



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



GEÇİRİMLİ BETONDA TIKANMA PROBLEMİNE AGREGA ÖZELLİKLERİNİN ETKİSİ

Doktora Tezi

Demet YAVUZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2023

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**GEÇİRİMLİ BETONDA TIKANMA
PROBLEMİNE AGREGA ÖZELLİKLERİNİN
ETKİSİ**

Demet YAVUZ

Danışman: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Doktora Programı

İzmir
2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Demet YAVUZ tarafından doktora tezi olarak sunulan “Geçirimli Betonda Tıkanma Problemine Agrega Özelliklerinin Etkisi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 10/03/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Raportör Üye : Prof. Dr. Şemsi YAZICI

Üye : Prof. Dr. Halit YAZICI

Üye : Prof. Dr. Soner GÜLER

Üye : Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Geçirimli Betonda Tıkanma Problemine Agreganın Özelliklerinin Etkisi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

10/03/2023

Demet YAVUZ

ÖZET**GEÇİRİMLİ BETONDA TIKANMA PROBLEMİNE AGREGA
ÖZELLİKLERİNİN ETKİSİ**

YAVUZ, Demet

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

Mart 2023, 137 sayfa

Bu çalışmada, geçirimli beton üretiminde kireçtaşı, dere ve geri dönüştürülmüş agrega (GDA) olmak üzere üç farklı kökendeki agrega ve üç farklı agrega gradasyonu (15-25 mm, 5-15 mm ve 10-15 mm) kullanılarak geçirimli betonlar elde edilmiştir. Geçirimli beton karışımlarında ince agrega kullanılmamıştır. Geçirimli betonda tıkanma problemine agrega özelliklerinin etkisinin incelenebilmesi için tüm karışımlarda 28 günlük hedef basınç dayanımı 10 ± 1.5 MPa seçilmiştir. GDA'lar, çalışma kapsamında minimum atık oluşturulması amacıyla, kireçtaşı agregası kullanarak üretilen geçirimli betonlardan elde edilmiştir. Geçirimli betonların basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımları, aşınma direnci, boşluk oranı, su geçirimliliği gibi özellikleri araştırılmıştır. Daha sonra numuneler kil ile tıkanmış ve tıkanmanın neden olduğu su geçirimliliğindeki azalmalar belirlenmiştir. Ayrıca geçirimli beton örneklerin bilgisayarlı tomografi (BT) yardımıyla görüntüleri alınarak analiz edilmiştir. BT ile boşluk oranı, boşluk çapı, boşlukların dağılımı gibi veriler elde edilmiştir. Tıkanma sonrasında da tekrar BT görüntüleri alınarak tıkanmanın meydana geldiği bölgeler belirlenmiştir. BT görüntüleri kullanılarak Avizo adlı program yardımıyla geçirimli betonlar üç boyutlu yapılandırılmıştır.

GDA kullanılarak üretilen geçirimli betonların boşluk oranı ve su geçirimliliği değerlerinin dere ve kireçtaşı agregası kullanılarak üretilenlere kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 15-25 mm tane aralığındaki agregalar, bu çalışmada göz önüne alınan bütün agrega kökenlerinde hem mekanik hem de su geçirimliliği özellikleri bakımından en iyi sonucu vermiştir. 15-25 mm aralığındaki agregalar ile üretilen geçirimli betonların daha geç tıkanmış ve gradasyondaki ince agrega yoğunluğu arttıkça tıkanma süresinin azaldığı belirlenmiştir. GDA ile üretilen geçirimli betonların tıkanma performansı diğer agrega kökenlerine kıyasla daha iyi olurken, tıkanmanın yüzeye yakın kısımlarda meydana geldiği görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Geçirimli beton, mekanik özellikler, su geçirimsiliği, tıkanma, görüntü analizi, bilgisayarlı tomografi.



ABSTRACT**EFFECT OF AGGREGATE PROPERTIES ON CLOGGING OF
PERVIOUS CONCRETE**

YAVUZ, Demet

PhD in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

March 2023, 137 pages

In this study, pervious concretes were produced using limestone, river and recycled aggregates with three different (15-25mm, 10-15 mm and 5-15 mm) size fractions. Fine aggregates were not used in the pervious mixtures. To be able to investigate the effect of aggregate properties on pervious concretes clogging the target compressive strength was chosen as 10 ± 1.5 MPa. Recycled aggregates were obtained from pervious concretes with limestone aggregates prepared from wastes of the present study. The compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, abrasion resistance, porosity and water permeability of concrete mixtures were investigated. The reduction in permeability of concrete mixture was noted after clogging them with clay slurry. Besides, image analyses was conducted with computed tomography (CT). The porosity, pore diameter, pore size distribution were obtained from CT images. After clogging, CT images of pervious samples were reobtained to determine the extent of clogging. Using CT images, three-dimensional reconstruction of pervious concretes was demonstrated with the Avizo software.

Not surprisingly, the pervious mixes with recycled aggregates showed better porosity than those produced with limestone and river aggregates. For the aggregate gradations considered in this study, 15-25 mm size fractions outperformed other gradations in terms of both mechanical properties and water permeability. The mixtures containing 15-25 mm aggregates were clogged somewhat later than those containing aggregates with smaller size fractions. The pervious concretes produced with recycled aggregates showed better performance in comparison with the mixtures containing other aggregate types. The clogging occurred in the upper zone of the concrete specimen close to their top surface.

Keywords: Pervious concrete, mechanical properties, water permeability, clogging, image analyses, computed tomography.



ÖNSÖZ

Geçirimli betonlar bünyelerinde bulundurdıkları yüksek boşluk oranları nedeniyle üst tabakadan bir alt tabakaya suyu kolaylıkla aktarabilmektedirler. Ancak, bahsedilen yüksek boşluk oranı nedeniyle mekanik özelliklerinde geleneksel betona kıyasla bir azalma meydana gelmektedir. Zayıf mekanik özellikleri geçirimli betonların yaygın kullanımı önündeki en büyük engellerden birisidir. Bir diğeri ise tıkanma problemidir. Geçirimli betonlar zamanla bünyelerindeki boşlukların tıkayıcı malzemelerle dolmasıyla su geçirimsizliği özelliklerinin azaldığı hatta bazı durumlarda tamamen ortadan kalktığı bilinmektedir.

Bu çalışmada farklı agrega kökenleri ve gradasyonları ile geçirimli betonlar üretilmiş ve akabinde laboratuvar ortamında kil ile tıkanması sağlanmıştır. Bilgisayarlı tomografi ile elde edilen görüntüler incelenerek tıkanmanın meydana geldiği bölgeler belirlenmiş ve bunun üzerine yorumlar yapılmıştır.

Demet YAVUZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLolar DİZİNİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1. Geçirimli Beton/Poroz Beton	3
2.1.1 Geçirimli betonun avantajları	3
2.1.2 Geçirimli betonun zayıf yönleri	4
2.2. Geçirimli Betonda Kullanılan Malzemeler	5
2.2.1 Agregas	5
2.2.2. Bağlayıcı Malzemeler	10
2.2.3. Kimyasal Katkılar	14
2.3. Karışım Dizaynı	15

2.4. Geçirimli Betonların Genel Özellikleri	17
2.4.1 Taze hal özellikleri	17
2.4.2 Mekanik özellikler	18
2.4.3 Dayanıklılık özellikleri.....	20
2.5. Geçirimli Betonun Saha Performansı	23
2.5.1 Geçirimli betonun su arıtma yeteneği	23
2.5.2 Geçirimli betonda tıkanma sorunu	24
2.5.3 Tıkanmayı açma yöntemleri.....	30
2.6. Geçirimli Betonun Maliyet Analizi	33
2.7. Geçirimli Betonda Görüntü Analizi Yönteminin Kullanılması.....	34
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	47
3.1. Amaç ve kapsam.....	47
3.2. Malzemeler	48
3.2.1. Çimento	48
3.2.2. Agregas	48
3.2.3. Su	52
3.2.4. Süperakışkanlaştırıcı (SA)	52
3.3. Yöntemler	53
3.3.1 Beton karışımlarının hazırlanması	53

3.3.2 Beton karışımlarının dökümü ve kürlenmesi.....	55
3.3.3 Betonların karakterizasyonu	55
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	65
4.1. Basınç Dayanımı	65
4.2. Yarmada Çekme Dayanımı	66
4.3. Eğilme Dayanımı	67
4.4. Yoğunluk ve Boşluk Oranı	68
4.5. Geçirimsizlik Katsayısı	73
4.6. Cantabro Aşınma Direnci.....	75
4.7. Kuruma Büzülmesi	77
4.8. BT ile Elde Edilen Görüntülerin Analizi	78
4.8.1. Boşluk geometrisi	78
4.8.2 2D Boşluk yapısı analizi.....	79
4.8.3 Boşluk büyüklüğü dağılımı	84
4.9. Kıvrımlılık.....	93
4.10. Tıkanma	96
4.10.1 Deneysel olarak elde edilen sonuçlar	96
4.10.2 BT ile elde edilen sonuçlar	100
4.11. 3D görüntüler	105

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR DİZİNİ	116
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	117
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	118
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	119
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	120
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	121
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	122
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	123
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	124
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	125
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	126
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	127
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	128
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	129
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	130
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	131
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	132
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	133

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	134
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	135
TEŞEKKÜR	136
ÖZGEÇMİŞ.....	137



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Aşırı çimento hamurunun aşağıya doğru akması (Kia et al., 2017)	3
Şekil 2.2 (a) Geçirimsiz beton (b) Geçirimli beton (Zhong et al., 2018)	4
Şekil 2.3 Geçirimli betonlarda görülen bozulmalar (Chandrappa and Biligiri, 2016)	5
Şekil 2.4 Farklı kıvamlardaki geçirimli betonlar (Da costa et al., 2021).....	18
Şekil 2.5 Sahada gerçekleştirilen BPN (Rodin III et al., 2019).....	22
Şekil 2.6 Geçirimli betonda farklı boyutlardaki partiküllerin tıkanmaya etkisi (Kia et al., 2017)	25
Şekil 2.7 Yeni bir yöntemle üretilen geçirimli betonlar (Kia et al., 2021)	27
Şekil 2.8 Basınçlı su ile tıkanmayı açma (Tong, 2011)	32
Şekil 2.9 Farklı agrega gradasyonları ile eşiklenmiş görüntüler (Sumanasooriya and Neithalath, 2009)	36
Şekil 2.10 Farklı derinliklerde porozite değişimi (Shan et al., 2022).....	40
Şekil 2.11 Geçirimli betonun 3D boşluk yapısı.....	40
Şekil 2.12 Geçirimli betonda 3 boyutlu görünüm (Grubeša et al., 2018).....	44
Şekil 3.1. Çalışma kapsamında kullanılan agregalar	50
Şekil 3.2. Kireçtaşı agregalarının gradasyon eğrileri.....	51
Şekil 3.3. Dere agregalarının gradasyon eğrileri	51
Şekil 3.4. GDA'ların gradasyon eğrileri.....	52

Şekil 3.5. Agregaların gradasyon eğrileri	52
Şekil 3.6 Su geçirimliliği katsayısı hesaplamasında kullanılan düzenek	57
Şekil 3.7 Geçirimli betonların bilgisayarlı tomografi ile görüntü alınma aşamaları	58
Şekil 3.8 BT ile alınan üst görünüş/yan görünüş	59
Şekil 3.9. BT ile alınan görüntülere siyah-beyaz eşikleme yapılması	59
Şekil 3.10 Görüntü analizi için takip edilen aşamalar	60
Şekil 3.11 Örnek kıvrımlılık tayini	60
Şekil 3.12 BT ile görüntü alınması	61
Şekil 3.13 Tıkama işleminde kullanılan kil	63
Şekil 3.14 3D boşluk yapısı analizi.....	64
Şekil 4.1 Yarmada çekme dayanımı sonuçları.....	66
Şekil 4.2 Gevreklik katsayısı sonuçları.....	68
Şekil 4.3 Farklı agrega kökenleri ve gradasyonları için yoğunluk değişimi.....	69
Şekil 4.4 Yoğunluk ve bağlantılı porozite arasındaki ilişki	70
Şekil 4.5 Kireçtaşı agregası ile üretilen geçirimli betonların porozite değerleri ...	71
Şekil 4.6 Dere agregası ile üretilen geçirimli betonların porozite değerleri	71
Şekil 4.7 GDA ile üretilen geçirimli betonların porozite değerleri.....	72
Şekil 4.8 Geçirimli betonların alt yüzey görüntüleri.....	72
Şekil 4.9 Bağlantılı porozite-geçirimsizlik katsayısı ilişkisi	74

Şekil 4.10 Toplam porozite-geçirimlilik katsayısı ilişkisi	74
Şekil 4.11 Agregada gradasyonu-geçirimlilik katsayısı ilişkisi	75
Şekil 4.12 Porozite ve geçirimlilik katsayısı arasındaki ilişki.....	75
Şekil 4.13 Cantabro testi sonucunda meydana gelen ağırlık kaybı	76
Şekil 4.14 Cantabro aşınma deneyi sonucunda numunelerdeki değişim görüntüleri	76
Şekil 4.15 Kuruma büzülmesi deney sonuçları	77
Şekil 4.16 Kireçtaşı agregası ile üretilen geçirimli betonlarda oluşan boşluk geometrisi	78
Şekil 4.17 Dere agregası ile üretilen geçirimli betonlarda oluşan boşluk geometrisi	79
Şekil 4.18 GDA ile üretilen geçirimli betonlarda oluşan boşluk geometrisi	79
Şekil 4.19 Ortalama boşluk çapı hesaplanması	80
Şekil 4.20 Kireçtaşı agregaları ile elde edilen geçirimli betonların boşluk yapısı analizi.....	81
Şekil 4.21 Dere agregaları ile elde edilen geçirimli betonların boşluk yapısı analizi	81
Şekil 4.22 GDA ile elde edilen geçirimli betonların boşluk yapısı analizi	82
Şekil 4.23 Kireçtaşı agregaları için boşluk büyüklüğü-geçirimlilik katsayısı ilişkisi	83
Şekil 4.24 Dere agregaları için boşluk büyüklüğü-geçirimlilik katsayısı ilişkisi ..	83
Şekil 4.25 GDA için boşluk büyüklüğü-geçirimlilik katsayısı ilişkisi	84

Şekil 4.26 Kireçtaşı agregası 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı	85
Şekil 4.27 Kireçtaşı agregası 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı	85
Şekil 4.28 Kireçtaşı agregası 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı	86
Şekil 4.29 Dere agregası 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı ..	86
Şekil 4.30 Dere agregası 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı ..	87
Şekil 4.31 Dere agregası 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı	87
Şekil 4.32 GDA 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.....	88
Şekil 4.33 GDA 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.....	88
Şekil 4.34 GDA 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.....	89
Şekil 4.35. Porozite dağılımı çiziminde 0 ve 140 eksen seçimleri	89
Şekil 4.36 Kireçtaşı agregaları için porozite-derinlik ilişkisi	91
Şekil 4.37 Dere agregaları için porozite-derinlik ilişkisi	92
Şekil 4.38 GDA için porozite-derinlik ilişkisi	93
Şekil 4.39 Kireçtaşı agregaları için efektif yol	94
Şekil 4.40 Dere agregaları için efektif yol	94
Şekil 4.41 GDA için efektif yol	95
Şekil 4.42 Kireçtaşı agregaları ile elde edilen geçirimli betonların tıkanma davranışları.....	96

Şekil 4.43 Dere agregaları ile elde edilen geçirimli betonların tıkanma davranışları	97
Şekil 4.44 GDA ile elde edilen geçirimli betonların tıkanma davranışları.....	98
Şekil 4.45 Tıkama sonrası numune yüzeylerindeki değişme	99
Şekil 4.46 Tıkanma tekrar sayıları.....	99
Şekil 4.47 Kireçtaşı agregası için tıkanma sonrası BT görüntüleri	100
Şekil 4.48 Dere agregası için tıkanma sonrası BT görüntüleri.....	101
Şekil 4.49 GDA için tıkanma sonrası BT görüntüleri	101
Şekil 4.50 Tıkanma sonrası numune derinliğindeki boşluk dağılımı	103
Şekil 4.51 Tıkanma sonrası belirlenen kesitlerdeki boşluk dağılımı	104
Şekil 4.52 Ayırık boşluk modeli (Kireçtaşı agregaları).....	105
Şekil 4.53 Ayırık boşluk modeli (Dere agregaları).....	105
Şekil 4.54 Ayırık boşluk modeli (GDA).....	106
Şekil 4.55 Eşdeğer boşluk modeli (Kireçtaşı agregaları)	106
Şekil 4.56 Eşdeğer boşluk modeli (Dere agregaları)	107
Şekil 4.57 Eşdeğer boşluk modeli (GDA)	107
Şekil 4.58. Kireçtaşı agregası 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).....	108
Şekil 4.59. Kireçtaşı agregası 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).....	108

Şekil 4.60. Kireçtaşı agregası 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D)	109
Şekil 4.61. Dere agregası 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D)	109
Şekil 4.62. Dere agregası 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D)	110
Şekil 4.63. Dere agregası 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D)	110
Şekil 4.64. GDA 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D)	111
Şekil 4.65. GDA 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D)	111
Şekil 4.66. GDA 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D)	112

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Geçirimli betonda kullanılan genel malzeme oranları (AlShareedah and Nassiri, 2021).....	15
Tablo 3.1. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.....	48
Tablo 3.2. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.....	48
Tablo 3.3 Kireçtaşı agregasının elek analizi sonuçları	49
Tablo 3.4. Dere agregasının elek analizi sonuçları.....	49
Tablo 3.5. GDA’ların elek analizi sonuçları.....	50
Tablo 3.6. Agregaların fiziksel özellikleri	51
Tablo 3.7. Süperakışkanlaştırıcının özellikleri	53
Tablo 3.8. Geçirimli beton karışımların teorik karışım oranları (kg/m^3) (kyd konumda)	54
Tablo 3.9. Geçirimli beton karışımların düzeltilmiş karışım oranları (kg/m^3) (kyd konumda)	54
Tablo 3.10 Kullanılan kilin kimyasal özellikleri	62
Tablo 4.1 Basınç dayanımı sonuçları.....	65
Tablo 4.2. Yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları.....	67
Tablo 4.3. Yoğunluk sonuçları	69
Tablo 4.4. Porozite değerleri	71
Tablo 4.5 Su geçirimsizliği deney sonuçları.....	73

Tablo 4.6 2D boşluk yapısı analiz sonuçları	89
Tablo 4.7. Geçirimli betonların kıvrımlılık değerleri	95
Tablo 4.8. Geçirimli betonların tıkanma sayıları	100
Tablo 4.9 BT ile hesaplanan boşluk miktarları	102



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ACI	Amerika Beton Enstitüsü
ASR	Alkali-silis reaksiyonu
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
BHA	Birim hacim ağırlık
BPT	İngiliz Sarkaç Testi
BREEAM	Bina Araştırma/Yapım Çevresel Değerlendirme Metodu
BT	Bilgisayarlı Tomografi
CH	Kalsiyum hidroksit
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
DGNB	Alman Sürdürülebilir Bina Konseyi
FHWA	Amerikan Federal Yollar İdaresi
GDA	Geri dönüşüm agregası
LCAA	Yaşam döngüsü maliyet analizi
LEED	Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik
XRF	X-Işını Floresans
XRT	X-ray Tomografi

1. GİRİŞ

Geçirimli beton kesikli gradasyon ile üretilen birbiriyle bağlantılı boşluklardan oluşan ve oldukça gözenekli olan bir özel beton türüdür (ACI, 2010). Geçirimli beton genelde tek bir boyutta iri agregaları bağlamaya/sarmaya yetecek miktarda çimento hamurundan oluşur. Tipik bir geçirimli betonun boşluk oranı ACI (2010)'da belirtildiği gibi minimum %15 olmak zorunda olup, genellikle bu oran %15-35 arasında değişir. Geleneksel betonla kıyaslandığında su/çimento oranı oldukça düşük olup, etkili agrega sarmalaması için önerilen su/çimento oranı 0.28 ile 0.40 arasında değişmektedir (Deo, 2011; Tennis et al., 2004). Geçirimli betonlarda agrega/çimento oranı ise 4/1 ile 6/1 arasında değişmektedir. Bilindiği üzere geleneksel betonda agrega beton hacminin yaklaşık olarak %60-75'ini oluştururken, bu değer geçirimli betonda %50-65 arasında değişmektedir.

Kaplama üzerinde su birikmemesi amacıyla geliştirilen geçirimli betonların avantajları şu şekilde sıralanabilir: Geçirimli betonun çevresel faydalarından en önemlisi yağmur-taşkın suyunun yer altına sızmasına olanak vermesidir. Yağmur sularının yer altına sızması ile yüzeyde su birikmesinin önüne geçildiği gibi yer altı suyunun beslenmesi açısından da büyük fayda sağlanmaktadır. Geçirimli betonlar, diğer yağmur suyu drenaj sistemlerine göre karmaşık bordürler, pompalar, oluklar gibi ihtiyaçları ortadan kaldırması nedeniyle daha düşük işçilik-yapım ve işletme maliyetine sahiptir. Yağmur suyu, su geçirmeyen geleneksel kaplamalar ile drene edilmeye çalışılırsa erozyona neden olabilir. Geçirimli beton ile bunun önüne geçilebilmektedir (ACI, 2010).

Geçirimli betonun yapısında bulunun yüksek miktardaki boşluklar nedeniyle, kaplamaların üzerinde kalan karların ve buzların erimesini hızlandırır ve suyun hemen toprağa nüfuzunu sağlar. Ayrıca tabaka üzerinde su birikmediği için buzlanma ihtimali de çok azalır. Kaplamadaki yüksek hava boşluğu, yüzey suyunun, hızla yol yüzeyinden alt tabakalara doğru drene olmasını sağlar. Böylelikle, yol yüzeyinde su birikintileri ve göllenmeler olmayacağından ve gece sürüşünde, yol yüzeyinde parlama oluşmayacağından, şerit çizgileri ve trafik işaretleri daha kolay görülebilir, yansıma sebebiyle oluşabilecek kazaların önüne geçilebilir (ACI, 2010). Geçirimli beton ile yol yüzeyinde su birikmeyeceğinden hem yol çevresini kullanan yayalar açısından hem de yoldaki görüş özelliklerini iyileştirmesi nedeniyle de sürücüler açısından avantaj sağlamaktadır. Geçirimli beton kaplamalar, LEED (Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik), BREEAM (Bina Araştırma/Yapım Çevresel Değerlendirme Metodu) veya DGNB (Alman Sürdürülebilir Bina Konseyi) gibi yeşil bina sertifika sistemlerince tanınan bir

uygulamadır. Geçirimli beton kaplamaların karışım tasarımı bölgede bulunan malzemeler kullanılarak yapılabilmektedir. Harici herhangi bir müdahale ve malzeme istemediği için diğer alternatiflere göre daha ekonomiktir. Geçirimli beton yapısında bulunan yüksek oranda boşluk nedeniyle suyu drene edebilmesi, yağmur suyunu yeraltına süzerek yüzeysel su akışını azaltması, yeraltı su kaynaklarını koruması, sürdürülebilir inşaatı desteklemesi, çevre ile alakalı endişeleri gidermeye yönelik çözümler sağlaması sebebiyle kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Tennis et al., 2004). Geçirimli betonun yaygın olarak kullanıldığı uygulamalar; kaldırımlar ve yollar, otoparklar, yaya geçitleri, tenis kortları, bahçe avluları, yüzme havuzu kenarları, geçirimli temel uygulamaları, sera altı döşemeleri ve peyzaj düzenlemeleri olarak sıralanabilir (ACI, 2010).



2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Geçirimli Beton/Poroz Beton

Geleneksel betonda kullanılan malzemelerle üretilen, ince agrega miktarı maksimum %10 olan ve %15-35 arasında boşluk içeriğine sahip olan betonlara geçirimli beton denilmektedir. Geçirimli betonun kaldırım malzemesi olarak kullanımı ilk olarak II. Dünya Savaşından sonra gerçekleşmiştir. Kaliforniya’da drenaj tabakası olarak kullanılırken, İsviçre ve diğer Avrupa ülkelerinde üst tabaka olarak kullanıldığı raporlanmıştır. Daha sonra ise yollarda sürtünmeyi ve drenajı artırmak için kaplama olarak ya da tenis kortlarında ve otoyol banketlerinde kullanıldığı belirtilmektedir (Monahan, 1981).

Geçirimli betonda ince agreganın çok az ya da hiç kullanılmaması nedeniyle boşluklu yapı oluşturulabilmektedir. Ancak iri agregayı saracak miktarda çimento hamurunun olması için dizayn aşamasında oldukça dikkatli olunmalıdır. Aynı şekilde fazla miktardaki çimento hamuru da iri agregalar arasından akarak numune altına toplanmakta ve boşlukların tıkanmasına sebep olmaktadır (Şekil 2.1) (Ferguson, 2005).

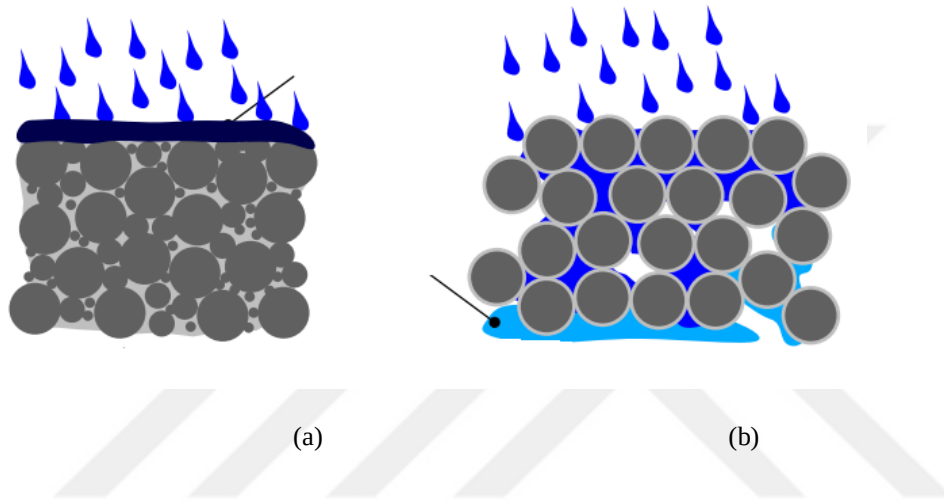


Şekil 2.1 Aşırı çimento hamurunun aşağıya doğru akması (Kia et al., 2017).

2.1.1 Geçirimli betonun avantajları

Geçirimli betonun en büyük avantajı taşkın sularının kontrol edilmesinde kullanılmasıdır. Geçirimsiz betondan üretilen tabakalardan suyun bir alt katmana iletimi sağlanamadığı için kaplama yüzeyinde göllenmeler görülmektedir. Böylelikle bu tarz kaplamalar sel baskını ve erozyon oluşumuna da yol açabilmektedir (Leming et al., 2007). Geçirimli beton ile sel sularının bir bölgede birikmesinin önüne geçildiği gibi taşkın suyu içerisinde bulunan yağ, kir gibi kirleticilerin de bir kısmı arıtılmaktadır. Bünyesindeki boşluklarda kirletici

partikülleri tutarak yeraltı suyunun da kirlenmesinin önüne geçilmektedir. Isı adası etkisini de azaltmaktadır. Isı adası yerleşim yerlerinin çevresinde bulunan kırsal alanlara göre daha fazla sıcaklığa sahip olması olarak tanımlanmaktadır. Geçirimli betonların boşluklarında hapsolan su buharlaşırken bir soğuma etkisi göstererek bu bölgelerdeki sıcaklığın düşmesine de katkı sağlamaktadır. İnce agrega kullanılmadığı için taşıt lastiği ile yüzey teması sırasındaki ses yalıtımı da sağlamaktadır. Asfalta kıyasla daha açık renkli olan geçirimli betonun yollarda kullanılması neticesinde sürücülerin gece görüşü de iyileşmektedir. Geçirimli ve geçirimsiz betonların simüle edilmiş tane yapısı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 (a) Geçirimsiz beton (b) Geçirimli beton (Zhong et al., 2018).

2.1.2 Geçirimli betonun zayıf yönleri

Geçirimli betonlardaki boşluklu yapı beraberinde düşük dayanımı getirmektedir. Herhangi bir mineral katkı kullanılmadan elde edilen geçirimli beton ancak düşük trafik yüküne maruz kalan alanlarda kullanılabilir. Ayrıca beton yüzeyi pürüzlü olduğu için araba, bisiklet gibi büyük lastikli araçların kullanımına uygunken daha küçük lastikli araçların kullanımına uygun değildir. Her ne kadar yerel malzemelerle üretilebilse de bu tarz betonların yerine yerleştirilmesi geleneksel beton ile aynı değildir. Dolayısıyla alanında uzman personel ile çalışılması gerektiği için ilk kullanım maliyeti geleneksel betona kıyasla artmaktadır. Şekil 2.3’de geçirimli betonda görülen tasarım, uygulama veya kullanımdan kaynaklı bazı bozulmalar gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Geçirimli betonlarda görülen bozulmalar (Chandrapa and Biligiri, 2016).

(a) Derz yerlerinden bozulma (b) Sökülme (c) Yüzey tıkanması

2.2. Geçirimli Betonda Kullanılan Malzemeler

2.2.1 Agregalar

Genellikle istenilen boşluk miktarının sağlanabilmesi için geçirimli betonlarda kullanılan agrega boyutları 9.5-19 mm arasında değişmektedir (ACI, 2010). Agregaların karıştırılarak kullanılması basınç dayanımını olumlu etkilerken, geçirimsizlik özelliklerini azaltmaktadır (Schaefer et al., 2006). Çakıl taşı gibi yuvarlak agregalar daha düşük boşluk oluşumuna neden olarak basınç dayanımını artırır. Köşeli agregalar ise yerleştirme sırasında tek bir yöne doğru yöneceklerinden aderansı ve temas yüzeyini etkiler. Yassı ve uzun agregaların kullanımından ise kaçınılması önerilmektedir (Lian and Zhunge, 2010; Kevern et al., 2010; Tennis et al., 2004). Kesikli gradasyon ve büyük agrega boyutu sayesinde daha boşluklu ve geçirimli bir beton üretilmesine olanak sağlanmış olunur. Ancak bazı çalışmalarda daha yüksek dayanım elde edilebilmek için 2.36-9.5 mm aralığında da agregalar (%7'ye kadar) kullanılmıştır (Nguyen et al., 2014; Huang et al., 2009; Crouch et al., 2007; Kevern et al., 2009; Deo and Neithalath, 2011; Henderson and Tingle, 2012). Geçirimli betonda kullanılan agregaların fiziksel özellikleri geleneksel betonda kullanılanlar ile benzerdir.

Geleneksel betonda olduğu gibi geçirimli betonda da agregaların boyutu, şekli ve gradasyonları gibi fiziksel özellikleri, mekanik, durabilite ve geçirimsizlik karakterleri gibi özelliklerini kontrol etmede önemli bir rol oynamaktadır (Kevern et al., 2010; Jain and Chouhan, 2011). Agregalar boyutundan farklı olarak, agregaların türü de geçirimli beton özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kireçtaşı agregası yaygın olarak kullanılsa da yapılan çalışmalar dolomit agregaları ile üretilen geçirimli betonların aynı boşluk miktarlarında daha yüksek basınç dayanımına sahip olduklarını göstermiştir (Cosic et al., 2014).

El-Hassan et al. (2019) geri dönüştürülmüş agregalarla yapılan geçirimli beton özelliklerini incelemiş ve sabit su/çimento (0.4) oranında üretilen karışımda yüksek fırın cürufu, çimento ile %50 oranında yer değiştirerek ve geri dönüşümlü agregaları ise normal agregalarla %10, 20, 40, 70 ve 100 ikameli olacak şekilde kullanmıştır. Yazarlar test edilen betonların basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları, geçirimlilik, boşluk miktarları ve tıkanmaya bağlı olarak geçirimliliklerinde değişmeyi ve aşınma direncini saptamıştır. Geçirimli betonda kullanılan geri dönüştürülmüş agrega oranının artmasıyla porozitenin arttığı ancak işlenebilirliğin azaldığı belirtilmiştir. Cüruf kullanımında ise işlenebilirliğin arttığı raporlanmıştır. Tıkanma potansiyeli 20 yıllık bir döngüde simüle edilmiş, ilk 5 yıl tıkanmanın oldukça fazla olduğu ve sonraki yıllarda giderek azaldığı görülmüştür. Cüruf ilavesinin mekanik davranışı iyileştirebileceği ve aşınma direncinin de daha çok geri dönüşümlü agrega kullanımından etkilendiği araştırmada rapor edilmiştir.

Sahdeo et al. (2020) 4 farklı boyutta doğal iri agrega (20 mm, 12.5 mm, 10 mm ve 4.75 mm) ile nehir kumu (%5 ve %10) kullandıkları çalışmada su/çimento oranını 0.30, 0.35 ve 0.38 olacak şekilde seçmiştir. Sonuç olarak iri agregaların betonda daha yüksek porozite ve birbirleriyle bağlantılı boşluklar oluşturduğu, ince agrega kullanımının ise basınç dayanımında yükselmelere neden olmakla birlikte porozite ve su geçirimliliğini azalttığı belirtilmiştir. Agrega gradasyonu olarak %30 10 mm ve %70 4.75 mm agrega kullanılarak oluşturulan karışımın hem basınç dayanımı hem de geçirimlilik ve porozite özellikleri açısından en iyi sonucu verdiği ifade edilmiştir.

Malaiskiene et al. (2020), iri agrega miktarının geçirimli betonda sızdırma miktarı, diğer fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek için 5 farklı oranda (%50, 70, 80, 90 ve 100) 8-16 mm boyutlarındaki iri agrega kullanmıştır. Araştırmacılar ürettikleri geçirimli betonlar içerisinde %70 oranında 8-16 mm'lik iri agrega içeren karışımın basınç dayanımı ve sızdırma miktarı göz önüne alındığında en ideal sonucu verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca bu yolla üretilen geçirimli betonlardaki 28 günlük basınç dayanımının 10 MPa olduğunu ifade edilmiştir.

Rezaei Lori et al. (2021) bakır cürufu agregasının geçirimli beton özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla %7 9.5 mm, %70 4.8 mm ve %23 ince agrega olacak şekilde dolomit agregası kullanılarak üretilen geçirimli betonu kontrol grubu olarak adlandırmış, tane aralığı 1.16-4.75 mm arasında değişen bakır cürufu agregası ile ince agrega ile agrega hacminin %20, %40, %60, %80 ve %100 olacak şekilde ikameli kullanılmıştır. Su/çimento oranı bütün karışımlar için 0.3 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Bakır cürufu kullanılan karışımların genellikle basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları iyileşmiş, en yüksek artış ise %100 bakır cürufu kullanılan numunede görülmüş ve basınç, yarmada çekme ve eğilme

dayanımlarındaki artış bu karışımda sırasıyla %31, %17 ve %10 olmuştur. Bakır cürufu katkısının aynı zamanda aşınma direncini de arttırdığı, %100 oranında kullanılan bakır cürufu agregası sayesinde aşınma direncinin kontrol karışımına kıyasla %40 oranında iyileştiği belirlenmiştir.

Lori et al. (2019) iri agrega olarak bakır cürufu kullanılan geçirimli betonun mekanik ve hidrolik özelliklerini incelemek amacıyla, dolomit agregası ve bakır cürufunu (%0, 20, 40, 50, 60, 80 ve 100) ikame olacak şekilde kullanmış; porozite, görüntü işleme yöntemiyle porozite, geçirimlilik, basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak bakır cürufu miktarının artırılmasıyla geçirimli betonun porozitesi ve geçirimliliğinin de arttığı görülmüştür.

Ibrahim et al. (2020) inşaat atıklarının agrega olarak geçirimli betonlarda kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla doğal agrega, geri dönüştürülmüş iri agrega (4.75-10 mm), nehir kumu ve geri dönüştürülmüş ince agreganın kullanıldığı çalışmada boşluk oranını %15, su/çimento (s/ç) oranını ise 0.3, 0.35 ve 0.40 olacak şekilde seçmiştir. Bu çalışmada geçirimli beton karışımında kullanılan inşaat atıkları beton hacminin ortalama olarak %72'si olmuştur. Sonuç olarak ince agrega kullanılmadan sadece geri dönüştürülmüş iri agrega ile üretilen geçirimli betonlar yüksek s/ç oranına bağlı olarak daha ince bir hamur tabakası oluşmasına neden olmuştur. Ancak kum ve geri dönüştürülmüş ince agreganın birlikte kullanıldığı karışımlarda harç kalınlığı artarak porozitenin azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla daha az poroz bir sistem oluşmuş ve ince agrega kullanılmayan karışımlara kıyasla daha düşük bir geçirimlilik katsayısı elde edilmiştir.

Shen et al. (2020), yüksek oranda atık cam kullanarak ürettikleri geçirimli beton için 2.36-5 mm tane aralığında granit agregası ve aynı tane aralığında atık cam şişelerden elde edilen cam agregası kullanmışlardır. Silis dumanı ve atık şişelerin ince öğütülmesiyle elde edilen cam tozu çimento ile ikame edilerek kullanılmıştır. Doğal agrega yerine atık cam agregasının kullanılmasıyla geçirimli betonların basınç dayanımları azalırken su geçirimliliği artmıştır. Geçirimli betonların termal iletkenliği atık cam agregası kullanımıyla azalırken, atık camın agrega olarak kullanılmasıyla geçirimli betonlarda ASR (alkali-silika reaksiyonu) kaynaklı genleşmenin sınırlı olduğu, ASR jelinin ise boşlukların yakınındaki cam agregaların dış yüzeyinde oluştuğu söylenmiştir.

Vieira et al. (2020) geri dönüştürülmüş agrega ve uçucu kül miktarının geçirimli beton performansı üzerindeki etkisini incelediği çalışmada, maksimum tane boyutu 9.5 mm olan doğal ve geri dönüştürülmüş agrega kullanmış, su/bağlayıcı oranı 0.25 ve 0.30 olarak seçilmiş ve uçucu kül karışıma çimento ile %10 oranında ikame edilerek katılmıştır. Tıkanma performansını da incelemek

amacıyla maksimum tane boyutu 0.6 mm olan kum tıkayıcı olarak kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş agregalar ise doğal agregalarla %0, %25, %50, %75 ve %100 olacak şekilde ikame edilerek kullanılmıştır. Sonuç olarak su/bağlayıcı oranı azaldıkça mekanik özelliklerin de zayıfladığı, geri dönüştürülmüş agrega kullanımı ile geçirimsizliğin arttığı, her iki su/bağlayıcı oranı için de %75 ve %100 oranlarda kullanılan geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen karışımlarda tıkanmanın daha yüksek olduğu, %25 oranında ise geçirimsizlik değerlerinin en ideal seviyede olduğu belirlenmiştir.

Zhang et al. (2020), agrega olarak çelik cürufunu ve bağlayıcı olarak farklı mineral katkıları kullanıp geçirimli beton karışımlar üretmiştir. Granüle cüruf, uçucu kül ve silis dumanı çimento ile ikame edilerek kullanılırken, çelikten elde edilen cüruf agregasının tane aralığını 5-10 mm olarak belirlemiştir. Yüksek bağlayıcı miktarı ile basınç dayanımı artarken açık porozite ve geçirimsizlik azalmakta, kullanılan tüm mineral katkıların sadece çimento ile üretilen geçirimli betonlara kıyasla basınç dayanımını iyileştirdiği ancak granüle cürufun uçucu kül ve silis dumanına kıyasla daha az etkili bir mineral katkı olduğu ifade edilmiştir.

Abdulwahid (2021), farklı taşlardan elde edilen tozların geçirimli beton dayanımı üzerindeki etkisini incelediği çalışmada kumtaşı, marlaşı, kıltaşı, kireçtaşı tozlarının 300 mikron elekten geçen kısımları kullanılmış ve tozlar iri agrega ile %7 oranında ikame edilerek kullanılmıştır. İri agrega ile ikame edilerek toz kullanımının üretilen betonda hem kabul edilebilir bir geçirimsizlik gösterdiği hem de basınç dayanımını iyileştirdiği belirtilmiştir. Kumtaşı ve marlaşı kullanımının geçirimli betonlarda dayanım kazanma hızını arttırdığı, kumtaşı (%45.7) ve marlaşı (%35.9) daki yüksek silis miktarının hidrasyon sırasında oluşan CH ile reaksiyona girerek ikincil C-S-H oluşturduğu ve böylelikle daha yüksek basınç dayanımları elde edildiği rapor edilmiştir.

Zhang et al. (2020) sabit seviyeli ve azalan su seviyeli iki geçirimsizlik yöntemini karşılaştırmak için 2.36 - 4.75 mm, 4.75 - 9.5 mm, ve 9.5 - 13.2 mm tane aralığında bazalt agregalarıyla beton üretmiştir. Her bir agrega gradasyonu için üç farklı çimento/agrega oranı (0.22, 0.24 ve 0.26) seçilmiş ve su/çimento oranı 0.30'da sabit tutulmuştur. Sonuç olarak ise sabit bir su/çimento oranında karışım daha iri tane boyutuna sahip olan agrega miktarı arttıkça daha yüksek su geçirimsizliği elde edilmiş ve daha ince agrega boyutları ile su geçirimsizliği azalmıştır. Azalan seviyeli geçirimsizlik yöntemiyle ölçülen değerlerin sabit seviyeli geçirimsizlik yöntemine kıyasla %100-300 daha fazla olduğu, azalan su seviyeli yöntemin sabit seviyesinin üçte biri ölçüde zaman aldığı ve tek bir kişiyle rahatlıkla tamamlanabileceği açıklanmıştır.

Yan et al. (2020) geri dönüştürülmüş agregaların geçirimli betonda kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, 4.75-31.5 mm tane aralığında iri agreg ve 0.075-4.75 mm aralığında ince agreg kullanarak geçirimli beton karışım hesaplarını yapmış ve üretmişlerdir. Basınç, çekme dayanımı, donma direnci, kuruma büzülmesi, su geçirimliliği deneyleri yapılmıştır. GDA (geri dönüştürülmüş agreg) oranı arttıkça mekanik özellikler de buna paralel olarak azalmış, %30 oranında kullanılan GDA ile en iyi donma direnci elde edilmiş, GDA oranı arttıkça kuruma büzülmesi de artmış ve buna sebep olarak ise GDA'lardaki yüksek su emme kapasitesi gösterilmiştir.

Nassiri et al. (2021), geri dönüştürülmüş karbon liflerin değerlendirildiği geçirimli betonlarda mekanik ve durabilite özelliklerini araştırdıkları çalışmada 4.75-9.5 mm tane aralığında çakıl taşı kullanılmış, su/çimento oranı 0.34'te sabit tutulmuş ve üreticiden temin edilen atık karbon lifler ve sentetik lifler iri agreg ile hacimce %0.5, %1.0 ve %2.0 oranlarında yer değiştirerek kullanılmıştır. Karbon liflerin hacimce %2 oranında kullanıldığı karışımlarda donma-çözülme direnci oldukça iyileşmiş, kontrol numunesi 63 döngüye kadar dayanabilirken %2 lif katkısı ile üretilen geçirimli betonlar %5'ten az kütle kaybıyla 238 döngüye kadar dayanabilmişlerdir. Buz çözücü kimyasallara karşı pullanma direnci de lif katkısıyla iyileşmiş, kontrol numunesinin 10 döngü ile dayanabildiği çözücülere lifli numuneler 20 döngü boyunca dayanabilmişlerdir.

Yap et al. (2018) geri dönüştürülmüş agregalar ile doğal agregaları belli oranlarda kullanarak hazırladığı geçirimli betonların basınç, yarmada çekme, geçirimlilik, sürtünme direnci, aşınma direnci ve sera gazı emisyonu analizlerini yapmıştır. 4.5-9.5 mm tane aralığında doğal ve geri dönüştürülmüş agreg kullanan araştırmacılar, geri dönüştürülmüş agregaları %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında doğal agreg yerine kullanmışlardır. %100 oranında geri dönüştürülmüş agreg ile üretilen geçirimli betonlar CO₂ emisyonunu %24 oranında azaltırken mekanik özellikleri olumsuz etkilemiştir. GDA oranı arttıkça oluşan boşluk sayısı ve dolayısıyla su geçirimliliği artmıştır. Sürtünme direnci ise standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde kalırken agreg kökeninden bağımsız olduğu belirtilmiştir.

Lu et al. (2019), geri dönüştürülmüş seramik agregası ve biyolojik bazlı poliüretan bağlayıcı kullanarak sürdürülebilir bir geçirimli kaldırım malzemesi üretmeyi amaçlamış ve bu malzemenin çevresel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Geleneksel agreganın (2-5.6 mm) %70'i geri dönüştürülmüş seramik agregası ile yer değiştirilmiş ve üretilen yeni malzemenin oldukça yüksek basınç dayanımına sahip olduğu ve aşınmaya karşı geleneksel geçirimli kaplamalara kıyasla, 2 kat daha dirençli olduğu görülmüştür. Daha iyi kayma direnci ve akustik absorplama gösterdiği ve asfaltta olduğu gibi ekstra bir ısıtma gerekemediği için

daha az enerjiye ihtiyaç duyulduğu ve sera gazı üretilmesinin önüne geçildiği söylenmiştir.

2.2.2. Bağlayıcı Malzemeler

Geçirimli beton genellikle Portland çimentosu kullanılarak üretilmektedir. Portland çimentosu haricinde silis dumanı, uçucu kül gibi puzolanik malzemeler de geçirimli betonda kullanılmaktadır. Bu malzemeler çimento ile belirli oranlarda ikame edilmektedir. Ancak kullanılan bu malzemelerin etkisi, geleneksel betonda gösterdikleri etkiden farklı olmaktadır. Fu et al. (2014)'de belirtildiği üzere belirli bir sınırı aşan mineral katkı neticesinde basınç dayanımında azalma görülmektedir.

Geçirimli betonu sarmalayan bağlayıcı malzemenin kalınlığının geçirimli betonun yapısal ve hidrolik özellikleri üzerinde oldukça yüksek bir etkisi vardır. Deo'ya (2011) göre, farklı boyutlardaki agregalarla üretilen geçirimli betonların dijital bir mikroskop ile ölçmüş ve iri agregaların daha kalın bir çimento hamuru ile sarılırken, ince agregalarda bu katmanın daha ince olduğunu gözlemlemiştir. Sebep olarak ise ince agregaların daha yüksek yüzey alanına sahip olmasını göstermiştir. Aynı çalışmada ayrıca artan agrega boyutuyla elastik modül ve basınç dayanımında da bir artış gözlenmiştir ki bu sonuç agrega boyutunun artmasıyla basınç dayanımının düştüğünü söyleyen diğer çalışmalarla çelişmektedir. Bu da farklı çalışmalarda kullanılan farklı karışım dizaynlarıyla ilişkilendirilebilir.

Bir başka çalışmada ise, geçirimli betonların hamur kalınlıklarını belirlemek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir (Torres et al., 2015). Çalışma, çimento hamur kalınlığını dayanım ve hidrolik özelliklerle ilişkilendirmiş ve hamur kalınlığındaki artışın, dayanımda artışa ve porozite ve geçirimsizlik gibi hidrolik özelliklerde azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca, agrega boyutundaki artışın, çimento tarafından sarılmadaki azalmaya bağlı olarak dayanımı azalttığı söylenmiştir.

Saboo et al. (2019), uçucu kül ve metakaolinin geçirimli beton üzerindeki etkisini incelemek için uçucu külü karışıma %0 ile %20 arasında, metakaolini ise %0 ile %2 arasında çimento ile ikame ederek kullanmış ve yoğunluk, porozite, geçirimsizlik ve basınç dayanımı gibi özelliklerini incelemiştir. Sonuç olarak %2 metakaolin ilavesinin poroziteyi azalttığı ve yoğunluğu arttırdığı görülmüş ve benzer sonucun uçucu kül katkılı numunelerde de görüldüğü belirtilmiştir. İstatistiksel analiz, kütleme şartlarının geçirimli beton üzerinde bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Tüm sonuçlar birleştirildiğinde yüksek dayanımlı geçirimli beton üretmek için çimento miktarını arttırmak yerine uçucu kül ve metakaolin gibi malzemelerin kullanılmasının daha yerinde bir karar olacağı ifade edilmiştir.

Chen et al. (2019), cüruf ve uçucu kül kullandığı geçirimli betonların mühendislik özellikleri ve çevresel etkilerini inceledikleri çalışmada, geleneksel geçirimli betonla kıyaslandığında cüruf ve uçucu kül kullanılan geçirimli betonun donma-çözülme direncinin benzer olduğu ancak daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğunu (özellikle çekme ve eğilme dayanımlarında) belirtmişlerdir. Cüruf ve uçucu küllü karışımların daha büyük hava boşluklarına sahip olmaları nedeniyle daha yüksek hidrolik iletkenlik gösterdikleri ve son olarak cüruf ve uçucu kül kullanımının, Portland çimentosuna kıyasla %6-9 arasında enerji tasarrufuna ve %11-19 arasında ise sera gazı azaltımına yol açtığını ifade etmişlerdir.

Huang et al. (2020), agrega türü, boyutu ve mineral katkıların geçirimli beton üzerindeki etkilerini incelemiş ve dolerit ve granit olmak üzere iki farklı agrega türü kullanılmıştır. Her iki agrega türü için de 5-10 ve 10-15 mm olmak üzere iki farklı gradasyon tercih edilirken mineral katkı olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanılmıştır. Silis dumanı %3, %6 ve %9, uçucu kül ise %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. Su/bağlayıcı oranları 0.20 ile 0.30 arasında değişmekte ve karışımlarının hedeflenen porozite değerleri ise %12 ile %21 arasında olacak şekilde belirlenmiştir. Basınç dayanımı, geçirimlilik gibi özellikler incelenmiştir. Dolerit agregası kullanılarak daha yüksek basınç dayanımı ve geçirimlilik elde edilmiştir. Dolerit ve granit agregaları için optimum su/çimento oranının 0.25 olduğu, dolerit agregası ile üretilen 30 MPa basınç dayanımına sahip geçirimli betonların 5-10 mm tane aralığında, 0.25 su/çimento oranı ve %18'lik porozite değeri ile elde edilebileceği söylenmiştir. Silis dumanı katkısının basınç dayanımını iyileştirdiği, ancak katı oranı arttıkça geçirimliliğin önce arttığı ve daha sonrasında azaldığı, dayanım ve geçirimlilik açısından en ideal oranın %6 olduğu raporlanmıştır. Uçucu kül miktarı arttıkça ise basınç dayanımının azaldığı, %10 oranında uçucu kül katkısı ile en yüksek geçirimlilik değeri elde edildiği, silis dumanı ve uçucu külün beraber kullanıldığı bütün karışımlarda basınç dayanımının yükseldiği ve son olarak en yüksek geçirimlilik değerinin %0 uçucu kül ve %6 silis dumanı içeren karışımda elde edildiği belirtilmiştir.

Lo et al. (2021), pirinç çeltiği ve kömür külünün, çimento ile ikame edilebilirliğini araştırmış ve bunun için kömür külü, taban külü ve pirinç çeltiği külü olmak üzere üç farklı kül ve 5-10 mm tane aralığına sahip agrega kullanmışlardır. Çimento ile ikame edilerek kullanılacak olan külleri üç farklı sıcaklıkta (550, 900 ve 1100°C) sinterlemeye maruz bırakmışlardır. 150 µm'den daha büyük parçacıkların pozolanik malzeme olarak kullanılamayacağı göz önüne alınarak 75 µm'lik bir elek kullanılmış ve yakılıp, daha sonra bilyeli öğütücüde öğütülen küller elenmiştir. Hacimce %30 oranında çimento ile ikame edilerek kullanılan küller ile üretilen geçirimli betonların basınç dayanımları, porozite ve su geçirimlilikleri, SEM yardımıyla iç yapıları ve ağır metalleri süzme özellikleri kontrol edilmiştir.

Yaşam döngü değerlendirmesi (LCA) ile geçirimli betonun karbon ayak izi çıkarılarak kaynak kullanımı, enerji sarfiyatı gibi konularda da bir yaklaşım yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda sinterlenerek elde edilen küllerin ASTM C618'de belirtilen F sınıfını kimyasal kompozisyon açısından sağladığı ve puzolan olarak kullanılabileceği, küllerin karma olarak kullanılmasının tekli kullanımlara kıyasla daha yüksek dayanım sağladığı ve bu şekilde üretilen geçirimli betonların basınç dayanımlarının 40 MPa ve üzeri olduğu, daha az puzolanik etkinliğe sahip malzemeye daha fazla etkinliği olanın beraber kullanılmasıyla sinerjik bir etki elde edildiği ve daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılabilirdiği açıklanmıştır. Üretilen geçirimli betonların basınç dayanımları 23 ile 61 MPa arasında değişirken, boşluk miktarları ise %8.3 ile 35.21 arasındadır. Basınç dayanımı ile porozite ve geçirimlilik arasında zayıf bir ters ilişki olduğu, 1100 °C'de sinterlenen küllerin ağır metalleri uzaklaştırmada daha etkili olduğu ve kül kullanımının farklı sıcaklıktaki sinterlemelere de bağlı olarak karbon kullanımını %9.9 ile %20.6 arasında azalttığı söylenmiştir.

Qin et al. (2021), toz halindeki biyolojik kömürün çimento yerine geçirimli betonlarda kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada kontrplak tahtalar pulverize edilerek atık haline getirilmiştir. Bunun için inşaatlardan temin edilen atık haldeki kontrplaklar 50°C'den 500°C'ye 10°C/dk hızda ısıtılmışlar ve 500°C'de pulverize olma işleminin tamamlanması için 2 saat bekletilmiştir. Oda sıcaklığına soğutulduktan sonra öğütülerek ilgili eleklerden elenen biyokömür iri ve ince olarak iki kategoriye ayrılmıştır. XRF (X-Işını Floresans) ile elde edilen kimyasal kompozisyonunda C oranı %85.13 olarak belirlenmiştir. Biyokömür/çimento oranı %0, %0.65, %3.2, %6.5, %9.5 ve %13.5 olacak şekilde ve 3-10 mm tane aralığında kireçtaşı agregası kullanılarak karışımlar üretilmiştir. Porozite, geçirimlilik, evaporasyon, basınç ve yarmada çekme dayanımlarına ek olarak kapiler su emme ve örnek albedosunun da incelendiği çalışmada biyokömür katkısının porozite ve geçirimlilik üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı, ama basınç ve yarmada çekme dayanımını %6.5 ve üzerindeki oranlarda iyileştirdiği ve biyokömür kullanılmayanlara kıyasla aynı ölçülerde güneş ışığını absorpladığı ifade edilmiştir.

Liu et al. (2019a) çevre dostu geçirimli beton üretmek için silis dumanı kullanmış ve silis dumanını çimento ile hacimce %3, %6, %9 ve %12 oranlarında yer değiştirerek betonun porozite, geçirimlilik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme direncini incelemiştir. Silis dumanı ilavesinin geçirimli betonun mekanik özelliklerini ve donma-çözülme direncini iyileştirdiği ve geçirimlilik ve porozite üzerindeki etkisinin ise ihmal edilebilir düzeyde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Liu et al. (2019b), uçucu külün geçirimli betonda kullanımını araştırmış ve uçucu külü çimento ile hacimce %3, %6, %9 ve %12 oranlarında yer değiştirerek

kullanmış ve porozite, geçirimlilik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma-çözülme dirençlerini ölçmüştür. Sonuçlar uçucu kül katkısının geçirimli betonun erken yaşlardaki (28 gün) basınç ve eğilme dayanımını azalttığı ancak ileri yaşlarda (150 gün) aynı mekanik özelliklerin yüksek olduğunu göstermiştir. Tam tersi etki ise donma-çözülme direncinde görülmüştür. Uçucu külün geçirimli beton üzerinde pozitif bir etkisinin olmadığı ancak atık malzemenin değerlendirilmesi açısından belirli dozajlarda betona ilave edilebileceği söylenmiştir.

Pachideh et al. (2020), zeolit, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufundan oluşan puzolanlar ve maksimum tane boyutu 19 mm olan çakıl taşı agregası kullanarak s/ç oranları 0.35 ile 0.45 arasında değişecek şekilde poroz numuneler üretmiş ve mineral katkıları çimento ile %10 ve %20 oranlarında ağırlıkça yer değiştirilmiştir. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katkısının basınç dayanımını %60, çekme dayanımını ise %300 oranında arttırdığı ve zeolit, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun su absorplama kapasitesini iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Adil et al. (2020), silis dumanı kullanımının geçirimli betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için 4.75-9.5 mm tane aralığındaki dere ve kireçtaşı agregası, ince agrega (77-79 kg/m³) ve silis dumanı (17-31-44-57-69 kg/m³) kullanarak şekilde 0.27 ile 0.32 arasında değişen su/bağlayıcı oranlarında karışımlar üretmişlerdir. Çimento hamuru için yapılan reoloji deneyinde %5.5 oranında silis dumanı kullanımının optimum işlenebilirlik sağladığı, akışkanlaştırıcı miktarının sabit tutulduğu karışımlarda silis dumanı ilavesi %5'i geçtiğinde karışımın daha yapışkan olduğu ve bunun boşluk miktarının artmasına sebep olurken dayanım ve durabiliteyi azalttığı söylenmiştir.

Zawawi et al. (2020), uçucu külün ince agrega ile yer değiştirilerek kullanıldığı, palmye ağacı artıklarıyla üretilen hafif agregalı betonların mekanik ve durabilite özelliklerini incelemek için uçucu kül muhtevası %0 ile %40 arasında değişen 5 karışım hazırlamış ve numunelerin taze ve sertleşmiş hal özellikleri ile sülfat dirençlerini ölçmüştür. Sonuç olarak, %10'luk uçucu kül kullanımının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin daha olumlu olduğu ve sülfat etkisine karşı daha yüksek dayanıklılık sağladığı ve uçucu kül ve palmye ağacı kabukları gibi atık malzemelerin doğal granit ve nehir kumunun temin edilemediği durumlarda kullanılabileceği söylenmiştir.

Sonuç olarak, sıkıştırma ve karışım dizaynları hesaba katılmaksızın, çimento miktarının artırılması, agregayı sarmalayan hamur kalınlığının artmasına neden olmaktadır. Bu da daha yüksek dayanıma neden olmakla beraber, azalan geçirimlilik ile geçirimli beton üretmedeki amaçtan sapılmaktadır.

2.2.3. Kimyasal Katkılar

Geçirimli betonda kullanılan kimyasal katkıları da geleneksel betondaki kullanım amacı doğrultusunda, istenilen özelliklerini iyileştirmek için katkı (ACI, 2010). Geçirimli betonlar genellikle sıfır çökme değerine sahiptir ki bu da işlenebilirliği sağlamak için katkı kullanımını zorunlu kılmaktadır. Su azaltıcı katkıları düşük su/çimento oranlarında yeterli akışkanlık sağlarken, geciktirici katkıları, çimentonun hidratasyon hızını azaltarak ve hidratasyonun erken evrelerinde oluşan yüksek hidratasyon ısını azaltarak işlenebilirliği uzatırlar. Geciktirici katkıları aynı zamanda yağlayıcı etki göstererek, yoğun kıvamdaki karışımların karıştırıcıdan boşaltılmasına da yardımcı olurlar. Birçok çalışma işlenebilirliği sağlamak için akışkanlaştırıcı kullanmış ve ACI'da (2010) geçirimli betonda kullanılabilecek kimyasal katkıların uyması gereken standartlar verilmiştir. Örneğin özellikle saha uygulamalarında priz geciktirici katkıları kullanılırken, hava sürükleyici katkıları kullanılarak soğuk havalarda kullanılacak betonun donma-çözülme direnci iyileştirilmektedir (Schafer et al., 2006; Kevern, 2008; Kevern et al., 2010). Ancak henüz geçirimli beton içerisindeki sürüklenmiş havanın ölçülebilmesi için güvenilir bir yöntem önerilmemiştir. Dolayısıyla özellikle sahada donma-çözülme direnci için yeterli ve gerekli hava sürüklenmesi oldukça zordur.

Da Costa et al. (2021), reoloji düzenleyici katkı ve su/çimento oranının geçirimli betonlardaki boşluk oranı üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Bunun için seçtikleri kimyasal katkının hem priz alma süresini geciktirdiğini hem de karışıma daha fazla işlenebilirlik kazandırdığını söylemişlerdir. Kullanılan kimyasal katkıya ek olarak 2.36-12.5 mm tane aralığında bazalt agregası ve erken dayanımı yüksek Portland çimentosunun kullanıldığı çalışmada sertleşmiş haldeki yoğunluk ve porozite ASTM C1754'ye, geçirimsizlik ise Darcy Yasasına göre belirlenmiştir. Karışımların ayrıca basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülleri incelenmiştir. Öngörülen yoğunluk 2000 kg/m³, porozite %25 ve su/çimento oranı 0.24, 0.26, 0.28, 0.30 ve 0.32 olacak şekilde karışımlar tasarlanmıştır. 0.30 su/çimento oranına sahip karışımda kimyasal katkı kullanılarak ve kullanılmadan üretilen geçirimli betonlar kıyaslandığında katkı kullanımının basınç ve eğilme dayanımını sırasıyla %46 ve %19 oranlarında arttırdığı görülmüştür. Katkı kullanımı ile taze haldeki geçirimli betonların viskozitesini arttırmış ve agrega ile hamur arasında daha iyi bir aderans sağlamıştır. Aynı seviyedeki porozite değerleri için düşük su/çimento oranına sahip numuneler, yüksek su/çimento oranına sahiplere kıyasla daha yüksek geçirimsizlik göstermişlerdir. Artan su/çimento oranı ile daha iyi bir işlenebilirlik ve daha yoğun bir karışım elde edilmekte, çimento hamurunun daha akışkan olması ile hamur içerisindeki boşlukların dağılımı ve şekilleri değişmekte ve su geçirimsizliği azalmaktadır. Su/çimento oranındaki değişikliklerin geçirimli betonu, geleneksel beton gibi etkilemeyeceği bilinen bir

gerçek olmakla beraber katkı kullanımının agrega ve hamur arasındaki bağı kuvvetlendirdiği, 0.24 su/çimento oranına sahip ve en yüksek oranda katkı kullanılarak üretilen karışımın basınç dayanımının değişmediği raporlanan bir diğer sonuçtur. Aynı boşluk oranına sahip numunelerde bile su/çimento oranındaki değişimin eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin gözlenebilir olduğu söylenmiştir. 2 MPa civarında eğilme dayanımı ve 15 GPa'lık bir elastisite modülü ise tüm karışımlardan elde edilen bir diğer değerdir.

2.3. Karışım Dizaynı

Farklı çalışmalar farklı özellikleri de dikkate alarak geçirimli beton için karışım dizaynları ve oranları önermiştir (Nguyen et al., 2014; Yahia and Kabagire, 2014). Bunların arasından en sık kullanılan yöntem ise Nguyen et al. (2014) tarafından önerilen, agregaları sarmalayacak yeterlilikte çimento hamuru üretmeyi amaçlayan dizayndır. Agregaları sarabilecek yeterlilikte çimento hamur hacmi, küresel agregaların yüzey alanına bölünerek elde edilmiştir. Yahia and Kabagire (2014) ise, hamur hacminin (PV), partiküller arası boşlukların (IPV) oranına dayanarak bir yöntem önermiş, Deo and Neithalath (2011) ise, geleneksel betonda kullanılan hacim yöntemini kullanarak karışım oranlarını belirlemiştir. Karışımlarda kullanılan agregaların yoğunlukları 1400-1800 kg/m³ arasında ve agrega/çimento oranı ise 4:1 ile 12:1 arasında değişmektedir. Ek olarak su/çimento oranı 0.25 ile 0.45 arasındadır. Geçirimli beton tasarımında kullanılan genel malzeme oranları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Geçirimli betonda kullanılan genel malzeme oranları (AlShareedah and Nassiri, 2021).

Malzeme	Genel aralık
Çimento miktarı (kg/m ³)	280-310
İri agrega miktarı (kg/m ³)	1440-1800
İnce agrega miktarı (kg/m ³)	85-205
Su/çimento oranı (s/ç)	0.26-0.45
Agrega/çimento oranı (a/ç) (kütlece)	4:1-4.5:1
İri agrega büyüklüğü (mm)	2.38-19

Yüksek basınç dayanımı çimento miktarını arttırarak elde edilebilir ancak aşırı çimento kullanımı boşlukların doldurulması ve dolayısıyla porozitenin azalmasına neden olmaktadır. Aksine, yetersiz çimento kullanımı ise agregaların yeterince sarılmaması ve düşük basınç dayanımına yol açmaktadır. ACI 2010'a göre optimum çimento miktarı agrega boyutuna göre değişmektedir. Ancak genel olarak geçirimli beton için ideal su/çimento oranının 0.25 ile 0.45 arasında olduğu ifade edilebilir. Ghafoori and Dutta (1995), agrega/çimento oranı 4-6 için ideal

su/çimento oranının 0.37-0.42 olduğunu söylemiştir. Smith (2004), ise 0.27-0.31 arasındaki su/çimento oranının yeterli bir geçirimli beton performansı için gerekli olduğunu belirtmiştir. ACI komitesine (ACI 2010) göre, agregaların yeterli bir şekilde sarılması ve hamur stabilitesi için su/çimento oranının 0.26-0.40 arasında olması gerekmektedir. Düşük su/çimento oranı karışım sırasında topaklanmaya ve beton karışımının yapışkan olmasına neden olurken, yüksek su/çimento oranı ise agrega etrafında daha ince bir hamura sebep olmakta ve böylece çimento hamuru agrega aralarından akıp gitmekte ve boşlukları tıkamaktadır (Meininger, 1988). Akıp giden çimento hamuru lokal tıkanmalara sebep olmakta ve özellikle betonun alt tabakasında yoğun bir şekilde hamur birikmesine sebep olmaktadır. Bu durumda olan geçirimli betonlar yüksek boşluk oranına sahip olmasına rağmen düşük su geçirimsizliği göstereceklerdir. Geleneksel betondaki basınç dayanımı ile su/çimento arasındaki ters orantı burada geçerli değildir. Sabit bir çimento ve agrega miktarında, su/çimento oranı arttıkça basınç dayanımı da artar çünkü artan hamur hacmi açık boşlukları belli ölçüde doldurmaktadır. Tersisi durumda s/ç oranını azaltmak ise boşluk miktarını ve geçirimsizliği artırır (Schaefer et al., 2006).

Açık boşluklu yapısı ve yüksek yüzey alanı nedeniyle geçirimli beton, geleneksel betona kıyasla küremeye karşı daha hassastır. Sahada geçirimli betonların kürlenmesi genelde plastik bir kaplama yardımıyla yapılır. Kürlenme, betonun yerine yerleştirilmesinden itibaren 20 dakika içerisinde başlamalı ve 7-10 gün sürmelidir (soğuk bölgelerde daha da uzun olabilir). Uygun bir şekilde kürlenmemiş geçirimli betonda hamur yeterli basınç dayanımına ulaşmadan kurur ve böylece betondan agregalar sökülebilir (Tennis et al., 2004; Smith, 2004). Ancak sahada kalite kontrol ve uygun sıkıştırma ve kürlenmenin elde edilebilmesi oldukça zordur.

Agrega/çimento (a/ç) oranı genellikle 4-5 arasında değişmektedir. A/ç oranının artması geçirimsizliği arttırmakta ancak agrega tanelerini saracak daha az hamur bulunması sebebiyle basınç dayanımını azaltmaktadır (Ghafoori and Dutta, 1995). Kuru agregalar geçirimli betonun işlenebilirliğini azaltırken, ıslak agregalar çimento hamurunun agrega üzerinden akıp gitmesine ve muhtemel bir tıkanmaya sebep olmaktadır (ACI, 2010).

Wang et al. (2019), çimento/agrega oranının ($\frac{c}{a}$) porozite, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve geçirimsizlik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için farklı $\frac{c}{a}$ oranlarında (0.18; 0.20; 0.22; 0.24 ve 0.26) geçirimli beton karışımlarını 0.31 sabit su/çimento oranı ile üç farklı boyuttaki bazalt agregası ve uçucu kül kullanarak üretmiş ve yüksek çimento/agrega oranının düşük poroziteye neden olduğunu, $\frac{c}{a}$ oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin her zaman pozitif olmadığını ifade etmişlerdir. Uçucu kül katkısının basınç dayanımını arttırdığını

(%30 civarındaki eklemelerde), 30 MPa'dan yüksek basınç dayanımı elde etmek için % 20 uçucu kül ikamesi ve 0.20-0.24 mertebesinde ç/a oranı önerilmektedir.

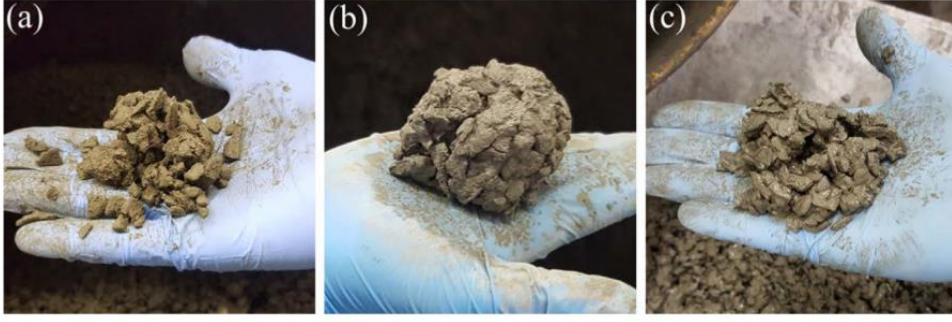
2.4. Geçirimli Betonların Genel Özellikleri

Geçirimli betonlarda istenilen ana amaç geçirimli olmasına karşılık ayrıca basınç, çekme, eğilme dayanımları, yorulma dayanımı, aşınma direnci, donma-çözölmeye dayanıklılık gibi bazı ek özellikleri de sağlaması beklenmektedir. Geçmiş yıllarda birçok araştırmacı geçirimli betonların bahsedilen özelliklerini incelemiş (Yang and Jiang, 2003; Haselbach et al., 2005; Ghafoori and Dutta, 1995; Huang et al., 2009; Yahia and Kabagire, 2014; Ibrahim et al., 2013) ve elde edilen sonuçlar ışığında geçirimli betonların genel özellikleri aşağıda listelenmiştir.

2.4.1 Taze hal özellikleri

Taze haldeki geçirimli beton geleneksel betona kıyasla daha viskoz bir yapıya sahiptir. Genelde sıfır ya da sıfıra yakın çökme değeri göstermelerinden dolayı geçirimli betonların kalıplara yerleştirilmesi işlemi zor olabilmektedir. Çökme değeri yerine birim hacim ağırlık ya da yoğunluk kontrolü yapılması araştırmacılar tarafından önerilmektedir (Lori et al., 2019; El-Hassan et al., 2019; Tang et al., 2019).

Taze haldeki geçirimli betonun istenilen şekilde yerleştirilebilmesi birçok özelliklerini etkilemektedir. Yetersiz sıkıştırma düşük dayanıma ve agregaların yüzeyden sökülmesine neden olurken, aşırı sıkıştırma ise hava miktarını azaltarak, geçirimli betonun suyu drene etme özelliklerini azaltmaktadır (Meininger, 1988; Sumanasooriya and Neithalath, 2011). Aşırı sıkıştırma aynı zamanda çimento hamurunun aşağıya doğru hareketine sebep olabilir. Geçirimli betonlar genellikle silindirle sıkıştırılarak yerine yerleştirilir. Silindir yüzeye yakın agregaları sıkıştırarak bu bölgede daha güçlü bir bağ oluşmasına neden olurken geçirimliliği azaltır.



Şekil 2.4 Farklı kıvamlardaki geçirimli betonlar (Da costa et al., 2021).

a) kuru çimento hamuru b) uygun kıvamlı çimento hamuru c) akışkan çimento hamuru

2.4.2 Mekanik özellikler

Geçirimli betonun dayanım özellikleri denilince basınç, çekme, eğilme ve yorulma dayanımları anlaşılmaktadır. Bu özellikler yıllar içinde birçok çalışmada incelenmiştir (Yang and Jiang, 2002; Haselbach et al., 2005; Ghafoori and Dutta, 1995; Huang et al., 2009; Ibrahim et al., 2013; Crouch et al., 2007; Lian et al., 2010; Deo and Neithalath, 2011; Gesoglu et al., 2014; Chindaprasrit et al., 2008; Rehder et al., 2014; Martin et al., 2014). Geçirimli betonun dayanımı karışım dizaynına bağlıdır ve su/çimento oranından ziyade agrega/çimento oranından daha çok etkilenmektedir (Crouch et al., 2007). Polimer ve kauçuk ilavesi sünekliğinde artışa neden olduğundan kırılma tokluğunu arttırmaktadır (Huang et al., 2009; Gesoglu et al., 2014; Rehder et al., 2014). Ayrıca agrega türünün de agregayı çevreleyen çimento miktarını etkilemesi nedeniyle, dayanım gelişimine etkisi yüksektir (Lian and Zhuge, 2010).

Yapılan çalışmalar kürleme süresinin geçirimli betonun eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Eğilme dayanımı açısından 7 ve 28 günlük kürlemelerde kayda değer bir fark görülmemiştir. Benzer şekilde, geçirimli betonun 7 günlük basınç dayanımı, 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık olarak %70-90'ı olmuştur. 7 günlük basınç dayanımı kazanma hızı geçirimli betonda, geleneksel betona kıyasla daha hızlı olmuştur (Kabir et al., 2012).

Mahboub et al. (2009), tarafından yapılan çalışmada kireçtaşı agregası kullanılarak su/çimento oranı 0.25 olan bir geçirimli beton üretilmiştir. Aynı zamanda sahadaki özellikleri incelemek için de 1.8x2.4x0.2 m boyutlarında plaka numuneler üretilmiştir. Basınç dayanımı, geçirimlilik ve porozitelerine bakılmış ve sonuç olarak uygulanan farklı sıkıştırma metotlarının, geçirimli beton üzerinden su

akış hızında bir etkisinin olmadığı, basınç dayanımı ile geçirimsizlik arasında doğrudan bir ilişkiden bahsedilemeyeceği ancak katı bileşen dağılımının etkisinin incelenmesi için ek çalışmalara ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir.

Raj and Chockalingam (2019) iri agrega boyutunun ve agrega/çimento (a/ç) oranının dayanım ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için üç farklı tek boyutlu agrega (4.74, 10 ve 12.5 mm) ve agrega/çimento oranı (3.2, 4.5 ve 5) kullanmış, agrega boyutu ve agrega/çimento oranının artmasıyla geçirimli betonda dayanım ve aşınma direncinin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Karıştırılarak kullanılan agregalarda, boşlukların daha ince olan partiküllerle doldurulması nedeniyle daha az boşluk elde edilmiştir. Artan yoğunluk ile geçirimli betondaki boşluk miktarı azalmıştır.

Yang and Jiang (2002), 4 farklı boyutta iri agrega, ince agrega, silis dumanı, çimento ve su kullanarak basınç ve eğilme dayanımı, su geçirimsizliği, aşınma dayanımı ve donma-çözülme etkisini incelemiş ve geçirimli betondaki boşluklar nedeniyle beton üretiminde kullanılan geleneksel malzemelerle yüksek dayanımlı bir geçirimli beton elde etmenin zor olduğunu, ince agrega kullanımının dayanımı arttırdığı ancak çimento miktarının da paralel olarak ayarlanması gerektiği, silis dumanı ve akışkanlaştırıcının beraber kullanımının geçirimli beton dayanımını oldukça arttırdığı ve böylece geçirimli betonların basınç dayanımının 50 MPa'a ve eğilme dayanımının ise 6 MPa' kadar yükseltilebileceğinden bahsedilmiştir.

Leon Raj and Chockalingam (2020), iri agrega boyutunu ve agrega/çimento oranının geçirimli beton dayanımı ve aşınma direnci üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 4.75 mm, 10 mm, 12.5 mm boyutlarındaki granit agregaları ve bunların karışımından oluşan toplamda dört farklı karışım ve 3.2, 4.5 ve 5 agrega/çimento oranı ile geçirimli beton örnekleri üretmiştir. Basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımlarına ek olarak boşluk miktarı, yoğunluk ve aşınma dirençleri de incelenmiştir. Aşınma direnci Cantabro aşınma testi ile yapılmıştır. Bu testte silindir numuneler ASTM C 1747 ve ASTM C 131'e göre Los Angeles cihazında demir bilyeler olmadan 500 devir döndürüldükten sonra 25 mm'lik elekte kalan kısım not alınarak hesaplanmıştır. Agrega/çimento oranının ve agrega boyutunun artması ile mekanik özelliklerin azaldığı ve boşluk miktarının ise arttığı söylenmiştir. Aşınma dirençlerine bakıldığında ise daha küçük boyuttaki agregalar ve düşük agrega/çimento oranına sahip geçirimli betonlar daha iyi aşınma direnci göstermişlerdir. Geçirimli betonlardaki boşluk miktarının yoğunluğu, dayanımı ve aşınma direncini kontrol ettiği, üç farklı agrega boyutunun karıştırılmasıyla elde edilen gradasyonla üretilen karışımlarda, boşlukların ince agregalarla doldurulmasına bağlı olarak daha düşük boşluk miktarı elde edildiği söylenmiştir.

Sherwani et al. (2020), geçirimli betonda dayanım, aşınma direnci ve geçirimlilik özelliklerini incelemek için doğal agrega ve yapay uçucu kül agregasını her iki agrega için tane aralığı 8-12.5 mm olacak şekilde belirlemiş, iki farklı su/çimento oranında (0.27 ve 0.32) çalışmışlardır. Yapay uçucu kül agregası karışıma %0, %25, %50, %75 ve %100 olacak şekilde katılarak toplam 10 farklı karışım elde edilmiştir. Basınç, yarmada çekme dayanımı, yoğunluk, boşluk miktarı, su geçirimliliği ve Böhme aşınma dirençlerinin incelendiği çalışmada yapay uçucu kül agregasının ikame oranı arttıkça, bu agreganın düşük özgül ağırlığı ve yüksek su emme kapasitesi nedeniyle geçirimli betonların yoğunlukları azalırken, basınç dayanımlarında da kayda değer bir azalma görülmüştür. Basınç dayanımı ve geçirimlilik özelliği düşünüldüğünde optimum karışımın %50 yapay uçucu kül ve 0.27 s/ç oranında elde edildiği ifade edilmiştir.

Geçirimli betonun yorulma dayanımı için ise yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Geçirimli betonda yorulma polimerler ve mikro silis kullanılarak Pindado et al. (1999) tarafından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda sınırlı miktarda numunenin 2 milyon döngüye dayanabildiği ve polimer katkısının yorulma dayanımını iyileştirdiği görülmüştür.

2.4.3 Dayanıklılık özellikleri

Agregaların doğrudan beton dış yüzeyinde yer alması ve geleneksel betona kıyasla agregaları saran çimento hamurunun daha ince olması nedeniyle, geçirimli betonun uzun süreli ömrünü araştırabilmek için aşınma dayanımı ve donma-çözülme direnci oldukça önemlidir. Geçirimli betonun aşınma direnci incelenirken genellikle Ontabro testi, yüklü tekerlekli aşınma testi ve yüzey aşınma testi olmak üzere üç yöntem kullanılmaktadır (Dong et al., 2013). Dong et al. (2013), aşınma direncini arttırmak için lif ve lateks kullanmış ve yukarıda belirtilen üç aşınma testi yöntemiyle numunelerin aşınma dirençlerini belirlemiştir. Lif ve lateks katkısının aşınma dayanımını arttırdığını, ince çakıl taş kullanılan geçirimli betonlarda, agregalar arasındaki düşük bağa bağlı olarak daha az direnç gösterdikleri ve geri dönüştürülmüş agrega içeren karışımların yüksek aşınma direncine sahip olduğu ve bu karışımlarda agregaların ara yüzeyi iyileştirdiği söylenmiştir. Bir başka çalışmada Gesoglu et al. (2014) ise, farklı türlerdeki kauçuk katkıları geçirimli betonun aşınma direnci üzerindeki etkisinin incelenmesi için kullanmış ve 1 mm boyutundaki ince kauçukların aşınma direncini iyileştirirken, lastik parçaları ve küçük kauçukların ise aşınma direncini azalttığı gözlemlenmiştir.

Büyük boşluk yapısına sahip geçirimli betonlarda, bu boşluklarda su depolanabilmekte ve depolanan sular belirli hava koşullarında donma-çözölmeye maruz kalabilmekte, bu da betonun bozulmasına ve dayanımın azalmasına neden

olmaktadır. Donma-çözülme direnci genellikle belirli sayıda döngüde donma-çözülme ardından meydana gelen kütle kaybı ile ölçülmektedir. Donma-çözülme sonucunda oluşan hasarları önlemek için araştırmacılar farklı katkıları kullanmıştır. Ghafoori and Dutta (1995), donma-çözülme direncini iyileştirmek için hava sürükleyici katkıları kullanmış, Yang and Jiang (2003) ise silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcıların donma-çözülme direncini arttırdığını belirtmiş, ayrıca lastik parçaları ve kauçuk kullanımının da donma-çözülme direnci üzerinde olumlu etkisinin olduğu Gesoglu et al. (2014) tarafından raporlanmıştır.

Feng et al. (2020), yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen geçirimli betonların durabilitesini incelemek için farklı konsantrasyonlarda (%0, 3, 5, 10, 20) buz çözücü tuzlar kullanarak, 300 çevrimlik donma-çözülme döngüsü sonrasında geçirimli betonlardaki kütle kaybı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı gibi özelliklere ek olarak SEM ile de numunelerin mikro yapısını incelemiştir. 300 çevrim sonucunda yüksek dayanımlı geçirimli betonun geleneksel betona kıyasla, daha iyi bir donma-çözülme direnci gösterdiği ve en şiddetli etkinin %3'lük NaCl çözeltisine maruz bırakılan örneklerde görüldüğü ve %20 NaCl çözeltisinin kullanıldığı numunelerde ise bariz bir zararın görülmediği ifade edilmiştir.

Taheri et al. (2021), geçirimli betonlarda donma-çözülme direncine su/çimento oranı, hava sürüklemesi, kum ilavesi ve iri agrega boyutu gibi özelliklerin etkisini incelemiş ve bunun için üç farklı boyutta iri agrega kullanmış (4.75-19 mm – 12.5-19 mm – 4.75-12.5 mm) ve su/çimento oranı olarak 0.3 ve 0.4 olmak üzere iki farklı oran seçmiştir. ASTM C666/C666 M de belirtilen donma-çözülme direnci ölçüm yönteminin geçirimli betonlar için uygulanabilirliğinin kuşkulu olduğunu belirten araştırmacılar bunun yerine JC446-91 standardını baz almışlardır. Bu yöntemle göre 28 günlük kürlenmenin ardından donma-çözülme döngülerine maruz bırakılan numunelerin her bir döngüsü 24 saat sürmekte, döngü -15°C'de 5 saat soğutmakla başlamakta ve 10 ve 30°C'de suda çözündürme ile son bulmaktadır. 25 döngünün sonunda numunelerin basınç dayanımındaki ve kütlelerindeki kayıp ölçülmüştür. Sonuç olarak ise %8 oranında kum kullanımının basınç dayanımı ve donma-çözülme direncini iyileştirmesine karşılık porozite ve geçirimliliği azalttığı söylenmiştir. Su/çimento oranı 0.4 olan karışımlar 0.3 olanlara kıyasla daha iyi donma-çözülme direnci gösterirken, hava sürükleyici katkı kullanımının geçirimli betonlarda donma-çözülme direncini iyileştirdiği, iri agregadaki tane boyutu değişiminin basınç dayanımı, porozite, geçirimlilik ve donma-çözülme döngüsünden sonraki kütle kaybı üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı söylenmiştir. Buna sebep olarak ise agrega gradasyon eğrisinin farklı iri agrega boyutlarını geniş bir yelpazede temsil etmemesi gösterilmiştir.

Rodin III et al. (2019) tarafından yapılan çalışmada farklı kış koşullarında yayalar ve sürücüler için sürtünme direncinin araştırıldığı bir diğer çalışmada

İngiliz sarkaç deneyi (British Pendulum Tester-BPT) ile (Şekil 2.5) kuru, yaş ve buzlanmış koşullarda geçirimli beton üzerinde yapılan deneyler geleneksel beton ile kıyaslanmıştır. 25.4 x 25.4 x 8.9 cm boyutlarında plakalar üç farklı poroziteye sahip (düşük, orta ve yüksek) geçirimli betonlarla oluşturulmuştur. Kuru, yaş ve buzlanmış koşulların hepsinde geçirimli betonla üretilen numunelerin geleneksel betonla üretilenlere kıyasla daha iyi BPN sonuçları verdiği, geçirimli betonlarda buz çözücü olarak magnezyum klorür kullanımının sürtünme direncinde kalsiyum klorüre kıyasla daha iyi sonuç verdiği, ancak bu sonuçların sadece tek bir karışım oranı için tek bir agregat boyutunda yapıldığı göz önüne alınarak farklı karışım oranlarında ve agregat tane aralıklarında araştırılması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 2.5 Sahada gerçekleştirilen BPN (Rodin III et al., 2019).

Wang et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada soğuk iklimlerdeki geçirimli betonlarda deniz kabuğu kullanımının donma direnci ve bitkilerin yetişmesi üzerine etkisini incelemek için üç farklı lokasyondan temin edilen atıklar (deniz tarağı, ıstiridye ve deniz kabuğu) farklı oranlarda betona katılmış ve 5-20 mm tane aralığındaki kırmataş iri agregası ile geçirimli betonlar üretilmiştir. Bitkilerin yetişip büyüebilmesi için 1 ve 3 yıllık deneyler yapılmıştır. SEM analizi sonucunda deniz kabuğunun mikro yapısının iğnemsî şekilde olduğu ve bu nedenle daha iyi bir donma-çözülme direnci gösterdiği ifade edilmiştir. ıstiridye kabuğu ile üretilen geçirimli betonların bitkilerin yetişmesi için daha elverişli olduğu ve aynı zamanda belli bir donma direncini de sağladığı bulunmuştur. 3 yılın sonunda bitkilerin yetiştirildiği toprakta yapılan atomik absorpsiyon spektrometri yöntemi ile kalsiyum iyonu konsantrasyonları incelenmiş ve ıstiridye kabuğu ile üretilen geçirimli betonların olduğu toprakların daha fazla kalsiyum iyonu konsantrasyonuna sahip olduğu görülmüştür.

Haselbach et al. (2020), magnezyum klorüre maruz bırakılan geçirimli betonların performanslarını incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada kireçtaşı agregası (6.4-9.5 mm) kullanılarak üretilen geçirimli betonlar %3 $MgCl_2$ buz çözücü çözeltiye, kış sezonunu temsil edebilmek için 17 hafta boyunca maruz bırakılmıştır. Kontrol grubu olması için bir seri ise sadece suya maruz bırakılmıştır. Magnezyum klorüre maruz bırakılan numunelerde kütle artışı gözlenmiştir. Bunun kalsiyum iyonları ile magnezyum iyonları arasındaki iyon alışverişinden gerçekleşmeyeceği çünkü magnezyumun atom kütlelerinin kalsiyumdan daha az olduğu, dolayısıyla kütle artması değil azalması gerektiği, kütle artışına ise magnezyum hidroksit çözeltisinin zamanla boşluklar içerisinde oluşması ve bu boşlukları doldurmasının sebep olduğu belirtilmiştir.

2.5. Geçirimli Betonun Saha Performansı

2.5.1 Geçirimli betonun su arıtma yeteneği

Daha önce de bahsedildiği gibi geçirimli betonun en büyük avantajlarından birisi, sel/yağmur sularının idare edilmesinde oynadığı roldür. Bilindiği üzere yağmur suları birçok kirleticiyi de beraberinde getirerek dere, nehir vb. gibi su kaynaklarına taşımaktadır. Geçirimli beton ise yüksek boşluklu yapısı nedeniyle, sadece yüzeyde akan suyu azaltmakla kalmayıp, gözeneklerinde söz konusu kirleticileri (ağır metaller, yağlar, tozlar vd.) de tutar (Thomle, 2010). Bahsedilen yağmur suyunun arındırılması işlemi üç kademede özetlenebilir:

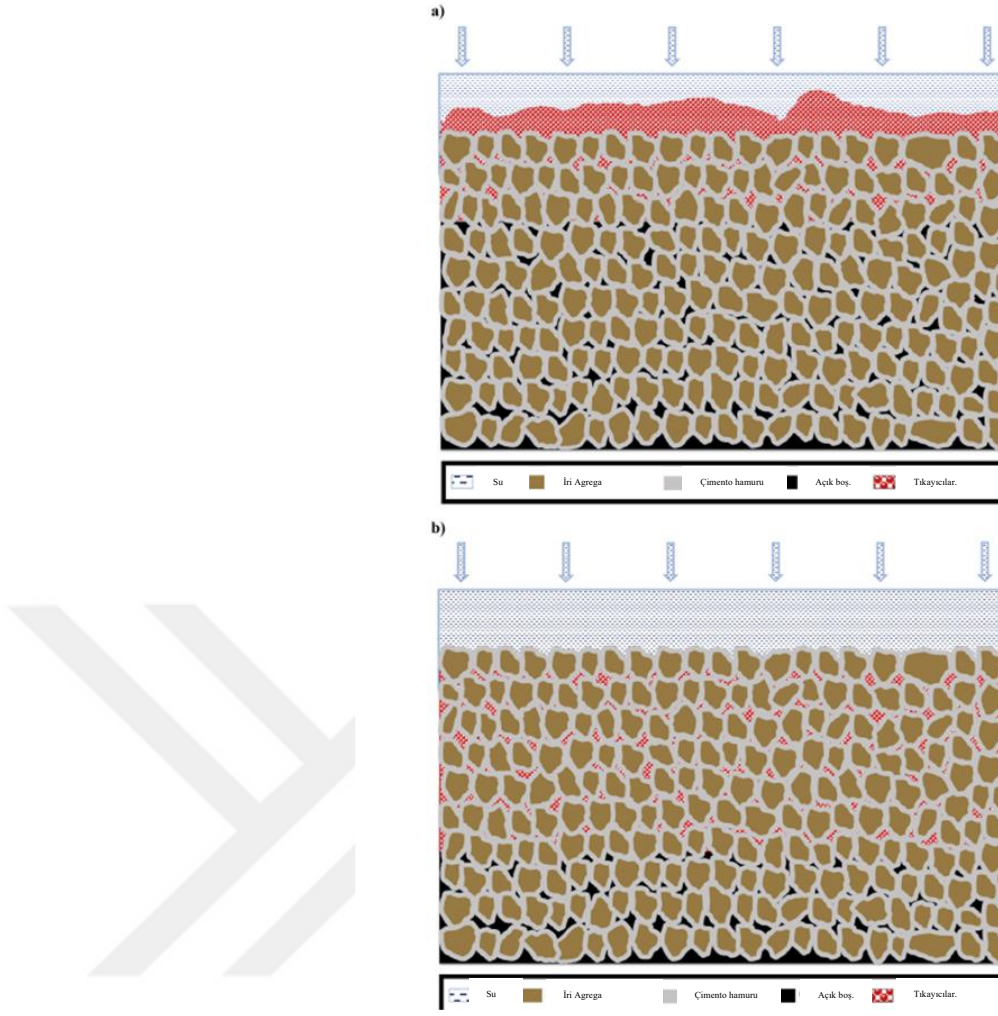
Geçirimli betonun arındırma yeteneği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Halen kullanılmakta olan bir geçirimli betonun, fosfor içeren maddeleri yağmur suyundan ayırabilme yeteneği test edilmiş ve alınan karot numuneler neticesinde, geçirimli betonun yağmur suyundaki fosforu %94.3 oranında arındırdığı sonucuna ulaşılmıştır (Radlinska et al., 2012). Geçirimli beton kalınlığının arındırma özellikleri üzerine etkisinin incelendiği bir diğer çalışmada (Lee et al., 2014) tuzluluk miktarı, yağ tortusu gibi özellikler incelenmiş ve orta geçirimli beton tabakasının daha iyi arındırma yeteneğine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak sadece geçirimli beton üst tabakası içeren kaplamalardan ziyade; temel, alt temel gibi tabakaları olan geçirimli betonların daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Geçirimli beton özellikle endüstriyel faaliyetlerin olduğu bölgelerde yer alan arazilerde yağmur suyunda bulunabilecek ağır metallerin arındırılmasının, diğer su kaynaklarının beslenmesi açısından çevresel açıdan önemi aşikardır. Başka bir çalışmada (Haselbach et al., 2014) geçirimli betonun emme kapasitesi çinko ve bakır gibi ağır metaller kullanılarak ölçülmüş ve atık su içeren çözeltilerin daha az

miktarda ağır metal içerdiği ve özellikle fabrikaların olduğu alanlarda geçirimli beton kullanılarak ağır metallerin su kaynaklarına karışmasının önlenilebileceği söylenmiştir. Bir diğer çalışmada (Li et al., 2015) geçirimli betonun kimyasal arındırma yeteneği kanalizasyon suyu ile fosforlu ve dışkı organizmaları için incelenmiş ve hidroksit iyonlarının artmasıyla bu bileşenlerin ayrıştırılmasının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

2.5.2 Geçirimli betonda tıkanma sorunu

Geçirimli betonlar dışarıdan girebilen katı partikülleri bünyelerinde tuttuklarından dolayı zamanla tıkanırlar. Sızarak gelen yağmur suları beraberinde katı partikülleri de taşır ve taşınan bu partiküller trafik vb. gibi yüklerle daha da küçük parçalara bölünerek ve beton bünyesindeki boşlukları doldurarak geçirimli betonu tıkar. Taşınan partiküller, kuruyunca sert bir tortu oluşturarak beton içerisinde kalır (Pratt et al., 1995). Bahsedilen bu durumun uzun süreler boyunca gerçekleşmesi sonucunda betonun sızdırma kapasitesi azalır ve bunun bir sonucu olarak beton üzerinde su göllenmeleri görülür. Tıkanmaya neden olan sedimentler (kum, silt, kil) genellikle çevredeki arazilerden parçalanarak, yol yapımında arta kalan molozlardan veya araçlarla başka yüzeylerden taşınmaktadır (Ferguson, 2005). Kayhanian et al. (2012) tıkanmış bir geçirimli betonun açılması çalışmaları sırasında betondan uzaklaştırılan partiküllerin çoğunluğunun 38 μm 'den büyük olduğunu ifade etmiştir. Şekil 2.6'te farklı tıkanma süreçleri gösterilmiştir (Kia et al., 2017).



Şekil 2.6 Geçirimli betonda farklı boyutlardaki partiküllerin tıkanmaya etkisi (Kia et al., 2017).

a) İri parçacıkların daha çok yüzeyde tıkanmaya sebep olması

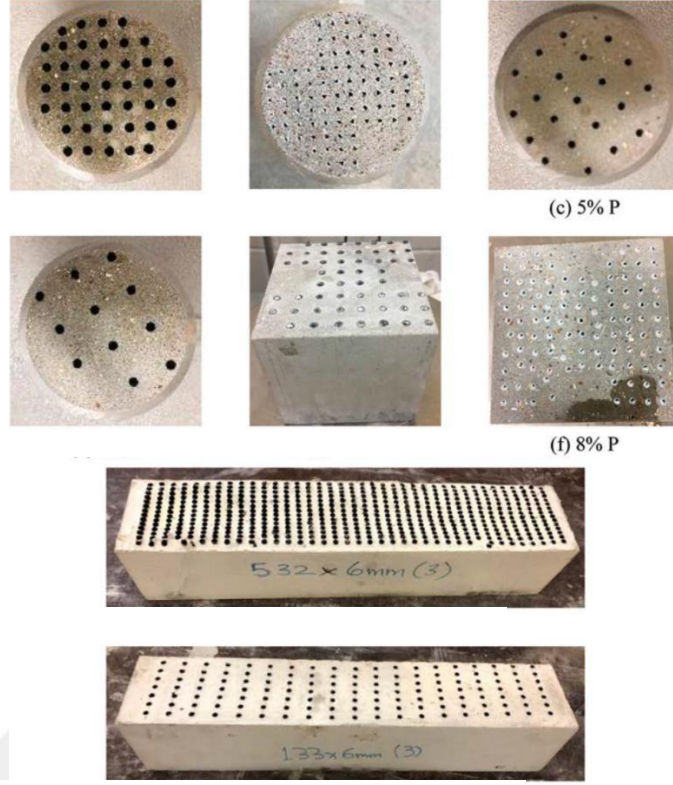
b) İnce parçacıkların iç kısımlara doğru ilerlemesi

Yapılan çalışmalardan bir kısmı da sediment türünün tıkanma üzerindeki etkisini incelemiştir. Kimi araştırmacılar iri partiküllerin beton boşluklarına sığamaması nedeniyle geçirimsizliği etkilemediğinden bahsederken (Coughlin et al., 2012; Deo et al., 2010), Schaefer et al. (2011) ise, kumun geçirimsizliği önemli ölçüde azalttığını, ince taneli siltli kilin tıkanma üzerinde neredeyse hiçbir etkisinin olmadığını söylemiştir. Siltli kilin kum ile karıştırılmasıyla ise çok daha az döngüde en yüksek geçirimsizlik azalmasına neden olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise, daha geniş partikül boyutu dağılımının boşluklarda tutulma ihtimalini artırması ve kilin kohezif yapısının daha fazla yüzey etkileşimi ve partiküllerin yapışmasına sebep olması olarak gösterilmiştir. Coughlin et al. (2012), kilin kuma kıyasla birim kütle için, yaklaşık on kat daha fazla tıkanmaya neden olduğunu açıklamıştır. Tıkanıcı malzemenin farklı olması, deneye tabi tutulan örneğin boşluk yapısının

farklı olması, tıkanmaya maruz kalma şartlarının değişmesi ve diğer değişkenler sebebiyle araştırmacıların sonuçları her zaman birbirleriyle uyuşmamaktadır. Sedimentlerin boyutları, geçirimli betonun boşluk boyutlarına yakın olduğu zaman tıkanmanın en fazla olma ihtimali yüksektir (ACI, 2010).

Kevern (2015), geçirimli beton plakalarında (350x350x150 mm) killi toprak ile tıkayarak ($\%34 < 0.074$ mm) sızdırma miktarını elde ettiği sonuçlarda, bütün numunelerin aynı kişi tarafından ve aynı yöntemle üretilmesine rağmen tıkanmamış numunelerdeki sızdırma miktarının oldukça geniş bir aralıkta (140 cm/s-1380 cm/s) olduğunu görmüştür. Bitki artıklarından oluşan tıkayıcının, çamurdan (toprak bulamacından) elde edilen tıkayıcıdan daha az tıkanmaya sebep olduğu, en yüksek tıkanma miktarının iki malzemenin kombinasyonu ile elde edildiği ve ilk tıkanma yüzdesi hızlı olan partiküllerin aynı zamanda açılmasının da daha fazla olduğu ancak ilk sızdırma kapasitesinin büyük bir kısmının kalıcı olarak kaybedildiği ve ancak $\%50$ civarında bir geri kazanım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bazı çalışmalar tıkanmanın sadece geçirimli beton yüzeyinde ya da üst tabakaya yakın bölgelerde meydana geldiğini gösterirken (Kayhanian et al., 2012; Yong et al., 2013), diğer araştırmacılara göre ise partiküller yüzeyde olduğu gibi alt tabakalarda da tıkanmaya neden olabilmektedir (Chopra et al., 2010; Mata and Leming., 2012). Geotekstil kumaş, tabakalar arasındaki ince partikül taşınmasını engellediği için kullanımı önerilmiştir (Scholz, 2013). Ancak kumaş üzerinde birikecek parçacıklar tıkanma ihtimalini arttırarak bir sonraki tabakada sızdırma miktarını azaltacaktır (Boving et al., 2008; Brown et al., 2009).

Kia et al. (2021), yüksek dayanımlı geçirimli betonda tıkanmaya dayanıklılığı incelemek için üç farklı geçirimli beton türünde deneylerini yapmışlardır; bunlar laboratuvarda hazırlanan geleneksel geçirimli beton (PC-Lab), piyasada satılan geleneksel geçirimli beton (PC-Com) ve yeni geliştirilen yüksek dayanımlı tıkanmaya dirençli geçirimli beton (CRP) olarak belirlenmiştir (Şekil 2.7). CRP betonlar hazırlanırken porozitesi $\%2$ ile 30 arasında değişen numuneler 3 ile 6 mm çaplarındaki plastik tüpler ve kendiliğinden yerleşen harç yardımıyla üretilmiştir. Plastik tüpler, kalıpların alt ve üstüne sabitlenen ızgaralarla sabit tutulmuştur. Geleneksel geçirimli betonların basınç dayanımı 6 ile 32 MPa arasında değişirken CRP’de bu değer 19 ile 59 MPa arasında olmuştur. Aynı değerdeki porozite için CRP’ler yaklaşık iki kat daha fazla dayanım göstermekte ve eğilme dayanımları ise 1.9 ile 4.4 MPa arasında olmaktadır. Geleneksel geçirimli betonlarda su geçirgenliği 0.1 ile 1.7 cm/s arasında değişirken bu değer CRP ile 0.6 ile 11.9 cm/s olmuştur. Bütün geleneksel geçirimli betonlar $3-8$ döngü sonucunda tıkanırken $\%5$ porozite ile üretilen CRP’lerin birçok döngü sonucunda bile tıkanmadığı söylenmiştir. Bunun sebebi olarak ise dikey ve sürekli olarak oluşturulan boşluk yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Yeni bir yöntemle üretilen geçirimli betonlar (Kia et al., 2021).

Sandoval et al. (2020), D_{max} 10 mm olacak şekilde GDA ve kireçtaşı agregası kullanarak üretilen geçirimli betonlarda tıkanma mekanizmasını incelemiştir. Bunun için tıkayıcı olarak 3 farklı sediment (kum 1, kum+kil karışımı ve kum 2) kullanmışlardır. Kum+kil karışımı kum 1'den daha ince ve kum 1 de kum 2'den biraz daha incedir. Çalışmada sağlıklı bir kıyaslama yapılabilmesi için çimento dozajı 420 kg/m^3 , agrega 1367 kg/m^3 olarak sabit tutulmuş ve s/ç oranı ise tüm karışımlar için 0.34 olarak belirlenmiştir. İlk su geçirimliliği belirlendikten sonra, sedimentler numune yüzeyine kuru olarak dağıtılmıştır. (Mata and Leming, 2012; Mata, 2008)'den yola çıkarak yıllık 0.6 kg/m^2 'lık sediment yığınının geçirimli beton yüzeyine taşınacağı öngörülerek, her bir numune yüzeyine 20 yıllık servis ömrü için 100 g sediment ile tıkanma yapılmasına karar verilmiştir. 100 g sediment 10 parçaya bölünmüş ve her defasında 10 g tıkayıcı sediment, numune yüzeyine eşit olarak dağıtıldıktan sonra geçirimlilik deneyi yapılmıştır. Bu deney her 10 g numune eklenmesinin ardından tekrarlanarak geçirimlilik değerleri ölçülmüştür. Tıkayıcı malzeme arttıkça geçirimliliğin de azaldığı, bu azalma miktarının kullanılan farklı sedimentlere göre değişeceği söylenmiştir. Kum 2 ile yapılan tıkanma deneylerinde 40 g'lık beslemeye kadar kum 1 ve kum+kil karışımına kıyasla daha fazla tıkanma görüldüğü belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak ise kum 2'nin daha iri tanecikli olması ve böylelikle geçirimli betonda daha yüksek bir tıkanma potansiyeline neden olması gösterilmiştir. 40 g üzerindeki tıkayıcı

sediment beslemelerinde ise kum 1 için tıkanma devam ederken, diğer iki sedimentte (kum 2 ve kum+kil karışımı) azalan bir tıkanma hızı görülmüştür. Farklı tıkanma eğilimlerinin geçirimli betonların farklı boşluk dağılımlarıyla alakalı olabileceği belirtilmiştir. Sediment eklendikçe geçirimli betonlardaki boşluk boyutu, sedimentin tane dağılımına bağlı olarak azalmaktadır. Kireçtaşı ile üretilen geçirimli betonlarda tıkayıcı malzeme olarak kum 1 kullanımında geçirimsizlik katsayısı, referans alınan standartta (VTT-R-080225-13) belirtilen değerlerinin altına düşerken, kum 2 ve kum+kil karışımında bu değerlerin üstünde sonuçlar elde edilmiştir. GDA ile üretilen geçirimli betonlarda ise kum 2 en zararlı sediment olup bunu kum 1 ve kum+kil karışımı takip etmiştir. Çalışmada kullanılan bütün tıkayıcı sedimentlerin kullanımı sırasında geçirimsizlik katsayısı standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde kalmıştır.

Zhou et al. (2019), Bilgisayarlı tomografi (BT) kullanarak geçirimli betonlardaki boşluk karakterinin tıkanmaya etkisini araştırmışlardır. İki farklı gradasyonda (2.36-4.75 mm ve 4.75-9.5 mm) bazalt agregası, silis dumanı ve çimento kullanarak geçirimli betonlar üretilmiş ve 4 farklı boyutta (0-0.5 mm, 0.5-1 mm, 1-2 mm ve 2-3 mm) kireçtaşı agregası ise tıkayıcı partikül olarak seçilmiştir. Lin et al. (2016)'dan yola çıkarak, geçirimli betonlarda tıkanma davranışının incelenebilmesi için, bu betonların bir yılda maruz kaldıkları tıkayıcı partikül miktarının 1 g olduğu ancak sonuçların daha net görülebilmesi için 10g partikül ile tıkanma işleminin gerçekleştirilmesinin uygun olduğu kanısına varılmıştır. Sedimentlerin geçirimli betonların içerisindeki boşluklardan tamamen geçmiş olması için, tıkanma işleminin 10 dakikadan daha az olmaması gerektiği belirtilen çalışmada araştırmacılar, tıkayıcı partikül boyutunun çok küçük veya çok büyük olmasının, geçirimli betonlarda düşük seviyede tıkanmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Tıkayıcı partikül, beton içerisindeki boşluklardan çok daha büyük olduğunda, partikül bu boşluklardan geçememektedir. Ters durumda ise, partikül tüm sistemden kolaylıkla geçip gidebilmektedir. Her iki durumda da geçirimli betonda tıkanmaya neden olmamaktadır.

Huang et al. (2021), 4 farklı gradasyonda (2.36-4.75 mm, 4.75-9.5 mm, 9.5-17 mm, 16-19 mm) kırma taş agregası, silis dumanı ve çimento kullanarak ürettikleri geçirimli betonlarda tıkanmaya bağlı olarak azalan su geçirimsizliğini inceledikleri çalışmada tıkayıcı malzeme olarak üç farklı boyutta (0-0.25 mm, 0.25-0.5 mm, 0.5-1 mm) kireçtaşı agregası kullanmışlardır. BT ile çekilen görüntüler işlenerek boşluk boyutları hesaplanmış ve Minitab Software ile dağılım testi uygulanarak bir eşitlik elde edilmiştir. Her bir partikül için 20 g malzeme 1 litre suda çözülerek, geçirimli beton numunesi üzerine dökülmüş ve tıkanma deneyi yapılmıştır. Agregası gradasyonunun tıkanma davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olmamakla beraber tıkayıcı kumun tane boyutunun artması, geçirimsizliğin tüm karışımlarda azalmasına

neden olmuştur. Geçirimli betonlarda tıkanma davranışını modellemek için Stein modelinin uygun olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

Marcaida et al. (2018) tarafından geçirimli betonlarda tıkanma davranışını incelemek için üç farklı tane boyutuna sahip (0.6-0.85 mm; 0.425-0.6 mm ve 0.25-0.425 mm) silis kumu tıkaçıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Silis kumları beton yüzeyine 5'er g olarak eklenmiş ve kümülatif olarak 65 g malzeme ile tıkanma davranışı incelenmiştir. Kullanılan üç farklı tane boyutundaki tıkaçıcı malzemeden en küçük boyuta sahip olanın en fazla tıkaçıcı özellik gösterdiği, maksimum tane boyutu daha fazla olan agregaların geçirimli beton içerisinde daha büyük boşlukların tıkanmadan kalmasını sağlayabileceği belirtilmiştir.

Deo et al. (2010), farklı agrega boyutları ile üretilen betonların tıkanma rejimlerini incelemek amacıyla üç farklı boyuttaki kireçtaşı agregaları ile 0.33 su/çimento oranına sahip geçirimli beton numuneleri üretmiş ve deneysel porozite, görüntü işleme yöntemi ile boşluk yapısı ve tıkanmış ve tıkanmamış yüzeylerde geçirimliliği belirlemiş ve tıkaçıcı malzeme olarak 0.84 ile 1.8 mm arasında kum kullanmıştır. Sonuç olarak benzer porozitede, oldukça büyük (~5-6 mm) veya oldukça küçük (~1-2 mm) boşluk boyutlarının tıkanmaya daha yatkın olduğu görülmüştür. Modellenen boşluk geometrisi ve partiküllerin boyutları göz önüne alınarak yapılan modellemede tıkanmanın gerçekleşeceği evre tahmin edilmiş ve deneysel sonuçlarla benzerlik göstermiştir.

Kayhanian et al. (2012), Kaliforniya'daki farklı yağ ve yağış rejimlerine sahip 20 otopark seçerek geçirimlilik deneylerini yapmış ve saha geçirimliliği üzerinde farklı parametrelerin etkisinin incelenmesi için bir regresyon analizi gerçekleştirmiştir. Geçirimlilik sonuçlarına bakıldığında hem otoparkların kendi içinde hem de birbirlerine kıyasla geçirimlilik değerlerinin oldukça farklılık gösterdiği görülmüştür. İstatiksel analiz sonucunda beton yaşının geçirimliliği etkileyen ana etken olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna ek olarak 38 µm'den küçük partikül miktarı, 30°C ve üzeri sıcaklığa maruz kalma gün sayısı, otopark çevresindeki yabancı otlar ve araba lastiklerinin neden olduğu aşınma gibi faktörlerin de geçirimlilik üzerinde etkisi olduğu açıklanmıştır.

Lee et al. (2021), üç farklı boyutta agrega kullanarak ürettikleri geçirimli betonlardan kaldırım üretmişler ve 6 aylık bir kullanım sonucunda geçirimliliğinde tıkanmaya bağlı olarak %17'lik bir azalma olduğundan bahsetmişlerdir. Beton yüzeylerinin basınçlı su ile yıkanmasıyla bu kaybın %29.6'sı geri kazanılmıştır. Bilgisayarlı tomografi (BT) görüntüleri ile incelenen numunelerde tıkanmanın büyük bir çoğunluğunun yüzeye yakın bölgede meydana geldiği ve bakım çalışmalarının ardından bu boşlukların bazılarının temizlenebildiği belirtilmiştir. Daha iri agrega kullanılarak üretilen karışımlarda tıkanma derinliği 35 mm'lere

ulaşırken bu değer ince agregalar kullanılarak üretilen geçirimli betonlarda 15 mm civarında olmuştur.

Tıkanma aynı zamanda donma-çözülme zararını da hızlandırmaktadır. Guthrie et al. (2010), farklı seviyelerde tıkanmaya ve suya doygunluğa sahip örneklerde donma-çözülme aşınmasını incelemiş, tıkanmış ve suya tam doygun örneklerin, tıkanmayan ve doygun olmayanlara kıyasla daha hızlı hasara uğradığı sonucuna ulaşmıştır.

2.5.3 Tıkanmayı açma yöntemleri

Geçirimli betonlar maksimum kapasitede hizmet verebilmek için, düzenli olarak bakım ve onarıma ihtiyaç duymaktadırlar. Yapılan bakımın ana amacı tıkanmaya neden olan parçacıkların beton boşluklarından uzaklaştırılmasıdır. Basınçlı suyla yıkama ve vakumlu süpürme (ve bunların kombinasyonu) tıkanıklığı açmak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir (Galroo and Tigle, 2012; Drake and Bradford, 2013). Basınçlı yıkama, tıkaçıcı parçacıklar ile geçirimli beton arasındaki bağı zayıflatmak için konik uçlu bir başlıkla beraber kullanılır. Vakumlu süpürmede ise, tıkanan boşluklardaki parçacıklar emilerek dışarıya çekilir. Önerilen bakım aralıkları geçirimli betonun bulunduğu bölgenin özelliklerine de bağlı olarak en az 1 yıl ile (Drake and Bradford, 2013), yılda iki ya da dört kez (Gunderson, 2008; Henderson and Tigle, 2012) arasında değişmektedir.

Basınçla yıkama, vakumlu süpürme ve bunların kombinasyonlarından oluşan yöntemlerin geçirimli betondaki tıkanıklığı açmadaki etkisi araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Çalışmalardan çıkarılan ortak sonuç, bahsedilen yöntemlerle geçirimli betondaki tıkanıklığın açıldığı ancak pratikte ekonomikliğinin ve kullanılabilirliğinin sorgulanabilir olduğu yönündedir. Örneğin Chopra et al. (2010), basınçlı yıkama ve vakumla süpürme yöntemlerinin beraber kullanımının en iyi sonucu verdiğini ve tek başına kullanılan basınçlı yıkama yönteminin, yine tek başına kullanılan vakumlu süpürmeye kıyasla daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir. Ancak, bahsedilen deneylerin laboratuvar ortamında açık bir alanda yapıldığı unutulmamalıdır. Basınçlı yıkama yönteminin parçacıkları yerinden çıkararak betonun iç yüzeylerine doğru sürüklemesi ve tıkanmayı daha da arttırması da bir diğer ihtimaldir. Coughlin et al. (2012) ise, basınçlı yıkamanın geçirimli betonda tıkanmayı açmada etkili olmadığını çünkü kumlu ve killi tıkanmalarda basınç kaybının geçirimli beton tabakadan ziyade alt temelde meydana geldiğini söylemiştir. Benzer olarak Haselbach (2010), geçirimli betonda kilin (bentonit, kaolinit ve kırmızı kil) sebep olduğu tıkanmaların, kurutma, yıkama ve süpürme ile bir miktar açılabilirdiğini ancak bunun sızdırma miktarı üzerinde, alt tabakalara sızan parçacıklara ulaşmanın zorluğu nedeniyle yeterli iyileştirme elde

edilemediğini açıklamıştır. Henderson ve Tigle (2012) tarafından sahada yapılan çalışmada, basınçlı yıkama ve vakumlu süpürmenin sızdırma kapasitesini arttırmada bir etkisinin olmadığı ve sert bir süpürge ile süpürmenin ardından bir bahçe hortumuyla yapılan yıkamanın daha etkili olduğu görülmüştür. Ancak mekanik süpürme, parçacıkları boşluklardan uzaklaştırmaktan ziyade daha da diplere doğru sürüklenmesinden dolayı önerilen bir yöntem değildir. Henderson and Tigle (2012), kötü tasarlanmış ve sızdırma miktarı az olan karışımların başlangıç sızdırma miktarlarının tekrar yakalanmasının oldukça zor olduğunu ifade etmişlerdir. Benzer şekilde Schaefer et al. (2011), bakım yöntemlerinin yüksek boşluklara sahip örneklerde daha iyi sonuçlar verdiğini ve boşluk miktarı %15'den küçük olan numunelerde ise etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ifade etmiştir. Bu sonuç aynı zamanda yüksek boşluğa sahip örneklerin daha yüksek sızdırma kapasitesine ulaştığını söyleyen Tong'un (2011) sonuçları ile de örtüşmektedir. Sonuç olarak, geri kazanım kapasitesi büyük ölçüde beton porozitesi, boşluk dağılımı ve boşlukların bağlantılılığı ile alakalıdır.

Vakumlu süpürme ile basınçlı yıkamadan daha hızlı sonuç alınır ancak sadece yüzeye yakın partiküllerin temizlenmesi sağlanmaktadır (Chopra et al., 2010; Vancura et al., 2012). Mata and Leming 2012, vakumlu süpürmenin kısmi olarak tıkanıklığı açtığını söylemiştir. Drake and Bradford (2013), vakumlu süpürmenin, inceledikleri bir alanda etkili olurken diğer alanda bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir. Manahiloh et al. (2012), X-Ray tomografi kullanarak, farklı boşluk yapılarına sahip geçirimli betonları incelemiş ve bir yaşındaki örneklerin ortalama poroziteleri %26 seviyesindeyken bu değer sekiz yıllık numunelerde %18.1 olduğunu söylemiştir. Vakumla süpürme sonucunda bir yaşındaki numunelerin poroziteleri %26'dan %29'a, ve sekiz yaşındaki numunelerde ise %18.1'den %19.1'e yükselmiştir. Daha yaşlı numunelerdeki düşük boşluk açmanın (tıkanma açma) sebebi tıkanmadaki büyüklük olarak ifade edilmiştir.

ACI'a (2010) göre en etkili yöntem vakumlu süpürmenin ardından uygulanan basınçlı yıkamadır. Chopra et al. (2010), vakumlu süpürme ve basınçlı yıkamanın beraber kullanılmasının en iyi düzeyde tıkanıklık açma sağladığını bulmuştur. Schaefer et al. (2011), vakumlu süpürme ve basınçlı yıkamanın ayrı ayrı uygulanmasının yaklaşık olarak aynı sonuçları verdiğini, vakumlu süpürme ve basınçlı yıkamanın beraber kullanıldığı durumlarda ise iyileşmenin en yüksek değerde olduğunu belirtmiştir. Hein et al. (2013), vakumlu süpürme ve basınçlı yıkamanın oldukça etkili olduğunu ancak vakumlu süpürme ve ardından basınçlı yıkama ve ikincil bir vakumlu süpürmenin çok daha etkili sonuç verdiğini belirtmiştir.

Ancak unutulmamalıdır ki bahsedilen bütün yöntemler kullanılarak dahi geçirimli betonun ilk sızdırma oranını elde etmek mümkün değildir. Hatta elde

edilen iyileştirme oranları genel olarak oldukça düşüktür. Örneğin Tong (2011), kil ve silt ile tıkanmış yüzeylere basınçlı yıkama veya vakumlu süpürme uygulamış ve geri kazanım oranının %15'den az olduğunu söylemiştir (Şekil 2.8). Her iki yöntemin beraber kullanılmasında ise bu değer %20-25 arasında olmuştur. Benzer şekilde Schaefer et al. (2011), kum ile tıkanmış yüzeylerde basınçlı yıkama ve vakumlu süpürme sonucunda geri kazanım miktarının %10-20 arasında olduğunu ancak bu metotların beraber kullanımında bu değerlerin %20'lere ulaşabildiğini belirtmiştir. Siltli killi kumla tıkanan yüzeylerde ise vakumlu süpürme veya basınçlı yıkamanın sonucunda ilk geçirimsizliğin %10-20'si geri kazanılabilişken bu yöntemler beraber kullanıldığında bu değer %20 olmuştur.



Şekil 2.8 Basınçlı su ile tıkanmayı açma (Tong, 2011).

Bakım yöntemlerinin etkinliği aynı zamanda tıkanmanın olduğu konum ve derinliği ile de alakalıdır. İri agregaların sebep olduğu tıkanmalar genelde yüzeyde meydana geldiği için vakumlu süpürme ya da basınçlı yıkama ile tıkanıklığı açabilmek mümkün olmaktadır. Eğer geçirimli beton siltli killi kum taneleri ile tıkanırsa geleneksel metotlarla temizlemek etkili olmamaktadır (Mata, 2008). Mata and Leming (2012), %20 poroziteye sahip betonları iki döngü şeklinde sedimentlerle tıkaşmış ve her döngüden sonra betonu yıkamış ve kumun büyük çoğunluğunun üst yüzeyde hapsediğini ve siltli killi kumların betonun iç kısımlarına kadar ulaşabildiğini ve alt tabakada biriktiğini söylemiştir. Kum çoğunlukla yıkanarak uzaklaştırılabiliş ve geçirimsizlik %30 oranında geri

kazanılabilmiştir. Killi siltli yüzeylerde alt tabakada biriken parçacıkların geri kazanılmasının zorluğu nedeniyle yıkamanın bu yüzeylerde daha etkisiz olduğu belirtilmiştir (<%20 oranında başarı). Vancura et al. (2012), halen kullanımda olan geçirimli beton kaldırımlarda vakumlu kamyon, vakumlu süpürme ve yenilemeli hava cadde süpürgesi ile tıkanmanın açılmasını incelemiş ve bahsedilen tüm yöntemlerin sadece yüzeyden 3 mm alta kadar tıkanmayı açtığını ve daha derinlerde bir etkisinin olmadığı sonucuna varmıştır. Bazı noktalarda ise istenilen geçirimliliğin sağlanması için her ay düzenli olarak bakım yapılması gerektiği görülmüştür. Drake and Bradford (2013), sekiz farklı otoparkta, basınçlı yıkama, sokak süpürme arabaları ve yüksek/düşük basınçlı vakumlu süpürgeler gibi farklı makinelerin etkinliğini incelemiş ve sonuçlar kullanılan makinelerin tamamının belli bir kademeye kadar etkili olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, büyük ihtimalle geçirimli betonun iç tabakalarına kadar işleyen ve artık çıkarılması mümkün olmayan partiküllerle alakalıdır. Bahsedilen bütün çalışmalardan, geçirimli betonlarda düzenli bakımla dahi tıkanmanın önüne geçmenin mümkün olmadığı sonucuna ulaşılabilir.

2.6. Geçirimli Betonun Maliyet Analizi

Geçirimli beton uygulamaları özellikle trafik yükünün az olduğu kaldırım, otopark vb. gibi yerlerde kullanıma oldukça uygundur. Sadece mekanik özellikleri dikkate alındığında geleneksel betona kıyasla zayıf gibi görülse de çevre dostu olması ve yağmur suyu drenesindeki etkisi göz önüne alındığında sağladığı faydalar göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir. Benzer malzemelerle üretilen betonları kıyaslamamanın en pratik yollarından birisi maliyet analizi ve kullanım ömrüdür. Geçirimli betonun maliyet analizi ile alakalı kapsamlı ve genel çalışma bulunmamakta ve mevcut sınırlı çalışmalar da sadece lokal olarak bir fikir vermektedir. Bahsedilen çalışmalarda ise geçirimli betonun, geleneksel betona kıyasla kontrollü tasarlanması gerekliliği vurgulanmaktadır. Betonu yerleştirmede karşılaşılan problemler nedeniyle, elde edilen sonuçlar ilk maliyetinin daha yüksek olduğu yönündedir (Wang et al., 2010; Terhell et al., 2015).

Geçirimli betonun toplam maliyeti yaşam döngüsü maliyet analizi (LCAA) ile belirlenebilir. Ancak, geçirimli betondan elde edilen uzun ömürlü performans, yapım ve bakım maliyeti değerlerine dair bilgilerin oldukça kısıtlı olması gibi nedenlerle, bu analiz ancak birçok varsayımla yapılabilmektedir. Wang et al. (2010)' da belirtildiği gibi, bir otoyol güvenlik şeridinde geçirimli ve geleneksel beton tercihlerinin maliyetleri kullanılarak birbirleriyle kıyaslanmış ve geçirimli betonun kullanım maliyetini %30 oranında azalttığı ve LCAA sonuçlarının gerçek veriler kullanılarak yapılmasıyla bu değerlerin birbirleriyle kıyaslanabileceği ifade edilmiştir. Bir diğer çalışmada Terhell et al. (2015), farklı birçok şirketten toplanan

verilere dayanarak, geçirimli beton kaldırımların başlangıç maliyetinden 64649 dolar azalttığı ve kaldırımların ortalama 25 yıllık kullanım ömrü düşünülerek suyun drene edilmesi için harcanacak 3,788,856 doların tasarruf edildiği söylenmiştir. Yapım maliyetindeki azalmalar, ek bir drenaj sistemi gerekmemesi ve geçirimli betonun herhangi bir kaplamaya ihtiyaç duymamasından kaynaklanmaktadır. Amerikan Federal Yollar İdaresi (FHWA), geçirimli betonun geleneksel betona kıyasla, %15-20 daha pahalı olabileceğini belirtmektedir. Ancak bu miktar kullanılan malzemeler ve uygulanan yöntem gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebilmektedir.

Mevcut olan literatür incelendiğinde geçirimli betonun uzun ömürlü maliyeti için yapılan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Mevcut olan çalışmalarda sadece başlangıç maliyeti dikkate alınıp, uzun ömürlü performanslar incelenemediği için genel yargı geçirimli betonun daha pahalı olduğu yönündedir. Ancak geçirimli betonun yüzeydeki yağmur suyu akışını azaltması, doğal filtreleme özelliği, yeraltı kaynaklarını beslemesi gibi faydaları göz önüne alındığında özellikle taşıt trafiğinin az olduğu bölgelerde kullanılması önerilmektedir.

2.7. Geçirimli Betonda Görüntü Analizi Yönteminin Kullanılması

Geçirimli betonlarda iç yapı incelenerek, boşluk büyüklüğü, boşlukların dağılımı ve birbirleriyle olan bağlantılarının belirlenmesi amacıyla görüntü analizi yöntemleri kullanılmaktadır. Görüntü analizi genellikle iki şekilde yapılmaktadır. Birinci yöntemde numunenin tamamı ya da belirli aralıklarla kesilen parçaların fotoğrafları çekilerek ilgili programlar yardımıyla görüntülerden boşluklar analiz edilmektedir. İkinci yöntemde ise bilgisayarlı tomografi (BT) ya da mikro tomografi (mikro BT) kullanılarak numunenin tamamının boşluk yapısı belirlenmektedir. Fotoğraflar üzerinden yapılan analizler, geçirimli betonların boşluk yapısına dair genel bir fikir vermekte ve tamamını temsil ettiği varsayılmaktadır (Sumanasooriya and Neithalath, 2009; Sumanasooriya et al., 2010; Martin III et al., 2013; Zhong et al., 2016; Rao et al., 2020; Debnath and Sarkar, 2021). Ancak BT yardımıyla yapılan analizle bu varsayıma gerek kalmayıp numunenin bütün iç yapısını göstermektedir. BT yardımıyla yapılan analizlerde tıkanmanın olduğu bölge de belirlenebilmektedir (Yu et al., 2019a; Ćosić et al., 2015; Kuang et al., 2015; Zhang et al., 2018; Lee et al., 2021; Shan et al., 2022). Aşağıda görüntü analizi kullanılarak geçirimli betonlarda yapılan çalışmaların özeti verilmiştir.

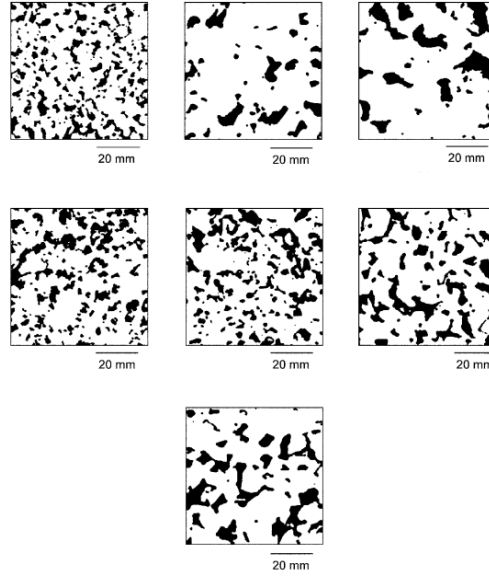
Yu et al. (2019a), agrega boyutunun basınç dayanımına etkisini incelemiştir. 8 boy sınıfında bazalt agregasının kullanıldığı çalışmada agrega gradasyonları 2.36-4.75 mm; 4.75-6 mm; 6-8 mm; 8-9.5 mm; 4.75-9.5 mm; 10-12.5 mm; 12.5-15 mm

ve 10-15 mm olarak belirlenmiş ve bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılmıştır. Bütün karışımlar %20 porozite hedeflenerek aynı s/ç oranlarıyla üretilmesine rağmen basınç dayanımlarının değişkenlik gösterdiği, ortalama tane boyutu 7 mm'den küçük agrega boyutlarında basınç dayanımının artan agrega boyutuyla doğru orantılı bir şekilde arttığı ancak 7 mm'yi geçtikten sonra bu artışın kayda değer bir mertebede olmadığı bulunmuştur. Boşluk yapısıyla basınç dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde ise, agrega boyutu arttıkça, küçük boyutlardaki boşlukların miktarının daha büyüklere kıyasla daha çok değişkenlik gösterdiği, küçük boşluk sayısı arttıkça (0-1.5 mm² arası boşluklar) geçirimli betonda basınç dayanımının azalacağı söylenmiştir.

Yu et al. (2019b), bir önceki çalışmanın devamı niteliğinde olan bu çalışmada 2D/3D BT görüntüleriyle geçirimli betonda boşluk yapılarını ve geçirimliliğini simüle etmiş ve BT görüntülerinin analiz edilmesi neticesinde geçirimli betonlarda boşlukların genellikle 3-7 adet agrega ile çevrelendiği, boşlukların çoğunluğunun elips şeklinde olduğu belirtilmiştir. Boşluklar büyüklüklerine göre 3 kategoriye ayrılmış: <20 mm² olanlar küçük, 20 mm²-50 mm² arası orta ve >50 mm² olanlar ise büyük boşluklar olarak adlandırılmıştır. Agrega boyutu arttıkça küçük boşlukların azaldığı, orta büyüklükteki boşlukların miktarında bir değişiklik olmazken büyük boşluk oranının arttığı belirtilmiştir. Beton karışımında kullanılan agrega boyutu fark etmeksizin bütün karışımlarda küçük boşlukların (<2 mm²) yüksek oranda (>%14) bulunduğu belirtilmiştir. Avizo programı kullanılarak yapılan 3 boyutlu (3D) geçirimlilik simülasyonlarında ise 3D boşluk boyutları arttıkça geçirimliliğin de arttığı ve artan toplam boşluk yüzey alanı ile geçirimliliğin azaldığı raporlanmıştır.

Sumanasooriya and Neithalath (2009), sekiz farklı geçirimli beton karışımı tasarlamak için 2.36-4.75 mm (No. 8); 4.75-9.5 mm (No. 4); 9.5-12.5 mm (3/8'') gradasyonlarında çakıl kullanmıştır. Ayrıca bu gradasyonlar belli oranlarda da karıştırılarak geçirimli beton üretilmiştir. S/ç oranının bütün karışımlar için 0.33 olduğu çalışmada porozite hem hacim yöntemiyle hem de görüntü analizi yöntemiyle belirlenmiştir. Boşluk büyüklüğü ve dağılımlarını belirlemek için 150 mm uzunluğundaki silindir numuneler 37.5 mm'lik parçalara bölünerek her bir numuneden 4 eşit büyüklükte kesitler elde edilmiştir. Bu kesitler İmageJ programı kullanılarak siyah-beyaz hale getirilip agregalar ve boşluklar farklı renklerde (siyah-beyaz) kodlanarak hesaplamalar yapılmıştır (Şekil 2.9). Her bir boşluk yuvarlak kabul edilerek alanları hesaplanmış ve eşdeğer çapları belirlenmiştir. Daha ince boyutlu agrega (No. 8) kullanılarak üretilen geçirimli betonların bünyesindeki küçük boşluklar daha fazla iken iri agregalarla üretilen geçirimli betonlarda (No. 4 ve 9.5 mm-12.5 mm) küçük boşluklarla beraber daha iri boşlukların da yer aldığı görülmüştür. Efektif boşluk büyüklüğünü (d₅₀) hesaplamak için 1 mm'den daha

büyük boşlukların ortalaması kullanılmıştır. Kümülatif frekans dağılımının %50'sine karşılık gelen boşluk büyüklüğü olarak tanımlanan d_{50} değerleri incelendiğinde, daha ince agregaların geçirimli beton karışımlarında kullanılması neticesinde boşluk boyutlarının daha küçük olduğu, iri agreganın daha ince agregaya yerine kullanıldığı karışımlarda, iri agregaların daha ince agreganın bıraktığı boşluğu doldurmaya yetmeyeceği ve böylelikle boşluk boyutu (d_{50} değerleri) ve dolayısıyla porozitenin artacağı belirtilmiştir.



Şekil 2.9 Farklı agrega gradasyonları ile eşiklenmiş görüntüler (Sumanasooriya and Neithalath, 2009).

Sumanasooriya et al. (2010), bir önceki çalışmada kullandıkları agrega gradasyonları ve bunların karışımı ile oluşturdukları 12 farklı geçirimli beton numunesini görüntü analizi ile yeniden yapılandırarak boşluk yapısını ve geçirimliliğini analiz etmişlerdir. Her bir agrega gradasyonu için 2 adet 150 mm uzunluğundaki silindir numuneleri 50 mm olacak şekilde kesmişler ve her bir gruptan $2 \times 3 = 6$ adet olmak üzere toplamda 72 görüntü ile numunelerin boşluk yapıları analiz edilmiş ve 3D görünimleri çıkarılmıştır. Hacimsel porozite değerleri ile görüntülerden elde edilen ortalama boşluk alanı değerlerinin birbirleriyle örtüştüğünü belirtmişlerdir.

Sumanasooriya and Neithalath (2011), üç farklı kireçtaşı agregası gradasyonu (No.8; No.4 ve 3/8'') kullandıkları çalışmada düşük ve yüksek çimento hamuru içerikli olarak iki farklı şekilde geçirimli beton karışımları tasarlamışlardır. 150 mm uzunluğundaki silindir numuneler 50'şer mm olacak şekilde kesilerek her bir örnekten 3'er adet parça elde edilmiştir. Deneysel yöntemle bulunan ve görüntü analizi ile elde edilen porozite değerlerinin birbirleriyle örtüştüğü, boşluk

büyükliklerinin betonun porozitesinden değil de kullanılan agrega boyutundan etkilendiği sonucuna varılmıştır. Düşük ve yüksek çimento hamuruna sahip numunelerdeki boşlukların yüzey alanlarının birbirinden oldukça farklı olduğu, yüksek çimento hamuruna sahip karışımların hamurun gözenekleri tıkaması nedeniyle daha düşük geçirimlilik gösterdiği belirtilmiştir.

Martin III et al. (2013), 4 farklı agrega tane aralığı kullanarak 0.3 s/ç oranına sahip numunelerle ürettiği geçirimli betonların boşluk hacmini deneysel ve görüntü analizi yöntemleriyle ölçerek birbirleriyle karşılaştırmıştır. 15.6 cm (6 in.) uzunluğunda silindir numuneler 2.5 cm aralıklarla kesilmiş ve bu numunelerin görüntüleri alınarak analiz edilmiştir. Görüntü analizi ile hesaplanan boşluk hacmi değerlerinin deneysel yöntemle belirlenen değerden daha fazla geldiği belirtilmiştir. Bu sonuç için ise iki neden öne sürülmüştür: Birincisi toplam ve efektif porozite kavramlarının birbirlerinden farklı olması ve görüntü analizi ile yapılan hesaplamalarda bunun dikkate alınmadığıdır. İkinci sebep olarak ise numunelerin kesilmesi sırasında küçük agregaların kaybolması gösterilmiştir.

Ćosić et al. (2015), agrega boyutu ve kökeninin geçirimli beton özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmada 4-8 mm ve 8-16 mm tane aralığındaki dolomit ve çelik cürufu agregalarını (30:60 veya 60:30) oranlarında kullanarak geçirimli betonlar üretmişlerdir. Karışımlarda %10 oranında da ince agrega kullanılmıştır. Mikro BT ile elde edilen görüntüler yardımıyla mekanik özelliklere ek olarak geçirimlilik ve boşluk hacmi özellikleri de incelenmiş ve Avizo programı yardımıyla geçirimli betonların 3D görüntüleri elde edilmiştir. Dolomit agregası kullanımının ve iri agreganın daha yüksek oranda kullanılmasının geçirimli betonda daha yüksek toplam boşluk hacmine sebep olduğu, beklenmeyen bir sonuç olarak ise agrega türünün agrega boyutuna kıyasla birbirleriyle bağlantılı olan boşlukları daha çok etkilediği belirtilmiştir. Cüruf agregasında ise hem bağlantılılığın hem de toplam porozitenin daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kuang et al. (2015), laboratuvar ve sahada üretilen geçirimli betonlardan alınan karot örneklerini çekilen X-ray tomografi (XRT) ile analiz ederek boşluk hacmini çıkarmışlardır. Aynı geçirimli beton Cincinnati'de bir sitede de kullanılmış ve 3 yıl sonunda buradan alınan örnekler ile tıkanma potansiyelleri de incelenmiştir. Boşluk boyutu ve frekansı, efektif porozite, boşluk kıvrımlılığı (L_e/L), boşluk dağılımı ve boşluk yüzey alanlarını hesaplamışlardır. Görüntü çözünürlüğünün boşluk hacmi hesaplamaları için kritik bir öneme sahip olmadığı, küçük boşlukların su geçirimliliğine etkisinin olmadığı, numunelerin toplam porozitesinin %10 ile %30 arasında değiştiği, efektif porozitenin ise %4 ile %27 arasında olduğu belirtilmiştir.

Zhong et al. (2016), boşluk kıvrımlılığının geçirimli betonun hidrolik performansına etkisini inceledikleri çalışmada 1.19 mm, 2.38 mm, 4.75 mm olmak üzere üç farklı maksimum tane boyutunda geçirimli betonlar üretmişler ve görüntü analizi ile boşluk miktarı, dağılımları, boşlukların birbirleriyle bağlantılarını ve kıvrımlılıklarını araştırmışlardır. Efektif porozite, matris işlenebilirliği ve agrega boyutunun boşluk kıvrımlılığını etkileyen ana parametreler olduğu, artan matris işlenebilirliğinin geçirimli betonda hidrolik performansı azalttığı, agrega boyutu arttıkça boşlukların birbirleriyle olan bağlantılılığı arttığı için su geçirimliliğinin de arttığı ifade edilmiştir.

Akand et al. (2016), 2 boyutlu (2D) görüntülerin analiz edilmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile boşluk dağılımının geçirimli betonda dayanım, sertlik ve geçirimlilik üzerindeki etkisini çalışmıştır. İlk önce hızlı Fourier dönüşümü ile (FFT) boşlukların konumu ve dağılımları özetlenmiştir. Daha sonra ANSYS programı kullanılarak elde edilen mikro yapı modeli üzerinde sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. 2D mikro yapı görüntülerinde örnek boyutlarının etkisi farklı kesitler kullanılarak araştırılmış ve temsili element hacmi (RVE) bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar ile deneysel olarak elde edilen sonuçlar kıyaslandığında %90 oranında bir uyum bulunmuş ve önerilen mikro mekanik analiz yönteminin geçirimli beton için kullanılabileceği söylenmiştir.

Zhong and Wille (2016), boyutları 1.19 mm ile 4.75 mm arasında değişen kuvars agregaları ile basınç dayanımları 29 MPa ile 174 MPa arasında değişen geçirimli betonlar üretmiş ve bu betonların boşluk sistemlerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Boşluk büyüklüğü dağılımı doğrusal yol fonksiyonu (lineer path function-LPF) ile hesaplanmış ve görüntü analizi ile elde edilen değerlerle örtüşmüştür. Hesaplanan değerler iki parametrelili Weibull dağılımından daha iyi sonuç vermiştir. Yazarlar tarafından boşluk büyüklüğü dağılımını belirlemek için önerilen denklemin hassas ölçüme gerek kalmadan yeterli doğruluk gösterdiği raporlanmıştır.

Neithalath et al. (2010), 2.36 mm-4.75 mm ve 4.75 mm-9.5 mm tane aralığındaki agregalar ile bunların belli oranlarda karıştırılmasıyla oluşturdukları geçirimli betonlarda geçirimlilik ve porozite değerlerini görüntü analizi yöntemiyle belirlemişlerdir. Boşluk boyutunu belirlemek için önerdikleri üç farklı yöntemin (d_{50} , d_{TPC} ve d_{crit}) birbirlerine yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Burada d_{50} ; kümülatif frekansın %50'sine karşılık gelen boşluk boyutu, d_{TPC} ; iki noktalı fonksiyondan elde edilen değer ve d_{crit} ; granülometrik dağılım fonksiyonundan elde edilen boşluk boyutu değerini temsil etmektedir. İki parametrelili Weibull dağılımının geçirimli betonlarda boşluk dağılımını temsil etmede yeterli olduğu belirtilmiştir.

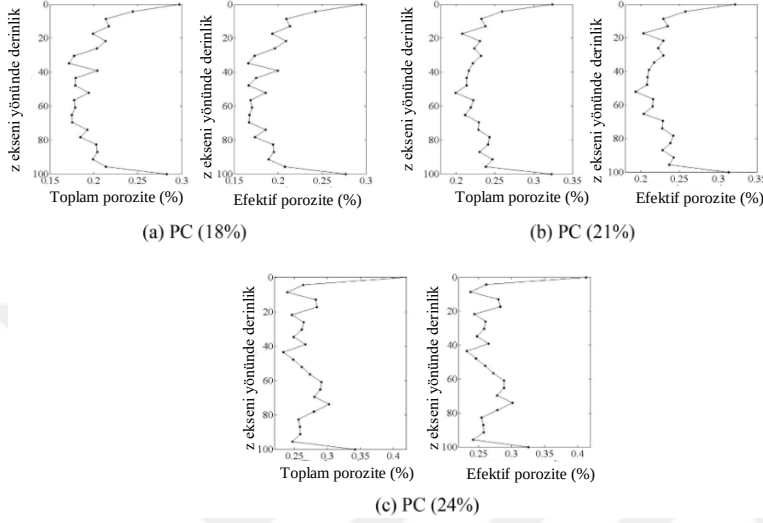
Deo and Neithalath (2010), geçirimli beton içerisinde rastgele dağılan boşlukların basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için farklı boşluk hacmine sahip geçirimli betonlar üzerinde çalışmıştır. Agregat boyutunun artmasıyla basınç dayanımı artmış, belirli oranlarda karıştırılarak kullanılan agregaların basınç dayanımı ise tek boyutlu kullanılanların dayanım değerlerinin arasında olmuştur. Görüntü analizi ile boşluklar incelendiğinde, daha küçük boyutlu agregat kullanılan karışımlarda basınç dayanımının düşmesine sebep olarak kırılma aşamasında daha çok boşluğun devrede olması gösterilmiştir.

Manahiloh et al. (2012), 4 farklı saha betonundan örnek alarak bilgisayarlı tomografi yardımıyla geçirimli betonda tıkanıklığı ölçmüş ve porozite değeri % 7.9 olan örneğin vakumlu temizleme ile temizlendikten sonra porozitesinin %19.05'e yükseldiğini, BT görüntülerinde tıkalı kesimlerin biraz daha koyu renkli olarak görüldüğünü (siyah renk boşluk olacak şekilde), numunelerde boşlukların üstten 24 cm sonrasında itibaren tıkanıldığını, görüntü analizi yöntemi ve deneysel olarak bulunan değerlerin birbiri ile örtüştüğünü belirtmişlerdir.

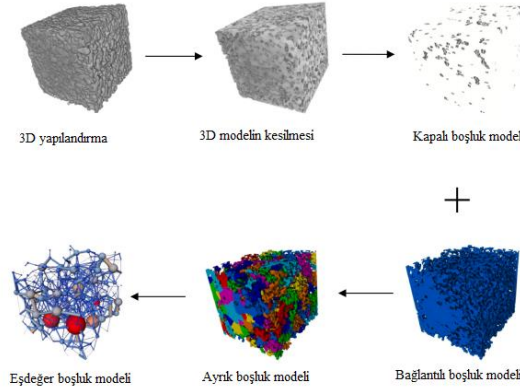
Xu et al. (2018), geçirimli betonun yollarda kullanılabilirliğini araştırmak için ince agregat ve içeriğinin değişken olduğu karışımlarda porozite, basınç dayanımı, geçirimsizlik, aşınma direnci, kuruma-büzülme ve oyulma dirençlerine ek olarak görüntü analizi yöntemi ile de boşluk hacmi hesaplamışlardır. İnce agregat kullanımının agregalar ile çimento hamuru arasında daha fazla bağlantı noktası oluşturarak geçirimli betonun özelliklerini iyileştirdiğini, numunelerin görüntü analizleri incelendiğinde ince agregat ilavesinin boşluk çapı ve alanını azalttığını ifade etmişlerdir. Beton karışımına %0'dan %15'e kadar ince agregat eklenmesi neticesinde 7050µm'den büyük boşlukların oranı %69'dan %17'ye kadar düşmüş ve 1050µm-50µm arasındaki boşluklar ise %5'ten %41'e yükselmiştir. Efektif porozite ile toplam porozite arasında lineer bir ilişki olduğu ve efektif porozite ile geçirimsizlik katsayısı arasındaki ilişkinin ise üstel fonksiyonla ifade edilebileceği belirtilmiştir.

Shan et al. (2022), iki farklı boy sınıfındaki (2.36-4.75 mm ve 4.75-9.5 mm) bazalt agregasını sırasıyla %30 ve %70 oranlarında kullanarak ürettikleri geçirimli betonlarda boşluk özelliklerini ve boşluk yapısının geçirimsizlik üzerindeki etkisini bilgisayarlı tomografi ve Avizo programı yardımıyla incelemişlerdir. Efektif porozitenin toplam poroziteye kıyasla su geçirimsizliğini belirlemede daha etkili olduğu ancak benzer efektif porozitelere sahip numunelerin farklı geçirimsizlik özellikleri gösterebildiği bunun da boşlukların boyutu, dağılımı, kıvrımlılığı gibi özelliklerine bağlı olduğunu söylemişlerdir. Tomografi görüntülerinden elde edilen boşluk değerleri z eksenine yönünde grafiğe döküldüğünde, geçirimli betonların üst ve alt kısımlarının göreceli olarak daha boşluklu bir yapıya sahip olduğu görülmüştür (Şekil 2.10). Bunun sebebi olarak ise taze betonun kalıplara

yerleştirilmesi sırasında bağlayıcının kalıbın alt taraflarındaki boşlukları ancak bir seviyeye kadar doldurabildiği ve betonun alt kısmına kıyasla sıkıştırma işleminin üst taraflarda daha zayıf olduğu gösterilmiştir. Ayrıca BT görüntüleri Avizo programı ile 3D olarak tekrar yapılandırılmış ve boşluk yapısı bağlantılı ve ayrık olarak modellenmiştir (Şekil 2.11). Böylelikle geçirimli betonun eşdeğer boşluk modeli elde edilmiştir.



Şekil 2.10 Farklı derinliklerde porozite değişimi (Shan et al., 2022)



Şekil 2.11 Geçirimli betonun 3D boşluk yapısı.

Zhang et al. (2018), bilgisayarlı tomografi yardımıyla elde ettikleri görüntüler ile geçirimli betonların akım hatlarını oluşturarak boşluk yapısı ve karakteristiğini araştırmışlardır. BT görüntüleri ile geçirimli betonların sanal 3D yapılarını oluşturarak, bağlantılı boşlukları modellemiş ve hedef porozite değerini analiz ederek gerçek porozite, oluşturulan 3D yapının porozitesi vb. gibi özellikleri ortaya çıkarmışlardır. 3D görüntülerden elde edilen porozitenin gerçek poroziteyi temsil ettiği, 3D bağlantılı porozitenin ise efektif porozite değerini temsil ettiği

belirtilmiştir. CFD (Computed Fluid Dynamics) yöntemi ile elde edilen akım hattı ile artan porozitenin geçirimsizliği oldukça olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir.

Lee et al. (2021) tarafından yapılan çalışmada üç farklı geçirimsiz beton kaplama herhangi bir tıkanma olmadan su geçirimsizliği deneyine tabi tutulmuş, 6 ay aktif kaldırım olarak kullanımdan sonra farklı bölgelerden karot numuneler alınarak bilgisayarlı tomografi yardımıyla tıkanma etkisi incelenmiştir. 6 aylık kullanım sonucunda betonların geçirimsizliği %17 oranında azalırken basınçlı suyla yıkama ile bu tıkanmanın %29.6'sı açılmıştır. X-ray BT görüntüleri tıkanmanın yüzeye yakın bölgelerde meydana geldiğini ve basınçlı suyla yıkama sonrasında bile bazı tıkalı bölgelerin açılmadığını göstermiştir. İnce agrega ağırlıklı olan betonlarda tıkanma derinliği 15 mm olurken bu değer daha iri agrega ile üretilen numunelerde 35 mm civarında olmuştur. Basınçlı suyla yıkama yöntemi sadece üstten 30 mm derinliğinde etkili olmuştur.

Huang et al. (2021), boşluk büyüklüğü dağılımının geçirimsiz betonlarda su geçirimsizliği üzerindeki etkisini incelemek için 2.36-4.75 mm, 4.75-9.5 mm, 9.5-16 mm ve 16-19 mm tane aralığındaki kireçtaşı agregası, silis dumanı ve Portland çimentosu kullanarak geçirimsiz beton üretmişlerdir. Geçirimsiz betonlarda beton tabakası kalınlığının su geçirimsizliği üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeyde olurken, tıkanma davranışını oldukça etkilediği görülmüştür. Agregada gradasyonunun su geçirimsizliği üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı ve iri agrega gradasyonundaki değişimle her zaman daha iyi su geçirimsizliği sağlanmadığı da eklenmiştir. BT kullanılarak boşluk yapısı ve dağılımları incelenmiş ve daha fazla boşluk hacmine sahip numunelerin daha kesintili dağılmış bir boşluk dağılımı gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca artırılan tıkalı kum boyutunun geçirimsizliği daha fazla düşürdüğü ve farklı beton tabakası kalınlıkları ve farklı tıkalı kumlar ile ek bir araştırmaya ihtiyaç duyulduğu eklenmiştir.

Rao et al. (2019), boşluk-agrega-çimento hamurunun dikey yönde dağılımının geçirimsiz beton üzerindeki etkisini incelemek için 4.5-9.5 mm tane aralığında olmak üzere tek bir gradasyonda kireçtaşı agregası kullanarak 0.27 s/ç oranına sahip geçirimsiz beton üretmiş, poroziteyi Montes et al. (2005) tarafından önerilen su yer değiştirme metodundan faydalanarak ölçmüş, boşluk dağılımlarını belirlemek için ise görüntü analizi yöntemini kullanmıştır. Görüntü analizi yöntemi için 120 mm uzunluğundaki silindir numuneler 20 mm kalınlığında yatay olarak kesilmiş ve her bir numune için 6 parça elde edilmiştir. Kesilen parçalarda çimento hamuru ve boşluk renklerinin birbiri ile oldukça yakın olduğu dolayısıyla resimler siyah-beyaz'a çevrilip hesaplama yapıldığında programın çimento hamurunu algılayamadığı belirlendiği için 20 mm kalınlığındaki kesitler önce herhangi bir boyama işlemine tabi tutulmadan fotoğraflanmış, daha sonra sadece agregalar boyanarak tekrar görüntü alınmış ve son olarak hamur fazı da boyanarak fotoğraflar

çekilmiştir. Böylelikle boşluk, agrega ve hamur fazı göreceli oranları ayrı ayrı hesaplanabilmiştir. Geçirimli betonların üst yüzeyinde küçük boşlukların daha fazla olduğu ve alt yüzeyde boşluk sayısının ortalama olarak %40 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Görüntüler analiz edildiğinde üst bölgede küçük boşlukların büyük boşluklarla birleşerek toplamda daha az sayıda boşluk oluşturduğu ama daha yüksek porozite değeri verdiği görülmüştür.

Debnath and Sarkar (2021), geçirimli betonlarda boşluk dağılımını incelemek için 13.2-12.5 mm, 12.5-9.5 mm, 9.5-4.75 mm, 12.5-4.75 mm ve 19-2.36 mm tane aralığında tuğla agregası ve kum kullanmışlardır. 200 mm uzunluğundaki silindir numunelerden 10 mm uzunluğunda 5'er adet örnek kesilerek ve bu görüntüler işlenerek geçirimli betonların boşluk yapısı araştırılmıştır. İri agregalar ile üretilen geçirimli betonlardaki boşlukların daha büyük olduğu, 3 parametrelili Weibull dağılımının geçirimli betonlarda boşluk büyüklüğünü tanımlamak için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Wang et al. (2021), hamur kalınlığının geçirimli betonlarda dayanım ve geçirimlilik üzerindeki etkisini incelemiş ve bunun için kuvars agregası, kum, silis dumanı ve Portland çimentosu ile geçirimli beton tasarlamışlardır. Hamur kalınlığını ölçmek için mikro-BT cihazı kullanmışlar ve elde ettikleri görüntülerde hamur fazını farklı bir renkle boyadıktan sonra geri kalan agrega ve boşlukları çıkararak sadece bu fazın kalınlığını hesaplamışlardır. Bağlayıcı hamur fazı arttıkça hamur ile agrega arasındaki bağlantı daha güçlü olmuş, dayanım artarken boşlukların hamur ile dolması sonucunda geçirimlilik ve porozite azalmıştır. Hamur kalınlığı arttıkça toplam boşluk oranına kıyasla bağlantılı boşluk oranında daha fazla bir düşüş gözlemlenmiştir.

Kayhanian et al. (2012), Kaliforniya'daki 20 farklı otoparktan alınan geçirimli betonların tıkanma davranışını BT ile incelemişlerdir. Geçirimlilik ölçümleri otoparkların ana girişinde, herhangi bir trafik yükünün olmadığı bölgede ve otopark içerisinde üç ayrı noktada olmak üzere toplam 5 noktada alınmıştır. Bitki örtüsü, trafik akışı, erozyon, tıkaç birikimi, bakım, çatlak varlığı, yağış durumu ve sıcaklık değerleri de ayrıca toplanmıştır. Toplanan bu veriler ile geçirimliliğin değişimi dolayısıyla geçirimli betonlarda tıkanma sebebi istatistiksel olarak da incelenmiştir. Ayrıca otoparklardan alınan 7 karot numune BT ile görüntü analizine tabi tutularak tıkanma ve boşluk karakterleri incelenmiştir. Sonuç olarak otopark yaşının geçirimli betonlarda su geçirimliliği davranışında ana etken olduğu, istatistiksel analiz sonucunda 38 μm 'den küçük ince partiküllerin tıkanma üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Hava sıcaklığının 30°C'den yüksek olduğu gün sayısı ve otopark çevresindeki bitki örtüsünün de tıkanma davranışı üzerinde etkisi olduğu vurgulanmıştır.

Chandrappa and Biligiri (2017), 4.75-6.7 mm, 6.7-9.5 mm, 9.5-13.2 mm ve 13.2-19 mm tane aralığında agregalar ile ürettikleri geçirimli betonlarda basınç dayanımı, porozite, geçirimlilik, aşınma direncini araştırarak çektikleri mikro-BT görüntüleri ile de boşluk yapısını incelemişlerdir. Daha ince agregalar ile üretilen geçirimli betonların daha iri agregalar kullanımına kıyasla yüksek oranda boşluk oluşturduğu, beton yoğunluğunun artan s/ç oranı ve çimento/agrega oranı ile arttığı, geçirimlilik ile porozite arasında oldukça iyi bir bağlantı olduğu ($R^2 > 0.90$), aşınma direncinde kütle kaybının %20 ile %55 arasında değiştiği, daha ince agregalı betonların daha az kütle kaybı gösterdiği belirtilmiştir. Mikro BT analizleri sonucunda boşlukların küreselliği arttıkça sıklığının arttığı, yüzey alanının boşluk küreselliği ile ters orantılı olduğu belirtilmiştir. Numunelerin kıvrımlılık değerleri < 1 olarak bulunmuş ve sebep olarak ise tek boyutlu agregalar kullanımının benzer boyutlu boşluklar oluşturması nedeniyle daha kıvrımlı bir yapı meydana getirmesini göstermişlerdir.

Huang et al. (2020), D_{max} ve agregalar gradasyonunun geçirimli betonlarda boşluk yapısına olan etkisini incelemek için D_{max} değeri 16, 13.2, 9.5 ve 4.75 mm arasında değişen agregaları tek ve kendi aralarında karıştırarak kullanmıştır. Chandrappa and Biligiri (2017) 'nin aksine iri agregalar ile üretilen geçirimli betonların daha yüksek geçirimlilik gösterdiğini ancak D_{max} değerinin birbirleriyle bağlantılı olan boşluk miktarını etkilemediğini belirtmiştir. BT görüntüleri incelendiğinde D_{max} boyutu küçüldükçe eşdeğer çap değerinin daha homojen dağıldığı, 10 mm ve üstündeki D_{max} değerleri için boşluk küreselliğinin agregalar boyutundan bağımsız olduğu belirtilmiştir.

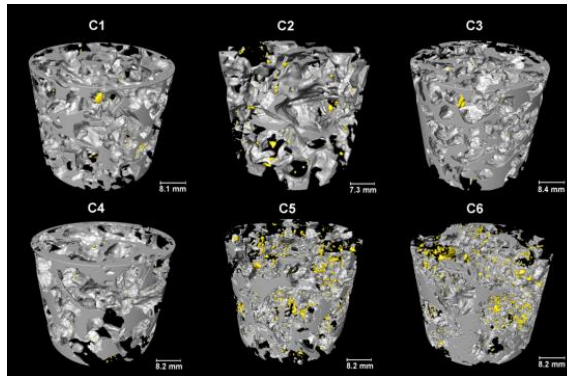
Zhu et al. (2020), geri dönüştürülmüş agregalar ve lif kullanarak geçirimli beton özelliklerini araştırmış ve kıvrımlılık (τ) değerini çektiği 2D görüntüler yardımıyla hesaplamıştır. Lif miktarı 3 kg/m^3 olduğu zaman basınç dayanımı ve geçirimlilik değerlerinin en ideal seviyede olduğu, lif katkısının eğilme dayanımını %30-32 civarında arttırdığı belirtilmiştir. Kıvrımlılık değeri hesaplamak için yeni bir yöntem belirlenmiş ve hesaplanan değerler porozite değerlerinin örtüştüğü belirtilmiştir.

Zhong and Wille (2018), matris ve boşluk karakterinin geçirimli betonda durabilite üzerindeki etkisini incelemek için normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı olacak şekilde 3 farklı matris tasarlamış ve bu matrisler ile geçirimli beton üretmiştir. Donma-çözülme dirençleri incelendiğinde ultra yüksek dayanımlı matrisle üretilen geçirimli betonların normal ve yüksek dayanımlı matrislilerle üretilenlere kıyasla daha iyi sonuç verdiği, boşluk yapısının donma-çözülme direnci üzerinde etkisinin boşluk büyüklüğü ve kıvrımlılık ile alakalı olduğu, iri agregalar kullanımının daha iri boşluklar oluşturduğu ve dolayısıyla daha yüksek kıvrımlılık gösterdiği ve donma-çözülme hasarının daha düşük olduğu belirtilmiştir. Uygun

dozajda lif kullanımının ultra yüksek dayanımlı matrislerde donma-çözülme direncini arttırdığı ancak normal ve yüksek dayanımlı matrislerle üretilen geçirimli betonlarda herhangi bir katkısının olmadığı belirtilmiştir.

Chandrappa and Biligiri (2018), farklı boşluk hacmine sahip geçirimli betonların x-ışınli mikro tomografi yardımı ile 3 boyutlu görüntüsünü çıkarmış, boşluk morfolojisini, boşluk şeklini ve büyüklüklerini belirlemiştir. Daha düz/yassı boşlukların suyun transferini zorlaştırmasından dolayı küre şeklindeki boşlukların tercih edildiği geçirimli betonlarda boşluk karakterinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Boşlukların şeklini (çubuk, küre, yassı, disk) belirleyerek Zingg diyagramı oluşturmuş ve bu diyagram yardımıyla boşlukların %35-40'ının çubuk şeklinde olduğunu belirlemiştir. XRT ile alınan görüntüler incelendiğinde artan porozite ile boşluk sayısının azaldığı ancak düşük poroziteye sahip numunelerin daha fazla boşluk hacmine sahip olduğu belirtilmiştir. Daha yüksek poroziteye sahip geçirimli betonların daha benzer büyüklükte boşluklardan oluştuğu, daha düşük poroziteli geçirimli betonların ise boşluk büyüklüklerinin daha eşit dağıldığı ve/veya çok az büyük boşluk içerdiği dolayısıyla da toplam boşluk oranında artışa sebep olduğu belirtilmiştir.

Grubeša et al. (2018), dolomit, diyabaz ve çelik cürufu agregası (4-8 mm ve 8-16 mm) kullanarak ürettikleri geçirimli betonların hidrolik özelliklerini kıyaslayarak en ideal drenaj kapasitesine sahip agrega türü ve gradasyonunu bulmaya çalışmışlardır. Sadece hidrolik kıstaslar göz önüne alındığında diyabaz agregasının keskin uçları nedeniyle suyun drene olmasına daha kolay izin vermesi nedeniyle daha iyi sonuç verdiği, artan agrega tane boyutunun daha iyi mekanik özellik ve daha iyi geçirimlilik sağladığı belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen 3 boyutlu görünüm Şekil 2.12'de verilmiştir. 3 boyutlu görünümeler yardımıyla bağlantılı olan boşluklar belirlenebilmiştir.



Şekil 2.12 Geçirimli betonda 3 boyutlu görünüm (Grubeša et al., 2018).

Zhou et al. (2019), geçirimli betonda tıkanma riskini BT görüntüleri yardımıyla analiz etmiştir. Tıkayıcı olarak 4 farklı tane aralığında (0-0.5 mm, 0.5-

1 mm, 1-2 mm ve 2-3 mm) kireçtaşı agregası kullanılan çalışmada tıkanma öncesinde geçirimsizliğin beton porozitesine ve agreganın büyüklüğüne bağlı olduğu belirtilmiştir. Porozitenin geçirimsiz betonun enkesitinden geçen su hacmini belirlediği, agregaların ise boşluk sayısı ve beton iç yapısının karmaşıklığını belirlediği eklenmiştir. Tıkanma ardından yapılan analizler sonucunda ise tıkanıcı kumun boyutunun çok büyük ya da çok küçük olduğu zaman tıkanmanın oldukça az olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni olarak ise tıkanıcı partiküllerin geçirimsiz betonların iç tarafındaki boşluklarda hapsolmesiyle tıkanmanın gerçekleşmesi gösterilmiştir. Tıkanıcı partikülün büyüklüğünün boşluk büyüklüğüne oranı ile bulunan büyüklük oranının geçirimsiz betonlarda tıkanma seviyesini belirlemede etken bir faktör olduğu belirtilmiştir. Büyüklük oranı 0.6 ile 0.8 arasındaki partiküllerin geçirimsiz betonu kolayca tıkadığı yapılan analizlerden elde edilmiştir.

Hung et al. (2021), geçirimsiz betonda dayanım ve su geçirimsizliğinin agreganın boyutundan ve tıkanıcı malzemeden hangi kademede etkilendiğini belirlemek için %100 oranında 5-10 mm (Mix 1), %80 5-10 mm-%15 2-5 mm-%5 kum (Mix 2) ve %50 5-10 mm-%45 2-5 mm-%5 kum (Mix 3) olacak şekilde üç farklı agreganın tane dağılımı ile geçirimsiz beton karışımları üretmiştir. 8.3 g tıkanıcı kum ile tıkanma yapılmış, akabinde basınçlı su ve vakumla temizleme işlemi ile tıkanan boşluklar açılmaya çalışılmıştır. Mix 3'ün mekanik ve geçirimsizlik özellikleri beraber dikkate alındığında en iyi sonucu verdiği, CT görüntüleriyle elde edilen porozite değerlerinin deneysel olarak elde edilenden %115 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Yüksek farkın ise deneysel çalışmada beton içerisindeki izole boşlukların ölçümünün daha zor olması nedeniyle düşük boşluk hacmi değeri elde edilmesi gösterilmiştir. Tıkanma deneyinin ardından yapılan vakumla süpürme ve basınçlı su ile yıkamanın geçirimsizlik değerini iyileştirdiği ancak ilk değere tekrar ulaşmanın mümkün olmadığı belirtilmiştir.

Rao and Yang (2021), bilgisayarlı tomografi, suyun kademeli yer değiştirmesi metodu ve dilim numunelerde suyun yer değiştirmesi metodu olmak üzere toplam üç farklı yöntem ile boşluk hacmi ölçerek sonuçları birbirleriyle kıyaslamıştır. Dilim numunelerle porozite ölçümü için önce kesilmemiş numuneler ile standart yöntem olan suyun yer değişmesi yardımıyla porozite ölçülmüş daha sonra aynı örnekler 6 parçaya bölünerek her bir dilim parçada porozite tekrar ölçülmüştür. Standart yöntemle hesaplanan boşluk hacmi ile BT görüntülerinden elde edilen sonuçlar birbiriyle mükemmel yakın örtüşürken toplam boşluk ve açık boşlukların birbirlerinden farklı olması nedeniyle BT ile elde edilen sonuçların daha yüksek olduğu belirtilmiştir.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Amaç ve kapsam

Geçirimli betonlar yerel malzemelerle üretilibilmeleri ve geleneksel betona kıyasla suyu daha hızlı drene edebilmeleri nedeniyle her geçen gün daha geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Ancak düşük mekanik özellikleri ve zamanla bünyelerindeki boşlukların tıkanarak geçirimsizlik özelliklerini kaybetmeleri, bu tarz betonların yaygın kullanımının önüne geçmektedir. Bu tez çalışmasında geçirimli betonların tıkanmasına agrega kökeni ve gradasyonunun etkisi incelenmiştir. Agrega kökeni ve gradasyonunun etkisini görebilmek amacıyla bütün beton karışımları 10 ± 1.5 MPa basınç dayanımına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Beton üretiminde üç farklı agrega kökeni (kireçtaşı, dere ve geri dönüştürülmüş agrega) ve her bir agrega kökeni için üç farklı gradasyon (15-25 mm, 5-15 mm ve 10-15 mm) kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş agregalar 10 MPa dayanımı yakalamak için ön deney kapsamında üretilen numunelerin kırıcılarda kırılıp, öğütülerek tekrar kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu aşamada agregalar iyice karıştırılarak oldukça homojen bir agrega yığını elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneyisel çalışma 4 aşamadan oluşmaktadır:

1. aşamada 10 MPa basınç dayanımına ulaşabilmek için kireçtaşı ve dere agregaları kullanılarak ön deneyler yapılmış ve hedeflenen basınç dayanımını sağlayan beton karışımları belirlenmiştir. Daha sonra, ön deney aşamasında dökülen geçirimli betonlar tekrar değerlendirilerek bu tez kapsamında atık miktarını azaltmak hedeflenmiştir. Bu amaçla kireçtaşı agregasından oluşan geçirimli betonlar basınç deneylerinden sonra çeneli kırıcılarda kırılarak, ilgili eleklerde elenmiş ve geri dönüştürülmüş agrega (GDA) elde edilmiştir. Elde edilen GDA'lar kullanılarak 10 MPa hedef dayanımına ulaşacak karışım tasarımları yapılmıştır.

2. aşamada elde edilen geçirimli beton karışımlarının mekanik ve hidrolik özellikleri incelenmiştir. Basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları, porozite ve su geçirimsizliğine ek olarak aşınma direnci ve kurulma büzülmesi deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

3. aşamada geçirimli betonlardan hazırlanan numunelerin yapay olarak laboratuvar ortamında tıkanması sağlanmıştır. Tıkayıcı olarak kil kullanılmıştır. Geçirimli betonların 100 g kil kullanılarak tamamen tıkanmaları sağlanmış ve tıkanma tekrar sayıları belirlenmiştir.

4. aşamada ise geçirimli betonların tıkanma öncesi ve tıkanma sonrasında bilgisayarlı tomografi (BT) yardımıyla görüntüleri alınarak boşluk yapıları

incelenmiştir. Tıkanmanın meydana geldiği bölgeler belirlenerek boşluk miktarının değişimi belirlenmiştir.

3.2. Malzemeler

3.2.1. Çimento

Çalışmada İzmir’de yerel bir çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 3.1’de, fiziksel özellikleri ise Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.

Kimyasal özellikler	Miktar (%)
SiO ₂	18.18
Al ₂ O ₃	4.7
Fe ₂ O ₃	3.41
CaO	63.17
MgO	1.22
Na ₂ O	0.58
K ₂ O	0.74
SO ₃	3.57
Kızdırma kaybı	3.28
Cl	0.006
Çözünmeyen kalıntı	0.03
Serbest CaO	0.94

Tablo 3.2. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.

Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık	3.14
Özgül yüzey (cm ² /g)	3220
Priz başlangıç süresi, (dak.)	230
Priz sona erme süresi, (dak.)	320
Basınç dayanımı (MPa)	
2 gün	29.5
7 gün	43.1
28 gün	45.0

3.2.2. Agregası

Tez çalışması kapsamında kireçtaşı, dere ve GDA olmak üzere üç farklı kökünde agregası kullanılmıştır.

3.2.2.1. Kireçtaşı agregası (KA)

Çalışma kapsamında yerel bir firmadan temin edilen 15-25 mm, 5-15 mm ve 10-15 mm olmak üzere üç farklı tane aralığında kireçtaşı agregası kullanılmıştır.

Kireçtaşı agregalarının elek analizi sonuçları Tablo 3.3'te fiziksel özellikleri ise Tablo 3.6'da listelenmiştir.

Tablo 3.3 Kireçtaşı agregasının elek analizi sonuçları.

Elek Açıklığı (mm)	Geçen (%)		
	15-25 mm	10-15 mm	5-15 mm
31.5	100	100	100
25	99	100	100
16	27	100	100
8	0	92	41
4	0	1	6
2	0	0	2
1	0	0	0
0.5	0	0	0
0.25	0	0	0
0.125	0	0	0

3.2.2.2. Dere Agregası (DA)

Turgutlu yöresinde faaliyet gösteren bir agrega firmasından temin edilen dere agregaları, kireçtaşı agregasında olduğu gibi 15-25 mm, 10-15 mm ve 5-15 mm tane boyutundan oluşmaktadır. Dere agregalarının elek analizi Tablo 3.4'te fiziksel özellikleri ise Tablo 3.6'da listelenmiştir.

Tablo 3.4. Dere agregasının elek analizi sonuçları.

Elek Açıklığı (mm)	Geçen (%)		
	15-25 mm	10-15 mm	5-15 mm
31.5	100	100	100
25	99	100	100
16	29	100	100
8	0	95	46
4	0	1	8
2	0	0	3
1	0	0	0
0.5	0	0	0
0.25	0	0	0
0.125	0	0	0

3.2.2.3. Geri Dönüştürülmüş Agregalar (GDA)

Bu çalışmada kullanılan geri dönüştürülmüş agregalar çalışma kapsamında üretilen geçirimli betonlardan elde edilmiştir. Ön deney aşamasında üretilen numuneler atılmayarak, çeneli kırıcılar yardımıyla kırılmış ve saklanmıştır. Ön deneyler neticesinde yaklaşık olarak 10 MPa hedef basınç dayanımına sahip olan kireçtaşı agregası kullanılarak üretilen geçirimli betonlar 28 gün kürlendikten sonra ilgili deneylere tabi tutulmuştur. Uygulanan deneyler sonucunda numuneler bir kırıcı yardımıyla parçalanmış ve elde edilen agregalar ilgili eleklerden elenerek kireçtaşı ve dere agregasıyla aynı tane boyutlarına sahip (15-25 mm, 10-15 mm ve 5-15 mm) geri dönüştürülmüş agregalar elde edilmiştir. Böylece tez kapsamında üretilen numuneler geri kazandırılarak ekstra bir çöp oluşmasının önüne geçilmiştir. Bahsedilen şekilde elde edilen geri dönüştürülmüş agregaların elek analizler Tablo 3.5'te, fiziksel özellikleri ise Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.5. GDA'ların elek analizi sonuçları.

Elek Açıklığı (mm)	Geçen (%)		
	15-25 mm	10-15 mm	5-15 mm
31.5	100	100	100
25	97	100	100
16	25	99	100
8	0	90	39
4	0	0	5
2	0	0	1
1	0	0	0
0.5	0	0	0
0.25	0	0	0
0.125	0	0	0

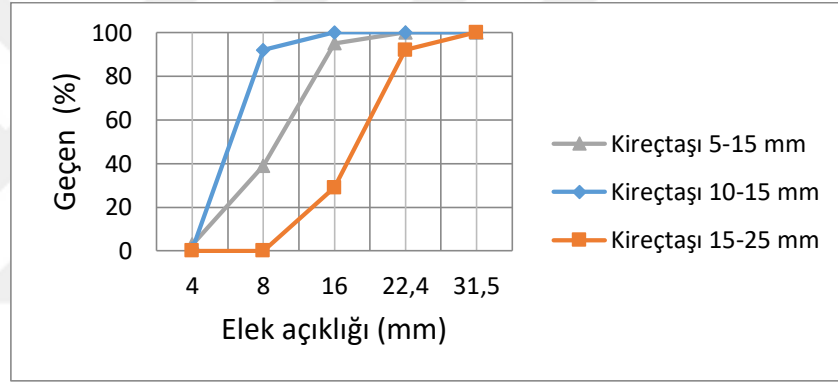


Şekil 3.1. Çalışma kapsamında kullanılan agregalar.

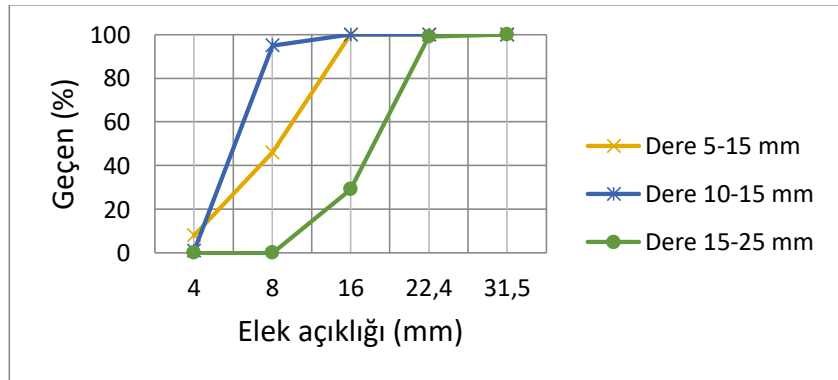
Tablo 3.6. Agregaların fiziksel özellikleri.

Özellikler	Kireçtaşı Agregası			Dere Agregası			Geri Dönüştürülmüş Agrega		
	15-25 mm	10-15 mm	5-15 mm	15-25 mm	10-15 mm	5-15 mm	15-25 mm	10-15 mm	5-15 mm
Kuru özgül ağırlık	2.69	2.65	2.65	2.68	2.73	2.71	2.65	2.66	2.70
Doygun yüzey kuru özgül ağırlık	2.71	2.68	2.67	2.71	2.75	2.73	2.61	2.63	2.65
Su emme oranı (%)	0.23	0.28	0.30	0.41	1.41	1.71	5.28	5.48	8.40

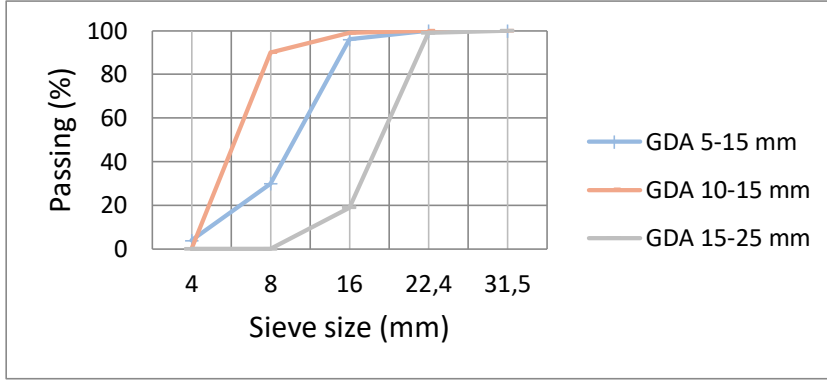
Çalışma kapsamında kullanılan kireçtaşı agregalarına ait gradasyon eğrileri Şekil 3.2’de, dere agregaları Şekil 3.3’de ve GDA’lar Şekil 3.4’de verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan tüm agregalara ait gradasyon eğrileri ise Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



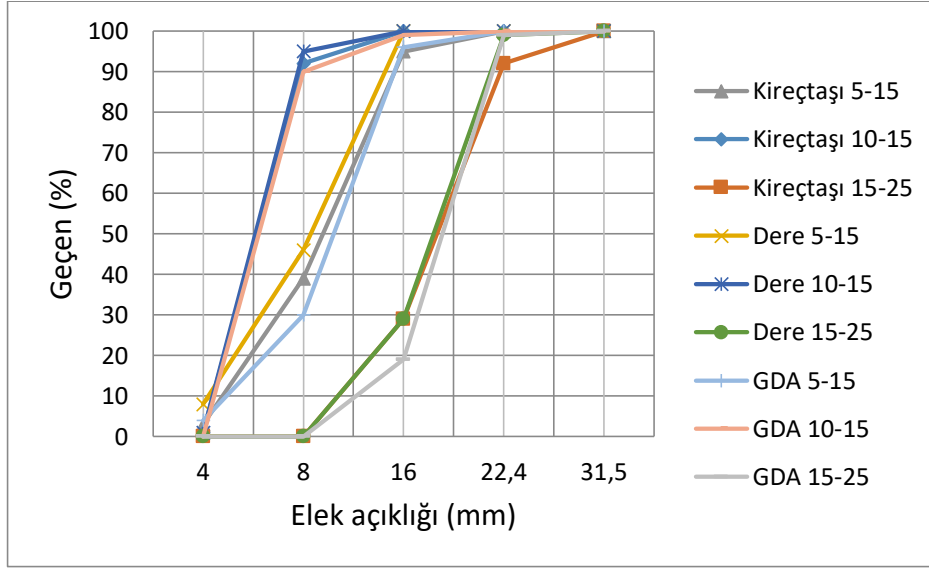
Şekil 3.2. Kireçtaşı agregalarının gradasyon eğrileri.



Şekil 3.3. Dere agregalarının gradasyon eğrileri.



Şekil 3.4. GDA'ların gradasyon eğrileri.



Şekil 3.5. Agregaların gradasyon eğrileri.

3.2.3. Su

Karışım suyu olarak İzmir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2.4. Süperakışkanlaştırıcı (SA)

İnka yapı kimyasalları firmasından temin edilen BSC/950 polikarboksiliketer esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen teknik özellikler Tablo 3.7'de özetlenmiştir.

Tablo 3.7. Süperakışkanlaştırıcının özellikleri.

Özellikler	
Görünüm	Kahverengi sıvı
Yoğunluk	1.07 kg/lt
Ph	4-7
Toplam klorür içeriği	En fazla %0.1
Alkali miktarı	En fazla %5

3.3. Yöntemler

3.3.1 Beton karışımlarının hazırlanması

Tez çalışması kapsamında üç farklı agrega ile üç farklı gradasyonda toplamda 9 farklı geçirimli beton karışım üretilmiştir. Yapılan ön deneylerden elde edilen sonuçlar mineral katkı kullanılmadan 10 MPa basınç dayanımına ulaşmanın kullanılan tüm agrega kökeni ve gradasyonları için mümkün olduğunu ortaya koymuştur. 10 MPa basınç dayanımının hafif trafik yükü altındaki geçirimli betonlar için yeterli bir dayanım olduğu da literatürde belirtilmiştir (ACI, 2010). Bütün bu sebepler göz önüne alınarak hedef basınç dayanımı tüm agrega türleri için 10 ± 1 MPa olacak şekilde seçilmiştir. Hedef dayanıma ulaşabilmek için boşluk miktarı %15'te sabit tutulmuş ve çimento dozajı, su/çimento oranı gibi parametreler değiştirilmiştir. Yapılan ön deneyler neticesinde belirlenen teorik beton karışım oranları Tablo 3.8'de, düzeltilmiş karışım oranları ise Tablo 3.9'da listelenmiştir.

Tablo 3.8. Geçirimli beton karışımların teorik karışım oranları (kg/m³).

[illegible]

Tablo 3.9. Geçirimli beton karışımların düzeltilmiş karışım oranları (kg/m³).

[illegible]

3.3.2 Beton karışımlarının dökümü ve kürlenmesi

Çalışma kapsamında geçirimli betonun karıştırılmasında 30 dm³ hacimli laboratuvar tipi beton mikseri kullanılmıştır. Doygun kuru yüzey durumundaki iri agregalar ve çimento miksere eklenerek kuru olarak 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyu ikiye bölünerek, ilk parçasına akışkanlaştırıcı katkı eklenmiş ve karıştırma işlemine 1 dakika daha devam edilmiştir. Mikser çalışır haldeyken karışım suyunun geri kalan ½'lik kısmı da eklenerek 1 dakika daha karıştırılmıştır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra mikser durdurulmuş ve karışımın homojenliği kontrol edilmiştir. Bir mala yardımıyla karışımın alt ve üst yüzeyleri tekrar karıştırıldıktan sonra 1 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bütün karışımlarda numunelerin çökme değerleri yaklaşık olarak sıfır bulunmuştur.

Betonlar kalıplara üç kademeli olarak yerleştirilmiştir. Geçirimli beton numuneler yağlanan kalıplara üç tabaka halinde her tabaka 25 defa şişlenerek yerleştirilmiştir. Üretilen geçirimli beton numuneler bir gün kalıplarda bekletildikten sonra kalıplardan çıkartılıp 28 gün standart su kürüne bırakılmıştır. 28 gün boyunca kürlen numunelerin basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları, boşluk oranları (porozite), geçirimlilik katsayıları, kuruma büzülmeleri ve aşınma dirençleri belirlenmiştir.

3.3.3 Betonların karakterizasyonu

3.3.3.1 Taze hal özellikleri

Taze betonların yayılması TS EN 12350-5 standardına göre saptanmıştır.

3.3.3.2 Sertleşmiş beton özellikleri

Tez çalışması kapsamında örnekler üzerinde tek eksenli basınç (TS EN 12390-3), yarmada çekme (TS EN 12390-6) ve üç noktalı eğilme (TS EN 12390-5) deneyleri yapılmıştır.

Geçirimli beton örneklerin aşınma direncini belirlemek için Wu et al., 2011 tarafından uygulanan Cantabro test düzeneği kullanılmıştır. Bu düzende Los Angeles aşınma cihazı çelik toprak olmadan kullanılmaktadır. ASTM C131 ve ASTM C365-16 baz alınarak oluşturulan bu düzende 100×200 mm silindir numuneler kullanılmıştır. Silindir numuneler önce tartılmış ve daha sonra Los Angeles tamburu içerisine yerleştirilmiştir. Çelik bilye kullanılmadan 300 tur

sonucunda numune tambur içerisinde çıkarılarak tekrar tartılmış ve ağırlık kaybı aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır:

$$Cantabro\ kaybi = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (1)$$

M_1 : Cantabro testi öncesi ağırlık (g)

M_2 : Cantabro testi sonrası ağırlık (g)

Kuruma büzülmesi deneyi ASTM C157/C157M-17'ye göre yapılmıştır. 75×75×285 mm boyutlarındaki kalıpların kullanıldığı çalışmada geçirimli beton örnekler önce 48 saat su içerisinde kürlendikten hemen sonra ölçüm alınmış ve farklı kürlenme günlerinde de kuruma büzülmesi değerleri belirlenmiştir.

Birbirleriyle bağlantılı ve toplam porozite olmak üzere iki farklı boşluk oranı saptanmıştır. 100×200 mm boyutlarındaki silindir numunelerin havadaki ve su içerisindeki ağırlıklarını ölçmek için elektronik bir tartı kullanılmıştır. Sudaki ağırlık 24 saniye ve 30 saat olmak üzere iki farklı şekilde ölçülmüştür. İlk 24 saniye içerisinde sadece birbirleriyle bağlantılı boşluklar su ile dolmuş, böylelikle ölçülen değer de birbirleriyle bağlantılı porozite hesaplanmasında kullanılmıştır. İkinci ölçümde numuneler 30 saat su içerisinde bırakıldıktan sonra ölçüm alınmıştır. Geçen bu süre içerisinde su açık olan tüm boşlukları doldurduğu için elde edilen değer ile toplam porozite hesaplanmıştır. Liu et al. (2020)'den uyarlanan boşluk oranı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$P = \left[1 - \frac{m_h - m_s}{\rho_s \times V} \right] \times 100 \quad (2)$$

m_h : Havadaki ağırlık (g)

m_s : Sudaki ağırlık (g)

ρ_s : Suyun yoğunluğu (g/cm³)

V : Örnek hacmi (cm³)

P : Porozite (%)

Geçirimli betonların su geçirimsizlik katsayılarını saptamak için Yap et al. (2018) tarafından yapılan çalışmadaki deney yönteminden faydalanılmıştır. Su geçirimsizliği katsayısını hesaplamak için azalan su yüksekliği metoduna göre hazırlanan Şekil 3.6'daki düzenek kullanılmıştır.



Şekil 3.6 Su geçirimliliği katsayısı hesaplamasında kullanılan düzenek.

Hazırlanan geçirimli beton örnekler 48 saat boyunca suda bekletilmiş ve sonrasında sudan çıkarılarak doygun kuru yüzey (DKY) hale getirilmiştir. DKY hale getirilen numunelerin etrafı streç film ile sarılarak beton kalıplarının içerisine yerleştirilmiştir. Kalıbın üst yüzeyine içerisindeki su yüksekliğini görebilmemize olanak sağlayacak şekilde modifiye edilmiş 100 mm iç çapında ve 600 mm yüksekliğinde metal bir boru yerleştirilmiştir. Borunun içerisine 400 mm çizgisine gelene kadar su doldurulmuş ve sonrasında suyun akışa geçmesi sağlanmıştır. Su seviyesinin 290 mm'den (h_1) 70 mm'ye (h_2) düşmesi arasında geçen süre bir kronometre yardımıyla hesaplanmıştır (t). Üretilen betonların su geçirimlilik katsayıları aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır;

$$\text{Su geçirimlilik katsayısı} = \frac{Q \times L}{H \times A \times t} \quad (3)$$

Q: Deney düzeneğinden t süresinde geçen su miktarı (mm^3)

L: Numunenin uzunluğu (mm)

A: Numunenin taban alanı (mm^2)

t: Suyun deney düzeneğinden geçiş süresi (saniye)

H: Su yüksekliği (mm)

Yoğunluk deneyleri ASTM 1754C/1754M standardına göre yapılmıştır. 100×200 mm boyutlarındaki silindir numuneler kullanılarak Eşitlik 4 yardımıyla yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Her bir deney için üçer adet örnek deneye tabi tutularak ortalamaları alınmıştır. Ayrıca yoğunluk, porozite ve su geçirimliliği deneyleri için aynı örnekler kullanılmıştır.

$$\text{Yoğunluk} = \frac{K \times A}{D^2 \times L} \text{ kg/m}^3 \quad (4)$$

A: Numunenin kuru ağırlığı (g)

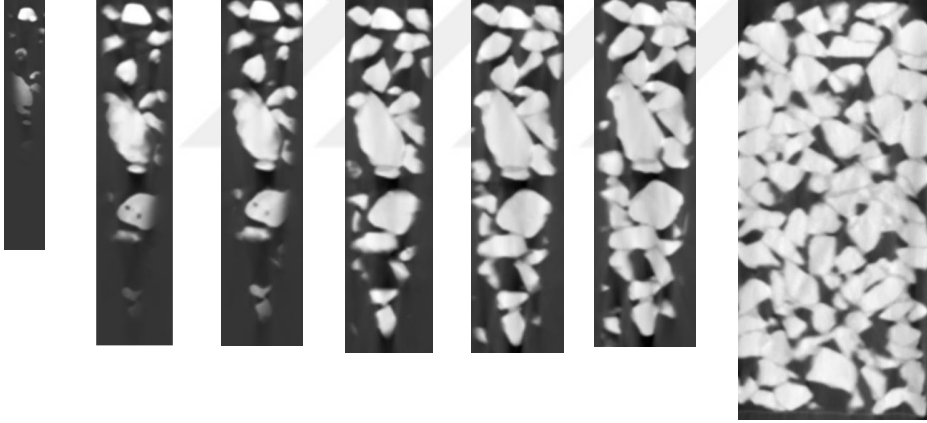
D: Numunenin ortalama çapı (mm)

K: $1273240 \text{ mm}^3\text{kg/m}^3\text{g}$ (Standart tarafından verilen katsayı)

L: Numunenin ortalama uzunluğu (mm)

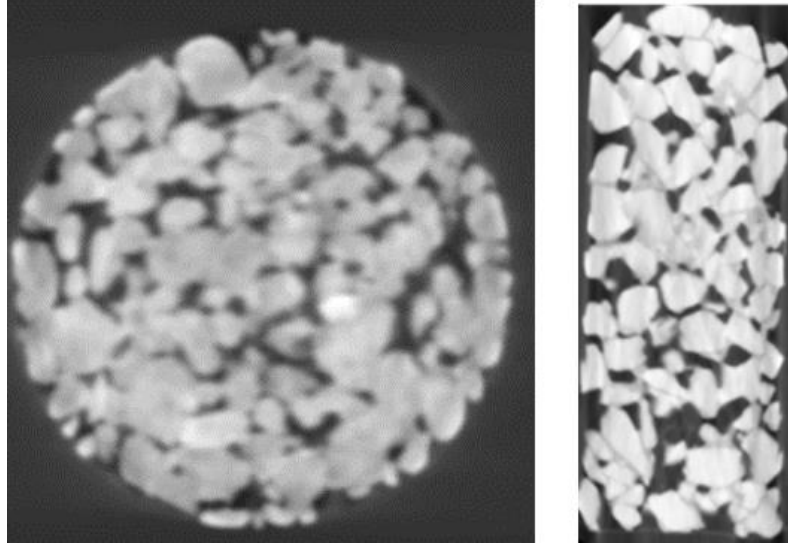
3.3.3.3 Bilgisayarlı tomografi (BT) ile görüntü alınması

Su geçirimliliği ve porozite deneylerine tabi tutulan geçirimli beton numunelerin daha sonra bilgisayarlı tomografi (BT) yardımıyla görüntüleri alınmıştır. Bu görüntüler yardımıyla geçirimli beton örnekleri içerisindeki porozitenin her bir derinlikteki dağılımı, toplam boşluk oranı, boşlukların birbirleriyle olan bağlantısı ve kıvrımlılık değerleri elde edilmiştir. Her bir geçirimli beton karışımı için görüntüler incelenerek deneysel değerler ve BT ile elde edilen görüntülerin analiziyle oluşturulan değerler kıyaslanmıştır. $100 \times 200 \text{ mm}$ silindirik numunelerin BT ile görüntülerinin alınma aşamaları Şekil 3.7’te verilmiştir.

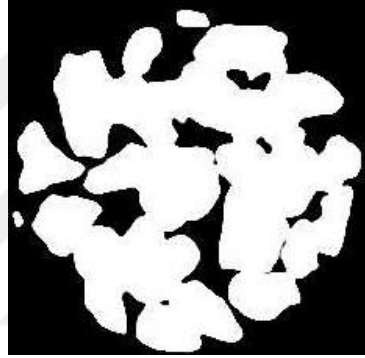


Şekil 3.7 Geçirimli betonların bilgisayarlı tomografi ile görüntü alınma aşamaları.

BT ile alınan görüntüler üst görünüş ve yan görünüş olmak üzere iki farklı düzlemde alınmıştır (Şekil 3.8). Yan görünüşler boşlukların birbirleriyle olan bağlantısını belirlemede, üst görünüşler ise boşluk hacmi hesaplamalarında kullanılmıştır. Şekil 3.7’de belirtilen şekilde alınan görüntüler daha sonra Şekil 3.9’da olduğu gibi agregalar beyaz ve boşluklar siyah olacak şekilde siyah-beyaz renk konturuna çevrilmiş ve boşluk hacmi hesaplamaları yapılmıştır. Siyah-beyaz eşikleme yapıldıktan sonra Python programı ile boşluk hacimleri hesaplanmıştır.

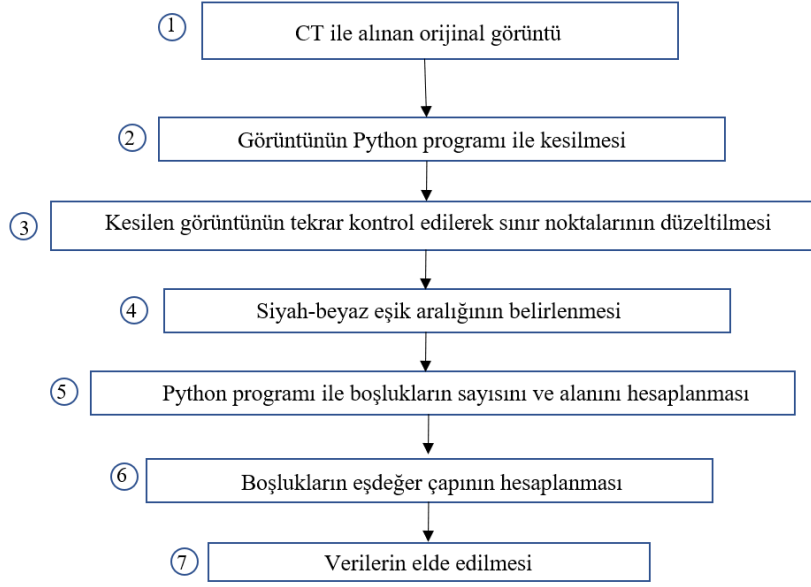


Şekil 3.8 BT ile alınan üst görünüş/yan görünüş.



Şekil 3.9. BT ile alınan görüntülere siyah-beyaz eşikleme yapılması.

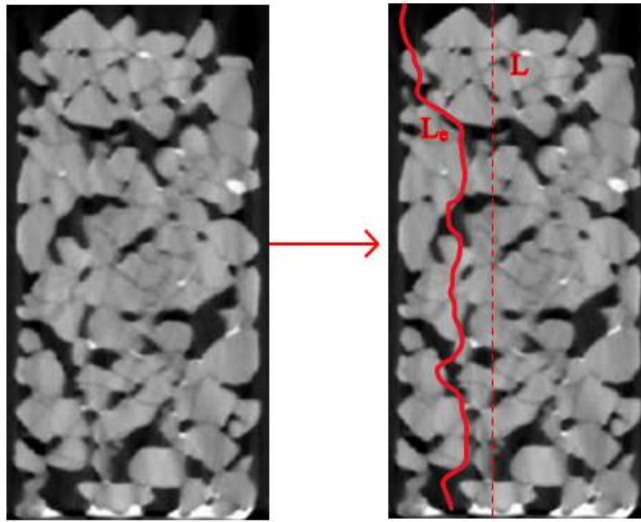
BT ile elde edilen görüntüler analiz edilirken takip edilen adımlar Şekil 3.10'da belirtilmiştir.



Şekil 3.10 Görüntü analizi için takip edilen aşamalar.

3.3.3.4 Kıvrımlılık tayini

Geçirimli betonların su sızdırma kabiliyetinin tayini için boşluk hacminin tek başına yeterli olmadığı, buna ek olarak boşluk kıvrımlılığının da belirlenmesi gerektiğine araştırmacılar tarafından dikkat çekilmiştir (Zhong et al., 2016). Bu nedenle efektif uzunluğun (L_e), numune boyuna (L) bölünmesiyle elde edilen ve kıvrımlılık (τ) adı verilen bir terim kullanılmaktadır (Şekil 3.11) (Eşitlik 5).

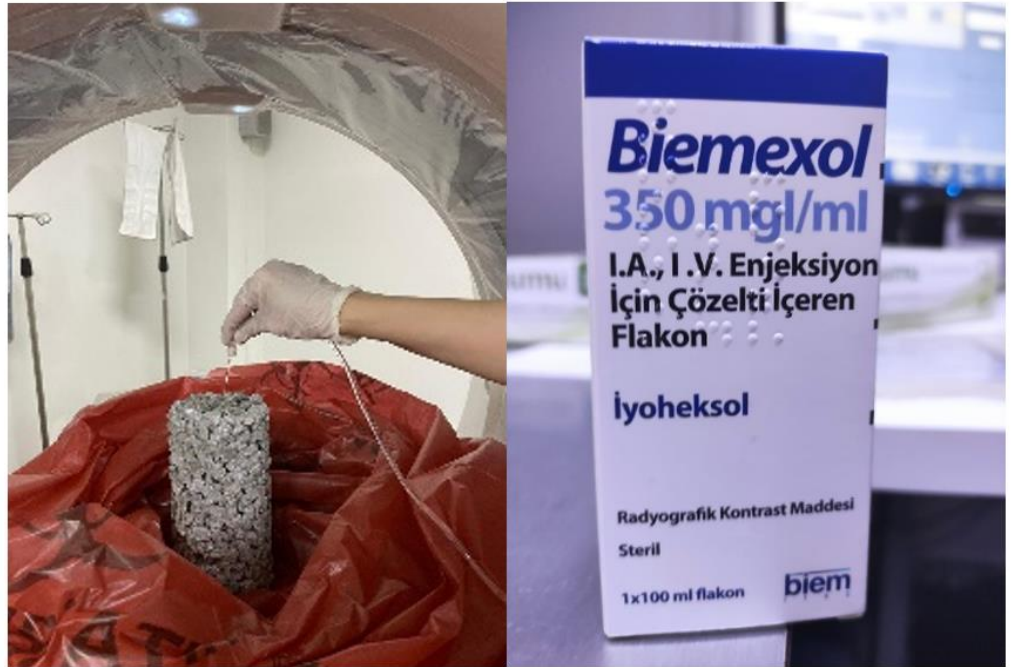


Şekil 3.11 Örnek kıvrımlılık tayini.

$$\tau = \frac{L_e}{L} > 1 \quad (5)$$

Bu bağlantıdaki L_e değerinin büyük olması suyun geçirimli betondan bir alt tabakaya geçebilmek için daha fazla mesafe kat etmesi ve dolayısıyla daha düşük bir su geçirimliliği göstermesi demektir. Geçirimli beton bünyesindeki boşlukların birbirleriyle olan bağlantısının artması, L_e değerinin kısılmasına, dolayısıyla τ değerinin azalmasına ve su geçirimliliğinin artmasına neden olmaktadır.

Geçirimli betonların BT ile görüntüleri alındıktan sonra numunelerin bünyesinde bulunan boşluklar arasındaki bağlantıyı ve sıvının bu boşluklar arasından geçerek bir alt tabakaya ulaşmasına eş zamanlı olarak gözlemleyebilmek ve kıvrımlılık yolunu çizebilmek için Şekil 3.12’de gösterildiği gibi opak madde kullanılmıştır. 40 ml opak madde betonun üst yüzeyinden Şekil 3.12’de belirtildiği gibi verilmiş ve bu madde alt yüzeye kadar boşluklardan geçerek inmiş, yüksek viskozitesi ve farklı yoğunluğu nedeniyle BT görüntülerinde daha parlak beyaz bir renkle gözlemlenmiştir. Elde edilen bu parlak beyaz renkli noktalar yardımıyla geçirimli betonlarda suyun seyahati eş zamanlı olarak gözlemlenmiş ve kaydedilmiştir. Kaydedilen görüntülerden yola çıkılarak yukarıda bahsedilen kıvrımlılık yolu (L_e) her bir numune için belirlenmiştir.



Şekil 3.12 BT ile görüntü alınması.

3.3.3.5 Tıkama işlemi

Geçirimli betonlar kullanım ömürleri boyunca birçok kirletici sedimentlere maruz kaldıkları için düzenli bakım yapılmadıkları takdirde zamanla bünyelerinde bulunan boşluklar tıkanmaktadır. Çevreden yağmur suları, rüzgâr gibi etkilerle sürüklenen ince ya da iri parçacıklar, geçirimli beton yüzeyinden başlayarak boşlukları doldurmaktadır. Boşlukların dolması ile geçirimli beton alt tabakalara suyu süzememekte ve bu su birikintileri beton yüzeyinde toplanmaktadır. Araştırmacılar tıkanma sürecini temsil etmesi için çeşitli tıkayıcı maddeleri farklı miktarlarda kullanmışlardır. Deo et al. (2021), Viera et al. (2020) tıkayıcı malzeme olarak yıllık 1 gram (g) malzemenin 10 yıllık bir döngüde geçirimli betonları tıkama sayılarını bulmak için toplamda 10 g malzeme kullanırken, Sandoval et al. ve Mata and Leming ise 20 yıllık bir döngü için toplamda 100 g tıkayıcı malzemenin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. 100 g malzemeyi 10'a bölerek geçirimli betonlara tıkayıcı madde beslemesini yapmışlar ve geçirimlilik katsayısındaki değişmeyi gözlemlemişlerdir. Bu tez çalışmasında da yukarıda belirlenen değerler göz önüne alınarak 100 g kil tıkayıcı madde olarak kullanılmıştır. Kullanılan kilin satıcı firmadan temin edilen özellikleri Tablo 3.10'de verilmiştir.

Tablo 3.10 Kullanılan kilin kimyasal özellikleri.

Oksit Adı	Birim	
CaO	%	0.38
SiO ₂	%	73.15
Al ₂ O ₃	%	16.55
Fe ₂ O ₃	%	0.69
MgO	%	0.31
SO ₃	%	0.82
Na ₂ O	%	0.1
K ₂ O	%	0.24
P ₂ O ₅	%	0.21
TiO ₂	%	0.32
Kızdırma Kaybı	%	6.9
Yoğunluk	g/cm ³	2.6
Blaine	g/cm ²	8800

Geçirimli betonların laboratuvar ortamında tıkanması için kullanılan kilin maksimum tane boyutu 32 mikron olup Şekil 3.13'te verilmiştir. Tıkama işlemi 10'ar g halinde alınan killer ile yapılmıştır. Tıkamaya başlamadan önce geçirimli beton örneğin etrafı streç film ile kaplanmıştır. Daha sonra numune su geçirimliliği deney düzeneğine yerleştirilmiş ve 10 g'lık kil geçirimli betonun üst yüzeyine (kuru halde) eşit olacak şekilde dağıtılmaya çalışılmıştır. Sisteme su beslemesi yapılmış ve tıkayıcı olarak kullanılan killerin büyük bir kısmının numunenin alt yüzeyinden

çıkıldığı görülmüştür. Alttan akan su ayrı bir kap ile toplanarak numune boşluklarında ilk beslemede hapsolmayan killerin kaybolması önlenmiştir. Toplanan su ile beraber kil partiküller tekrar sisteme beslenmiş ve alt yüzeyden çıkan kil+su tekrar toplanarak sisteme tekrardan beslenmiştir. Bu işleme numunenin alt kısmından çıkan su berraklaşana kadar devam edilmiştir. İlk 10 g'lık kil örneği kullanıldıktan sonra su geçirimsizliği katsayısı ölçülerek not edilmiştir. Daha sonra ikinci 10 g'lık kil örnek ilk beslemedeki işlemler takip edilerek tekrar geçirimli betonda tıkanmayı temsil etmesi için kullanılmıştır. 20 g'lık kil örneğin geçirimli beton içerisindeki boşluklarda hapsi sağlandıktan sonra tekrar su geçirimsizliği katsayısına bakılmış ve not edilmiştir. Bütün bu işlemler üçüncü 10 g'lık kil için dördüncü 10 g'lık kil için yapılarak tıkanma sonrası su geçirimsizliği katsayıları belirlenmiştir. Geçirimli betonlarda ayrıca kaç tekrardan sonra tamamen tıkanmanın gerçekleştiği de saptanmıştır. Ayrıca kille yapılan tıkanmadan sonra numunelerin tekrar BT ile iç yapıları incelenerek görüntü analizi ile de boşluk hacmindeki azalma ve tıkanmanın hangi derinliklerde meydana geldiği de tespit edilmeye çalışılmıştır.

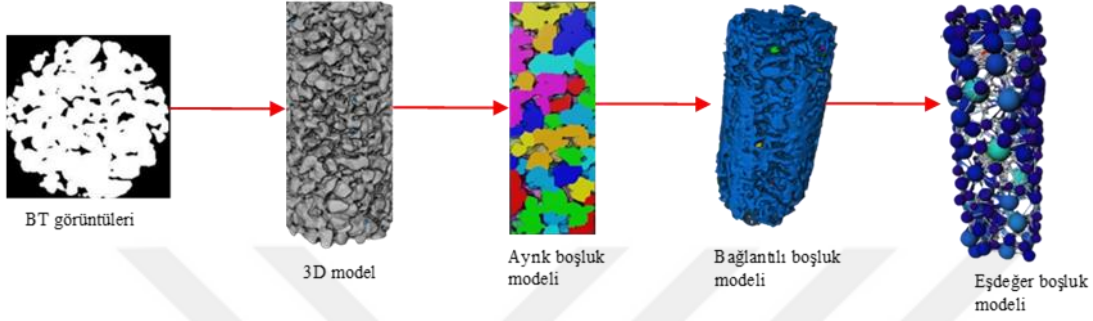


Şekil 3.13 Tıkama işleminde kullanılan kil.

3.3.3.6 Üç boyutlu (3D) analiz

Geçirimli beton numunelerin görüntüleri BT ile alındıktan sonra 3 boyutlu modelleme aşamasına geçilmiştir. Avizo programı kullanılarak 2 boyutlu olan BT görüntüleri ile 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Avizo yardımıyla ayrık boşluk modeli ve bağlantılı boşluk modeli olmak üzere iki çeşit model elde edilmiştir.

Birbirinden ayrılmış boşluk modelinde boşluklar bir boğaz yardımıyla birbirinden ayrılmıştır. Bu boğazlar sayesinde 3D boşluk dağılımı hesaplanabilmektedir. Bağlantılı boşluk modelinde ise efektif boşluklar kullanılarak geçirimsizlik simülasyonu yapılmıştır. 3D yapılandırma aşamasında takip edilen adımlar Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 3D boşluk yapısı analizi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Basınç Dayanımı

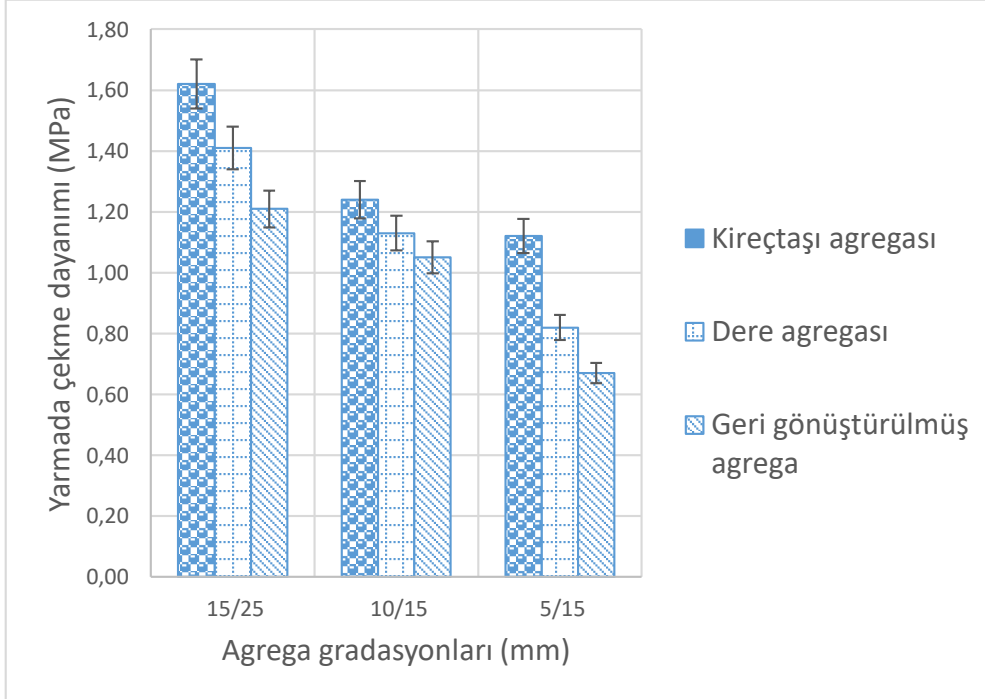
Geçirimli betonların 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Tablo 4.1’de listelenmiştir. Bu çalışmada tıkanma problemine agrega gradasyonu ve kökeninin etkisinin araştırılması amaçlanmış ve bu nedenle bütün karışımlar aynı hedef basınç dayanımına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Karışım oranları incelendiğinde aynı hedef basınç dayanımına ulaşabilmek için gereken çimento hamuru miktarının bütün agrega kökenlerinde, agrega boyutunun artmasıyla azaldığı görülmüştür. 5/15 mm gradasyona sahip agregalar ile üretilen geçirimli betonlarda 10 MPa basınç dayanımına ulaşabilmek için gerekli olan çimento miktarı 327.5 kg iken bu değer aynı gradasyondaki dere agregası için 305.5 kg ve GDA için 344.8 kg olmuştur. GDA kullanılarak elde edilen geçirimli betonlarda ise çimento hamuru ihtiyacı daha fazla olmuştur. Artan yüzey alanı ile çimento hamuru miktarı da artmış ve bu değer 5/15 mm gradasyonda en yüksek değere ulaşarak 344.8 kg olmuştur. Bu çalışmada s/ç oranı ile geçirimli betonların dayanımı arasında bir ilişki kurulamamıştır. ACI (2010)’da belirtildiği gibi s/ç oranındaki değişim geçirimli betonlarda, geleneksel betonda olduğu gibi etki etmemektedir.

Tablo 4.1 Basınç dayanımı sonuçları.

Karışım	Basınç dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)	Standart sapma
KA25	12.01	11.05	0.8
	10.61		
	10.54		
KA10	11.48	11.90	0.4
	11.88		
	12.34		
KA5	9.87	9.44	0.8
	8.49		
	9.96		
DA25	11.30	11.28	1.2
	12.51		
	10.03		
DA10	12.90	11.67	1.8
	9.51		
	12.61		
DA5	11.64	10.23	1.5
	8.51		
	10.54		
GDA25	10.64	10.19	0.58
	10.40		
	9.53		
GDA10	13.12	11.59	1.4
	11.52		
	10.15		
GDA5	11.27	10.43	0.78
	10.35		
	9.70		

4.2. Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı ile ilgili sonuçlar Şekil 4.1’de verilmiştir. Geleneksel betonda olduğu gibi yarmada çekme dayanımları, basınç dayanıma kıyasla oldukça düşüktür (Agar-Ozbek et al., 2013; Sata et al., 2013; Nguyen et al., 2013). Geçirimli betonların yarmada çekme dayanımı sonuçları 0.67 MPa ile 1.62 MPa arasında değişmiştir. En yüksek yarmada çekme dayanımı 15/25 mm tane aralığındaki kireçtaşı agregası ile elde edilirken, bunu aynı gradasyondaki dere agregası ve 10/15 mm tane aralığındaki kireçtaşı agregası ile üretilen geçirimli betonlar takip etmiştir. 0.67 MPa’lık dayanım ile en düşük performansı 5/15 mm gradasyonlu GDA’lı geçirimli betonlar göstermiştir. 15/25 mm tane aralığındaki agregalar bu çalışmada kullanılan diğer gradasyonlara kıyasla daha iyi bir performans göstermiştir. Geri dönüştürülmüş agregalar yüzeylerinde bulunan eski çimento hamuru nedeniyle daha zayıf bir aderansa sahip olduğu için daha düşük yarmada çekme dayanımı göstermişlerdir. Ayrıca 15/25 mm tane aralığındaki GDA’lı geçirimli betonlar daha yüksek yarmada çekme dayanımı göstermiştir. Bu çalışmada üretilen bütün geçirimli betonlar aynı hedef basınç dayanımına sahip olmasına rağmen yarmada çekme dayanımları benzer mertebede olmamıştır. Bunun nedeni olarak ise çimento hamuru ile agregalar arasındaki zayıf matris bağı gösterilebilir.



Şekil 4.1 Yarmada çekme dayanımı sonuçları.

4.3. Eğilme Dayanımı

Bu tez kapsamında üretilen geçirimli betonların eğilme dayanımı sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçları 1.31 MPa ile 2.24 MPa arasında değişmektedir. Geçirimli betonlarda eğilme dayanımı son yıllara kadar yeterince araştırılan bir özellik olmamıştır. Bu nedenle geçirimli betonların eğilme dayanımları için genelleme yapabilecek kadar yeterli bir bilgi elimizde bulunmamaktadır. Bununla birlikte, bazı araştırmacılar geçirimli betonların eğilme dayanımlarının geleneksel betonda olduğu gibi yarmada çekme dayanımdan daha yüksek olduğunu belirtmiş (Chen et al., 2013; Hesami et al., 2014), bazı araştırmacılar ise tam tersi yönünde bir davranış gösterdiğini savunmuşlardır (Yeih et al., 2015; Kuo et al., 2013). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Hesami et al., 2014 ile örtüşmektedir. Kireçtaşı, dere ve geri dönüştürülmüş agregalar ile üretilen geçirimli betonlar arasında en yüksek eğilme dayanımları sırasıyla 2.24 MPa, 2.09 MPa ve 1.84 MPa olmuştur.

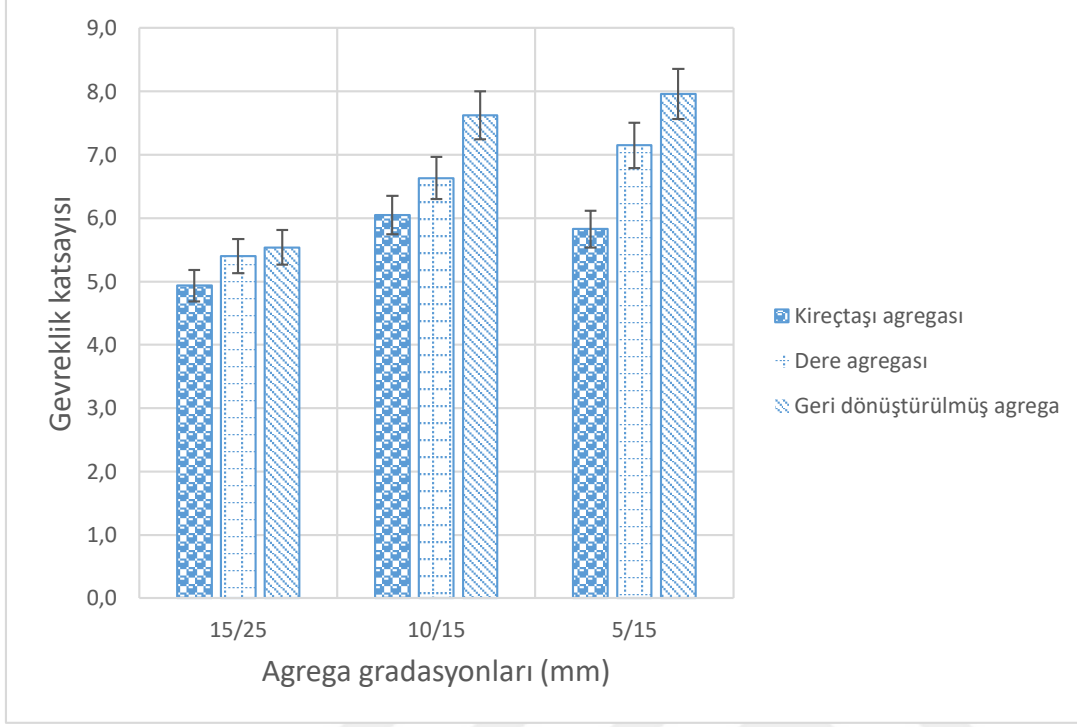
Tablo 4.2. Yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları.

Karışım	*Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Standart sapma	*Eğilme Dayanımı (MPa)	Standart sapma
KA25	1.62	1.32	2.24	0.70
KA10	1.24	1.15	1.95	0.81
KA5	1.12	1.44	1.62	0.94
DA25	1.41	1.17	2.09	1.02
DA10	1.13	1.31	1.76	1.31
DA5	0.82	1.42	1.47	1.37
GDA25	1.21	1.12	1.84	0.97
GDA10	1.05	1.31	1.52	1.22
GDA5	0.67	1.48	1.31	1.33

*Sonuçlar üç örneğin ortalamasıdır.

Bu çalışmada eğilme dayanımı ile alakalı olarak araştırılan bir diğer parametre de gevrekliktir (Yap et al., 2018). Gevrek betonlar daha düşük yük kapasitesine sahip olup ani kırılma göstermektedirler. Bu tez çalışmasında gevreklik, gevreklik katsayısı denilen ve basınç dayanımının eğilme dayanımına bölünmesiyle elde edilen değer ile ölçülmüş ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Geleneksel betonlarda gevreklik katsayısı 4 ile 8 arasında değişmekte iken (Neville, 1995), geçirimli betonlar için elimizde böyle bir aralık bulunmamaktadır. Bu çalışmada araştırılan agrega kökenleri ve gradasyonları için gevreklik katsayısı 4.9 ve 8 arasında değişmiştir. 5/15 mm tane aralığındaki kireçtaşı agregası ile üretilen geçirimli betonlarda en düşük gevreklik değerleri elde edilmiştir. Kireçtaşı agregaları ile üretilen geçirimli betonlar en düşük gevreklik katsayısı değerlerini gösterirken, geri dönüştürülmüş agregalar ile üretilen geçirimli betonlar en yüksek

değere sahip olmuşlardır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar Yap et al., 2018 ile örtüşmektedir.



Şekil 4.2 Gevreklik katsayısı sonuçları.

4.4. Yoğunluk ve Boşluk Oranı

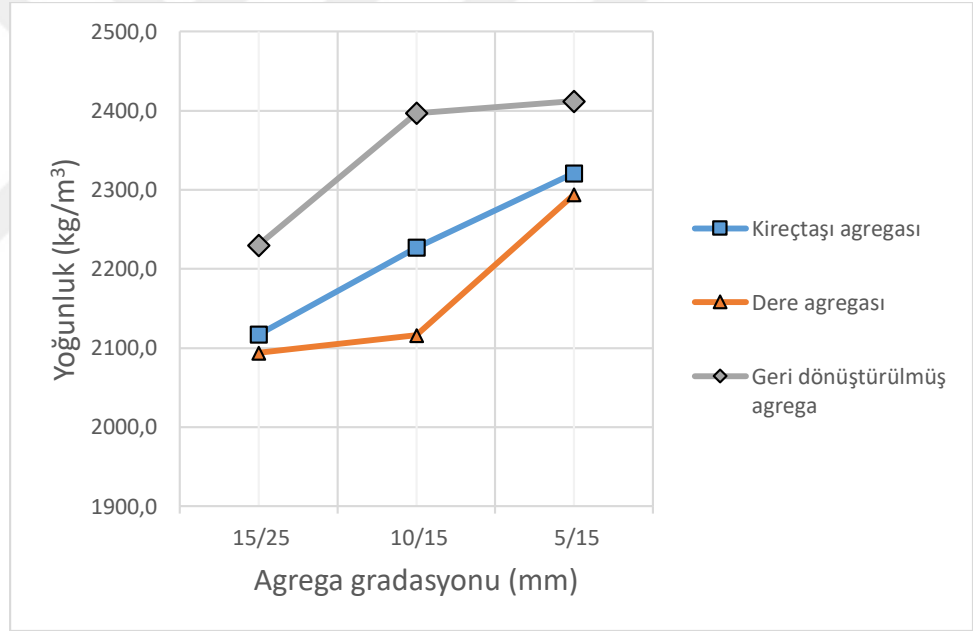
Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te farklı geçirimli beton karışımların yoğunluk değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4.3'ten de anlaşılabileceği üzere, agregada tane boyutu arttıkça üretilen geçirimli betonun yoğunluğu azalmaktadır. Agregada tane çapının azalması karışımdaki doluluğun artmasına sebep olmakta bunun sonucunda da geçirimli betonun yoğunluğu artmaktadır. Cosic et al. (2015), iri agregada tane çapının büyüklüğü arttıkça geçirimli beton içerisinde daha büyük boşlukların oluştuğunu belirtmiştir. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar da bu yöndedir. Geri dönüştürülmüş agregalar ile üretilen geçirimli betonlar, dere ve kireçtaşı agregası kullanılarak üretilenlere kıyasla daha yüksek yoğunluk değeri göstermişlerdir. Dere agregaları, kireçtaşı ve GDA'ya kıyasla daha düz ve pürüzsüz bir yüzeye sahiptirler. Dolayısıyla bu tarz agregalar kullanılarak üretilen geçirimli betonlarda büyük boşluklar oluşturabilmek zorlaşmaktadır. GDA'lar ise yüzeylerinde bulunan eski çimento hamuru nedeniyle bahsedilen büyük boşlukları daha kolay bir şekilde oluşturabilmektedir. 15/25 mm tane aralığındaki dere agregaları ile üretilen geçirimli betonların yoğunluk değeri 2094 kg/m^3 ile en düşük değer olurken, aynı gradasyona sahip GDA ve kireçtaşı agregaları sırasıyla 2230

kg/m³ ve 2117 kg/m³ ile onu takip etmiştir. Tez çalışması kapsamında elde edilen yoğunluk değerleri Tablo 4.3'te listelenmiştir.

Tablo 4.3. Yoğunluk sonuçları.

Karışım kodu	* Yoğunluk (kg/m ³)	Standart sapma
KA25	2117	0.86
KA10	2227	0.92
KA5	2321	1.17
DA25	2094	0.58
DA10	2116	0.91
DA5	2294	1.27
GDA25	2230	1.19
GDA10	2397	1.26
GDA5	2412	1.33

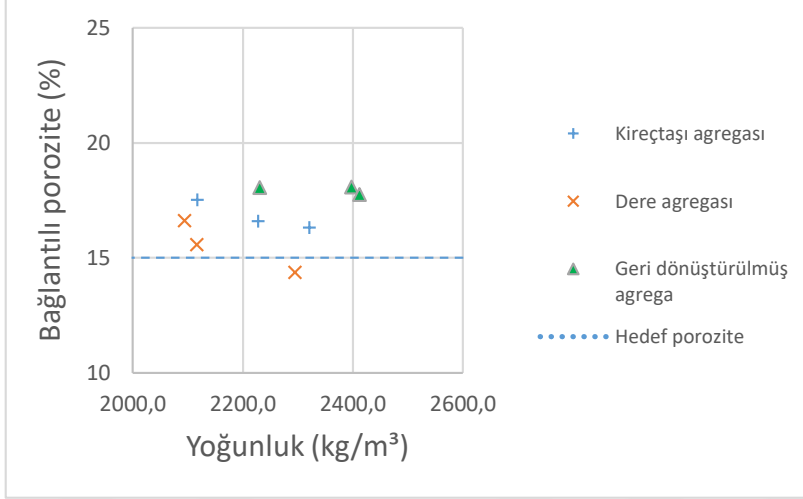
* Sonuçlar üç örneğin ortalamasıdır.



Şekil 4.3 Farklı agrega kökenleri ve gradasyonları için yoğunluk değişimi.

Sertleşmiş haldeki yoğunluk sonuçları bağlantılı porozite değerleri ile Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Bağlantılı porozite ve yoğunluk değerleri genel olarak tasarlanan değerden (%15) daha fazla çıkmıştır. Buna sebep olarak ise düşük s/ç oranının işlenebilirliği zorlaştırması ve dolayısıyla taze haldeki karışımı kalıplara yerleştirirken segregasyona uğramadan yerleştirmenin zorlaşması gösterilmiştir. 5/15 mm tane aralığındaki dere agregaları ile üretilen geçirimli betonlar, hedeflenen boşluk hacmine ulaşamamıştır. Bu çalışmada kullanılan diğer agrega tane aralıklarına kıyasla daha ince olması ve dere agregalarının düz ve pürüzsüz yüzeye

sahip olması nedeniyle hedeflenen porozite değerine ulaşamadığı sonucu çıkarılmıştır.



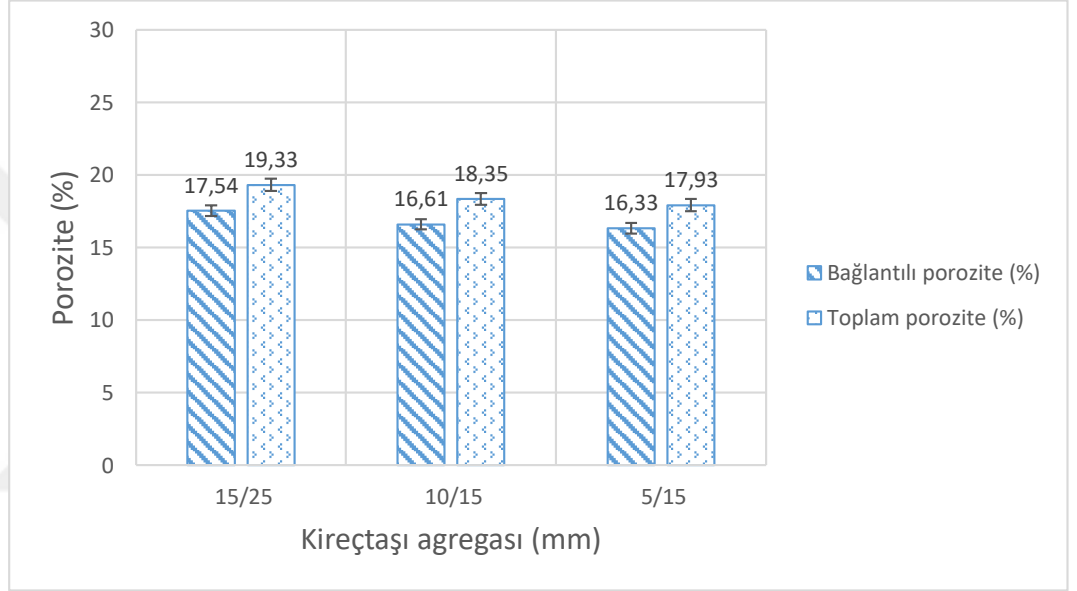
Şekil 4.4 Yoğunluk ve bağlantılı porozite arasındaki ilişki.

Üretilen betonların toplam boşluk oranı ve birbirleriyle bağlantılı olan boşluk oranı Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de grafik olarak verilmiştir. Cosic et al., (2015), bağlantılı porozite değerlerinin agrega tane çapından ziyade agrega kökeninden etkilendiğini raporlamıştır. Ancak bu çalışmada hem agrega kökeninin hem de agrega gradasyonunun bağlantılı porozite üzerinde pozitif bir etkisi olduğu görülmektedir. Toplam porozite değerleri, beklenildiği gibi birbirleriyle bağlantılı olan porozite değerlerinden daha fazla olmuştur. En yüksek porozite değeri GDA’lı agregalarla üretilen geçirimli betonlarda elde edilmiştir. Agregaya yüzeylerinde bulunan eski çimento hamurları sayesinde bu tür agregalar ile daha yüksek boşluk hacmine sahip geçirimli beton üretmek mümkün olmaktadır. Kullanılan agregaların daha da irileşmesiyle geçirimli betonlarda boşluk hacminin de arttığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Mulyono, 2019; Sun et al., 2018; Singh and Madasamy, 2022). Bu tez kapsamında GDA’lar ile üretilen geçirimli betonlar da bu genellemeye uymamıştır. GDA ile üretilen geçirimli betonlarda kullanılan agrega gradasyonu daha irileştikçe boşluk miktarında az da olsa bir artış gözlemlenmişse de bu artışın dikkate değer olmadığı belirlenmiştir. 15/25 mm tane aralığındaki agregalar hem toplam porozite hem de bağlantılı porozite değerleri için en iyi sonuçları göstermiştir. 15/25 mm gradasyonlu GDA’lar ile üretilen geçirimli betonlar ise bağlantılı porozite değerleri en yüksek olan agregalar olmuştur. Geçirimli betonlarda suyun toplam boşluktan ziyade birbirleriyle bağlantılı olan boşluklardan geçerek ilerleyebileceği göz önüne alınarak, bütün kıyaslamalar bağlantılı boşluk hacmi üzerinden yapılmıştır. Elde edilen porozite değerleri Tablo 4.4’te listelenmiştir.

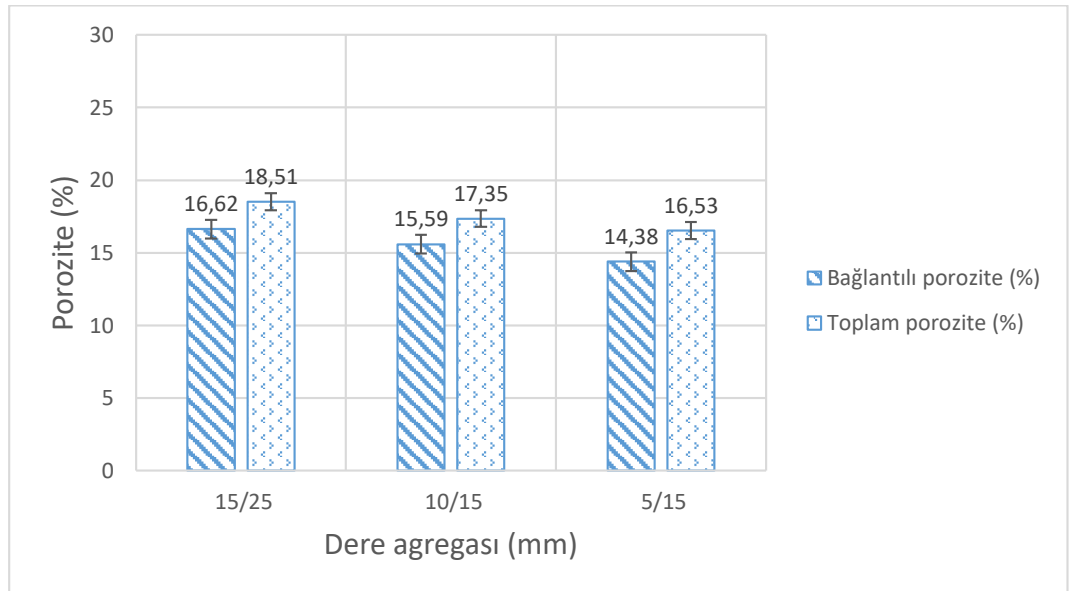
Tablo 4.4. Porozite değerleri.

Karışım kodu	Hedeflenen porozite (%)	* Bağlantılı porozite (%)	Toplam porozite (%)
KA25	15	17.54	19.33
KA10	15	16.61	18.35
KA5	15	16.33	17.93
DA25	15	16.62	18.51
DA10	15	15.59	17.35
DA5	15	14.38	16.53
GDA25	15	18.08	19.78
GDA10	15	18.09	19.77
GDA5	15	17.76	18.53

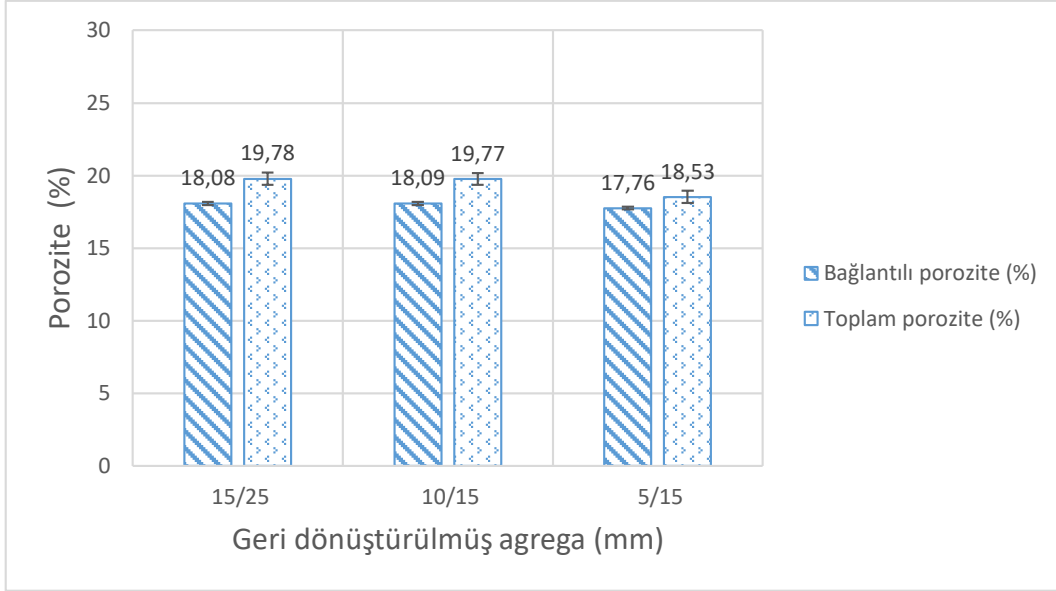
* Sonuçlar üç örneğin ortalamasıdır.



Şekil 4.5 Kireçtaşı agregası ile üretilen geçirimli betonların porozite değerleri.

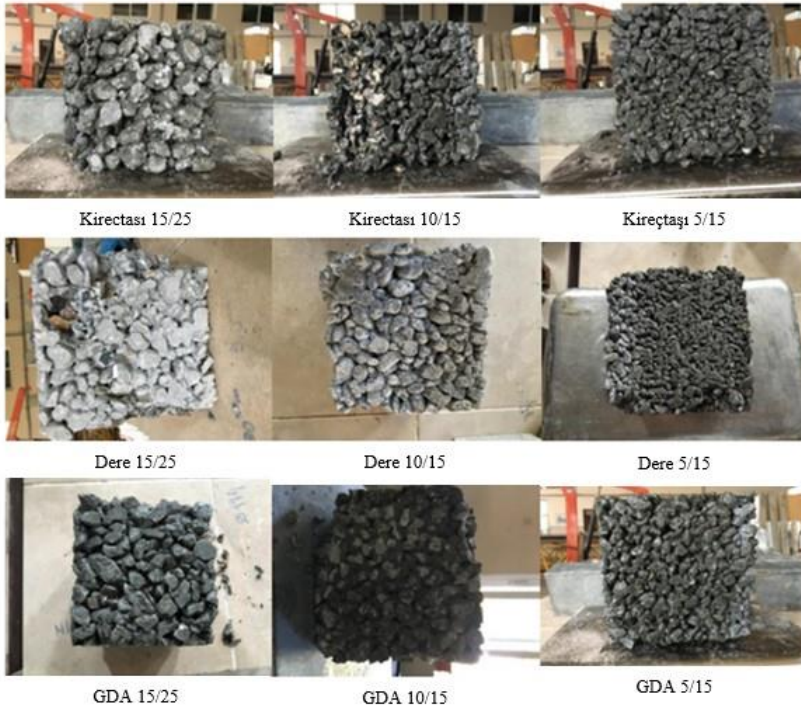


Şekil 4.6 Dere agregası ile üretilen geçirimli betonların porozite değerleri.



Şekil 4.7 GDA ile üretilen geçirimli betonların porozite değerleri.

Bu tez kapsamında üretilen bütün geçirimli beton karışımlardan hazırlanan örnekler alt yüzeylerinden fotoğraflanarak Şekil 4.8’de verilmiştir. Yüksek çimento hamuruna sahip olan karışımlar ve dere agregası ile üretilen betonlarda çimento hamurunun üst yüzeyden alta doğru aktığı ve boşlukları tıkayarak daha düşük porozite değerine neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4.8 Geçirimli betonların alt yüzey görüntüleri.

4.5. Geçirimsizlik Katsayısı

Tez kapsamında üretilen geçirimsiz betonların su geçirimsizliği katsayılarına ait sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir. Tablo 4.5'ten de anlaşılabileceği üzere bu çalışma kapsamında incelenen agrega kökenleri arasında en yüksek su geçirimsizliği katsayısı değeri GDA ile üretilen karışımlardan elde edilmiştir. 15/25 mm gradasyonlu GDA ile üretilen geçirimsiz betonlar 1.5 cm/s su geçirimsizliği katsayısı ile geçirimsizliği en yüksek karışım olmuştur. Üretilen bütün betonların geçirimsizlik katsayısı tavsiye edilen aralıkta kalmıştır ($>0.01\text{m/s}$) (ACI, 2010). İri agrega tane boyutu düştükçe geçirimsizlik katsayısının azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Bu sonuç porozite değerleri ile de örtüşmektedir. İnce malzeme kullanımının birbirleriyle bağlantılı olan boşluk oluşturmada, iri agregalara kıyasla daha düşük performans göstermesi nedeniyle böyle bir sonuç ortaya çıkmıştır. Ayrıca dere agregaları da yüzeylerinin düz ve pürüzsüz olması nedeniyle daha küçük ve daha az bağlantılı boşluklar oluşturarak, düşük su geçirimsizliği göstermişlerdir. 5/15 mm tane aralığındaki dere agregaları ile üretilen geçirimsiz beton karışımlar 1.01 cm/s geçirimsizlik katsayısı ile en kötü geçirimsizlik performansını göstermişlerdir. 15-25 mm gradasyona sahip GDA'lı agregalar ile üretilen geçirimsiz betonların geçirimsizlik katsayısı aynı gradasyondaki kireçtaşı agregası ile üretilenlere kıyasla %2.67 artmıştır. Aynı şekilde bu değer 10-15 mm gradasyona sahip GDA'lı agrega ile üretilen geçirimsiz betonlar için %3.07 olmuştur. 5-15 mm gradasyonda ise geçirimsizlik katsayısı bakımından GDA ve kireçtaşı agregaları benzer sonuçlar göstermiştir.

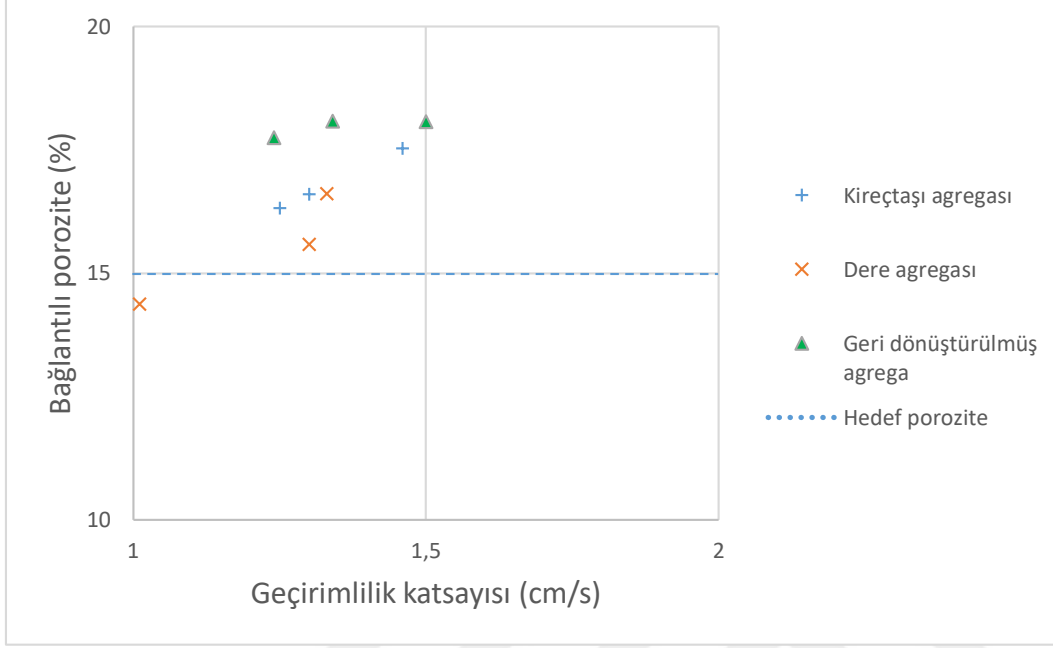
Tablo 4.5 Su geçirimsizliği deney sonuçları.

Agrega türü	Agrega gradasyonu	Geçirimsizlik katsayısı (cm/s)	Standart Sapma
Kireçtaşı agregası	15/25	1.46	0.82
	10/15	1.30	0.94
	5/15	1.25	1.18
Dere agregası	15/25	1.33	0.96
	10/15	1.30	1.14
	5/15	1.01	1.38
Geri dönüştürülmüş agrega	15/25	1.50	0.93
	10/15	1.34	1.28
	5/15	1.24	1.37

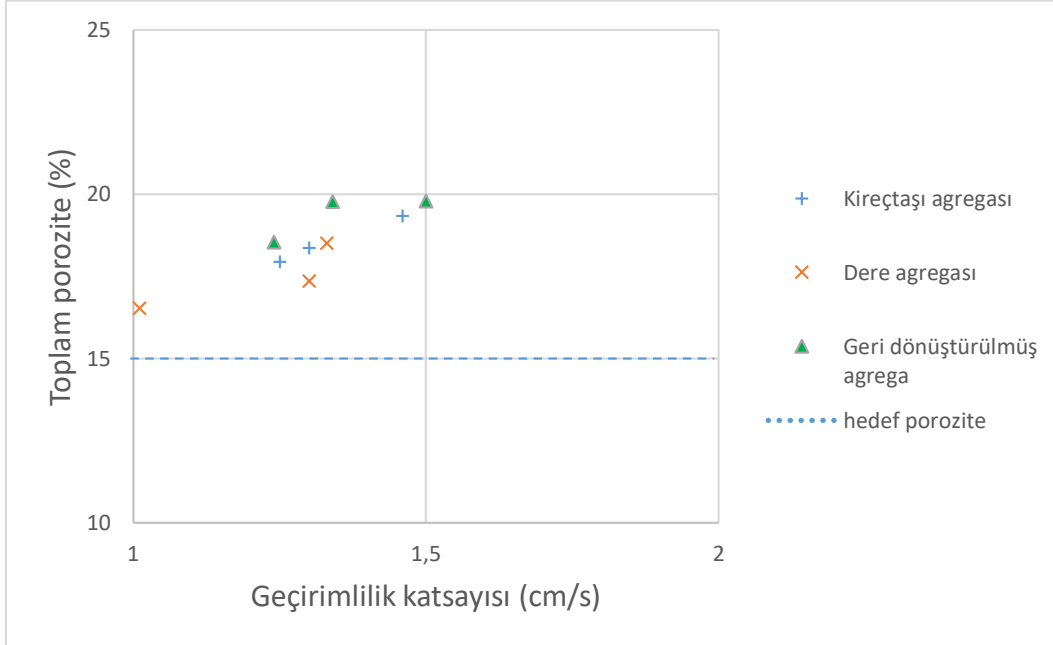
*Sonuçlar üç örneğin ortalamasıdır.

Şekil 4.9'da bağlantılı porozite ile geçirimsizlik katsayısı arasındaki ilişki Şekil 4.10'da ise toplam porozite ile geçirimsizlik katsayısı arasındaki ilişki verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde toplam porozite değerlerinden yola çıkılarak yapılacak olan geçirimsizlik tahminlerinin hatalı olabileceği bu nedenle bağlantılı porozite değerlerinin dikkate alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 4.11'de bu çalışmada kullanılan agrega gradasyonları ile geçirimsizlik katsayısı

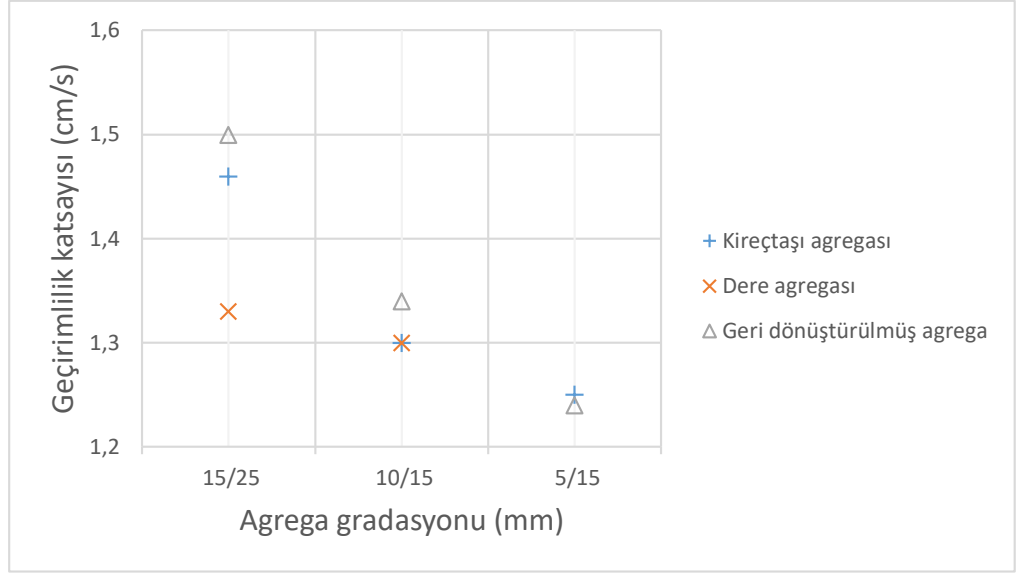
arasındaki ilişki verilmiştir. Daha iri gradasyonların yüksek geçirimlilik gösterdiği buradan da anlaşılmaktadır. Şekil 4.12’de ise porozite ile geçirimlilik arasındaki ilişki çıkarılmıştır. R^2 değeri 0.6 olarak elde edilen denklem şekil üzerinde verilmiştir.



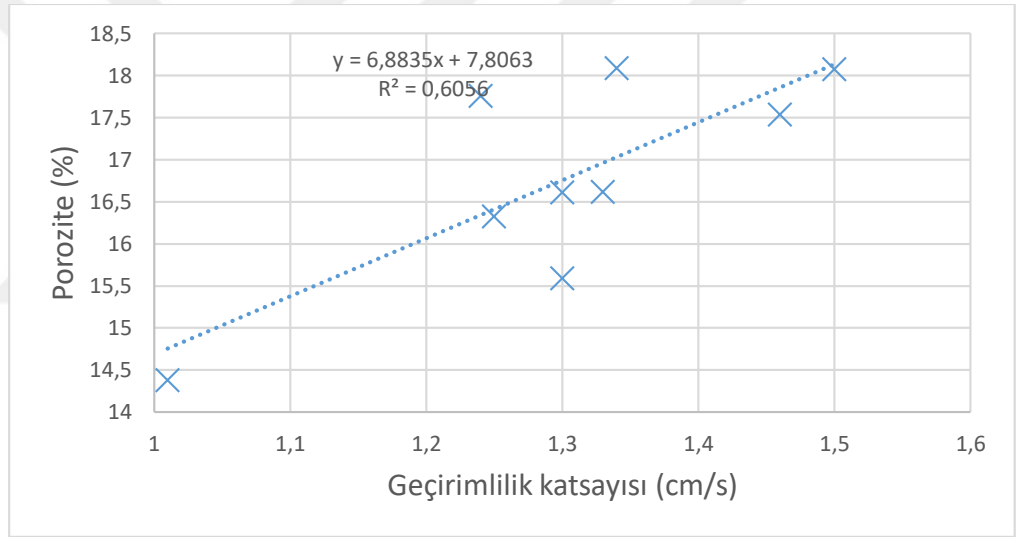
Şekil 4.9 Bağlantılı porozite-geçirimlilik katsayısı ilişkisi.



Şekil 4.10 Toplam porozite-geçirimlilik katsayısı ilişkisi.



Şekil 4.11 Agrega gradasyonu-geçirimlilik katsayısı ilişkisi.

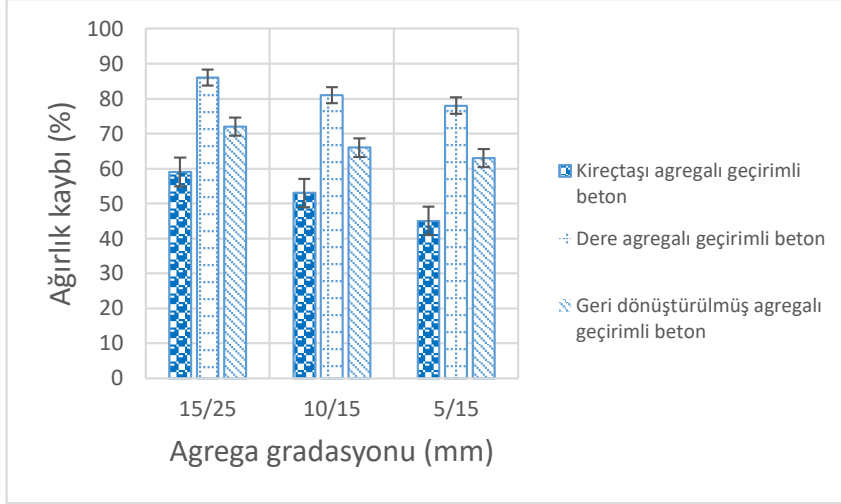


Şekil 4.12 Porozite ve geçirimlilik katsayısı arasındaki ilişki.

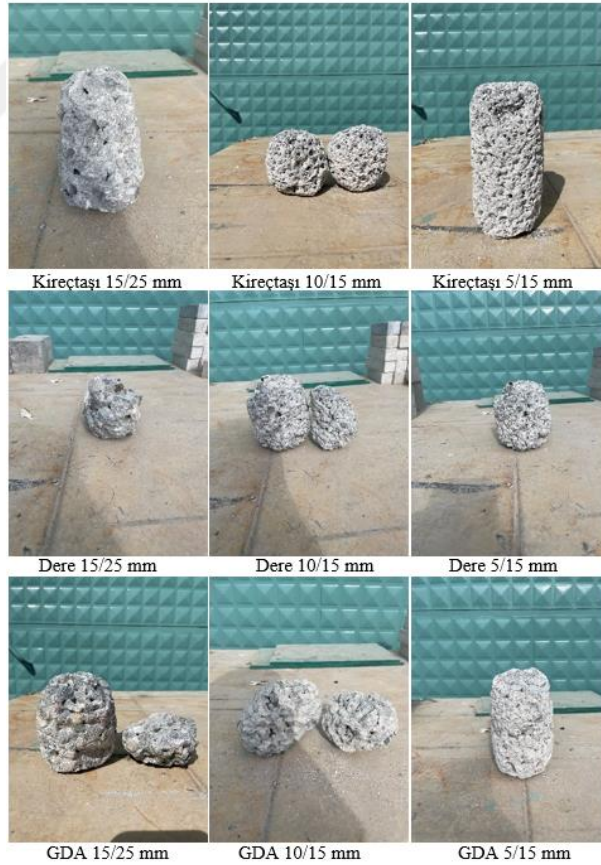
4.6. Cantabro Aşınma Direnci

Üretilen geçirimli betonların Cantabro aşınma direncine ait sonuçlar Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekil 4.13'ten de anlaşılabileceği üzere agrega yığınındaki iri agrega miktarı arttıkça aşınma direncinden kaynaklı kütle kaybı da artmaktadır. Elde edilen sonuçlar Lori et al., 2021 ve Raj and Chockalingam, 2020 ile örtüşmektedir. Dere agregaları ile üretilen geçirimli betonlar en kötü aşınma direncine sahipken, kireçtaşı agregası ile üretilen geçirimli betonlar ise en iyi performansı göstermiştir. Bu sonuca dere agregalarının yüzeyinin daha pürüzsüz olması dolayısıyla agrega-çimento hamuru aderansının daha düşük olması ve aşınma etkisiyle kireçtaşı agregalarına kıyasla daha erken parçalanmasının sebep

olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, dere agregaları kullanılarak elde edilen geçirimli betonların gösterdiği düşük aşınma direncine, çimento hamurunun dere agregalarının pürüzsüz yüzeyinden daha kolay ayrışabilmesinin sebep olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 4.13 Cantabro testi sonucunda meydana gelen ağırlık kaybı.

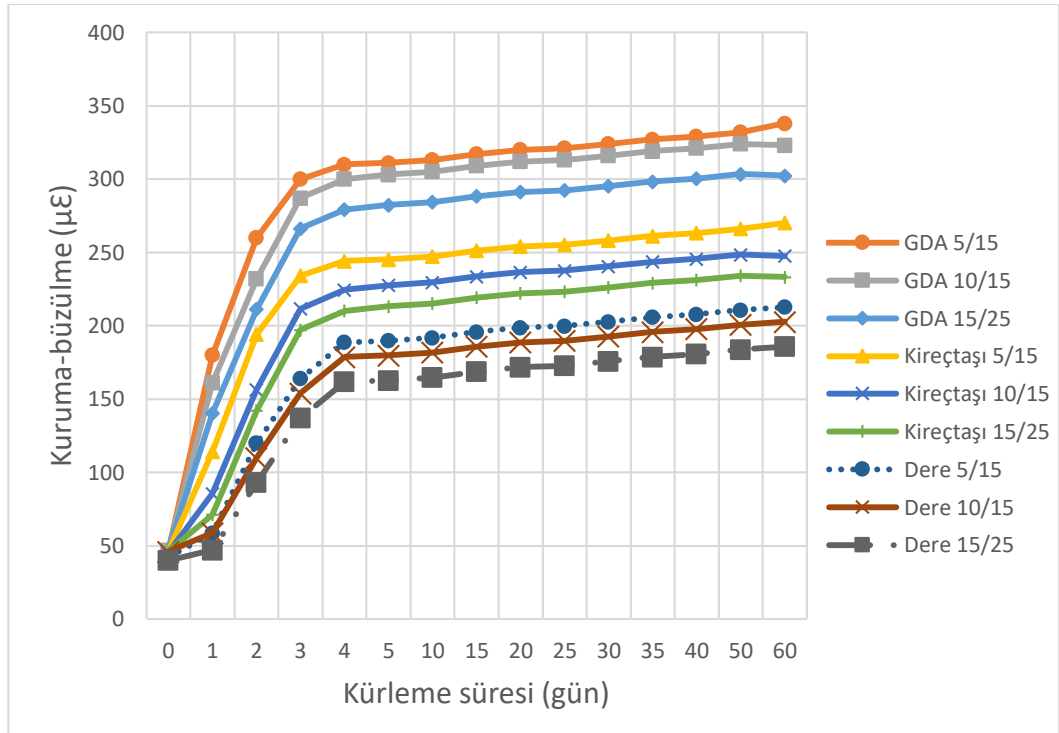


Şekil 4.14 Cantabro aşınma deneyi sonucunda numunelerdeki değişim görüntüleri.

Dong et al., (2013) tarafından 300 devirli Cantabro aşınma testinin, geçirimli betonlar için efektif olmadığı ve devir sayısının azaltılması gerektiği önerilmiştir. Bu tez çalışmasında elde edilen veriler de bu bulguyu desteklemektedir. Aşınma dayanımı sonucunda geçirimli betonların son hali Şekil 4.14'te verilmiştir.

4.7. Kuruma Büzülmesi

Kuruma büzülmesi çoğunlukla beton içerisindeki çimento miktarından etkilenmektedir. Bilindiği üzere, kuruma büzülmesi ortamdaki nemin doygunluk sınırının altında olduğu durumlarda meydana gelmektedir (Mehta and Monteiro, 2017). Betonda nem ile alakalı olarak meydana gelen değişimlerin hidrate çimento hamurundan kaynaklı olduğu göz önüne alınarak, beton karışım oranlarının kuruma büzülmesini doğrudan etkilediği sonucu çıkarılmaktadır. Aynı kaynakta ayrıca kullanılan agrega miktarının da kuruma büzülmesi üzerinde etkisi olduğu belirtilmiştir. Maksimum agrega boyutu, gradasyonu, şekli ve dokusunun da kuruma büzülmesini etkileyen diğer faktörler olduğu unutulmamalıdır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da Şekil 4.14'te gösterildiği gibi bu önerme ile uyumaktadır. Çimento miktarının etkisi agrega kökeni ve gradasyonundan daha baskın olmuştur. GDA ile üretilen geçirimli betonlar kireçtaşı ve dere agregası ile üretilen karışımlara kıyasla daha yüksek bir kuruma büzülmesi göstermişlerdir. Kuruma büzülmesi davranışları dikkate alındığında 15/25 mm gradasyonlu kireçtaşı agregasının en iyi seçenek olduğu görülmüştür.

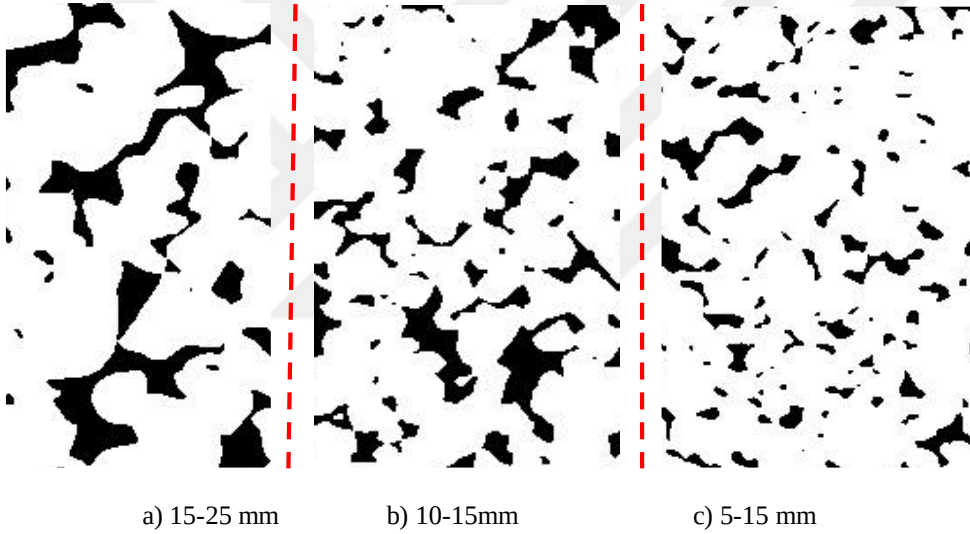


Şekil 4.15 Kuruma büzülmesi deney sonuçları.

4.8. BT ile Elde Edilen Görüntülerin Analizi

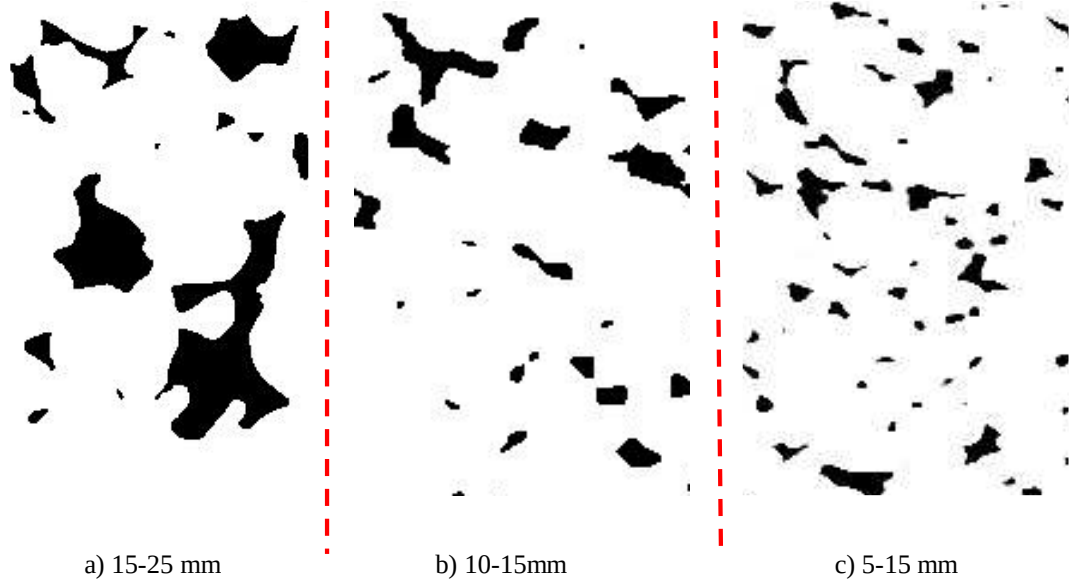
4.8.1. Boşluk geometrisi

Boşluk geometrisi ve boşlukların büyüklüğü geçirimli betonların drenaj kapasitelerini etkileyen önemli bir parametredir. BT ile elde edilen görüntülerin analiz edilmesiyle boşluk büyüklükleri bu tez kapsamında incelenmiştir. Şekil 4.16'da kireçtaşı agregası kullanılarak elde edilen geçirimli betonların boşluk büyüklükleri verilmiştir. Şekil 4.16a'dan da görülebileceği üzere en büyük boşluklar 15-25 mm kireçtaşı agregası ile elde edilirken bunu 10-15 mm (Şekil 4.16b) ve 5-15 mm (Şekil 4.16c) takip etmiştir. 5-15 mm gradasyonlu kireçtaşı agregası ile daha fazla sayıda boşluk elde edilirken, bu boşlukların küçük ve birbirleriyle bağlantılı olmaması nedeniyle su geçirimliliği performansına pozitif bir etkisi olmamıştır.



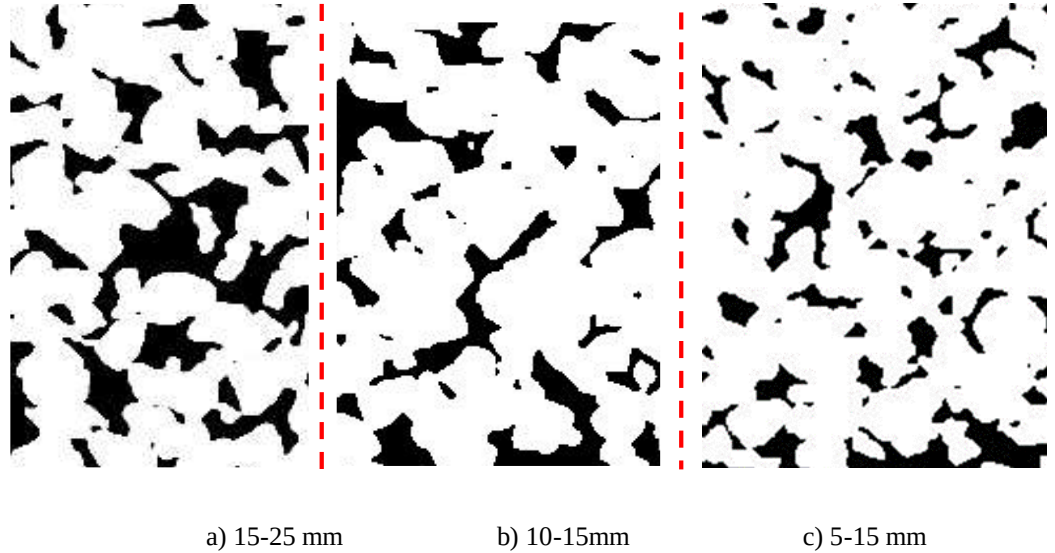
Şekil 4.16 Kireçtaşı agregası ile üretilen geçirimli betonlarda oluşan boşluk geometrisi.

Şekil 4.17'de ise dere agregası ile üretilen geçirimli betonların BT ile alınan görüntüleri gösterilmiştir. Daha iri gradasyonla üretilen dere agregalı betonlar da kireçtaşı agregasında olduğu gibi, daha sürekli ve daha büyük boşluk oluşturmuşlardır. Bu boşluklardan suyun transferinin ince agregalara kıyasla daha kolay olduğu su geçirimliliği sonuçları ile elde edilmiştir. 5-15 mm tane aralığındaki dere agregaları bu köken için boşluk büyüklüğü açısından en kötü performansı göstermiştir.



Şekil 4.17 Dere agregası ile üretilen geçirimli betonlarda oluşan boşluk geometrisi.

Şekil 4.18’de GDA ile elde edilen geçirimli betonların BT görüntüleri verilmiştir. GDA ile üretilen bütün geçirimli betonlarda boşluk miktarının fazla ve sürekli olduğu BT görüntülerinin analiz edilmesiyle görülmüştür. 15-25 mm gradasyonlu GDA ile üretilen geçirimli betonlar hem GDA’lı geçirimli betonlar içerisinde hem de bütün agrega kökenleri ve gradasyonları arasında en iyi boşluk performansını göstermiştir.

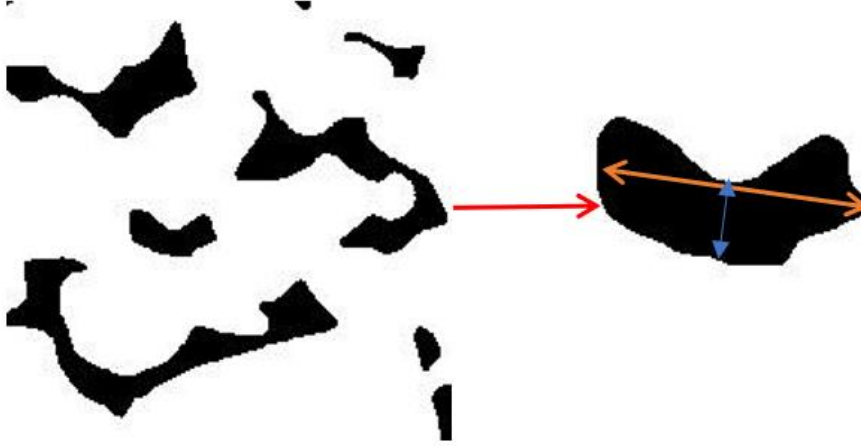


Şekil 4.18 GDA ile üretilen geçirimli betonlarda oluşan boşluk geometrisi.

4.8.2 2D Boşluk yapısı analizi

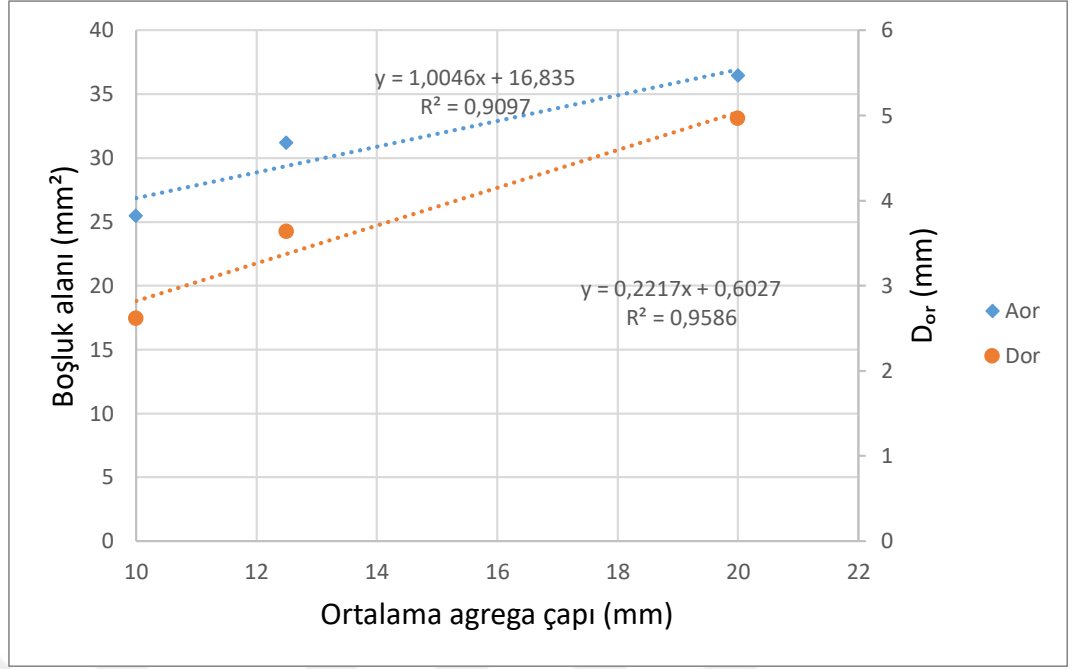
BT ile çekilen görüntülerin analizi ile elde edilen bir diğer parametre boşluk yapısıdır. Boşlukların şeklinin ve çapının su geçirimliliği performansını etkilediği

göz önüne alınarak araştırmacılar tarafından boşluk çapı da hesaplanmıştır. Bazı araştırmacılar boşluk çapını hesaplarlarken boşlukları küre olarak kabul edip, eşdeğer bir çap belirlerken (Sumanasooriya and Neithalath, 2009), Yu et al., (2019) tarafından yapılan çalışmada ise boşluğun merkezinden geçen üç farklı doğru çizilmiş ve bu doğruların ortalaması eşdeğer çap olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ise buradan esinlenerek Şekil 4.19'da çizildiği gibi en yakın ve en uzak doğrular çizilerek ortalaması ortalama çap olarak alınmıştır.

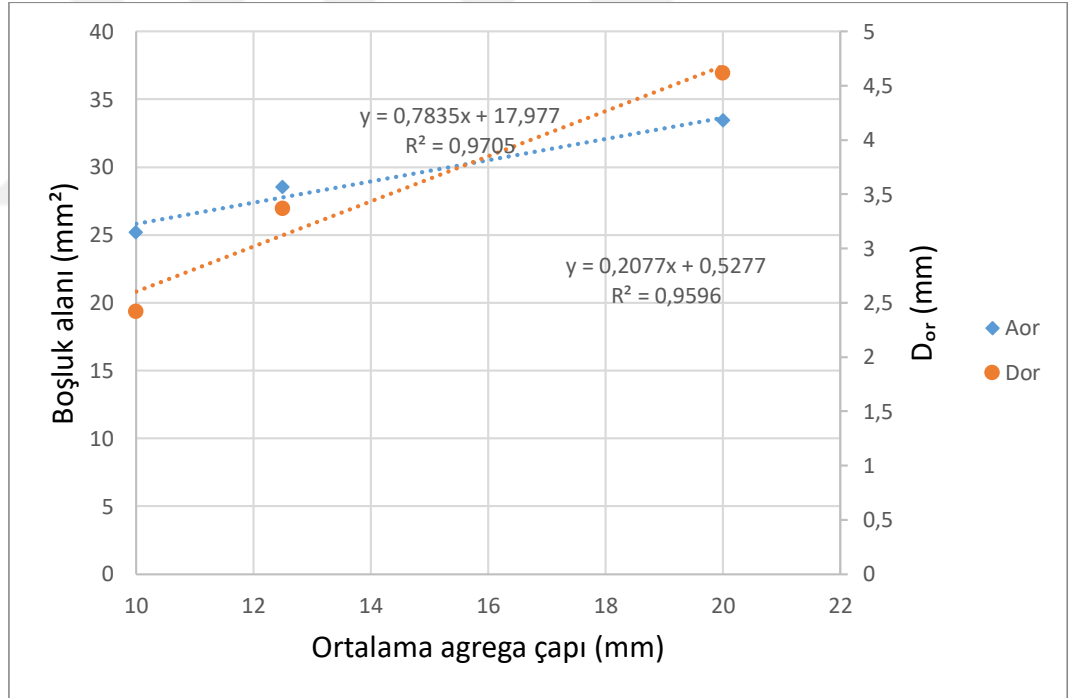


Şekil 4.19 Ortalama boşluk çapı hesaplanması.

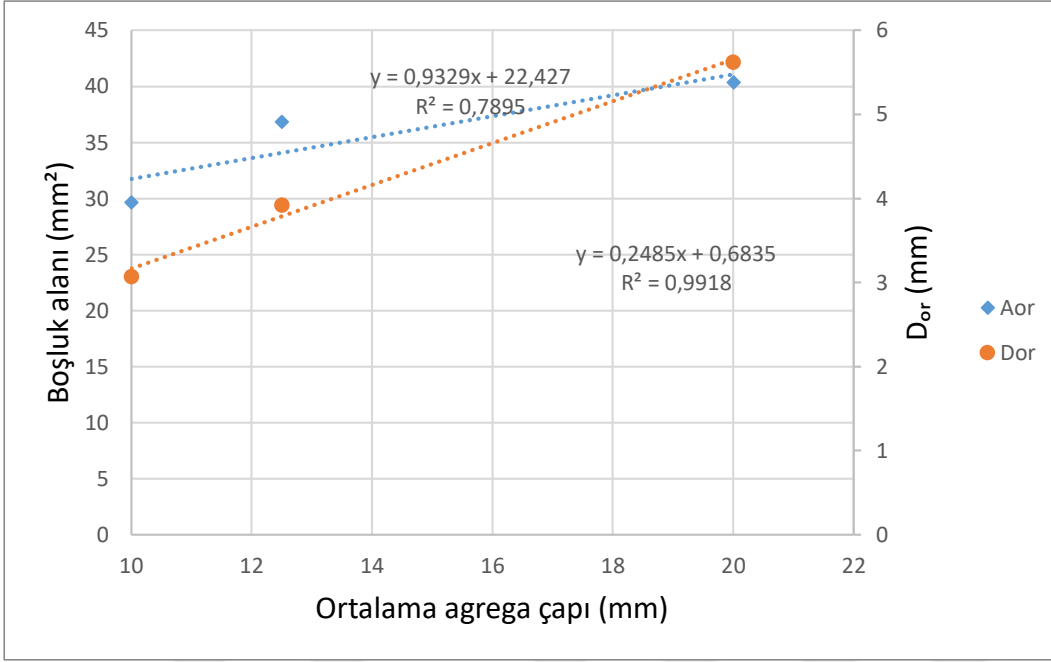
Ortalama boşluk çapı (D_{or}) ve ortalama boşluk alanı (A_{or}) değerleri Python programı yardımıyla hesaplanmıştır. Şekil 4.20'de kireçtaşı agregaları, Şekil 4.21'de dere agregaları ve Şekil 4.22'de ise GDA ile elde edilen geçirimli betonların ortalama boşluk çapı, ortalama boşluk alanı ve eşdeğer agrega çapları birlikte çizilmiştir. Bu çalışmada kullanılan bütün agrega gradasyonları tek boyda olduğu için eşdeğer agrega çapı, kullanılan agrega gradasyonlarının ortalamasına eşit olmuştur. Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'den de görülebileceği üzere 2 boyutlu boşluk büyüklüğü ve ortalama agrega çapı arasında oldukça iyi bir korelasyon vardır. Tüm agrega kökenleri için R^2 değeri 0.90'ın üzerinde olup, boşluk büyüklükleri ile ortalama agrega çapı arasındaki lineer ilişki de yine aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.20 Kireçtaşı agregaları ile elde edilen geçirimli betonların boşluk yapısı analizi.

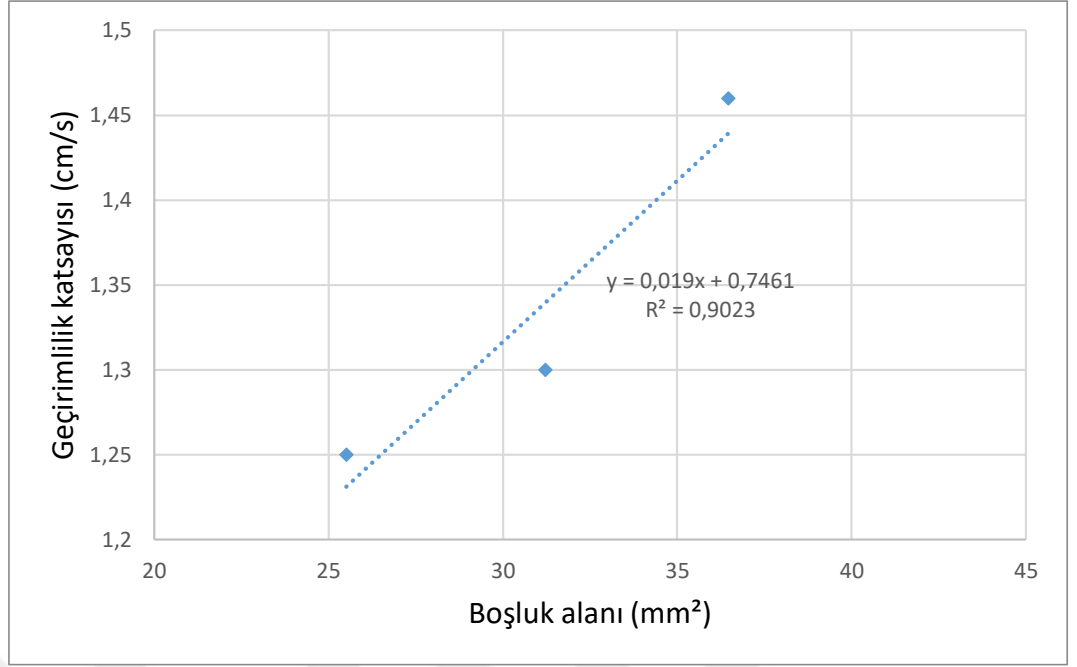


Şekil 4.21 Dere agregaları ile elde edilen geçirimli betonların boşluk yapısı analizi.

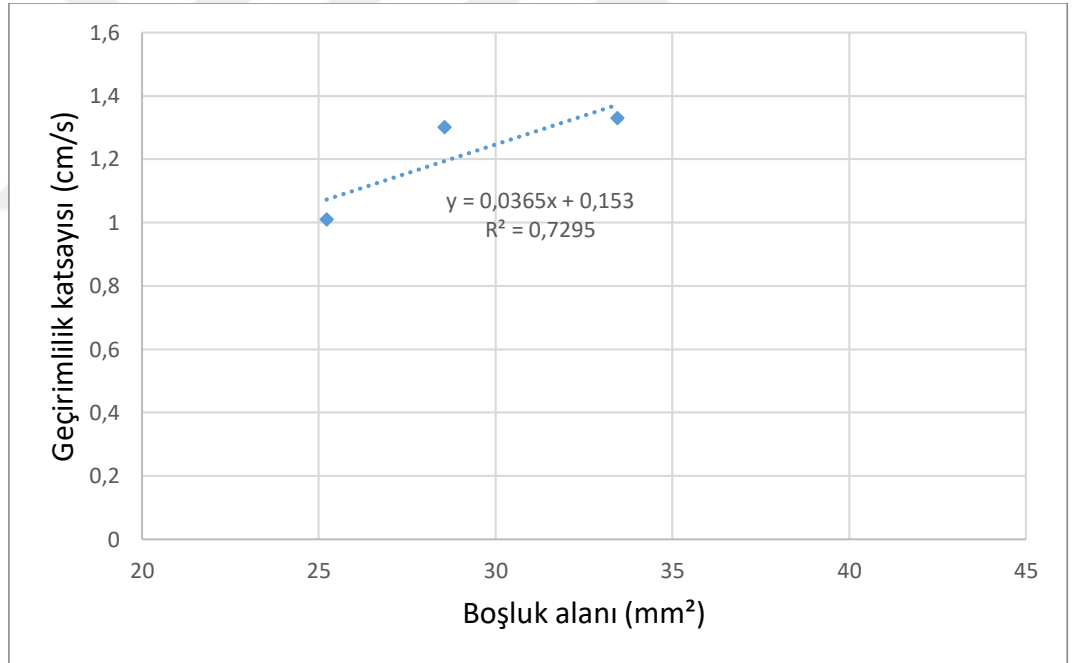


Şekil 4.22 GDA ile elde edilen geçirimli betonların boşluk yapısı analizi.

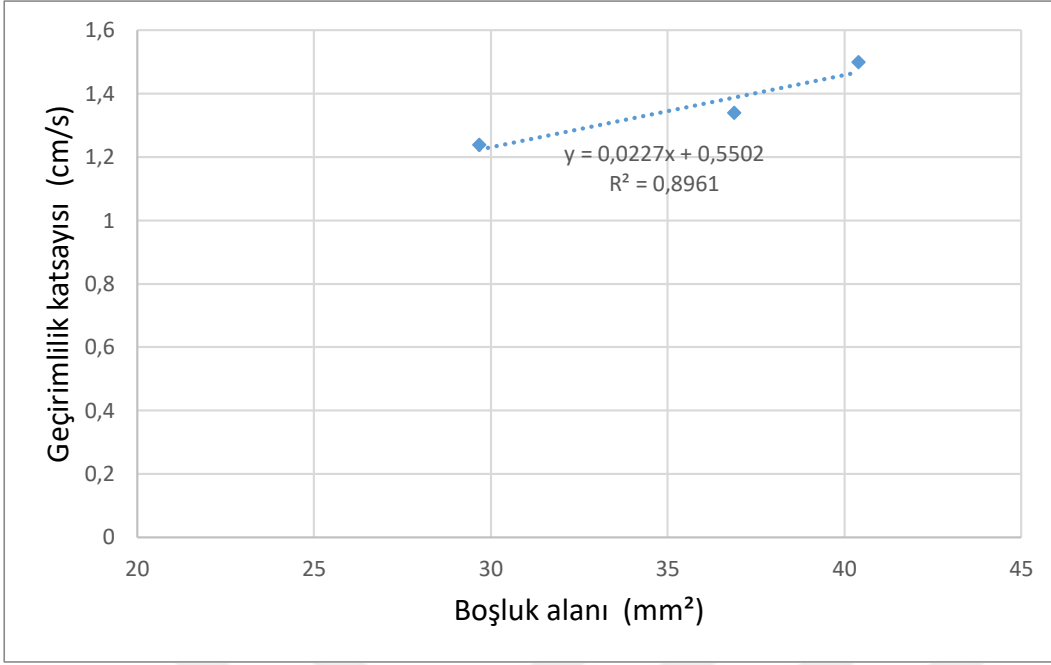
Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25'te geçirimlilik katsayısı ile 2D boşluk boyutu arasındaki ilişki verilmiştir. Boşluk boyutu ve geçirimlilik katsayısı arasında lineer bir ilişki vardır. Kireçtaşı ve GDA'da R^2 değerinin 0.9 civarında olduğu ve dolayısıyla boşluk boyutunun, geçirimli betonların su geçirimliliği ile alakalı bir fikir verdiği görülmüştür. Dere agregalarında ise yine lineer bir ilişki bulunurken, verilen formülün yeterli kesinlikte olmadığı belirtilmiştir. Bu sonuca, dere agregaları ile üretilen geçirimli betonlarda görülen çimento hamurunun yukarıdan aşağıya doğru akmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.23 Kireçtaşı agregaları için boşluk büyüklüğü-geçirimsizlik katsayısı ilişkisi.



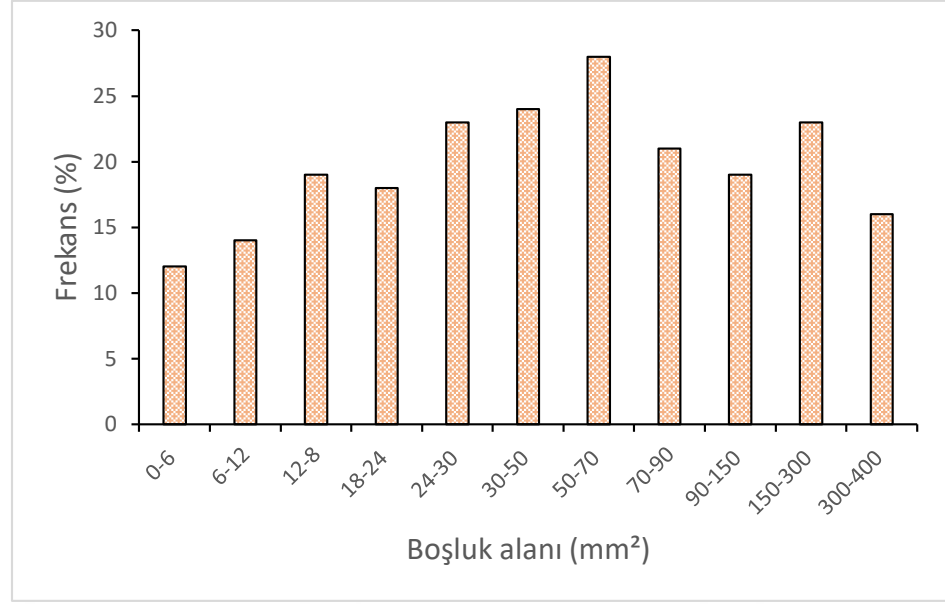
Şekil 4.24 Dere agregaları için boşluk büyüklüğü-geçirimsizlik katsayısı ilişkisi.



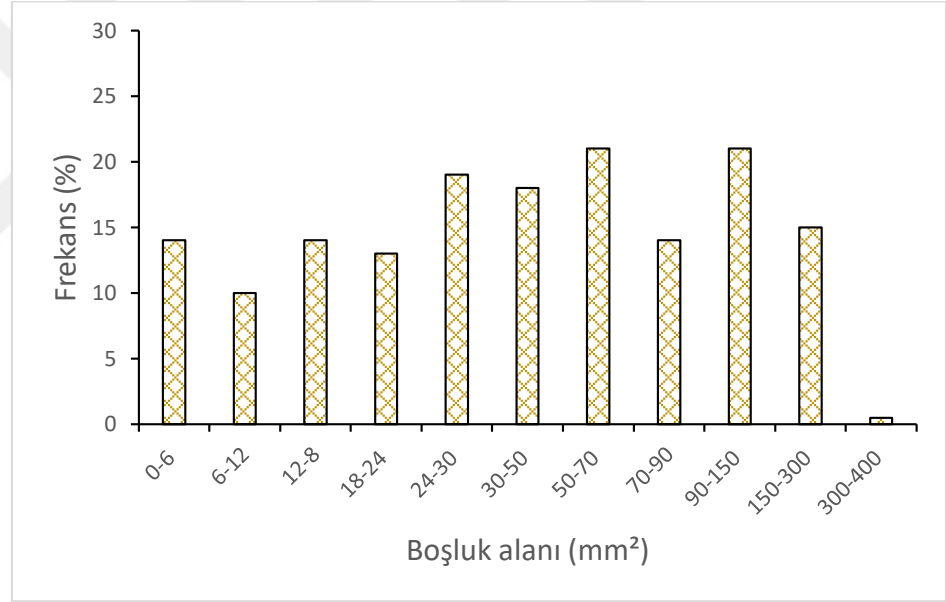
Şekil 4.25 GDA için boşluk büyüklüğü-geçirimsizlik katsayısı ilişkisi.

4.8.3 Boşluk büyüklüğü dağılımı

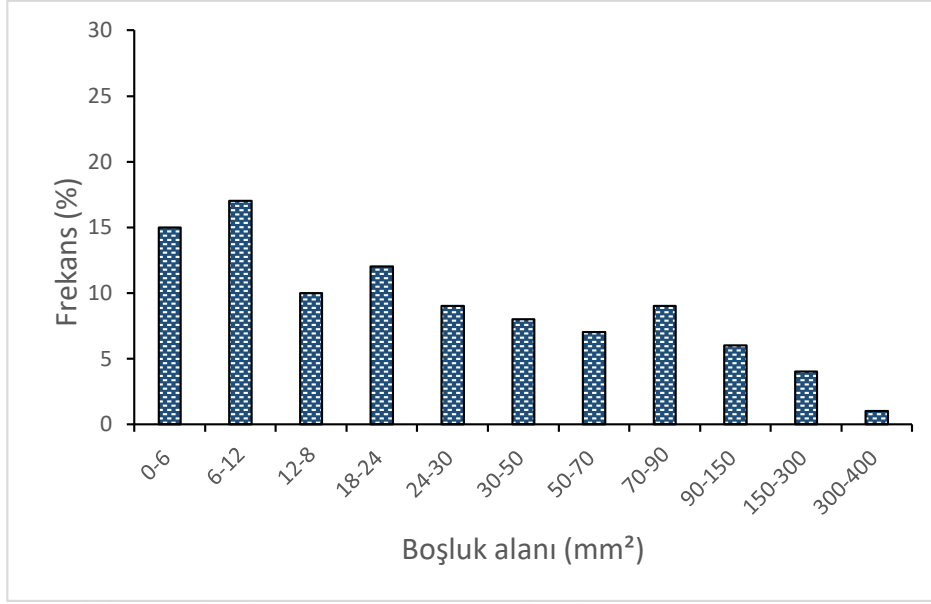
Boşlukların şeklinin düzensiz olması nedeniyle boşluk büyüklüğü ve bu boşlukların geçirimli beton içerisindeki dağılımının belirlenebilmesi için boşluk alanı isimli parametre kullanılmıştır. BT ile elde edilen görüntüler siyah-beyaz olacak şekilde eşiklenmiştir. Daha sonra boşluklar, 0-6 mm², 6-12 mm², 12-8 mm², 18-24 mm², 24-30 mm², 30-50 mm², 50-70 mm², 70-90 mm², 90-150 mm², 150-300 mm² ve 300-400 mm² olmak üzere toplam 11 farklı aralıkta gruplandırılmıştır. Gruplandırma yapılırken çalışmada karşılaşılan boşluk alanlarının dağılımı göz önüne alınmıştır. Siyah-beyaz eşiklenmiş resimlerdeki piksellerin alanlarının hesaplanmasıyla bulunan bu değerler Şekil 4.26-4.34'te gösterilmiştir. Şekil 4.26, Şekil 4.29 ve Şekil 4.32 incelendiğinde 15/25 mm gradasyonda oluşan daha küçük boşluk alanlarının az sıklıkta olduğu, çizilen histogramların tepe noktasının orta ya da daha iri boşluklarda gözlemlendiği görülmüştür.



Şekil 4.26 Kireçtaşı agregası 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.

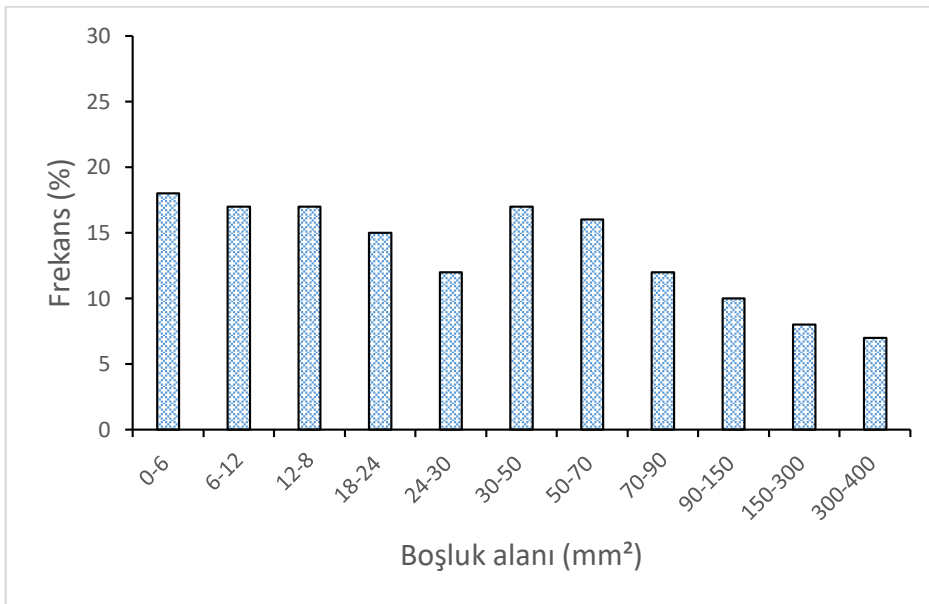


Şekil 4.27 Kireçtaşı agregası 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.

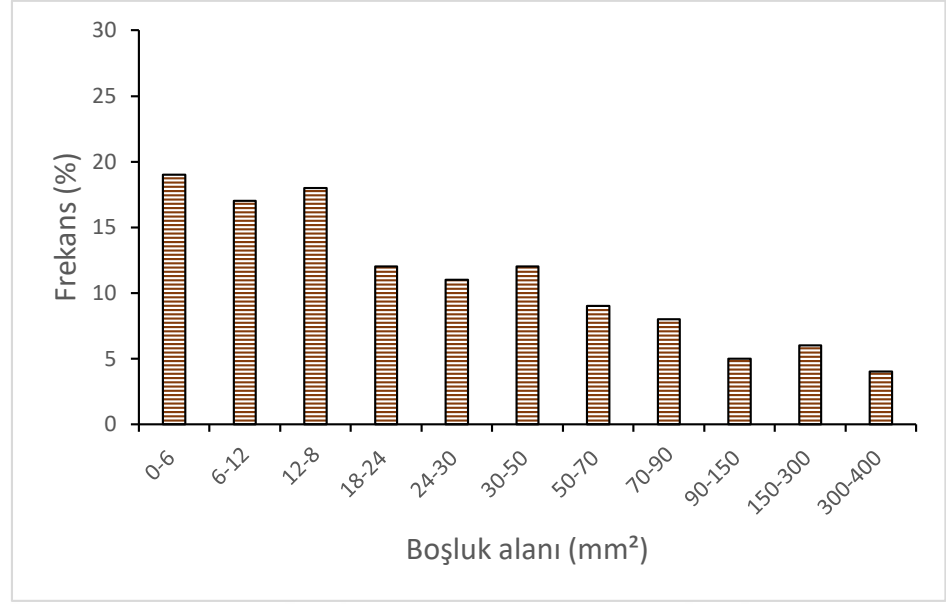


Şekil 4.28 Kireçtaşı agregası 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.

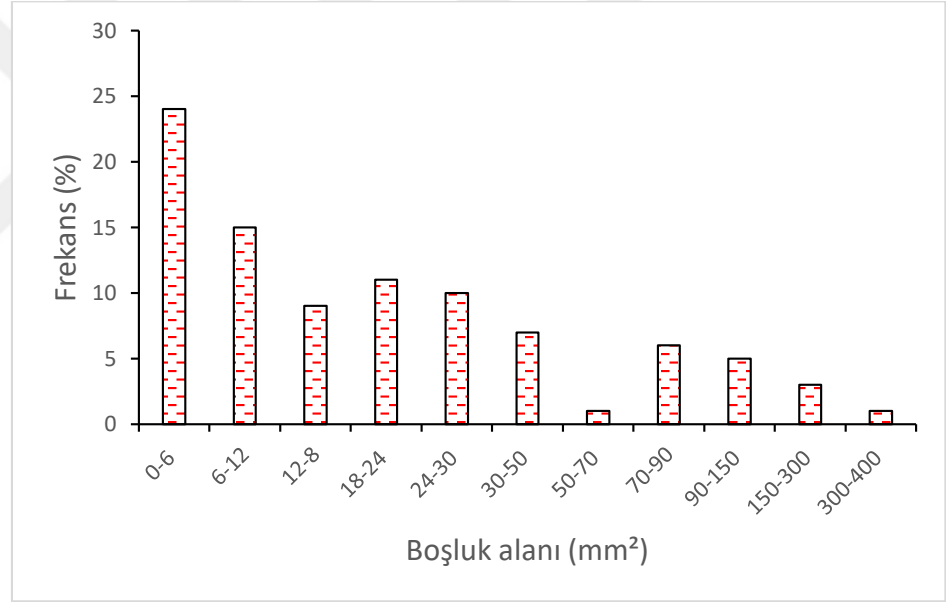
Artan iri agregada gradasyonu ile oluşan boşluk alanının da arttığı gözlemlenmiştir. Daha ince agregada yoğunluğunun fazla olduğu gradasyonlarda küçük boşluk alanı oluşumunun daha fazla olduğu görülmüştür. 5/15 mm gradasyonla üretilen geçirimli betonlarda 0-6 mm² ve 6-12 mm² boşluk alanı değerlerinin en yüksek değerler olduğu Şekil 4.28, Şekil 4.31 ve Şekil 4.34'ten de anlaşılabilmektedir. Agregada yığnında iri agreganın daha fazla olduğu karışımlarda ise küçük boşluk alanı oluşma yüzdesi daha düşük olmakla beraber, bu karışımlarda da hatırı sayılır küçük boşluk oluştuğu ayrıca not edilmelidir. Böylelikle gradasyon ne olursa olsun geçirimli betonlarda bir miktar küçük boşluklar oluşacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.29 Dere agregası 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.

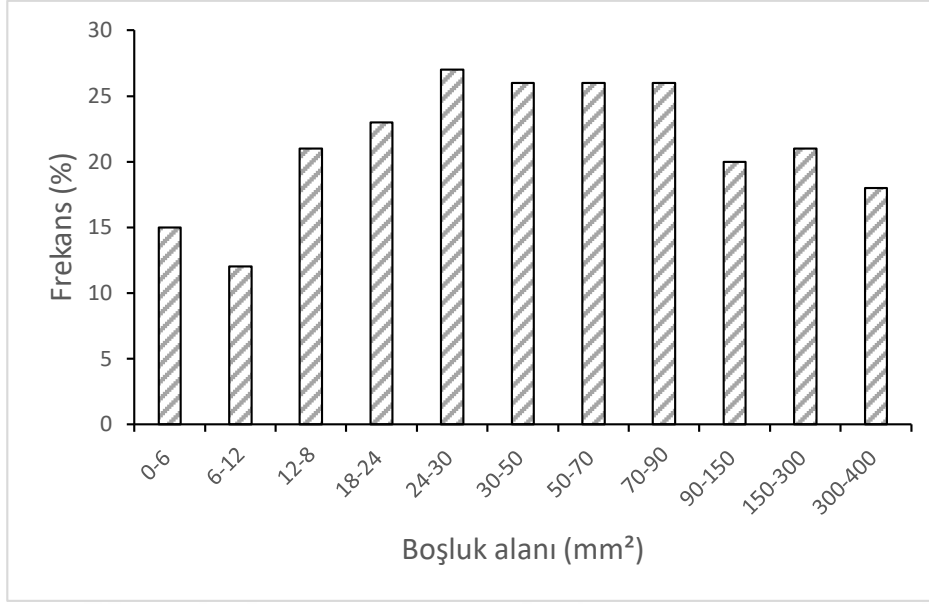


Şekil 4.30 Dere agregası 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.

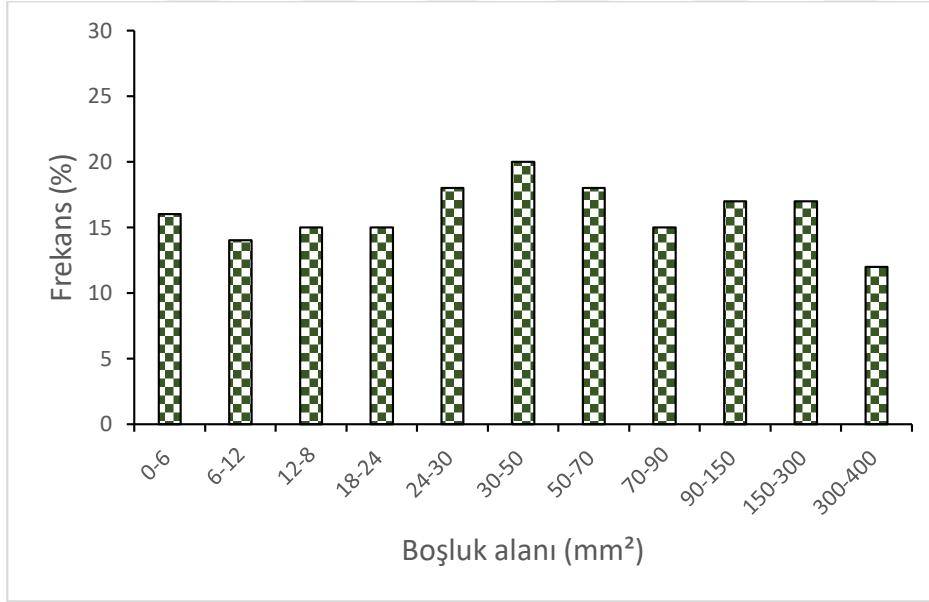


Şekil 4.31 Dere agregası 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.

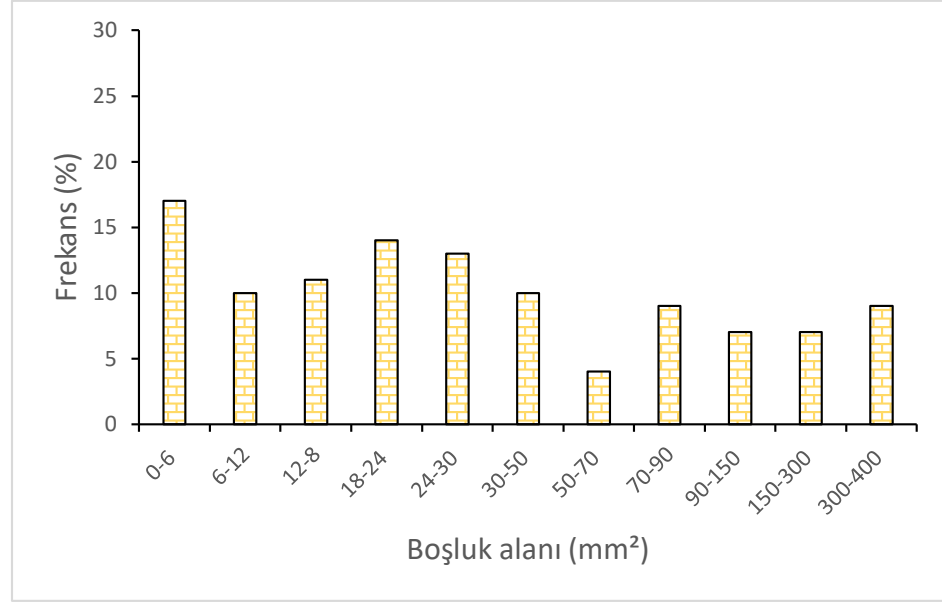
Bu çalışmada kullanılan bütün agrega kökenlerinde 15/25 mm tane aralığındaki agregalar, geçirimli beton içerisinde daha büyük boşluklar oluşturmıştır. Oluşan bu büyük boşluklar sayesinde suyun drene edilmesinin söz konusu karışımlarda daha kolay olduğu görülmüştür. Bu tez çalışması kapsamında incelenen 9 farklı karışımın tamamında boşluk büyüklüğü dağılımları incelendiğinde hepsinin farklı bölgelerde pik noktaya ulaştığı görülmektedir. Buda her karışımın boşluk büyüklüğü ve dağılımının farklı olduğu ve ayrı ayrı incelenmesi gerektiği sonucunu doğurmaktadır.



Şekil 4.32 GDA 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.



Şekil 4.33 GDA 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.

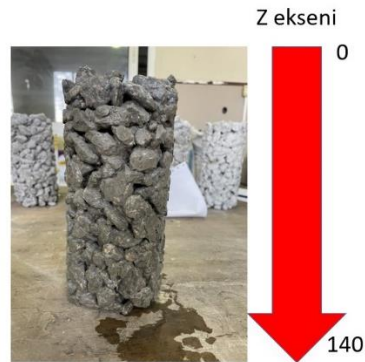


Şekil 4.34 GDA 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı.

Geçirimli betonlarda 2D boşluk yapısının analiz edilmesi için yapılan hesaplamalar toplu olarak Tablo 4.6’te listelenmiştir.

Tablo 4.6 2D boşluk yapısı analiz sonuçları

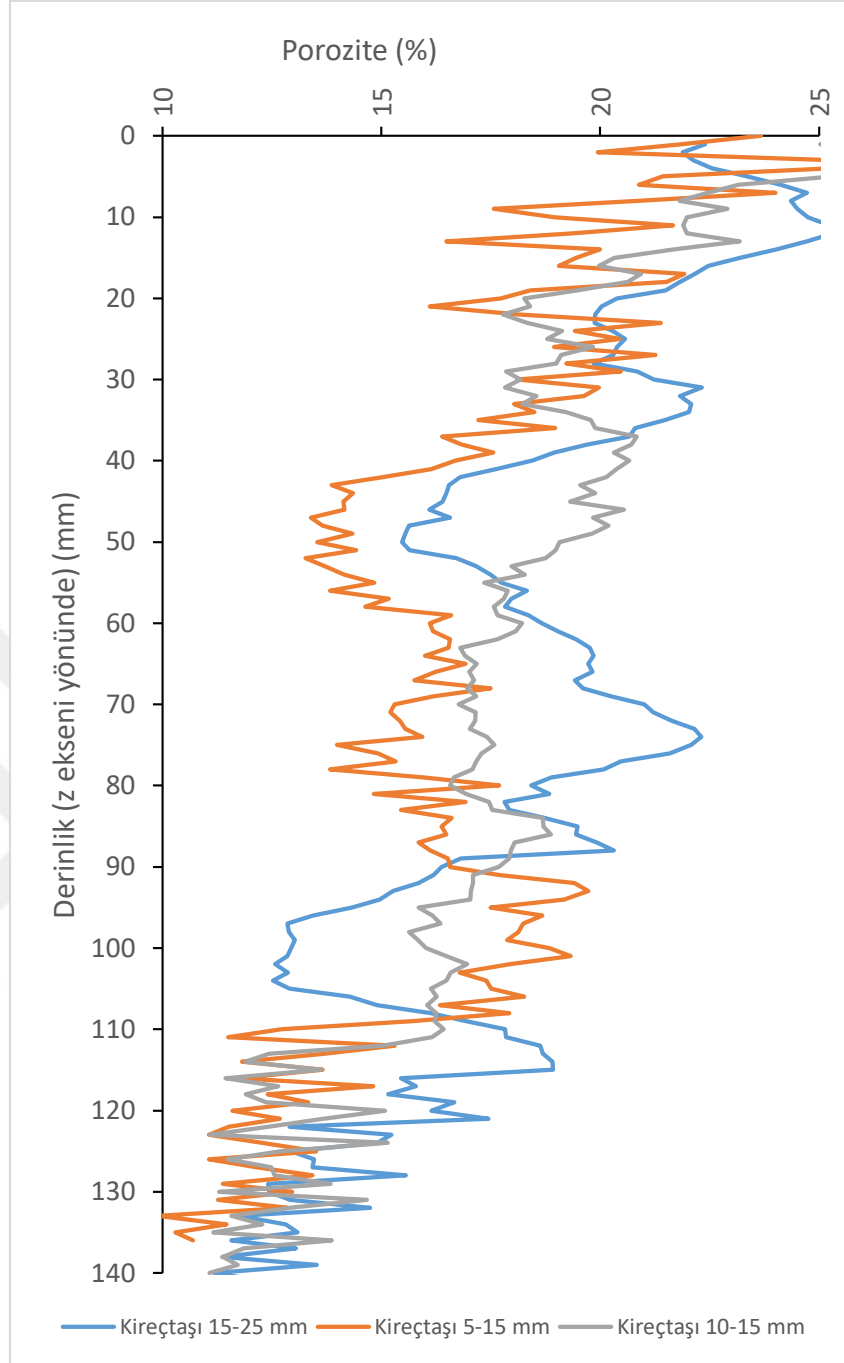
Karışım Adı	Ortalama agrega çapı (mm)	Ortalama 2D porozite (%)	A _{or} (mm²)	D _{or} (mm)
KA25	20	20.1	36.47	4.97
KA10	12.5	19.3	31.22	3.64
KA5	10	18.7	25.51	2.62
DA25	20	19.6	33.45	4.62
DA10	12.5	18.5	28.56	3.37
DA5	10	17.4	25.22	2.42
GDA25	20	20.6	40.39	5.62
GDA10	12.5	20.6	36.87	3.92
GDA5	10	19.2	29.67	3.07



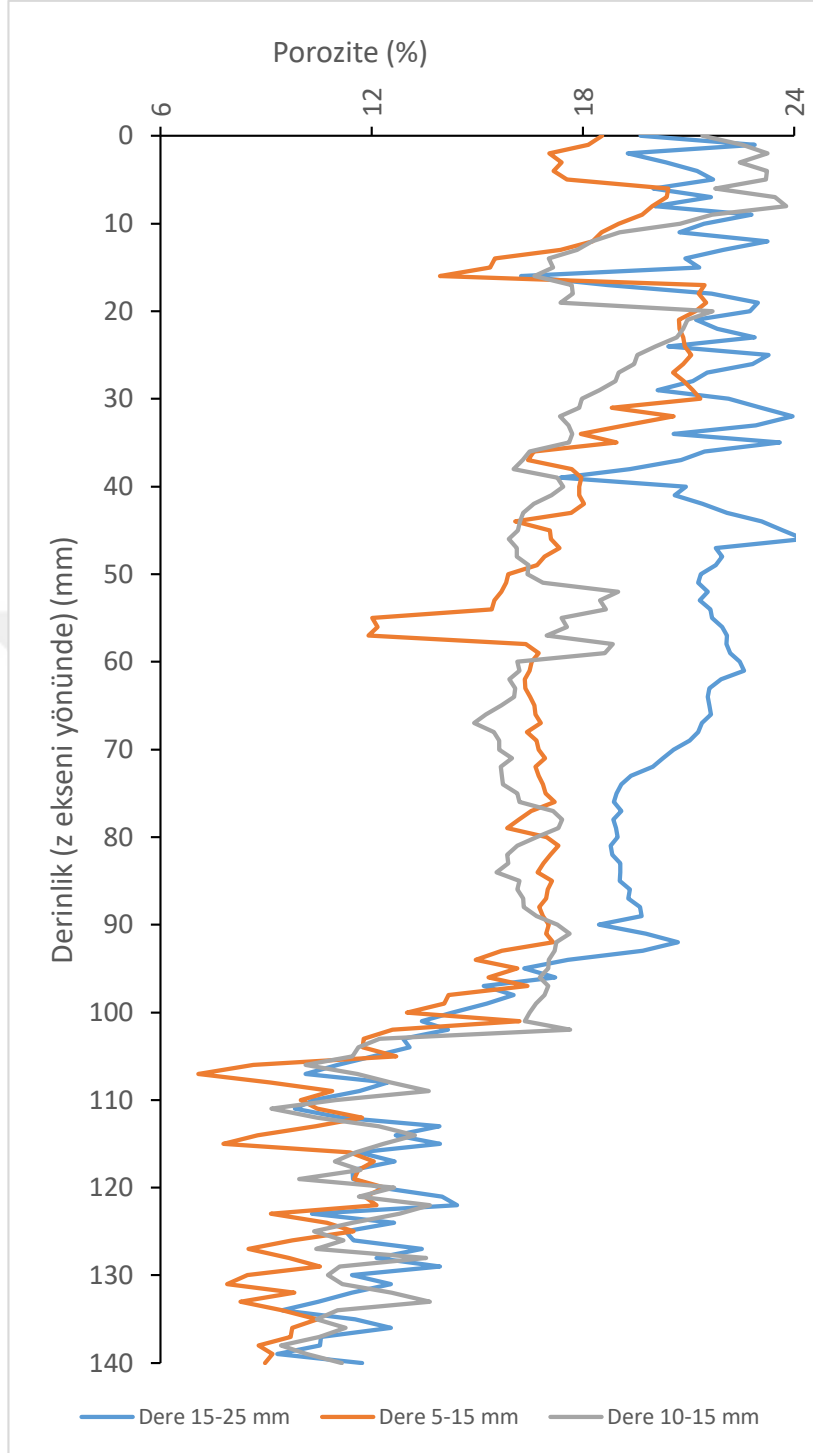
Şekil 4.35. Porozite dağılımı çiziminde 0 ve 140 eksen seçimleri

BT ile elde edilen görüntülerin analizi sonucunda belirlenen porozite değerleri her bir kesit için tek tek çizilerek numune derinliği boyunca porozite dağılımının da çıkarılması amaçlanmıştır. Bunun için Şekil 4.35'te belirtildiği şekilde numunenin üst kısmı 0 eksen ve en altı 140 olacak şekilde numaralandırılmış ve 0 ile 140 mm arasında değişen kesitlerdeki porozite değerleri grafik halinde çizilmiştir. Numunelerin üst ve alt kısımlarında gözlemlenen yüksek heterojenlik nedeniyle üst yüzeyden 3 cm ve alt yüzeyden 3 cm'lik kısımlar çıkarılmıştır.

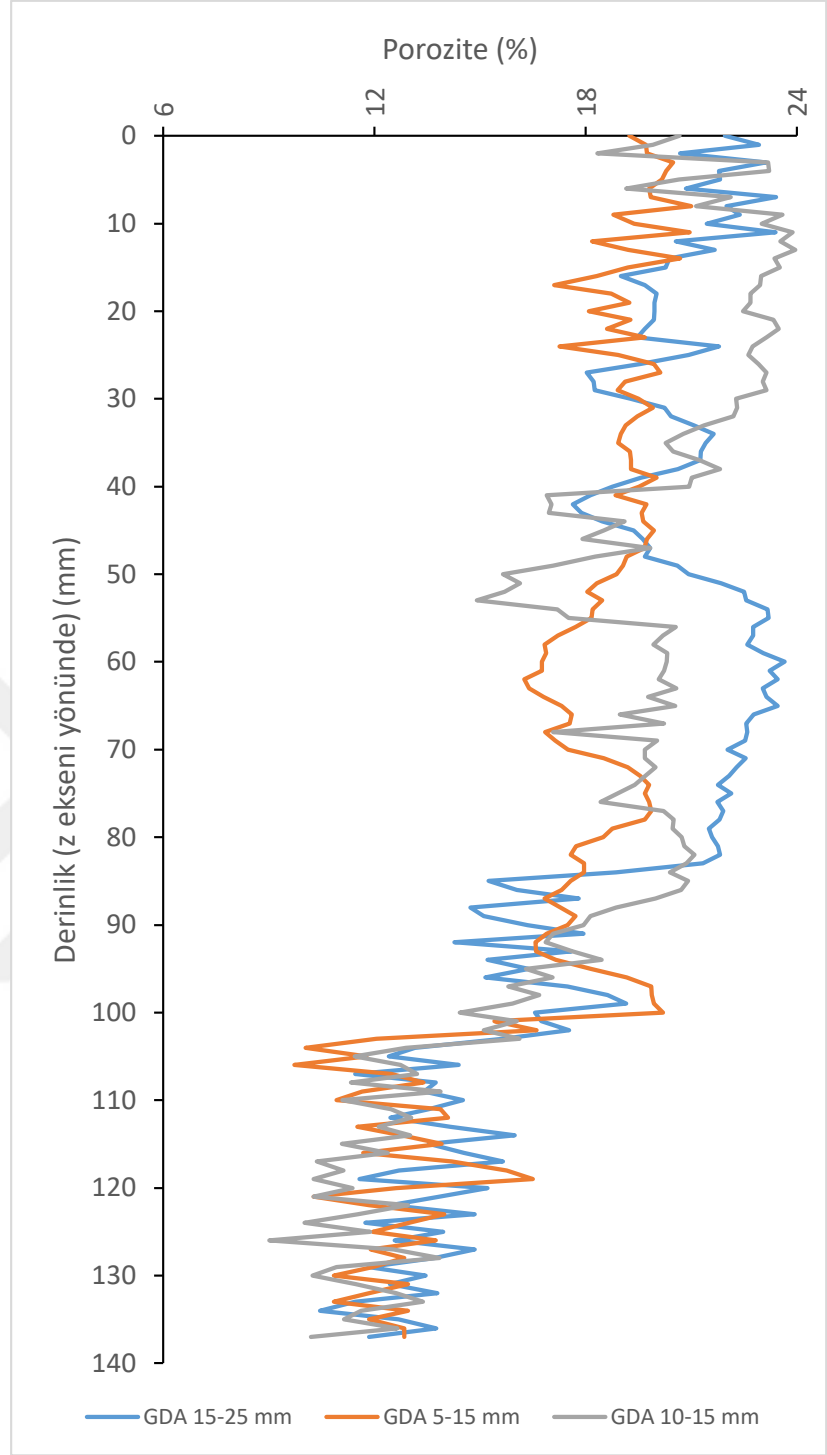
BT ile alınan her farklı kesitteki toplam porozite değerleri numunenin z eksen yönündeki derinliğine karşı çizilerek Şekil 4.36-4.39'de gösterilmiştir. BT görüntüleri sayesinde geçirimli betonlardaki boşluk hacmi değişimini her bir kesitte görüntüleyerek boşluk dağılımı hakkında yorum yapabilmek mümkün olmaktadır. Şekil 4.36-4.39 incelendiğinde numunelerin üst kısımlarının genellikle daha yüksek porozite değerine sahip olduğu görülmüştür. Taze haldeki geçirimli betonlar kalıplara yerleştirilirken çimento hamuru aşağıya doğru akarak boşlukların bir kısmını doldurabilmektedir. Ayrıca sıkıştırma işlemi sırasında betonun üst kısmı, alt kısmına kıyasla daha zayıf bir sıkıştırmaya maruz kalmaktadır. Bu nedenle, genellikle geçirimli betonların üst kısmındaki porozite artışının oldukça süreksiz ve ani olduğu görülmektedir. Numunelerin orta kısmındaki porozite dağılımının genel olarak daha küçük olduğu görülürken, bu sonuç yeterli ve kararında şişlemeye bağlanmıştır. Elde edilen porozite dağılımı sonuçları Kayhanian et al., 2012 ile örtüşmektedir. Sonuç olarak, geçirimli beton numunelerin orta kısmının porozitesi üst kısımlara kıyasla daha az olmaktadır. Boşlukların geçirimli beton içerisindeki sürekliliğinin ve dağılımının vibrasyon ve şişleme ile alakalı olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar (Shan et al., 2022) ile de örtüşmektedir.



Şekil 4.36 Kireçtaşı agregaları için porozite-derinlik ilişkisi.



Şekil 4.37 Dere agregaları için porozite-derinlik ilişkisi.

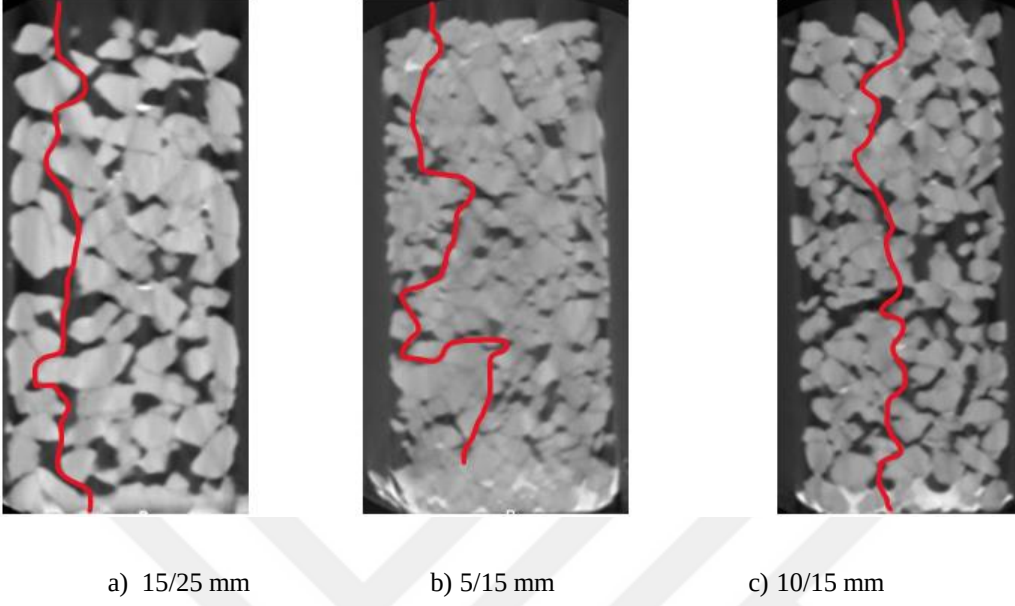


Şekil 4.38 GDA için porozite-derinlik ilişkisi.

4.9. Kıvrımlılık

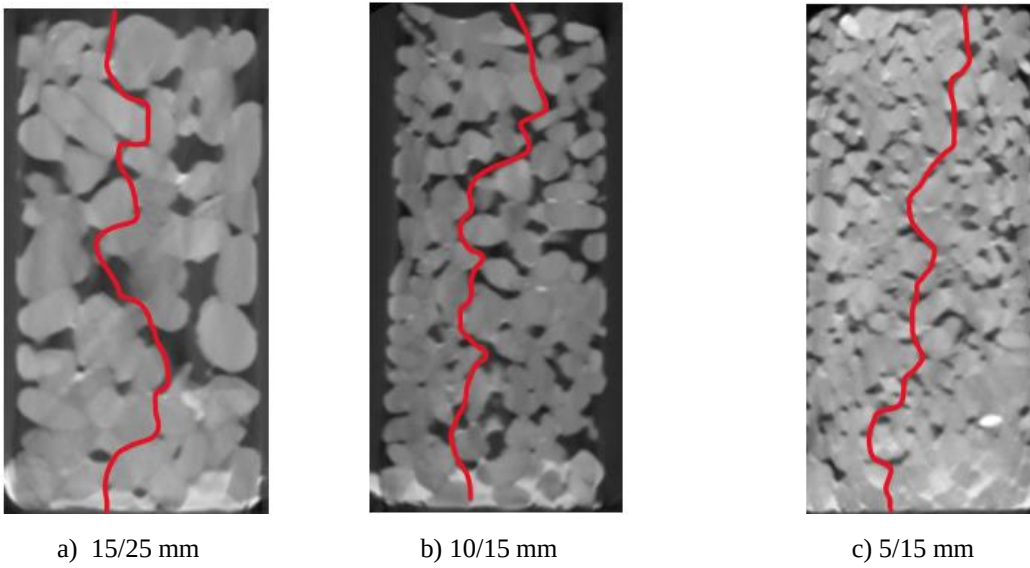
Bölüm 3.3.3.4'te açıklanan yaklaşım ile geçirimli betonlarda kıvrımlılık tayin edilmiştir. Efektif yol (L_e), opak maddenin numunenin en tepesinden en aşağısına kadar izlenmesiyle çizilmiş ve AutoCad programı ile hesaplanmıştır. Hesaplanan

efektif yolun numune boyuna bölünmesiyle de kıvrımlılık değeri elde edilmiştir. Çizilen efektif yollar Şekil 4.39, 4.40 ve 4.41’de verilmiştir.



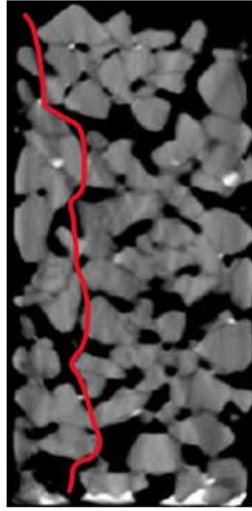
Şekil 4.39 Kireçtaşı agregaları için efektif yol.

Şekil 4.39’den da görülebileceği üzere iri agreganın daha yoğun olduğu kireçtaşı agregaları kullanılarak elde edilen geçirimli betonlarda daha büyük ve sürekli boşluklar elde edilmiştir. En kısa efektif yol 15/25 mm tane aralığına sahip kireçtaşı agregaları ile belirlenmiştir. Suyun drene olabilmesi için takip etmesi gereken yol 5/15 mm gradasyonda en yüksek değere ulaşarak en kötü kıvrımlılık değerini vermiştir.

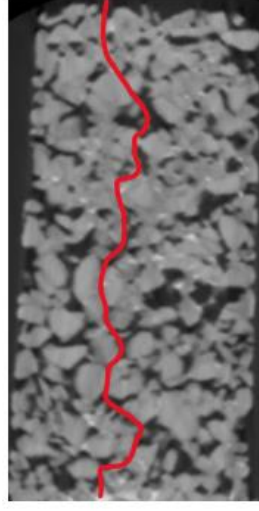


Şekil 4.40 Dere agregaları için efektif yol.

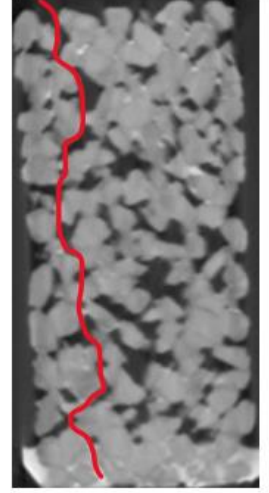
Şekil 4.40'ta dere agregaları ile elde edilen efektif yollar çizilmiştir. Kireçtaşı agregalarında olduğu gibi, iri agreganın çoğunlukta olduğu gradasyonlardaki efektif yol daha kısa olmuştur. Agregat yığınının ince agregat miktarı arttıkça efektif yolun da uzadığı görülmüştür.



a) 15/25 mm



b) 5/15 mm



c) 10/15 mm

Şekil 4.41 GDA için efektif yol.

GDA ile üretilen geçirimli betonlar için çizilen kıvrımlılık yolları Şekil 4.41'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan diğer agregat kökenlerinde olduğu gibi GDA'da da 15/25 mm tane aralığındaki agregatlar ile üretilen geçirimli betonların efektif yolları daha kısa olmuştur. 5/15 mm gradasyonlu GDA'lar bu köken arasında en kötü sonucu gösterse de aynı gradasyondaki dere ve kireçtaşı agregalarından daha iyi performans göstermiştir.

Çizilen efektif yolun numune boyuna bölünmesi ile elde edilen kıvrımlılık değerleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

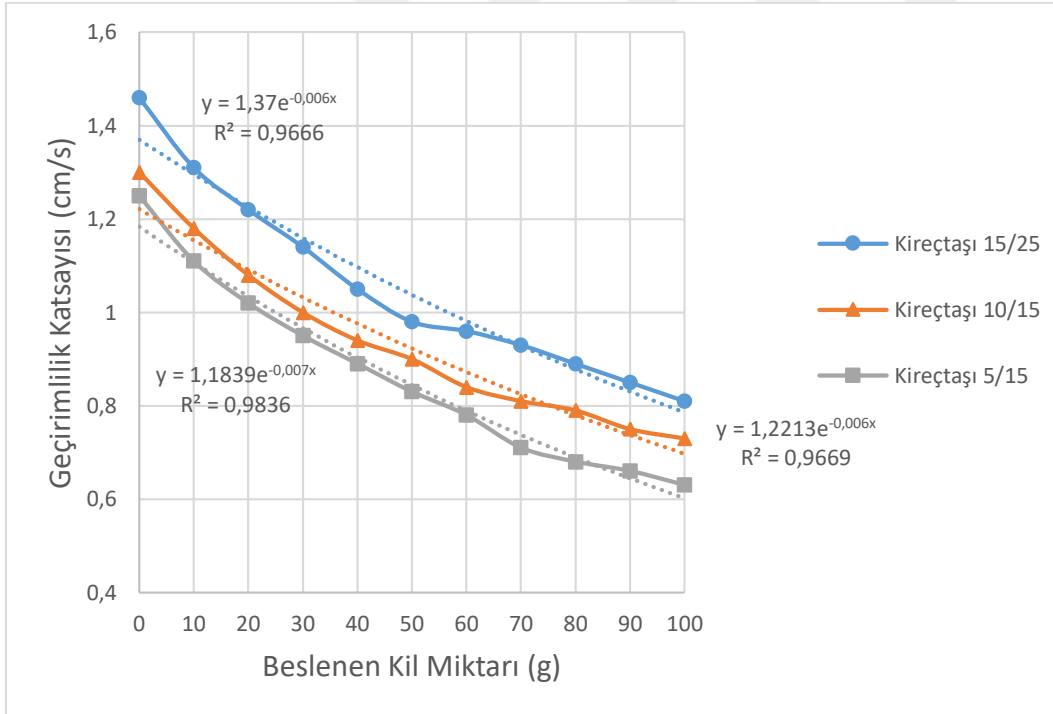
Tablo 4.7. Geçirimli betonların kıvrımlılık değerleri.

Karışım Adı	Kıvrımlılık
KA25	1.19
KA10	1.41
KA5	1.61
DA25	1.22
DA10	1.31
DA5	1.46
GDA25	1.12
GDA10	1.26
GDA5	1.42

4.10. Tıkanma

4.10.1 Deneysel olarak elde edilen sonuçlar

Tez kapsamında üretilen geçirimli beton numuneler daha önce açıklanan yöntemlerle kil ile tıkanmıştır. İlk durumda herhangi bir tıkayıcı olmadan betonların geçirimlilik katsayıları belirlenmiş, daha sonra 10 g kil kuru olarak silindir numune üzerinde olabildiğince eşit bir şekilde dağıtıldıktan sonra sisteme su beslemesi yapılmış ve geçirimlilik katsayısı tekrar belirlenmiştir. Daha sonra ikinci 10 g numune beslemesi yapılmış ve toplamda 20 g kilin sebep olduğu geçirimlilik azalması kaydedilmiştir. Kuru olarak numune yüzeyine dağıtılan kilin su beslemesi ile olabildiğince geçirimli betonun içerisine dağılabilmesi için 5 dakika boyunca su beslemeye devam edilmiştir. Oldukça ince olan kilin büyük bir kısmı ilk beslemede su ile birlikte numune alt yüzeyinden akarak çıkmıştır. Kil ile karışık olan su alt taraftan toplanarak tekrar sisteme verilmiştir. Kaydedilen süreler ile yeni geçirimlilik katsayıları hesaplanarak, bu katsayıların azalma eğilimleri Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’de gösterilmiştir.

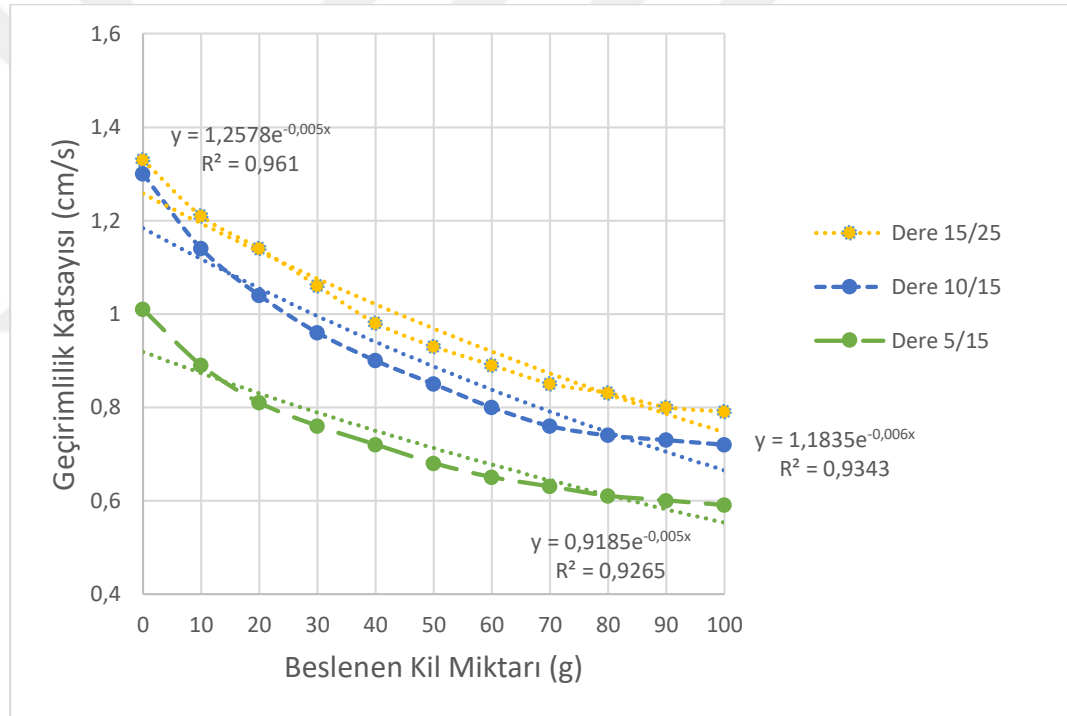


Şekil 4.42 Kireçtaşı agregaları ile elde edilen geçirimli betonların tıkanma davranışları.

Şekil 4.42 incelendiğinde beslenen kil miktarı arttıkça geçirimli betonlarda su geçirimliliği katsayısının da azaldığı görülmektedir. Geçirimli betonun bünyesindeki boşluklar kil ile dolmakta ve geçirimlilik katsayısı da buna paralel olarak azalmaktadır. 15/25 mm gradasyonlu kireçtaşı agregaları ile elde edilen

geçirimli betonlardaki geçirimsizlik katsayısı düşüşü 10/15 mm ve 5/15 mm gradasyonlara kıyasla daha fazla olmuştur. Geçirimsizlik katsayısındaki azalma hızı ilk beslemelerde oldukça hızlı olurken, besleme miktarı arttırılmaya devam ettikçe azalmıştır. Tıkanma öncesindeki en düşük su geçirimsizlik katsayısı değeri 5/15 mm gradasyonlu kireçtaşı agregasında görülürken, tıkanma sonrasında da en düşük değer aynı gradasyonlu agregaya ile elde edilen betonlarda görülmüştür.

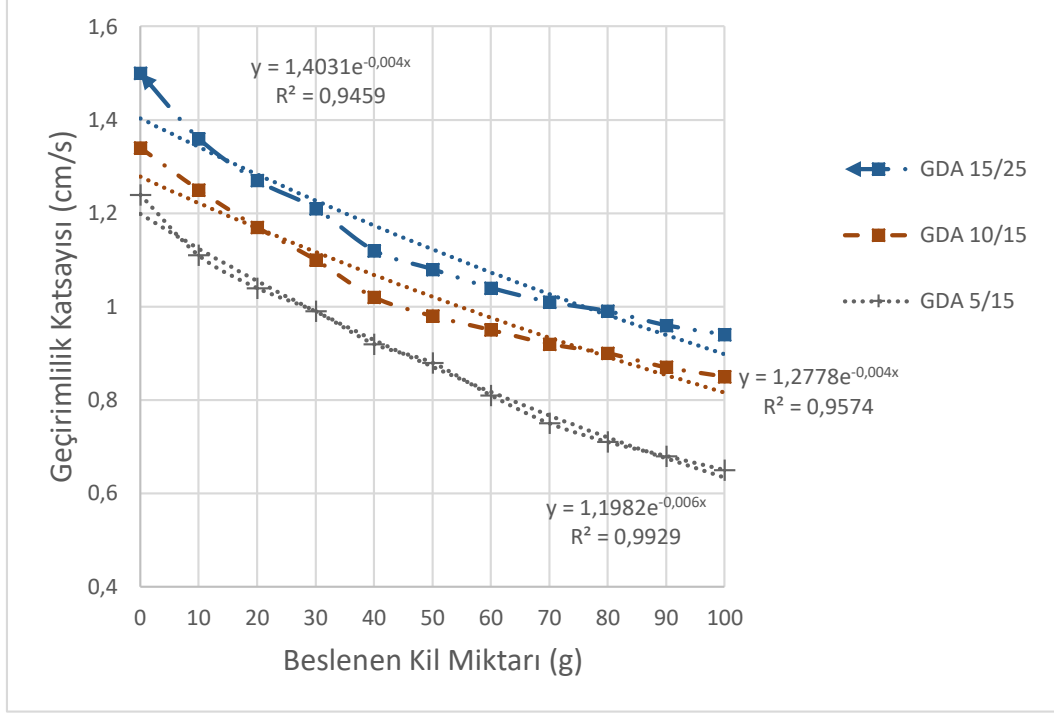
Şekil 4.43’da dere agregaları kullanılarak elde edilen geçirimsiz betonlardaki tıkanma sonrasında gözlemlenen geçirimsizlik katsayısındaki azalma verilmiştir. 10/15 mm gradasyonlu agregalar ile dökülen betonlarda geçirimsizlikteki azalma daha keskin bir şekilde gözlemlenmiştir. 5/15 mm tane dağılımındaki dere agregaları ise bu agrega kökeni içerisinde tıkanma öncesi ve sonrasında en kötü geçirimsizlik performansını göstermiştir. Tıkanma sonrasında numunelerin geçirimsizlik katsayıları %70’lere varan azalmalar göstermiştir.



Şekil 4.43 Dere agregaları ile elde edilen geçirimsiz betonların tıkanma davranışları.

GDA ile elde edilen geçirimsiz betonlardaki geçirimsizlik katsayısı değişimleri Şekil 4.44’de verilmiştir. 15/25 mm tane dağılımına sahip agregaların geçirimsizlik katsayılarındaki azalma daha belirgin olurken, tıkanma sonrasında geçirimsizlik katsayıları 0.5 cm/sn civarlarına düşmüştür. Diğer agrega kökenleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek geçirimsizlik katsayısına sahip olan GDA ile üretilen geçirimsiz betonların tıkanma davranışının ise benzer olduğu görülmüştür. Tıkanma ile azalan su geçirimsizliği katsayısının azalma hızı bu tür agregalarda daha fazla olurken, tıkanma sonrasında ölçülen nihai su geçirimsizliğinin aynı gradasyona sahip

agregalar ile örtüştüğü görülmektedir. Bu sonuca, tıkanmanın beton numunesinin üst yüzeyinde başlaması ve ilk önce buradaki boşlukların tıkanması neden olarak gösterilebilir. Her ne kadar numunenin alt kısmındaki boşluklar tıkanmamış olsa da üst taraf tamamen tıkanmış için su buralara ulaşamamakta ve su geçirimsizliği performansı düşmektedir. Bahsedilen bu süreç BT ile yapılan iç yapı analizle ile de gösterilecektir.



Şekil 4.44 GDA ile elde edilen geçirimli betonların tıkanma davranışları.

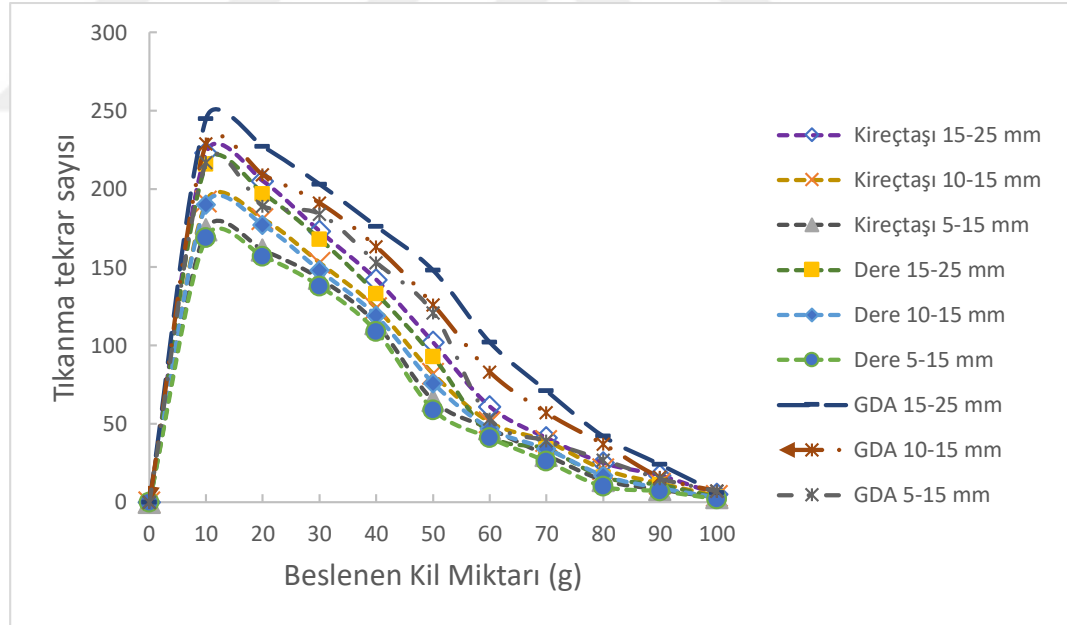
Şekil 4.45'te kil ile yapılan tıkanma işlemi sonrasında numune yüzeylerinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Çıplak göz ile yapılan muayenelerde de tıkanıcı malzemenin daha çok besleme yapılan yüzeyde yoğunlaştığı, alt tabakalara inen kil miktarının oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.





Şekil 4.45 Tıkama sonrası numune yüzeylerindeki değişim.

Kil ile yapılan tıkanma deneyleri sonrasında geçirimli betonların tıkanma tekrar sayıları Şekil 4.46’da verilmiştir. GDA kullanılarak elde edilen geçirimli betonların tıkanması daha uzun sürerken aynı kökende 15-25 mm gradasyonlu agregat tıkanma süresi açısından en iyi performansı göstermiştir. Dere agregalarının tıkanma sayıları diğer agregat kökenlerine kıyasla daha az olmuştur. Bu agregatlar ile üretilen geçirimli betonlar daha çabuk tıkanmıştır. 5-15 mm tane aralığındaki agregatlar her bir köken için en az tıkanma tekrar sayısı gösterirken 15-25 mm gradasyonlu agregatlar ise en fazla tıkanma tekrar sayısı göstermiştir. Böylelikle GDA 15-25 mm tane aralığındaki agregatlar ile elde edilen geçirimli betonların daha uzun sürede tıkanacağı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.46 Tıkanma tekrar sayıları.

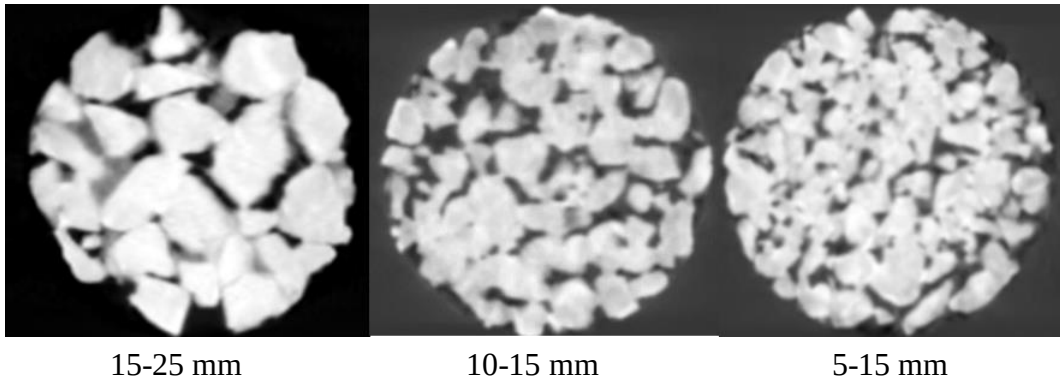
Beslenen kil miktarı ile değişen tıkanma sayıları Tablo 4.8’de verilmiştir. Beklendiği gibi sisteme beslenen kil miktarı arttıkça geçirimli beton numunelerin tıkanma tekrar sayıları azalmakta ve kil beslemesi devam ettiğinde tıkanarak geçirimsizlik özelliğini kaybetmektedir.

Tablo 4.8. Geçirimli betonların tıkanma sayıları.

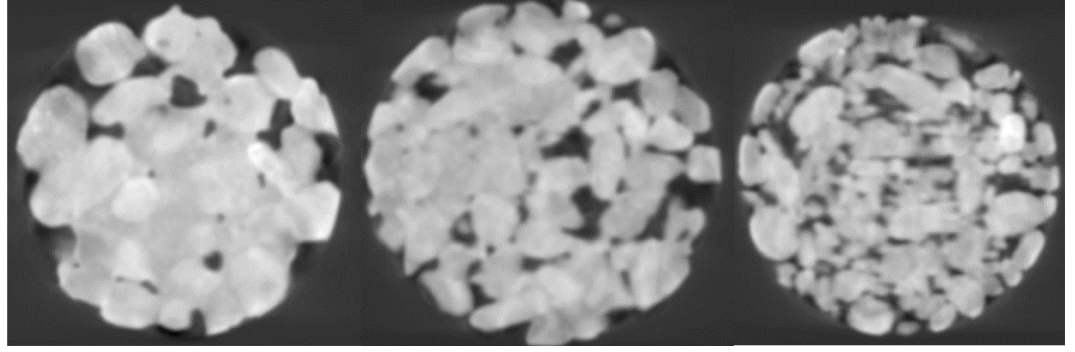
Kil miktarı (g)	KA25	KA10	KA5	DA25	DA10	DA5	GDA25	GDA10	GDA5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	223	192	174	216	190	169	245	229	217
20	205	181	161	197	177	157	227	209	189
30	173	153	143	168	148	138	203	191	184
40	142	124	114	133	119	109	176	163	153
50	102	82	65	93	76	59	148	126	121
60	61	51	47	43	47	41	102	83	53
70	41	39	30	34	34	26	71	57	39
80	25	21	14	16	17	10	42	37	27
90	17	12	8	11	9	7	24	16	15
100	5	4	3	3	3	2	6	7	7

4.10.2 BT ile elde edilen sonuçlar

Laboratuvar ortamında kil ile tıkanan numunelerin su geçirme katsayılarındaki azalma deneysel yöntemle bulunduğundan sonra aynı numunelerin BT yardımıyla görüntüleri de alınmıştır. Elde edilen bu görüntüler yardımıyla tekrar boşluk miktarları hesaplanarak tıkanmanın neden olduğu porozite değişimi belirlenmiştir. Ayrıca numune derinliğindeki boşluk miktarı değişimi de kesit kesit not edilerek tıkanmanın hangi bölgelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.47’te kireçtaşı agregası, 4.48’de dere agregası ve 4.49’de de GDA kullanılarak üretilen geçirimsiz betonların tıkanıldıktan sonraki BT görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.47 Kireçtaşı agregası için tıkanma sonrası BT görüntüleri.

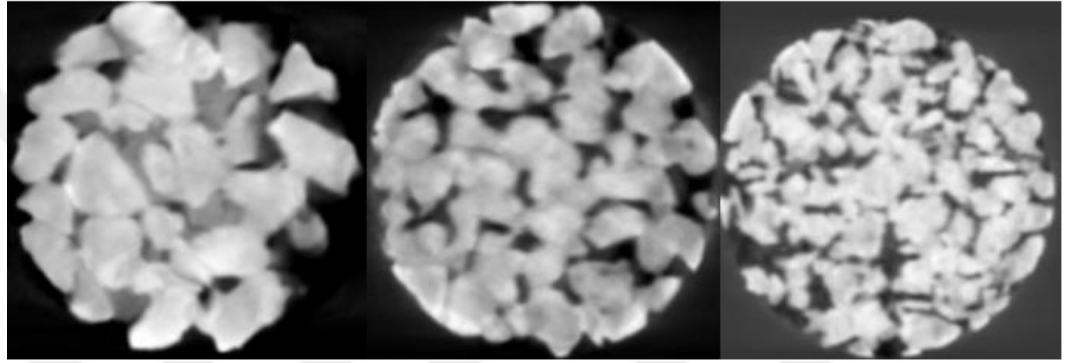


15-25 mm

10-15 mm

5-15 mm

Şekil 4.48 Dere agregası için tıkanma sonrası BT görüntüleri.



15-25 mm

10-15 mm

5-15 mm

Şekil 4.49 GDA için tıkanma sonrası BT görüntüleri.

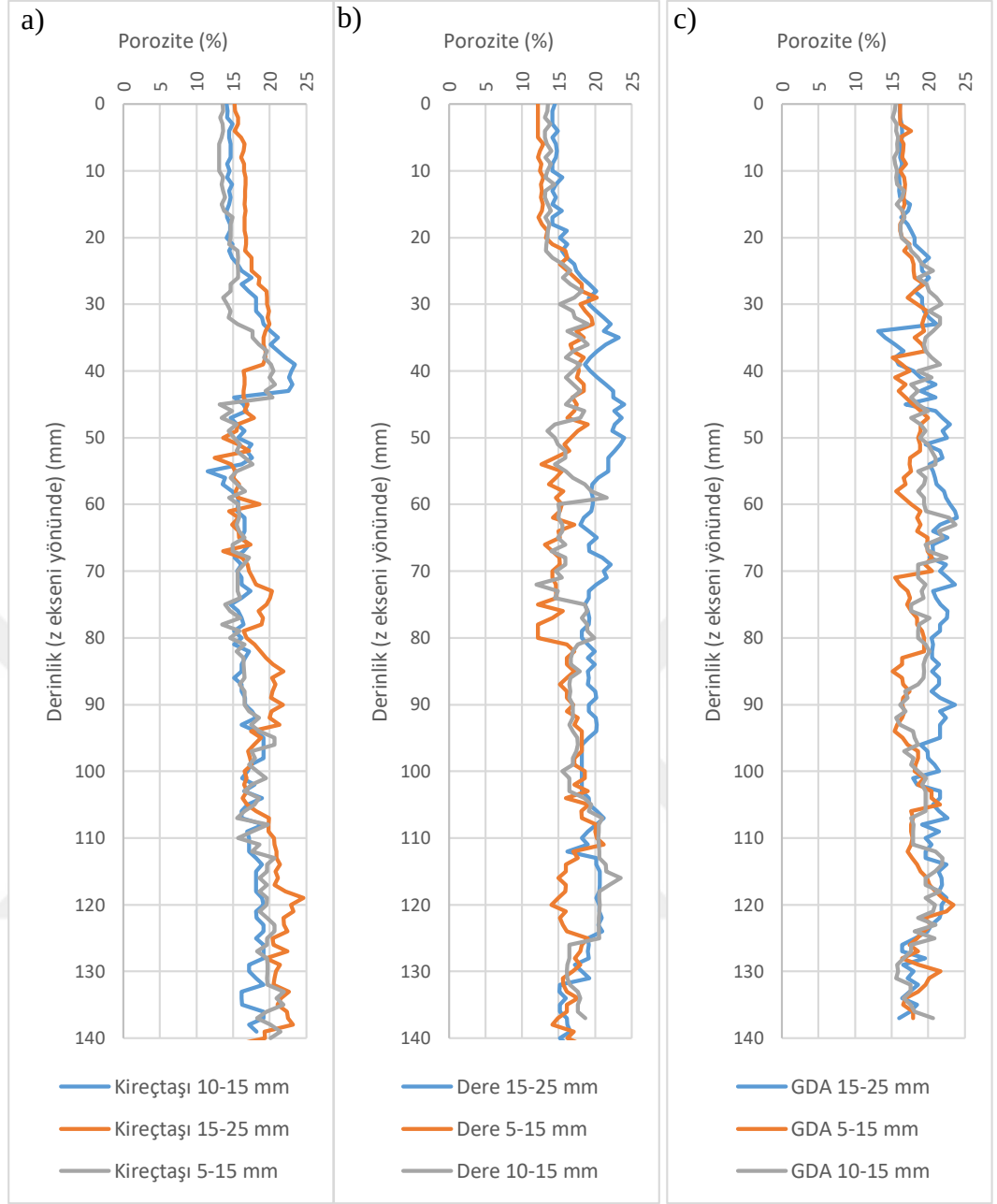
Şekil 4.47, 4.48 ve 4.49 incelendiğinde kilin agrega üzerinde ya da boşluklarda konumlandığı görülmektedir. Numunenin üst taraflarında kilin yoğun bir şekilde görülebildiği ancak alt katmanlara indikçe bu yoğunluğun azaldığı ve bazı bölgelerde ise hiç gözlenmediği görülmüştür. Üst tabakada boşlukların tamamen tıkanması neticesinde, sisteme beslenen yeni kil bir alt tabakaya inemeyerek üst kısımlarda toplanmışlardır. Dolayısıyla üst bölgelerde boşluklar kil ile tıkanırken alt kısımlarda boşlukların tamamen boş olarak kaldığı görülmüştür. Kil, agrega ve çimento hamurunun yoğunlukları birbirlerine yakın olduğu için görüntülerden kili ayırt etmenin bazı bölgelerde oldukça zorlaştığı görülmüştür. Kil ile tıkanma yapılmadan önce çekilen BT görüntüleri yardımıyla boşluk hacmi hesaplanmıştı. Tıkanmadan sonra da boşluk hacimleri hesaplanarak aralarındaki fark ortaya çıkarılmış ve Tablo 4.9'te listelenmiştir.

Tablo 4.9 BT ile hesaplanan boşluk miktarları.

Karışım	Tıkanma öncesinde BT ile hesaplanan boşluk miktarı (%)	Tıkanma sonrasında BT ile hesaplanan boşluk miktarı (%)
KA25	20.1	17.25
KA10	18.7	15.33
KA5	19.3	15.41
DA25	19.6	17.14
DA10	17.4	15.46
DA5	18.5	16.11
GDA25	20.6	17.36
GDA10	19.2	17.32
GDA5	20.6	16.72

Tablo 4.5 incelendiğinde numunelerin tıkanma sonrasındaki boşluk oranlarının ilk ölçüme göre düştüğü görülmektedir. Ancak tıkanma sonrasında bile geçirimli beton numunelerinin hedef porozite değerine yakın bir sonuç gösterdiği görülmektedir. Numunelerin bu yüksek porozite değerine rağmen su geçirimliliğinin azalması ise tıkanmanın yoğun olarak besleme yapılan noktaya yakın yerlerde olmasının bir sonucudur. Alt tabakalarda boşluklar tıkanmamasına rağmen su üst tabakayı geçip buraya ulaşamadığı için numuneler yüksek porozite değerine rağmen düşük su geçirimliliği göstermektedirler.

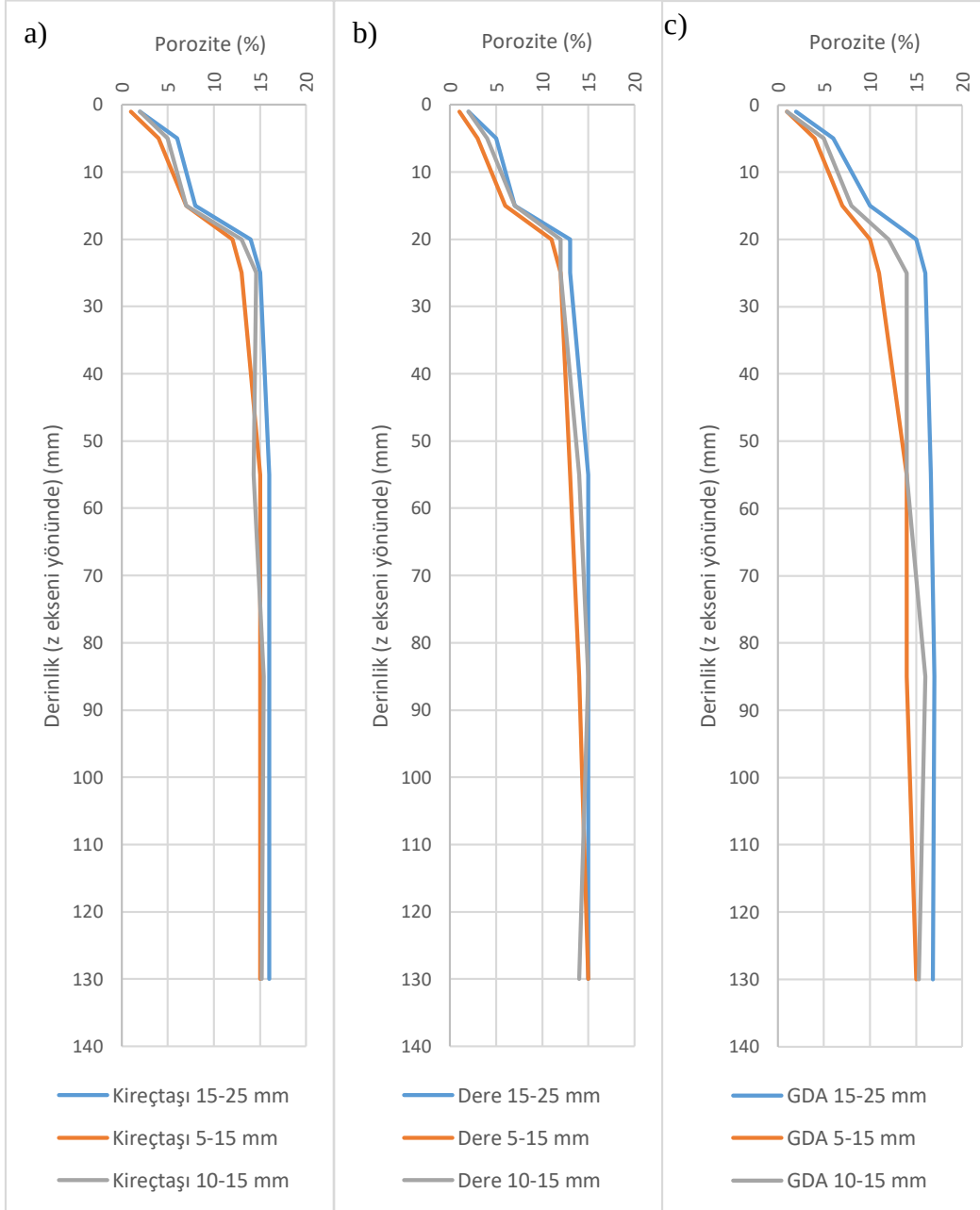
Tıkanma sonrasında tekrar çekilen BT görüntüleri ile tıkanmadan kaynaklanan boşluk dağılımı değişimi numune derinliği boyunca tekrar çizilmiştir. Elde edilen görüntüler kireçtaşı agregası için Şekil 4.50a'da, dere agregası için 4.50b'de ve GDA için 4.50c'de verilmiştir.



Şekil 4.50 Tıkanma sonrası numune derinliğindeki boşluk dağılımı.

Her bir geçirimli beton numunesinden elde edilen 500'ün üzerindeki BT görüntüleri analiz edildiğinde, her bir kesitte tıkanma şiddetine bağlı olarak görülen renk şiddetinin de farklı olduğu görülmüştür. Program tek bir kesit üzerinden referans alıp buna göre hesaplama yaptığı için tıkanma sonrasında hesaplanan boşluk hacmi değeri oldukça yüksek çıkmıştır. Bu sonucun önüne geçmek için belli derinliklerdeki bazı kesitler alınarak tekrar hesaplama yapılmış ve boşluk dağılımındaki değişim tekrar belirlenmiştir. Bunun için tıkanmanın yoğun olarak gerçekleştiği bölge olan üst kısımdan 5 kesit orta bölgeden 2 kesit ve tıkanmanın neredeyse hiç yaşanmadığı bölge olan alt kısımdan 1 kesit alınarak boşluk dağılımı değerleri tekrar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.51a, 4.51b ve 4.51c'de

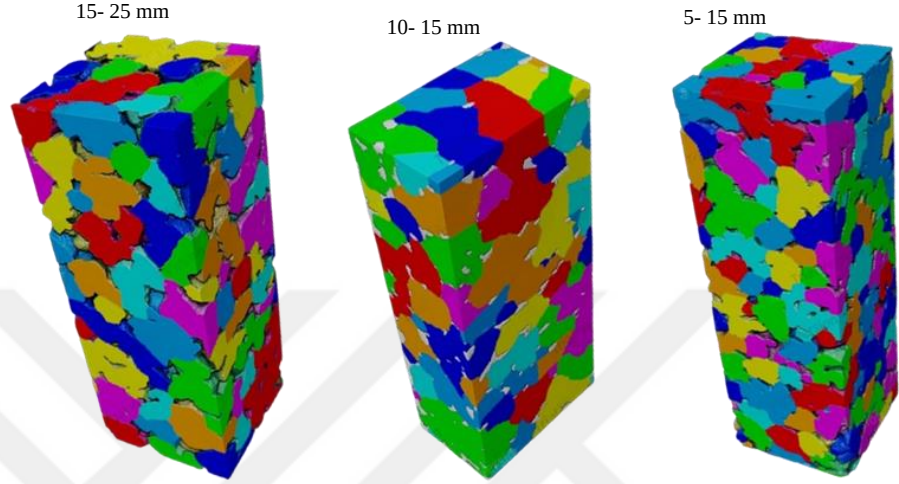
gösterilmiştir. Bütün kesitlerden alınan görüntü analizinin aksine, belli bölgelerden alınan görüntülerin analizi sonucunda tıkanmanın gerçekleştiği bölgeler belirlenebilmiştir. Numune yüzeyinden itibaren 20 mm derinliğe kadar gerçekleştiği, bu bölgeden sonra üstte kalan boşlukların tıkanması neticesinde bir alt katmana su iletiminin gerçekleştirilemediği görülmüştür. Lee et al. (2021), da tıkanmanın yüzeye yakın bölgelerde meydana geldiğini, ince taneli tıkaçıcılar için bu değerin yüzeyden 11 mm derinlikte gerçekleştiğini ve daha büyük tanecikli tıkaçıcılarda bu değerin 35 mm’den fazla olduğunu belirtmiştir.



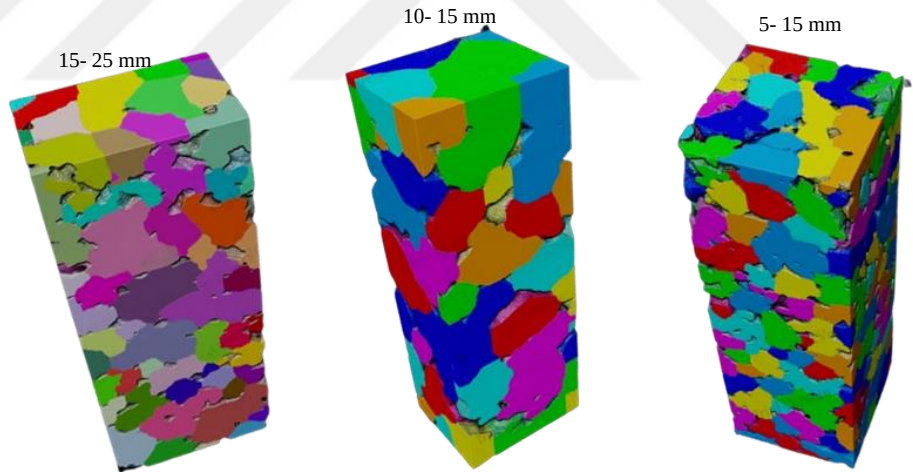
Şekil 4.51 Tıkanma sonrası belirlenen kesitlerdeki boşluk dağılımı.

4.11. 3D görüntüler

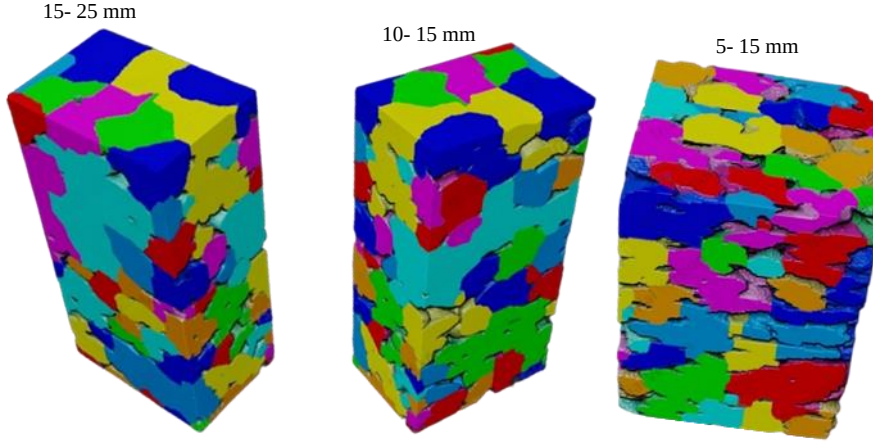
Kireçtaşı agregaları kullanılarak elde edilen geçirimli betonların ayrık boşluk modeli Şekil 4.52’de, dere agregaları ile elde edilen karışımlar Şekil 4.53’da ve GDA ile elde edilenler ise Şekil 4.54’te çizilmiştir. Renklendirilmiş alanlar boşlukları temsil etmekte olup farklı boşluklar farklı renklerle birbirinden ayrılmıştır. 3D boşluk yapısı da bu şekillerden elde edilen veriler ile hesaplanmıştır.



Şekil 4.52 Ayrık boşluk modeli (Kireçtaşı agregaları).

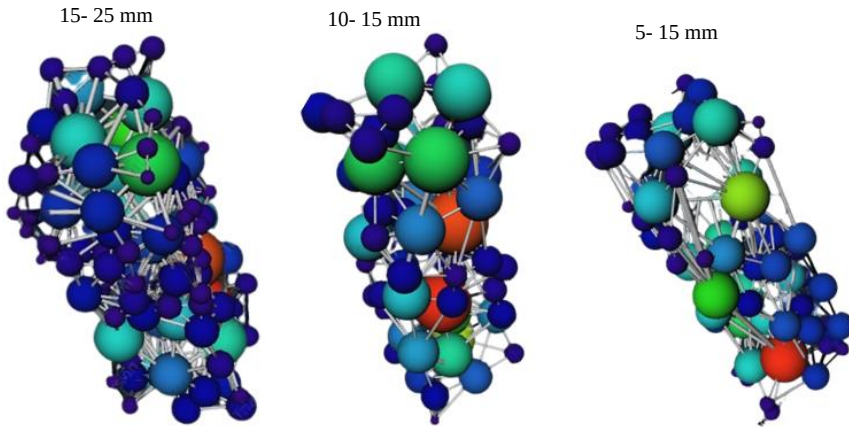


Şekil 4.53 Ayrık boşluk modeli (Dere agregaları).

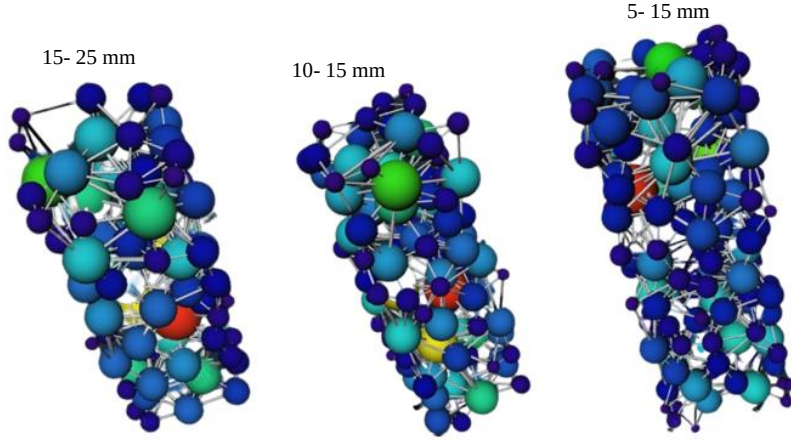


Şekil 4.54 Ayrık boşluk modeli (GDA).

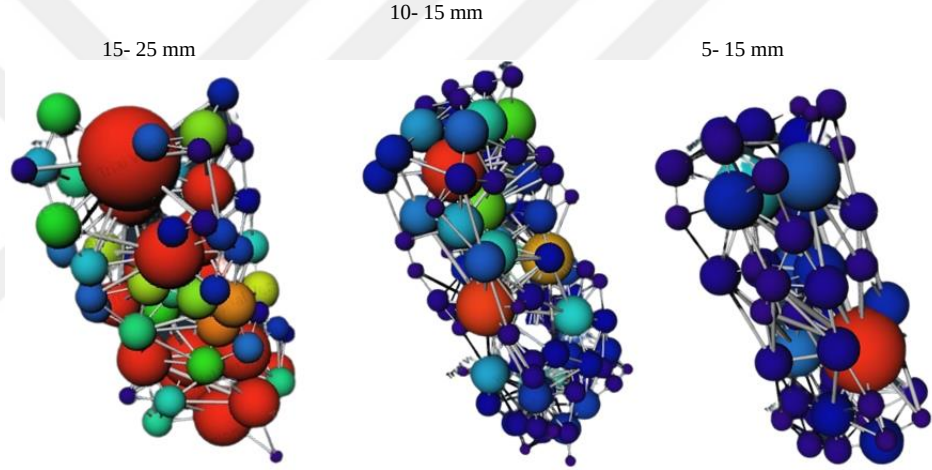
Eşdeğer boşluk modelleri ise kireçtaşı agregaları kullanılan karışımlar için Şekil 4.55'te, dere agregaları için 4.56'te ve GDA için 4.57'te verilmiştir. Eşdeğer boşluk modeli ile iki boyutlu ve üç boyutlu görüntülerin bir kombinasyonu yapılarak, örnek içerisindeki boşlukların geçirimsilik kapasitesine dair bir öngörü yapılabilmektedir. Geçirimli betonların içerisindeki sızıntı yapabilme kapasitesinin belirlenebilmesi için gerçek boşluk yapısına oldukça benzer olan eşdeğer boşluk modelinin çıkarılması gerekmektedir (Shan et al., 2022). Boşluklar ve boşlukları birbirine bağlayan boğazlar Şekil 4.54, 4.55 ve 4.56'te de gösterildiği üzere düzenli geometrik şekillere atanmıştır. Şekil 4.54-4.56'ten de görülebileceği üzere eşdeğer boşluk modeli basit yuvarlak toplar boşlukları ve boşlukları birbirine bağlayan boğazlarında silindir şeklinde gösterildiği modeldir. Boğazlar boşlukları birbirlerine bağlamaktadır. Şekillerdeki farklı renkteki boşluklar farklı boşlukları temsil edecek şekilde program tarafından otomatik olarak atanmıştır.



Şekil 4.55 Eşdeğer boşluk modeli (Kireçtaşı agregaları).



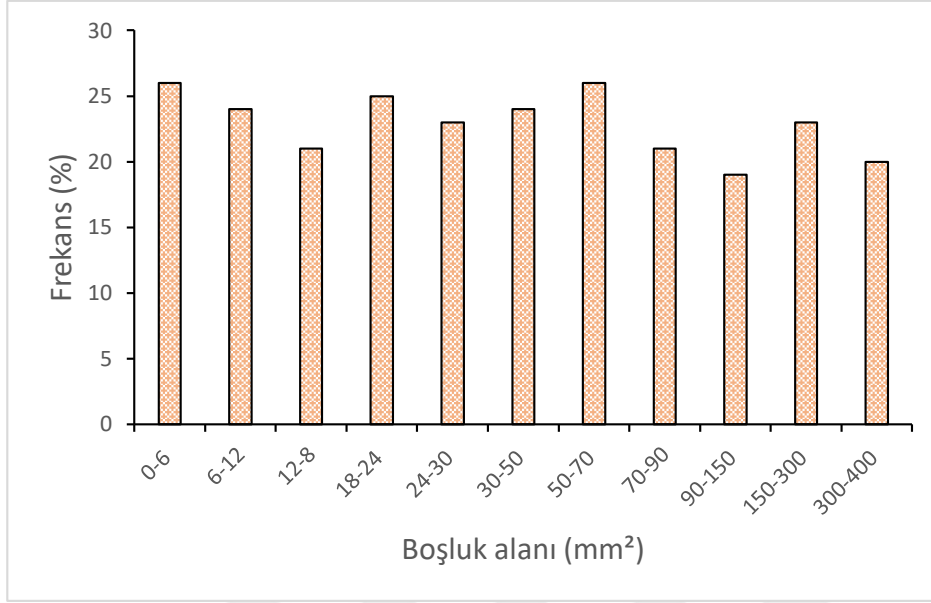
Şekil 4.56 Eşdeğer boşluk modeli (Dere agregaları).



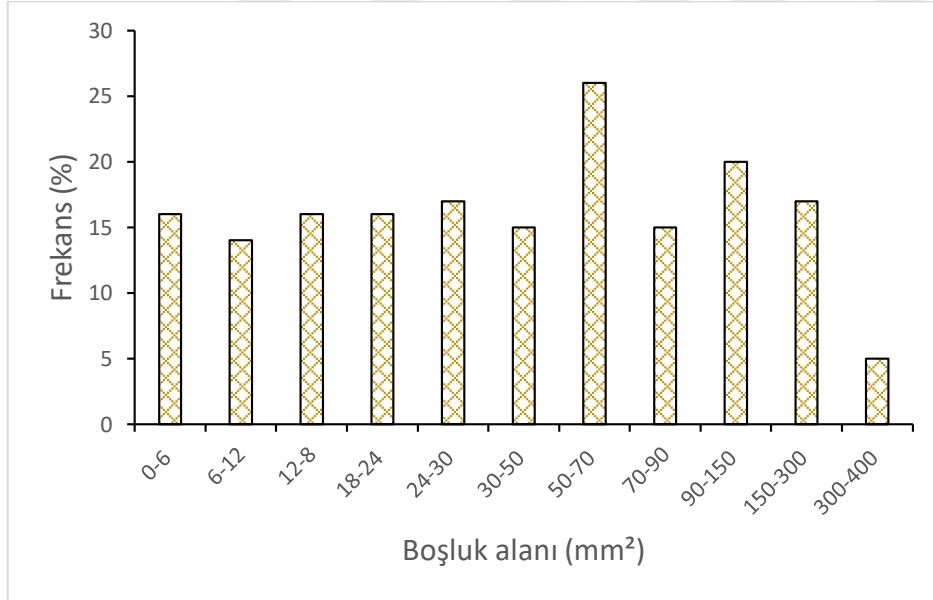
Şekil 4.57 Eşdeğer boşluk modeli (GDA).

Ayrık boşluk modelinden 2D görüntülerle yapılan analizlerde olduğu gibi boşluk büyüklüğü dağılımları elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan her bir agrega kökeni ve gradasyonu için boşluk büyüklüğü ve boşluk büyüklüğünün bulunma sıklığı frekans değeri olarak çizilmiş ve grafikler halinde verilmiştir. Kireçtaşı agregası 15-25 mm gradasyonlu agregalar ile üretilen geçirimli betonların 3D boşluk analizi Şekil 4.58’de, 10-15 mm gradasyon için Şekil 4.59’da ve 5-15 mm için ise 4.60’da verilmiştir. Aynı şekilde dere agregaları ile üretilen geçirimli betonların Avizo programı ile elde edilen 3D boşluk dağılımı 15-25 mm tane aralığı için Şekil 4.61’de, 10-15 mm için Şekil 4.62’de ve 5-15 mm için Şekil 4.63’te verilmiştir. 15-25 mm tane aralığında GDA’lar ile üretilen geçirimli betonlara ait 3D boşluk dağılımı Şekil 4.64’te, 10-15 mm tane aralığındaki agregalar için Şekil 4.65’te ve 5-15 mm için Şekil 4.66’a verilmiştir. Avizo programı ile elde edilen boşluk dağılımı değerlerinin 2D görüntülerle elde edilen değerlere kıyasla daha

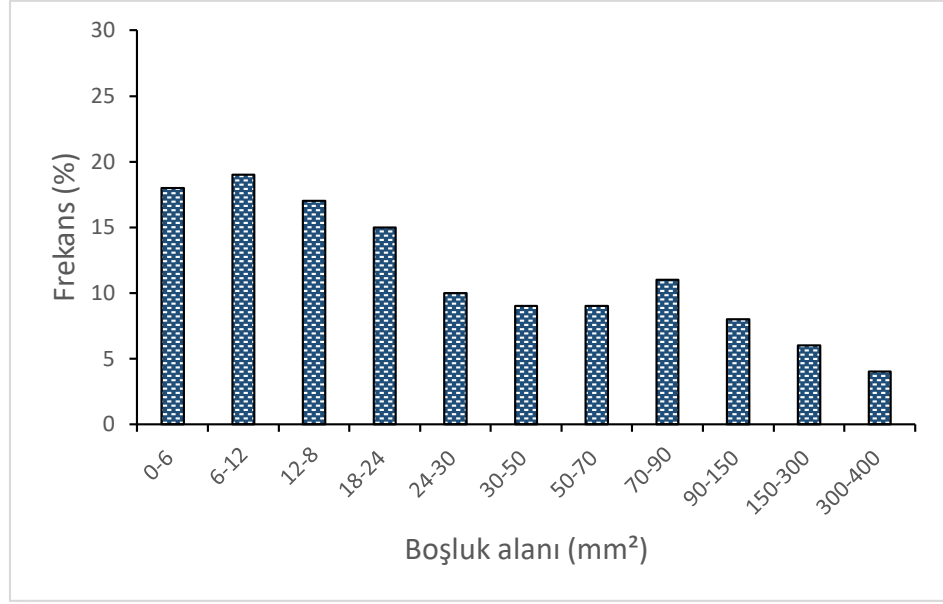
fazla olduğu görülmektedir. Özellikle dere ve GDA'lı agregalar ile elde edilen geçirimli beton örneklerde boşluk dağılımları 2D görüntülere kıyasla farklılık göstermektedir.



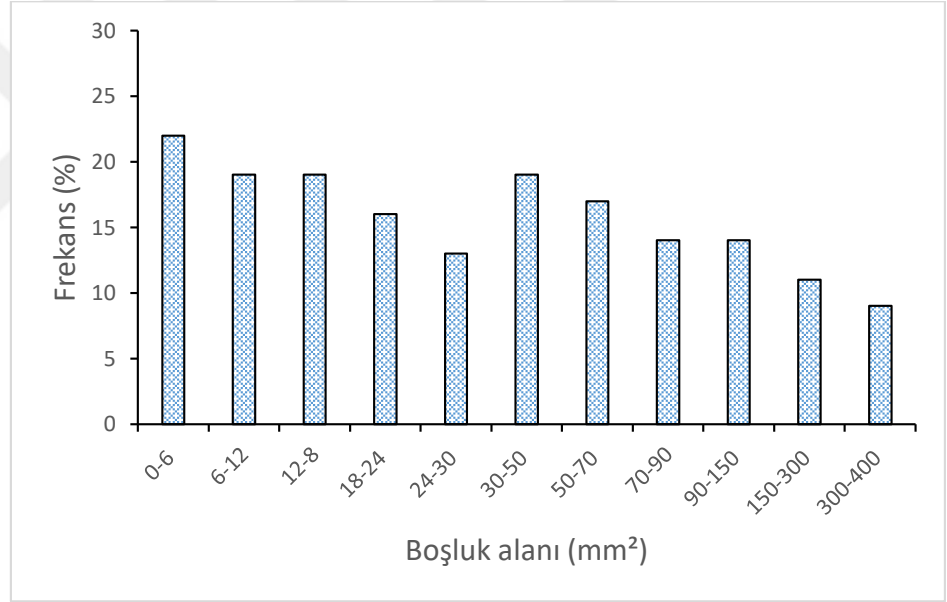
Şekil 4.58. Kireçtaşı agregası 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).



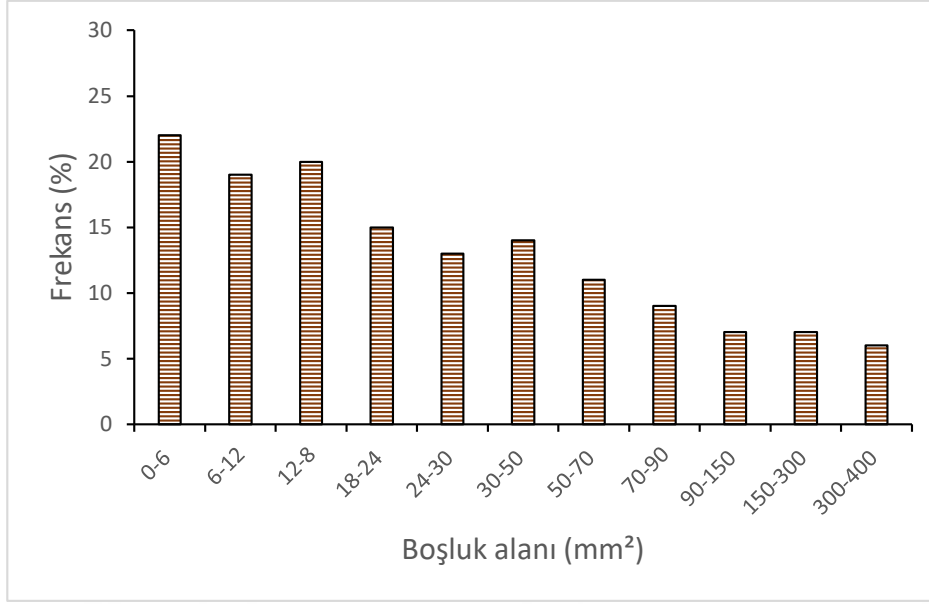
Şekil 4.59. Kireçtaşı agregası 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).



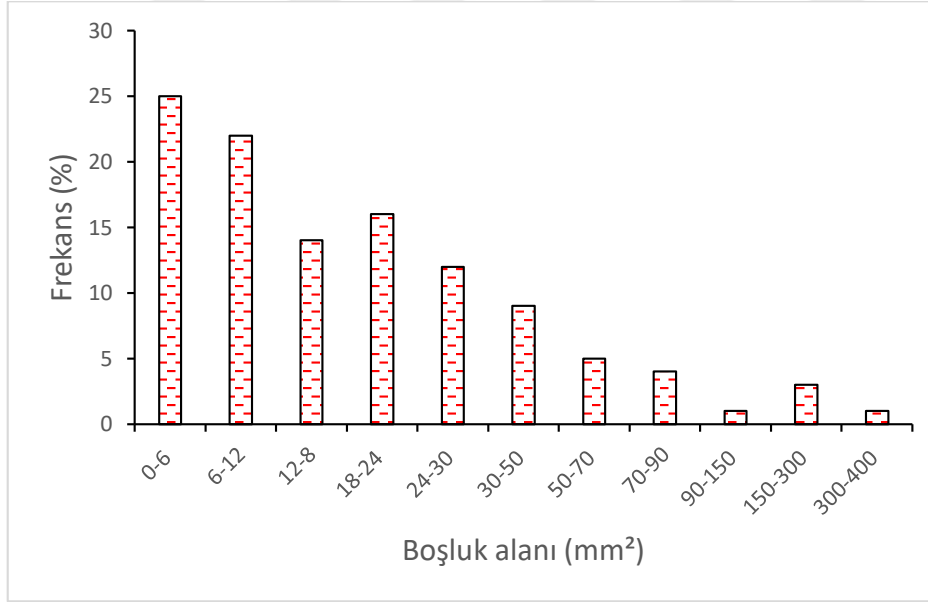
Şekil 4.60. Kireçtaşı agregası 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).



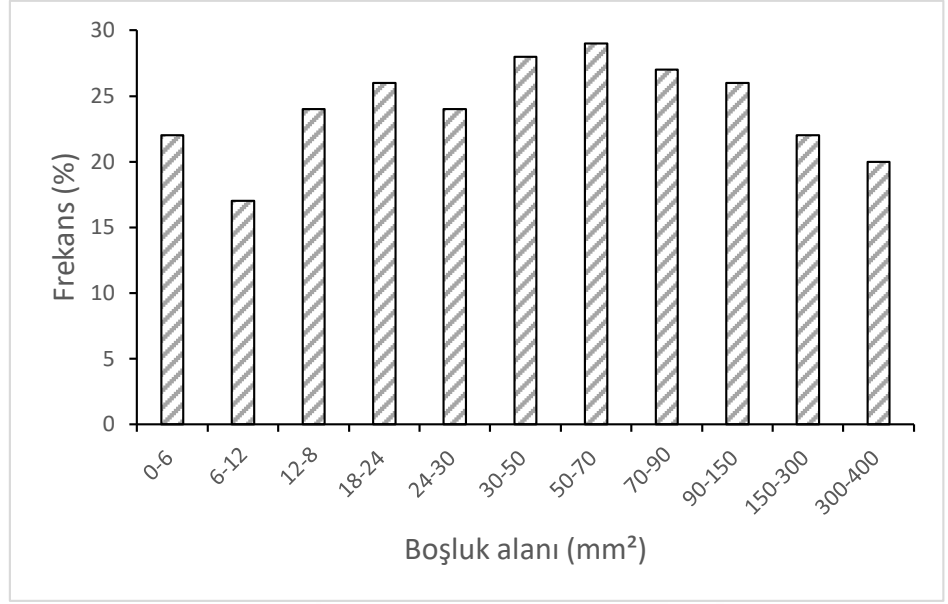
Şekil 4.61. Dere agregası 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).



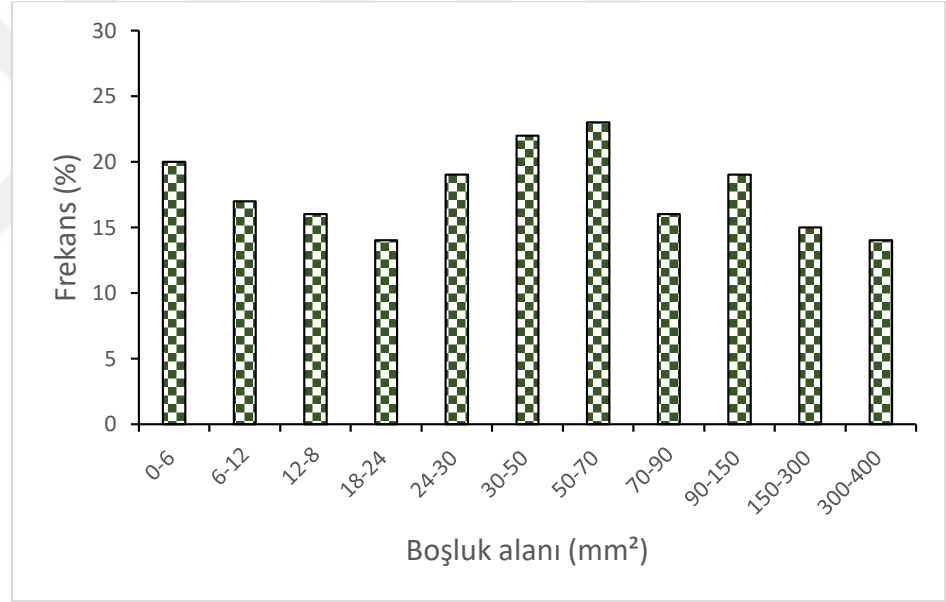
Şekil 4.62. Dere agregası 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).



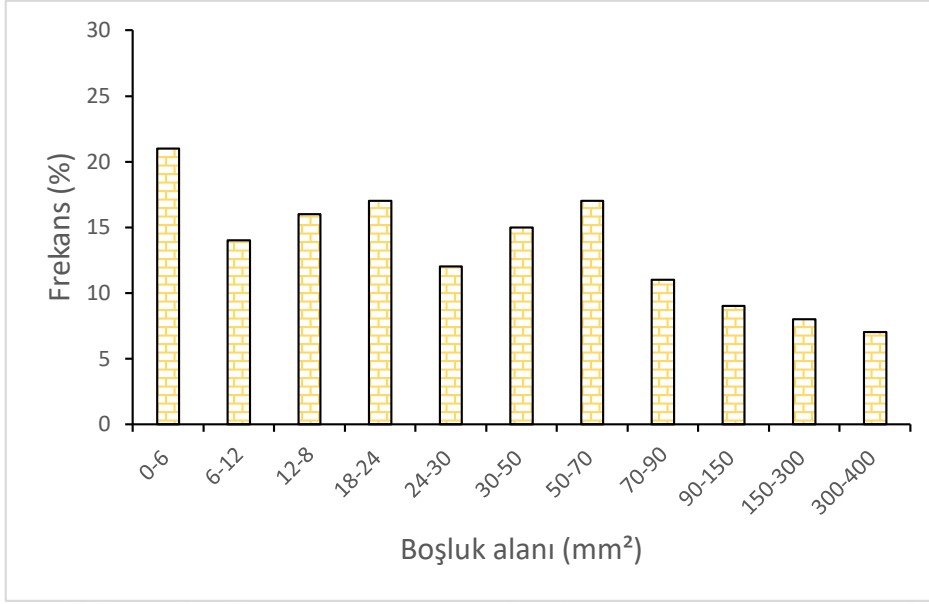
Şekil 4.63. Dere agregası 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).



Şekil 4.64. GDA 15-25 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).



Şekil 4.65. GDA 10-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).



Şekil 4.66. GDA 5-15 mm gradasyon için boşluk büyüklüğü dağılımı (3D).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında yapılan deneyler ve görüntü analizleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Uygun bir beton karışım hesabı ile çeşitli kökene ve gradasyona sahip agregalar kullanarak aynı basınç dayanıma sahip geçirimli betonlar üretmek mümkündür. GDA'lar ile üretilen geçirimli betonlarda aynı basınç dayanımına ulaşabilmek için kullanılan çimento miktarı en yüksek olurken bunu sırasıyla kireçtaşı ve dere agregaları takip etmiştir.
- Geçirimli betonlarda basınç dayanımı ile yarmada çekme ve/veya eğilme dayanımı arasında kesin bir ilişki oluşturulamamıştır.
- GDA kullanımının geçirimli betonlarda yoğunluk değerini azalttığı görülmüştür. Bu çalışmada göz önüne alınan GDA'lar arasında en yüksek yoğunluk değeri 15-25 mm gradasyonu ile elde edilmiştir. Dere agregaları arasında ise 5-15 mm gradasyonu ile üretilen geçirimli betonlar en yüksek yoğunluk değerini göstermişlerdir.
- Yüksek su emme kapasiteleri nedeniyle GDA'lar ile üretilen geçirimli betonların işlenebilirliğinin daha düşük olduğu görülmüştür. Zayıf işlenebilirlikleri nedeniyle GDA'lar ile üretilecek olan geçirimli betonların tasarımında oldukça dikkatli olunmalıdır.
- Beklenildiği gibi toplam porozite değerleri bağlantılı porozite değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. %15 hedef porozite değerine bütün karışımlarda ulaşılmıştır. Bu çalışmada kullanılan tüm agrega kökenleri için iri agrega tane çapının büyüklüğünün fazla olduğu karışımlarda daha yüksek poroziteye ulaşılmıştır. Aynı basınç dayanımına sahip olmalarına rağmen, GDA'lar ile üretilen geçirimli betonlarda oluşan birbirleriyle bağlantılı olan boşluk miktarı daha fazla olmuştur.
- Tıkanma öncesindeki porozite değerlerinin ve geçirimlilik katsayısı değerlerinin birbirleriyle orantılı olduğu görülmüştür. Birbirleriyle bağlantılı olan porozite değerleri yüksek olan karışımlar daha yüksek su geçirimliliğine sahip olmuştur. Bağlantılı boşluklar sayesinde su üst yüzeyden bir alt yüzeye kolaylıkla geçebilmiştir.

- Bu tez çalışması kapsamında kullanılan gradasyonlar arasından 15-25 mm tane aralığındaki agregalar ile üretilen geçirimli betonlar en düşük aşınma direncine sahip olurken, 5-15 mm gradasyon ile elde edilenler ise en iyi performansı göstermiştir.
- GDA'lar ile üretilen geçirimli betonlarda gözlemlenen kuruma büzülmesi değerleri içerdikleri yüksek çimento hamuru nedeniyle en yüksek olmuştur.
- BT görüntüleri incelendiğinde dere agregası ile üretilen numunelerin alt kısımlarında boşluk oranı daha az olduğu, aynı numunelerin üst kısımlarında ise nispeten daha yüksek boşluk hacmi değerlerinin elde edildiği görülmüştür.
- Genellikle tıbbi görüntülemede kullanılan opak maddenin geçirimli betonlarda kıvrımlılık tayininde de kullanılabileceği görülmüştür.
- BT görüntüleri de iri agrega tane büyüklüğünün daha fazla olduğu gradasyonlar ile üretilen geçirimli betonlarda daha büyük boyutlu ve birbirleriyle bağlantılı boşlukların oluştuğunu göstermiştir.
- Artan bağlantılı porozite ile kıvrımlılık değeri azalmıştır. Dere ve kireçtaşı agregaları ile üretilen geçirimli betonların alt kısımlarındaki porozite değeri en düşük değer olmuştur. GDA'lı betonlarda ise en düşük porozite değerine numunelerin orta kısımlarında ulaşılmıştır.
- BT görüntüleri, geçirimli betonların geçirimlilik performansının numunenin farklı bölgelerinde değişiklik gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle numunelerin geçirimlilik performansı, boşluk özelliklerine göre analiz edilmelidir.
- Boşluk büyüklüğü dağılımları incelendiğinde de iri agregaların daha büyük boşluk alanları oluşturduğu ($>50 \text{ mm}^2$), daha ince agrega yığınları ile üretilen numunelerde orta ($20-50 \text{ mm}^2$) ve küçük ($<20 \text{ mm}^2$) boşluk alanları oluştuğu görülmüştür. Artan büyük boşluk alanı değerlerinin geçirimliliğe de pozitif bir etkisi olmuştur.
- Ortalama boşluk alanı ve ortalama boşluk büyüklüğünün numunelerin geçirimliliği ile alakalı bir fikir verdiği görülmüştür.
- Tıkanma deneyleri sonucunda numunelerin belli bir tıkanma sayısından sonra geçirimliliklerini tamamen kaybettikleri görülmüştür.

- Tıkanma sonrasında çekilen BT görüntüleri incelendiğinde tıkanmanın yüzeye yakın kısımlarda olduğu görülmüştür. Tıkayıcı partiküller tıkanan üst bölgeden geçemeyip burada biriktiklerinden dolayı numunelerin alt kısımlarındaki boşluklar tıkanmamasına rağmen numunelerin su geçirimsizliği oldukça azalmıştır.
- İnce partikül ile yapılan tıkama işleminde tıkayıcının büyük bir çoğunluğunun su ile alt yüzeyden çıktığı görülmüştür.
- GDA'lar ile üretilen geçirimli betonların tıkanmaya en dirençli beton olduğu ve onları sırasıyla kireçtaşı ve dere agregaları ile elde edilen geçirimli betonlar takip etmiştir.
- 15-25 mm gradasyonu tüm agrega kökenleri için daha geç tıkanma göstermiştir.
- BT görüntüleri incelendiğinde tıkayıcı olarak kullanılan kilin bir kısmının da su ile taşınarak numunenin alt bölgesindeki boşluklarda hapsediği görülmüştür.

Bu çalışmadan yola çıkarak gelecekte aşağıdaki konular üzerinde çalışılabilir:

- Farklı büyüklükte ve kökende tıkayıcı partiküller kullanılarak, tıkayıcıların geçirimli betonlardaki tıkama performansı incelenebilir.
- Daha geniş agrega kökenleri ve gradasyonları kullanılarak geçirimli betonlar üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Farklı agrega kökenleri ve gradasyonları kullanılarak geçirimli betonların durabilite özellikleri incelenebilir.
- Geçirimli betonlarda tıkanmanın açılabilmesi için farklı yöntemler uygulandıktan sonra BT ile görüntüleri alınarak tıkanmanın hangi kesitlerde açılabilirliği incelenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Abdulwahid, M. Y., 2021, Influences of different stone powders on pervious concrete strength. *Structural Concrete*, 22, E528-E534.

ACI 522R-2010, Report on Pervious Concrete, American Concrete Institute.

Adil, G., Kevern, J. T., & Mann, D., 2020, Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 247, 118453.

Agar-Ozbek, A. S., Weerheijm, J., Schlangen, E., & Van Breugel, K., 2013, Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. *Construction and Building Materials*, 41, 480-490.

Akand, L., Yang, M., & Gao, Z., 2016, Characterization of pervious concrete through image based micromechanical modeling. *Construction and Building Materials*, 114, 547-555.

AlShareedah, O., & Nassiri, S., 2021, Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125095.

ASTM C 1754/C1754M., 2012, Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete.

ASTM C 618. 2012, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken: ASTM.

ASTM C131. 2012, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.

ASTM C131/C131M-14., 2006, Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM C157/C157M-17., 2020, Standard Test Method For Length Change Of Hardened Hydraulic-Cement Mortar And Concrete.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASTM C1747.**, 2013, Standard test method for determining potential resistance to degradation of pervious concrete by impact and abrasion. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- ASTM C1747/C1747M-13.**, 2013, Standard test method for determining potential resistance to degradation of pervious concrete by impact and abrasion. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C1754.**, 2019, Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete. Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C365/C365M-16.**, 2021, Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores.
- ASTM C618-12.**, 2012, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, US.
- ASTM C666/C666M-15.**, 2015, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C666-97.**, 2017, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
- ASTM Standard C1754/C1754M-12.**, 2012, Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 09.49, ASTM International, West Conshohocken.
- Boving, T. B., Stolt, M. H., Augenstern, J., & Brosnan, B.**, 2008, Potential for localized groundwater contamination in a porous pavement parking lot setting in Rhode Island. *Environmental Geology*, 55(3), 571-582.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bright Singh, S., & Madasamy, M.,** 2022, Investigation of aggregate size effects on properties of basalt and carbon fibre-reinforced pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 23(6), 1305-1328.
- Brown, C., Chu, A., Van Duin, B., & Valeo, C.,** 2009, Characteristics of sediment removal in two types of permeable pavement. *Water Quality Research Journal*, 44(1), 59-70.
- 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.
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P.,** 2017, Relationships between structural, functional, and X-ray microcomputed tomography parameters of pervious concrete for pavement applications. *Transportation Research Record*, 2629(1), 51-62.
- Chen, X., Wang, H., Najm, H., Venkateela, G., & Hencken, J.,** 2019, Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag. *Journal of cleaner production*, 237, 117714.
- Chen, Y., Wang, K., Wang, X., & Zhou, W.,** 2013, Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 42, 97-104.
- Chindaprasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N., & Yuasa, Y.,** 2008, Cement paste characteristics and porous concrete properties. *Construction and Building materials*, 22(5), 894-901.
- Chopra, M., Kakuturu, S., Ballock, C., Spence, J., & Wanielista, M.,** 2010, Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of pervious concrete pavements. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 426-433.
- Chopra, M., Kakuturu, S., Ballock, C., Spence, J., & Wanielista, M.,** 2010, Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of pervious concrete pavements. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 426-433.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ćosić, K., Korat, L., Ducman, V., & Netinger, I., 2015, Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 78, 69-76.
- Ćosić, K., Korat, L., Ducman, V., & Netinger, I., 2015, Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 78, 69-76.
- Coughlin, J. P., Campbell, C. D., & Mays, D. C., 2012, Infiltration and clogging by sand and clay in a pervious concrete pavement system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(1), 68-73.
- Crouch, L. K., Pitt, J., & Hewitt, R., 2007, Aggregate effects on pervious portland cement concrete static modulus of elasticity. *Journal of materials in civil engineering*, 19(7), 561-568.
- Crouch, L. K., Pitt, J., & Hewitt, R., 2007, Aggregate effects on pervious portland cement concrete static modulus of elasticity. *Journal of materials in civil engineering*, 19(7), 561-568.
- da Costa, F. B. P., Haselbach, L. M., & da Silva Filho, L. C. P., 2021, Pervious concrete for desired porosity: Influence of w/c ratio and a rheology-modifying admixture. *Construction and Building Materials*, 268, 121084.
- da Costa, F. B. P., Haselbach, L. M., & da Silva Filho, L. C. P., 2021, Pervious concrete for desired porosity: Influence of w/c ratio and a rheology-modifying admixture. *Construction and Building Materials*, 268, 121084.
- Debnath, B., & Sarkar, P. P., 2021, Quantification of random pore features of porous concrete mixes prepared with brick aggregate: An application of stereology and mathematical morphology. *Construction and Building Materials*, 294, 123594.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Debnath, B., & Sarkar, P. P.**, 2021, Quantification of random pore features of porous concrete mixes prepared with brick aggregate: An application of stereology and mathematical morphology. *Construction and Building Materials*, 294, 123594.
- Deo, O., & Neithalath, N.**, 2011, Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4181-4189.
- Deo, O.**, 2011, Influence of material structure on the structural and environmental properties of pervious concretes (Ph.D. Dissertation), Clarkson University, USA.
- Deo, O., Sumanasooriya, M., & Neithalath, N.**, 2010, Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), 741-751.
- Dong, Q., Wu, H., Huang, B., Shu, X., & Wang, K.**, 2013, Investigation into laboratory abrasion test methods for pervious concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7), 886-892.
- Drake, J., & Bradford, A.**, 2013, Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance. *Water Science and Technology*, 68(9), 1950-1958.
- El-Hassan, H., Kianmehr, P., & Zouaoui, S.**, 2019, Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. *Construction and Building Materials*, 212, 164-175.
- Feng, J., Zong, N., Zhu, P., Liu, H., Yao, L., & Geng, J.**, 2020, The Frost-resisting Durability of High Strength Self-Compacting Pervious Concrete in Deicing Salt Environment. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 35(1), 167-175.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fu, T. C., Yeih, W., Chang, J. J., & Huang, R.,** 2014, The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., & İpek, S.,** 2014, Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*, 73, 19-24.
- Ghafoori, N., & Dutta, S.,** 1995, Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. *Journal of materials in civil engineering*, 7(3), 183-191.
- Golroo, A., & Tighe, S. L.,** 2012, Pervious concrete pavement performance modeling: an empirical approach in cold climates. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(10), 1100-1112.
- Grubeša, I. N., Barišić, I., Ducman, V., & Korat, L.,** 2018, Draining capability of single-sized pervious concrete. *Construction and building materials*, 169, 252-260.
- Gunderson, J.,** 2008, Pervious pavements: New findings about their functionality and performance in cold climates. *Stormwater*, September.
- Guthrie, W. S., DeMille, C. B., & Eggett, D. L.,** 2010, Effects of soil clogging and water saturation on freeze–thaw durability of pervious concrete. *Transportation research record*, 2164(1), 89-97.
- Haselbach, L. M.,** 2010, Potential for clay clogging of pervious concrete under extreme conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(1), 67-69.
- Haselbach, L. M., & Freeman, R. M.,** 2006, Vertical porosity distributions in pervious concrete pavement. *ACI materials journal*, 103(6), 452.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Haselbach, L. M., Valavala, S., & Montes, F.,** 2006, Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of environmental management*, 81(1), 42-49.
- Haselbach, L., Almeida, N., & Ross, M.,** 2020, Performance of Pervious Concrete Exposed to Magnesium Chloride Deicers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6), 04020109.
- Haselbach, L., Poor, C., & Tilson, J.,** 2014, Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 652-657.
- Hein, M. F., Dougherty, M., & Hobbs, T.,** 2013, Cleaning methods for pervious concrete pavements. *International Journal of Construction Education and Research*, 9(2), 102-116.
- Henderson, V., & Tighe, S.,** 2012, Evaluation of pervious concrete pavement performance in cold weather climates. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(3), 197-208.
- Hesami, S., Ahmadi, S., & 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, B., Wu, H., Shu, X., & Burdette, E. G.,** 2010, Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 818-823.
- Huang, B., Wu, H., Shu, X., & Burdette, E. G.,** 2010, Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 818-823.
- Huang, J., Zhang, Y., Sun, Y., Ren, J., Zhao, Z., & Zhang, J.,** 2021, Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 290, 123228.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Huang, J., Zhang, Y., Sun, Y., Ren, J., Zhao, Z., & Zhang, J.**, 2021, Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 290, 123228.
- Huang, W., Cai, X., Li, X., Cui, W., & Wu, K.**, 2020, Influence of Nominal Maximum Aggregate Size and Aggregate Gradation on Pore Characteristics of Porous Asphalt Concrete. *Materials*, 13(6), 1355.
- 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), 426.
- Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M., & Patibandla, V. C.**, 2014, Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. *Construction and building materials*, 50, 524-529.
- Ibrahim, H. A., Goh, Y., Ng, Z. A., Yap, S. P., Mo, K. H., Yuen, C. W., & Abutaha, F.**, 2020, Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. *Construction and Building Materials*, 253, 119251.
- Jain, A. K., & Chouhan, J. S.**, 2011, Effect of shape of aggregate on compressive strength and permeability properties of pervious concrete. *International journal of advanced engineering research and studies*, 1(1), 120-126.
- Kabir, A., Hasan, M., & Miah, K.**, 2012, Predicting 28 days compressive strength of concrete from 7 days test result. *In Proceedings of the International Conference on Advances in Design and Construction of Structures* (pp. 18-22).
- Kayhanian, M., Anderson, D., Harvey, J. T., Jones, D., & Muhunthan, B.**, 2012, Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. *Journal of Environmental management*, 95(1), 114-123.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kevern, J. T.**, 2008, Advancements in pervious concrete technology. Iowa State University. PhD Thesis.
- Kevern, J. T.**, 2015, Evaluating permeability and infiltration requirements for pervious concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(3), 544-553.
- Kevern, J. T., Schaefer, V. R., & Wang, K.**, 2009, Evaluation of pervious concrete workability using gyratory compaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(12), 19.
- Kevern, J. T., Wang, K., & Schaefer, V. R.**, 2010, Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of pervious concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(5), 469-475.
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R.**, 2017, Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 221-233.
- Kuang, X., Ying, G., Ranieri, V., & Sansalone, J.**, 2015, Examination of pervious pavement pore parameters with X-ray tomography. *Journal of Environmental Engineering*, 141(10), 04015021.
- Kuo, W. T., Liu, C. C., & Su, D. S.**, 2013, Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, 37, 328-335.
- Kuosa, J., & Niemeläinen, E.**, 2014, VTT-R-080225-13. Tech. Res. Cent. Finl., 1.
- Lee, J. W., Yang, E., Jang, J., & Yun, T. S.**, 2021, Effect of clogging and cleaning on the permeability of pervious block pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-10.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lee, M. G., Tia, M., Chuang, S. H., Huang, Y., & Chiang, C. L.,** 2014, Pollution and purification study of the pervious concrete pavement material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(8), 04014035.
- Leon Raj, J., & Chockalingam, T.,** 2020, Strength and abrasion characteristics of pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 21(8), 2180-2197.
- Li, D., Wan, J., Ma, Y., Wang, Y., Huang, M., & Chen, Y.,** 2015, Stormwater runoff pollutant loading distributions and their correlation with rainfall and catchment characteristics in a rapidly industrialized city. *PloS one*, 10(3), e0118776.
- Lian, C. Q., Yan, Z. G., & Beecham, S.,** 2011, Modelling pervious concrete under compression loading—a discrete element approach (Vol. 168, pp. 1590-1600). Trans Tech Publications Ltd.
- Lian, C., & Zhuge, Y.,** 2010, Optimum mix design of enhanced permeable concrete—an experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2664-2671.
- Lin, W., Park, D. G., Ryu, S. W., Lee, B. T., & Cho, Y. H.,** 2016, Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. *Construction and Building Materials*, 118, 20-26.
- Liu, H., Luo, G., Wang, L., & Gong, Y,** 2019b, Strength Time–Varying and Freeze–Thaw Durability of Sustainable Pervious Concrete Pavement Material Containing Waste Fly Ash, *Sustainability*, 11(1), 176.
- Liu, H., Luo, G., Wang, L., Wang, W., Li, W., & Gong, Y,** 2019a, Laboratory evaluation of eco-friendly pervious concrete pavement material containing silica fume, *Applied Sciences*, 9(1), 73.
- 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.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lori, A. R., Hassani, A., & Sedghi, R.,** 2019, Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 197, 130-142.
- Lu, G., Liu, P., Wang, Y., Faßbender, S., Wang, D., & Oeser, M,** 2019, Development of a sustainable pervious pavement material using recycled ceramic aggregate and bio-based polyurethane binder, *Journal of Cleaner Production*, 220, 1052-1060.
- Mahboub, K. C., Canler, J., Rathbone, R., Robl, T., & Davis, B.,** 2009, Pervious concrete: Compaction and aggregate gradation. *ACI Materials Journal*, 106(6), 523.
- Malaikiene, J., Kizinievic, O., & Sarkauskas, A.,** 2020, 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(5), 569-582.
- Manahiloh, K. N., Muhunthan, B., Kayhanian, M., & Gebremariam, S. Y.,** 2012, X-ray computed tomography and nondestructive evaluation of clogging in porous concrete field samples. *J. Mater. Civ. Eng*, 24(8), 1103-1109.
- Marcaida, A. K., Nguyen, T. H., & Ahn, J.,** 2018, Investigation of particle-related clogging of sustainable concrete pavements. *Sustainability*, 10(12), 4845.
- Martin III, W. D., Kaye, N. B., & Putman, B. J.,** 2014, Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 59, 78-84.
- Martin III, W. D., Putman, B. J., & Kaye, N. B.,** 2013, Using image analysis to measure the porosity distribution of a porous pavement. *Construction and Building Materials*, 48, 210-217.
- Mata, L. A.,** 2008, Sedimentation of pervious concrete pavement systems.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mata, L. A., & Leming, M. L.,** 2012, Vertical distribution of sediments in pervious concrete pavement systems. *ACI materials Journal*, 109(2), 149.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J.,** 2017, Concrete microstructure, properties and materials.
- Meininger, R. C.,** 1988, No-fines pervious concrete for paving. *Concrete International*, 10(8), 20-27.
- Montes, F., Valavala, S., & Haselbach, L. M.,** 2005, A new test method for porosity measurements of Portland cement pervious concrete. *Journal of ASTM international*, 2(1), 1-13.
- Mulyono, T.,** 2019, Laboratory experiment: pervious concrete for permeable pavement, focus in compressive strength and permeability. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 366, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- Nassiri, S., AlShareedah, O., Rodin, H., & Englund, K.,** 2021, Mechanical and durability characteristics of pervious concrete reinforced with mechanically recycled carbon fiber composite materials. *Materials and Structures*, 54(3), 1-18.
- Neville, A. M.,** 1995, Properties of concrete (Vol. 4, p. 1995). London: Longman.
- Nguyen, D. H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Leleyter, L., & Baraud, F.,** 2013, Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Construction and Building Materials*, 49, 151-160.
- 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.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Öz, H. Ö.**, 2018, Properties of pervious concretes partially incorporating acidic pumice as coarse aggregate. *Construction and building Materials*, 166, 601-609.
- 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.
- Pindado, M. Á., Aguado, A., & Josa, A.**, 1999, Fatigue behavior of polymer-modified porous concretes. *Cement and Concrete Research*, 29(7), 1077-1083.
- Pratt, C. J., Mantle, J. D. G., & Schofield, P. A.**, 1995, UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality. *Water science and technology*, 32(1), 63-69.
- Qin, Y., Pang, X., Tan, K., & Bao, T.**, 2021, Evaluation of pervious concrete performance with pulverized biochar as cement replacement. *Cement and Concrete Composites*, 119, 104022.
- Radlińska, A., Welker, A., Greising, K., Campbell, B., & Littlewood, D.**, 2012, Long-term field performance of pervious concrete pavement. *Advances in Civil Engineering*, 2012.
- Rao, Y., & Yang, T.**, 2021, Three volumetric methods for measuring the vertical porosity distribution of pervious concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-12.
- Rao, Y., Ding, Y., Sarmah, A. K., Liu, D., & Pan, B.**, 2020, Vertical distribution of pore-aggregate-cement paste in statically compacted pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 237, 117605.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rehder, B., Banh, K., & Neithalath, N.,** 2014, Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, 118, 1-16.
- Rezaei Lori, A., Bayat, A., & Azimi, A.,** 2021, Influence of the replacement of fine copper slag aggregate on physical properties and abrasion resistance of pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 22(4), 835-851.
- Rodin III, H., Nassiri, S., AlShareedah, O., Yekkalar, M., & Haselbach, L.,** 2021, Evaluation of skid resistance of pervious concrete slabs under various winter conditions for driver and pedestrian users. *Road Materials and Pavement Design*, 22(6), 1350-1368.
- Saboo, N., Shivhare, S., Kori, K. K., & Chandrappa, A. K.,** 2019, Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. *Construction and Building Materials*, 223, 322-328.
- Sahdeo, S. K., Ransinchung, G. D., Rahul, 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, 119260.
- Sandoval, G. F., Galobardes, I., De Moura, A. C., & Toralles, B. M.,** 2020 Hydraulic behavior variation of pervious concrete due to clogging. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00354.
- Sata, V., Wongs, A., & Chindaprasirt, P.,** 2013, Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 42, 33-39.
- Schaefer, V. R., & Kevern, J. T.,** 2011, An integrated study of pervious concrete mixture design for wearing course applications (No. DTFH61-06-H-00011 Work Plan 10). Iowa State University. National Concrete Pavement Technology Center.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Schaefer, V. R., & Wang, K.,** 2006, Mix design development for pervious concrete in cold weather climates (No. 2006-01). Iowa. Dept. of Transportation. Highway Division.
- Schaefer, V.R., Kevern, J.T., Wang, K.,** 2011, An Integrated Study of Pervious Concrete Mixture Design for Wearing Course Applications. National Concrete Pavement Technology Centre.
- Scholz, M.,** 2013, Water quality improvement performance of geotextiles within permeable pavement systems: A critical review. *Water*, 5(2), 462-479.
- Shan, J., Zhang, Y., Wu, S., Lin, Z., Li, L., & Wu, Q.,** 2022, Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. *Construction and Building Materials*, 327, 126874
- Shen, P., Zheng, H., Liu, S., Lu, J. X., & Poon, C. S.,** 2020, Development of high-strength pervious concrete incorporated with high percentages of waste glass. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103790.
- Sherwani, A. F. H., Faraj, R., Younis, K. H., & Daraei, A.,** 2021, Strength, abrasion resistance and permeability of artificial fly-ash aggregate pervious concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00502.
- Standard of JC446-91.,** 1992, Concrete Pavement Brick China Building Material Industry Office, Beijing, China.
- Sumanasooriya, M. S., & Neithalath, N.,** 2009, Stereology-and Morphology-Based Pore Structure Descriptors of Enhanced Porosity (Pervious) Concretes. *ACI Materials Journal*, 106(5).
- Sumanasooriya, M. S., & Neithalath, N.,** 2011, Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 778-787.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sumanasooriya, M. S., Bentz, D. P., & Neithalath, N.,** 2010, Planar Image-Based Reconstruction of Pervious Concrete Pore Structure and Permeability Prediction. *ACI Materials Journal*, 107(4).
- Sun, Z., Lin, X., & Vollpracht, A.,** 2018, Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers. *Construction and Building Materials*, 189, 797-803.
- Taheri, B. M., Ramezaniapour, A. M., Sabokpa, S., & Gapele, M.,** 2021, Experimental evaluation of freeze-thaw durability of pervious concrete. *Journal of Building Engineering*, 33, 101617.
- Tang, C. W., Cheng, C. K., & Tsai, C. Y.,** 2019, Mix design and mechanical properties of high-performance pervious concrete. *Materials*, 12(16), 2577.
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J.,** 2004, Pervious concrete pavements (No. PCA Serial No. 2828). Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Terhell, S. L., Cai, K., Chiu, D., & Murphy, J.,** 2015, Cost and benefit analysis of permeable pavements in water sustainability. University of California Agriculture and Natural Resources: Davis, CA, USA.
- Thomle, J. N.,** 2010, The declining pH of waters exposed to pervious concrete (Doctoral dissertation, Washington State University).
- Tong, B.,** 2011, Clogging effects of portland cement pervious concrete (Doctoral dissertation).
- 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.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vancura, M. E., MacDonald, K., & Khazanovich, L.,** 2012, Location and depth of pervious concrete clogging material before and after void maintenance with common municipal utility vehicles. *Journal of Transportation Engineering*, 138(3), 332.
- Vieira, G. L., Schiavon, J. Z., Borges, P. M., da Silva, S. R., & de Oliveira Andrade, J. J.,** 2020, Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122665.
- Wang, D., Zhao, Q., Yang, C., Chi, Y., Qi, W., & Teng, Z.,** 2020, Study on frost resistance and vegetation performance of seashell waste pervious concrete in cold area. *Construction and Building Materials*, 265, 120758.
- Wang, H., Li, H., Liang, X., Zhou, H., Xie, N., & Dai, Z.,** 2019, Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio, *Construction and Building Materials*, 202, 387-395pp.
- Wang, T., Jones, D., & Harvey, J. T.,** 2010, A framework for life-cycle cost analyses and environmental life-cycle assessments for fully permeable pavements. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.
- Wang, Z., Zou, D., Liu, T., & Zhou, A.,** 2021, Influence of paste coating thickness on the compressive strength, permeability, and mesostructure of permeable concrete. *Construction and Building Materials*, 299, 123994.
- Xu, G., Shen, W., Huo, X., Yang, Z., Wang, J., Zhang, W., & Ji, X.,** 2018, Investigation on the properties of porous concrete as road base material. *Construction and Building Materials*, 158, 141-148.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- 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, 117326.
- Yang, J., & Jiang, G.,** 2003, Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and concrete research*, 33(3), 381-386.
- 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.
- Yeih, W., Fu, T. C., Chang, J. J., & Huang, R.,** 2015, Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates. *Construction and Building Materials*, 93, 737-745.
- Yong, C. F., McCarthy, D. T., & Deletic, A.,** 2013, Predicting physical clogging of porous and permeable pavements. *Journal of Hydrology*, 481, 48-55.
- Yu, F., Sun, D., Hu, M., & Wang, J.,** 2019a, Study on the pores characteristics and permeability simulation of pervious concrete based on 2D/3D CT images. *Construction and Building Materials*, 200, 687-702.
- Yu, F., Sun, D., Wang, J., & Hu, M.,** 2019b, Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 463-475.
- Zawawi, M. N. A. A., Muthusamy, K., Majeed, A. P. A., Musa, R. M., & Budiea, A. M. A.,** 2020, Mechanical properties of oil palm waste lightweight aggregate concrete with fly ash as fine aggregate replacement. *Journal of Building Engineering*, 27, 100924.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zhang, G., Wang, S., Wang, B., Zhao, Y., Kang, M., & Wang, P.,** 2020, Properties of pervious concrete with steel slag as aggregates and different mineral admixtures as binders. *Construction and Building Materials*, 257, 119543.
- Zhang, J., Ma, G., Ming, R., Cui, X., Li, L., & Xu, H.,** 2018, Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging. *Construction and Building Materials*, 161, 468-478.
- 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, 120614.
- Zhong, R., & Wille, K.,** 2016, Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, 70, 130-138.
- Zhong, R., Leng, Z., & Poon, C. S.,** 2018, Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Construction and Building Materials*, 183, 544-553.
- Zhong, R., Xu, M., Netto, R. V., & Wille, K.,** 2016, Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. *Construction and Building Materials*, 125, 1158-1168.
- Zhou, H., Li, H., Abdelhady, A., Liang, X., Wang, H., & Yang, B.,** 2019, Experimental investigation on the effect of pore characteristics on clogging risk of pervious concrete based on CT scanning. *Construction and Building Materials*, 212, 130-139.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhou, H., Li, H., Abdelhady, A., Liang, X., Wang, H., & Yang, B., 2019, Experimental investigation on the effect of pore characteristics on clogging risk of pervious concrete based on CT scanning. *Construction and Building Materials*, 212, 130-139.

Zhu, H., Wen, C., Wang, Z., & Li, L., 2020, Study on the permeability of recycled aggregate pervious concrete with fibers. *Materials*, 13(2), 321.



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca benden her türlü bilgi ve birikimini esirgemeyen, hem akademik olarak hem de sosyal hayatta ufkumu açan, alçakgönüllülüğü akademik tecrübesiyle harmanlanmış değerli bilim insanı, tez danışmanım Prof. Dr. Şemsi YAZICI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alan ve tecrübeleri ile tezime katkı sunan Prof. Dr. Kambiz RAMYAR ve Prof. Dr. Halit YAZICI'ya teşekkür ederim. BT görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Demet ÖZMEN'e teşekkür ederim.

Eğitim-öğretim hayatım boyunca hep yanımda olan, daha ileriye gidebilmem için beni hep destekleyen pek kıymetli anne ve babama teşekkürü bir borç bilirim.

10/03/2023

Demet YAVUZ

ÖZGEÇMİŞ

Demet YAVUZ lisans öğrenimini 2018 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, yüksek lisans öğrenimini ise 2018 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamlamıştır. 2018 yılından itibaren Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimine devam etmektedir.

