, konsantrasyonu, etkime süresi ve beton özelliklerine bağlı olarak değişir (Kwasny vd., 2018; Zivica ve Bajza, 2002; Beddoe ve Dorner, 2005). Asit etkisine maruz kalan geopolimer betonlarda bozulma alüminosilikat yapının kırılması sonucu meydana gelir (Bakharev, 2005). Asit etkisi sonucunda basınç dayanımında görülen düşüş esas olarak bu yapının kırılması sonucunda meydana gelen çatlak oluşumu ile alakalıdır (Djobo vd., 2016). Geopolimer betonların üç boyutlu alüminosilikat yapılarından dolayı asit etkilerine karşı üstün direnç gösterdiği çeşitli çalışmalarda vurgulanmıştır (Palomo vd., 1999; Sata vd. 2012; Bakharev vd., 2003; Ganesh ve Muthukannan, 2021; Moradikhou vd., 2020).

Lifler düşük maliyetleri ve üstün özellikleri nedeniyle son yıllarda beton üretiminde yoğun olarak tercih edilmektedirler. Betonun zayıf olan çekme ve çatlak oluşumu direncinin lif katkısı ile geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Cam elyaf, polipropilen (PP), çelik, bazalt, karbon vb. lifler toplam beton hacminin yüzdesi olarak karışıma ilave edilmektedir (Dawood ve Ramli, 2011; Sabu ve Karthi, 2018; Reed vd., 2014; Aswani ve Karthi, 2017). Lifli geopolimer betonlar ise görece olarak yeni bir araştırma konusudur. Lif tipi, çapı, boyu, oranı ve karıştırma yöntemi geopolimer betonun özelliklerini doğrudan etkiler. Lif boyunun ve oranının geopolimer betonların asit direncine etkisi üzerine literatürde çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın yeniliği, lif boyunun ve lif içeriğinin ısıl kür işlemi uygulanmadan üretilmiş geopolimer betonların asit direncine etkisini ortaya çıkarmasıdır. Bu amaçla 6 ve 12 mm boylarında PP lif, hacimce %0.5, %1.0 ve 1.5 oranlarında ilave edilmiştir. Laboratuar koşullarında 28 gün kür edilen geopolimer beton numuneleri daha sonra 14 ve 28 gün boyunca %5 HCl çözeltilisine maruz bırakılmıştır. Asit etkisi sonrasında, geopolimer betonların basınç dayanımı, ağırlık, ultra ses hızı (UPV), dış görünüş gibi fiziksel ve mekanik özelliklerindeki

değişimler araştırılmıştır. Ayrıca SEM analizleri ile mikro yapıları incelenmeleri gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve metod

2.1. Materyal

2.1.1. Yüksek fırın cürufu (YFC)

Bağlayıcı malzeme alüminosilikat kaynağı olarak kullanılan YFC Karçimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş'den tedarik edilmiştir. YFC'nin kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. YFC'nin kimyasal bileşimleri

Bileşen, (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	Mn ₂ O ₃
YFC	32.47	9.94	1.25	32.45	0.82	0.31	9.31	1.16	3.51

Tablo 2. NaOH alkali aktivatörünün bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri

Sodyum Hidroksit	
Kimyasal formülü	NaOH
Moleküler kütle, (g/mol)	39.997
Asitlik	Çok düşük (pH:13-14)
Çözünürlük, (g/l)	1110 (+20°C'de)
Renk	Beyaz
Yoğunluk, (g/cm ³)	2.13
Kaynama noktası, (°C)	1390
Erime noktası, (°C)	318
Donma noktası, (°C)	14

2.1.3. Su

Deneysel çalışmada kullanılan alkali aktivatör çözeltisi TS EN 1008 standardına uygun olan musluk suyu ile hazırlanmıştır. Karışıma çözelti haricinde ilave su katılmamıştır.

2.1.4. Agregat

Yapılan deneme dökümleri neticesinde, agregat tane çapı arttıkça basınç dayanımının düştüğü

YFC'nin özgül ağırlığı 2.86, özgül yüzeyi ise 3940 cm²/g'dır.

2.1.2. Sodyum hidroksit (NaOH)

Geopolimer bağlayıcı üretiminde sıklıkla kullanılan alkali aktivatör, kolay bulunabilirliği, düşük maliyeti ve düşük viskozitesi nedeniyle NaOH çözeltisidir. Bu sebeple bu çalışmada da NaOH tercih edilmiştir. NaOH aktivatörünün bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

gözlemlendiğinden agregat maksimum tane çapı 8 mm olarak seçilmiştir. Agregatlar 0-2 mm, 2-4 mm ve 4-8 mm tane gruplarına ayrılmıştır (Şekil 1). Agregatların bazı fiziksel özellikleri TS EN 1097-6 standardına göre tespit edilmiş ve Tablo 3'de verilmiştir. Ayrıca agregatlar üzerinde TS EN 1744-1 standardına uygun olarak organik madde içeriği deneyi yapılmış ve kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 1. Dere agregatı; a) 0-2 mm, b) 2-4 mm, c) 4-8 mm

Tablo 3. Agregaların fiziksel özellikleri

	Dere agregası		
	0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm
Kuru özgül ağırlık	2.35	2.46	2.51
Doygun kuru yüzey özgül ağırlık	2.42	2.52	2.57
Su emme oranı, (%)	2.65	2.05	1.95

2.1.5. PP lif

Deneysel çalışmada 6 mm ve 12 mm boylarında PP lif kullanılmıştır (Şekil 2). Liflerin sadece boyları

farklı olup fiziksel ve mekanik özellikleri aynıdır ve Tablo 4’de gösterilmiştir.

Tablo 4. PP liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri

	PP lif tipi	
	PP 6 mm	PP 12 mm
Uzunluk, (mm)	6	12
Özgül ağırlık, (g/cm ³)	0.91	0.91
Çekme dayanımı, (MPa)	350	350
Elastisite modülü, (GPa)	4.2	4.2
Maksimum uzama, (%)	15	15
Su emme	Eser miktarda	Eser miktarda
Isı iletkenliği	Düşük	Düşük
Asit direnci	Yüksek	Yüksek
Alkali direnci	Yüksek	Yüksek

**Şekil 2.** Çalışmada kullanılan PP lif; a) 6 mm, b) 12 mm

2.1.6. HCl çözeltisi

28 günlük lifli geopolimer beton numuneleri 14 ve 28 gün boyunca %5 HCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Çözeltinin pH değeri belirli sıklıkta kontrol edilmiş ve pH değerinin 2.8~3.0 aralığında kalması için ihtiyaç duyuldukça çözelti yenilenmesi yapılmıştır.

2.2. Metot

2.2.1. Deneysel parametreler

Geopolimer betonun üretim parametreleri ve lif oranı, literatür taraması ve ön dökümler neticesinde belirlenmiştir. Buna göre dozaj 400 kg/m³, alkali aktivatör çözeltisi/bağlayıcı oranı 0.53, alkali aktivatör konsantrasyonu 12 M olarak seçilmiştir. Karışıma 6 mm ve 12 mm boylarında hacimce

%0.5, %1.0 ve %1.5 boylarında PP lif ilave edilmiştir. Çalışmanın deneysel parametreleri Tablo 5’de özetlenmiştir.

2.2.2. Karışım oranları

Geopolimer beton karışımlarında YFC dozajı sabit 400 kg/m³, alkali aktivatör çözeltilisi/bağlayıcı oranı ise sabit 0.53 olarak seçilmiştir. 6 mm ve 12 mm

boylarında PP lifler karışıma hacimce %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında ilave edilmiştir (Tablo 5). YFC, NaOH çözeltilisi ve liflerin hacimleri hesaplanıp 1 m³ hacimden çıkarılmış ve agregaların miktarları hesaplanmıştır. Karışım hesapları için [TS 802 ve TS 706 EN 12620+A1](#) standartlarından yararlanılmıştır. Geopolimer beton numunelerin 1 m³ hacim için karışım oranları Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 5. Geopolimer beton üretim parametreleri

Lif parametreleri		Geopolimer beton üretim parametreleri				
Boy, (mm)	Hacimce Oran, (%)	Dozaj, (kg)	Aktivatör/ Bağlayıcı oranı	Alkali aktivatör	Aktivatör kons. (M)	Kür koşulu
6	0.5	400	0.53	NaOH	12	Lab. (23°C)
12	1.0					
	1.5					

Tablo 6. Geopolimer beton numunelerin karışım oranları

Numune ID	Değişkenler		Geopolimer beton bileşenleri, (kg/m ³)					Teorik BHA, (kg/m ³)	
	Lif Özellikleri		YFC	NaOH çözeltilisi	Agrega				PP lif
	Boy, (mm)	Oran, (%)			0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm		
Ref.	-	-	400	212	708.14	409.68	501.36	-	2231.18
PP6-0.5		0.5	400	212	702.70	406.53	497.50	4.55	2223.28
PP6-1.0	6	1.0	400	212	697.25	403.38	493.65	9.10	2215.38
PP6-1.5		1.5	400	212	691.81	400.23	489.79	13.65	2207.48
PP12-0.5		0.5	400	212	702.70	406.53	497.50	4.55	2223.28
PP12-1.0	12	1.0	400	212	697.25	403.38	493.65	9.10	2215.38
PP12-1.5		1.5	400	212	691.81	400.23	489.79	13.65	2207.48

2.2.3. Numune hazırlanması

Geopolimer beton numunelerinde, liflerin karışıma ilave edilme sırası homojen lif dağılımını doğrudan etkilediği için önemlidir. Daha önce yapılan çalışmalarda liflerin kuru karışıma yavaşça ilave edilmesi, daha sonra homojen kuru karışımın alkali aktivatör çözeltilisine tabi tutulması önerilmiştir ([Ranjbar ve Zhang; 2020; Vaidya ve Allouche, 2011; Li vd., 2005; Ganesan vd., 2015](#)). Bu doğrultuda ilk olarak, PP lifler belirlenen oranlarda YFC’ye yavaşça ilave edilmiş ve homojen karışım elde edilinceye kadar 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra agregada dahil edilmiş ve ilave 5 dakika karıştırılmıştır. Son olarak bir gün önceden hazırlanmış olan 12 M NaOH çözeltilisi kuru karışıma yavaşça eklenmiş ve karıştırılmıştır (Şekil 3). Taze haldeki geopolimer beton karışımı 5*5*5 cm boyutlarındaki çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Yerleştirme sırasında önemli işlenebilirlik sorunları yaşanmamıştır. Geopolimer bağlayıcı üretiminde sıklıkla tercih edilen ve en

önemli dezavantajı olarak nitelendirilen ısıl kür işlemi uygulanmamıştır. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler asit deneylerine tabi tutulmak amacıyla deney gününe (28. Gün) kadar laboratuvar koşullarında bekletilmiştir.

2.2.4. Uygulanan deneyler

28 günlük geopolimer beton numuneleri plastik kaplarda hazırlanmış olan %5 HCl çözeltilisine daldırılmıştır. Asit ortamında buharlaşma olmaması ve bunun sonucuna çözeltili yoğunluğunun değişmemesi için kapların üstünün kapalı olmasına özen gösterilmiştir. 14 ve 28 günün sonunda numuneler çözeltiliden çıkarılmış ve yüzeyler fırça ile silinmiştir. Asit etkisi sonucunda, geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı, ağırlık, UPV, dış görünüş gibi fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler [ASTM C 109, ASTM C 267 ve ASTM C 597](#) standartları ile uyumlu olarak araştırılmıştır. Ayrıca numunelerin mikro yapıları SEM analizleri ile incelenmiştir.



Şekil 3. Lifli geopolimer beton üretimi; a) Kuru karışım, b) Taze lifli geopolimer beton, c) Sertleşmiş lifli geopolimer beton numunesi

3. Bulgular ve tartışma

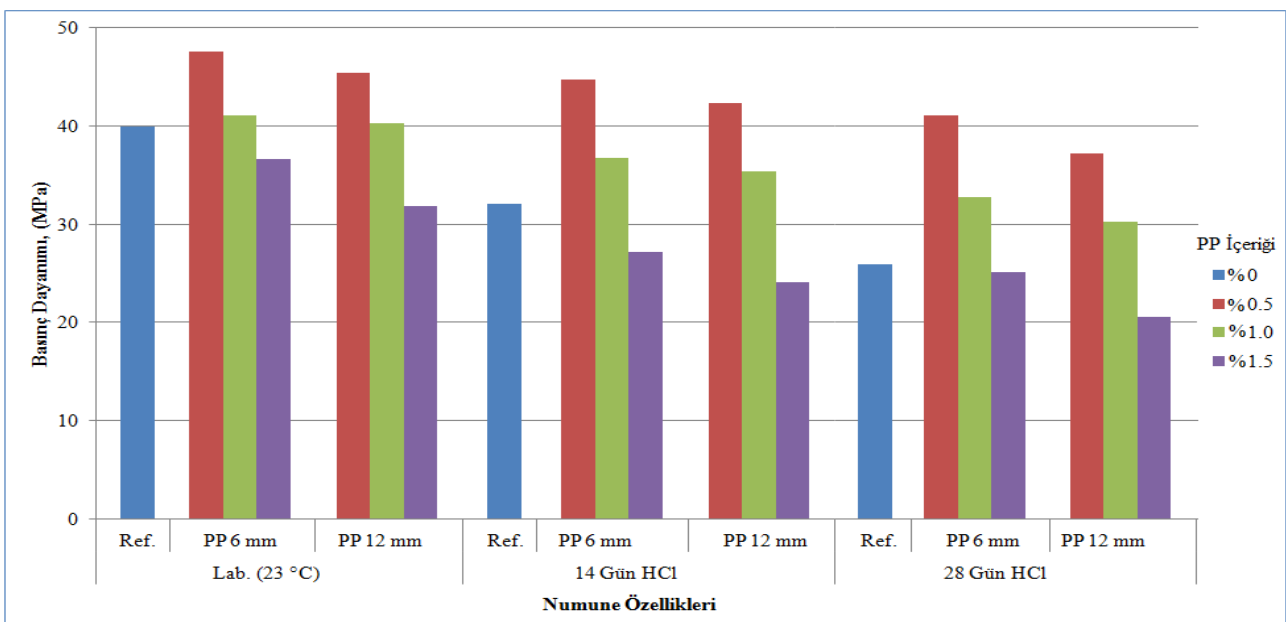
3.1. Basınç dayanımı

Geopolimer beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları ile 14 ve 28 gün boyunca %5 HCl çözeltisine maruz bırakılmış numunelerin basınç

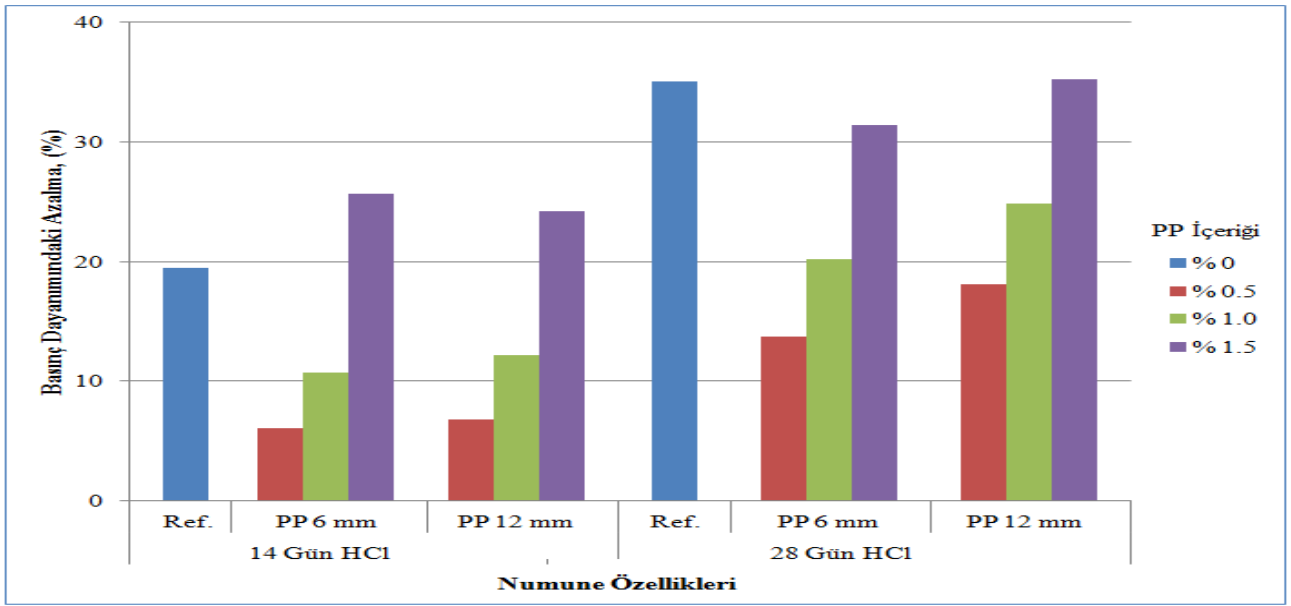
dayanımları Tablo 7’de verilmiş olup Şekil 4’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek amacıyla, asit etkisi sonucunda, maruz bırakılmamış numuneye kıyasla basınç dayanımında görülen azalma da Şekil 5’de verilmiştir.

Tablo 7. Geopolimer beton numunelerin asit etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımı değerleri

İncelenen Parametre		Lif İçeriği, (% Hacimce)						
		Ref.	PP 6 mm			PP 12 mm		
		0	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
Basınç Dayanımı, (MPa)	28 Günlük Referans	39.9	47.6	41.1	36.6	45.4	40.3	31.8
	14 Gün HCl Sonrası	32.1	44.7	36.7	27.2	42.3	35.4	24.1
	28 Gün HCl Sonrası	25.9	41.1	32.8	25.1	37.2	30.3	20.6
Dayanımındaki Azalma, (%)	14 Gün HCl Sonrası	19.5	6.1	10.7	25.7	6.8	12.2	24.2
	28 Gün HCl Sonrası	35.1	13.7	20.2	31.4	18.1	24.8	35.2



Şekil 4. PP lif boyunun ve içeriğinin geopolimer betonların asit etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımlarına etkisi



Şekil 5. Geopolimer betonların asit etkisi sonucunda, maruz bırakılmamış numuneye kıyasla basınç dayanımında görülen azalma

Geopolimer beton numunelerin asit etkisi öncesi araştırma bulguları incelendiğinde, hacimce %0.5 oranında lif katkısının basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durum, lif katkısının çatlak oluşumunu engelleyen köprü görevi görmesi ve böylelikle bağlayıcı fazda daha yoğun bir mekanik bağ oluşumu sayesinde olabilir (Dawood ve Ramli, 2011; Sabu ve Karthi, 2018). Artan lif içeriğinin işlenebilirlik problemlerine yol açması nedeniyle basınç dayanımını düşürdüğü tespit edilmiştir. Azalan işlenebilirlik, lifler arasındaki bağlantıyı zayıflatır, matris içerisinde boşluklara neden olur, ara yüzey geçiş bölgelerinde kusurlara yol açar ve böylelikle basınç dayanımında azalmaya neden olur (Ranjbar ve Zhang, 2020; Zollo, 1997; Martinie vd., 2010; Zhang vd., 2018; Sukontasukkul vd., 2018; Moradikhrou vd., 2020). Optimum oranda lif katkısının geopolimer betonların basınç dayanımını iyileştirdiği çeşitli çalışmalarda doğrulanmıştır (Ranjbar ve Zhang, 2020; Moradikhrou vd., 2020; Mohseni, 2018). 6 mm lif boyu bütün içeriklerde daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. Bu durum lif boyu arttıkça liflerin homojen dağılmasının daha zor olmasından kaynaklanmış olabilir (Wang vd., 2020).

Geopolimer betonların asit etkisi sonrası araştırma bulguları incelendiğinde, asit etkisi öncesi basınç dayanımları ile uyumlu olarak %0.5 oranında lif katkısının asit etkisine daha dayanıklı olduğu tespit

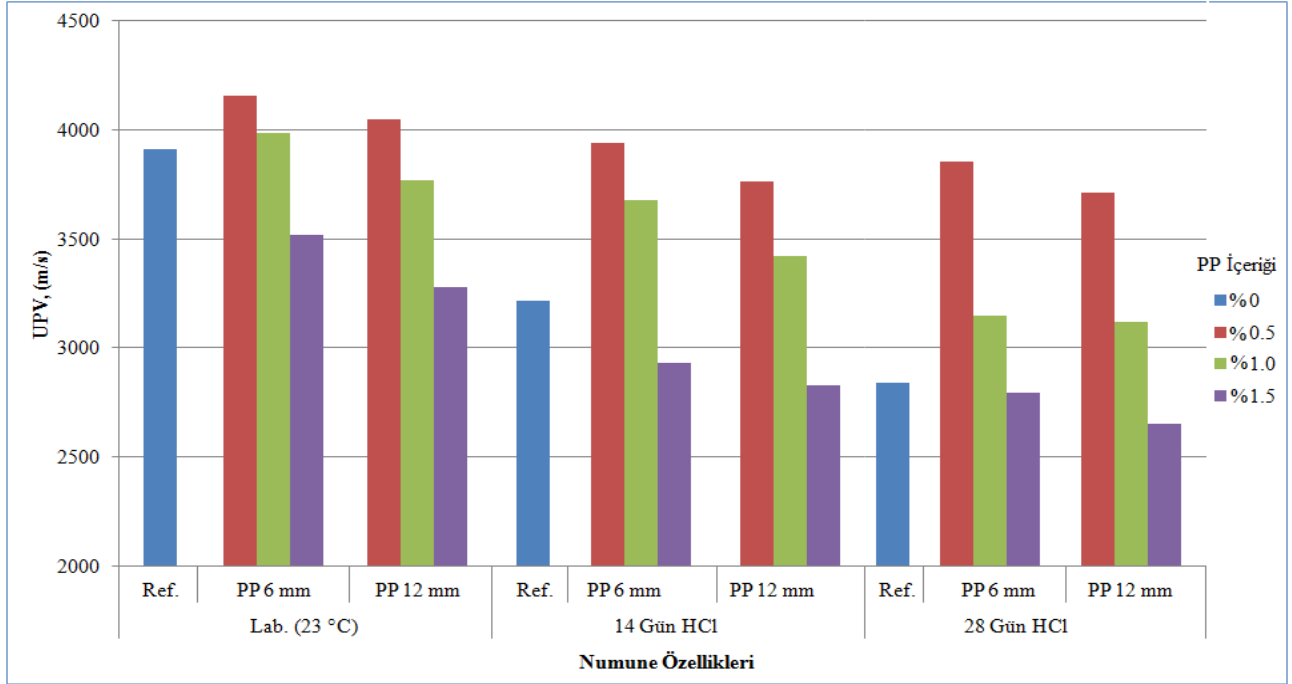
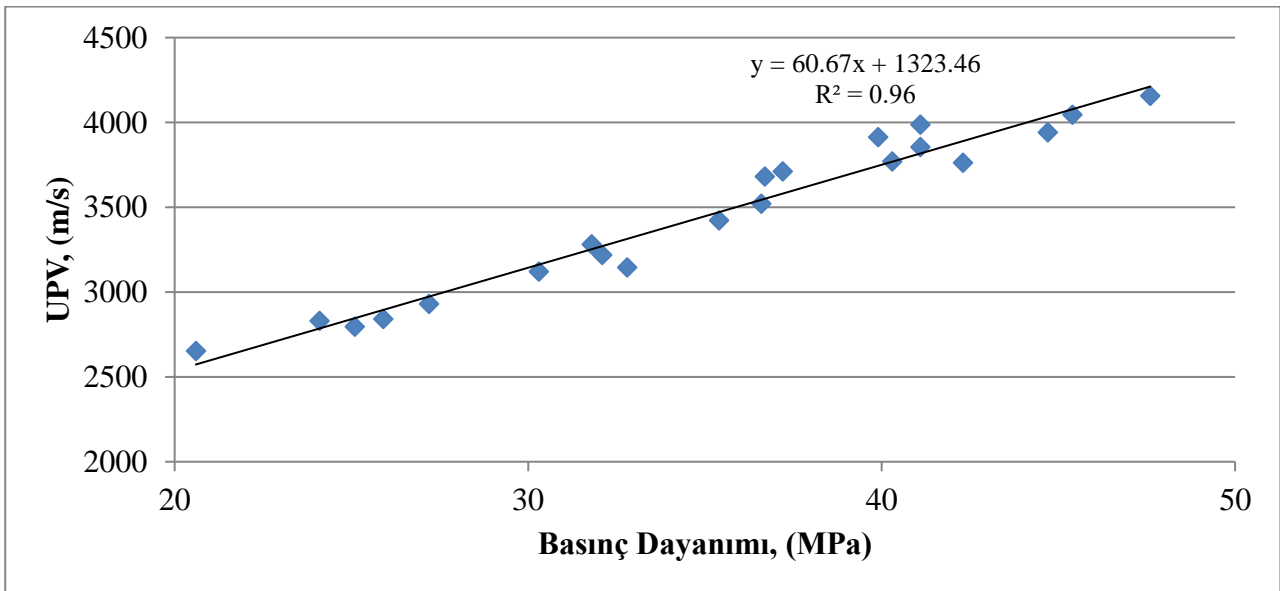
edilmiştir. Bu durum yukarıda da bahsedildiği üzere optimum oranda lif katkısının çatlak gelişimini engellemesi ve böylelikle asit çözeltisinin beton bünyesine nüfuz etmesinin zorlaşması nedeniyle olmuş olabilir. Buna karşılık %1.5 oranında lif katkısının asit direncini düşürmesi ise, artan lif içeriğinin boşluklu yapıya yol açması ve böylelikle asit çözeltisinin içyapıya daha kolay ulaşabilmesinden kaynaklı olabilir. Bununla birlikte, %1.0 oranında lif kullanılması basınç dayanımında kayda değer bir iyileşmeye neden olmazken, asit etkisi sonrası kalan basınç dayanımlarında daha az düşüşe neden olmuştur (Şekil 5). 6 mm boyunda PP lif kullanılması 12 mm'ye kıyasla daha etkili sonuçlar vermiştir. Optimum oranda lif içeren geopolimer betonların asit dirençlerinin yüksek olduğu çeşitli çalışmalarda doğrulanmıştır (Ranjbar ve Zhang, 2020; Ganesan vd., 2015; Yunsheng vd., 2008).

3.2. UPV değerleri

Geopolimer beton numunelerinin asit etkisi öncesi ve sonrası UPV değerleri Tablo 8'de verilmiş olup Şekil 6'da verilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki Şekil 7'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Geopolimer beton numunelerin asit etkisi öncesi ve sonrası UPV değerleri

İncelenen Parametre	Lif İçeriği, (% Hacimce)							
	Ref.	PP 6 mm			PP 12 mm			
		0	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
UPV, (m/s)	28 Günlük Referans	3914	4156	3987	3521	4046	3769	3281
	14 Gün HCl Sonrası	3218	3941	3681	2930	3762	3423	2831
	28 Gün HCl Sonrası	2841	3854	3146	2796	3711	3120	2652

**Şekil 6.** Geopolimer beton numunelerin UPV değerleri**Şekil 7.** Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki

Geopolimer beton numunelerin UPV değerleri, basınç dayanımı bulguları ile uyumlu olarak lif içeriği arttıkça düşmüştür. Asit etki süresi arttıkça

UPV değerleri beklendiği gibi düşmüştür. %0.5 oranında lif katkısı matris yapıyı güçlendirdiği için UPV değerleri artmış, buna karşılık %1.5 oranında

lif ilavesi boşluklu yapı oluşturması nedeniyle UPV değerleri düşmüştür. Ayrıca asit etkisi sonucunda bağlayıcı jellerin tahrip olması, boşluklu yapının artmasına ve UPV değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında iyi bir ilişki ($R^2=0.96$) elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen UPV değerleri daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen bulgular ile

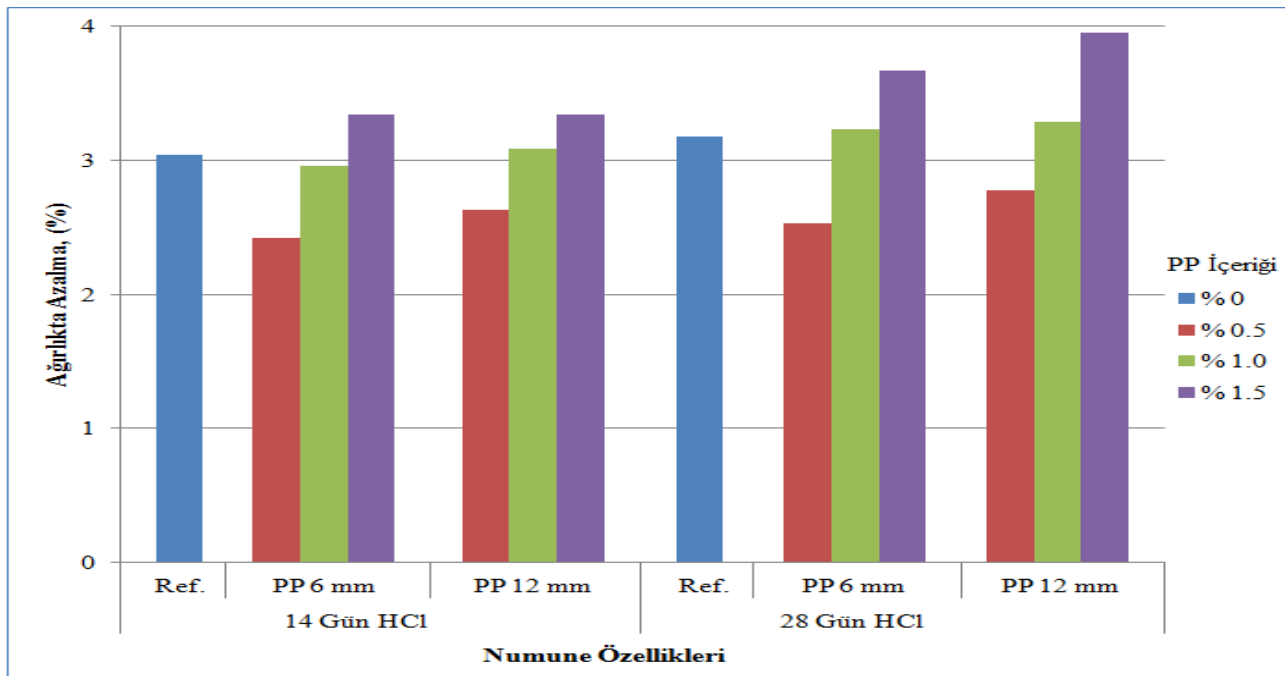
örtüşmektedir (Kantarıcı vd., 2019; Ghosh vd., 2018; Yadollahi vd., 2015; Noushini ve Castel, 2016).

3.3. Ağırlık değişimi

Geopolimer beton numunelerinin asit etkisi sonrası ağırlığında görülen azalma Tablo 9’da verilmiş olup Şekil 8’de gösterilmiştir.

Tablo 9. Geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası ağırlık kayıpları

İncelenen Parametre		Lif İçeriği, (% Hacimce)						
		Ref.	PP 6 mm			PP 12 mm		
		0	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
Ağırlıkta azalma, (%)	14 Gün HCl Sonrası	3.04	2.42	2.96	3.34	2.63	3.09	3.54
	28 Gün HCl Sonrası	3.18	2.53	3.23	3.67	2.78	3.29	3.95



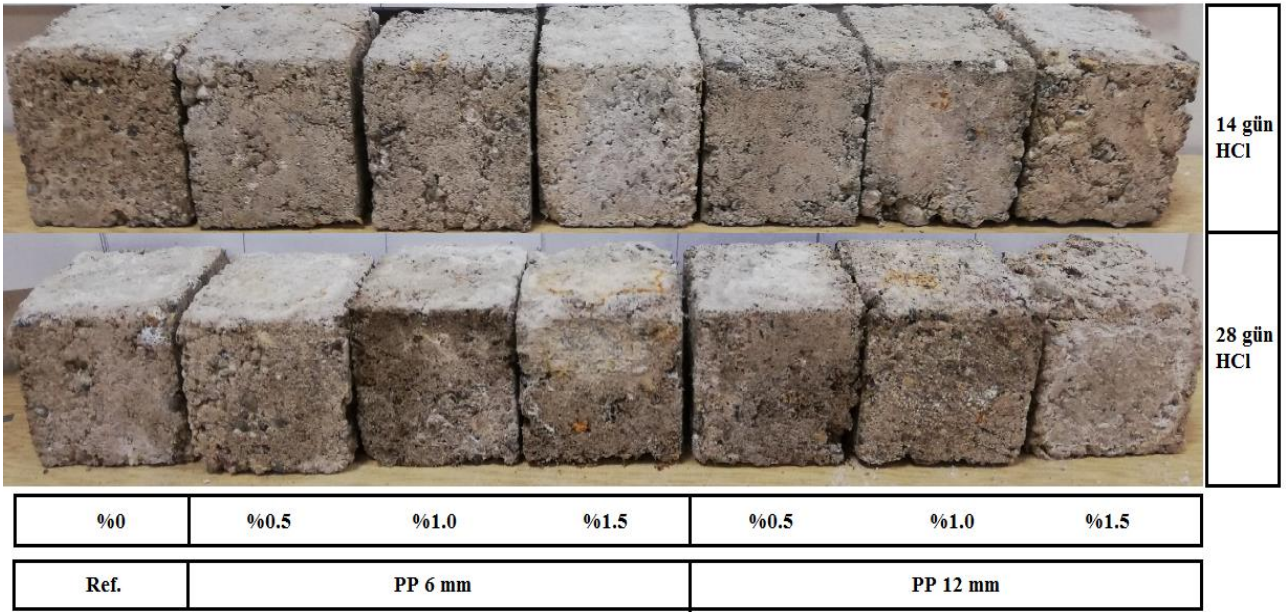
Şekil 8. Geopolimer beton numunelerin asit etkisi sonrası ağırlık kayıpları

Asit etkisi sonucunda geopolimer betonların ağırlıkları beklendiği gibi düşmüştür. Asit etki süresi arttıkça ağırlık kayıpları da artmıştır. Asit etkisi sonucunda meydana gelen ağırlık kayıpları geopolimer jel matrisindeki alüminosilikat bağlarının kırılmasından kaynaklanmaktadır (Djobo vd., 2016; Bakharev, 2005). Ancak %0.5 oranında lif katkısı, çatlak gelişimini engellemesi ve böylelikle asit çözeltisinin beton bünyesine daha az nüfuz etmesi nedeniyle ağırlık kayıplarını azaltmıştır. Geopolimer betonların asit ortamlarında ağırlık kayıplarının, normal Portland çimentolu betonlara kıyasla daha az olduğu çeşitli çalışmalarda doğrulanmıştır (Ariffin vd., 2013;

Kim vd., 2014; Davidovits, 1991; Huseien vd., 2017; Bhutta vd., 2014). Bu çalışmada ise hacimce %0.5 oranında lif katkısının asit ortamlarında ağırlık kayıplarını daha da azalttığı ortaya çıkarılmıştır. Lif içeriği ve lif boyu arttıkça ağırlık kayıpları da artmıştır.

3.4. Görsel inceleme

Geopolimer beton numunelerinin 14 ve 28 gün boyunca %5 HCl çözeltisine maruz bırakıldıktan sonraki görünüşleri Şekil 9’da verilmiştir.



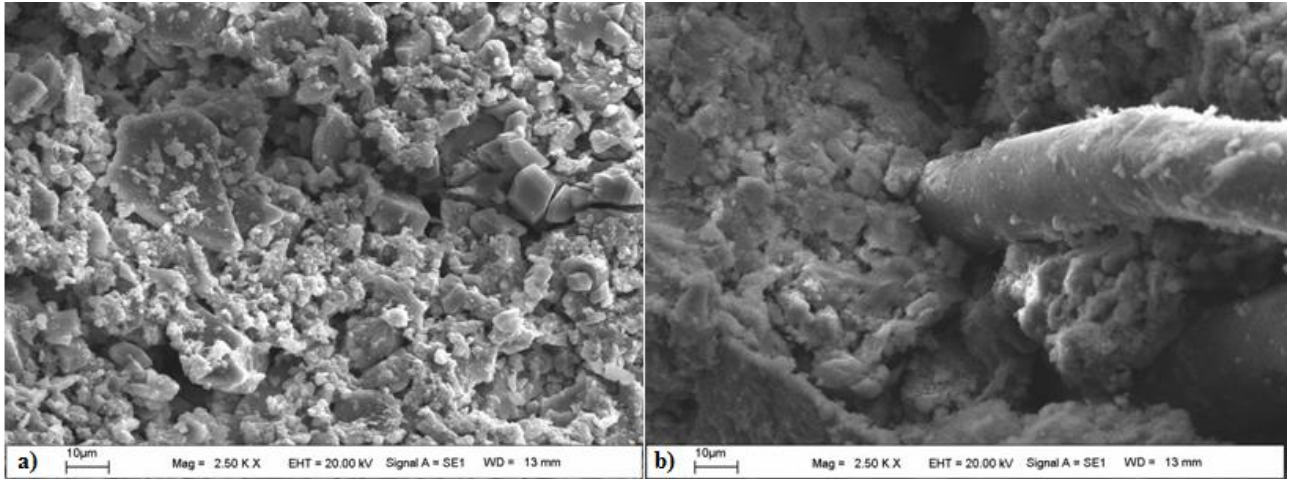
Şekil 9. Geopolimer numunelerin asit etkisi sonrası görünüşleri

Geopolimer beton numunelerde asit etkisi sonucunda yüzeyde aşınmalar ve köşelerde kırılmalar meydana gelmiştir. Özellikler %1.5 oranında lif içeriğine sahip geopolimer betonlarda ağırlık kayıpları ile uyumlu olarak daha fazla tahribat gözlenmiştir. Ayrıca numunelerin yüzeyinde yer yer beyaz renkli tabakalanmalar tespit edilmiştir. Benzer oluşumlar [Guo vd. \(2016\)](#) tarafından %5 HCl çözeltisine maruz bırakılmış geopolimer betonlarda da rapor edilmiştir. Bu

durum geopolimer jel tabakası ile asit çözeltisi arasında oluşan çökeltme reaksiyonlarından kaynaklı olabilir ([Djobo vd., 2016](#)).

3.5. Mikroyapı analizi

Geopolimer beton numunelerinin 14 gün %5 HCl çözeltisine maruz bırakıldıktan sonraki SEM görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. 14 gün %5 HCl etkisine maruz bırakılmış geopolimer beton numunelerinin SEM görüntüleri, a) Lif katkısız referans numune, b) 6 mm boyunda %0.5 oranında lif katkılı numune

SEM görüntüleri incelendiğinde optimum oranda lif katkısının bağlayıcı fazda oluşturduğu köprü etkisi sayesinde daha yoğun ve kompakt bir mikro yapıya neden olduğu, buna karşılık lif katkısız numunelerin ise göreceli olarak daha boşluklu yapıda olduğu görülmüştür. Bu durum basınç

dayanımı ve ağırlıklardaki düşüş bulguları ile örtüşmektedir.

4. Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada, laboratuvar koşullarında üretilmiş geopolimer betonların asit direncine lif boyunun ve

içeriğinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 6 ve 12 mm boylarında PP lif, hacimce %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarında ilave edilmiştir. Araştırma bulguları şu şekilde özetlenebilir:

- Hacimce %0.5 oranında lif katkısı, çatlak oluşumunu engelleyen köprü görevi görmesi ve böylelikle bağlayıcı fazda daha yoğun bir mekanik bağ oluşturması sayesinde geopolimer betonların asit öncesi ve sonrası basınç dayanımını arttırmıştır.
- Hacimce %1.5 oranında lif katkısı, artan lif içeriğinin boşluklu yapıya yol açması ve böylelikle asit çözeltisinin içyapıya daha kolay ulaşabilmesi nedeniyle asit direncini düşürmüştür.
- 6 mm boyunda PP lif kullanılması homojen dağılmasının daha kolay olması nedeniyle 12 mm'ye kıyasla daha etkili sonuçlar vermiştir
- UPV değerleri, basınç dayanımı bulguları ile uyumlu olarak lif içeriği arttıkça düşmüştür. Basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında iyi bir ilişki ($R^2=0.96$) elde edilmiştir.
- Hacimce %0.5 oranında lif katkısı, çatlak gelişimini engellemesi ve böylelikle asit çözeltisinin beton bünyesine daha az nüfuz etmesi nedeniyle ağırlık kayıplarını azaltmıştır.
- Hacimce %1.5 lif içeren geopolimer beton numunelerinin asit etkisi sonucunda yüzeyinde aşınmalar ve köşelerde kırılmalar meydana gelmiştir. Ayrıca numunelerin yüzeyinde çökme reaksiyonları nedeniyle yer yer beyaz renkli tabakalanmalar tespit edilmiştir.
- Hacimce %0.5 lif katkısının bağlayıcı fazda oluşturduğu köprü etkisi sayesinde daha yoğun ve kompakt bir mikro yapıya neden olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda hacimce %0.5 lif katkısının, %1.0 ve %1.5 oranlarına kıyasla daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Lifli geopolimer betonların yaygın bir şekilde kullanılabilmesi için çeşitli lif türlerinin ve oranlarının farklı çevresel koşullar altındaki etkisinin ayrıntılı bir şekilde ortaya çıkarılmasına ihtiyaç vardır. Sürdürülebilir yapı malzemesi olan geopolimer betonların kullanılması çevresel ve ekonomik birçok avantaj sağlayacaktır.

Kaynaklar

Ariffin, M. A. M., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W., Tahir, M. M. and Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and building materials*, 43, 80-86.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.018>

Assi, L.N., Deaver, E.E. and Ziehl, P. (2018). Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 167, 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.193>

ASTM C109. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C267-20. (2020). Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C597-16. (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Aswani, E. and Karthi, L. (2017). A literature review on fiber reinforced geopolymer concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(2), 408-411.

Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35(4), 658-670. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>

Bakharev, T., Sanjayan, J. G. and Cheng, Y. B. (2003). Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete research*, 33(10), 1607-1611. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00125-X)

Beddoe, R. E. And Dorner, H. W. (2005). Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. *Cement and concrete research*, 35(12), 2333-2339. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.002>

Bhutta, M. A. R., Hussin, W. M., Azreen, M. and Tahir, M. M. (2014). Sulphate resistance of geopolymer concrete prepared from blended waste fuel ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), 04014080. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001030)

Comrie, D.C. and Davidovits, J. (1988). Long Term Durability of Hazardous Toxic and Nuclear Waste Disposals, *Proceedings of Geopolymer88; First European Conference on Soft Mineralogy*, Compiegne.

- Damilola, O.M. (2013). Syntheses, characterization and binding strength of geopolymers: a review. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2(6), 185–193. doi: 10.11648/j.ijmsa.20130206.14
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/bf01912193>
- Davidovits, J. (1993). Geopolymer cements to minimise carbon-dioxide greenhousewarming. *Ceramic Transactions*, 37, 165–182.
- Davidovits, J. (1994). High-Alkali Cements for 21st Century Concretes. *ACI Special Publication*, 144, 383-398.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*, Institut Géopolymère, Saint-Quentin.
- Davidovits, J. (2011). *Geopolymer Chemistry and Applications*, third ed. Institute of Geopolymere.
- Davidovits, J., Comrie, D.C., Paterson, J.H. and Ritcey, D.J. (1990). Geopolymeric concretes for environmental protection, *Concrete International*, 12(7), 30–40.
- Dawood, E. T. and Ramli, M. (2011). Contribution of hybrid fibers on the properties of high strength concrete having high workability. *Procedia Engineering*, 14, 814-820. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.103>
- Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K. and Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 124, 606-614. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.141>
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C. and Van Deventer, J. S. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590-1597. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>
- El-Gamal, S.M.A. and Selim, F.A. (2017). Utilization of some industrial wastes for eco-friendly cement production. *Sustainable Materials and Technologies*, 12, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.03.001>
- Ganesan, N., Abraham, R. and Raj, S. D. (2015). Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 471-476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014>
- Ganesh, A.C. and Muthukannan, M. (2021). Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124543>
- Ghosh, R., Sagar, S. P., Kumar, A., Gupta, S. K. and Kumar, S. (2018). Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser. *Journal of building engineering*, 16, 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.009>
- Guo, C. M., Wang, K. T., Liu, M. Y., Li, X. H. and Cui, X. M. (2016). Preparation and characterization of acid-based geopolymer using metakaolin and disused polishing liquid. *Ceramics International*, 42(7), 9287-9291. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.02.073>
- Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K. and Hussein, A. A. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 54-74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.076>
- Kajaste, R. and Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions-management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041-4052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
- Kantarci, F., Türkmen, İ. and Ekinçi, E. (2019). Optimization of production parameters of geopolymer mortar and concrete: A comprehensive experimental study. *Construction and Building Materials*, 228, 116770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116770>
- Kim, Y. Y., Lee, B. J., Saraswathy, V. and Kwon, S. J. (2014). Strength and durability performance of alkali-activated rice husk ash geopolymer mortar. *The Scientific World Journal*, 2014, 209584. <https://doi.org/10.1155/2014/209584>
- Kwasny, J., Aiken, T. A., Soutsos, M. N., McIntosh, J. A. and Cleland, D.J. (2018). Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 166, 537-553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.129>
- Li, Z., Zhang, Y. And Zhou, X. (2005). Short fiber reinforced geopolymer composites manufactured by extrusion. *Journal of materials in civil engineering*, 17(6), 624-631.

DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:6(624)

- Malhotra, V.M. (1999). Making Concrete “Greener” With Fly Ash. *Concrete International*, 21(5), 61-66.
- Martinie, L., Rossi, P. and Roussel, N. (2010). Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. *Cement and concrete research*, 40(2), 226-234. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.032>
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601-605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>
- Mohseni, E. (2018). Assessment of Na₂SiO₃ to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 186, 904-911. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.032>
- Moradikhou, A.B., Esparham, A. and Avanaki, M.J. (2020). Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 25,118965 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118965>
- Noushini, A. and Castel, A. (2016). The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 464-477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.210>
- Palomo, A., Blanco-Varela, M. T., Granizo, M. L., Puertas, F., Vazquez, T. and Grutzeck, M. W. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 29(7), 997-1004. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00074-5)
- Ranjbar, N., and Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>
- Reed, M., Lokuge, W. and Karunasena, W. (2014). Fibre-reinforced geopolymer concrete with ambient curing for in situ applications. *Journal of materials science*, 49(12), 4297-4304. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8125-3>
- Sabu, A. and Karthi, L. (2018). A review on strength properties of fibre and hybrid fibre reinforced geopolymer concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5, 1686-1690.
- Sata, V., Sathonsaowaphak, A. and Chindaprasirt, P. (2012). Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 700-708. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010>
- Scrivener, K.L., John, V.M. and Gartner, E.M. (2018). Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Shi, X.S., Wang, Q.Y., Zhao, X.L. and Collins, F. (2012). Discussion on properties and microstructure of geopolymer concrete containing fly ash and recycled aggregate. *Advanced Materials Research*, 450-451, 1577-1583. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.1577>
- Singh, N.B. (2018). Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. *Minerals*, 8(7), 299. <https://doi.org/10.3390/min8070299>
- Sukontasukkul, P., Pongsopha, P., Chindaprasirt, P. and Songpiriyakij, S. (2018). Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer. *Construction and Building Materials*, 161, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.122>
- TS 706 EN 12620+A1. (2009). Aggregates for concrete. Turkish Standards Institution, Ankara-Turkey.
- TS 802. (2016). Design of concrete mixes. Turkish Standards Institution, Ankara-Turkey.
- TS EN 1008. (2003). Mixing water for concrete- Specifications for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete, Turkish Standards Institution, Ankara-Turkey.
- TS EN 1097–6. (2013). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. Turkish Standards Institution, Ankara-Turkey.
- TS EN 1744–1:2009+A1. (2013). Tests for chemical properties of aggregates - Part 1: Chemical analysis. Turkish Standards Institution, Ankara-Turkey.

- Vaidya, S. and Allouche, E. N. (2011). Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete. *Materials and structures*, 44(8), 1467-1475. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9711-3>
- Wang, Y., Zheng, T., Zheng, X., Liu, Y., Darkwa, J. and Zhou, G. (2020). Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 251, 118960. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118960>
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C. and Meida, L.O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26(1), 303-329. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Yadollahi, M. M., Benli, A. and Demirboğa, R. (2015). The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 94, 767-774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.052>
- Yunsheng, Z., Wei, S., Zongjin, L., Xiangming, Z. and Chungkong, C. (2008). Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. *Construction and Building Materials*, 22(3), 370-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.006>
- Zhang, H., Wang, L., Zheng, K., Bakura, T. J. and Totakhil, P. G. (2018). Research on compressive impact dynamic behavior and constitutive model of polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 187, 584-595. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.164>
- Zivica, V. and Bajza, A. (2002). Acidic attack of cement-based materials—a review Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures. *Construction and building materials*, 16(4), 215-222. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00011-9)
- Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and concrete composites*, 19(2), 107-122. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7)