

KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

BAZALT ELYAF TAKVİYELİ ve GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ
POLİPROPİLEN AGREGA KATKILI GEÇİRİMLİ BETON

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İBRAHİM DOĞAN

210835201

Mühendislik Bilimleri Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

DOÇ. DR. SADIK ALPER YILDIZEL

TEMMUZ 2024

KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

BAZALT ELYAF TAKVİYELİ ve GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ
POLİPROPİLEN AGREGA KATKILI GEÇİRİMLİ BETON

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İBRAHİM DOĞAN

210835201

Mühendislik Bilimleri Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

DOÇ. DR. SADIK ALPER YILDIZEL

İKİNCİ DANIŞMAN

DOÇ.DR. GÖKHAN KAPLAN

TEMMUZ 2024

TEZ ONAYI

İbrahim Doğan tarafından hazırlanan Bazalt Elyaf Takviyeli ve Geri Dönüştürülmüş Polipropilen Agrega Katkılı Geçirimli Beton adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman:
Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

Eş Danışman:
Doç. Dr. Gökhan KAPLAN

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

Doç. Dr. Gizem MISIR

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

İmza:

Tez Savunma Tarihi: 03/07/2024

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Murat MAYDA
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

İbrahim DOĞAN



İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	ii
TABLO LİSTESİ	iii
SEMBOL LİSTESİ	iv
ÖNSÖZ	v
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Betonun Yapısı	3
1.2.1. Agregası	3
1.2.1.1. İri Agregası	3
1.2.1.2. İdeal Agregası Standartları	4
1.2.2. Çimento	4
1.2.3. Katkı Maddeleri	4
1.2.3.1. Kimyasal Katkıları	4
1.2.3.2. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Maddeleri	5
1.3. Betonun Sınıflandırılması	5
1.3.1. Betonun Basınç Dayanımı	5
1.3.2. Beton Dayanım Sınıfları	5
1.4. Araştırma Konusu	6
2. Materyaller Yöntemleri	7
3. Bulgular ve Tartışma	11
4. Sonuç	19
Referanslar	20

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1. Deneysel programda kullanılan (a)DpA ve (b)BF	7
Şekil 2. Agregaların parçacık boyutu dağılımı	8
Şekil 3. Deneysel testler	10
Şekil 4. Sertleştirilmiş yoğunluklar.	11
(a) kuru yoğunluğa karşı DpA ikame seviyesi	11
(b) kuru yoğunluğa karşı porozite	11
Şekil 5. Çökme testi sonuçları	12
Şekil 6. Sertleştirilmiş geçirimli betonların gözenekliliği	13
Şekil 7. Geçirimsizlik testi sonuçları	14
Şekil 8. Geçirimsizlik – gözeneklilik ilişkisi	14
Şekil 9. Geçirimli beton numunelerinin basınç dayanımı	16
Şekil 10. Geçirimli beton numunelerinin eğilme dayanımı	16
Şekil 11. 200, 300 ve 400 döngüden sonra kütle kayıpları.	17
Şekil 12. Çimento matrisinin SEM görüntüleri BF, DpA ve sertleşmiş çimento matrisinin SEM görüntüleri (a) BF ve gözenekler (b) Hidrasyon ürünleri ve BF	18

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Agrega gradasyon değerleri	4
Tablo 2. Basınç dayanım sınıfları	6
Tablo 3. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	7
Tablo 4. BF'nin kimyasal özellikleri	8
Tablo 5. Deneysel testler ve ilgili standart	9
Tablo 6. Geçirimli betonların karışım oranları	9



SEMBOL LİSTESİ

W/C	: Su çimento oranı
FA	: İnce agregalar
CA	: İri agregalar
DpA	: Plastik atıklardan dönüştürülen polipropilen esaslı geri dönüştürülmüş plastik agrega
GHG	: Sera gazı
PP	: Polipropilen
PE	: Polietilen
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
CO₂	: Karbon dioksit
BF	: Bazalt elyaf

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım esnasında emek veren bütün hocalarıma ve özellikle danışman hocam Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL'e, Doç. Dr. Gökhan KAPLAN'a laboratuvar çalışmaları esnasında bana yardımcı olan yüksek lisans öğrencisi arkadaşım Ali YAVUZ'a ve kıymetli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz, 2024

İbrahim DOĞAN



Özet

Çevre konusunda artan bilinç, plastik çöplerin seçici olmayan bir şekilde bertaraf edilmesine ilişkin endişelerin artmasına ve dolayısıyla çöp sahalarıyla ilgili sorunların artmasına neden olmuştur. Geçtiğimiz on yılda, akademisyenler bu karmaşık meseleyi daha büyük bir gayretle ele almaya çalışmışlardır. Plastik ve kauçuk atıkların geri dönüştürülmesi ve betonda sürdürülebilir bir agrega olarak kullanılması üstün bir strateji olacaktır. Bununla birlikte, çok sayıda uygulama yönünün ve ilgili engellerin anlaşılması önemlidir. Bu çalışma, geri dönüştürülmüş polipropilen agrega (DpA) ve bazalt fiber (BF) takviyelerinin geçirimli beton performansındaki etkisini araştırmaktadır. Dpa'ların CA ile değiştirilmesi %5, %10, %15 ve %20 ağırlık oranlarında gerçekleştirilmiştir. Karışımlar, %0,25, %0,5, %0,755 ve %1 seviyelerinde olmak üzere değişen hacimlerde bazalt fiber ile desteklenmiştir. Çalışma, geçirimli betonun çeşitli fiziksel, mekanik, geçirimsizlik ve dayanıklılık özelliklerinin değerlendirilmesini kapsamıştır. Elde edilen sonuçlar, DpA ile bazalt lifinin birlikte kullanım potansiyelini ortaya koyarken, gelecekte inşa edilecek sünger kentlerin beton yol tasarımına da ışık tutmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Geçirimli beton, bazalt lif, geri dönüştürülmüş polipropilen agrega, geçirimsizlik

SUMMARY

The growing consciousness surrounding the environment has led to heightened concerns regarding the unselective disposal of plastic trash, hence escalating landfill-related problems. In the preceding decade, scholars have attempted to address this complex issue with greater vigor. A superior strategy would be to recycle plastic and rubber waste and use it as a sustainable aggregate in concrete. However, it is essential to comprehend the numerous implementation aspects and associated obstacles. This study investigates the effect of recycled polypropylene aggregate (DpA) incorporation and basalt fiber (BF) reinforcements on the performance of pervious concrete. The replacement of DpA with CA occurred at weight ratios of 5%, 10%, 15%, and 20%. The mixes were supplemented with varying volumes of basalt fiber, namely at levels of 0.25%, 0.5%, 0.755%, and 1%. The study covered the evaluation of several physical, mechanical, permeability, and durability features of pervious concrete. While the results obtained reveal the potential of the combined use of DpA with basalt fiber, the outcomes also enlighten the concrete road design of the sponge cities to be built in the future.

Keywords: porous concrete, basalt fiber, recycled propylen aggregate, permability

1. GİRİŞ

1.1 GENEL BİLGİLER

Günümüzde, kentsel sel ve ısı adası etkisi gibi çeşitli ekolojik ve çevresel sorunlar hızlı kentleşme ile ilişkilendirilmektedir [1,2]. Bu sorunları hafifletmek için Çin, sünger şehir konseptini önermiştir. Bu konseptte göre şehirler, yağmur suyunun sızmasını ve depolanmasını sağlayarak şehre serbestçe akmasını sağlayabilir, ardından gerektiğinde serbest bırakıp kullanılabilir [3,4]. Geçirimli beton, Sünger Kentlerde yaygın olarak kullanılan çevre dostu bir yapı malzemesidir [5]. Geleneksel yoğun betondan farklı olarak, geçirimli beton tek boyutlu kaba agregadan oluşan bir iskeletten oluşur ve bu da zengin bir birbirine bağlı gözenek sistemi (yüzde 15 ila 30 gözeneklilik) ile sonuçlanır [6,7]. Kompozitin gözenekli yapısı, yüzey akışını azaltmak, yeraltı su seviyelerini yeniden şarj etmek, kentsel ısı adası etkisini azaltmak, suyu arıtmak ve trafik gürültüsünü emmek gibi çok çeşitli somut çevresel faydalar sağlar. [8,9]. Son yıllarda, geçirimli betonun özellikleri üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Permeabilite, mekanik özellikler, dayanıklılık ve diğer birçok özellik incelenmiştir. [10-13], çevresel avantajlar [14] ve performansı etkileyen faktörler [15]. Geri dönüştürülmüş atıklar da geçirimli betonda hammadde olarak kullanılmıştır [16,17]. Bu atık malzemeler, geçirimli betonun yukarıda belirtilen özelliklerinin çoğunu etkiler. Su, 0,08 ila 0,32 inç (2-8 mm) arasında birbirine bağlı gözeneklere sahip geçirimli betonda etkili bir şekilde hareket edebilir. Geçirimli betonların tipik basınç dayanımı 2,8-28 MPa arasında değişmektedir. [18]. En iyi agrega kaplaması ve hamur stabilitesi ile etkili geçirimli beton üretmek için, W/C oranının 0,26 ila 0,45 aralığında tutulması tavsiye edilir. Tek bir boyutta veya 19 ila 9,5 mm arasında derecelendirilmiş iri agrega kullanılması, betonda kabul edilebilir bir boşluk içeriğini koruyabilir [19]. Geçirimli betonların sürdürülebilirliğini veya ekolojik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli atık agregaların kullanımına önem verilmektedir. İnşaat yıkım atıkları, plastik atıklar veya çeşitli metalik cürufur, geçirimli beton üretmek için kullanılabilir.

Sudan sonra en çok kullanılan ikinci madde olan beton, 1950 yılında 2 ila 2,5 milyar tondan az olan küresel yıllık tüketimde önemli bir artış yaşayarak 2015 yılında 20 ila 30 milyar ton aralığına ulaşmıştır [20]. Beton üretiminde hacimsel olarak %60-80 aralığında agrega kullanılmaktadır. Freedonia'nın analizine göre, beton üretiminde kullanılan agregalara yönelik dünya çapındaki talebin 2023 yılına kadar yaklaşık 47,5 milyar tona ulaşacağı öngörülmektedir[21]. Bu öngörülen agrega talebi, aşırı taş ocağı çıkarılmasına, bunun sonucunda enerji kullanımına ve ilgili sera gazı (GHG) emisyonlarına yol açmaktadır [20]. Dixit ve diğerleri (yıl), inşaat sektörünün dünyanın doğal kaynaklarının tükenmesine katkıda bulunan başlıca sektörlerden biri olduğunu belirtmektedir. Bu sektörün küresel işlenmemiş taş, kum ve çakıl arzının yaklaşık %40'ını, işlenmemiş kerestenin %25'ini, su kaynaklarının %16'sını ve yıllık enerji tüketiminin %40'ını tükettiği tahmin edilmektedir [22]. Madencilik sektörü tarafından elde edilen kaba agregalar yeraltı su kaynakları üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.

Başka bir çalışmaya göre, 2013 ve 2017 yılları arasında, doğal agregaların çıkarılmasından kaynaklanan arazi tükenmesinde %47,14 ile %112,9 arasında değişen bir artış olduğu gözlemlenmiştir. [20]. Evangelista ve diğerlerine göre, doğal

agregaların kullanımı, beton üretimiyle ilişkili toplam karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %13-20'sine katkıda bulunmaktadır [23]. Geleneksel doğal agregalara olan talep, herhangi bir atık agrega kullanılarak kısmen veya tamamen karşılanabilir. Başta ambalajlama amacıyla olmak üzere küresel plastik kullanımı önemli ölçüde artmış, bu da büyük miktarlarda tek kullanımlık plastik çöp üretimine yol açmıştır [20]. Çok yönlülüğü, dayanıklılığı, hafifliği ve diğer kendine has özellikleri nedeniyle plastiklere olan talep dünya çapında artmaya devam ediyor [24]. 2018 yılında dünya genelinde 359 milyon ton plastik üretildi ve bunun yaklaşık %17'si Avrupa'dan geldi [25]. Avrupa'da 2017 yılında reçine türüne göre plastik talebi açısından polipropilen (PP) %19,3 ile ilk sırada yer alırken, onu %17,5 ile düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) takip etmiştir. [26]. PE ve PP polimerleri, inşaat ve yıkım atıklarından ve ayırma tesislerinden mekanik olarak ayrılmış plastik atıklardan gelen atık akışlarında bulunan en yaygın plastiklerdir [27]. Küresel olarak bu kadar çok salınan plastiklerin biyolojik olarak parçalanabilirliği düşük olduğundan, kullanım ömürlerinin ardından etkin bir şekilde bertaraf edilmeleri gerekmektedir. Bu yöntemlerden en etkili ve en ucuz olanı plastik atıkların agrega olarak betona katılmasıdır. Plastik atıklar betonun birim ağırlığını ve ısı iletkenlik katsayısını düşürmekte ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [28-30]. Mevcut literatürde plastik atıkların geçirimli betonda kullanımına ilişkin herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu atıkların geçirimli beton üretiminde iri agrega olarak kullanılması, agrega üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltacak ve biyolojik ayrışa bilirliliği düşük atıkların bertaraf edilmesine olanak sağlayacaktır. Bu sayede sünger kentlerde daha sürdürülebilir geçirimli betonlardan yollar üretilebilecektir. Ancak plastik atıklar geleneksel betonun mekanik özelliklerini, özellikle de basınç dayanımını azaltmaktadır. Bu sorundan kaçınmak için, geçirimli betonun metalik veya sentetik liflerle güçlendirilmesi alternatif bir çözüm olabilir. Özellikle geçirimli betonlar çoğunlukla yollarda kullanıldığından, beton kaplamanın eğilme performansının artırılması gerekmektedir. Bunun için bazalt lifi gibi diğer liflere kıyasla daha sürdürülebilir liflerin kullanılması ekolojik bir avantaj sağlayacaktır.

Betonun yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen, düşük çekme dayanımı ve büyük büzülme ve sünme davranışı en önemli dezavantajlarıdır [31,32]. Betona elyaf eklenerek bu olumsuz özellikler azaltılmış ve yeni bir kompozit üretilmiştir [33]. Elyaf takviyeli beton, belirli miktarda kısa, eşit dağılmış ve parçalanmış elyafın geleneksel betona dahil edilmesiyle üretilir. Lifler ve matrisin etkileşimi, betonun süneklik ve tokluk gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra çekme, eğilme ve darbe direncini de artırabilir. Ayrıca matris çatlaklarının oluşmasını önleyerek çatlama direncini de artırabilir. [34]. Liflerin beton matrisi üzerinde sertleştirme, takviye ve çatlama direnci olmak üzere üç temel etkisi vardır. Betondaki çatlak direncinin temel amacı, hem sertleşmemiş hem de sertleşmiş aşamalarda büzülme çatlaklarının oluşumunu engellemek ve en aza indirmektir [35]. Uygun lif türleri ve miktarları seçildiğinde, güçlendirme, liflerin yerleştirilmesinin betonun doğal kusurlarının betonun mukavemeti üzerindeki etkisini azalttığı ve betonun eşdeğer mekanik mukavemetini artırdığı anlamına gelir [36]. Lif köprülemesinin sertleşmede bir rolü vardır. Beton çatlama ile karşı karşıya kaldığında, elyaf çatlak arayüzünü geçme ve çıkma ve kırılmadan önce belirli bir stres seviyesine dayanma kabiliyetine sahiptir. Bu süreç enerjinin emilmesiyle sonuçlanır, böylece betonun sünekliği artar ve hasar görmeden önemli deformasyonlara dayanma kapasitesi güçlenir. [37]. Çevre dostu tek elyaf olan

bazalt elyaf (BF), bazalttan yapılan bir mineral elyaftır [38]. BF, diğer elyaflara kıyasla çok sayıda avantaj sergilemektedir. BF'nin gerilme mukavemeti 3000 ila 4500 MPa arasında değişirken, elastikiyet modülü 80 ila 100 GPa arasındadır. Bu üstün mekanik özellikler onu aramid, polipropilen ve polietilen elyafların önüne geçirmektedir [39]. Yumuşama noktası 960 °C olan BF, diğer elyaflara göre yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklıdır. BF 600 °C 'de gerilme mukavemetinin yaklaşık % 80'ini korur. [40]. BF'nin ana bileşeni olan bazaltın kimyasal bileşimi betonunkine benzerlik göstermekte, dolayısıyla elyafın beton matrisine entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Ayrıca, insanlar ya da çevre üzerinde hiçbir olumsuz etkisi olmayan organik bir doğal elyaftır. [41]. BF diğer elyaflara göre daha uygun maliyetlidir. Yer kabuğu birçok bölgede bazalt bakımından zengindir ve madencilik ve işleme maliyetleri diğer minerallere göre daha düşüktür. BF'nin üretim sürecinde başka hiçbir katkı maddesine ihtiyaç duymaması ek maliyetleri ortadan kaldırır [42]. BF'nin birçok olumlu özelliği nedeniyle çimento esaslı kompozitlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Son zamanlarda özellikle eğilme performansının iyileştirilmek istendiği beton kaplamalarda tercih edilmeye başlanmıştır. Beton yollarda kullanılan geçirimli beton üretiminde BF kullanımını araştıran çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada, düşük biyo bozunurluğa sahip plastik agregaların geçirimli betonun taze, fiziksel, mekanik, dayanıklılık ve geçirimsizlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. BF kullanılan geçirimli betonun eğilme performansı da ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, gelecekte inşa edilecek sünger kentlerin beton yol tasarımına ışık tutacaktır.

1.2. Betonun Yapısı

Beton çimento su ve agreganın belirli standartlarda reçetelendirilmesiyle üretilen bir yapı malzemesidir. Beton bazı özellikleri geliştirmek için kimyasal katkıları da karışıma eklenebilmektedir [75].

1.2.1. Agregalar

Doğal yollarla nehir, deniz, göl tabanı gibi doğal oluşumlardan veya yapay olarak taş ocaklarından elde edilen çapları 100 mm'ye kadar olan taneler yığınıdır [76].

1.2.1.1 İri agregalar

Kare delikli 4 mm açıklıklı elek üzerinde kalan elenmiş agregadır.

İri agregalar tane büyüklüğü Tablo 1.1 gösterilmiştir

Agrega	Tane büyüklüğü	Elekten Geçen Kütlece Yüzde (%)					Kategori G
		2D	1,4D	D	d	d/2	
İri Agregat	$D/d \leq 2$ veya $D \leq 11.2 \text{ mm}$	100	98-100	85-99	0-20	0-5	Gc85/20
	$D/d \leq 2$ veya $D \leq 11.2 \text{ mm}$	100	98-100	85-99	0-20	0-5	Gc85/20
İnce Agregat	$D \leq 4 \text{ mm. ve } d=0$	100	95-100	85-99			Gf85
Doğal Olarak	$D=8 \text{ mm. ve } d=0$	100	98-100	90-99			Gng90
Karışık	$D \leq 45$ ve $d=0$	100	98-100	90-99			Ga90
		100	98-100	85-99			Ga85

Tablo 1. Agregat Gradasyon değerleri [77].

1.2.1.2 İdeal agregat standartları

Porozite: Agregat taneleri bünyelerinde boşluklu yapılar bulundurulur. Bu boşluklu yapılar agregatın su emme kapasitesi ile belirlenir. Bunun için önce kurutulmuş agregat tanelerinden belirli miktarda W ağırlığında malzeme alınır 24 saat su içinde bekletilir. Kuru ve temiz bir bezle ile tanelerin yüzeyindeki su çekilir ve böylece kuru yüzey doygun duruma getirilmiş olur. Bu numunedan W1 (suya doygun) ağırlığında bir miktar malzeme alınır ve etüve atılarak kurutulur. Kurutulmuş malzeme tartılarak W0 (kuru malzeme) ağırlığı bulunur.

Agregatın % olarak ağırlıkça su emme kapasitesi $(W1-W0) / W0$ ifadesiyle bulunur. Porozitesi (P) agregatın gr/cm^3 cinsinden özgül ağırlığı, W1 ve W0 ağırlıkları kullanarak $P = ((W1-W0)/W0) * 100$ olarak gösterilir. agregat tanelerinin mukavemetinin yüksek olması agregat tanelerinin porozitesinin küçük olması ile sağlanır. Betonda mukavemeti yüksek tanelerin kullanılması betonun dayanımını (mekanik mukavemeti) da artırılabilir [78].

1.2.2. Çimento

Öğütülmüş kalkerin içindeki silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri ile birlikte döner fırınlarda pişirilmekte ve sonra elde edilen klinkerlerin, alçı taşı ve başka katkı maddeleriyle karıştırılmasıyla oluşturulan bağlayıcı maddeye çimento denir.

Çimento ve su bir araya geldiğinde hidrasyon reaksiyonu veren çimento hamuru dediğimiz işlenebilirliği kolay bir kıvam alan ve priz alarak sertleşen, ve bu süreçten sonra dayanım kazanan sonrasında su içerisinde bile kararlılığını kaybetmeyen yapı malzemeleridir [79].

1.2.3. Katkı maddeleri

1.2.3.1. Kimyasal katkı maddeleri

Betonda olumsuz bazı özelliklerini geliştirmek amacıyla beton içerisindeki bağlayıcı miktarı göz önünde bulundurularak belli miktarlarda ilave edilen inorganik veya

organik kökenli kimyasallardır. Katkı maddeleri uygun oranlarda ilave edilmeli eksik veya fazla olmamalıdır. Beton kurallara uygun üretilirse kalitelidir katkı maddeleri kötü üretilen bir betonun özelliklerini iyileştirmez. Betonda katkı maddelerinin etkisi üretimden önce deneylerle test edilmelidir.

Beton üretiminde kullandığım kimyasal katkı maddesi

1.2.3.2. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleri

Kimyasal katkıları genellikle çimento ağırlığının % 0.2 – 0.5 oranındadır. Beton harcının işlenebilirliğini kolaylaştıran bu katkıları beton karma suyu ihtiyacını azaltır ve betonun dayanımını artırır.

1.3. Betonun Sınıflandırılması

1.3.1. Betonun basınç dayanımı

Betonun basınç dayanımı kullanım amacına bakılırsa betonun en önemli özelliğidir. Betonlar karakteristik basınç dayanımı TS 500'e göre "denenecek numunelerden bulunacak basınç dirençlerinin, bu değerden düşük olma olasılığı %10 olduğu değerdir". Yani betonun karakteristik dayanımı her 100 numuneden 90 tanesinin üzerinde kaldığı minimum dayanım değeri olarak ifade edilir. Beton sınıfları, karakteristik ve eşdeğer küp özellikleri Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

Betonda Basınç Mukavemetinin Önemi değerlendirilecek olursa: Yapıdaki beton hareketli yükler ve sabit yükler gibi yükler altında çeşitli zorlamalara maruz kalmaktadır. Bu zorlamaların olumsuz etkilerini bertaraf etmek için malzemenin bazı özelliklere sahip olması gerekir. Bu özelliklerin başında da belkide en önemlisi betonun basınç mukavemetidir.

1.3.2. Basınç dayanım sınıfları

Betonda basınç dayanımı sınıfları küp ve silindir numuneler için Tablo 1.2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Basınç Dayanım Sınıfları [80]

Beton Mukavameti	Silindir Numuneler (f_{ckmin} , N/mm ²) - Küp Numuneler (f_{ckmin} , N/mm ²)
C 8 - 10	8-10
C 12- 15	12-15
C 16-20	16-20
C 20-25	20-25
C 25-30	25-30
C 30-37	30-37
C 35-45	35-45
C 40-50	40-50
C 45-55	45-55
C 50-60	50-60
C 55-67	55-67
C60-75	60-75
C 70-85	70-85
C 80-95	80-95
C 90-105	90-105
C 100-115	100-115

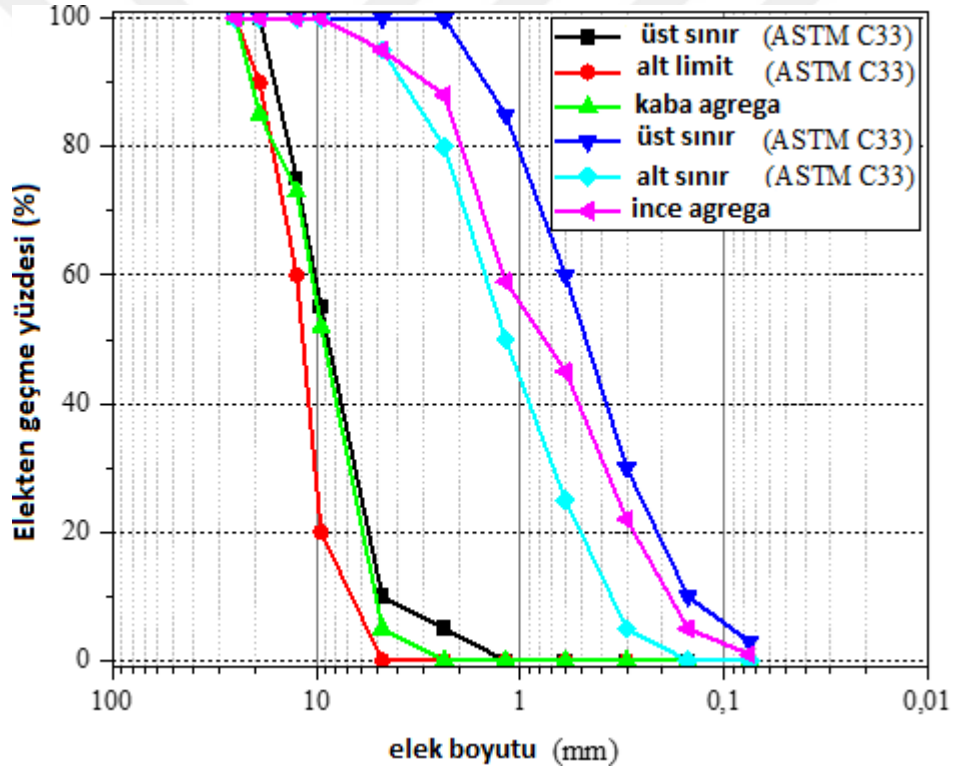
1.4. Araştırmanın konusu

Bazalt elyaf takviyeli ve geri dönüştürülmüş polipropilen agregaya katkılı geçirimli betonun performansının ölçülmesi. Üretilmesi düşünülen beton geçirimsizliği yüksek olması beklenilir. Betona katkı olarak eklenen geri dönüştürülmüş polipropilen agregaya ile çevreci bir ürün oluşturulur. Bazalt elyaf katkısının çekme dayanımına katkısı beklenilir.

Bu tezin amacı çevreci bir yaklaşım olan geri dönüştürülmüş polipropilen agreganın betonun dayanımını gözlemlemektir.

Tablo 4. BF'nin kimyasal özellikleri

Kimyasal içerik	İçerik (%)
SiO ₂	51.3-59.2
Al ₂ O ₃	14.6-18.1
Fe ₂ O ₃	5.7-9.4
MgO	3.0-5.3
FeO+ Fe ₂ O ₃	9.1-13.9
TiO ₂	0.8-2.21
Na ₂ O + K ₂ O	0.8-2.21
Others	0.08-0.14



Şekil 2. Agregaların parçacık boyutu dağılımı

Tablo 3, mevcut araştırmada gerçekleştirilen deneysel testlerin bir özetini sunmaktadır. Tablo 4 ise geçirimli betonların karışım tasarımını göstermektedir. Tablo 4'te verildiği gibi, yirmi beş beton numunesi hazırlanmıştır. DpA'lar ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında CA ile değiştirilmiştir. Bazalt fiber karışımlara hacimce %0,25, %0,5, %0,755 ve %1 oranlarında eklenmiştir.

Tablo 5. Deneysel testler ve ilgili standart

Test	Standart	Numune boyutu (mm)
Çökme testi	ASTM C143[44]	Taze karışım
Gözeneklilik	ASTM C1688[45]	10 x 10 x 10 cm
Sertleştirilmiş yoğunluk	ASTM C1754[46]	10 x 10 x 10 cm
Basınç dayanımı	ASTM C349[47]	10 x 10 x 10 cm (Şekil. 3a)
Eğilme dayanımı	ASTM C932[48]	4 x 4 x 16 cm (Şekil. 3b)
Geçirimlilik	ASTM C1701M[49]	5 x 50 x 50 cm (Şekil. 3c)
Raveling direnci (28 gün)	ASTM C09-1041[50]	4 x 4 x 8 cm (Şekil. 3d)

Tablo 6. Geçirimli betonların karışım oranları

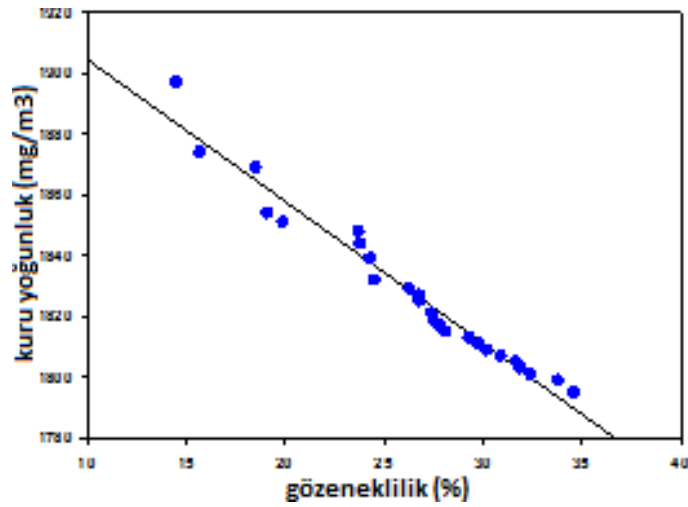
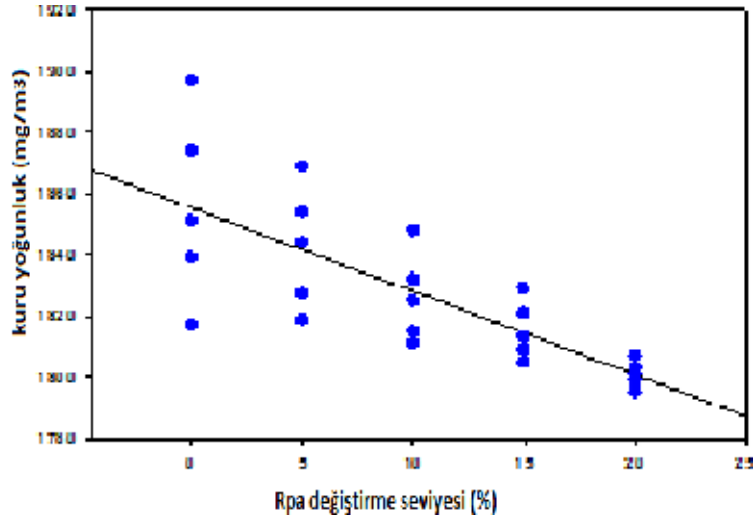
Mix_ID	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	CA (kg/m ³)	DpA (kg/m ³)	BF (%)
PC-R	360	144	1450	150	0	0
PC ₁	360	144	1450	142.5	5	0
PC ₂	360	144	1450	135	10	0
PC ₃	360	144	1450	127.5	15	0
PC ₄	360	144	1450	120	20	0
PC ₅	360	144	1450	150	0	0.25
PC ₆	360	144	1450	142.5	0	0.50
PC ₇	360	144	1450	135	0	0.75
PC ₈	360	144	1450	127.5	0	1.00
PC ₉	360	144	1450	120	5	0.25
PC ₁₀	360	144	1450	150	5	0.50
PC ₁₁	360	144	1450	142.5	5	0.75
PC ₁₂	360	144	1450	135	5	1.00
PC ₁₃	360	144	1450	127.5	10	0.25
PC ₁₄	360	144	1450	120	10	0.50
PC ₁₅	360	144	1450	150	10	0.75
PC ₁₆	360	144	1450	142.5	10	1.00
PC ₁₇	360	144	1450	135	15	0.25
PC ₁₈	360	144	1450	127.5	15	0.50
PC ₁₉	360	144	1450	120	15	0.75
PC ₂₀	360	144	1450	150	15	1.00
PC ₂₁	360	144	1450	142.5	20	0.25
PC ₂₂	360	144	1450	135	20	0.50
PC ₂₃	360	144	1450	127.5	20	0.75
PC ₂₄	360	144	1450	120	20	1.00



Şekil 3. Deneysel testler

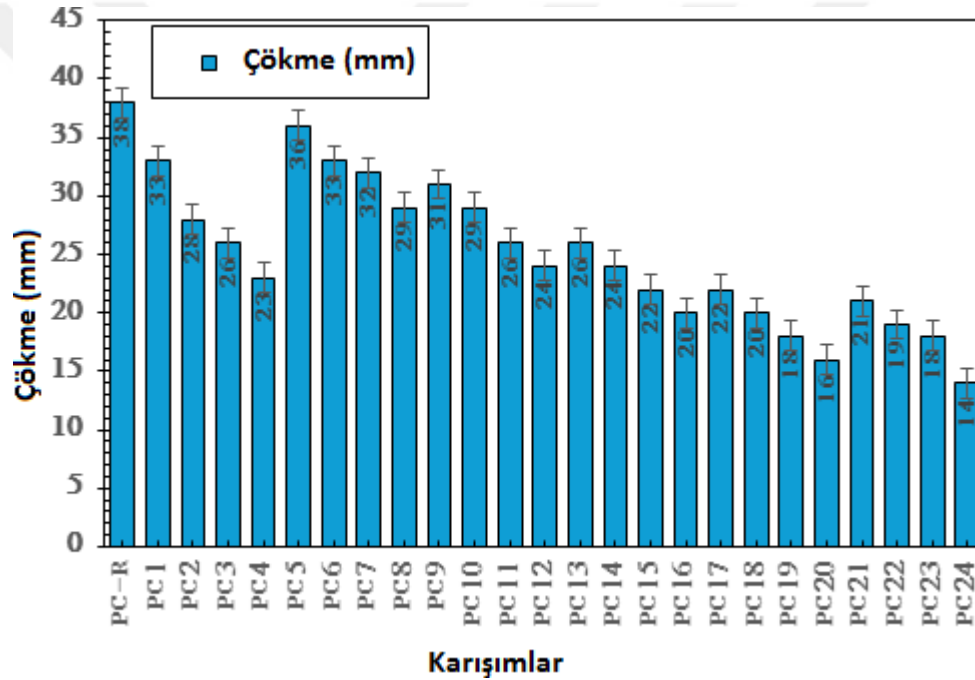
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 4, çeşitli DpA ikame seviyeleri ve gözeneklilik dikkate alındığında, geçirimli beton karışımlarının sertleşmiş yoğunluğunu göstermektedir. Yoğunluk ölçümleri ortalama $1828 \pm 25 \text{ kg/m}^3$ değerini göstermiş olup, bu değerlerin geçirimli beton için izin verilen sınırlar dahilinde olduğunu göstermektedir [51-53]. Sertleştirilmiş yoğunluk değerleri, BF ve DpA miktarlarındaki artışa bağlı olarak azalma eğilimi göstermiştir. Bu azalma, DpA'nın FA'ya kıyasla daha düşük özgül ağırlık ve yığın yoğunluğuna bağlanabilir. Ayrıca, artan BF içeriği geçirimli betonun içine daha fazla hava hapsedilmesine neden olarak sertleşmiş yoğunluklarda düşüşe yol açabilir. Ayrıca, yoğunluk değerleri gözeneklilikle doğrudan ilişkilidir. Gözeneklilikteki artış, beklendiği gibi yoğunluğu azaltıcı bir etki olarak kendini göstermiştir[54,55].



Şekil 4. Sertleştirilmiş yoğunluklar. Sertleştirilmiş yoğunluklar: (a) kuru yoğunluğa karşı DpA ikame seviyesi (b) kuru yoğunluğa karşı porozite

Geçirimli betonların çökme testi sonuçları Şekil 5'te çizilmiştir. Referans numune maksimum 38 mm çökme ölçümü göstermiştir. Taze geçirimli betonun çökmesi, DpA ve BF miktarlarındaki artışla önemli ölçüde ilişkilidir ve çökmede gözle görülür bir düşüşe neden olur. Bu davranışın bir nedeni, DpA'nın üniform olmayan formları olabilir.[56,57]. Benzer sonuçlar, geleneksel harç ve betonda doğal agregalar geri dönüştürülmüş agregalarla değiştirildiğinde de kaydedilmiştir [56,58]. Ayrıca, çökme değerleri de geçirimli betonun BF içeriğinin artmasıyla azalmıştır. Bu sonuçların BF'nin daha büyük spesifik yüzey alanı ile ilişkili olması muhtemeldir, çünkü karıştırma işlemi sırasında büyük miktarlarda su ve çimento bulamacı bazalt lifinin yüzeyine adsorbe edilerek betonun viskozitesini artırır [59,60].



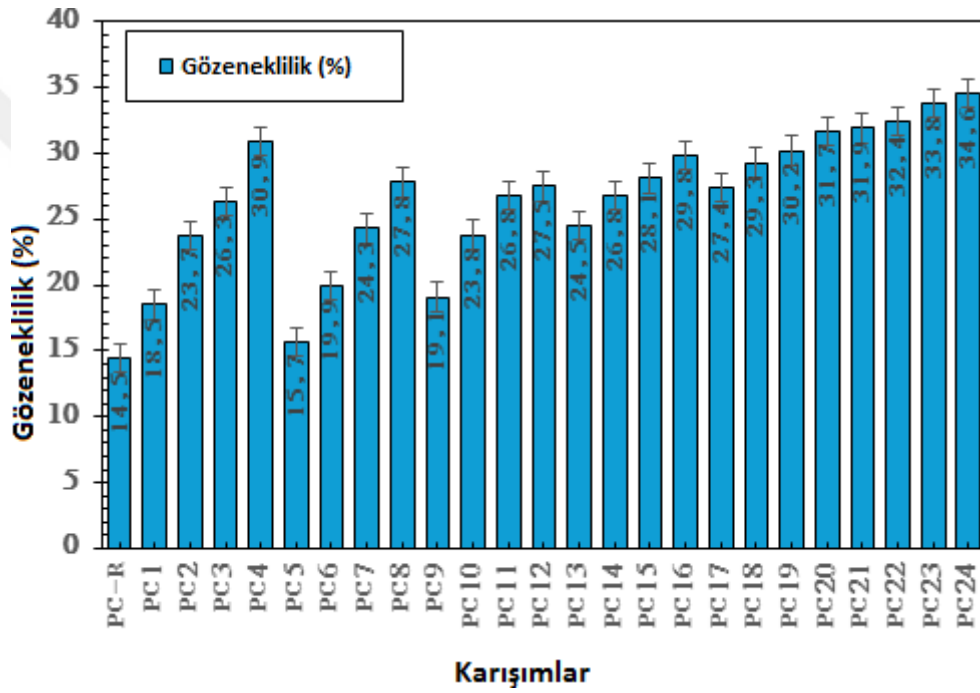
Şekil 5. Çökme testi sonuçları Çökme testi sonuçları

Şekil 6, kürlenmiş geçirimli beton karışımlarının gözenekliliğini göstermektedir. Numunelerdeki DpA ve BF miktarları arttıkça porozite değerleri artan bir eğilim göstermiştir. DpA'nın üniform olmayan formları porozitede artışa neden olmuştur[61]. Ayrıca, en yüksek porozite değeri %34,6 ile PC24 numunesinde elde edilmiştir. Numunelerin artan elyaf içeriği ve BF'lerin topaklanmaya eğilimli olması bu sonuç üzerinde etkili olmuştur[62,63].

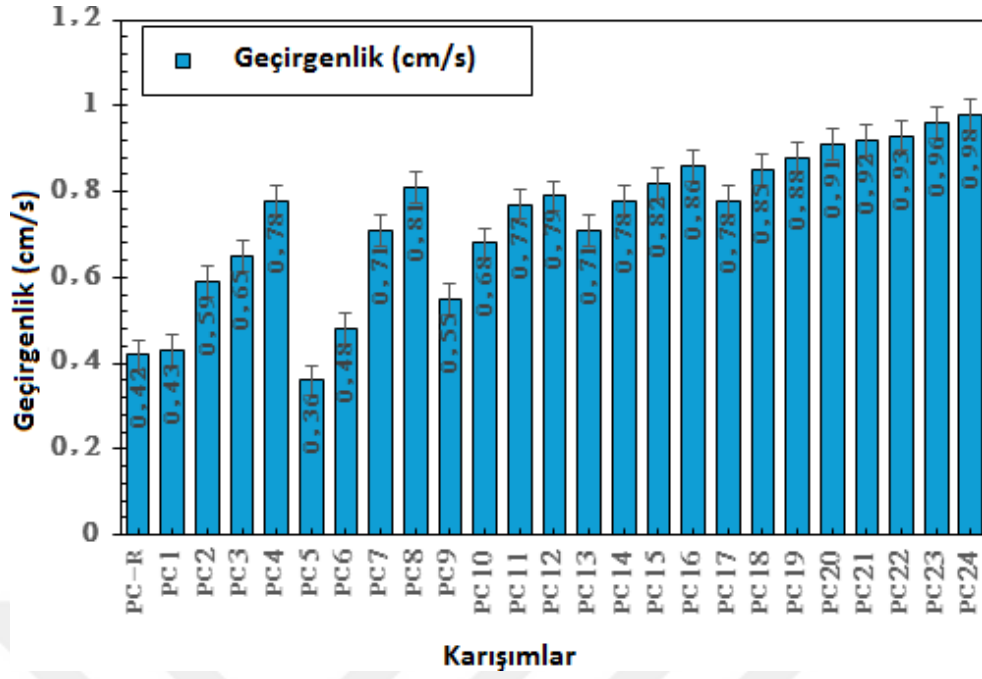
Geçirimsizlik testi sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Tüm geçirimsizlik test sonuçları ASTM C170M-17'ye göre kabul edilebilir sınırlar içerisindedir[49]. DpA'nın ikame yüzdeleri

ve numunelerin BF içerme seviyeleri arttıkça geçirimsizlik katsayısı yükselme eğilimi göstermiştir. BF ve DpA'nın fiziksel özellikleri bu durumun ana faktörleridir. Örneğin, DpA ikamesi %0'dan %20'ye çıktığında beton numunelerinin geçirimsizlik katsayısı 0,42'den 0,78 cm/s'ye yükselmiştir. Ayrıca, geçirimsizlik tepkisi DpA ve BF'nin birlikte ikamesi ile önemli bir artış göstermiş ve geçirimsizlik (Pe) ve gözeneklilik (P) benzer eğilimler sergilemiştir. Sonuç olarak, Şekil 8'de gösterildiği gibi iki özellik arasında bir ilişki kurmak için bir regresyon analizi yapılmıştır. Geçirimsiz betonun geçirimsizliği, Eşitlik (1) kullanılarak gözeneklilikten doğru bir Şekilde ($R^2=94.4$) belirlenebilir.

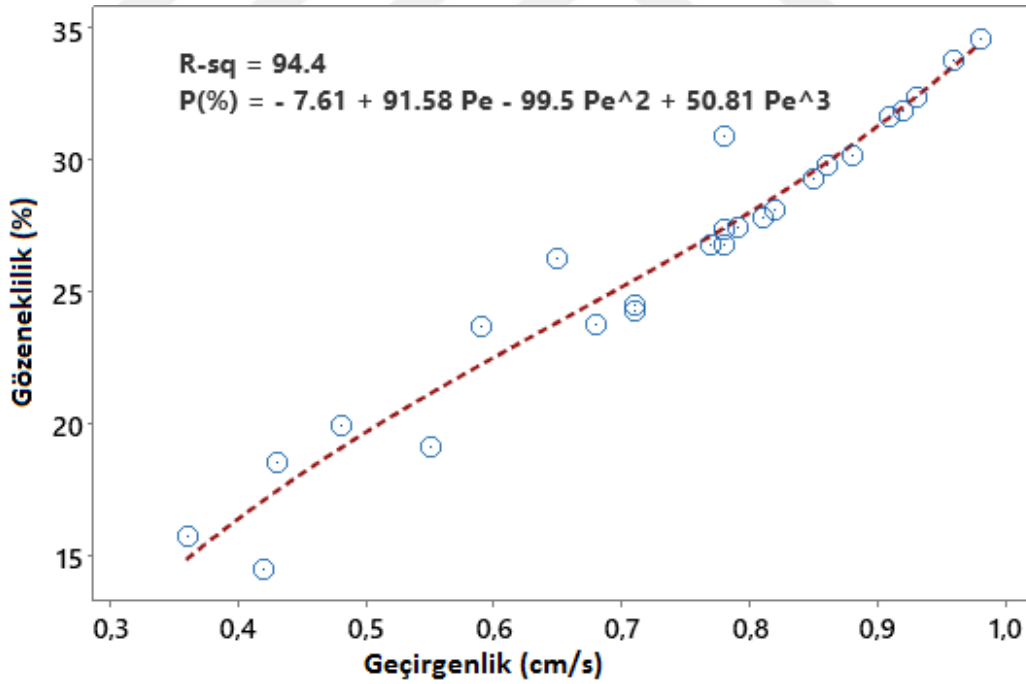
$$P (\%) = -7.91 + 91.58 Pe - 99.5 Pe^2 + 50.81 Pe^3 \quad (1)$$



Şekil 6. Sertleştirilmiş geçirimsiz betonların gözenekliliği



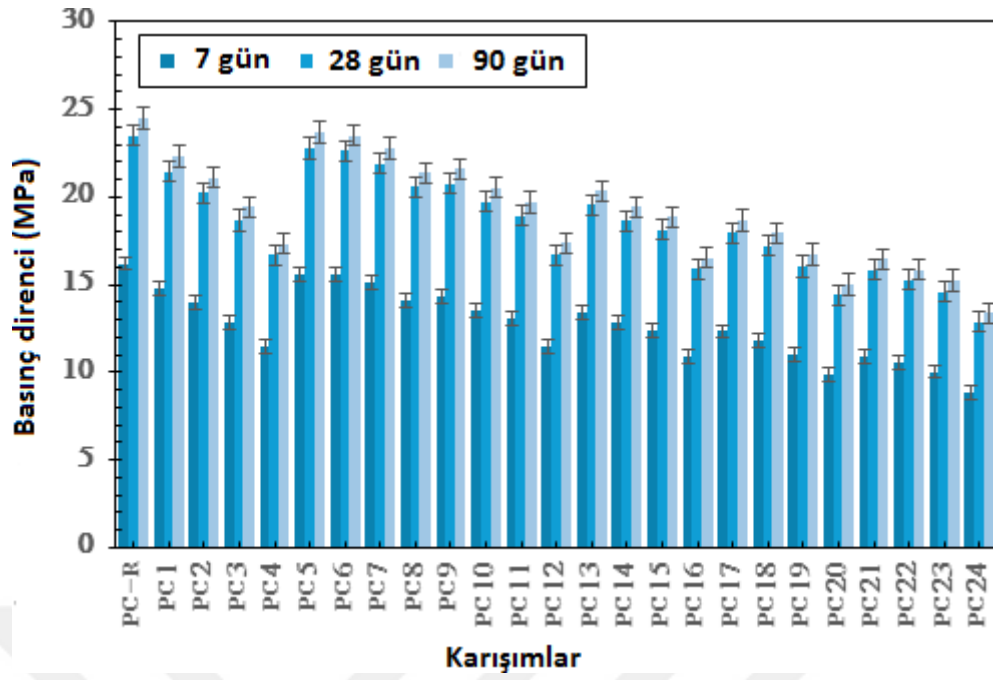
Şekil 7. Geçirimsizlik testi sonuçları



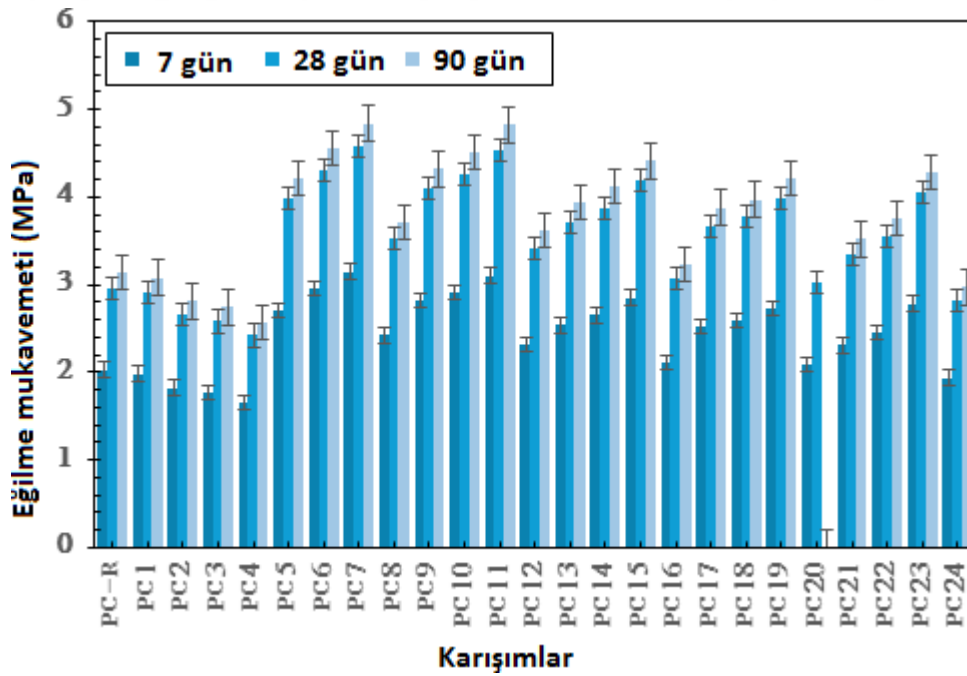
Şekil 8. Geçirimsizlik - gözeneklilik ilişkisi

Şekil 9, farklı DpA ve BF ikame oranlarıyla hazırlanan geçirimli beton numunelerinin basınç dayanımını göstermektedir. Yaşlandırma süresi arttıkça tüm karışımların değerlerinin artış gösterdiği fark edilmiştir. Şekil 9'dan görüldüğü üzere, DpA ikame oranı arttıkça basınç dayanımı test sonuçları azalmaktadır. Bu durum, DpA'nın FA'ya kıyasla daha düşük elastik modülüne ve çimento hamuru ile DpA arasındaki zayıf bağa bağlanabilir [64,65]. BF ilavesi tüm numuneler için basınç dayanımlarını düşürmüştür. Eklenen bazalt lif miktarı arttıkça bu düşüş daha da artmıştır. Bunun nedeni, özellikle betondaki liflerin hacim fraksiyonu daha büyük olduğunda BF'nin rastgele dağılması ve sonuç olarak basınç dayanımının azalmasıdır. [66-68]. DpA ikamesi ve BF katkısının birleşik etkisi de araştırılmıştır. 5-20 DpA değişimi ve %0,25-1 BF ilavesi ile yapılan geçirimli beton karışımlarının basınç dayanımı 28 günde 12,85 - 20,75 MPa aralığında olup, referans karışım PC-R'den % 11,8 - 46 daha düşüktür. Ayrıca, DpA'yı %5'e kadar değiştirerek ve %0,75'e kadar BF ekleyerek üretilen tüm numuneler Japonya üstyapı uygulamaları (JIS:5371) kriterlerini (Basınç dayanımı > 17 MPa) karşılamaktadır.

Geçirimli betonların eğilme dayanımı Şekil 10'da sunulmuştur. Eğilme dayanımları DpA'nın tek başına katılmasıyla azalmıştır. Örneğin, %20 ikame seviyesiyle üretilen geçirimli beton numunesi, PC-R'den % 19 daha düşük olan 2,42 MPa eğilme dayanımı değerine sahiptir. Bu sonuç da benzer literatür çalışmaları sonucunda elde edilen değerlere yakındır [69-71]. Sadece bazalt fiber ilavesinin eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi incelendiğinde, %0,75'e kadar BF ilavesinin eğilme mukavemetini artırdığı görülmüştür. DpA içermeyen PC7 numunesi için eğilme mukavemetindeki iyileşme, referans numuneye kıyasla yaklaşık %55'tir. DpA ve BF elyaflarının birlikte kullanılmasının eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi incelendiğinde, BF ilavesinin DpA'nın eğilme mukavemeti üzerindeki olumsuz etkisini azalttığı da tespit edilmiştir. PC4 numunesi için mukavemet kaybı %19 iken, PC23 numunesi için eğilme mukavemetindeki iyileşme %36'ya yakındır. Bu sonuç, eğilme dayanımı açısından analiz edildiğinde DpA ve BF'nin birlikte kullanılma potansiyelinin yüksek olduğunu da göstermiştir.

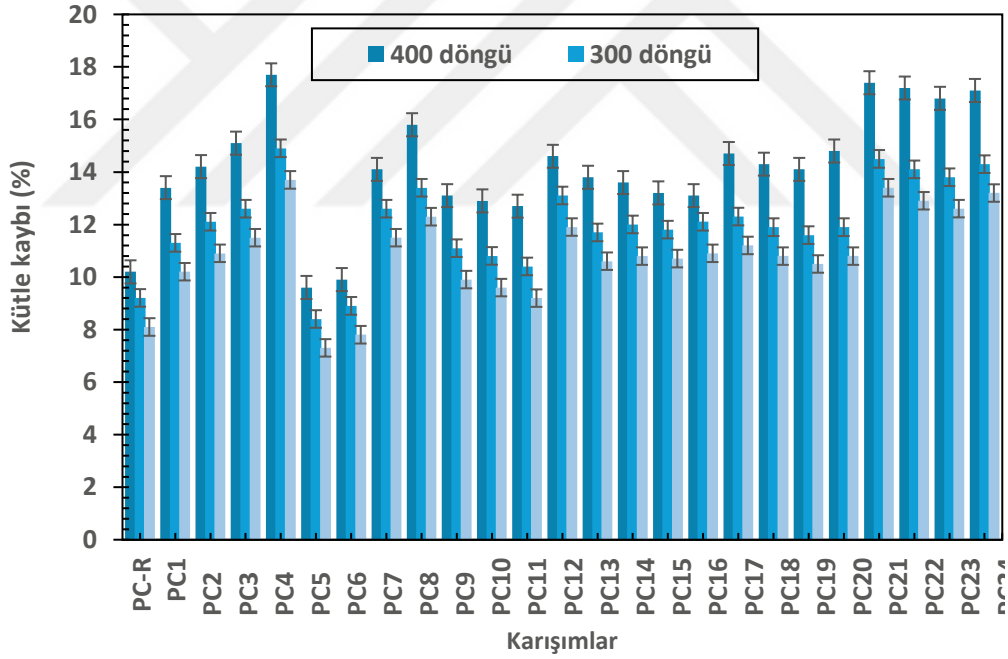


Şekil 9. Geçirimli beton numunelerinin basınç dayanımı



Şekil 10. Geçirimli beton numunelerinin eğilme dayanımı

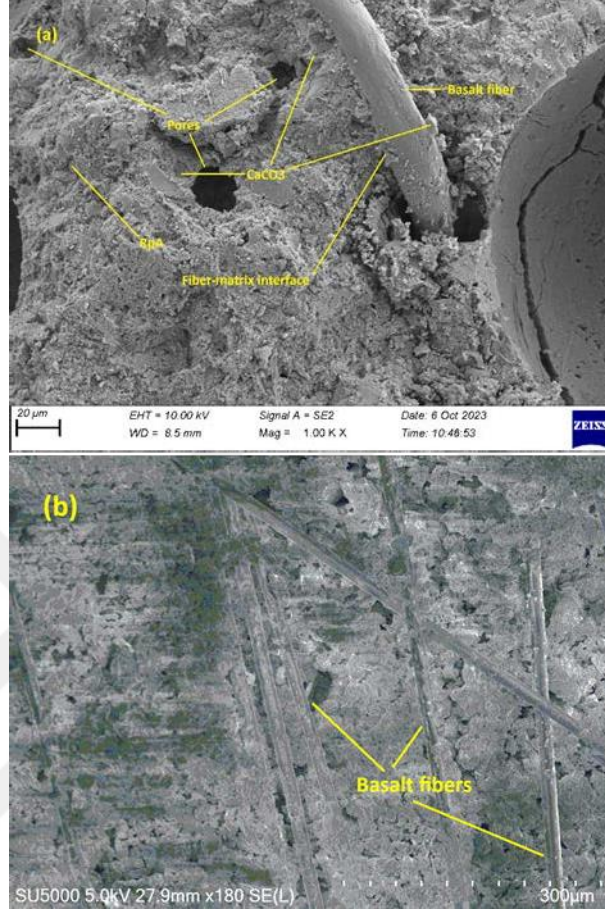
Sürtünme, geçirimli betonun aşınmaya karşı koyma kapasitesini ifade eder ve her ikisi de yaygın olarak sürtünmeye katkıda bulunan dönen araçların etkisi ve sürme işlemi gibi dış kuvvetlere dayanma kabiliyetinin güvenilir bir ölçüsü olarak hizmet eder. Kütle kaybının numuneler ile test ekipmanının iç yüzeyi arasındaki etkiye atfedilmesine rağmen. Veriler, daha yüksek açısallığa ve yüzey pürüzlülüğüne sahip agregaların, aşınma direnci artırılmış geçirimli beton üretimine daha elverişli olduğunu göstermektedir. 200, 300 ve 400 döngüden sonraki ortalama kütle kayıpları Şekil 11'de verilmiştir. Tüm sonuçlar için beklendiği gibi, döngü sayısı arttıkça kütle kaybı miktarı da artmıştır. Referans karışım PC-R için 28 günlük raveling kayıpları 400, 300 ve 200 döngü için sırasıyla %10.2, %9.2 ve %8.1 olmuştur. DpA'nın tek başına kullanımını, referans karışıma kıyasla kütle kayıplarında önemli bir artışa neden olmuştur. Bununla birlikte, sadece BF eklenmiş numunelerde ağırlık kaybında azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre, geçirimli betonun eğrilik direnci, önceki araştırma bulgularında belirtildiği gibi agregaya türünden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu sonuçlara göre, geçirimli betonun eğrilik direnci, önceki araştırma bulgularında belirtildiği gibi agregaya türünden önemli ölçüde etkilenmektedir.[72,73]. 0,75'e kadar bazalt elyaf ilavesi kütle kayıplarını sınırlar.



Şekil 11. 200, 300 ve 400 döngüden sonra kütle kayıpları.

Şu anda, bazalt lifleri ve katılaşmış çimento matrisi arasındaki mikroyapı etkileşiminin araştırılması ağırlıklı olarak taramalı elektron mikroskobu kullanımına dayanmaktadır. Şekil 12'de görüldüğü gibi, çimento betonunun gözeneklerini doldurmak için bazalt lifleri kullanılmış ve bu da beton içinde daha yüksek bir kompaktlık seviyesine neden olmuştur[74]Bu görüntüler ayrıca DpA ve matris yapışmasının da doğal agregalar ve

çimento hamuruna kıyasla iyi ve daha geniş olduğunu göstermektedir. Bu durum, DpA'nın küresel olmayan ve tekdüze olmayan şekline katkıda bulunabilir.



Şekil 12. Çimento matrisinin SEM görüntüleri BF, DpA ve sertleşmiş çimento matrisinin SEM görüntüleri (a) BF ve gözenekler (b) Hidrasyon ürünleri ve BF

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, bazalt lifi (BF) ve geri dönüştürülmüş PP agrega kullanımının geçirimli betonun fiziksel, dayanıklılık ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemektedir. Deneysel sonuçlara ve bulgulara dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Gözlenen yoğunluk değerleri, artan BF ve DpA miktarlarının bir sonucu olarak azalan bir model sergilemiştir. Büyüklükteki düşüş, DpA'nın FA'ya kıyasla nispeten daha düşük özgül ağırlığı ve yığın yoğunluğuna bağlanabilir. Ayrıca, BF içeriğinin artırılması, geçirimli beton içinde daha fazla miktarda hapsedilmiş hava ile sonuçlanabilir ve böylece sertleşmiş malzemenin yoğunluklarında bir azalmaya yol açabilir.
- Taze geçirimli betonun çökmesindeki azalma ile DpA ve BF miktarlarındaki artış arasında önemli bir korelasyon görülmüş ve bu da çökmede kayda değer bir azalmaya yol açmıştır.
- Geçirimsizlik katsayısında gözlenen eğilim, DpA'nın artan ikame yüzdeleri ve numunelere BF ekleme seviyeleri ile pozitif bir korelasyon göstermiştir. Bu durumun birincil belirleyicileri BF ve DpA'nın fiziksel özellikleridir.
- DpA'nın ikame oranı arttıkça, basınç dayanımı testinden elde edilen bulgularda buna karşılık gelen bir düşüş görülmektedir. Bu olgu, ince agregaya (FA) kıyasla DpA'nın nispeten daha düşük elastik modülü ve çimento hamuru ile DpA arasındaki nispeten zayıf bağlanma ile açıklanabilir.
- Eğilme dayanımları sadece DpA ilavesi nedeniyle düşüş göstermiştir. Sadece bazalt elyafının dahil edilmesinin eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi incelendiğinde, BF'nin %0,75'lik bir konsantrasyona kadar dahil edilmesinin eğilme mukavemetinin artmasına neden olduğu ortaya çıkmıştır. DpA ve BF liflerinin eğilme mukavemeti üzerindeki birleşik etkisinin araştırılması, BF liflerinin dahil edilmesinin DpA liflerinin eğilme mukavemeti üzerindeki zararlı etkisini azalttığını ortaya koymuştur.
- Yapılan çalışmaların laboratuvar test sonuçlarında eğilme ve basınç dayanımları birlikte değerlendirildiğinde DpA değeri 5 kg/m³ ve BF değeri %0,25'lik olan numunemiz PC₉ en iyi performans sergileyen numune olmuştur.
- DpA'nın tek başına kullanılması, referans kombinasyona kıyasla kütle kayıplarında önemli bir artışa yol açmıştır. Bununla birlikte, özellikle BF eklenen numunelerde ağırlık kaybında bir azalma tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ağırlık kaybındaki düşüş esas olarak BF içeren numunelerde kaydedilmiştir.

Referanslar

- [1] F. Yu, J. Guo, J. Liu, H. Cai, Y. Huang, Geçirgen betonun gözenek yapısı üzerine bir inceleme: Analiz yöntemi, karakterizasyon parametreleri ve performans üzerindeki etkisi, *Constr. Yapı. Mater.* 365 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129971>.
- [2] X. Dong, H. Guo, S. Zeng, Kentsel drenaj sisteminde gelecekteki dayanıklılığın artırılması: Green versus grey infrastructure, *Water Res.* 124 (2017) 280-289. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>.
- [3] Y. Sun, L. Deng, S.-Y. Pan, P.-C. Chiang, S.S. Sable, K.J. Shah, Sünger şehir için yeşil ve gri altyapıların entegrasyonu: Su ve enerji nexus, *Su-Enerji Nexus.* 3 (2020) 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.03.003>.
- [4] J. Wang, J. Liu, H. Wang, W. Shao, C. Mei, X. Ding, Çin'deki sünger şehirlerin yatırım yapısı ve kentsel su baskını kontrol fonksiyonunun eşleştirme analizi, *J. Clean. Prod.* 266 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121850>.
- [5] X. Guan, J. Wang, F. Xiao, Sünger şehir stratejisi ve sünger şehirde kaldırım malzemelerinin uygulanması, *J. Clean. Prod.* 303 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127022>.
- [6] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, Q. Kareem, S. İpek, Doğal agreganın geri dönüştürülmüş agrega ile farklı ikamesinin geçirimli betonun performans özellikleri üzerine etkisi, *Mater. Struct. Constr.* (2016). <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0517-y>.
- [7] G. Kaplan, A. Gulcan, B. Cagdas, O.Y. Bayraktar, Atık betonlardan elde edilen geri dönüştürülmüş iri agregaların hafif geçirimli beton özelliklerine etkisi, *Environ. Sci. Pollut. Res.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11881-y>.
- [8] G.M. Kim, J.G. Jang, H.R. Khalid, H.K. Lee, CSA çimentosu ve taban külü agregaları ile üretilen geçirimli betonun su arıtma özellikleri, *Constr. Build. Mater.* 136 (2017) 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.020>.
- [9] L. Chu, T.F. Fwa, K.H. Tan, Geçirgen beton kaplama malzemelerinin ses emme özelliklerinin laboratuvarında değerlendirilmesi, *Transp. Res. Rec.* 2629 (2017) 91-103. <https://doi.org/10.3141/2629-12>.
- [10] R. Zhong, Z. Leng, C. sun Poon, Sürdürülebilir bir kaplama malzemesi olarak geçirgen betonun araştırılması ve uygulanması: Son teknoloji ve uygulama durumu incelemesi, *Constr. Build. Mater.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131>.

- [11] N. Xie, M. Akin, X. Shi, Geçirgen beton kaplamalar: Çevresel faydalar ve dayanıklılık üzerine bir inceleme, *J. Clean. Prod.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>.
- [12] O. AlShareedah, S. Nassiri, Geçirgen beton karışım optimizasyonu, fiziksel ve mekanik özellikler ve kaplama tasarımı: Bir inceleme, *J. Clean. Prod.* 288 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125095>.
- [13] A. Singh, P.V. Sampath, K.P. Biligiri, Sürdürülebilir geçirgen beton sistemleri üzerine bir inceleme: Tıkanma, malzeme karakterizasyonu ve çevresel yönler üzerine, *Constr. Build. Mater.* 261 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120491>.
- [14] P. Wijeyawardana, N. Nanayakkara, C. Gunasekara, A. Karunarathna, D. Law, B.K. Pramanik, Modifiye edilmiş geçirgen beton kullanılarak kentsel akıştan ağır metal gideriminin iyileştirilmesi, *Sci. Total Environ.* 815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152936>.
- [15] B.S. Seeni, M. Madasamy, Geçirgen beton performansını etkileyen faktörler, *Gradjevinar.* 73 (2021) 1017-1030. <https://doi.org/10.14256/JCE.2997.2018>.
- [16] F.H. Anwar, H. El-Hassan, M. Hamouda, G. Hinge, K.H. Mo, Çimento ve Agregada Değişimleri ile Geçirgen Beton Performansının Meta Analizi, *Buildings.* 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/buildings12040461>.
- [17] A. Toghroli, M. Shariati, F. Sajedi, Z. Ibrahim, S. Koting, E.T. Mohamad, M. Khorami, A review on pavement porous concrete using recycled waste materials, *Smart Struct. Syst.* 22 (2018) 433-440. <https://doi.org/10.12989/sss.2018.22.4.433>.
- [18] K.S. Elango, R. Gopi, R. Saravanakumar, V. Rajeshkumar, D. Vivek, S.V. Raman, Geçirgen betonun özellikleri - Son teknoloji ürünü bir inceleme, in: *Mater. Today Proc.*, 2021: pp. 2422-2425. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.839>.
- [19] J. Endawati, R. Utami, Rochaeti, Uçucu kül ve agregada bileşiminin geçirgen beton özellikleri üzerindeki etkisi, in: *Mater. Sci. Forum*, 2018: pp. 297-302. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.917.297>.
- [20] A. Shiuly, T. Hazra, D. Sau, D. Maji, Atık plastik agregada bazlı sürdürülebilir betonun performans ve optimizasyon çalışması - Bir makine öğrenimi yaklaşımı, *Clean. Atık Sist.* 2 (2022) 100014. <https://doi.org/10.1016/J.CLWAS.2022.100014>.
- [21] Freedomia, Dünya İnşaat Agregaları - Talep ve Satış Tahminleri, Pazar Payı, Pazar Büyüklüğü, Pazar Liderleri, *Free. Gorup.* (2016). <https://doi.org/10.1128/mBio.00197-12>. Editor.

- [22] M.K. Dixit, J.L. Fernández-Solís, S. Lavy, C.H. Culp, Somutlaştırılmış enerji ölçümü için parametrelerin tanımlanması: Bir literatür taraması, *Energy Build.* 42 (2010) 1238-1247. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016>.
- [23] L. Evangelista, M. Guedes, J. De Brito, A.C. Ferro, M.F. Pereira, Beton atıklarından yapılan ince geri dönüştürülmüş agregaların fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri, *Constr. Build. Mater.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112>.
- [24] M. Záleská, M. Pavlíková, O. Jankovský, M. Lojka, F. Antončík, A. Pivák, Z. Pavlík, Atık plastik agrega ve su itici katkının hafif magnezyum oksiklorür çimento kompozitinin özellikleri üzerindeki etkisi, *Appl. Sci.* 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/app9245463>.
- [25] M. Garside, 1950'den 2018'e dünya çapında plastik üretimi (milyon metrik ton cinsinden)*, *Statista.* (2020). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/>.
- [26] PlasticsEurope, The facts 2018, *PlasticsEurope.* (2018) 59. https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf.
- [27] V. Lahtela, M. Hyvärinen, T. Kärki, Atık akışlarındaki plastik fraksiyonların bileşimi: Daha verimli geri dönüşüm ve kullanıma doğru, *Polymers (Basel).* 11 (2019). <https://doi.org/10.3390/polym11010069>.
- [28] R. Sharma, P.P. Bansal, Betonda farklı atık plastik formlarının kullanımı - Bir inceleme, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 473-482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.042>.
- [29] M. Záleská, M. Pavlíková, J. Pokorný, O. Jankovský, Z. Pavlík, R. Černý, Atık plastiklerin uygulanmasına dayalı hafif betonun yapısal, mekanik ve higrotermal özellikleri, *Constr. Yapı. Mater.* 180 (2018) 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.250>.
- [30] N. Saikia, J. De Brito, Plastik atıkların çimento harcı ve beton hazırlanmasında agrega olarak kullanımı: Bir inceleme, *Constr. Build. Mater.* 34 (2012) 385-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>.
- [31] S.M. Abtahi, M. Sheikhzadeh, S.M. Hejazi, Fiber takviyeli asfalt-beton - Bir inceleme, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 871-877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009>.
- [32] Y. Li, J. Zhang, Y. He, G. Huang, J. Li, Z. Niu, B. Gao, Bazalt fiber takviyeli betonun dayanıklılığı üzerine bir inceleme, *Compos. Sci. Technol.* 225 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109519>.
- [33] W. Abbass, M.I. Khan, S. Mourad, Farklı beton dayanımlarına sahip çelik lif takviyeli betonun mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi, *Constr. Build. Mater.* 168 (2018) 556-569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164>.

- [34] A.C. Aydin, Yüksek hacimli hibrit lif donatılı betonun kendiliğinden sıkışabilirliği, *Constr. Yapı Malzemeleri. Mater.* 21 (2007) 1149-1154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.017>.
- [35] N. Banthia, M. Sappakittipakorn, Fiber hibridizasyonu yoluyla çelik fiber takviyeli betonda tokluk artışı, *Cem. Concr. Res.* (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.005>.
- [36] A. Siddika, M.A. Al Mamun, R. Alyousef, Y.H.M. Amran, Fiber takviyeli polimer kompozitler kullanılarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesi: Bir inceleme, *J. Build. Eng.* 25 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100798>.
- [37] M.Z. Naser, R.A. Hawileh, J.A. Abdalla, Betonarme yapıların güçlendirilmesinde fiber takviyeli polimer kompozitler: Eleştirel bir inceleme, *Eng. Struct.* 198 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109542>.
- [38] H. Li, J. Lin, X. Lei, T. Wei, Rastgele orman algoritması ile bazalt lif takviyeli betonun basınç dayanımı tahmini, *Mater. Today Commun.* 30 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.103117>.
- [39] H. Dilbas, Ö. Çakır, Bazalt lifinin işlenmiş geri dönüştürülmüş agregalı betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkisi, *Constr. Yapı Malzemeleri. Mater.* 254 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119216>.
- [40] T. Scalici, G. Pitarresi, D. Badagliacco, V. Fiore, A. Valenza, Farklı vakum destekli empenye teknikleri ile üretilen bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, *Compos. Part B Eng.* 104 (2016) 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.021>.
- [41] H. Zhang, B. Wang, A. Xie, Y. Qi, Bazalt lif takviyeli betonun dinamik mekanik özellikleri ve bünye modeli üzerine deneysel çalışma, *Constr. Build. Mater.* 152 (2017) 154-167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.177>.
- [42] Ş. Özkan, F. Demir, PVA elyafı ve bazalt elyafının uygun maliyetli hibrit çimentolu kompozitlerin mekanik performansı üzerindeki hibrit etkileri, *Constr. Yapı Malzemeleri. Mater.* 263 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120564>.
- [43] İngiliz Standartları Enstitüsü BSI, BS EN 197-1: Çimento, Bölüm 1: Yaygın Çimentolar için Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Br. Stand.* (2011) 50.
- [44] ASTM, ASTM C143/C143M-12 Hidrolik Çimentolu Betonun Çökmesi için Standart Test Yöntemi, *Annu. B. ASTM Stand.* (2015).
- [45] ASTM C1688, Taze karıştırılmış geçirimli betonun yoğunluğu ve boşluk içeriği için standart test yöntemi, 2014.

- [46] ASTM:C1754/C1754M-12, Sertleştirilmiş geçirimli betonun yoğunluğu ve boşluk içeriği için standart test yöntemi, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. https://doi.org/10.1520/C1754_C1754M-12.
- [47] ASTM Standardı, ASTM C349-18: Hidrolik Çimento Harçlarının Basınç Dayanımı için Standart Test Yöntemi (Prizmaların Eğilmede Kırılan Kısımları Kullanılarak), Annu. B. ASTM Stand. (2018) 1-4.
- [48] S. Spesifikasyon, Dış Cephe İçin Yüzey Uygulamalı Yapıştırma Bileşikleri için Standart Spesifikasyon, Değişiklikler. 4 (2003).
- [49] ASTM International, C1701/C1701M - 17a: Yerinde Geçirgen Betonun Sızma Oranı için Standart Test Yöntemi, Annu. B. ASTM Stand. (2017).
- [50] M. Offenbergl, Geçirimli betonun potansiyel raveling direncini değerlendirmek için yeni bir test yönteminin geliştirilmesi, in: ASTM Spec. Tech. Publ., 2012. <https://doi.org/10.1520/STP104555>.
- [51] S. Park, S. Ju, H.K. Kim, Y.S. Seo, S. Pyo, Taze bağlayıcının reolojik özelliklerinin geçirimli betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi, J. Mater. Res. Technol. 17 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.045>.
- [52] K. Tan, Y. Qin, J. Wang, Biyokömürle modifiye edilmiş geçirimli betonun özelliklerinin ve karbon tutma potansiyelinin değerlendirilmesi, Constr. Yapı. Mater. 314 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125648>.
- [53] J. Cai, J. ge Chen, J. Shi, Q. Tian, G. Xu, Y. Du, Geçirgen betonun tıkanma direncini değerlendirmek için yeni bir yaklaşım, Case Stud. Constr. Mater. 16 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00864>.
- [54] M.G. Lee, W.C. Wang, Y.C. Wang, Y.C. Hsieh, Y.C. Lin, Çelik Lifli veya Cam Lifli Yüksek Mukavemetli Geçirgen Betonun Mekanik Özellikleri, Buildings. 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/buildings12050620>.
- [55] H.L. Strieder, V.F.P. Dutra, Â.G. Graeff, W.P. Núñez, F.R.M. Merten, Geri dönüştürülmüş beton agregalı geçirimli beton kaplamaların performans değerlendirmesi, Constr. Build. Mater. 315 (2022) 125384. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125384>.
- [56] A.J. Babafemi, B. Šavija, S.C. Paul, V. Anggraini, Atık geri dönüştürülmüş plastik ile betonun mühendislik özellikleri: Bir inceleme, Sustain. (2018). <https://doi.org/10.3390/su10113875>.
- [57] I. Almeshal, B.A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Mustafa Mohamed, A. Alaskar, Çimentolu kompozitlerde ince agrega olarak geri dönüştürülmüş plastik kullanımı: Bir inceleme, Constr. Yapı. Mater. 253 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119146>.
- [58] F.S. Khalid, J.M. Irwan, M.H.W. Ibrahim, N. Othman, S. Shahidan, Fiber takviyeli beton kirişlerde plastik atıkların performansı, Constr. Yapı. Mater. 183 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.122>.

- [59] O. Gencel, M. Nodehi, O. Yavuz Bayraktar, G. Kaplan, A. Benli, A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu, Silis dumanı içeren bazalt lif takviyeli köpük beton: Deneysel bir çalışma, *Constr. Yapı Malzemeleri. Mater.* 326 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126861>.
- [60] X. Sun, Z. Gao, P. Cao, C. Zhou, Bazalt lif takviyeli beton için mekanik özellik testleri ve çok ölçekli sayısal simülasyonlar, *Constr. Yapı. Mater.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.018>.
- [61] Y. El Bitouri, D. Perrin, ABS ve WEEE Bazlı Plastik Agregalar İçeren Harçların Basınç ve Eğilme Dayanımları, *Polymers (Basel)*. 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14183914>.
- [62] N. Suksawang, A. Mirmiran, Beton Kaplama Levhasının Değiştirilmesi için Fiber Takviyeli Beton Kullanımı, *Res. Cent. Florida Dep. Transp.* (2014).
- [63] R. Kacharla Sunil Kumar, K. Ravande, Bazalt Lifinin Farklı Uzunluk ve Hacimlerinin Betonun Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, *Civ. Eng. Archit.* 11 (2023). <https://doi.org/10.13189/cea.2023.110207>.
- [64] S.N. Abbas, M.I. Qureshi, M. Abid, M.A.U.R. Tariq, A.W.M. Ng, Doğal Kaba Agregaların Kısmi İkamesi Olarak Kullanılan Geri Dönüştürülmüş Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) ve Elektronik Atıklar (E-Atıklar) Üzerine Kum Kaplama Uygulanarak Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Sustain.* 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14074087>.
- [65] S. W. M. Supit, P. -, MODİFİYE PLASTİK ATIKLARIN İNCE AGREGATE İÇEREN GÖZENEKLİ BETON BLOK ÜZERİNDE KULLANILMASI, *J. Teknol.* 85 (2023). <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v85.19219>.
- [66] J.H. Haido, S.S. Majeed, M. Karpuzcu, Bazalt lifleri ile yapılan kendiliğinden yerleşen betonun akışkanlık, dayanım ve geçirgenlik özellikleri, *Acad. J. Nawroz Univ.* 9 (2020). <https://doi.org/10.25007/ajnu.v9n1a589>.
- [67] H. Zhou, B. Jia, H. Huang, Y. Mou, Bazalt lif takviyeli betonun temel mekanik özellikleri üzerine deneysel çalışma, *Materials (Basel)*. 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13061362>.
- [68] N. Liang, L. Ren, S. Tian, X. Liu, Z. Zhong, Z. Deng, R. Yan, Polipropilen-Bazalt Elyaf Takviyeli Betonun Kırılma Tokluğu Üzerine Çalışma, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 15 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00472-x>.
- [69] T.K. Mohammed, S.M. Hama, Atık cam tozu ve atık ince plastik agrega içeren yeşil betonun mekanik özellikleri, darbe direnci ve bağlanma dayanımı, *Innov. Infrastruct. Solut.* 7 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00652-4>.
- [70] J.K. Park, M.O. Kim, Geri dönüştürülmüş plastik içeren çimento bazlı malzemelerin mekanik özellikleri: Bir inceleme, *Sustain.* 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12219060>.

- [71] F.K. Alqahtani, I. Zafar, Atık İşlemeden Elde Edilen Fabrikasyon Plastik Agregayı İçeren Yeşil Beton Yapımı, *Sustain.* 15 (2023). <https://doi.org/10.3390/su15054114>.
- [72] C. Gaedicke, A. Marines, F. Miankodila, İşlenmemiş ve geri dönüştürülmüş agregalı geçirimli betonda karotları ve dökme silindirleri karşılaştırmak için bir yöntem, *Constr. Build. Mater.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.043>.
- [73] C. Gaedicke, A. Marines, F. Miankodila, İşlenmemiş ve geri dönüştürülmüş agregalı geçirimli betonlarda çekirdeklerin aşınma direncinin değerlendirilmesi, *Constr. Build. Mater.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.001>.
- [74] M. Hassani Niaki, A. Fereidoon, M. Ghorbanzadeh Ahangari, Bazalt lif ve nanokil takviyeli polimer betonun mekanik ve termal özellikleri üzerine deneysel çalışma, *Compos. Struct.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.063>.
- [75] CELEP, Z. ve KUMBASAR, N., 2005. Betonarme Yapılar, İhlas Gazetecilik A.Ş., İstanbul.
- [76] NEVİLLE, A.M., 1993. Properties of Concrete, Third Edition, Longman Scientific and Technical.
- [77]. https://www.asmaden.com/Agrega_Siniflandirma.html
- [78] KALİTEKONTROL.org, www.kalitekontrol.org 06.05.2012
- [79] VİKİPEDİA, www.wikipedia.org
- [80] <https://paksoybeton.com/teknik-bilgi/f/beton-basin%C3%A7-dayanim-siniflari>