



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Jeopolimer Betonlarda Sülfürik Asit Etkisinin Araştırılması

 Ümit YURT^{a,*},  Behçet DÜNDAR^b,  Emriye ÇINAR^b

^a İnşaat Bölümü, Düzce MYO, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: umityurt@duzce.edu.tr

DOI: [10.29130/dubited.644176](https://doi.org/10.29130/dubited.644176)

ÖZET

İnşaat sektörünün önemli malzemelerinden biri olan çimento üretimi için yüksek miktarlarda enerji harcanmaktadır. İnşaat sektöründe çok fazla kullanım alanı olan çimentolu kompozitler için alternatif olabilecek çevreci çözümler tercih edilebilir. Çimento kullanılmadan üretilen yapı malzemeleri çimento üretim miktarını azaltarak küresel ısınmanın zararlı etkilerini azaltacaktır. Üretilen çevreci ürünlerin dayanım ve durabilite özellikleri açısından hâlihazırda kullanılan yapı malzemelerinin yerine geçebilecek nitelikte olması beklenmektedir. Bu çalışmada demir çelik fabrikalarının bir atığı olan Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC), Sodyum Hidroksit (NaOH), Sodyum Silikat (Na₂SiO₃), agrega, hiperakışkanlaştırıcı ve su kullanılarak yüksek dayanımlı (65-85 MPa) jeopolimer betonlar üretilmiştir. Sertleşmiş jeopolimer numuneler, asit saldırılarına karşı dayanıklılık özelliklerini belirlemek amacıyla 0,5M, 1M ve 1,5 M'lik Sülfürik Asit (SA) çözeltisi içerisinde 1, 7, 14, 21 ve 28 gün süresince asit etkisine maruz bırakılmıştır. Jeopolimer numunelerin ağırlık kayıpları, su emme ve porozite değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak numunelerin asitte kalma süreleri arttıkça su emme, porozite ve ağırlık kayıp oranlarında artış gözlemlenmiştir. Su emme -ağırlık kaybı arasındaki ilişkiye benzer şekilde su emme ve porozite arasında da istatistiksel olarak doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Jeopolimer Beton, Yüksek Fırın Cürufu, Asit Etkisi, Sülfürik Asit, Porozite

Investigation of Sulfuric Acid Effect in Geopolymer Concrete

ABSTRACT

High amounts of energy are used for cement production, which is one of the important materials of the construction sector. For the cementitious composites which have a lot of usage in the construction sector, alternative solutions which may be an alternative may be preferred. Building materials to be produced without the use of cement will reduce the amount of cement production and reduce the harmful effects of global warming. The environmental products to be produced instead of cementitious composites are expected to replace the currently used building materials in terms of strength and durability properties. In this study, high strength (65-85 MPa) geopolymer concretes were produced by using Blast Furnace Slag (BFS), sodium hydroxide (NaOH), sodium silicate (Na₂SiO₃), aggregate, hyper plasticizer and water. Hardened concrete specimens were subjected to acid effect in 0.5M, 1M and 1.5M Sulfuric Acid (SA) solution for 1, 7, 14, 21 and 28 days to determine their durability to acid attacks. Weight loss, water absorption and porosity values of geopolymer concretes specimen on days 1, 7, 14, 21 and 28 were determined. As a result, increasing acid exposure times

increased water absorption, porosity and weight loss rates. Similar to the relationship between water absorption and weight loss, a statistically linear relationship was found between water absorption and porosity.

Keywords: Geopolymer Concrete, Blast Furnace Slag, Acid Effect, Sulfuric Acid, Porosity

I. GİRİŞ

Durabilite malzeme tasarımı için önemli kriterlerden biridir [1, 2]. Dayanıklı bir malzeme, doğal kaynakların en iyi şekilde kullanımını ve atıkları zararlı çevresel etkilerinin azalmasına katkı sağlamalıdır. Malzeme bileşimi, agresif ortamlarda hizmet ömrü açısından önemlidir [3]. Yapı malzemeleri, organik ve inorganik asitlerin neden olduğu çeşitli kimyasal saldırılara maruz kalabilir [4, 5]. Altyapılar ve binalar çevresindeki agresif ortamların çeşitliliği nedeniyle, araştırmacıların inşaat malzemelerinin farklı çevre tehditlerine karşı betonun direncini artırmaya yönelik çalışmalar yaptığı bilinmektedir. Şiddetli asit saldırısına maruz kalma durumu, beton dayanıklılığı için ana sorunlardan biri olarak kabul edilir [6]. Bu kimyasal saldırılar sıklıkla eşzamanlı olarak gerçekleşir ve betonun mikro yapısındaki fiziksel değişikliklere; betonun porozitesinin, geçirgenliğinin ve bütünlüğünün değişmesine neden olur [7]. En fazla kimyasal saldırı sülfat ve asit saldırısı olarak gerçekleşmektedir [4, 8]. Çimento esaslı malzemelerin çoğu asidik ortamlarda, özellikle sülfürik asit (H_2SO_4), hidroklorik asit (HCl) ve nitrik asit (HNO_3) gibi güçlü asitlere karşı zayıftır. Güçlü asitlerin oluşumu endüstriyel faaliyetlerde daha belirgin olmasına rağmen, bu asitler genellikle kentsel faaliyetlerle ilgili yeraltı suyu, deniz suyu ve kanalizasyon sistemlerinde ortaya çıkabilir [4]. Özellikle büyük sanayi ülkelerinde küresel kirliliğin artması asit yağmurlarına neden olmaktadır [9]. Sonuç olarak, beton yapılar bu zararlı ortamlara daha fazla maruz kalmaktadır. Saldırının ciddiyeti ve kapsamı, kullanılan çimento türü ve genel beton kalitesi gibi betonun bileşimiyle ilgili faktörler ve ayrıca asidik ortamın özellikleri ile doğrudan ilgilidir [5, 10, 11].

Çimentolu kompozitlerin kullanım alanlarına göre tasarım yapılması ve mümkünse asit saldırılarına karşı alternatif ve sürdürülebilir yeni malzemelerin bulunması gerekmektedir. Alternatif çevreci yapı malzemelerinin kullanımı çimento üretim miktarını azaltarak çevreci yönüyle tercih sebebi olacaktır. Günümüzde çimento kullanılmadan alkali aktivasyonu ile yapı malzemeleri üretilebilmektedir. Jeopolimerler, çimento bazlı bağlayıcılara düşük karbonlu bir alternatiftir. Çimento üretimi için gerekli olan yüksek sıcaklık ve dolayısıyla CO_2 salınımı yerine jeopolimer betonlar daha az enerji sarfiyatı olan, silisyum ve alüminyum içeriği yüksek malzemelerden üretilen bir tür inorganik malzemedir [12, 13]. Bunlar tipik olarak amorf alümino silikatlardan oluşan bir toz öncü maddesi ve hidroksitler, silikatlar veya bunların karışımları formunda yüksek pH sağlayan bir alkali kaynağı içeren sıvı kimyasal aktivatörden oluşur. Karıştırıldığında, iki bileşen, seramik benzeri bir şekilsiz (düzensiz) mikro yapı oluşturmak için bir çözülme/yoğunlaşma reaksiyonuna girer [14]. Jeopolimerler, alkali aktif maddeler olarak adlandırılan, daha geniş bir malzeme grubunun alt grubudur [15]. Farklı kalitede jeopolimerler üretebilecek çok çeşitli potansiyellerde öncül ve aktivatörler vardır [16]. Jeopolimerler, yüksek basınç dayanımının yanında düşük sünme, iyi asit direnci ve düşük büzülme gibi birçok mükemmel özelliğe sahiptir [17, 18]. Bu nedenle, bazı alanlarda geleneksel betonlar yerine tercih edilmektedir [19, 20].

Shahrajabian and Behfarnia alkali aktivasyonlu cüruf betonlar üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada nano-silika, nano-alümina ve nano-kil içeren nano partiküllerin betonun donma ve

çözülme döngülerine olan direncini araştırmışlardır. Sonuç olarak nano-silis ve nano-kilin nano-alüminadan, dayanım ve durabilite özelliklerini geliştirmede daha iyi olduğunu bildirmişlerdir [21]. Sun et al. Geçirimli beton üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada metakaolin cüraf karışımı jeopolimer betonların agrega boyutu ve bağlayıcı oranının betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak üç farklı agrega boyutu (2-4, 4-8, 8-16) kullanarak üretilen jeopolimer betonlar maksimum 36.2 MPa basınç dayanımına ulaşmışlardır. Elde edilen tüm karışımlar için agrega boyutunun artışı ile basınç dayanımı ve yoğunluk değerlerin azaldığını, toplam porozite ve su geçirimsizliği değerlerinin artış gösterdiğini bildirmişlerdir [22]. Patel and Shah, Kendiliğinden yerleşen jeopolimer betonlar üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada 30 Mpa dayanımı hedef alarak ve tarımsal bir atık olan pirinç kabuğu külü, İnce Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanmışlardır. Çalışmada üretilen jeopolimer numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük dayanım gelişimleri takip edilmiştir. Sonuç olarak en yüksek: basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı değerine %5 pirinç kabuğu külü ikameli betonlarda ulaşıldığını bildirmişlerdir. %100 uçucu kül, %100 cüraf ve %5 pirinç kabuğu külü ikameli betonların 28 günlük basınç dayanımı sırasıyla 20 MPa, 41.35 MPa, 42.6 MPa değerine ulaşmıştır. %100 uçucu kül kullanılarak üretilen betonların ortam sıcaklığında ısı olmadan jeopolimerizasyon sürecinin ve 3, 7 ve 28 günlük dayanım artışının gerçekleşmediğini bildirmişlerdir [23].

Durabilite inşaat malzemeleri için önemli bir endişe kaynağı olmakla birlikte, jeopolimer betonun dayanıklılığı konusunda yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada çimento olmadan, demir çelik fabrikalarının bir atığı olan İÖYFC kullanılarak yüksek dayanımlı (65-85 MPa) jeopolimer betonlar üretilmiştir. Üretilen bu betonların asit saldırılarına karşı dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi amacıyla fiziksel ve kimyasal deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler asit içerisinde 1, 7, 14, 21 ve 28 gün süresince asit saldırısına maruz bırakılmıştır. Asit etkisi süresince beton numunelerin 1, 7, 14, 21 ve 28. günlerdeki ağırlık kayıpları, su emme ve porozite yüzdeleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

A. MATERYAL

Bu çalışma kapsamında bağlayıcı malzeme olarak Ereğli Demir Çelik Fabrikasının bir atığı olan İÖYFC kullanılmıştır. İÖYFC'nin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. İÖYFC'nin kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	SiO₂	Fe₂O₃	TiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	SO₃
ÖYFC	40.52	1.10	0.98	14.59	34.18	7.29	0.58	1.1	0.16

Jeopolimer beton üretiminde kullanılan NaOH ve Na₂SiO₃'a ait fiziksel, kimyasal özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Jeopolimer betonun işlenebilirliğinin sağlanması amacıyla çalışma kapsamında Polikarboksilat bazlı hiperakışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Agrega olarak yakın bir lokasyondan temin edilen ve en büyük dane çapı 12 mm olan, kireçtaşı kullanılmıştır. Alkali solisyonu

için sodyum silikat ve sodyum hidroksit yakın bir lokasyondan temin edilmiştir. Tablo 2’de özellikleri verilen sodyum hidroksit %97 saflıkta pelet olarak alınmış ve laboratuvar ortamında 8,10 ve 12 molarite değerlerinde sulu çözelti haline getirilmiştir. Sodyum silikat ise sıvı olarak üretici firmadan temin edilerek herhangi bir işlem yapılmadan kullanılmıştır.

Tablo 2. NaOH ve Na₂SiO₃ ait kimyasal özellikler

Özellikler	Sodyum hidroksit	Sodyum silikat
Molekül Formülü	NaOH	Na ₂ SiO ₃
Molekül Ağırlığı (g/mol)	39.97	182.18
Renk	Beyaz	Beyaz
pH	13-14	11-12.65
Yoğunluk (g/cm ³)	2.14	1.36-1.44
Na ₂ O (%)	-	8.88
SiO ₂ (%)	-	27.52
H ₂ O (%)	-	63.60

B. METOT

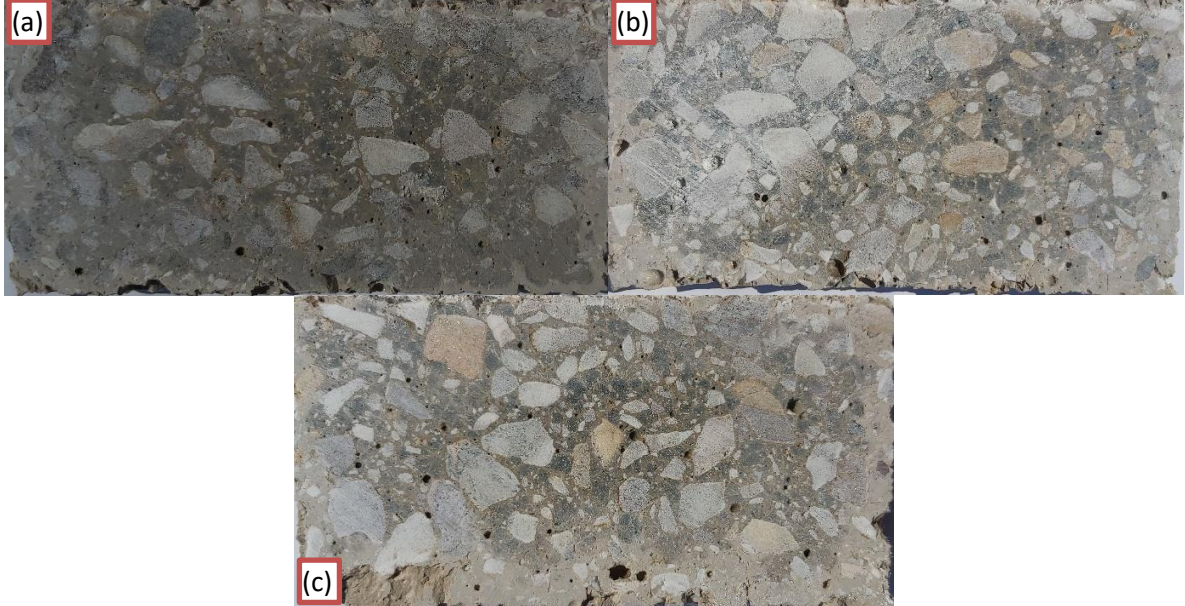
Karışımlarda sodyum hidroksit (%97 saflıkta) 3 farklı molarite değerini sağlayacak şekilde (8, 10, 12) sulu çözelti olarak hazırlanmıştır. Tablo 3’de belirtilen ölçülerdeki malzemelerden ilk olarak agregalar beton mikserine aktarılmış, ince ve iri agregaların karıştırılmasının ardından karışıma eklenen İÖYFC agregalarla birlikte kuru olarak tekrar karıştırılmıştır. Aynı bir kaptaki bir gün önceden su ile belirlenen molarite değerinde hazırlanan NaOH ve Na₂SiO₃ sulu çözeltileri karışımından hemen önce birbiri ile karıştırılarak alkali solüsyonu elde edilmiştir. Alkali solüsyonu kuru karışıma 2 dakika içerisinde eklenmiştir. Homojen bir dağılıma ulaşılmasının ardından, hiperakışkanlaştırıcı katkı eklenerek bir dakika boyunca karıştırılarak jeopolimer beton elde edilmiştir. Elde edilen taze jeopolimer beton karışımı, basınç dayanımlarının belirlenmesi için 100x100x100 mm küp kalıplara, asit çözeltilerinde bekletilecek numuneler ise 50x50x50 mm küp kalıplara vibrasyon yardımıyla yerleştirilmiştir [24]. Kalıba yerleştirilen numunelerin hızlı su kaybını önlemek için yüzeyleri kapatılarak etüve yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen her bir seri 60 °C sabit sıcaklıkta 20 saat boyunca sıcaklık kürüne tabi tutulmuştur. Sıcaklık küründe dayanım kazanan numuneler laboratuvar ortamında 28 günlük hava kürünü takiben mekanik, fiziksel ve kimyasal testlere tabi tutulmuştur. Farklı molarite değişkenlerine sahip 3 farklı seri üretilmiştir. Her bir seri en az 3 adet numuneden oluşmaktadır. Molarite oranı her bir grup için değişiklik göstermektedir. Tasarımı yapılan jeopolimer beton için karışım oranları, Tablo 3’de özetlenmiştir. Sertleşmiş beton numuneler üzerinde basınç dayanımı, su emme, porozite, ağırlık kaybı, gibi mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Asit çözeltilerinin beton iç yüzeyi ile etkileşiminin sağlanması amacıyla 50x50 mm küp örnekler kesilerek 50x 25 mm boyutlarına getirilmiştir. Numuneler üzerinden asit etkisi, karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tüm elde edilen verilerin birbiri ile ilişkisi istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir.

Tablo 3. Jeopolimer beton karışım miktarları (1 m³)

Kullanılan Malzemeler	Miktar (kg/m³)
YFC	670
İri agrega	907
İnce agrega	605
SA	19
Sodyum silikat çözeltisi	160
Sodyum hidroksit çözeltisi	108

B.1. Beton Karışımı ve Agrega Dağılımı

Jeopolimer beton karışımlarının NaOH çözeltisinin molarite değerinin yükselmesi ile betonun işlenebilirliği ve kalıba yerleşmesi üzerinde olumsuz bir etki gösterip göstermediği Şekil 1'de incelenmiştir. Taze jeopolimer betonun kalıba yerleştirme işlemi sonrasında dayanım kazanma sürecinin tamamlanmasının ardından sertleşmiş örnekler, beton kesme cihazı ile kesilerek Şekil 1'de görülen yüzeyler elde edilmiştir. Farklı molarite (M8, M10, M12) içeriğine sahip beton yüzeyler incelendiğinde beton gibi heterojen bir yapıya sahip olan malzemenin bağlayıcı - agrega dağılımının orantılı bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Tüm karışımlarda hapsolmuş hava kabarcıklarının olduğu fakat Basınç dayanımı değerleri ile beraber incelendiğinde bu durumun dayanım ve durabilite değerlerini etkileyecek ölçüde olmadığı düşünülmektedir.



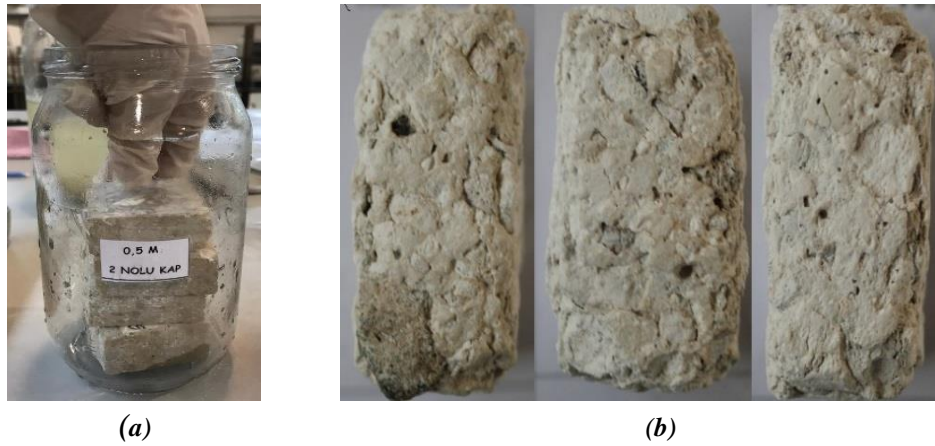
Şekil 1. Jeopolimer beton karışımların agrega bağlayıcı dağılımı (a) M8 (b) M10 (c) M12

B.2. Su Emme ve Porozite Deneyleri

Tüm seriler üzerinde arşimet prensibi ile çalışan terazi yardımıyla porozite ve su emme özellikleri TS EN 1170-6 standardına uygun olarak belirlenmiştir [25]. Belirli günlerde (1, 7, 14, 21, 28) asit çözeltisinden çıkartılıp tartının su içindeki sepetine koyularak ağırlıkları kaydedilmiştir. Daha sonra yüzeyleri bir bez yardımı ile kurularak havadaki ağırlıkları ölçülmüştür. Numuneler 110 °C’de etüvde 24 saat boyunca kurutulup etüv kurusu haline getirilmiştir. Etüvden çıkan numuneler oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulduktan sonra etüv kurusu ağırlıkları tartılmıştır. Kayıt alınan ağırlıklar yardımıyla gerekli hesaplamalar yapılarak su emme ve porozite değerleri hesaplanmıştır.

B.3. Asit Uygulaması

Jeopolimer numuneler Şekil 2’deki gibi cam kavanoz içerisine yerleştirilerek asit çözeltileri ilave edilmiştir. Asit içerisinde bekletilmek üzere 50x50x50 mm küp boyutlarında üretilen numuneler mermer kesici yardımı ile eşit parçaya bölünerek 25x25x50 mm boyutlarına getirildikten sonra hazırlanan asit çözeltilerinin içerisine yerleştirilmiştir. Numunenin ortadan bölünmesi ile hem dış yüzeyler hem de iç kısımlarının direk asit ile temas etmesi sağlanmıştır. Asit çözeltileri 1’er litrelik kavanozlara hazırlanmış ve deney süresi boyunca haftalık olarak yenilenmiştir. Farklı molariteye sahip olan numuneler farklı kavanozlarda olacak şekilde gruplandırılarak asit çözeltilerinde bekletilmiştir. Asit olarak H₂SO₄ (sülfürik asit) kullanılmıştır. Çözelti molaritesi (M₁), kavanozun hacmi (V₁), asit molaritesi (M₂), asit hacmi (V₂) olmak üzere çözelti içine konulacak asit hacmi, Eşitlik 1 yardımıyla elde edilmiştir.



Şekil 2. (a) Jeopolimer numunelerin asit çözeltisi içerisine yerleştirilmesi ve (b) Asit sonrası numunelerde oluşan hasar

Asit çözeltileri 0,5M, 1M ve 1,5M olmak üzere üç farklı molarite de hazırlanmıştır. Daha sonra bu üç çözeltide 28 gün süre ile bekletilmiştir. Numuneler 1, 7, 14, 21 ve 28 gün olmak üzere asit çözeltilerinden çıkartılarak ağırlık kaybı, porozite ve su emme değerleri belirlenmiştir. Şekil 2’de 12M’lik üretilen jeopolimer betonlarının 1,5M’lik asit çözeltisinde 28 gün bekletildikten sonraki görünüşleri verilmiştir.

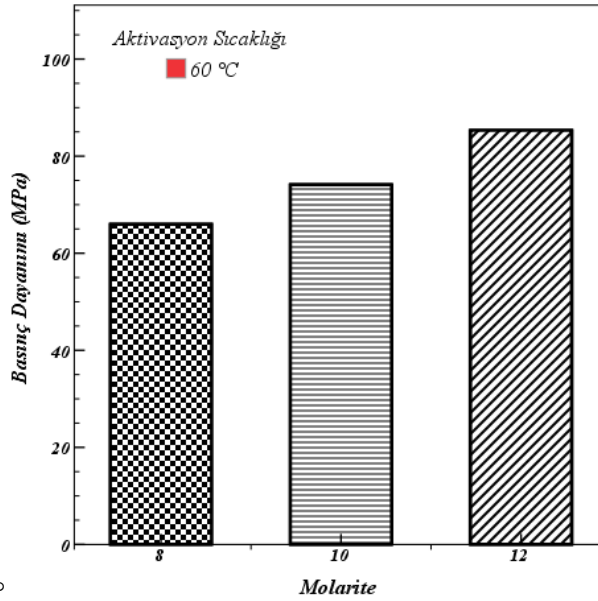
$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2 \quad (1)$$

Asit saldırısı sonucunda numunelerin bağlayıcı matrisin ve agrega yapısının olumsuz etkilendiği ayrıca yüzeyde bozulmaların oluştuğu gözlemlenmiştir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

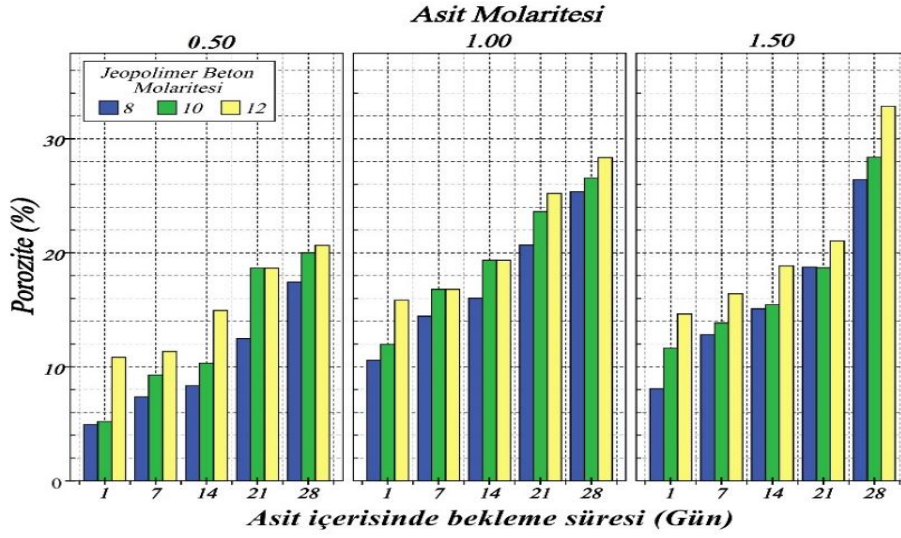
Çimento kullanılmadan üretilen çevre dostu jeopolimer beton numuneler yüksek dayanım hedef alınarak üretilmiştir. Dayanım kazanma süreci sonucunda basınç dayanımı testi uygulanan numunelere ait grafik Şekil 3’de görülmektedir.

Numunelerin dayanım değerlerinin artışı karışım içerisindeki NaOH molaritesinin artışı ile orantılı olarak artmaktadır. Basınç dayanımı değerleri yaklaşık 65-85 MPa aralığında değişmektedir. Bu çalışma kapsamında yüksek dayanımlı jeopolimer beton numuneler üzerinde asit etkisi sonucunda basınç dayanımı değeri ölçülememiştir.



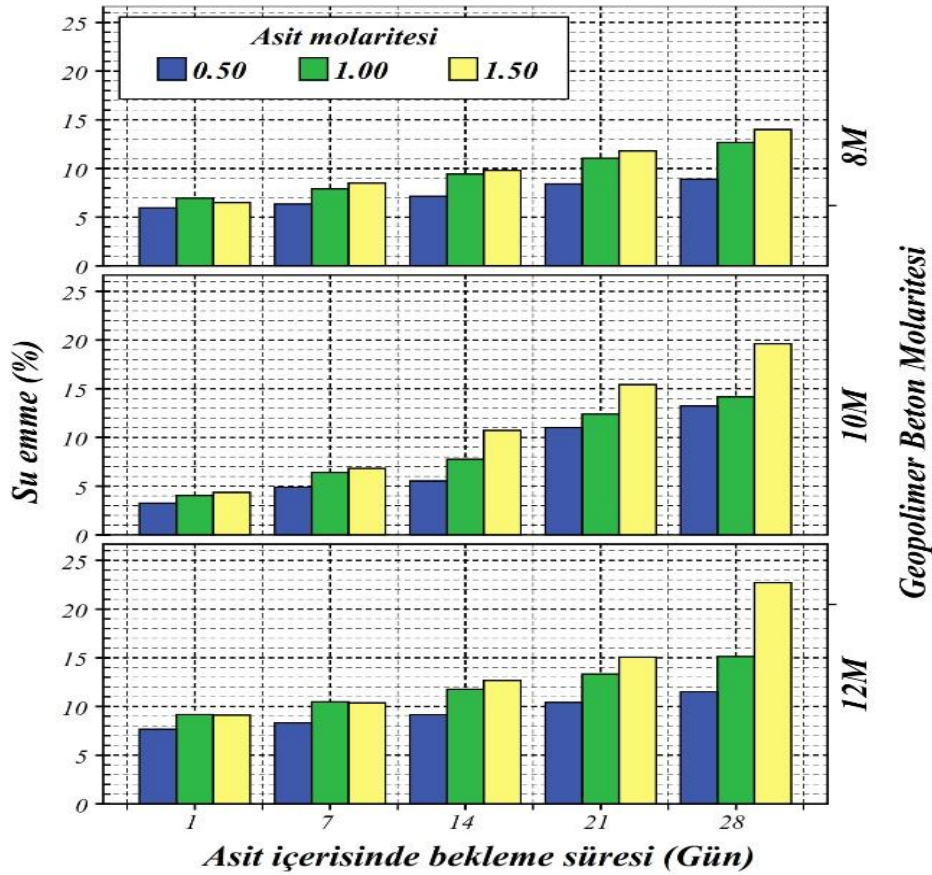
Şekil 3. Basınç dayanımı değerleri

Jeopolimer beton numuneler, 28 gün boyunca 0,5M, 1M ve 1,5 M’lik asit çözeltilerinde asit etkisine maruz bırakılmıştır. Genel olarak asit içerisinde kalma süresinin artmasıyla birlikte asit saldırısından kaynaklanan hasarlarda artış meydana geldiği görülmüştür (Şekil 4). Numunelerin asitte bekleme süresinin artmasına bağlı olarak daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. En yüksek porozite değerine 28. günde 12M’lik sodyum hidroksit içeriğine sahip numunelerde ve 1,5M’lik asit etkisinde meydana gelmiştir. Bu duruma jeopolimer betonunun kalıba yerleştirilmesi esnasında kalan hava boşluklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4. Asit çözeltisinde bekleme süresine bağlı olarak porozite yüzdeleri

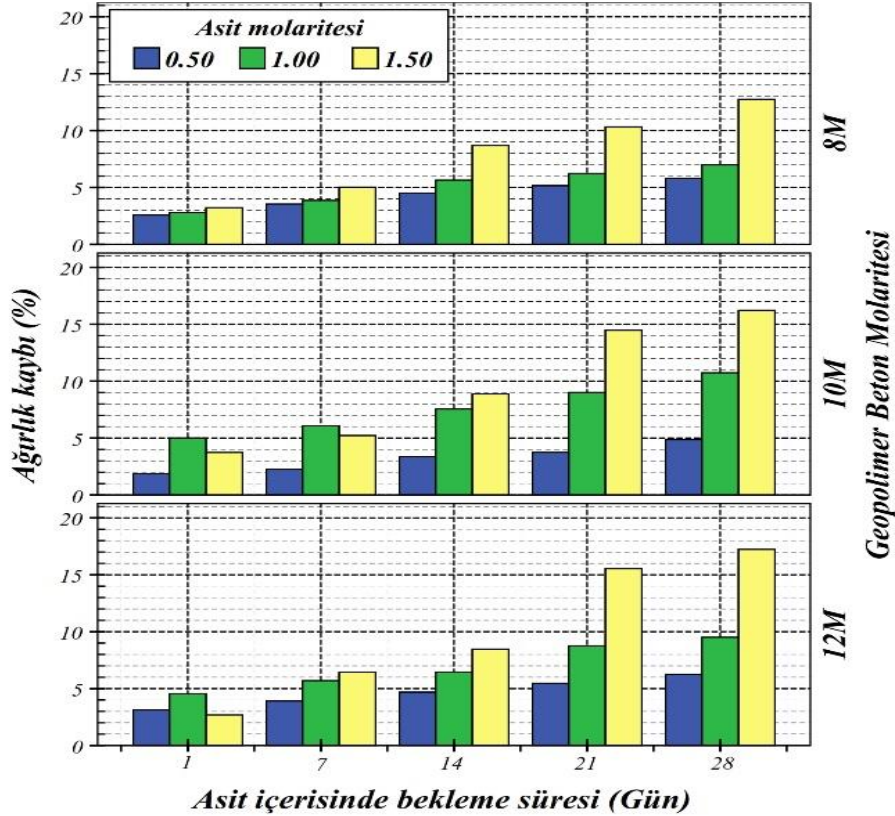
Genel olarak, Şekil 4 incelendiğinde asit molaritesinin artışı ile porozite değerlerindeki değişim arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Başlangıçta numunelerde asit etkisine bağlı olarak hasar oluşumunun daha az olduğu asitte bekleme süresinin artışına bağlı olarak hasar oluşumunun artmasıyla porozite değerlerinde artışın daha fazla gerçekleştiği görülmüştür. Farklı NaOH içeriğine sahip jeopolimer betonların 0,5M, 1M ve 1,5M asit çözeltileri içerisinde bekleme süresine bağlı olarak, su emme yüzdelerinin değişimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Asit çözeltisinde bekleme sürelerine göre su emme yüzdeleri

Grafik incelendiğinde (Şekil 5) 0,5M'lik asit içerisinde bekletilen numuneler değerlendirildiğinde en fazla su emme yüzdesi 12M üretilen jeopolimer beton numunesinde (%11,52) artış göstermiştir. 1M'lik asit içerisinde bekletilen numunelerdeki su emme yüzdeleri incelendiğinde en fazla 12M üretilen beton numunesinde %15,13 oranında gerçekleştiği görülmektedir. 1,5M'lik asit içerisinde bekletilen numunelerdeki su emme yüzdeleri incelendiğinde en yüksek değere 12M üretilen beton numunesi (%22,71) ulaşmıştır. Asit molaritesi arttıkça tüm numunelerde su emme yüzde değerlerinde artış meydana gelmiştir. En yüksek asit etkisine (1,5 M) maruz kalan 8M, 10M, 12M NaOH içeriğine sahip jeopolimer betonların su emme yüzdelerinde sırasıyla %8, %15, %13 artış gerçekleşmiştir. Yüksek molarite değerine sahip betonlarda görülen asit saldırısı sonucu porozite değerinin artışı betonun sahip olduğu PH değeri ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Farklı molaritelere sahip jeopolimer betonların 0,5M, 1M ve 1,5M asit çözeltileri içerisinde 28 gün boyunca bekletilmesi halinde oluşan ağırlık kayıpları Şekil 6'te verilmiştir. 0,5M'lik asit içerisinde bekletilen numunelerde ağırlık kayıplarında gözlemlenen artışın sınırlı kaldığı görülmüştür. Şekil 6 incelendiğinde 0,5M asit etkisine maruz kalan numuneler incelendiğinde en fazla ağırlık kaybının 12M üretilen jeopolimer beton numunesinde, % 6,25 oranında gerçekleştiği görülmektedir. 1M'lik asit içerisinde bekletilen numunelerdeki ağırlık kayıpları incelendiğinde 8M, 10M, 12M jeopolimer betonların ağırlık kayıpları sırasıyla % 7, % 10,73, % 9,51 olarak gerçekleşmiştir. 1,5M'lik asit etkisine maruz kalan numunelerde ise, sırasıyla % 12,74, % 16,22, % 17,23 ağırlık kaybı oluşmuştur. Genel olarak 21. Günden itibaren asit saldırısı nedeniyle hasar oluşumun artışının belirgin olduğu görülmüştür. Genel olarak asit molaritesi arttıkça tüm numunelerde ağırlık kayıplarında artış meydana gelmiştir. Asit molaritesinin artmasıyla birlikte ilerleyen günlerde meydana gelen hasarın miktarı da artmaktadır.



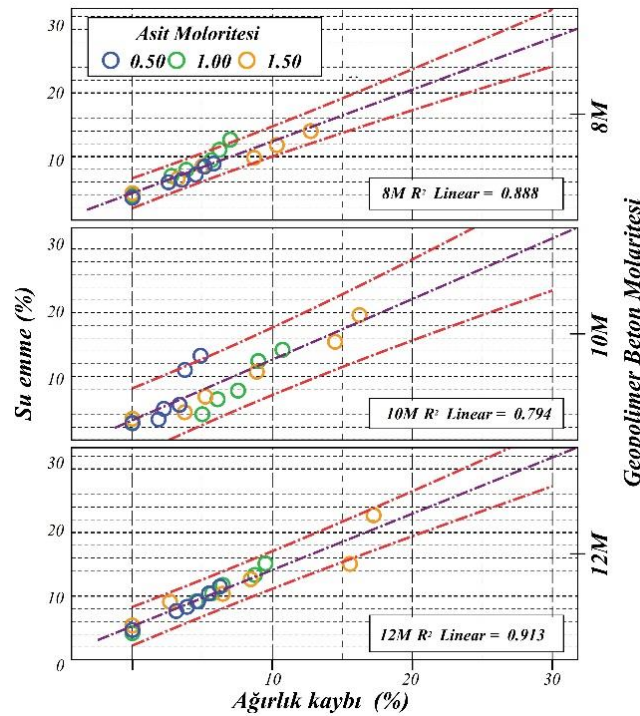
Şekil 6. Asit çözeltilerinde bekletme sürelerine göre ağırlık kayıpları

0.5M'lik asit çözeltisinde 1. günden 28. güne kadar olan artışlar incelendiğinde tüm jeopolimer karışımları için yaklaşık olarak %3 oranında artış gözlemlenmiştir, ancak 1,5M'lik asit çözeltisi incelendiğinde ise 8M'lik jeopolimer beton numunelerde %10, 10M üretilen jeopolimer beton numunede %12 ve 12M üretilen jeopolimer betonda %14 oranında artış görülmektedir.

DeneySEL çalışma için üretilen jeopolimer betonların su emme ile ağırlık kaybı yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'de oluşturulan grafikler %95 güven aralığı ile elde edilmiştir.

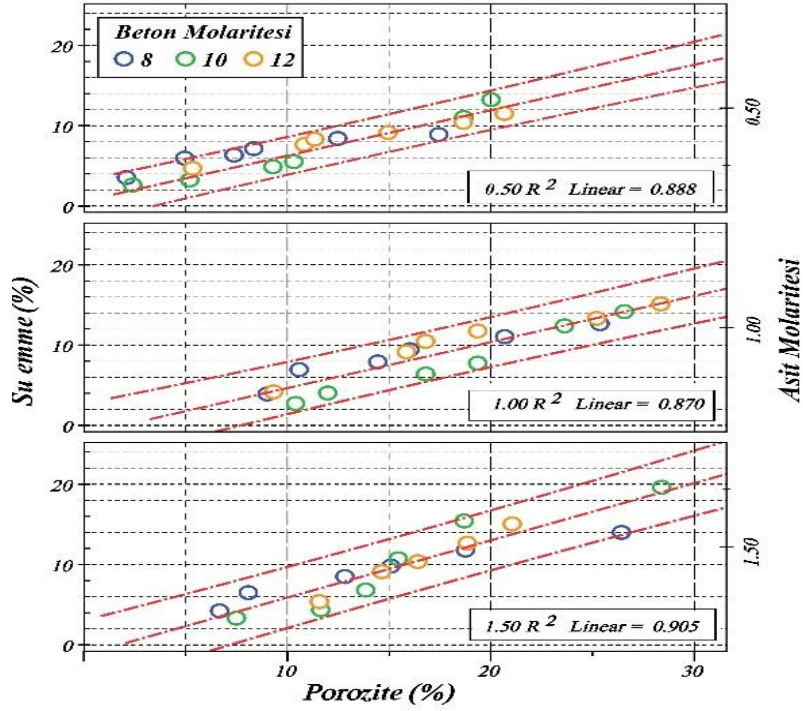
Su emme ve ağırlık kaybı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Asit çözeltisinde beklenen numunelerde porozite oranının artmasıyla birlikte numune içerisine daha fazla asit etki ederek hasar oluşumunu arttırmaktadır. Bu nedenle su emme yüzde oranı arttıkça ağırlık kayıplarında da artış meydana gelmektedir.

Jeopolimer beton numunelerin molaritelerine göre su emme ve ağırlık kaybı arasında ki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayıları incelendiğinde; 8M ve 12M üretilen jeopolimer betonlarının korelasyon katsayıları 1 değerine yakın olup, güçlü bir ilişki olduğunu görülmektedir, 10M üretilen jeopolimer numunelerde ise korelasyon katsayısı 0,794 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Su Emme-Ağırlık kaybı ilişkisi

Farklı asit molaritesi içerisinde asit saldırısı etkisinde kalan numunelerin su emme- porozite değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren regrasyon analizi Şekil 8'de görülmektedir. Grafik incelendiğinde su emme- porozite değerleri arasında kuvvetli bir ilişki olduğu, R² değerlerinin 1'e yakın değerler aldığı görülmüştür. Asit saldırısı sonucunda numune bünyesinde oluşan boşluklardaki artış ile su emme yüzdeleri arasında lineer bir ilişki olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Su emme-porozite ilişkisi

Genel olarak su emme-porozite ilişkisine benzer şekilde su emme-ağırlık kaybı arasında da doğrusal bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Bu ilişkinin portland çimentolu betonlardakine benzer şekilde gerçekleştiği görülmüştür [26]. Jeopolimer betonun çimentolu kompozitlere nazaran yeni bir konu olması sebebiyle gerçekleştirilecek çalışmaların sonucunda kullanım alanların yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Özellikle mikro yapı ile ilgili değişimlerin analizi için mikro boyutta analizlerin yapılması kimyasal değişimlerin incelenmesi yeni yapılacak çalışmalarda göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

IV. SONUÇ

- Tüm asit içeriklerinde asitte bekleme süreleri arttıkça su emme ve porozite oranlarında artış gözlemlenmiştir. Numunelerin asit içerisinde bekleme süresinin artmasıyla birlikte betonlarda meydana getirdiği tahribatların arttığı görülmüştür.
- Asitte kalma süresi arttıkça jeopolimer betonda ağırlık kayıplarının arttığı ve daha gözenekli bir yapı oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir.
- Asit molaritesinin artmasıyla birlikte betonda meydana gelen ağırlık kayıplarının arttığı görülmektedir.
- 10M ve 12M'lik beton numuneleri sülfürik asit içerisinde bekletildiğinde hemen hemen aynı poroziteye sahiptir. En fazla porozite yüzdesi 28. günde 10M ve 12M'lik jeopolimer beton numunelerinin 1,5 M'lik asit çözeltilisinde bekletilmesiyle meydana gelmiştir.

- 0,5M'lik asit içerisinde bekletilen numunelerde, en fazla su emme yüzdesi 12M üretilen beton numunesinde %11,52 oranında olduğu görülmektedir.
- 1M'lik asit içerisinde bekletilen numunelerdeki su emme yüzdeleri incelendiğinde en fazla su emme yüzdesinin 12M üretilen beton numunesinde %15,13 oranında olduğu görülmektedir.
- 1,5M'lik asit içerisinde bekletilen numunelerdeki su emme yüzdeleri incelendiğinde en fazla su emme yüzdesi 12M üretilen beton numunesinde %22,71 oranında olduğu görülmektedir.
- Su emme ve ağırlık kaybı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Özellikle 8M ve 12M üretilen jeopolimerler de güçlü korelasyonlar elde edilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Y. Ümit, M. EMİROĞLU, B. ÇOMAK, and M. YÜKSEK, "Kriyojenik Sıcaklık Koşullarının Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 3, no. 2, 2016.
- [2] Ü. YURT and M. EMİROĞLU, "Kendiliğinden Yerleşen Betonların Düşük Sıcaklıklardaki Davranışının Tahribatsız Yöntemlerle İncelenmesi," *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 6, no. 3, pp. 8-15, 2018.
- [3] C. L. Page and M. M. Page, *Durability of concrete and cement composites*. Elsevier, 2007.
- [4] V. r. Zivica and A. Bajza, "Acidic attack of cement based materials — a review.: Part 1. Principle of acidic attack," *Construction and Building Materials*, vol. 15, no. 8, pp. 331-340, 2001.
- [5] M. Alexander, A. Bertron, and N. De Belie, *Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments*. Springer, 2013.
- [6] B. Baradan and S. Aydın, "Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık)," *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, pp. 265-288, 2013.
- [7] P. Basheer, S. Chidiact, and A. Long, "Predictive models for deterioration of concrete structures," *Construction and Building Materials*, vol. 10, no. 1, pp. 27-37, 1996.
- [8] J. Marchand, I. Odler, and J. P. Skalny, *Sulfate attack on concrete*. CRC Press, 2001.
- [9] Y. Fan, Z. Hu, and H. Luan, "Deterioration of tensile behavior of concrete exposed to artificial acid rain environment," *Interaction and multiscale mechanics*, vol. 5, no. 1, pp. 41-56, 2012.
- [10] M. Santhanam, M. D. Cohen, and J. Olek, "Sulfate attack research—whither now?," *Cement and concrete research*, vol. 31, no. 6, pp. 845-851, 2001.

- [11] B. Dündar, İ. İ. Atabey, And Y. Ümit, "Osmaniye İlinde Hazır Beton Santrallerinde Üretilen Beton Kalitelerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi," *Selçuk-Teknik Dergisi*, vol. 16, no. 2, pp. 71-86, 2017.
- [12] H. Toutanji, L. Zhao, and Y. Zhang, "Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix," *Engineering Structures*, vol. 28, no. 4, pp. 557-566, 2006.
- [13] H. Toutanji and Y. Deng, "Comparison between organic and inorganic matrices for RC beams strengthened with carbon fiber sheets," *Journal of Composites for Construction*, vol. 11, no. 5, pp. 507-513, 2007.
- [14] J. L. Provis and J. S. Van Deventer, *Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] J. S. van Deventer, J. L. Provis, P. Duxson, and D. G. Brice, "Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 1, no. 1, pp. 145-155, 2010.
- [16] C. Shi, D. Roy, and P. Krivenko, *Alkali-activated cements and concretes*. CRC press, 2003.
- [17] M. Zhang, M. Zhao, G. Zhang, D. Mann, K. Lumsden, and M. Tao, "Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water," *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 373-382, 2016.
- [18] B. B. Jindal, "Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 227, p. 116644, 2019.
- [19] T. Bakharev, "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1233-1246, 2005.
- [20] M. Komljenović, Z. Baščarević, N. Marjanović, and V. Nikolić, "External sulfate attack on alkali-activated slag," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 31-39, 2013.
- [21] F. Shahrajabian and K. Behfarnia, "The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 176, pp. 172-178, 2018.
- [22] Z. Sun, X. Lin, and A. Vollpracht, "Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers," *Construction and Building Materials*, vol. 189, pp. 797-803, 2018.
- [23] Y. J. Patel and N. Shah, "Enhancement of the properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag based Self Compacting Geopolymer Concrete by incorporating Rice Husk Ash," *Construction and Building Materials*, vol. 171, pp. 654-662, 2018.
- [24] *Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 4: Basınç dayanım Deney makinelerinin özellikleri*, 2002.

[25] *Ön yapımlı beton mamuller-Cam elyaf takviyeli çimento (ctc) deney metodu-Bölüm 6: Suyu daldırma yoluyla su emme ve kuru yoğunluk tayini 1999.*

[26] S. T. YILDIRIM, "Lif takviyeli betonların performans özelliklerinin araştırılması/The investigation of performance characteristics of reinforced concretes," 2002.