

**FARKLI AGREGA TÜRLERİ İLE ÜRETİLEN GEÇİRİMLİ BETONLARIN
GEÇİRİMLİLİK VE TIKANMA POTANSİYELLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUNUS İNANÇ

Danışman

Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI AGREGA TÜRLERİ İLE ÜRETİLEN GEÇİRİMLİ
BETONLARIN GEÇİRİMLİLİK VE TIKANMA
POTANSİYELLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Yunus İNANÇ

Danışman

Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2024

TEZ ONAY SAYFASI

YUNUS İNANÇ tarafından hazırlanan “Farklı Agrega Türleri ile Üretilen Geçirimli Betonların Geçirimlilik ve Tıkanma Potansiyellerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 25/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA

Başkan : Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Abdullah DEMİR
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25/07/2024

YUNUS İNANÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI AGREGA TÜRLERİ İLE ÜRETİLEN GEÇİRİMLİ BETONLARIN GEÇİRİMLİLİK VE TIKANMA POTANSİYELLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Yunus İNANÇ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA

Bu tez çalışmasında, üç farklı agrega türü; doğal agrega, kırmataş agrega ve beton kırığı agregası kullanılarak üretilen geçirimli betonların özellikleri incelenmiştir. Bu agregalar, iki farklı elek aralığında (4,00-11,2 mm ve 11,2-22,4 mm) gradasyonlara ayrılarak toplamda 6 (altı) seri beton numunesi, 10 cm x 10 cm x 10 cm küp ve 10 cm x 20 cm silindir şeklinde üretilmiştir. Geçirimli betonların boşluk oranları, birim hacim ağırlıkları, basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı, geçirimlilik (permabilite) seviyeleri, kil ve kum ile tıkanmaya maruz bırakılan numunelerin geçirimlilik seviyelerindeki değişimin belirlenmesi deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, farklı agrega türlerinin geçirimli betonun fiziksel, mekanik ve geçirimlilik özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir. Özellikle boşluk oranı, basınç dayanımı ve geçirimlilik seviyeleri gibi parametrelerde agreganın türüne ve elek aralığına bağlı olarak değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, geçirimli beton üretiminde uygun agrega seçimlerinin yapılmasının betonun performansını ve dayanıklılığını optimize etmek için kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

2024, xi + 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Geçirimli Beton, Geçirimlilik, Tıkanma Potansiyeli, Agrega Türü

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF PERMEABILITY AND CLOGGING POTENTIALS OF PERVIOUS CONCRETE PRODUCED WITH DIFFERENT AGGREGATE TYPES

Yunus İNANÇ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet Raif BOĞA

In this thesis study, the properties of pervious concrete produced using three different types of aggregates: natural aggregate, crushed stone aggregate, and recycled concrete aggregate, were examined. These aggregates were divided into gradations within two different sieve ranges (4.00-11.2 mm and 11.2-22.4 mm), resulting in a total of 6 (six) series of concrete samples, produced in the shapes of 10 cm x 10 cm x 10 cm cubes and 10 cm x 20 cm cylinders. Tests were conducted to determine the void ratios, unit weight, compressive strength, splitting tensile strength, ultrasonic pulse velocity, permeability levels, and the changes in permeability levels of samples subjected to clogging with clay and sand. The results of the experiments indicated that different types of aggregates have significant effects on the physical, mechanical, and permeability properties of pervious concrete. Particularly, variations in parameters such as void ratio, compressive strength, and permeability levels were observed depending on the type of aggregate and the sieve range. These results demonstrate that selecting the appropriate aggregates for the production of pervious concrete is critically important for optimizing the concrete's performance and durability.

2024, xi +75 pages

Keywords: Pervious Concrete, Permeability, Clogging Potential, Types of Aggregates

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA'ya teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca desteklerinden dolayı aileme ve tez çalışmasındaki katkılarından dolayı doktora öğrencisi İnşaat Yüksek Mühendisi Emre IŞIK'a teşekkür ederim.

Yunus İNANÇ

Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ	x
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Geçirimli Beton	3
2.2 Geçirimli Betonun Kullanım Alanları ve Uygulanma Şekli	5
2.3 Geçirimli Betonun Avantajları	8
2.3.1 Su Yönetimi	8
2.3.2 Yeraltı Su Şarjı.....	9
2.3.3 Çevre Dostu İnşaat.....	9
2.3.4 Sel Kontrolü	9
2.3.5 Su Temizliği.....	10
2.3.6 Yerel Su Yönetimi Standartlarına Uygunluk.....	10
2.3.7 Estetik Çeşitlilik.....	11
2.3.8 Gürültü Azaltma	11
2.4 Geçirimli Betonun Dezavantajları.....	12
2.4.1 Dayanıklılık Sorunları.....	12
2.4.2 Bakım Gereksinimi	12
2.4.3 Yüksek Maliyet.....	13
2.4.4 Zamanla Tıkanma Riski.....	13
2.4.5 Sıcaklık ve İklim Etkisi.....	13
2.4.6 Uygulama alanlarının sınırlı olması.....	14

2.4.7 Uygulama Zorlukları.....	14
2.5 Geçirimli Betonda Boşluk Türleri.....	14
2.6 Geçirimli Betonda Tıkanma Türleri ve Oluşum Şekli	16
2.7 Geçirimli Betonda Kullanılan Malzemeler	17
2.7.1 Agregalar	17
2.7.2 Bağlayıcı Malzemeler	19
2.7.3 Su	20
2.7.4 Kimyasal Katkılar	21
2.8 Geçirimli Beton Tasarımı.....	22
2.9 Geçirimli Beton ile İlgili Yapılan Çalışmalar	23
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	27
3.1 Kullanılan Malzemeler	28
3.1.1 Çimento.....	28
3.1.2 Agregalar	29
3.1.2.1 Doğal Agregalar	29
3.1.2.2 Kırmataş Agregalar	30
3.1.2.3 Beton Kırığı Agregalar	31
3.1.3 Hiper Akışkanlaştırıcı Katkı	34
3.1.4 Su	34
3.2 Geçirimli Beton Karışım Oranları ve Hazırlanması.....	34
3.3 Beton Döküm Yöntemi, Sıkıştırma ve Üretilen Numune Tipleri	36
3.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri	42
3.4.1 Toplam Boşluk Oranı Belirlenmesi	42
3.4.2 Birim Hacim Ağırlık Deneyi	42
3.4.3 Sabit Seviyeli Geçirimlilik Deneyi	43
3.4.4 Basınç Dayanımı Deneyi	45
3.4.5 Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi.....	46
3.4.6 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi.....	48
3.4.7 Geçirimli Beton Numunelerinin Tıkanmaya Maruz Bırakılması	49
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	51
4.1 Toplam Boşluk Oranı Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	51
4.2 Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	53

4.3 Sabit Seviyeli Geçirimsizlik (Permabilite) Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	54
4.3 Basınç Dayanımı Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	56
4.4 Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	58
4.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	60
4.6 Tıkanma Performansı Sonuçları ve Değerlendirilmesi	61
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	66
6. KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	75



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

m	Metre
%	Yüzde
cm	Santimetre
dB	Desibel
f_{ctk}	Yarmada çekme dayanımını
L	Mesafe
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
P	Basınç kuvveti
sn	Saniye
kg	Kilogram
dk	Dakika
m ³	Metreküp
g	Gram
cm ²	Santimetrekare
pH	Potansiyel Hidrojen
°C	Santigrat derece
lt	Litre
cm ³	Santimetreküp
N	Newton

Kısaltmalar

NaOH	Sodyumhidroksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyumsilikat
HA	Hiper akışkanlaştırıcı
SiO ₂	Silisyum oksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
CaO	Kalsiyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
Na	Sodyum
SO ₃	Kükürt Trioksit
Cl ⁻	Klor
w/c	Su/Bağlayıcı
ACV	Agreggate Crushing Value

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Geçirimli alt zeminde geçirimli beton uygulaması..	6
Şekil 2.2 Az Geçirimli alt zeminde geçirimli beton uygulaması...	7
Şekil 2.3 Geçirimli betondaki gözenek türleri	15
Şekil 2.4 Farklı agrega boyutlarının gözenek dağılımı	15
Şekil 3.1 Deneysel çalışma akış diyagramı	27
Şekil 3.2 4,00-11,2 mm agregalara ait granülometri eğrileri	32
Şekil 3.3 11,2-22,4 mm agregalara ait granülometri eğrileri	33
Şekil 3.4 Sabit seviye geçirimsizlik deney düzeneği 2D ve 3D çizimleri	43
Şekil 4.1 Toplam boşluk oranının beton serilerine göre değişimi	51
Şekil 4.2 Birim hacim ağırlığın beton serilerine göre değişimi	53
Şekil 4.3 Birim hacim ağırlığın toplam boşluk oranı ile olan ilişkisi	54
Şekil 4.4 Geçirimsizlik katsayısının beton serilerine göre değişimi	55
Şekil 4.5 Geçirimsizlik katsayısı ve toplam boşluk oranı arasındaki ilişki	55
Şekil 4.6 Basınç dayanımının beton serilerine göre değişimi	56
Şekil 4.7 Basınç dayanımı ve toplam boşluk oranı arasındaki ilişki	57
Şekil 4.8 Basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişki	58
Şekil 4.9 Yarmada-çekme dayanımının beton serilerine göre değişimi	59
Şekil 4.10 Yarmada çekme dayanımının toplam boşluk oranı ile olan ilişkisi	59
Şekil 4.11 Ultrases geçiş hızının tüm serilere göre değişimi	61
Şekil 4.12 Ultrases geçiş hızı ve toplam boşluk oranı arasındaki ilişki	61
Şekil 4.13 4,00-11,2 mm elek aralığında üretilen beton serilerinin tıkanma performansları	62
Şekil 4.14 11,2-22,4 mm elek aralığında üretilen beton serilerinin tıkanma performansları	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Geçirgen betonun tipik bileşenleri ve bunların oranları ile geçirgen betonun temel mekanik ve fiziksel özellikleri	23
Çizelge 3.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	28
Çizelge 3.2 4,00 – 11,2 mm boyutlarındaki agregaların granülometrik analizi, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	32
Çizelge 3.3 11,2 – 22,4 mm boyutlarındaki agregaların granülometrik analizi, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	33
Çizelge 3.4 Hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri.	34
Çizelge 3.5 Geçirimli beton teorik karışım oranları, kg/m ³	35
Çizelge 3.6 Tıkanma potansiyeli tespitinde elek aralıklarına göre herbir döngü için kullanılan sediment miktarı ve boyutları	50

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Geçirimli beton	3
Resim 2.2 Geçirimli beton uygulanmış bir otopark alanı	5
Resim 2.3 Geçirimli beton uygulanmış yürüyüş yolu ve kaldırım	6
Resim 2.4 Geçirimli betonun silindirle sıkıştırma işlemi	7
Resim 2.5 Çimento harcının aşağı doğru akması ile tıkanmış (b) ve tıkanmamış (a) geçirimli beton	17
Resim 3.1 Doğal agregaların taşındığı dere yatağı	29
Resim 3.2 4,00 – 11,2 mm (a), 11,2-22,4 mm (b) elek aralığında doğal agregalar.	30
Resim 3.3 4,00–1,2 mm (a), 11,2-22,4 mm (b) elek aralığında kırmataş agregalar	30
Resim 3.4 4,00 – 11,2 mm (a), 11,2-22,4 mm (b) elek aralığında beton kırığı agregalar	31
Resim 3.5 Beton karışımında kullanılan mikser.	36
Resim 3.6 11,2-22,4 mm kırmataş agregası (a), 4,00-11,2 mm beton kırığı (b) agregaya ait döküm.	37
Resim 3.7 Şişleme ekipmanına ait görsel ve çizimler.....	38
Resim 3.8 Taze betonun kalıplanması	38
Resim 3.9 11,2-22,4 mm beton kırığı agregalı numunenin kalıptan çıkarıldıktan sonraki durumu	39
Resim 3.10 4-11,2 mm beton kırığı agregalı numunelerinin kalıptan çıkarıldıktan sonraki durumu	39
Resim 3.11 4-11,2 mm doğal agregası ile üretilen betonların dip görüntüsü	40
Resim 3.12 4-11,2 mm kırmataş agregası ile üretilen betonların dip görüntüsü	40
Resim 3.13 4-11,2 mm beton kırığı agregası ile üretilen betonların dip görüntüsü	41
Resim 3.14 11,2-22,4 mm doğal agregası ile üretilen betonların dip görüntüsü	41
Resim 3.15 11,2-22,4 mm kırmataş agregası ile üretilen betonların dip görüntüsü	41
Resim 3.16 11,2-22,4 mm beton kırığı agregası ile üretilen betonların dip görüntüsü	41
Resim 3.17 Sabit seviyeli geçirimsizlik deney düzeneği	44
Resim 3.18 Geçirimli betonun deney düzeneğine montaj aşamaları (Sırası ile 1,2,3,4)	45

Resim 3.19 Basınç dayanımı deneyi ve 11,2-22,4 mm doğal agregalı numunenin kırılma görseli	46
Resim 3.20 Yarmada-çekme dayanımı deneyi yapılışı.....	47
Resim 3.21 4,00-11,2 mm doğal agregalı numunenin yarılma şekli	47
Resim 3.22 Ultrases geçiş hızı deneyi yapılışı.....	48
Resim 3.23 Geçirimli betonun bir tıkanma döngüsünde kullanılan kum ve suda çözünmüş kil, tıkanma sonrası geçirimli betonun görünüşü.....	50
Resim 4.1 4,00 - 11,2 mm doğal agregalı numunenin deney sonundaki görünümü.....	60
Resim 4.2 11,2-22,4 mm agregalı numunelerin tıkanma sonrası durumu	63
Resim 4.3 4,00-11,2 mm beton kırığı numunenin iç boşluklarında sediment birikimi .	64
Resim 4.4 4,00-11,2 mm beton kırığı numunenin iç boşluklarında sediment birikimi .	64
Resim 4.5 Kum ve kil partiküllerinin deney düzeneğinde çökmesi.....	65

1.GİRİŞ

Artan kentleşme ile birlikte şehirler giderek daha çok yapı ve hava/su geçirmeyen yüzeyler ile kaplanmaktadır. Kullanılan yüzey kaplamalarının su geçirgenlik ve hava geçirgenlik özelliği olmadığı için yağmur suları yer altına ulaşamamaktadır. Bununla beraber toprağın hava vasıtası ile ısı ve nem alışverişi yapması zorlaşmaktadır. Bu nedenle büyük şehirlerde yer yüzeyinin sıcaklığı ve nemi ayarlanamamaktadır. Bu süreç şehirlerde sıcak ada etkisini ortaya çıkarmaktadır (Yang ve Jiang 2003).

Şehirlerde geçirimli yüzeylerin artırılması ile yağmur suyu hareketi doğal dengesi içinde sürdürülebilir hale gelebilir. Böylelikle yer altı su kaynaklarının yenilenmesi ve beslenmesi sağlanabilecektir.

Geçirimli yüzeylerin oluşmasını sağlamak için kullanılabilecek yapı malzemelerinin en önemlilerinden birisi geçirimli betondur. Geçirimli beton temelde geleneksel betona göre daha açık gözenek yapısı sayesinde üzerine gelen su yükünü daha hızlı bir şekilde altındaki yüzeye aktarabilme özelliğine sahip bir beton türüdür (Çelikten ve Canbaz 2020).

Geçirimli betonunun içindeki tüm gözenekli alanların sıvıyı iletme konusunda etkili olmadığı ve “aktif olmayan gözeneklilik” olarak adlandırılan etkili olmayan boşlukların sıvı akışına uygun olmadığı belirtilmektedir. Beton içerisindeki gözeneklerin bir kısmı diğer boşluklardan izole yapıdadır (kapalı yapı) ve sıvıyı iletemezler. Bu davranış, oldukça karışık olmakla birlikte, küçük boyutlu agregalar içeren geçirimli betonlarda daha sık olarak gerçekleşmektedir (Torres vd. 2015).

Geçirimli betonun ince agregalar içeriği sınırlıdır. Aşırı miktarda ince agregalar, gözenekleri tıkayabilir ve geçirgenliği azaltabilmektedir. Kaba agregalar kullanımı için dar bir gradasyon uygulamak gerekebilir. Uygulanan gradasyon aralığı istenen gözeneklilik ve geçirgenliği elde etmek için önemlidir. Dar bir gradasyon, tane boyutlarının sınırlı bir aralıkta olması anlamına gelmektedir. Daha büyük agregalarla üretilen geçirimli betonlarda daha pürüzlü bir yüzey oluşmaktadır. Doğal agregalar gibi yuvarlak ve oval

hatlara sahip agregalar daha düşük boşluk oluşumuna neden olmaktadır. Köşeli agregalar ise yerleştirme sırasında tek bir yöne doğru yöneleceklerinden aderansı ve temas yüzeyini etkilemektedirler. Yassı ve uzun agregaların kullanımından ise kaçınılması önerilmektedir (Tennis vd. 2004).

Geçirgen beton kaplamaların yaygınlaşmasıyla birlikte araştırmacılar geçirgenliğin azalması sorununu fark etmeye başladılar. Çok sayıda asılı parçacık (çamur, ince kum, moloz vb.) geçirimli betonun gözeneklerine sürekli olarak girerek tıkanmaya neden olabilmektedir. Geçirgen betonun geçirimliliğinin azalması, kaplamanın hizmet ömrünün kısılmasına neden olmaktadır (Huang vd. 2021).

Bu çalışmada geçirimli betonun en önemli özelliklerinden olan boşluk oranı, birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı, geçirimlilik (permabilite) seviyelerinin agrega türü ve boyutları ile ne şekilde değişiklik gösterdiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışma ile üretilen geçirimli betonların belirli bir tıkanma simülasyonunda, karşılaştıkları sediment (kil ve kum) yüklemesi karşısında tıkanma performanslarının belirlenmesi ve karşılaştırılması da hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Geçirimli Beton

Geçirimli beton yapısında ince agrega bulunmayan veya çok az miktarda ince malzeme bulunan ve bu nedenle birbirine bağlı boşluklar içeren özel bir beton türüdür. Birbiri ile bağlantılı geniş boşluklar su ve havanın geçişine olanak sağlamaktadır (Zaetang vd. 2013).



Resim 2.1 Geçirimli beton (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2018).

Nüfus artışı ve artan kentleşmeyle birlikte yaşam alanlarımız geçirimsiz yüzey alanlarıyla kaplanmaktadır. Beton ve geçirimsiz kaplamanın su ve hava geçirgenliğinin olmaması nedeniyle yağmur suları yeraltına süzölememektedir ve bunun sonucunda geçirimsiz yüzeyde yüzeysel akış artmaktadır.

Ayrıca geçirimsiz yüzey nedeniyle toprağın hava vasıtası ile ısı ve nem alışverişi yapması mümkün olmamaktadır. Bu durum yaşam alanlarında sera ve sıcak toprak etkisini de

beraberinde getirmektedir. Aynı zamanda yağışlı günlerde yol yüzeyindeki su birikintileri araç ve yaya trafiğini olumsuz etkilemektedir (Nguyen vd. 2014).

Geçirimli betonlar yağmur suyu akışının yönetilmesi, yeraltı suyu döngüsünün sağlanması ve su kalitesinin iyileştirilmesi için en iyi yönetim uygulamalarından ve en önemli çevresel materyallerden biri olarak kabul edilmektedir (Yahia vd. 2014).

Geçirgen betonun tipik boşluk oranları %15 ile 35 arasındadır. Bu gözenekli yapısı ile infiltrasyon değerleri 0,001 ile 0,012 m/sn arasında değişen sonuçlar göstermektedir (Lederle vd. 2020).

Taze geçirimli betonun birim ağırlığı, geleneksel betondan %30 oranında daha azdır ve genellikle 1600-2000 kg/m³ arasında değerler almaktadır. Bu nedenle geçirimli beton hafif beton olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca geçirimli betonun basınç dayanımı 2.8 ile 28 MPa arasında değişiklik göstermektedir ve eğilme dayanımı ise 1 ile 4 MPa arasında değişmektedir (Bilgiç 2019).

Birçok çalışma, geçirgen betonun su/çimento oranı, agrega/çimento oranı, agrega boyutları, bağlayıcı malzeme türü veya uygulanan sıkıştırmanın geçirimli betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde etkisi olduğunu ortaya çıkarmıştır (Nguyen vd. 2014).

Agrega gradasyonu, tipik olarak tek boyutlu veya ikili kaba agrega karışımından oluşmaktadır ve geçirgen betonun özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İri agregalar 9 ile 19 mm arasında değişirken, ince agregalar (toplam agregaların ağırlıkça %10'undan azı) betonun mukavemetini arttırmak için eklenmektedir, ancak ince agregalar boşluk içeriğini azaltmaktadır (Yang vd. 2008).

2.2 Geçirimli Betonun Kullanım Alanları ve Uygulanma Şekli

Geçirimli betonların dayanımı normal betonlara göre daha düşük olduğundan, uygulama alanları yalnızca otoparklar, yol banketleri, caddeler ve yerel yollar gibi trafik sıklığına az olduğu alanlardır. Öte yandan geçirimli betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımları, gözenekliliğin yüksek olması ve ince agregası içermemesi nedeniyle sıradan betonlara göre daha düşüktür. Dolayısıyla bu betonun kullanım süresi tasarım ömründen daha azdır. Basınç dayanımı değerleri ise 2,8-28 MPa arasında değişiklik göstermektedir (Hesami vd. 2014).

Geçirimli betonun boşluklu yapısı yüksek korozyon riski nedeni ile herhangi bir çelik donatı kullanılmadan üretilmektedir. Geçirimli betonun bazı uygulamalarına ait örnekler aşağıdaki gibi verilebilir. Bunlar sırası ile otoparklar için geçirgen bir zemin oluşturmak, dış alanlardaki sert drenaj katmanlarını üretmek, zeminde biriken suyu önlemek için sera zeminleri inşa etmek, hafif veya daha iyi termal izolasyon özelliklerine sahip yapı duvar uygulamaları yapmak, daha iyi akustik emilim özelliklerine sahip elemanlar üretmektir. Ayrıca yol malzemesi, otoparklar için yüzey malzemesi, tenis kortları, hayvanat bahçesi alanları, hayvan ahırları, plaj yapıları gibi alanlarda da kullanılabilmektedir. Resim 2.2 ve 2.3'te uygulama örnekleri gösterilmiştir (Sonebi vd. 2016).



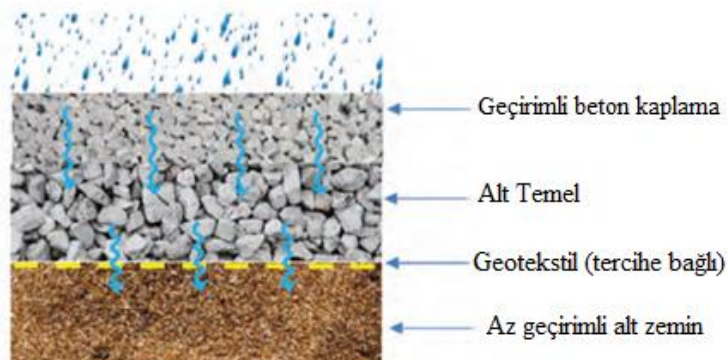
Resim 2.2 Geçirimli beton uygulanmış bir otopark alanı (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2018).



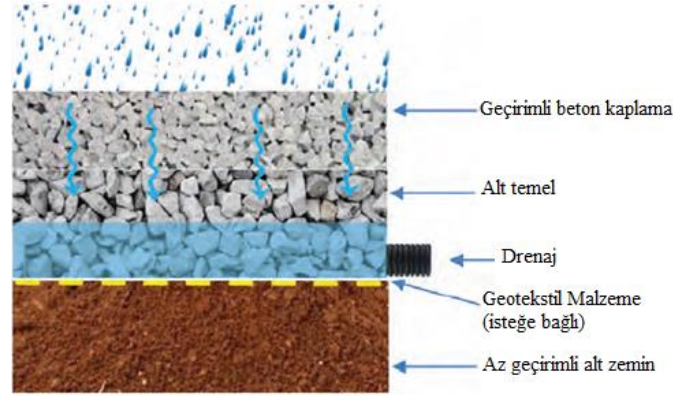
Resim 2.3 Geçirimli beton uygulanmış yürüyüş yolu ve kaldırım (Tennis vd. 2004).

Uygulamalar arasında iki katlı evlerin duvarları, yük taşıyan duvarlar (10 kata kadar yüksek binalar için), yüksek binaların doldurma panelleri de yer almaktadır. Ancak, bu sonuçları elde etmek için karışım tasarımı ve inşaat detayları dikkatlice planlanmalı ve uygulanmalıdır. (Tennis vd. 2004)

Geçirimli beton genellikle hafif trafikli alanlarda ve otoparklarda bir zemin kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Geçirimli betonun altındaki toprak tabakası önerilen uygulama için tasarlanmış yükü desteklemek amacı ile yeterli taşıma kapasitesine sahip olmalıdır. Genellikle alt temel malzemesi üzerine dökülür. Yağışın toprağa süzülmeden önce bir filtrasyon ortamı olarak hareket etmesi için alt zemin malzemesinin altına geotekstil malzemesi yerleştirilir (Sonebi vd. 2016). Geçirimli ve az geçirimli zeminlerde geçirimli betonun uygulanması Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Geçirimli alt zeminde geçirimli beton uygulaması (Bilgiç 2019).



Şekil 2.2 Az Geçirimli alt zeminde geçirimli beton uygulaması (Bilgiç 2019).

Geçirimli beton karışımında fazla su bulunmamaktadır. Taze geçirimli betonun bekletilmesi ile içeriğindeki malzemeler ayrışabilmekte ve döküm için gerekli kıvam kaybedilebilmektedir. Çimento hamurunun kuruması, beton zemin yüzeyinde dökülmelere yol açabilmektedir. Tüm yerleştirme operasyonları ve ekipmanlar, bu durum göz önünde bulundurularak tasarlanmalı ve seçilmelidir. Beton zemin hızlı bir şekilde yerleştirilmelidir. Geçirimli beton zemin, sabit veya kayar form döşeme makinesi ile yerleştirilebilir. Yüzey düzeltme, titreşimli veya manuel düzleme cihazlarıyla yapılabilmektedir. Silindirleme ile taze betonun çimento harcı ve agregalar arasında güçlü bir bağ ve daha düz bir sürüş yüzeyi oluşturulması için yapılan işlem Resim 2.4'te gösterilmiştir. Silindirleme sırasında aşırı basınçtan kaçınılmalıdır, aşırı basınç boşlukların kapanmasına neden olabilmektedir. Silindirleme, düzeltme işleminden hemen sonra yapılmalıdır. Yüzeydeki boşlukları tıkanmasına neden olabilecek olan mala ve mastar ile yüzey düzeltme işlemleri gerçekleştirilmemelidir (Obla 2010).



Resim 2.4 Geçirimli betonun silindirle sıkıştırma işlemi (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2018).

Tüm bu çalışmalar göz önüne alındığında geçirimli betonun uygulama alanları şu şekilde sıralanabilir.

- Düşük hacimli zeminler,
- Yol araları, ara sokaklar ve giriş yolları, yaya yolları ve patikalar,
- Otoparklar,
- Düşük su seviyesinin olduğu su geçişleri,
- Tenis kortları,
- Geleneksel beton zeminlerin alt tabakaları,
- Bahçe avlusu,
- Yapay resifler,
- Eğim stabilizasyonu,
- Kuyu kaplamaları,
- Yaya yollarındaki ağaç ızgaraları,
- Sera ve balık üretim tesisleri,
- Su eğlence merkezleri
- Hayvanat bahçeleri için temeller/zeminler,
- Yüzme havuzu güverte alanları, zemin kenarı drenajları,
- Rıhtımlar ve deniz duvarları, Hidrolik yapılar,
- Ses bariyerleri,
- Duvarlar(yük taşıyan dahil) (Tennis vd. 2004).

2.3 Geçirimli Betonun Avantajları

2.3.1 Su Yönetimi

Su en önemli küresel ve insani sorun olmakla beraber, optimum kontrol ve yönetim gerektirdiği açıktır. Kentsel alanlardaki yüzeysel su akışı kontrolü ve yönetimi hayati bir öneme sahiptir. Geçirimli yüzeyler, yüzeysel su akışının yönetimi için bir çözüm olarak önerilmektedir. Mevcut su potansiyelinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlarken, yüzey suyunun depolama, arıtma ve yeniden kullanım için alttaki katmanlara veya belirlenmiş bir kaynağa yönlendirilmesini sağlamaktadır (Adresi vd. 2023).

2.3.2 Yeraltı Su Şarjı

İklim değışikliğı ve küresel ısınma dünya çapında önemli sorunlardandır ve bunun sonucunda hem enerji hem de su için sürdürülebilir uygulamalar günümüzde öne çıkan konulardır. Geçirgen betonun genel işlevi, yeraltı suyunun beslenmesini arttırmak için yüzey akışını toplamak, arıtmak ve filtrelemektir. Kentsel yağmur suyu akışı ve geçirgen kaldırım gibi sürdürülebilir drenaj sistemleri, yağmur suyu yönetimi uygulamalarında önemli bir husus olmuştur. Akışın sürdürülebilir drenaj yönetimi, yağmur suyu akışının toplanmasını, depolanmasını, arıtılmasını ve yeniden kullanılmasını içeren yeşil bir yaklaşımdır. Geçirimli beton, kentsel, ticari ve endüstriyel alanlar için iyi bir yağmur suyu akış yönetimi çözümüdür (Imran vd. 2013).

2.3.3 Çevre Dostu İnşaat

Sürdürülebilir drenaj sistemleri ve su kalitesini sağlamak için geçirimli betonun işlevi ve bunların iyileştirilmesi üzerine önemli araştırmalar yapılmıştır (Imran vd. 2013). Geçirgen beton sisteminin yağmur suyu kirleticilerini yüzey akışından uzaklaştırıp uzaklaştıramayacağını değerlendirmek amacıyla yapılan çalışmalarda çeşitli kirletici konsantrasyonlarında anlamlı bir azalma olduğu belirlenmiştir (Pilon vd. 2019).

İnşaat atıklarının yeni beton üretimi için agrega kaynağı olarak kullanılması son yıllarda daha yaygın hale gelmiştir. Depolama sahalarının artan maliyeti ve agrega için doğal kaynakların kıtlığı, inşaat sahalarındaki atıkların agrega kaynağı olarak kullanılmasını teşvik etmektedir. İnşaat ve yıkım atıklarından geri dönüştürülmüş agrega, inşaattaki birincil (normal) agregalara bir alternatif olabilir. Yıkılmış beton binalardan elde edilen geri dönüştürülmüş agrega, betonun %75'ini oluşturabilir. Geri dönüştürülmüş agregayı kullanmanın en ekonomik yolu, %80'den fazla agrega kullanılan geçirimli beton olabilir (Bhutta vd. 2013).

2.3.4 Sel Kontrolü

Geleneksel drenaj sistemlerinde yağmur suyu, yakındaki su yollarına, kanalizasyonlara ve drenaj sistemlerine ulaşır. Geçirimli beton, yüzeysel akışı azaltan, yeraltı suyunun

yeniden şarjını, sızmasını ve ardından yağmur suyunun depolanmasını ve geri dönüştürülmesini artıran bir süreç ortaya çıkarmaktadır (Imran vd. 2013).

Geçirimli betonun yüksek geçirgenlik gerektiren spesifik uygulamalarda kullanılması oldukça caziptir. Ayrıca, ani sel baskını riskini azaltmak için trafiğin az olduğu yollarda, otoparklarda ve kaldırımlarda geçirimli yüzeylere artan bir ilgi vardır (Yahia vd. 2014).

2.3.5 Su Temizliği

Artan küresel kalkınma çevre kirliliğini önemli bir sorun haline getirmiştir. Suyun yeryüzündeki yaşam için önemli bir madde olması ve her canlının hayatta kalabilmek için tatlı suya ihtiyacı olması nedeniyle denizler, göller ve nehirler gibi su kaynaklarının kirlenmesi çok önemli ve üzerinde önemle durulan bir çevre sorunudur. Bu, su kalitesine ve ekosisteme zarar vermesi ve insan sağlığı üzerinde büyük olumsuz etki yaratması nedeniyle yıkıcı bir hidrolojik sorundur. Yağmursuyu akışı en önemli su kirleticilerini oluşturur. Böyle bir kaynağın kirletici maddeleri genellikle bakteri, nitrat, toplam nitrojen, toplam fosfor ve ağır metalleri içerir ancak bunlarla sınırlı değildir. Akıntı taşması, geleneksel geçirimsiz kaplamaların bir başka dezavantajıdır. Bu durum, özellikle sedimantasyon, su baskını ve erozyon şeklinde yüzey suyunu bozabilecek yakıt sızıntısı ve akan su çöpleri gibi akarsuların kirlenmesine neden olmaktadır. Bu olumsuzluklar, yeni su adsorpsiyonu ve filtreleme yöntemleri ve malzemeleriyle giderilebilir. Organik/inorganik kirletici maddeler ve ağır metaller gibi kirletici maddelerin yağmur suyundan uzaklaştırılması için “Suya Duyarlı Kentsel Tasarıma” dayalı çok sayıda çevre dostu, toksik olmayan ve basit yöntemler hâlihazırda mevcuttur. Geçirimli beton, yapısındaki filtrasyon özelliği sayesinde yağmur suyundaki potansiyel kirleticileri önemli ölçüde ortadan kaldırarak yağmur suyu kalitesini iyileştirme konusunda iyi bir performans geçmişine sahiptir (Imran vd. 2013).

2.3.6 Yerel Su Yönetimi Standartlarına Uygunluk

Geleceğin şehirleri olarak da adlandırılan Eko-kent şehircilik anlayışı özellikle gelişmiş ülkelerin hızlı bir şekilde hayata geçirdikleri bir şehirleşme stratejisidir. Eko-şehirler,

yeşil-şehirler veya sürdürülebilir şehirler olarak da adlandırılan şehircilik kavramı şehirlerin büyümesine olanak verirken su odaklı sürdürülebilir şehirlerin oluşturulmasına imkân sağlamaktadır. Eko-kent şehirleşme stratejisi su odaklı bir şehircilik anlayışı içinde “Düşük Etkili Gelişim” ve “En İyi Yönetim Uygulamaları” stratejileri ile geçirimli alanların yüzdesinin artırılması ile taşkınların ve kentsel yayılı kirliliğin engellenmesini hedef almaktadır (T.C. Kalkınma Bakanlığı 2018).

2.3.7 Estetik Çeşitlilik

Geçirimli beton, farklı renkler ve desenlerle tasarlanabilir, bu da estetik çeşitliliği artırır ve peyzaj düzenlemelerine uyum sağlar. Yapılan bir çalışmada Sultanbeyli Gölet Parkı için sürdürülebilir bir tasarım modeli oluşturulmuştur. Çalışma alanının doğal ve sosyo-kültürel peyzaj analizi yapılmış ve sürdürülebilir tasarım kriterleri ile oluşturulan örnek uygulamalar incelenerek mevcut tasarımla karşılaştırılmıştır. Getirilen öneriler kapsamında sürdürülebilir ilkeler doğrultusunda alan için yeni bir tasarım modeli oluşturulmuştur (Şenol ve Gürbey 2020). Yapılan peyzaj çalışmasında geçirimli betonun estetik yönleri de ele alınarak peyzaj alanında çeşitli kullanım önerilerinde bulunulmuştur.

2.3.8 Gürültü Azaltma

Yapılan çalışmalar ile geçirimli betonun aynı zamanda trafik gürültüsünü azaltmasındaki faydaları gösterilmiştir. Yapılan bir çalışmada geleneksel beton gürültü seviyesi 100 ila 110 dB arasında değişirken geçirgen betonun gürültü seviyesi 96 ila 98 dB arasında değişmektedir. Geçirimli beton kaplamasının ses emilimi, gözenekli tabakanın kalınlığı, agregaların boyutu, hava boşlukları veya gözeneklilik, birim uzunluk başına hava akış direnci ve kaplamanın kıvrımlılığı dahil olmak üzere çeşitli parametrelere bağlıdır. Saha testi sonuçları, geçirimli beton uygulanmasından sonra gürültünün 4-8 dB azaltılabileceğini göstermektedir (Xie vd. 2019).

2.4 Geçirimli Betonun Dezavantajları

2.4.1 Dayanıklılık Sorunları

Normal betonlar için önemli olduğu kadar geçirimli betonlarında basınç dayanımları önemlidir. Geçirimli betonların basınç dayanımını belirlemek üzere yapılan çalışmalarda genel olarak geleneksel betonlar için uygulanan yöntemler kullanılmıştır. Geçirimli betonların poroz yapısı nedeniyle dayanımları düşük çıkmaktadır (Yang ve Jiang 2003).

Geçirimli betonun basınç dayanımı 2.8 ile 28 MPa arasında değişiklik göstermektedir ve eğilme dayanımı 1 ile 4 MPa arasında değişmektedir (Bilgiç 2019). Daha dayanıklı ve daha sağlam geçirimli betonlar elde etmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Chen vd. (2019) polimer katkı ve ikame bağlayıcı malzeme ilavesi ile geçirimli betonlar üretmiş ve bu geçirimli betonlarla daha yüksek basınç dayanımı değerlerinin elde edilebileceğini tespit etmişlerdir. (poroziteye bağlı olarak 28 günlük değeri 32-46 MPa).

Yang ve Jiang (2003) küçük boyutlu agregası kullanımı, silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanarak geçirimli betonların dayanımının artabileceğini belirtmişlerdir.

2.4.2 Bakım Gereksinimi

Poroz ortamın geçirimliliğinde ortaya çıkan azalma tıkanma olarak ifade edilir. Tıkanma olayı genellikle fiziksel, kimyasal veya biyolojik bir süreçten meydana gelmektedir. Tıkanmanın yaklaşık %70'i çökeltme malzemelerinde bulunan askıdaki katılar tarafından, %15'i mikrobik büyüme tarafından, %10'u kimyasal reaksiyonlar tarafından ve geri kalan %5'i diğer nedenlerden kaynaklanmaktadır. Geçirgen beton, kir, ince kum ve toz gibi askıdaki partiküllerin yüksek konsantrasyonlarının kentsel yağmur suları ile taşınması dolayısıyla tıkanmaya meyillidir (Rama ve Shanthi 2018).

Geçirimli betonun bakımı için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Geçirgen beton yüzeylerine biriken partiküller, basınçlı yıkama ve vakum kullanılarak emilmekte ve yüzey ile

birbirine bağılı gözenekler açılmaya çalışılmaktadır. Son çalışmalar, temiz, düşük basınçlı su ile geçirimli zeminleri yıkandıktan sonra vakum uygulamanın etkili olduğunu göstermektedir. Eğer geçirimli beton yüzeyi, rutin vakum süpürme ile infiltrasyon hızını kalıcı olarak geri getiremeyecek şekilde tıkanıyorsa, daha yoğun bir bakım seviyesi gerekebilir. Vakumla başlayan ardından basınçlı yıkama, infiltrasyon hızının daha iyi iyileştirilmesini sağlayan bir yöntemdir. Basınçlı yıkama ile beraber vakumlama işleminin tıkanmayı temizlemede etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır (Rama ve Shanthi 2018).

2.4.3 Yüksek Maliyet

Geçirimli ve geleneksel kaplamalar arasında inşaatın ilk maliyetinin karşılaştırmalı analizini yapan az sayıda çalışma vardır. Bu çalışmalar da bildirildiği üzere kontrollü tasarım ve geçirimliliğin sürekliliğini sağlamak amacıyla yapılan uygulamalar nedeniyle geçirimli betonun başlangıç maliyetlerinin daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Geçirgen betonun genel maliyet avantajları, yaşam döngüsü maliyet analizi yapıldığında belirlenebilir. Ancak geniş çaplı testlerin, uzun vadeli performans verilerinin, inşaat ve bakım maliyet verilerinin eksikliği nedeniyle maliyet incelemesi zor olmaktadır (Chandrappa ve Biligiri 2016).

2.4.4 Zamanla Tıkanma Riski

Geçirgen beton kaplamaların yaygınlaşmasıyla birlikte araştırmacılar geçirgenliğin azalması sorununu fark etmeye başladılar. Bunun nedeni, geçirgen betonun gözeneklerine sürekli olarak giren ve tıkanmaya neden olabilen çok sayıda asılı parçacıktır (çamur, ince kum, moloz vb.). Geçirgen betonun geçirimliliğinin azalması, kaplamanın hizmet ömrünün kısılmasına neden olmaktadır. Örneğin, 5 yıl kullanıldıktan sonra %90'lık bir azalma fark edilmiştir (Huang vd. 2021).

2.4.5 Sıcaklık ve İklim Etkisi

Etkili gözenek yapısına sahip geçirimli betonun, suyun hareketi için yeterli boşluklara sahip olduğu ve dolayısıyla yeterli donma-çözülme direnci gösterdiği dikkate alınmalıdır.

Ancak birçok durumda araştırma sonuçlarına göre, geçirimli betonların sızma oranları % 40-50'ye kadar düşebilir. Sadece uygulamadan 2-3 yıl sonra bile yüzey bakım işlemi yapılmadığında, geçirimli betonlar ciddi şekilde tıkanmaktadır. Oluşan tıkanma ile donma ve çözülme hasarları için uygun koşullar oluşmaya başlayacaktır. Geçirimli betonun temel karakteristiği olan nispeten düşük bağlanma, agrega-hamur-agrega matrisinde hasar meydana geldiğinde gözenek yapısının sıradan betona göre çok daha hızlı bir biçimde bozulacağı belirlenmiştir (Wu vd. 2016).

2.4.6 Uygulama alanlarının sınırlı olması

Geçirimli betonların dayanımı normal betonlara göre daha düşük olduğundan, uygulama alanları yalnızca otoparklar, yol banketleri, caddeler ve yerel yollar gibi trafik sıklığının az olduğu alanlar olarak belirtilmektedir (Hesami vd. 2014).

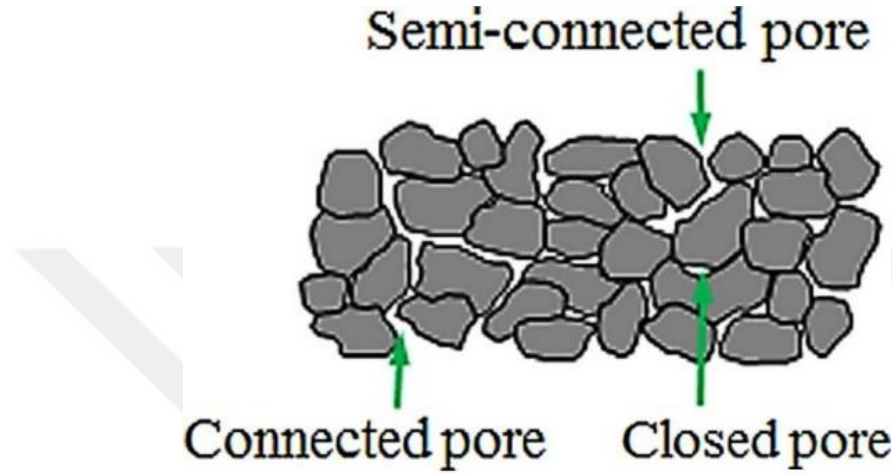
2.4.7 Uygulama Zorlukları

Geçirimli beton tasarımında hem hidrolik hem de yapısal açılardan düşünülmesi gereken önemli noktalar vardır. Geçirimli beton öğelerinin başarılı bir yapısal tasarımını oluşturarak performans gereksinimlerini karşılamalarını ve sürdürülebilir yağmur suyu yönetimi çözümleri sunmaları sağlanabilir. Geleneksel beton gibi, yerleştirme teknikleri özel işyeri koşullarına uyarlanmıştır. Geçirimli beton karışımlarının pompa ile taşınmaması, iş sahasına erişimin önemli bir planlama faktörü olduğunu unutmamak gerekmektedir. Hızlı sertleşme ve yüksek buharlaşma oranları nedeniyle sıkıştırma sürecinde gecikmeler sorunlara neden olabilmektedir. Genellikle, sıkıştırmanın yerleştirme işleminden sonraki 15 dakika içinde tamamlanması önerilmektedir. Geçirimli beton kaldırımlar, geleneksel beton kaldırımlar gibi aynı şekilde bitirilemez. Normal düzleme ve mastarlama işlemleri, boşlukların üst yüzeyini kapatma eğilimindedir (Tennis 2004).

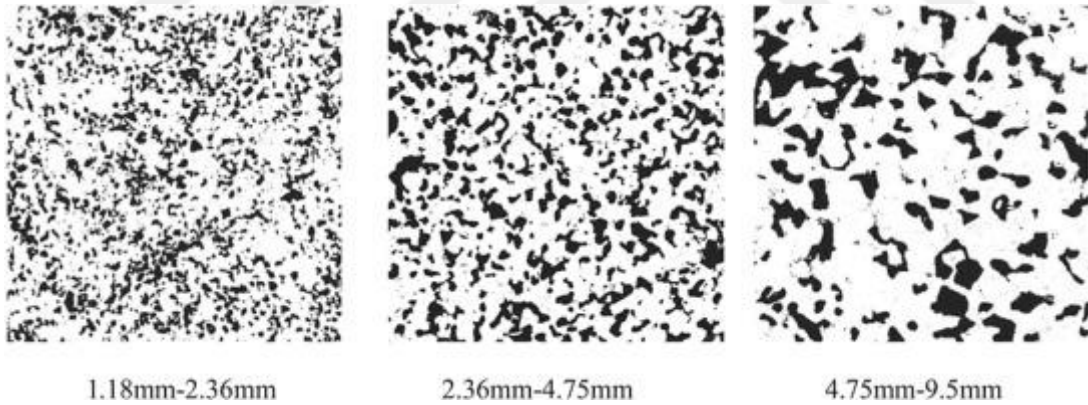
2.5 Geçirimli Betonda Boşluk Türleri

Gözenek bağlantısı açısından geçirimli betonda üç tip gözenek vardır. Bunlar açık veya bağlantılı gözenekler, yarı açık veya yarı bağlantılı gözenekler ve kapalı gözeneklerdir.

Bu kategoriler Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Kapalı ve yarı açık gözeneklerin miktarının, bağlantılı gözeneklerden önemli ölçüde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak, agrega yoğunluğu, boyutu ve tipi, çimentonun agregaya oranı ve kalıplama için kullanılan teknik gösterilebilir. Şekil 2.4 farklı agregaların boyutuna bağlı olarak gözenekli betonda bulunan gözeneklerdeki değişimi göstermektedir (Adresi vd. 2023).



Şekil 2.3 Geçirimli betondaki gözenek türleri (Adresi vd. 2023).



Şekil 2.4 Farklı agrega boyutlarının gözenek dağılımı (Adresi vd. 2023).

Tüm gözenekli alanların sıvı tutma konusunda etkili olmadığı ve “aktif olmayan gözeneklilik” olarak gruplandırılan sıvı akışına uygun olmadığı belirtilmektedir. Bazı gözenekli alanlar diğer boş alanlardan izole olup (kapatılabilir) sıvıyı iletmezler. Bu davranış, oldukça kompakt veya küçük kaba agregalı (4,75 mm) geçirgen betondan beklenmektedir. Çünkü daha küçük boşluklar, yüzey gerilimi etkileri ve kılcal etki nedeniyle sıkışan sıvıyı tutma yeteneğine sahiptir. Etkin gözeneklilik, "hızlı akış"

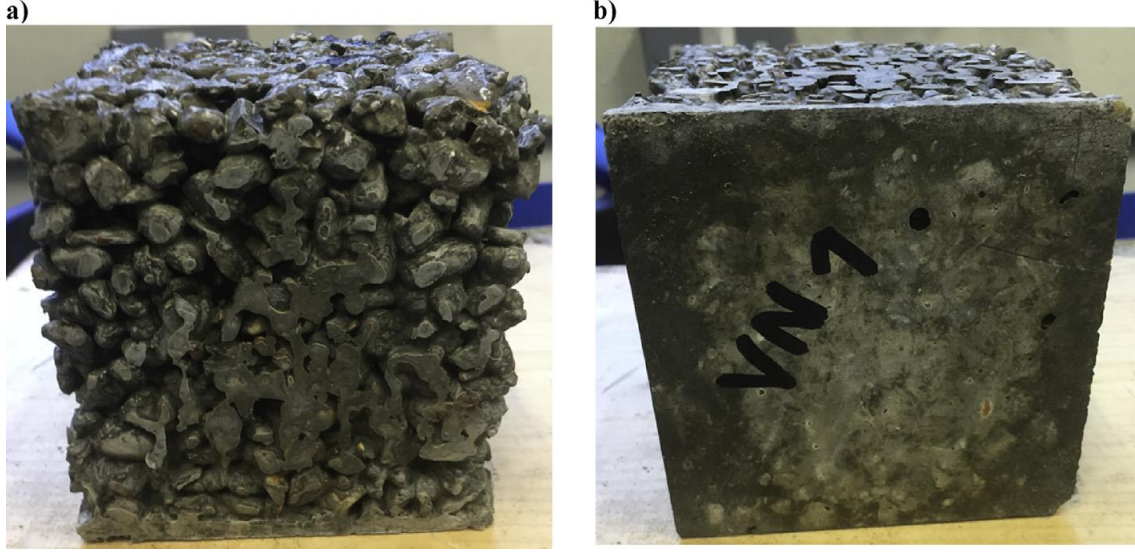
gözenekliliği olarak adlandırılır ve akışkanın geçirgen beton numunesinden hızlı bir şekilde akacağı veya boşalacağı toplam gözenekliliğin 30 dakika içinde süzülmesine izin verilen kısmı olarak açıklanmaktadır. Ancak bu yöntemin bilinmeyen yönlerinin yüksek olması nedeniyle değişkenliği fazladır. Geçirgen betonun boşluk sistemlerinin karakterizasyonunu açıklayan yukarıda özetlenen bilgilere rağmen, farklı geçirgen beton karışımlarının beton içindeki boşluk sistemlerini nasıl etkileyeceği konusunda hala belirsizlik vardır (Torres vd. 2015).

2.6 Geçirimli Betonda Tıkanma Türleri ve Oluşum Şekli

Geçirgen beton kaplamaların yaygınlaşmasıyla birlikte araştırmacılar geçirimliliğin azalması sorununu fark etmeye başlamışlardır. Bunun nedeni, geçirgen betonun gözeneklerine sürekli olarak girerek tıkanmaya neden olabilecek çok sayıda asılı parçacıklardır (çamur, ince kum, moloz vb.). Trafikten kaynaklı toz depolama, yakındaki bitki örtüsü ve rüzgârdan gelen toz da gözeneklerin tıkanmasına neden olabilmektedir. Geçirgen betonun geçirimliliğinin azalması, kaplamanın hizmet ömrünün kısılmasına neden olmaktadır. Örneğin, 5 yıl kullanıldıktan sonra geçirimlilik seviyesinde %90'lık bir azalma tespit edilmiş, bu durum geçirgen olmayan bir yüzeyin oluşmasına, yüzeysel akışın meydana gelmesine ve donma-çözünme sorunlarına neden olmaktadır (Huang vd. 2021).

Uygulama türüne bağlı olarak geçirimli betonda çoğunlukla uygulama sonrasında fiziksel tıkanma, biyolojik tıkanma ve kimyasal tıkanmadan oluşan üç (3) farklı tıkanma türü meydana gelmektedir. Yapılan bilimsel araştırmaların %70'inin fiziksel tıkanma üzerine olduğu gösterilmiştir (O. Ekolu vd. 2022).

Yukarıda belirtilen 3 tıkanma türünden farklı olarak bir diğer tıkanma türü Resim 2.5' te gösterildiği gibi geçirimli betonun tasarımı sırasında ortaya çıkmaktadır. İri agregayı saracak miktarda çimento harcının olması için geçirimli betonun tasarım aşamasında oldukça dikkatli olunmalıdır. Fazla miktardaki çimento hamuru iri agregalar arasından akarak numune altına toplanmakta ve boşlukların tıkanmasına sebep olmaktadır (Yavuz 2023).



Resim 2.5 Çimento harcının aşağı doğru akması ile tıkanmış (b) ve tıkanmamış (a) geçirimli beton (Kia vd. 2017, Yavuz 2023).

Bir diğer tıkanma olayı geçirimli betonun uygulanması aşamasında ortaya çıkmaktadır. Geçirimli betonun serilmesi sırasında silindirme aşamasında aşırı basınçtan kaçınılmalıdır. Aşırı basınç uygulanması boşlukların kapanmasına neden olabilmektedir. Silindirme, düzeltme işleminden hemen sonra yapılmalıdır. Yüzeydeki boşlukları tıkanmasına neden olabilecek olan mastarlama uygulamalarından kaçınmak gerekmektedir (Obla 2010).

2.7 Geçirimli Betonda Kullanılan Malzemeler

2.7.1 Agregalar

Geçirimli betonun ince agrega içeriği sınırlıdır. Aşırı miktarda ince agrega, gözenekleri tıkayabilir ve geçirgenliği azaltmaktadır. Kaba agrega kullanımı için dar bir gradasyon uygulamak gereklidir. Uygulanan gradasyon aralığı istenen gözeneklilik ve geçirgenliği elde etmek için önem arz etmektedir. Dar bir gradasyon, tane boyutlarının sınırlı bir aralıkta olması anlamına gelmektedir. Agrega boyutunun seçimi, geçirimli betonun yüzey dokusunu etkilemektedir. Daha büyük agregalarla üretilen geçirimli betonlarda daha pürüzlü bir yüzey oluşmaktadır. Bu nedenle park alanları ve yaya yolları gibi uygulamalarda genellikle estetik nedenlerle mümkün olan en küçük boyutlu agregaların kullanılması tercih edilmektedir. Doğal agregalar gibi yuvarlak ve oval hatlara sahip

agregalar daha düşük boşluk oluşumuna neden olmaktadır. Köşeli agregalar ise yerleştirme sırasında tek bir yöne doğru yöneleceklerinden aderansı ve temas yüzeyini etkilemektedirler. Yassı ve uzun agregaların kullanımından ise kaçınılması önerilmektedir (Tennis vd. 2004). Kesik köşeli şekle sahip ve büyük agrega boyutu sayesinde daha boşluklu ve geçirimli özelliklere sahip geçirimli beton üretilmesi sağlanabilmektedir (Nguyen vd. 2014).

Malaiskiene vd. (2017) 5 farklı oranda (%50, 70, 80, 90 ve 100) 8-16 mm boyutlarında iri agrega kullanarak ürettikleri geçirimli betonların permabilite miktarı, diğer fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma ile üretilen geçirimli betonlar içerisinde %70 oranında 8-16 mm'lik iri agrega içeren karışımın basınç dayanımı ve permabilite özellikleri bakımından optimum sonucu verdiğini belirtmişlerdir.

Kant Sahdeo vd. (2020) 20 mm, 12.5 mm, 10 mm ve 4.75 mm agrega elek aralıklarına sahip 4 farklı boyutta doğal iri agrega ile %5 ve %10 oranında nehir kumu kullanarak, su/çimento oranını 0.30, 0.35 ve 0.38 olacak şekilde geçirimli beton tasarımı yapmışlardır. Üretilen geçirimli betonlardan iri agregaların betonda daha yüksek porozite ve birbirleriyle bağlantılı boşluklar oluşturduğu, ince agrega kullanımının ise basınç dayanımında artış sağlamakla birlikte poroziteyi ve su geçirimliliğini azalttığını belirlemişlerdir.

Zhang vd. (2020) 2.36 - 4.75 mm, 4.75 - 9.5 mm, ve 9.5 - 13.2 mm tane aralığındaki bazalt agregalarıyla geçirimli beton üretmişlerdir. Her bir agrega gradasyonu için 0.22, 0.24 ve 0.26 değerlerinde çimento/agrega oranı ve tüm agrega boyut aralıkları için su/çimento oranı 0.30'da sabit tutularak geçirimli beton tasarımı yapılmıştır. Sonuç olarak tasarlanan geçirimli betonlara sabit ve düşen seviyeli permabilite test yöntemleri uygulanmış daha iri tane boyutuna sahip olan agrega miktarı arttıkça su geçirimliliğinde artış, daha ince agrega boyutları ile su geçirimliliği azalma olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yan vd. (2020) geçirimli beton tasarımında 4.75-31.5 mm tane aralığında geri dönüştürülmüş agrega 0.075-4.75 mm aralığında ince agrega kullanarak ürettikleri betonlara basınç, çekme dayanımı, donma direnci, kuruma büzülmesi, geçirimlilik deneyleri yapmışlardır. Geri dönüştürülmüş agrega oranı arttırıldıkça mekanik özellikler

de azalma, %30 oranında kullanılan geri dönüştürülmüş agreganın kullanımında en iyi donma direncini elde etmişlerdir.

2.7.2 Bağlayıcı Malzemeler

Geçirimli beton tasarımında bağlayıcı malzeme olarak çoğunlukla geleneksel portland çimentosu kullanılmaktadır. Geçirimli betonun mukavemetini ve geçirgenliğini değerlendirmek için çimento içeriğinde değişiklikler yapılarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Maguesvari vd. 2017).

Geçirimli beton tasarımında kullanılan çimento dozajı $110-330 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişiklik göstermektedir. Geçirimli beton üretiminde genellikle dar boyut gradasyonu aralığındaki kaba agreganın seçiminin yanı sıra hedeflenen özelliklere ulaşılması için çimento hamur hacmi önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Geçirimli betonun tasarımındaki en önemli kriterlerden birisi çimento hamurunun kaba agregayı sürekli biçimde sararak bağlaması ve böylece sürekli ve bağlantılı boşluk yapısının korunması sağlanmaktadır. Genellikle agreganın-çimento oranları, kütleli olarak 4 ile 6 arasında değişmektedir. Agreganın-çimento oranları, 1300 kg/m^3 ile 1800 kg/m^3 arasında agreganın kullanımını ortaya çıkarmaktadır. Laboratuvar çalışmalarında daha yüksek agreganın/çimento oranları kullanılmış olsa da, bu durum dayanımın önemli ölçüde azalmasıyla sonuçlanmaktadır. (Sonebi vd. 2016)

Torres vd. (2015) çimento harç hamuru miktarının dayanım ve hidrolik özelliklerine etkisini, sıkıştırma etkisi ile beraber incelemişlerdir. 9,54 ve 6,35 mm boyutlarındaki agregalar kullanarak ve üç farklı su/çimento oranına (0.33, 0.37, 0.41) sahip beton tasarımı ile her numunenin sıkıştırılmasının tutarlılık açısından kontrol edildiği laboratuvarında geçirimsiz betonlar üretmişlerdir. Sonuç olarak çimento hamuru arttırıldığında, basınç dayanımı artmakta ve boşluk oranı, porozite ve geçirimsizlik gibi hidrolik özelliklerinin ise azaldığı görülmüştür.

Geçirimli beton üretiminde geleneksel portland çimentosu yerine geopolimer bağlayıcı malzemelerin kullanılabileceğine dair çalışmalarda yapılmıştır. Chi Fu vd. (2014) yaptıkları bir çalışmada geçirimsiz betonun mukavemetini su-çimento (w/c) oranını

azaltarak ve silis dumanı gibi puzolanik malzemeler ekleyerek bağlayıcı özelliklerinin artırılması ile geliştirilebileceğini göstermişlerdir.

Pachideh vd. (2020) geçirimli betonda farklı puzolan malzemelerin etkisini araştırmak amacı ile zeolit, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufundan oluşan bağlayıcı malzemeler ile geçirimli betonlar üretmişlerdir. Tasarım kriterleri olarak; 19 mm olan çakıl taşı agregası kullanılmış, w/c oranları 0.35 ile 0.45 arasında değişecek şekilde geçirimli beton numuneler üretmişler ve mineral katkıları çimento ile %10 ve %20 oranlarında ağırlıkça ikame etmişlerdir. Sonuç olarak silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun basınç dayanımını, çekme dayanımını arttırdığı ve zeolit, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun geçirimliliği iyileştirdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Lo vd. (2021) çimento ile beraber pirinç çeltiği ve kömür külünün kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada kömür külü, taban külü ve pirinç çeltiği külü olmak üzere üç farklı kül ve 5-10 mm tane aralığına sahip agrega kullanmışlardır. Çimento ile beraber kullanılacak olan malzemelere çeşitli yöntemlerle puzolanik özellik kazandırılmış ve hacimce %30 oranında çimento ile beraber kullanarak geçirimli betonlar üretmişlerdir. Basınç dayanımları, boşluk oranları, porozite ve su geçirimlilik özelliklerini incelemişlerdir.

2.7.3 Su

Geçirimli betonda kullanılan suyun kalitesi ve özellikleri geleneksel beton ile aynıdır. Temiz, içilebilir kalitede su kullanılmalıdır. Kullanılan su kalitesi betonun priz süresini, dayanım kazanma hızını ve donatının korozyona karşı korunmasını etkilemektedir (TS EN 1008 2003). Geçirimli betonda kullanılması gereken optimum su içeriği, genellikle agrega gradasyonu ve fiziksel özellikleri ile birlikte çimento içeriği ve tipine bağlıdır. Tipik olarak 0.27 ile 0.43 arasında değişen su/bağlayıcı oranları ile üretim yapılmaktadır. Geçirimli betonun işlenebilirliğini arttırmak için su azaltıcı katkı maddelerinin kullanılması ile istenen işlenebilirlik seviyesi elde edilebilmektedir. İşlenebilirlik, taze beton karışımından bir avuç dolusu örneği sıkıştırıldığında ve bırakıldığında, dağılmadan ve boşluklu yapının korunduğu bir karışım elde edildiğinde istenen kıvam elde edilmiş olmaktadır (Sonebi vd. 2016).

Ancak puzolonik malzeme olarak silis dumanı, yüksek fırın cürüfu ve uçucu kül gibi mineral katkıların kullanılması durumunda genellikle su doğrudan kullanılmamaktadır. Geopolimer beton, alümino-silikatların alkali aktivasyonu ile üretilir ve yarı kristal bir yapıya sahiptir. Bağlayıcı malzemelerin NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri ile reaksiyonu sonucu beton üretimi gerçekleştirilmektedir (Rasheedabdulmjeed 2022).

2.7.4 Kimyasal Katkılar

Kimyasal katkılar taze veya sertleşmiş betonun bazı özelliklerini değiştirmek üzere, karıştırma işlemi esnasında betona, çimento kütlesine oranla az miktarlarda ilâve edilen malzeme olarak tanımlanmaktadır (TS EN 206, 2002).

Geçirimli beton sıfır çökme seviyesi ile katı bir kıvama sahiptir ve bu nedenle istenen mekanik performansı elde edebilmek için sıkıştırma önem arz etmektedir. Ancak bu sırada gözenekli yapının (boşluk hacmi) geçirimsizliğinin kaybedilmemesi gerekmektedir (Sonebi vd. 2016).

Beton karışımında uygun boşluklu yapının oluşması için akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici (özellikle donma-çözülme riski olan yerlerde) veya hidratasyon düzenleyici kimyasal katkıları kullanılabilmektedir. Özellikle az miktarda kullanılan çimento hamurunun yeterli akıcılıkta olması, aynı zamanda ayrışma olmayacak viskozitede olması için uygun kimyasal katkıların seçilmesi önemlidir. Akışkanlaştırıcı katkı kullanılacaksa agreganın yüzeyindeki çimento hamurunun akmaması sağlanmalıdır. Bu nedenle polikarboksilat esaslı katkıları kullanılırsa bu hususa özellikle dikkat edilmesi gereklidir. Geçirimli betonun uygulama anında işlenebilirliğinin kontrolü için hidratasyon düzenleyici katkıların da kullanılması önerilmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2018).

Bonecille vd. (2015) geçirimsiz betonun genel performansını iyileştirmek ve işlenebilirliği geliştirmek için geçirimsiz beton üretiminde “Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkı”, “Hava Sürükleyici Katkı” ve “Viskozite Düzenleyici Katkı” maddelerinin tümünü bir arada kullanarak geçirimsiz beton üretmişlerdir. 0.3 su/bağlayıcı oranı ile kimyasal katkıları kullanarak ve kullanmadan, kütlece %18 oranında ince agrega 2,36 – 4,75 mm arasında ince taneli agrega içeriğine sahip beton üretilerek kimyasal katkı maddelerinin etkisini

incelemişlerdir. Sonuç olarak katkısız karışımın kuru kıvamda olduğu ve işlenebilirlik seviyesinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Katkı içeren karışımında ise çimento hamurunun agregaları daha iyi sardığı ve karışımı toplayıcı bir etkiye bulunduğunu belirlemişlerdir.

K.Chandrappa ve Prapoorna Biligiri (2016) yaptıkları bir çalışmada maksimum tane çapı 6.7, 9.5, 13.2 ve 19 mm olan dört boyutta kaba agrega içeren, bağlayıcı madde olarak standart portlant çimentosu kullanarak geçirimli betonlar üretmişlerdir. Geçirimli taze beton karışımının işlenebilirliğini arttırmak için, ticari olarak temin edilebilen ligno-sülfat bazlı akışkanlaştırıcı katkı, çimento ağırlığının %0,2'si oranında kullanılmıştır.

2.8 Geçirimli Beton Tasarımı

Geçirimli beton tasarım yaklaşımı yapılırken, dar gradasyona sahip gruplandırılmış iri agreganın seçimi ile beraber hedeflenen özelliklere ulaşıncaya kadar hamur hacminin değiştirilmesi şeklinde yapılabilir. Geçirimli beton için kullanılması gereken optimum su içeriği, öncelikle agreganın gradasyonuna ve fiziksel özellikleri ile çimento malzemelerinin türü ve çimento miktarına bağlıdır. Su/çimento oranları genellikle 0.27 ile 0.43 arasında değişmektedir. Bazı durumlarda su azaltıcı katkı maddeleri kullanılarak istenen işlenebilirliğe ulaşmak mümkün olmaktadır. İşlenebilirlik, karışımın bir avuç dolusu örneğinin sıkıldığında ve bırakıldığında dağılmayan ve boşluklu yapının kaybedilmediği bir karışım uygun tasarımının elde edildiğini göstermektedir. Geçirimli betonun başarılı bir karışım tasarımı, geçirgenlik, dayanıklılık ve mukavemet açısından en iyi performansı sağlamak için malzemelerin dengeli bir karışım hesabı ile bir araya gelmesi gerekmektedir. Geçirimli beton tasarımındaki en önemli koşul, iri agreganın çimento hamurunun içinde gömülmesi yani hamurun agrega yüzeylerini tamamen sarması ve bu sürecin sürekliliğini korumasıdır, böylelikle bağlantılı boşluk yapısı korunabilmektedir. Genellikle, agrega-çimento oranları, kütle bazında 4 ile 6 arasında değişir. Agreg-a-çimento oranları, 1300 kg/m³ ile 1800 kg/m³ arasında değişmektedir. Laboratuvar çalışmalarında daha yüksek agrega-çimento oranları kullanılmış olsa da, bu durum mukavemetin önemli ölçüde azalmasıyla sonuçlanır (Sonebi vd. 2016).

Çizelge 2.1 Geçirgen betonun tipik bileşenleri ve bunların oranları ile geçirgen betonun temel mekanik ve fiziksel özellikleri (Al Shareedah ve Nassiri 2021).

Malzeme	Tipik Aralık
Çimento içeriği (kg/m^3)	280–310
İri agregası içeriği (kg/m^3)	1.440–1.800
İnce agregası içeriği (isteğe bağlı) (kg/m^3)	85–205
Su/çimento oranı (W/C)	0,26–0,45
Agrega: kütlece çimento oranı (A/C)	4:1–4,5:1
İri agregası boyutu (mm)	2.38–19
Sertleştirilmiş gözeneklilik (%)	15–35
Basınç dayanımı (MPa)	2.8–28
Geçirgenlik (cm/s)	0,14–1,22

2.9 Geçirimli Beton ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Yahia ve Daddy Kabagire (2014) yaptıkları bir çalışmada agregası boyutu ve gradasyonun yanı sıra çimento hamuru hacminin geçirimli betonun birim ağırlık, basınç ve gerilme dayanımı, gözeneklilik ve geçirimlilik üzerine etkilerini belirlemişlerdir. 3 farklı agregası boyutu kullanılarak 0.30 sabit su-çimento oranı ile geçirimli beton tasarlamışlardır. Çimento hamuru/boşluk oranı artışının dayanımı ve yoğunluğu arttırdığı ancak geçirimlilik ve geçirgenliği azalttığını gösterilmiştir. Genel olarak sıkıştırmanın artırılması ile basınç dayanımının arttığını ve geçirgenliğin azaldığını göstermişlerdir. Ayrıca ince malzemenin ise geçirimli betonun dayanım gelişimini olumlu yönde arttırdığını göstermişlerdir.

Hung vd. (2021) çeşitli agregası boyutları kullanılarak üç karışım oranı önermiş ve her oran için üç silindir geçirimli beton üretmişlerdir. Silindir numunelerin gözenek yapılarını, sıkıştırma, geçirimlilik deneyi, su altındaki numunelerin ağırlığının ölçülmesi ve bilgisayarlı tomografi görüntüsünü değerlendirmişlerdir. Deneyler mukavemet ve geçirgenlik açısından 5-10 mm agregası için %50, 2-5 mm agregası için %45, kum için %5 oranında karıştırmanın optimum olduğunu göstermiştir. Ayrıca ince agregası oranı arttıkça gözeneklilik ve geçirgenlik azalmıştır.

Sahdeo vd. (2021) yaptıkları bir çalışmada dört farklı sıkıştırma türü ve kuvveti uygulanarak sıkıştırılan kaba agregaların ($> 4,75$ mm) kombinasyonlarını kullanmışlardır. Hazırlanan silindirik şekilli geçirimli beton numunelerini incelemişlerdir. Geçirgen betonun kabul edilebilir sınırlar dahilinde gözeneklilik sağlayan sıkıştırma enerjilerinin eşik değerlerini belirlemek için sekiz farklı geçirimli beton karışımının sıkıştırma özelliklerini incelenmiştir. Ayrıca, geçirimli beton karışımlarının yapısal kapasitesi ve aşınma kayıpları, iki farklı dereceli karışım için incelemişlerdir. Geçirimli beton karışımlarının yapısal kapasitesi, büyük oranda agrega boyutuna, su/çimento oranına, agrega gradasyonuna ve sıkıştırma miktarına bağlı olan basınç dayanımı testiyle belirlenmiştir. Üretilen geçirimli betonların fonksiyonel özellikleri, esas olarak sıkıştırma enerjisi ve agrega/çimento oranından etkilenen aşınma direnci kullanılarak belirlenmiştir. Düşük sıkıştırma enerjisi ve yüksek agrega-çimento oranının, daha düşük aşınma direncine yol açtığı belirlenmiştir.

Yap vd. (2018) geri dönüştürülmüş agregaların potansiyel kullanım alanlarını genişletmeyi amaçlayan çalışmalarında; normal granit agregası ve geri dönüştürülmüş agregaların karışımıyla yapılan geçirimli betonların mekanik ve yüzey özellikleri, geçirgenliği ve sera gazı değerlendirmesini araştırılmışlardır. Çalışmada %20, %40, %60, %80 ve %100'lük geri dönüştürülmüş agrega oranları kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar geri dönüştürülmüş agregaların karışımlarının daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Mikroskobik analizler, geri dönüştürülmüş agrega karışımlarının daha düşük mukavemetli olmasının nedeni olarak, geri dönüştürülmüş agregaların üzerine daha zayıf yapışan harçlar olduğunu göstermiştir. Mukavemetteki düşüşe rağmen tüm geri dönüşüm agrega karışımları ile üretilen geçirimli betonlar, kayma ve aşınma direnci açısından minimum gereklilikleri karşılamıştır.

Qin vd. (2015) yaptıkları bir çalışmada geçirimli betonun su geçirgenliğini test etmek için sırasıyla düşen seviyeli permabilite test yöntemi ve sabit seviyeli permabilite test yöntemlerini beton numuneleri üzerinde farklı su yükseklikleri kullanılarak uygulamışlardır. Sonuçta, uygulanan su yüksekliğiyle birlikte geçirgen betonun görünür geçirgenliğinin azaldığını göstermişlerdir. Sonuçlar aynı zamanda düşen seviyeli permeabilite testinde ölçülen geçirgenliğin sabit seviyeli permeabilite testinden ölçülen

geçirgenlikten daha düşük olduğunu göstermiştir. Test sonuçları, geçirgen betonun su geçirgenliğinin uygulanan basınç ve test yöntemiyle birlikte raporlanması gerektiğini göstermiştir.

Huang vd. (2021) yaptıkları bir çalışmada geçirimli betonun hem gözenek boyutu dağılımlarını, hem de geçirgenliğinin azalmasını laboratuvar testleri ile incelemişlerdir. Geçirgenlik azalmasının derecesi, değişen agrega boyutları ve numune kalınlıklarına sahip 21 seri geçirgen beton karışımı için penetrasyon testi tasarlanarak ele alınmıştır. Gözenek boyutu dağılımları, bilgisayarlı tomografi tarafından taranan iki boyutlu dilimlenmiş görüntüyle belirlenmiştir. Geçirgen betonun karakteristik gözenek boyutunu temsil eden bir yaklaşım önerilmiş ve doğrulanmıştır. Elde ettikleri sonuçlar şu şekildedir; beton kalınlığının geçirgenlik üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydeyken, tıkanma davranışı üzerindeki etkisi önemlidir. Tıkayan kum boyutları ile karakteristik gözenek boyutu arasındaki oran, tıkanma davranışını etkileyen önemli bir parametredir ve tıkanmayı önleme performansını tahmin etmek için kullanılabilir.

Sandoval vd. (2020) yaptıkları bir çalışmada, laboratuvar ve saha koşullarında geçirimli betonun tıkanma mekanizmasını tanımlamayı ve karakterize etmeyi amaçlamışlardır. Bu anlamda, bir geçirimli beton karışımı ve üç tip tıkayıcı malzeme (kum, kil ve her ikisinin karışımını) kullanmışlardır. Tıkanmayı tetiklemek ve geçirgenlik azalmasını tahmin etmek için iki tür geçirgenlik testi uygulamışlardır. Bu testler sabit seviyeli permeabilite testi (laboratuvar) ve ASTM C1701 (saha) testleridir. Son olarak, farklı tıkanma oranları (düşük, orta ve yüksek) dikkate alınmıştır. Tortuların türü göz önüne alındığında, ne kadar ince olursa tıkanma olayı üzerindeki etkisinin de o kadar yüksek olduğu ve %95'ten daha fazla maksimum geçirgenlik azalması belirlemişlerdir. Bununla beraber tıkanmayı açıklamaya yönelik analitik bir model önermişlerdir. Bu model ile çökeltinin türü ve konsantrasyonu dikkate alınarak geçirgenliğin azalmasını etkili bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Bu model, elde edilen deneysel verilerle önerilmiş ve diğer araştırmalardan elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır.

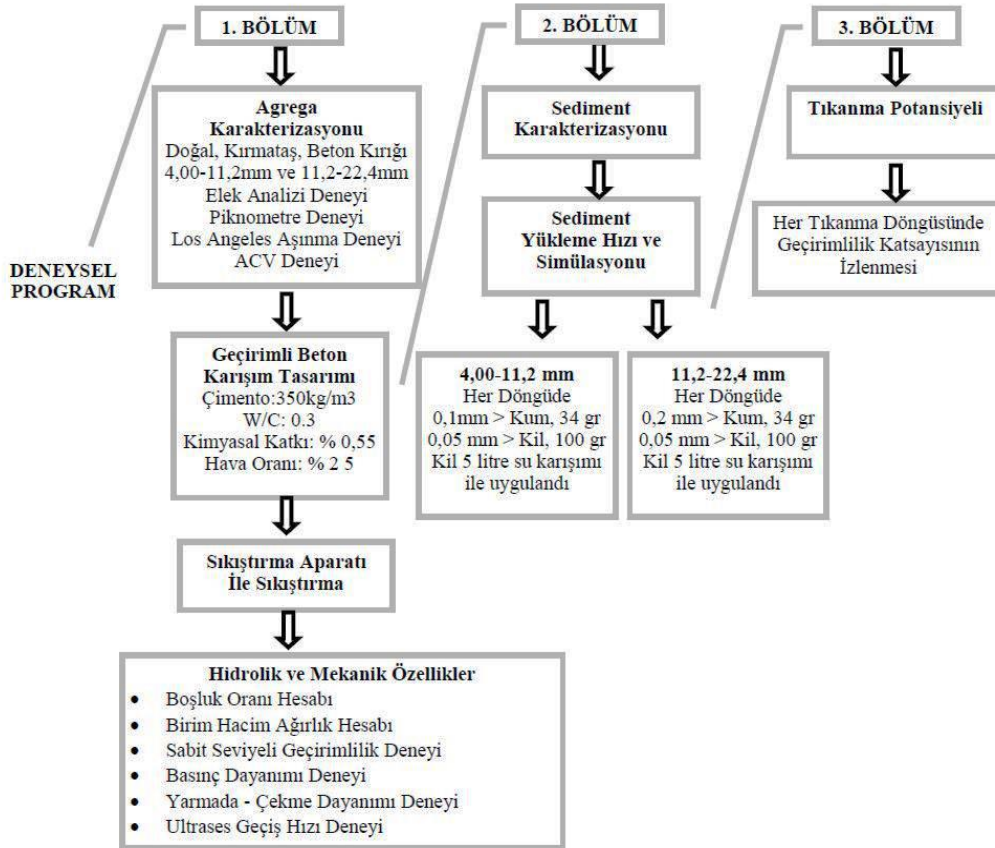
Barısic vd. (2020) yaptıkları bir çalışmada, tıkanmanın geçirimli betonun drenaj özellikleri üzerindeki etkisini ve değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Tıkanma etkisi, ASTM C1701-09 test yöntemine göre geçirgen beton numunelerinin tıkanmadan önce ve

sonraki drenaj özelliklerinin ölçülmesiyle incelenmiştir. Daha küçük agrega boyutları ile hazırlanan geçirimli betonun tıkanmaya daha yatkın olduğu sonucuna varılmıştır.

Sandoval vd. (2020) yaptıkları bir çalışmada geçirimli betonun geçirgenliğini geri kazanmak için daha etkili temizleme yöntemlerini değerlendirmeyi ve geçirgenliği başlangıç seviyesine yakın seviyede tutmak için bir temizleme periyodu önermeyi amaçlamışlardır. Gözenekliliği yüksek olan geçirimli beton, çökeltinin türüne bağlı olarak malzemenin geçirgenliğini neredeyse %100 oranında azaltabilecek tıkanmaya maruz kalmaktadır. Çalışmanın amacına ulaşması için geçirimli betonun maksimum 1,27 g/cm² konsantrasyona sahip üç tip çökelti ile bir tıkanma simüle edilmiştir. Geçirimli betonun geçirgenlik geri kazanımı, her bir tortu türü için en verimli yöntemi belirlemek amacıyla üç basit yöntem kullanılmıştır. Bunlar yüzey temizleme, hava temizleme ve su temizleme yöntemleridir. Ayrıca, birincisi yüksek periyodlara sahip ve ikincisi orta periyodlara sahip iki farklı senaryoyu toprak erozyonu mekaniği analizi uygulayarak simüle edilmiştir. Yapılan simülasyon, temizleme periyodunu belirlemeğe yardımcı olmuştur. Elde edilen sonuçlar, çökeltilerin çoğunlukla ilk santimetrede ve orta derinlikte çökeldiğinin görselleştirilmesine olanak tanıyan 3 boyutlu mikrotomografi ile desteklenmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında portland çimentosu, su, hiper akışkanlaştırıcı katkı ve 3 farklı tür agrega kullanılmıştır. Kullanılan her agrega türü için 2 farklı gradasyon (4,00-11,2 mm ve 11,2-22,4 mm) hazırlanmıştır. Böylece toplam 6 farklı geçirimli beton serisi üretilmiştir. Kullanılan agregaların mekanik ve fiziksel özelliklerinin tespitine yönelik; piknometre, elek analizi, Los Angeles aşınma, Aggregate Crushing Value (ACV) deneyleri yapılmıştır. Agrega deneyleri sonrasında beton tasarımı yapılarak, üretilen geçirimli betonların toplam boşluk oranı, birim hacim ağırlık, sabit seviyeli geçirimlilik, basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca geçirimli beton numuneleri kum ve kil ile tıkanmaya maruz bırakılmış ve numunelerin tıkanma potansiyelleri belirlenmiştir. Kullanılan malzemeler ve yapılan deneyler hakkında ayrıntılı bilgiler bu bölümde verilmiştir. Şekil 3.1’de deneysel programa ait akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Deneysel program akış diyagramı

3.1 Kullanılan Malzemeler

Geçirimli beton üretimlerinde kullanılan çimento, agrega, su ve hiper akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

3.1.1 Çimento

Geçirimli Beton üretimlerinde ÇİMSA Afyon Çimento Fabrikası'nın üretmiş olduğu TS EN 197-1 (2012)'e uygun CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Beton üretimlerinde kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerine ait sonuçlar Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşim, %		CEM I 42.5 R
Kimyasal Özellikler (XRF analizi)	SiO ₂	19.01
	Al ₂ O ₃	4.61
	Fe ₂ O ₃	3.49
	CaO	64.28
	MgO	1.69
	Eşdeğer Alkali (Na eşdeğeri)	0.87
	SO ₃	2.94
	Cl ⁻	0.0128
	Kızdırma kaybı	3.10
	Çözünmeyen Kalıntı	0.31
Fiziksel Özellikler	Özgül ağırlık	3.12
	Özgül yüzey, cm ² /gr	3875
	Priz Başlama Süresi, dk	177
	Priz Sona Erme Süresi, dk	260
	Hacim Genleşmesi, mm	0.8
Mekanik Özellikler	Basınç Dayanımı, MPa (2 Günlük)	34.5
	Basınç Dayanımı, MPa (7 Günlük)	47.4
	Basınç Dayanımı, MPa (28 Günlük)	56.0

3.1.2 Agregalar

Beton üretimlerinde doğal agrega (dere agregası), kırmataş agrega ve geri dönüştürülmüş beton agregası olmak üzere 3 farklı türde ve her bir tür için 4,00 - 11,2 mm ve 11,2 - 22,4 mm elek aralığında agrega kullanılmıştır.

3.1.2.1 Doğal Agregalar

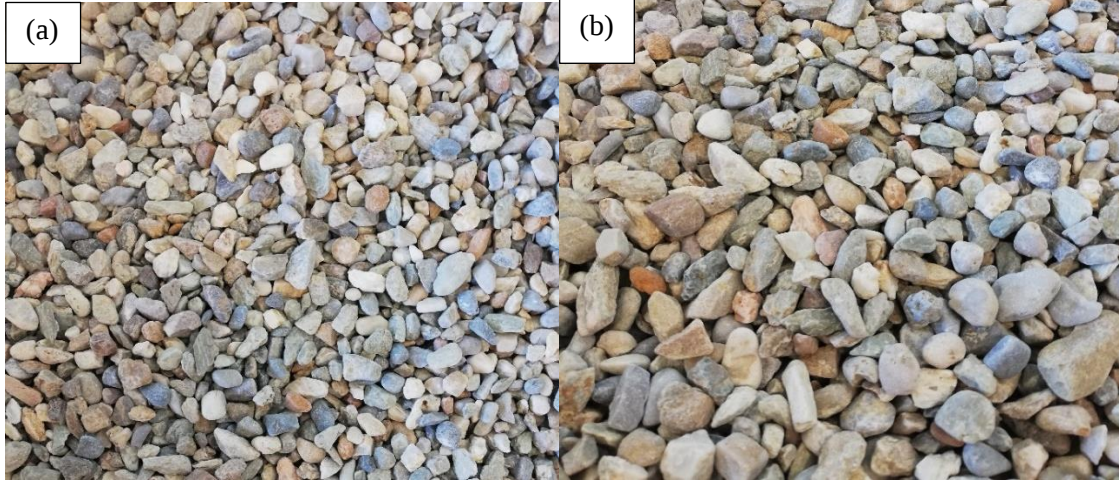
Doğal agregalar Afyonkarahisar ili, Sinanpaşa ilçesi, Çayhisar köyü mücavirinde yer alan dombeyli kaynağı olarak bilinen çay üzerinde faaliyet gösteren bir firmadan temin edilmiştir. Taş ocağına ait görüntüler Resim 3.1’de gösterilmiştir.

Kum ocağından 3,00 -7,00 mm, 7,00 -15,00 mm ve 15,00 - 30,00 mm olmak üzere 3 farklı gradasyonda doğal agregalar temin edilmiştir. Bu agregalar uygun elekler kullanılarak 4,00 -11,2 mm ve 11,2-22,4 mm elek aralığına getirilmiştir. Resim 3.2’de her iki elek aralığına ait agregalar gösterilmiştir.

Doğal agregalar oval köşe hatlarına sahip, yuvarlak/küresel şekil yapısında taneler içermektedir. 4,00-11,2 mm elek aralığındaki agregalar kısmen büyük kayalardan kırılarak oluştuğundan, 11,2-22,4 mm elek aralığındaki agregalar daha oval şekil yapısına sahiptirler. Çalışmada doğal agrega kullanılmasının amacı, doğal agreganın şekil özelliklerinin diğer agrega türlerine göre oval hatlar içermesi ve yuvarlak tane şekil yapısına sahip olmasının geçirimli beton üzerindeki etkisini incelemektir.



Resim 3.1 Doğal agregaların taşındığı dere yatağı (İnt. Kyn. 1).

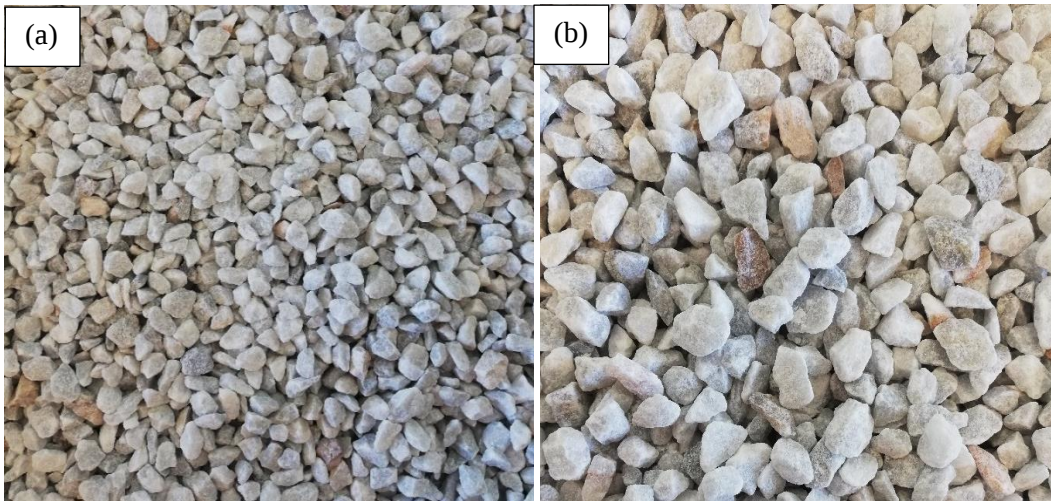


Resim 3.2 4,00 – 11,2 mm (a), 11,2-22,4 mm (b) elek aralığında doğal agregalar.

3.1.2.2 Kırmataş Agregalar

Afyonkarahisar ilinde faaliyet gösteren Kahvecioğlu Grup Hazır Beton ve Ürünleri firmasının taş ocaklarından elde edilen kırmataş agregaları kullanılmıştır. Tesis bünyesinde 4,00-11,2 mm ve 11,2-22,4 mm aralıklarında hazır halde istif alanından kırmataş agregaları temin edilmiştir. Resim 3.3’te her iki elek aralığına ait agregalar gösterilmiştir.

Kullanılan kırmataş agregalar kesik köşeli, çoğunlukla benzer kırılma hatları olan uniform yapılara sahiptirler.

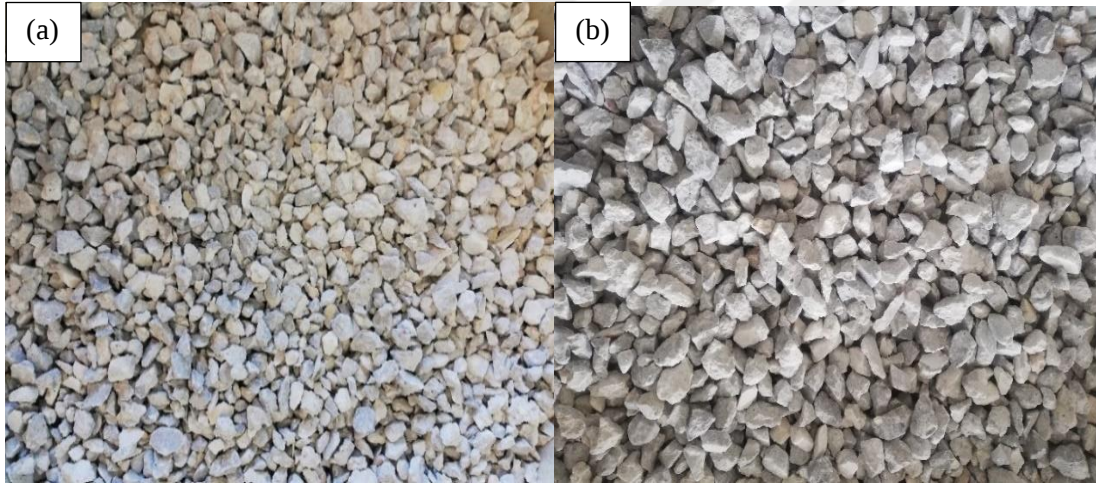


Resim 3.3 4,00–1,2 mm (a), 11,2-22,4 mm (b) elek aralığında kırmataş agregalar

3.1.2.3 Beton Kırığı Agregalar

Beton kırığı agregaları Afyon Kocatepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı laboratuvarlarında üretilen, beton numune atıklarının çeneli kırıcı marifeti ile kırılması ile üretilmiştir. Elde edilen beton kırığı agregalar uygun elek aralıklarına sahip elekler ile elenerek boyutları 4,00 -11,2 mm ve 11,2 - 22,4 mm aralığında ve diğer agrega türleri ile yakın gradasyonda olacak şekilde iki boyut aralığına getirilmiştir. Resim 3.4’de her iki elek aralığına ait agregalar gösterilmektedir.

Kullanılan beton kırığı agregalar kesik köşeli ancak kırılma şekil ve yönleri kendi arasında farklılık gösteren/ üniform olmayan, kırmataş agregasına nazaran daha fazla kesik hat ve şekil farklılığı içerdiği görülmüştür.

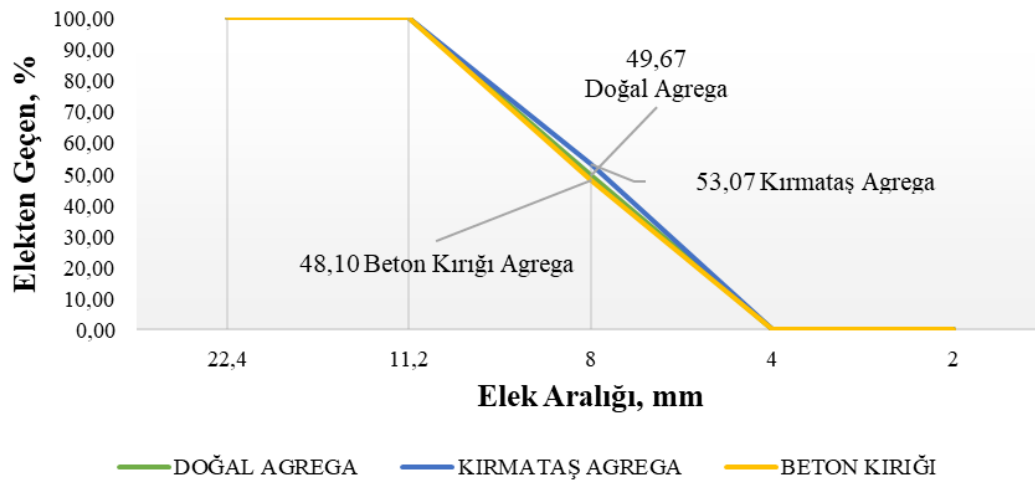


Resim 3.4 4,00 – 11,2 mm (a), 11,2-22,4 mm (b) elek aralığında beton kırığı agregalar

Geçirimli beton üretimlerinde kullanılan doğal agrega, kırmataş agrega ve beton kırığı agregalarına ait fiziksel ve mekanik özellik deney sonuçları ve elek analizi sonuçları Çizelge 3.2 ve 3.3’te gösterilmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de beton üretimlerinde kullanılan agregalara ait granülometri eğrileri verilmiştir.

Çizelge 3.2 4,00 – 11,2 mm boyutlarındaki agregaların granülometrik analizi, fiziksel ve mekanik özellikleri

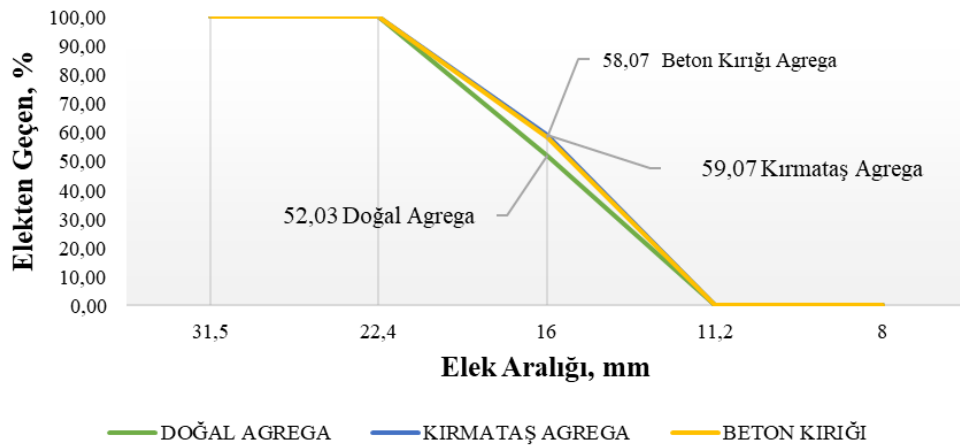
Elek boyutları (mm)	Elekten geçen malzeme miktarı, %		
	Doğal Agrega	Kırmataş Agrega	Beton Kırığı Agrega
31,5	100	100	100
22,4	100	100	100
11,2	100	100	100
8	49,67	53,07	48,10
4	0	0	0
2	0	0	0
1	0	0	0
0,5	0	0	0
0,25	0	0	0
0,125	0	0	0
0,063	0	0	0
Fiziksel Özellikler			
Özgül ağırlık	2,611	2,639	2,463
Su emme, %	1,112	0,503	5,597
Los Angeles, %	31,18	26,58	34,82
ACV, %	29,21	24,39	32,47



Şekil 3.2 4,00-11,2 mm agregalara ait granülometri eğrileri

Çizelge 3.3 11,2 – 22,4 mm boyutlarındaki agregaların granülometrik analizi, fiziksel ve mekanik özellikleri

Elek boyutları (mm)	Elekten geçen malzeme miktarı, %		
	Doğal	Kırmataş	Beton Kırığı
31,5	100	100	100
22,4	100	100	100
16	52,03	59,07	58,07
11,2	0	0	0
8	0	0	0
4	0	0	0
2	0	0	0
1	0	0	0
0,25	0	0	0
0,125	0	0	0
0,063	0	0	0
Fiziksel Özellikler			
Özgül ağırlık	2,634	2,705	2,534
Su emme, %	1,111	0,401	3,731
Los Angeles, %	31,18	26,58	34,82
ACV, %	29,21	24,39	32,47



Şekil 3.3 11,2-22,4 mm agregalara ait granülometri eğrileri

3.1.3 Hiper Akışkanlaştırıcı Katkı

Beton üretimlerinde hiper akışkanlaştırıcı beton katkısı olarak Master Glenium ACE 450 katkısı kullanılmıştır. Kimyasal yapısı Polikarboksilik Eter Esaslı olarak belirtilmiştir. Master Glenium ACE 450 katkısının özellikleri Çizelge 3.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri.

Özellik	Değerler
Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Görünüm	Kahverengi-Sıvı
pH Değeri	5-7
Klor iyon içeriği	≤ 0.10
Alkali miktarı (%)	$\leq 3,00$
Özgül ağırlık (20°C’de)	1.069 – 1109 kg/lt

3.1.4 Su

Beton üretimlerinde Afyonkarahisar ili şehir şebekesi suyu kullanılmıştır.

3.2 Geçirimli Beton Karışım Oranları ve Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında üç farklı agrega türü ve her agrega türü için iki farklı gradasyonda toplamda 6 adet geçirimli beton karışımı tasarlanmıştır. Yapılan deneme dökümleri ile kullanılacak çimento dozajı, su/ bağlayıcı oranı, teorik hava içeriği, çimento harç hamuru ve sıkıştırma miktarı ve yöntemi ile ilgili genel bir yaklaşım elde edilmiştir. Hedeflenen boşluk oranı ve dayanım özelliklerine yakın sonuçlar elde edilmesi ile beton tasarımı ön dökümler çerçevesinde yapılmıştır. Teorik karışım oranları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Geçirimli beton teorik karışım oranları, kg/m³

						Agrega Türü						Teorik Birim
						Doğal Agregası		Kırmataş Agregası		Beton Kırığı		
								4.00-11,2 mm	11,2-22,4 mm	4.00-11,2 mm	11,2-22,4 mm	
Karışımlar	w/c Oranı	Çimento	Su	Hava Oranı (%)	Kimyasal Katkı	4.00-11,2 mm	11,2-22,4 mm	4.00-11,2 mm	11,2-22,4 mm	4.00-11,2 mm	11,2-22,4 mm	Hacim Ağırlığı kg/m³
Doğal 4,00-11,2	0.3	350	105	25	1,93	1389	-	-	-	-	-	1846
Doğal 11,2-22,4	0.3	350	105	25	1,93	-	1401	-	-	-	-	1858
Kırmataş 4,00-11,2	0.3	350	105	25	1,93	-	-	1404	-	-	-	1861
Kırmataş 11,2-22,4	0.3	350	105	25	1,93	-	-	-	1439	-	-	1896
Beton Kırığı 4,00-11,2	0.3	350	105	25	1,93	-	-	-	-	1310	-	1767
Beton Kırığı 11,2-22,4	0.3	350	105	25	1,93	-	-	-	-	-	1348	1805

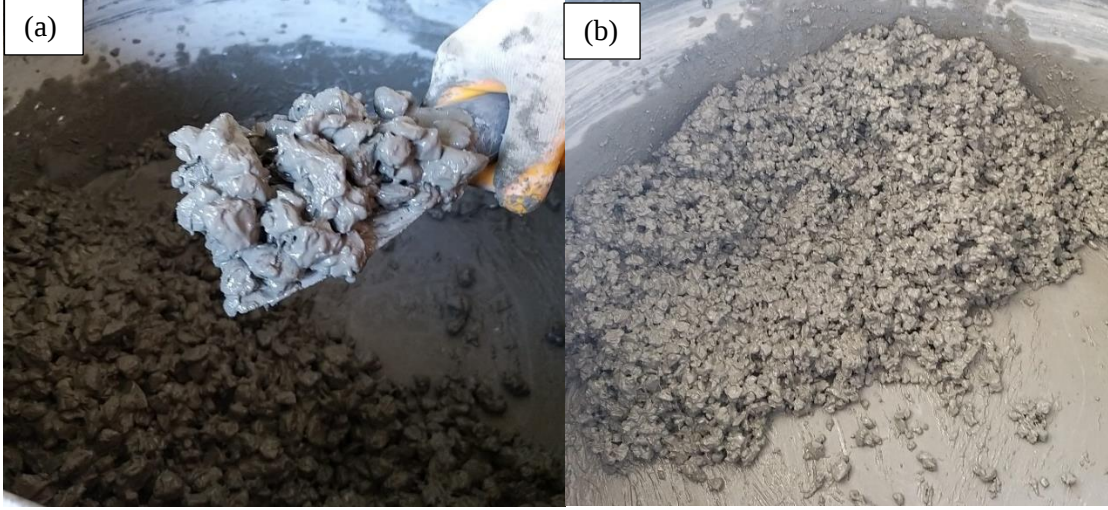
3.3 Beton Döküm Yöntemi, Sıkıştırma ve Üretilen Numune Tipleri

Yapılan çalışmada geçirimli betonlar 4,00 - 11,2 mm ve 11,2 - 22,4 mm aralıklarında 2 farklı gradasyon aralığında olmak üzere 3 tür agrega kullanılarak üretilmiştir. Üretilen tüm geçirimli beton serileri 3 adet 10 cm x 10 cm x 10 cm ebatlarında küp kalıp ve 4 adet 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir kalıplara dökülmüştür. Beton karıştırma işleminde kullanılan ekipman Resim 3.5'te gösterilmiştir. Deneme dökümlerinde kullanılan beton mikserinin karışım anında agregaları kırıp ufaladığı tespit edilmiş, bu durumun az da olsa agrega gradasyonunda ince malzemenin oluşmasına neden olacağından dolayı gerekli düzenlemeler ile agreganın kırılıp incelmesi engellenmiştir. Böylece başlangıç gradasyonunun korunması sağlanmıştır. Ayrıca kırılma/ufalanma sonrası oluşabilecek ince malzemenin boşluk ve geçirimlilik seviyelerinde ortaya çıkaracağı olumsuz etki berteraf edilmiştir.



Resim 3.5 Beton karışımında kullanılan mikser.

Resim 3.6' da gösterildiği gibi döküm sırasında çimento harcının tüm agregayı saracak şekilde bir bütünlük sağlamasına önem verilmiştir. Hiper akışkanlaştırıcı katkının etkisi ile işlenebilirliği arttırarak kalıplara rahat yerleşebilecek bir kıvamın elde edilmesi sağlanmıştır.



Resim 3.6 11,2-22,4 mm kırmataş agregası (a), 4,00-11,2 mm beton kırığı (b) agregaya ait döküm.

Üretilen geçirimli beton türleri birbiri ile karşılaştırılacağı için tüm dökümlerde aynı şartların sağlanması ve aynı yöntemlerin kullanılması önemlidir. Bu nedenle beton karışımı tamamlandıktan sonra tasarım birim hacim ağırlıkları göz önüne alınarak tartılarak kalıplanmıştır.

Kalıplara alma işleminde dikkat edilen diğer bir parametre tüm serilerdeki numunelerin eşit şekilde sıkıştırılmasıdır, numunelerin her noktasında üniform bir yapı sağlanarak ve boşluk yapısını bozmadan sıkıştırma işleminin yapılması gerekmektedir.

İlgili literatür incelendiğinde çeşitli sıkıştırma yöntemlerinin kullanıldığı, bu yöntemlerden birisinin de şişleme yöntemi olduğu ancak çalışmanın amacı dikkate alındığında standart şişleme yönteminde eşit kuvvet ve şişin uygulanacağı noktalarda farklılıklar olabileceği, her hamlede eşit ve dengeli sıkıştırma elde edilemeyeceği, bu durumun deney sonuçlarını önemli ölçüde değiştireceği düşünülmüştür.

Sıkıştırma faktörünün tüm numuneler üzerindeki etkisini en aza indirmek için Resim 3.7'deki şişleme ekipmanı tasarlanmıştır. Aparat ile her seferinde aynı noktalara ve eşit kuvvette şişleme işlemi uygulanması sağlanmaya çalışılmıştır.



Resim 3.7 Şişleme ekipmanına ait görsel ve çizimler

Birim hacim ağırlıkları dikkate alınıp tartılan geçirimli taze beton her bir kalıba kısımlar halinde dökülerek sıkıştırma uygulanması ile tartılan tüm betonun kalıplara alınması sağlanmıştır. Bu işlem sonunda her numune için 5 kademedeki beton miktarı yerleştirilmiş olmaktadır. Her kademedeki sonra sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Beton kırığı agregalı 11,2-22,4 mm taze beton karışımının kalıplara yerleştirilmesi Resim 3.8 de gösterilmiştir. 11,2-22,4 mm beton kırığı agregalı numunelerin kalıplardan çıkarıldıktan sonraki gösterimi Resim 3.9’ da, 4,00-11,2 mm beton kırığı agregalı numunelerin kalıplardan çıkarıldıktan sonraki gösterimi Resim 3.10’ da verilmiştir.



Resim 3.8 Taze betonun kalıplanması



Resim 3.9 11,2-22,4 mm beton kırığı agregalı numunenin kalıptan çıkarıldıktan sonraki durumu



Resim 3.10 4-11,2 mm beton kırığı agregalı numunelerinin kalıptan çıkarıldıktan sonraki durumu

Beton tasarımı ve dökümü sırasında dikkat edilen diğer bir husus çimento harcının kıvamı, gravitesi ve miktarından dolayı boşuklardan akarak dip kısımlarda birikerek tıkanmaya yol açmasıdır. Labaratuvar şartlarında numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra bu durum izlenebilmektedir. Çimento hamurunun kalıp diplerinde ortaya çıkardığı hamur birikimi yapılacak olan permabilite deneylerini yapılamaz hale getirmekte, geçirimsizliğin gözlemlenmesi bakımından önem arz etmektedir.

Beton kırığı agregaları poroz agregalar olduğu için karışım tasarımı ve geçirimsiz beton dökümünde agregaların bu özelliği göz önünde bulundurulmuştur, karışımda kullanılacak su miktarı agregaların su emme miktarları belirlenerek, agregaların döküm öncesi yüzey kuru suya doymuş hal alması takip edilmiştir. Tüm serilere ait dip görüntüleri Resim 3.11-3.16'da gösterilmiştir.



Resim 3.11 4-11,2 mm doğal agregalar ile üretilen betonların dip görüntüsü



Resim 3.12 4-11,2 mm kırmataş agregalar ile üretilen betonların dip görüntüsü



Resim 3.13 4-11,2 mm beton kırığı agrega ile üretilen betonların dip görüntüsü



Resim 3.14 11,2-22,4 mm doğal agrega ile üretilen betonların dip görüntüsü



Resim 3.15 11,2-22,4 mm kırmataş agrega ile üretilen betonların dip görüntüsü



Resim 3.16 11,2-22,4 mm beton kırığı agrega ile üretilen betonların dip görüntüsü

Üretilen geçirimli beton numuneler 24 saat kalıplarda bekletildikten sonra kalıplardan çıkartılıp 28 gün standart su kürüne bırakılmıştır.

3.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.4.1 Toplam Boşluk Oranı Belirlenmesi

Geçirimli beton boşluk yapısı itibari ile toplam boşluk ve etkili boşluk olmak üzere iki farklı boşluktan oluşmaktadır. Toplam boşluk miktarı su akışını sağlayan ve akışa etkisi olmayan; kapalı veya birbirleri ile bağlantılı olmayan boşlukları ifade etmektedir. Etkili boşluk oranı ise akışkan hareketine olanak sağlayan birbiri ile bağlantılı akışın sağlandığı boşluk olarak değerlendirilmektedir. Numunelere uygulanan standart 28 günlük kür süresi sonunda boşluk oranı belirleme deneyi yapılmıştır. Denklem 3.1 ile toplam boşluk oranı hesaplanmıştır. (Adresi vd. 2023)

$$P = 1 - \left(\frac{m_d - m_s}{\rho_w * V} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’ de yer alan P; toplam boşluk oranı (%), m_d ; 24 saat süre ile etüvde kurutulmuş numunenin ağırlığı (gr), m_s ; yüzey kuru suya doymun haldeki numunenin su altındaki ağırlığı (gr), ρ_w ; suyun yoğunluğu (gr/cm³), V; numunenin hacmi (cm³) olarak tanımlanmaktadır.

3.4.2 Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Numunelerin birim hacim ağırlıkları etüv kurusu ağırlığının hacim değerine bölünmesi ile elde edilmiştir. Beton numunelerin birim hacim ağırlıkları Denklem 3.2 yardımı ile hesaplanmıştır.

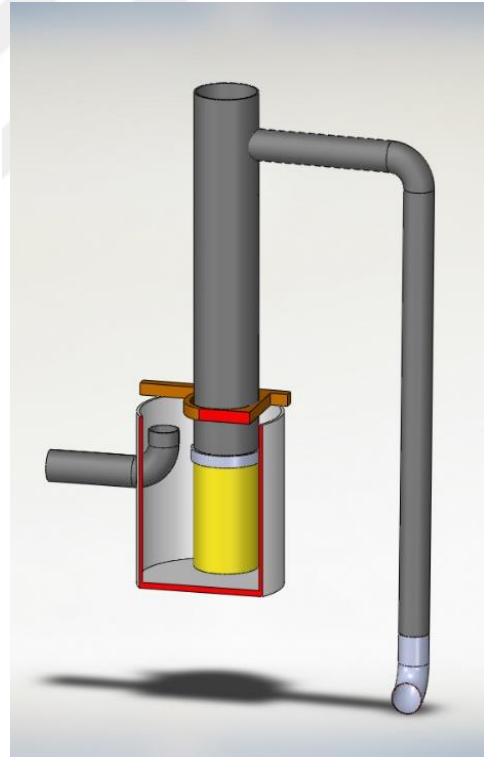
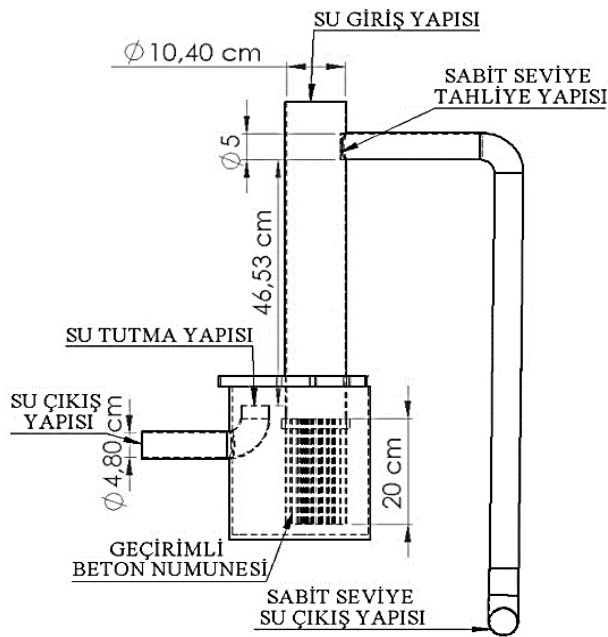
$$BHA = \frac{w}{v} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de yer alan BHA; birim hacim ağırlık (kg/m³), w; numunenin etüv kurusu ağırlığı (kg), v; numunenin hacmi (m³)

3.4.3 Sabit Seviyeli Geçirirnililik Deneyi

Geçirgenliğin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden birisi sabit seviyeli geçirirnililik deneyi yöntemidir. Numune üzerindeki su seviyesinin sabit kaldığı böylelikle akış hızının ölçüldüğü sabit yük yaklaşımıdır.

Şekil 3.4'te deney düzeneğinin 2D ve 3D çizimleri gösterilmektedir. Suyun sabit bir seviyede kalmasını sağlamak, numunenin üzerinde oluşan basıncı sabit tutmak ve belirlenen bir yüksekliğe suyun tahliye edilmesini sağlamak amacı ile sabit seviye tahliye yapısı tasarlanmıştır. Sabit bir su seviyesinin yakalanabilmesi için geçirirnil beton numunesinin geçirirnililik debisinden daha fazla bir debi ile su beslemesi gerekmektedir, geçirirnililik debisinden fazla olan suyun ise sabit seviye su çıkış yapısından deney düzeneğini terk etmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.4 Sabit seviyeli geçirirnililik deney düzeneği 2D ve 3D çizimleri



Resim 3.17 Sabit seviyeli geçirimsizlik deney düzeneği

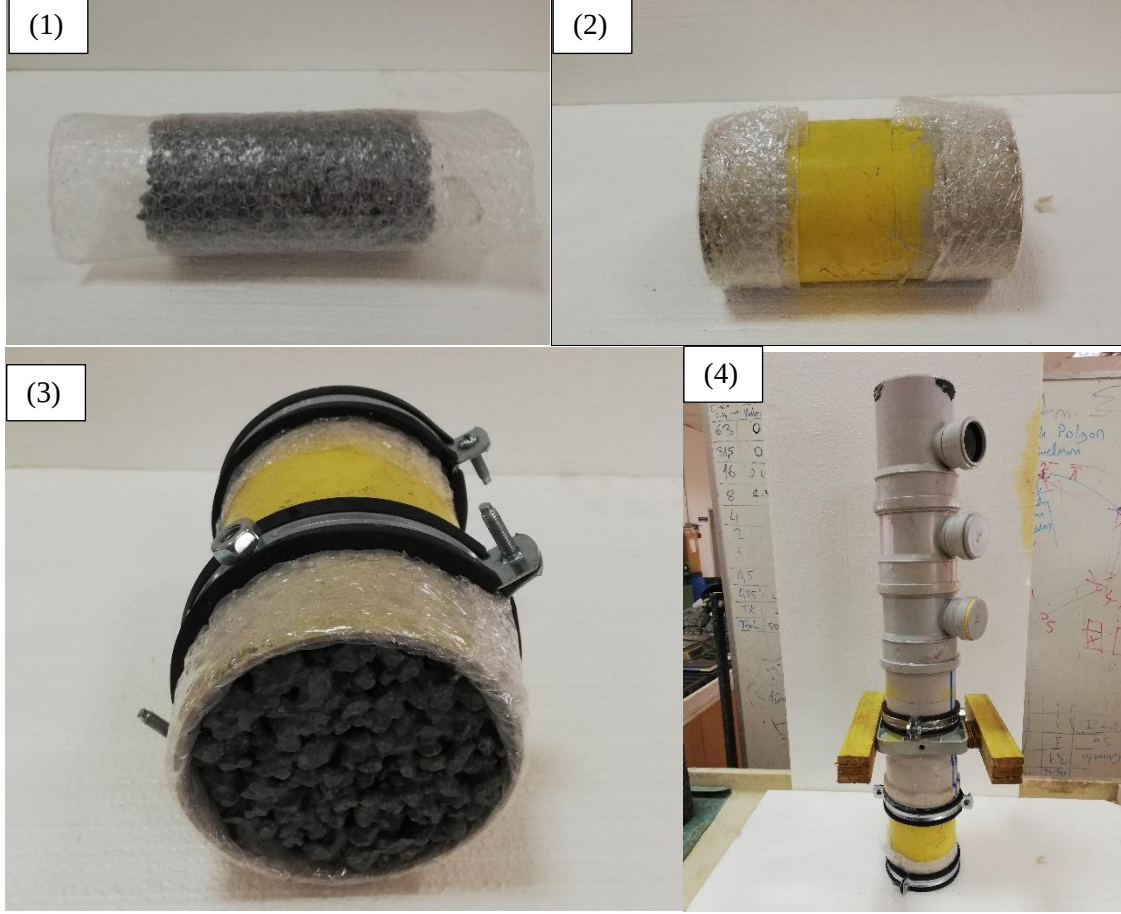
Resim 3.17’de sabit seviyeli geçirimsizlik deney düzeneği gösterilmiştir. Beslenen su geçirimli beton numunesinin içinden geçtikten sonra savaklanıp, çıkış yapısına ulaşarak ölçülü bir kaptan toplanmaktadır. Belirli bir zaman aralığında, ölçülü kaptan toplanan su miktarından faydalanarak betonun geçirimsizlik seviyesi belirlenebilir. Bu deney düzeneği ile geçirimli betonun geçirimsizlik katsayısı denklem 3.3 yardımı ile hesaplanmıştır. (Qin vd. 2015).

$$K = \frac{Q L}{A h t} \quad (3.3)$$

Denklem 3.2’ de yer alan K; geçirimsizlik katsayısı (cm/sn), Q; kaptan toplanan su miktarı (cm³), L; geçirimli beton numunesinin yüksekliği (cm), A; geçirimli beton numunesinin kesit alanı (cm²), h; su yüksekliği (cm), t; Q miktarında suyun toplandığı süredir (sn).

Beton numunesinin deney düzeneğine montajının yapılması sırasında kalıp cidarı ve

beton arasından su sızmasının engellenmesi için izolasyon işlemi yapılmıştır. İşlem sıralaması Resim 3.18’ de gösterilmiştir.



Resim 3.18 Geçirimli betonun deney düzeneğine montaj aşamaları (Sırası ile 1,2,3,4)

3.4.4 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyleri 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Küp numunelere 28 gün boyunca standart kür uygulandıktan sonra basınç dayanımı deneyleri TS EN 12390-3 (2021)’e göre gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyinin yapılışı ve kırılması Resim 3.19’da gösterilmiştir. Basınç dayanımlarının tayininde Denklem 3.4 kullanılmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A_k} \quad (3.4)$$

Denklemden σ : Basınç dayanımını (N/mm^2), P : Kırılma yükünü, A_k : Beton basınç yüzey alanını göstermektedir.



Resim 3.19 Basınç dayanımı deneyi ve 11,2-22,4 mm doğal agregalı numunenin kırılma görseli

3.4.5 Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi

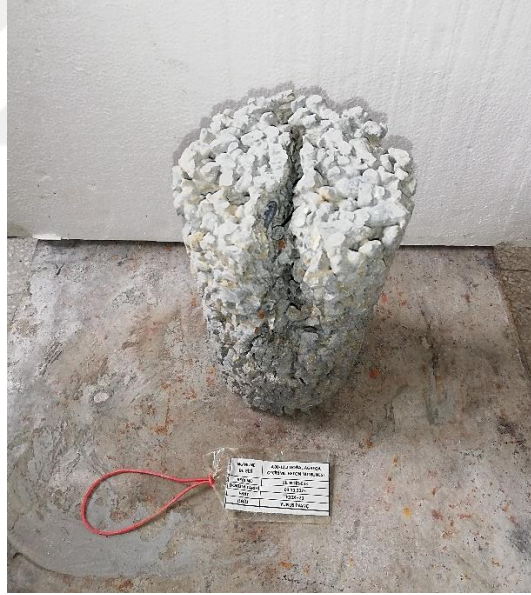
Yarmada-çekme dayanımı deneyleri $\Phi 100 \times 200$ mm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde, 28 günlük standart kür sonrasında TS EN 12390-6 (2010)'ya uygun olarak yapılmıştır. Yarmada-çekme dayanımı deneyine ait görseller Resim 3.20'de gösterilmiştir. Yarmada-çekme dayanımı değerlerinin hesaplanmasında Denklem 3.5 kullanılmıştır. Resim 3.21'de deney sonrası numunenin kırılma biçimi gösterilmiştir.

$$f_{ctk} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3.5)$$

Denklem 3.4'te, f_{ctk} ; Yarmada çekme dayanımını (MPa), P; Silindire uygulanan basınç yükünü (N), D; Silindirin çapını (mm) ve L; Silindirin uzunluğunu (mm) ifade etmektedir.



Resim 3.20 Yarmada-çekme dayanımı deneyi yapılışı



Resim 3.21 4,00-11,2 mm doğal agregalı numunenin yarılma şekli

3.4.6 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyleri 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Küp numunelere 28 gün boyunca standart kür uygulandıktan sonra ultrases geçiş hızı deneyleri TS EN 12504-4'ye (2021) göre gerçekleştirilmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyinin yapılışı Resim 3.22'da gösterilmiştir. Deneyin daha hassas şekilde yapılabilmesi ve numunelerin yüzeyindeki boşlukların kapatılması amacıyla numune yüzeyine gres yağı sürülmüştür. Geçiş hızının tayini için gerekli olan küp numunelerin kenar uzunlukları da yine hassas ölçüm yapılabilmesi amacıyla kumpas ile ölçülmüştür. Ultrases cihazından alınan mikro saniye cinsinden zaman ifadesi, numunelerin kenar uzunluğuna bölünerek ultrases geçiş hızı değerleri belirlenmiştir. Ultrases geçiş hızları Denklem 3.6 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$v = \frac{L}{t} \quad (3.6)$$

Denklem 3.5'te ifade edilen v : Ultrases geçiş hızını, L : Ses dalgalarının iletildiği kenar uzunluğu, t : Birimi mikro saniye olan geçiş süresidir.



Resim 3.22 Ultrases geçiş hızı deneyi yapılışı

3.4.7 Geçirimli Beton Numunelerinin Tıkanmaya Maruz Bırakılması

Laboratuvar koşullarında, malzeme tipinin tıkanmaya etkisini araştıran çok sayıda çalışma bulunmaktadır. İri kum parçaları yüzey gözeneklerine girmediğinden dolayı geçirgenliği önemli ölçüde azaltmamışlardır. İnce kumun geçirgenlikte önemli azalmalara neden olduğu, ince taneli siltli kilin ise gözenek yapısında herhangi bir konsantrasyon olmadan numuneyi yıkayarak neredeyse hiçbir etki yaratmadığı belirlenmiştir. Siltli kil ve kum kombinasyonları, az sayıda döngüden sonra tamamen tıkanmayla birlikte en yüksek geçirgenlik düşüşlerine neden olmaktadır. Kil ve kum kombinasyonun tıkanma olasılığını artıran geniş parçacık boyutu dağılımına ve daha fazla yüzey etkileşimine ve parçacık yapışmasına neden olan kilin bağlayıcı özellik göstermesi ile ilişkilendirilmektedir (Kia vd. 2018).

Tıkanma olayı ile ilgili yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, doğadaki su akışı ve su akışı ile taşınan parçacıkların boyutları ve türleri dikkate alınmıştır. Bu durumda kil ve kum malzemeleri kombinasyonu ile tıkanma olayının sağlanması gerçekçi bir simülasyon ortaya çıkaracağı öngörülmüştür.

Tıkanma olayında önemli bir parametre, her döngüde numuneye uygulanan kum ve kil miktarı, yani yükleme hızıdır. Yüksek miktarda yüklemeye maruz bırakılması halinde anında tıkanmaya neden olmakta ve bu durum gerçeklikten uzak olmaktadır. Küçük bir yükleme ölçülebilir bir etki yaratmayabilir, malzemenin boşluklardan kolayca akarak numuneyi terk etmesi mümkün olmaktadır. Diğer bir ihtimalde küçük yükleme hızlarında döngü sayısı aşırı bir biçimde artabilir çok uzun testler gerektirebilir. Literatür çalışmalarında yola çıkarak Her döngüde 0,8 g/ cm² kum veya 33,3 g/L kilin uygulanmasının geçirgenlikte ölçülebilir değerler ortaya çıkaracağı ve doğal su akışına uygun bir tıkanma simülasyonu olabilecektir (Kia vd. 2018).

4,00-11,2 mm aralığındaki agregalar için 0,5 mm boyutundan küçük kil malzeme ve 1,00 mm boyutundan küçük kum malzeme tıkanma deneylerinde kullanılmıştır.

11,2-22,4 mm aralığındaki agregalar için 0,5 mm boyutundan küçük kil malzeme ve 2,00 mm çapından küçük kum malzeme tıkanma deneylerinde kullanılmıştır.

Çizelge 3.6’da elek aralıklarına göre her bir döngü için kullanılan sediment miktarı boyutları verilmiştir. Her döngüde 34 gr kum malzeme permabilite deney düzeneği stabil hale geldikten sonra geçirimli beton numune üzerine dökülerek, 5 litre su içerisinde çözülmesi sağlanan 100 gr kil malzeme çözeltisinin numunenin üzerine dökülmesi ile geçirimli beton numunesi tıkanmaya maruz bırakılmıştır. Her tıkanma döngüsü sonrasında sabit seviyeli geçirimlilik deney düzeneği ile geçirimlilik seviyesi kayıt altına alınmıştır. Geçirimli beton numunesi tıkanıncaya kadar tıkanma sürecine devam edilmiştir. Resim 3.23’te tıkanma potansiyeli tespitinde kullanılan kum ve suda çözünmüş kil, tıkanma sonrası geçirimli betonun görünüşü.

Çizelge 3.6 Tıkanma potansiyeli tespitinde elek aralıklarına göre her bir döngü için kullanılan sediment miktarı ve boyutları

Agrega Elek Aralığı (mm)	Sediment Özellikleri			
	Kum		Kil	
	Boyut (mm)	Miktar (g)	Boyut (mm)	Miktar (g)
4,00-11,2	< 1,00	34	< 0,5	100
11,2-22,4	< 2,00	34	< 0,5	100

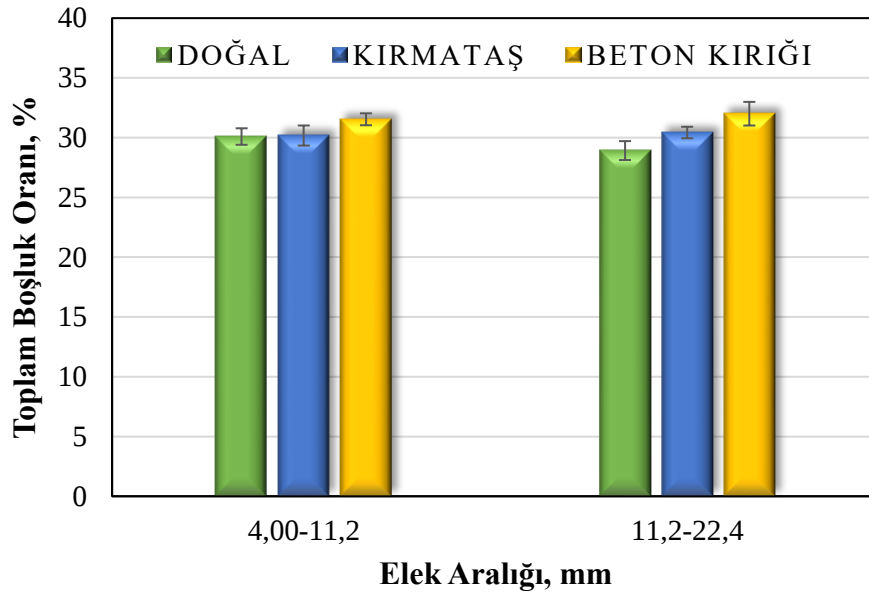


Resim 3.23 Geçirimli betonun bir tıkanma döngüsünde kullanılan kum ve suda çözünmüş kil, tıkanma sonrası geçirimli betonun görünüşü.

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Toplam Boşluk Oranı Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Şekil 4.1’de tüm serilere ait geçirimli beton boşluk oranı değişimleri gösterilmiştir. Beton tasarımında hedef boşluk oranı % 25 olarak belirlenmiş ancak tüm seriler için üretim değerleri hedeflenen boşluk oranından daha yüksek boşluk oranı değerleri ortaya çıkmıştır. Hedeflenen boşluk oranının daha yüksek çıkmasının nedenlerinden bir tanesi agrega boşluklarının boşluk hesabına dahil olarak hedeflenen boşluk miktarını arttırmasıdır. Beton kırığı agregalarının su emme değerlerinin daha yüksek ve özgül ağırlık değerlerinin daha düşük olmasından dolayı üretilen beton kırığı agregalı geçirimli betonlarda toplam boşluk oranları daha fazla olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.1 Toplam boşluk oranının beton serilerine göre değişimi

Yapılan bir çalışmada geri dönüştürülmüş agrega kullanılan geçirimli betonun toplam boşluk oranı, normal agrega kullanılan geçirimli betondan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, geri dönüştürülmüş agregalı geçirimli beton, yalnızca orijinal agregayı değil aynı zamanda benzer normal agregaya kıyasla özgül ağırlığı azaltan ve gözenekliliği artıran hidratlı çimento harcı içermesi ile ilişkilendirmişlerdir. (Bhutta vd. 2013)

Agrega şekil yapıları incelendiğinde; doğal agregalar, pürüzsüz yüzey yapısına, oval hatlara ve küresel şekil yapısına sahiptirler. Tane çapları arttıkça küresel yapı artmaktadır. 4,00 – 11,2 mm aralığında kırmataş agregası ile doğal agregası şekil olarak benzerlik gösterse de 11,2- 22,4 mm aralığı için doğal agregaların küresel şekil yapısı net bir biçimde ayırt edilebilmektedir.

Kırmataş agregaları; köşeli şekil yapısına ve doğal agregaya göre daha pürüzlü bir yüzeye sahiptirler ayrıca üniform yapıda köşeli şekil yapısına sahiptirler.

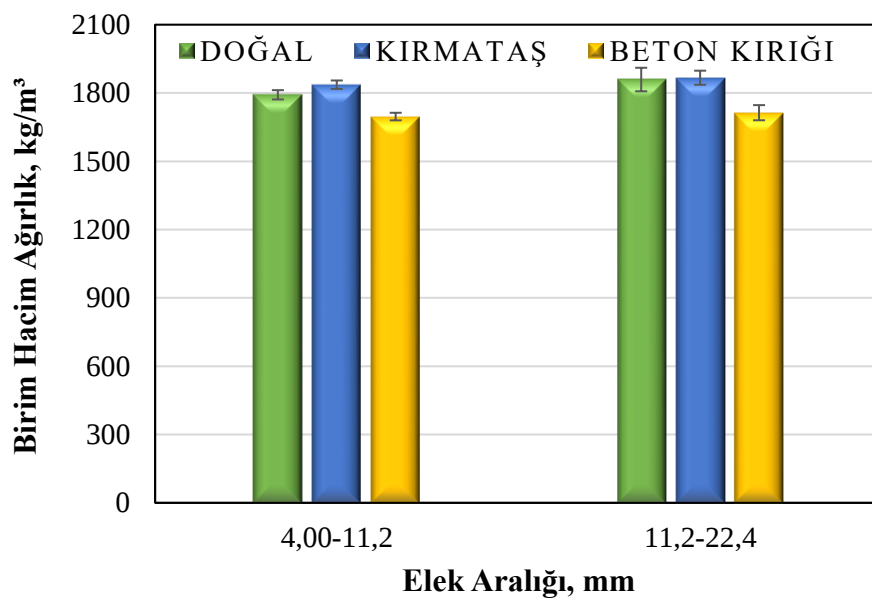
Beton kırığı agregaları; kesikli ve sivri köşeli, diğer agregası türlerine göre daha pürüzlü yüzeye sahiptirler, aynı zamanda kırılma sonunda oluşan taneler birbirinden çok farklı şekiller oluşturarak, üniform olmayan bir yapıya sahip olmaktadır. Bu bağlamda agregası şekil yapıları ile boşluk oranları karşılaştırıldığında beton kırığı agregaları kesikli ve üniform olmayan şekil yapıları ile boşluk oranında artışa neden olmuş, agregaların temas noktalarında sivri ve kesik uçlu tanecikler etkili olarak boşluk oranında artışa neden olduğu düşünülmektedir. Beton kırığı agregalarının pürüzlü yüzey yapısına sahip olması işlenebilirliği azaltarak, daha fazla iç sürtünme ortaya çıkmasına ve toplam boşluk oranını daha yüksek değerler almasına neden olduğu değerlendirilmektedir.

Doğal agregaları gibi yuvarlak ve oval hatlara sahip agregaları daha düşük boşluk oluşumuna neden olabilmektedirler. Köşeli agregaları ise yerleştirme sırasında tek bir yöne doğru yönelmektedirler ve bu durum beton ile olan aderansı ve temas yüzeyini etkilemektedir (Tennis vd. 2004). Kesik köşeli şekle sahip ve büyük agregası boyutu daha boşluklu ve geçirimli bir beton üretilmesini sağlamaktadır (Nguyen vd. 2014). Her iki elek aralığı kıyaslandığında ise 11,2-22,4 mm elek aralığında kırmataş ve beton kırığı agregalarının boşluk oranı 4,00-11,2 mm elek aralığına göre daha yüksek çıktığı ancak doğal agregası türünde tam tersi bir durum ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Araştırmalarda agregası boyutu ile beraber agregası şekil yapısının da boşluk oranı üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. 11,2-22,4 mm elek aralığında doğal agregalarının daha oval hatlara sahip olduğundan dolayı bu durumun ortaya çıktığı değerlendirilmiştir. Cosic vd. (2015)'in yaptıkları çalışma ile agregası boyutlarının artması ile geçirimli beton içerisinde daha büyük boşlukların oluştuğu sonucuna ulaşmışlardır.

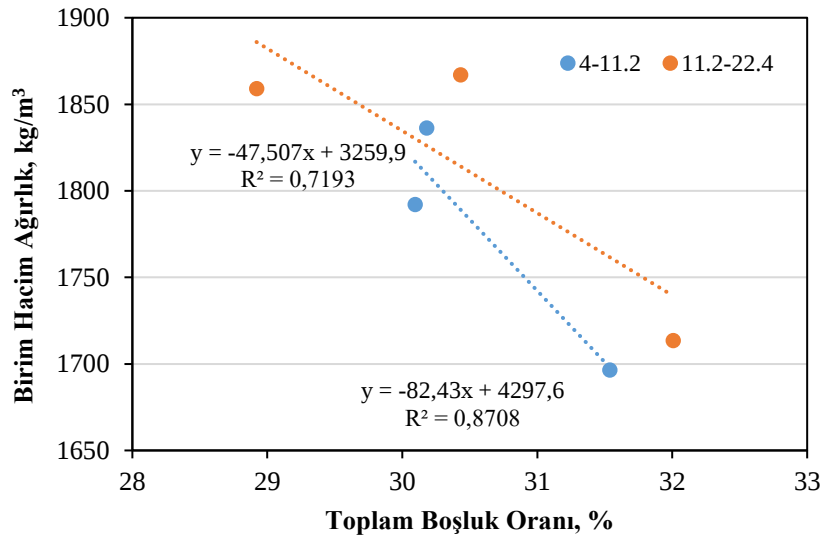
4.2 Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Şekil 4.2’te geçirimli beton serilerinin birim hacim ağırlıklarındaki değişimler gösterilmiştir. Beton kırığı agregası ile üretilen beton serileri en düşük birim hacim ağırlık değerine sahip, kırmataş agregası ile üretilen beton serileri ise en yüksek birim hacim ağırlık değerine sahiptir. Sonuçların bu şekilde çıkması aslında beklenen bir durumdur. Tüm beton serileri beton tasarım aşamasındaki birim hacim ağırlıklarına göre tartılarak ve neredeyse eşit bir biçimde sıkıştırma uygulanarak kalıplara alındığından dolayı sonuçların bu şekilde olması beklenmektedir.

Beton kırığı agregasının özgül ağırlığının düşük olması nedeni ile en düşük birim hacim ağırlık değerine sahip beton olarak agrega özelliklerini yansıtacak biçimde sonuçlar elde edilmiştir. Her iki gradasyon birbiri ile mukayese edildiğinde 11,2-22,4 mm gradasyonlu betonların birim hacim ağırlıklarının 4,00-11,2 mm gradasyonu betonlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum 11,2-22,4 mm aralığındaki agregaların özgül ağırlıklarının 4,00-11,2 mm aralığındaki agregaların özgül ağırlıklarından daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.3’te her iki agrega boyutu için birim hacim ağırlık ile boşluk oranı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Boşluk oranının artması ile birim hacim ağırlıkta azalmalar olduğu belirlenmiştir. Gözeneklilik arttıkça yoğunluk azalır ve en düşük gözeneklilik en yüksek yoğunluğa neden olmaktadır.



Şekil 4.2 Birim hacim ağırlığın beton serilerine göre değişimi

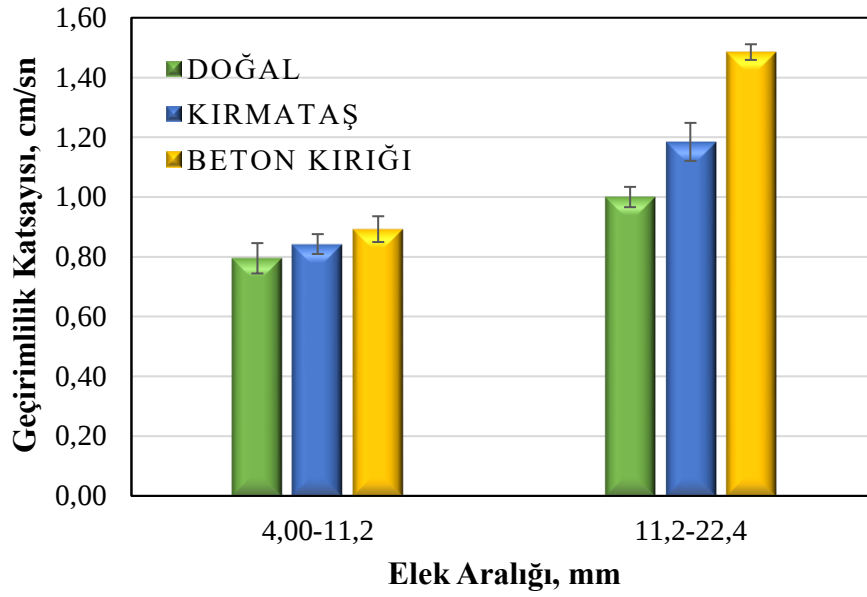


Şekil 4.3 Birim hacim ağırlığın toplam boşluk oranı ile olan ilişkisi

4.3 Sabit Seviyeli Geçirimsizlik (Permabilite) Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

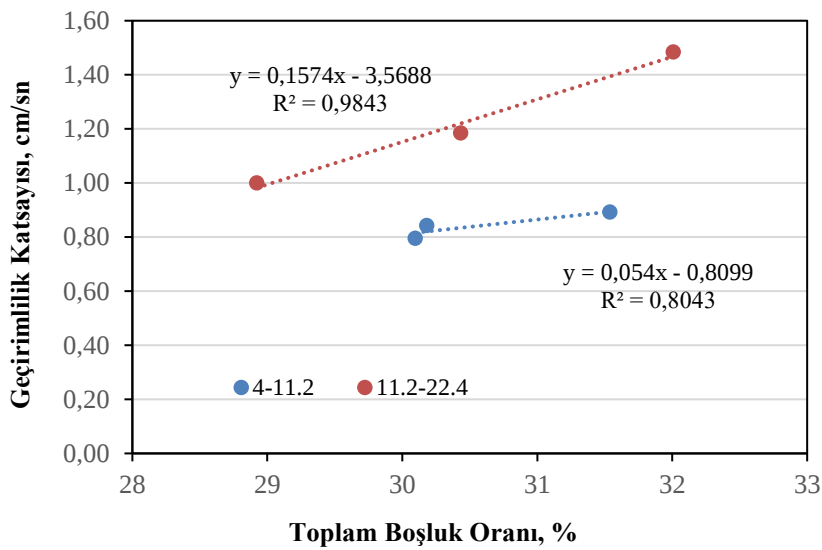
Şekil 4.4'te geçirimsiz beton serilerinin geçirimsizlik seviyelerindeki değişimler gösterilmiştir. En yüksek geçirimsizlik sonuçları beton kırığı agregalı betonlardan elde edilmiştir. En düşük geçirimsizlik değerleri ise doğal agregalı beton serilerinden elde edilmiştir. Bu durum agreganın şekil yapısı ile ilişkilendirebilir. Yapılan bir çalışmada da agreganın açısallığı göz önüne alındığında, daha fazla kırık ve açısallık agregası içeren bir geçirimsiz betonun, daha oval kenar hatlarına sahip nehir agregalarından oluşan geçirimsiz betondan daha iyi geçirimsizlik sergilediği sonucuna varılmıştır (Adresi vd. 2023).

Her iki agreganın boyutu karşılaştırıldığında ise 11,2-22,4 mm agregalar ile üretilen betonlardan elde edilen geçirimsizlik sonuçları 4,00-11,2 mm agregalar ile üretilen betonlara göre daha yüksek olarak elde edilmiştir. Agreganın boyutu arttıkça geçirimsiz betondaki gözenek boyutu artarken gözenek dağılımının ise azalmaktadır. Tam tersi durumda ise, agregaların boyutunun küçülmesi ile gözenek sayısında bir artış oluşabilir, ancak gözenek boyutları küçülebilmektedir. Bu durum agreganın boyutu arttıkça agregalar arasındaki kilit ve kenetlenme sayısının azalmasına ve bunun sonucunda daha az gözenek dağılımına neden olmaktadır. Sonuç olarak, daha büyük agreganın boyutları, ince agregalı karışımlara kıyasla daha yüksek gözenekliliğe ve daha geniş gözeneklere yol açmaktadır (Adresi vd. 2023).



Şekil 4.4 Geçirimsizlik katsayısının beton serilerine göre değişimi

Küçük agregalı numuneler, bağlı boşluklarda küçük kesit alanlarına sahiptirler ve bu da su nüfuzu için kıvrımlı yollar oluşturmaktadır. Büyük agregalardan oluşan numuneler ise geniş kesit alanlarına sahiptir ve dolayısıyla düz yollar oluşturmaktadır. Bu nedenle, daha büyük agregalar ile üretilen geçirimsiz betonlarda numuneden geçen suyun hızı artmaktadır ve numuneden dışarı akan suyun akış hacminde değişiklik meydana gelmektedir (Chi Fu vd. 2014). Şekil 4.5'te geçirimsizlik katsayısı ve boşluk oranı arasındaki ilişki verilmiştir.

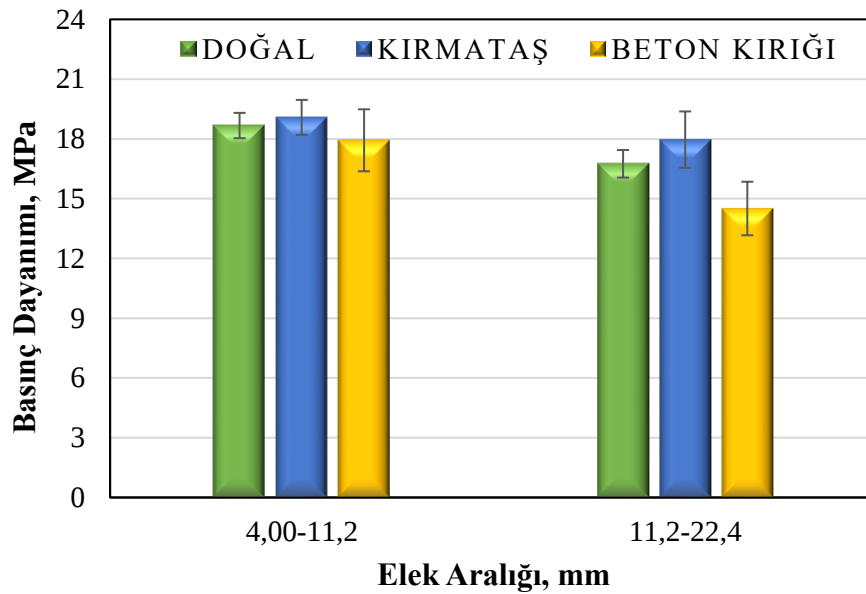


Şekil 4.5 Geçirimsizlik katsayısı ve toplam boşluk oranı arasındaki ilişki

Boşluk oranının artması ile permabilite seviyesinde artış gerçekleştiği belirlenmiştir. Görüldüğü gibi, gözeneklilik ve geçirgenlik arasında kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır.

4.3 Basınç Dayanımı Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Şekil 4.6’da geçirimli beton serilerinin 28 günlük basınç dayanımı değişimleri gösterilmiştir. Agregat türleri karşılaştırıldığında kırmataş agregat ile üretilen betonun basınç dayanımının diğer serilere göre daha yüksek olduğu, beton kırığı agregatı ile üretilen betonların ise en düşük basınç dayanımına sahip oldukları belirlenmiştir. Agregalar üzerinde yapılan Los Angeles ve ACV deneyleri sonucunda en iyi sonuçlar kırmataş agregalarından elde edilirken, en kötü sonuçlar ise beton kırığı agregalarından elde edilmiştir. Geçirimli betonlardan elde edilen basınç dayanımlarındaki farklılık agregaların mekanik özelliklerindeki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

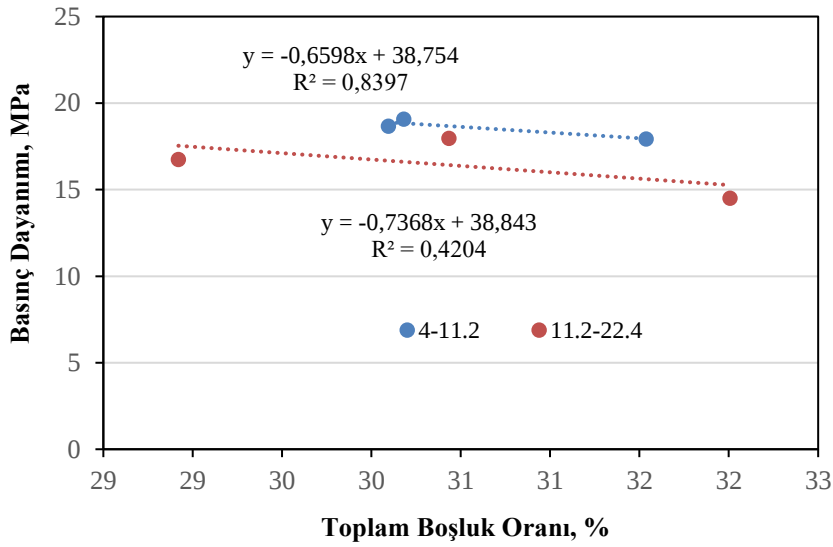


Şekil 4.6 Basınç dayanımının beton serilerine göre değişimi

4,00-11,2 mm agregalar ile üretilen geçirimli betonların basınç dayanımlarının 11,2-22,4 mm agregalar ile üretilen geçirimli betonlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, küçük boyutlu agregaların daha yüksek basınç dayanımına yol açtığı sonucuna varan çalışmalar ile uyumludur (Mulu vd. 2022).

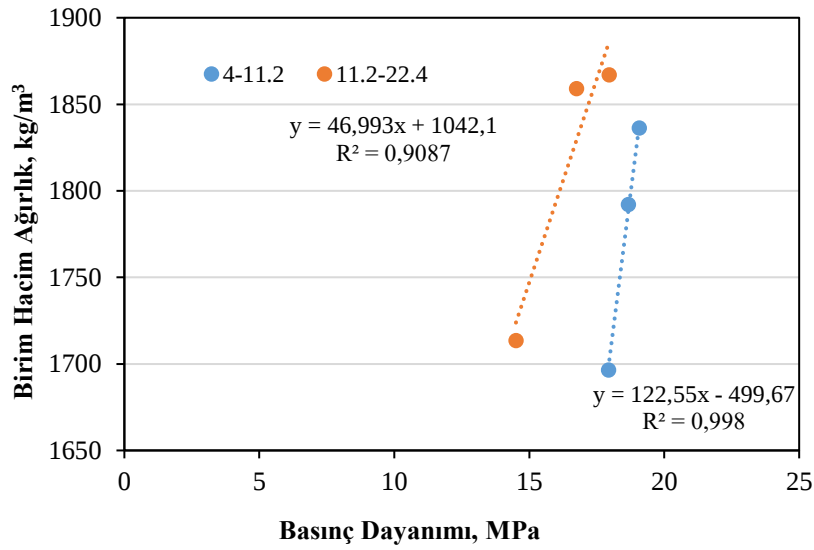
Beton kırığı agregaları ile üretilen geçirimli betonların basınç dayanımlarının diğer serilere kıyasla zayıf olduğu belirlenmiştir. Bu durum çimento harcı ile agregalar arasında oluşan zayıf bağlanma durumu ile ilişkilendirilebilir. Önceki çalışmalarda beton kırığı agregalı betonlarda dayanım azalmasının çimento harç hacminden ve agrega ile çimento hamuru arasındaki bağlanmadan kaynaklandığı belirtilmiştir. Beton kırığı agregası ile üretilen betonlarda zayıf agrega-çimento harcı bağlantısı olabilmektedir. Zayıf agrega-çimento harcı bağı, beton kırığı agregalı betonlarda zayıf beton özelliklerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Yap vd. 2018).

Şekil 4.7’de geçirimli beton serilerinin basınç dayanımı ve boşluk oranları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Boşluk oranının artması ile basınç dayanımında azalmalar olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.7 Basınç dayanımı ve toplam boşluk oranı arasındaki ilişki

Şekil 4.8 geçirimli beton serilerinin basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Birim hacim ağırlığındaki artış ile basınç dayanımında artış gerçekleştiği belirlenmiştir.

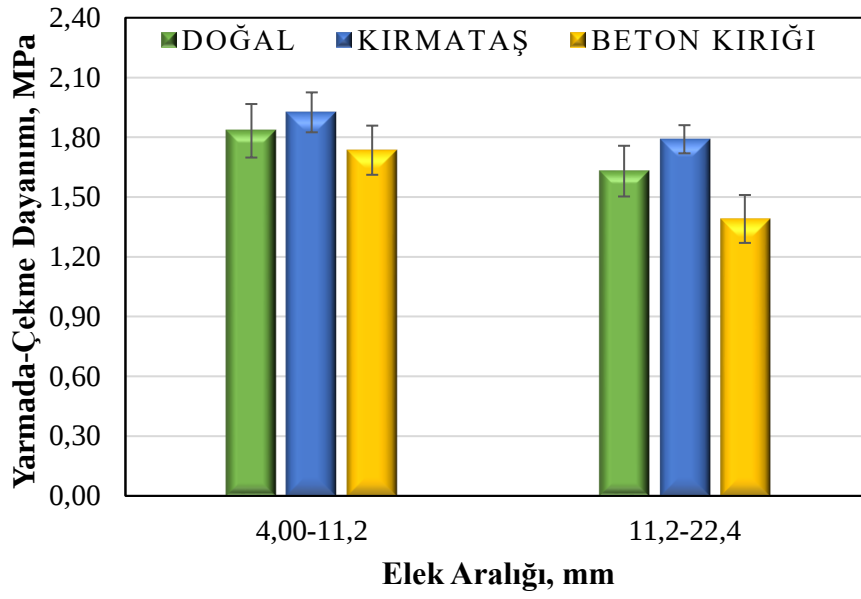


Şekil 4.8 Basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

Daha yüksek yoğunluk daha yüksek basınç dayanımına yol açar ve bu ikisi doğrudan ilişkilidir. Yoğunluktaki artışın gözeneklilik ve geçirgenlikte bir azalmaya yol açtığını ve dolayısıyla yoğunluğun tek başına geçirimli betonun basınç dayanımını optimize etmede tek başına belirleyici bir etken olarak kabul edilemeyeceğini belirtmek önemlidir (Adresi vd. 2023).

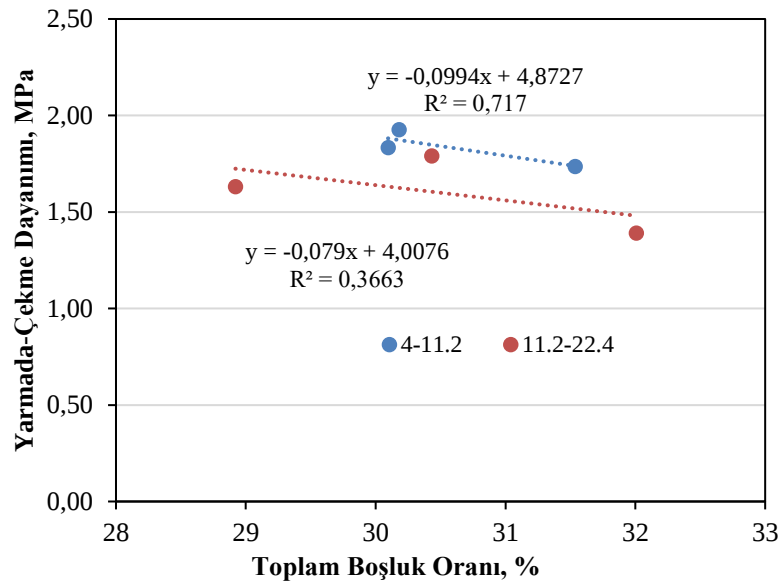
4.4 Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Şekil 4.9’da geçirimli beton serilerinin yarmada çekme dayanımlarındaki değişimler gösterilmiştir. Agregat türleri karşılaştırıldığında kırmataş agregat ile üretilen betonun yarmada çekme dayanımlarının diğer serilere göre daha yüksek olduğu, beton kırığı agregası ile üretilen betonların ise en düşük yarmada çekme dayanımına sahip oldukları belirlenmiştir.

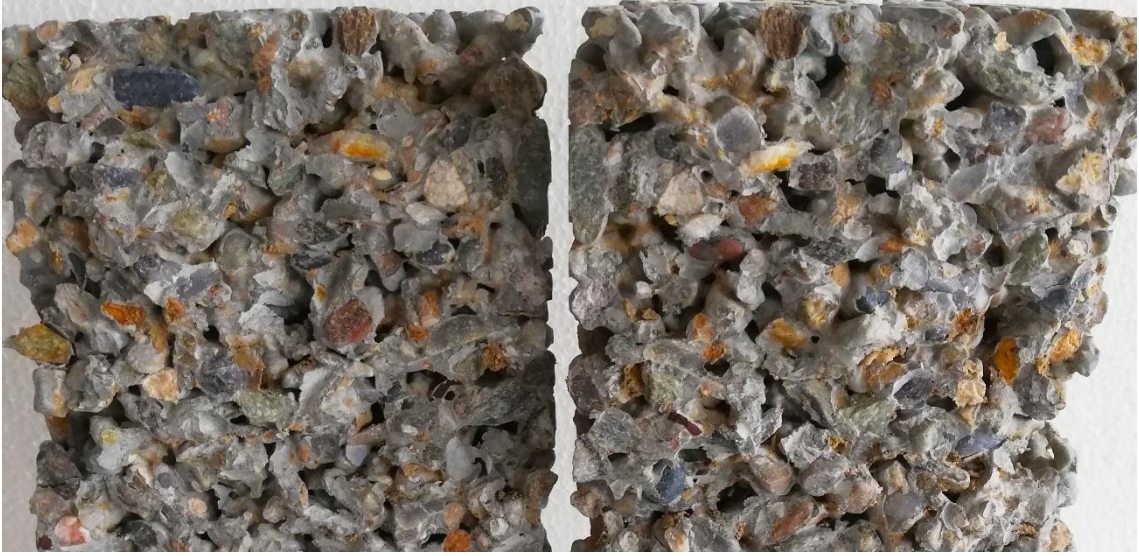


Şekil 4.9 Yarmada-çekme dayanımının beton serilerine göre değişimi

Şekil 4.10 geçirimli beton serilerinin yarmada çekme dayanımı ve toplam boşluk oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Boşluk oranındaki artış ile beraber yarmada çekme dayanımı değerlerinde düşüşler gerçekleştiği belirlenmiştir.



Şekil 4.10 Yarmada-çekme dayanımının toplam boşluk oranı ile olan ilişkisi



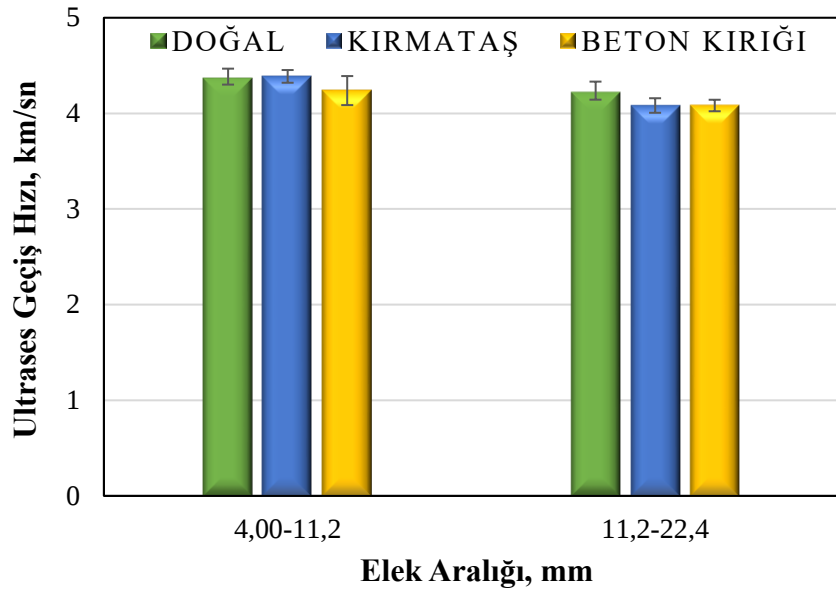
Resim 4.1 4,00 - 11,2 mm doğal agregalı numunenin deney sonundaki görünümü

Resim 4.1’de 4,00-11,2 mm doğal agregalı numunenin yarmada çekme dayanımı deneyi sonundaki kırılma biçimi gösterilmiştir. Kırılmalar yüksek oranda agregalarda oluşmakla beraber doğal agregalı numuneler daha pürüzsüz yüzeye sahip olduklarından dolayı agregaya yüzeyi ile çimento harcı arasındaki ayrılmalar göze çarpmaktadır.

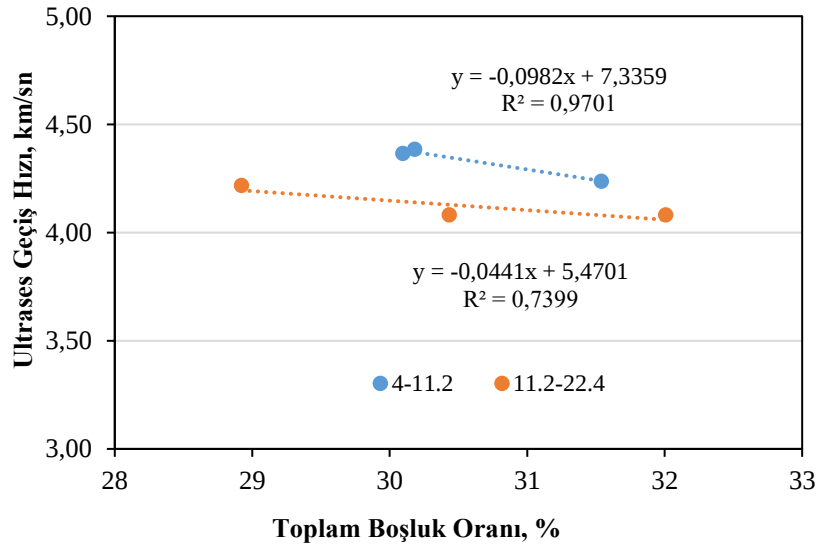
4.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Şekil 4.11’de geçirimli beton serilerinin ultrases geçiş hızı değerleri gösterilmiştir. En düşük ultrases geçiş hızı beton kırığı agregaya kullanılan numunelerde elde edilmiştir. Ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde 4,00-11,2 mm agregaya aralığındaki beton serilerinden 11,2-22,4 mm agregaya aralığındaki serilere göre daha yüksek ultrases geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. Yani 11,2-22,4 mm agregaya ile üretilen geçirimli beton serilerinin daha boşluklu olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 4.12 geçirimli beton serilerinin ultrases geçiş hızı ve toplam boşluk oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Boşluk oranındaki artış ile beraber ultrases geçiş hızı değerlerinde düşüşler gerçekleştiği belirlenmiştir.



Şekil 4.11 Ultrases geçiş hızının tüm serilere göre değişimi

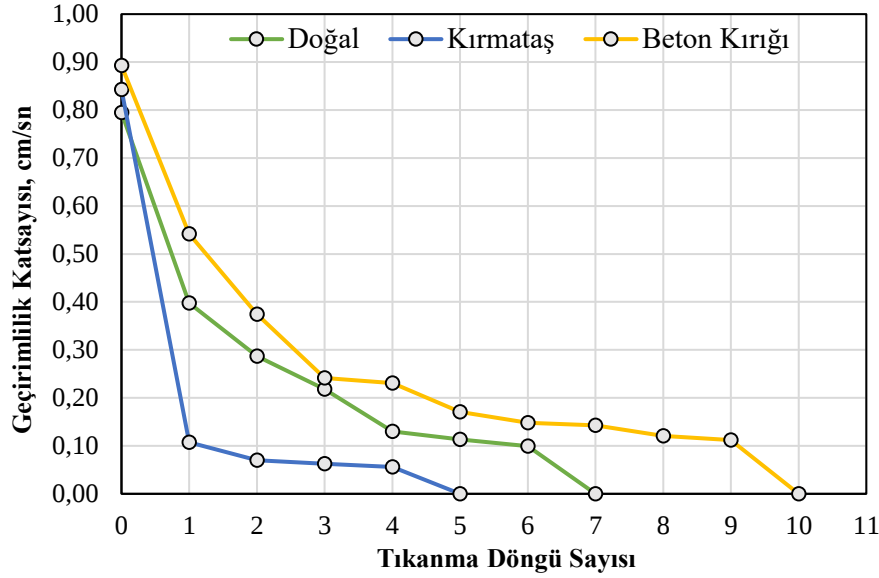


Şekil 4.12 Ultrases geçiş hızı ve toplam boşluk oranı arasındaki ilişki

4.6 Tıkanma Performansı Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Şekil 4.13'te 4,00-11,2 mm elek aralığında üretilen beton serilerinin tıkanma performansları gösterilmiştir. Tıkanmaya maruz bırakılan numune ortalama permabilite seviyesine en yakın numune olarak seçilmiştir. Her bir tıkanma döngüsü karşısında permabilite katsayısındaki azalmalar gösterilmiştir. 4,00-11,2 mm elek aralığındaki

numunelerin tıkanma deneylerinde 0,5 mm çapından küçük 100 gr kil ve 1,00 mm çapından küçük 34,00 gr kum kullanılmıştır.

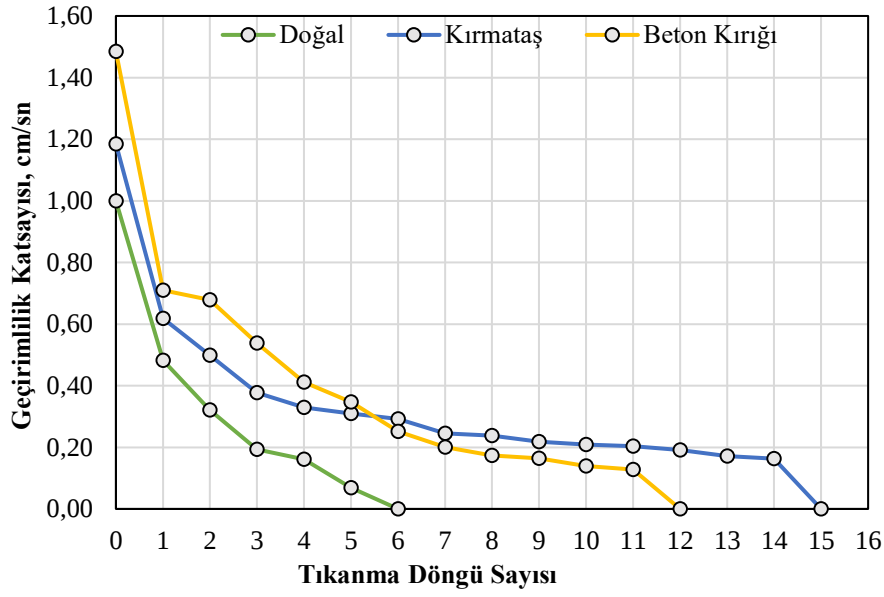


Şekil 4.13 4,00-11,2 mm elek aralığında üretilen beton serilerinin tıkanma performansları

Tıkanma karşısında en güçlü performansı 10 döngü ile beton kırığı agregalı numune, en zayıf performansı ise 5 döngü ile kırmataş agregalı numune göstermiştir. Geçirimli numunelerin ilk döngüde en fazla tepki gösterdiği ve permabilite katsayısındaki oransal olarak en önemli düşüşün ilk döngüde gerçekleştiği görülmektedir. Sonraki döngülerde azalmanın ilk döngüye nazaran daha stabil olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.14'te 11,2-22,4 mm elek aralığında üretilen beton serilerinin tıkanma performansları gösterilmekte ve her bir tıkanma döngüsü karşısında permabilite katsayılarındaki azalmaları ifade etmektedir. 11,2-22,4 mm elek aralığındaki numunelerin tıkanma deneylerinde 0,5 mm çapından den küçük 100 gr kil ve 2,00 mm çapından küçük 34 gr kum kullanılmıştır.

11,2-22,4 mm elek aralıklı agregaların tıkanmaya maruz bırakılması karşısında en güçlü performansı 15 döngü ile kırmataş agregalı numune, en zayıf performansı ise 6 döngü ile doğal agregalı numune göstermiştir. Geçirimli numunelerin ilk döngüde en fazla tepkiyi gösterdiği ve permabilite katsayısındaki en önemli düşüşün ilk döngüde gerçekleştiği görülmektedir. Sonraki azalmanın ilk döngüye nazaran daha stabil olduğu belirlenmiştir.

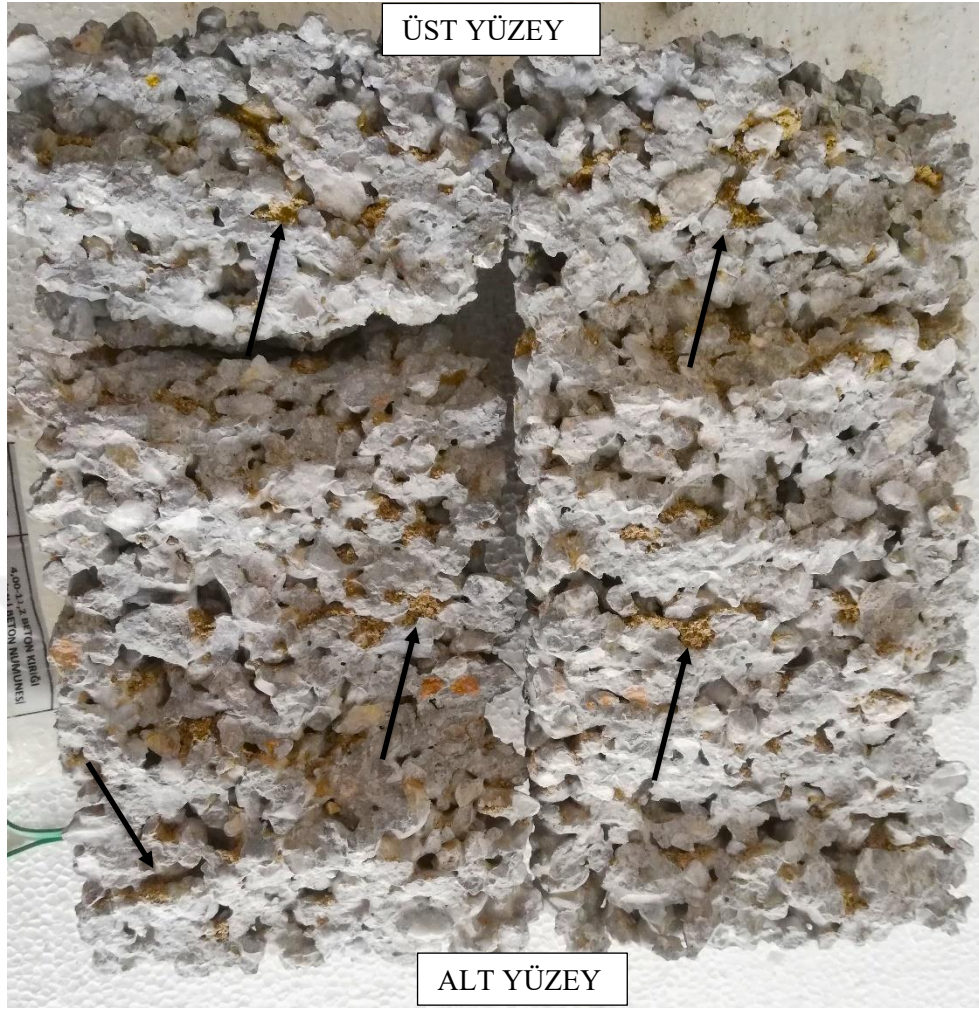


Şekil 4.14 11,2-22,4 mm elek aralığında üretilen beton serilerinin tıkanma performansları

Resim 4.2’ de 11,2-22,4 mm agregalı numunelerin tıkanma sonrası durumları gösterilmiştir. Yüksek tıkanma performanslı kırmataş agregası ve beton kırığı agregalarının boru cidarında akış sürdürülemediğinden kum ve kil parçacıklarının daha fazla biriktiği, Doğal agregalı numunede ise tıkanmanın daha erken döngülerde tamamlanması ile bu durum görülemediği.



Resim 4.2 11,2-22,4 mm agregalı numunelerin tıkanma sonrası durumu



Resim 4.3 4,00-11,2 mm beton kırığı numunenin iç boşluklarında sediment birikimi



Resim 4.4 4,00-11,2 mm beton kırığı numunenin iç boşluklarında sediment birikimi

Resim 4.3 ve Resim 4.4’ te yapılan değerlendirme ile kil + kum sediment malzemelerin kaplamanın üst bölgelerinde, ortasında ve hatta alt bölgelerine inerek geçirimli betona nüfuz ettiği ve sonuçta tıkanmaya neden olabileceği belirlenmiştir.

Resim 4.5’ te geçirimli betonun gözeneklerinden geçerek deney düzeneğinde çökelmiş kil ve kum parçacıkları görölmektedir. Tıkayıcı partiköl maddelerin geçirimli betonun dip kısmından itibaren zamanla birikerek tıkanma mekanizmasına katkıda bulunarak tıkanmayı hızlandırabilecektir.



Resim 4.5 Kum ve kil partiköllerinin deney düzeneğinde ökeltmesi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Toplam boşluk oranı değerleri incelendiğinde 11,2-22,4 mm agregası boyutuna sahip geçirimsiz beton serileri, daha büyük gözenekler nedeniyle 4,00-11,2 mm agregası boyutuna sahip beton serilerinden daha yüksek toplam boşluk oranı değerlerine sahip olduğu görülmüştür.
- En yüksek boşluk oranı değerleri tüm serilerde beton kırığı agregalı geçirimsiz betonlardan elde edilmiştir. Bu durumun agregası şekil özellikleri ile bağlantılı olduğu düşünülmektedir. Doğal agregalar gibi yuvarlak hatlara ve küresel şekillere sahip agregalar geçirimsiz betonlarda daha düşük boşluk oluşmasına neden olmuştur.
- Gözeneklerin çok sayıda ve birbiri ile bağlı olması nedeniyle geçirgenlik katsayısı değerleri daha büyük agregalı serilerde artmıştır. Daha büyük agregaların kullanılması, beton içinde değişen akış yollarına ve akış yönlerine neden olmuştur.
- Daha fazla kırık ve açısal agregası içeren kırmataş ve beton kırığı agregalı serilerden, daha düşük açıklığa sahip doğal agregalı geçirimsiz beton serilerine göre daha yüksek geçirimsizlik katsayısı değerleri elde edilmiştir.
- Toplam boşluk oranı ile geçirimsizlik arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Toplam boşluk oranındaki artışlar geçirimsiz betonda gözenekliliğin artmasına, dolaylı olarak etkin boşluk oranının artmasına neden olmuştur.
- 4,00-11,2 mm gradasyonlu agregalar ile üretilen geçirimsiz betonların, 11,2-22,4 mm gradasyonlu agregalar ile üretilen geçirimsiz betonlardan daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Küçük boyutlu agregaların kullanılması ile daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir.
- Beton kırığı agregalarının kullanımı ile geçirimsiz betonların basınç ve yarmada-çekme dayanımları azalmıştır.

- Beton kırığı agregalarının kullanımı ile daha büyük gözenekli boşluklar oluşmuş ve diğer agregalar ile karşılaştırıldığında geçirimlilik katsayılarının daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.
- Betonun basınç dayanımının çimento harcı, agrega dayanımı ve boşluk oranı ile ilişkili olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Tüm serilerde çimento dozajı aynı miktarda kullanıldığından dolayı, geçirimli betonların basınç dayanımlarının agregaların mekanik özellikleri ve geçirimli betonların boşluk oranları ile doğrudan ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.
- Geçirimli betonun yarmada çekme-dayanımı ile basınç dayanımı arasında ilişki olduğu görülmüştür. Bu nedenle, basınç dayanımındaki herhangi bir artış veya azalış, yarmada çekme dayanımını da aynı yönde etkileyeceği düşünülmektedir.
- Ultrases geçiş hızı ile boşluk oranı arasındaki korelasyon, geçirimli betonun toplam boşluk oranı artışı ile ultrases geçiş hızının azaldığını göstermektedir. Ancak geçirimli betonda boşluklar üniform dağılmadığından dolayı ultrases geçiş hızı değerlerinin uygulanan alana göre değişiklik gösterebileceği düşünülmektedir.
- Daha yüksek geçirimlilik katsayılarına sahip geçirimli betonların tıkanmaya karşı dirençlerinin arttığı görülmüştür, geçirimlilik artışı ile tıkanmaya karşı direnç artışının sağlanacağı düşünülmektedir.
- Tüm serilerde en yüksek tıkanma oranı birinci döngüde gerçekleşmiştir.
- Daha büyük agrega boyutları ile daha yüksek tıkanma dirençlerinin elde edilebileceği ve bununla birlikte mekanik özelliklerde azalmaların gerçekleşebileceği görülmüştür.
- Partikül maddelerin geçirimli betonların her yüksekliğinde birikime ve tıkanmaya yol açabildiği görülmüştür.
- Tıkanma potansiyeli deneyleri sonrasında, numunelerin belli bir tıkanma döngüsünden sonra tamamen tıkanarak geçirimsiz hale geldikleri görülmüştür.

- Beton kırığı agregaları ile üretilen geçirimli betonların tıkanma potansiyellerinin genel olarak diğer agregalara göre daha düşük olduğu görülmüştür.
- Kullanılan tıkaçıcı malzemelerin bir kısmı gözenekler içinden geçerek geçirimli betonu terk etmişlerdir. Bu sonuç geçirimli betonun filtrasyon özelliğini göstermektedir.

Geçirimli beton üretimlerinde farklı agrega türlerinin kullanılmasının geçirimli betonların fiziksel, mekanik, geçirimlilik ve tıkanma potansiyeli özelliklerini çeşitli şekillerde değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Geçirimlilik seviyelerinin ve tıkanma direncinin yüksek olması istenilen uygulamalarda beton kırığı agregalarının kullanılabilceğı ve böylece atık bir malzemenin geçirimli beton üretimlerinde değerlendirilebileceğı sonucuna ulaşılmıştır. Mekanik özelliklerin yüksek olması istenilen uygulamalarda ise kırmataş agregalarının geçirimli beton üretimlerinde kullanılabilceğı sonucuna varılmıştır. Daha sonraki yapılacak çalışmalar için tıkaçıcı malzemenin tanecik boyutu, miktarı ve yükleme hızının tıkanma potansiyeli üzerindeki etkisinin incelenmesi önerilmektedir.



6. KAYNAKLAR

- Adresi M Yamani, A Karimaei Tabarestani M, Rooholamini H, 2023, A comprehensive review on pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 407, Article number 133308.
- Al Shareedah O, Nassiri S, 2021, Pervious concrete mixture optimization physical and mechanical properties and pavement design: A review. *Journal of Cleaner Production*, 288, Article number 125095.
- Barišić I, Netinger Grubeša, I, Dokšanović T, Zvonarić M, 2020, Influence of clogging and unbound base layer properties on pervious concrete drainage characteristics, *Materials*, 13(11), 2455.
- Bhutta M A R, Hasanah N, Farhayu N, Hussin M W, bin Md Tahir M, Mirza J, 2013, Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). *Construction and building materials*, 47, 1243-1248.
- Bilgiç, Ş, 2019, Use of Paste Theory and Image Analysis to Investigate Properties of Pervious Concrete, 103, yüksek lisans tezi, İzmir Teknoloji Üniversitesi, İzmir.
- Bonicelli, A, Giustozzi, F Crispino M, 2015, Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 91, 102-110.
- Chandrappa A K, Biligiri K P, 2016, Pervious concrete as a sustainable pavement material–Research findings and future prospects: A state-of-the-art review, *Construction and building materials*, 111, 262-274.
- Chen Y, Wang K, Wang X, Zhou W, 2013, Strength, Fracture and Fatigue of Pervious Concrete, *Construction and Building Materials*, 42, 97-104.
- Chi Fu T, Yeih W, Chang J-R, Huang R, 2014, The Influence of Aggregate Size and Binder Material on the Properties of Pervious Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 17, Article number 963971.

- Çelikten S, Canbaz M, 2020, Agrega Tane Boyutunun Ve Bağlayıcı Türünün Geçirimli Beton Özelliklerine Etkisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler, 8(2), 171-181.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye Hazır Beton Birliği, 2018, Geçirimli Beton Uygulama Klavuzu.
- Hesami S, Ahmadi S, and Nematzadeh M, 2014, Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. Construction and Building Materials, 53, 680-691.
- Huang J, Zhang Y, Sun Y, Ren J, Zhao Z, and Zhang J, 2021, Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete, Construction and Building Materials, 290, Article number 123228.
- Hung V V, Seo S Y, Kim H W, Lee G C, 2021, Permeability and strength of pervious concrete according to aggregate size and blocking material, Sustainability, 13(1), Article number 426.
- Imran H M, Akib S, Karim M R, 2013, Permeable pavement and stormwater management systems, a review, Environmental technology, 34(18), 2649-2656.
- K Chandrappa A, Prapoorna Biligiri K, 2016, Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach, Construction and Building Materials, 123, 627-637.
- Kant Sahdeo S, Ransinchung R N, G D Rahu K L, Debbarma S, 2020, Effect of mix proportion on the structural and functional properties of pervious concrete paving mixtures, Construction and Building Materials, 255, Article number 119260
- Kia A, Wong H S, Cheeseman C R, 2018, Defining clogging potential for permeable concrete, Journal of Environmental Management, 220, 44-53.
- Kia Alalea, Hong S Wong, and Christopher R Cheeseman, 2017, Clogging in permeable concrete, A review, Journal of Environmental Management 193, 221-233.
- Lederle R, Shepard T, Meza V D L V, 2020, Comparison of methods for measuring infiltration rate of pervious concrete, Construction and Building Materials, 244, 118339.

- Lo F C, Lee M G, Lo S L, 2021, Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 286, 122947.
- Maguesvari Muthaiyan U, Thirumalai S, 2017, Studies on the properties of pervious fly ash–cement concrete as a pavement material, 4(1), 1318802.
- Malaiskiene J, Kizinievic O, Sarkauskas A, 2017, The impact of coarse aggregate content on infiltration rate structure and other physical & mechanical properties of pervious concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24, 569–582.
- Mulu A, Jacob P, S Dwarkish G, 2022, Hydraulic Performance of Pervious Concrete Based on Small Size Aggregates, *Advances in Materials Science and Engineering* Volume 2022, Article ID 2973255.
- Nguyen D H, Sebaibi N, Boutouil M, Leleyter L, Baraud F, 2014, A modified method for the design of pervious concrete mix, *Construction and Building Materials*, 73, 271-282.
- O Ekolu S, Solomon F, deBeer F, Bitandi L, N Kilula R, T Maseko K, G Mahlangu F, 2022, Measurement of pore volume connectivity and clogging of pervious concrete reactive barrier used to treat acid mine drainage, *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 55743–55756.
- Obla K H, 2010, Pervious concrete, An overview, *Indian Concrete Journal*, 84(8), 9.
- Pachideh G, Gholhaki M, Moshtagh A, 2020, Experimental study on mechanical strength of porous concrete pavement containing pozzolans. *Advances in Civil Engineering Materials*, 9(1), 38-52.
- Pilon B, Tyner J, Yoder D, Buchanan J, 2019, The Effect of Pervious Concrete on Water Quality Parameters: A Case Study. *Water*, 11, 263.
- Qin Y, Yang H, Deng Z, He J, 2015, Water Permeability of Pervious Concrete Is Dependent on the Applied Pressure and Testing Methods, *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi Limited, 6, Article ID 404136.

- Rama M, Shanthi V M, 2018, Experimental study on sedimentation removal of pervious concrete, Archives of Civil Engineering, LXVI, 181-195.
- Rasheedabdulmjeed R, 2022, Design and mechanical properties of geopolymer pervious concrete pavement cured by ambient condition, Institute Of Graduate Studies, Doktora Tezi, 106, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Gaziantep
- Sahdeo S K, Chandrappa A, Biligiri K P, 2021, Effect of compaction type and compaction efforts on structural and functional properties of pervious concrete, Transportation in Developing Economies, 7(2), 19.
- Sandoval G F, de Moura A C, Jussiani E I, Andrello A C, Toralles B M, 2020 Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging, Construction and Building Materials, 248, 118672.
- Sandoval G F, Galobardes I, Campos A, Toralles B M, 2020, Assessing the phenomenon of clogging of pervious concrete (Pc): Experimental test and model proposition, Journal of Building Engineering, 29, 101203.
- Sonebi M, Bassuoni M, Yahia A, 2016, Pervious Concrete: Mix Design Properties and Applications, RILEM Technical Letters, Rilem Publications SARL, 1, 109 – 115
- Şenol Y, Gürbey A P, 2020, Sürdürülebilir Peyzaj Tasarım Kriterleri Doğrultusunda Sultanbeyli Gölet Parkı için bir Model Önerisi, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 22(3), 775-790.
- T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2018, Su kaynakları yönetimi ve güvenliği, Özel ihtisas komisyonu raporu, KB: 3012- ÖİK: 79356, 56.
- Tennis P D, Leming M L, Akers D J, 2004, Pervious concrete pavements (Vol. 8), Skokie, IL: Portland Cement Association, 36, Silver Spring, Maryland, ABD.
- Torres A, Hu J, Ramos A, 2015, The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete, Construction and Building Materials, 95, 850-859.
- TS EN 1008, 2003, Beton karma suyu standardı, Türk Standardı.
- TS EN 12390-3, 2021, Sertleşmiş beton deneyleri, Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standardı.

- TS EN 12390-6, 2010, Sertleşmiş beton deneyleri, Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standardı.
- TS EN 12504-4, 2021, TS EN 12504-4, 2004, Beton deneyleri: Ultrases geçiş hızının tayini, Türk Standardı.
- TS EN 197-1, 2012, Çimento Standardı, Türk Standardı.
- TS EN 206-1, 2002, Beton Standardı, Kimyasal Katkı Maddeleri, Türk Standardı.
- Wu H Liu, Z Sun B, Yin J, 2016, Experimental investigation on freeze–thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC), Construction and Building Materials, 117, 63-71.
- Xie N, Akin M, Shi X, 2019, Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability, Journal of cleaner production, 210, 1605-1621.
- Yahia A, Kabagire K D, 2014, New approach to proportion pervious concrete. Construction and Building Materials, 62, 38-46.
- Yan K Li, G You, L Zhou Y, Wu S, 2020, Performance assessments of open-graded cement stabilized macadam containing recycled aggregate, Construction and Building Materials, 233, Article number 117326.
- Yang J, Jiang G, 2003, Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials, Cement and concrete research, 33(3), 381-386.
- Yang Z, Ma W, Shen W, Zhou, M, 2008, The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material, 23, 391–394.
- Yap S P, Chen P Z C, Goh Y, Ibrahim H A, Mo K H, Yuen C W, 2018, Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates, Journal of Cleaner Production, 181, 155-165.
- Yavuz, D, 2023, Geçirimli betonda tıkanma problemine agrega özelliklerinin etkisi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 137, İzmir.
- Zaetang Y, Wongs A, Sata V, Chindaprasirt P, 2013, Use of lightweight aggregates in pervious concrete, Construction and Building Materials, 48, 585-591.

Zhang Y Li, H Abdelhady A, Yang J, 2020, Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods, Construction and Building Materials, 263, Article number 120614.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.google.com/map>

