

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEÇİRİMLİ BETON TASARIMI VE ZEMİN
KAPLAMA BLOKLARINDA KULLANIM
OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

Özgür Barış TOPÇU

Nisan, 2019
İZMİR

GEÇİRİMLİ BETON TASARIMI VE ZEMİN KAPLAMA BLOKLARINDA KULLANIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı

Özgür Barış TOPÇU

Nisan, 2019

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÖZGÜR BARIŞ TOPÇU, tarafından PROF. DR. BURAK FELEKOĞLU yönetiminde hazırlanan “GEÇİRİMLİ BETON TASARIMI VE ZEMİN KAPLAMA BLOKLARINDA KULLANIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Burak FELEKOĞLU

Yönetici


Prof. Dr. Hamide KADIRIYAR
Jüri Üyesi


Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL
Jüri Üyesi


Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bilgi, tecrübesi ve yol göstericiliğiyle bilgi ve birikimime her daim katkıda bulunan değerli danışman hocam Prof. Dr. Burak FELEKOĞLU'na çok teşekkür ederim. Çalışmalarımnda kullandığım araçların edinilmesinde bulunduğu katkıdan dolayı Doç. Dr. Kamile Tosun FELEKOĞLU'na çok teşekkür ederim. Aynı zamanda tez kapsamında yaptığım çalışmalara hem manevi hem de fiziksel olarak katkıda bulunan Barış ÇAYLAK'a da teşekkür ederim. Yüksek lisans süresince bana desteklerini esirgemeyen sevgili ailem ve Beril SEVİN'e ayrıca teşekkür ederim.

Özgür Barış TOPÇU

GEÇİRİMLİ BETON TASARIMI VE ZEMİN KAPLAMA BLOKLARINDA KULLANIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Kentlerde geniş çapta kullanılan geçirimsiz kaplamalar, yağış sularını yüzeysel su akışlarına dönüştürerek şehirlerde sellere ve su basmalarının meydana gelmesine neden olmaktadır. Geçirimli beton, içerdiği bağlantılı boşluklar sayesinde yağış sularını bünyesinden drene ederek zemine iletilmesini sağlarlar. Böylece yüzeysel su akışı oluşumunu engellerler. Bu çalışma kapsamında geçirimli beton kaplamaların farklı karışım oranlarında parke taşı şeklinde üretilmiş, mekanik performansları ulusal ve uluslararası parke taşı standartları (pts) açısından değerlendirilmiştir.

Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada ince malzeme içeren (kil-silt) agregası (ima) kullanımının ve agregası/çimento (a/ç) oranının geçirimli betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada karışımda kullanılan akışkanlaştırıcı miktarı artırılarak geçirimli beton numunelerinde tıkanma meydana gelip gelmediği gözlenmiş ve tıkanma yaratmayan uygun a/ç oranı tespit edilmiştir. Üçüncü aşamada ise karışımda çimento-yüksek fırın cürufu ve iri-ince agregası ikamesi yapılarak üretilen geçirimli beton parke taşlarının; mekanik, fiziksel özellikleri ve aşınma dayanıklılığı incelenmiş ve pts'ye uygunluğu tartışılmıştır.

Çalışma sonucunda: ima kullanımının geçirimli betonun basınç ve yarmada çekme dayanımlarını önemli derecede düşürdüğü, karışımda kullanılan a/ç oranının geçirimli betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir. Aynı zamanda geçirimli betonun ıslak durumdaki basınç dayanımının kuru durumdaki basınç dayanımından daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çimento-yüksek fırın cürufu ve iri-ince agregası ikamesinin geçirimli betonun mekanik özelliklerinde gelişme sağladığı ancak ince agregası kullanımının geçirimlilik özelliklerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Çalışma sonunda araç trafiğine ve yaya yüklerine maruz kalacak kaplamalar için karışım oranları önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geçirimli beton, ince malzemeli agregası, ıslak-kuru basınç dayanımı, agregası/çimento oranı, geçirimli beton parke taşı

PERVIOUS CONCRETE DESIGN AND INVESTIGATION OF USAGE IN FLOOR PAVING BLOCKS

ABSTRACT

Impermeable coatings, which are widely used in cities, may cause water accumulation and flooding by converting precipitation water into surface water flows. Thanks to its connected void content, pervious concrete drains the precipitation water from the surface and transfers it to the ground. Thus, it prevents the formation of surface water flow. Within the scope of this study, pervious concrete coatings with different mix proportions were prepared in the form of paving blocks and evaluated in terms of national and international paving block standards (pbs).

The study consists of three stages. First, the effect of aggregates with fines (clay-silt) (awf) and aggregate/cement (a/c) ratio on mechanical and physical properties of pervious concrete were examined. In the second stage, the amount of plasticizer used in the mixture was increased and it was observed that pervious concrete samples were clogged and appropriate a/c ratio without clogging was determined. In the third stage, mechanical, physical properties and abrasion resistance of pervious concrete paving blocks produced by blast furnace slag-cement and coarse-fine aggregate substitution were investigated and the suitability according to pbs was discussed.

In conclusion: it was determined that the use of awf significantly reduced the compressive and tensile strength of the pervious concrete, and the a/c ratio used in the mixture significantly affected the mechanical and physical properties of the pervious concrete. At the same time, it has been determined that the compressive strength of the wet pervious concrete is lower than its compressive strength at dry state. In addition, it was observed that blast furnace slag-cement and coarse-fine aggregate substitution improved the mechanical properties of the pervious concrete, but the use of fine aggregate negatively affected the permeability properties. At the end of thesis, proper mix proportions have been proposed for coatings to be subjected to vehicular traffic and pedestrian loads.

Keywords: Pervious concrete, aggregate with fines, wet-dry compressive strength, aggregate/cement ratio, pervious concrete paving block

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Geçirimli Kaplamalar.....	1
1.2 Geçirimli Beton.....	3
1.3 Geçirimli Beton Uygulamaları.....	6
BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	7
2.1 Geçirimli Beton Karışım Oranları.....	7
2.2 Geçirimli Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler	9
2.2.1 Agregalar.....	9
2.2.2 Bağlayıcı Malzemeler	9
2.2.3 Su	9
2.2.4 Kimyasal Katkılar	10
2.3 Geçirimli Betonun Mekanik ve Fiziksel Özellikleri	10
2.3.1 Basınç Dayanımı	10
2.3.2 Eğilme Dayanımı	13
2.3.3 Yarmada Çekme Dayanımı	14
2.3.4 Boşluk İçeriği ve Birim Hacim Ağırlığı.....	17
2.3.5 Permeabilite (Geçirimsilik)	19
2.4 Geçirimli Beton Dayanıklılık Özellikleri.....	21
2.4.1 Donma-Çözülme Direnci	21
2.4.2 Aşınma Direnci	23
2.5 Geçirimli Beton Akustik Özellikleri	24

2.6 Geçirimli Betonda Tıkanma.....	25
BÖLÜM ÜÇ - GEÇİRİMLİ BETON KAPLAMA TASARIMI, İNŞAASI VE PARKE TAŞI STANDARTLARI	29
3.1 Geçirimli Beton Kaplama Sistemi Tasarımı	29
3.1.1 Yapısal Tasarımı	30
3.1.1.1 Yerel Zemin (Temel) ve Alt Temel	30
3.1.1.2 Geçirimli Beton Dayanım Gerekliliği.....	30
3.1.1.3 Geçirimli Beton Kaplama Kalınlığı	31
3.1.2 Hidrolojik Tasarımı.....	34
3.1.2.1 Depolama Kapasitesi ve Eğim Etkisi.....	35
3.1.2.2 Hidrolojik Tasarım Metotları	37
3.2 Geçirimli Beton Kaplama İnşası	38
3.3 Beton Parke Taşı Standartları.....	39
BÖLÜM DÖRT - DENEYSEL ÇALIŞMALAR, MATERYAL VE METOD... 42	42
4.1 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	42
4.2 Kullanılan Malzemeler.....	43
4.2.1 İnce ve Kaba Agregalar.....	43
4.2.2 Çimento ve Yüksek Fırın Cürufu.....	45
4.2.3 Su ve Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı	46
4.3 Karışım Oranları.....	46
4.4 Beton Karışımlarının ve Numunelerinin Hazırlanması.....	48
4.5 Deney Yöntemleri	50
4.5.1 Basınç ve Yarmada Çekme Deneyleri	50
4.5.2 Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Geçirimsizlik Deneyleri.....	51
4.5.3 Aşınma Deneyi.....	53
BÖLÜM BEŞ - BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	55
5.1 Kuru Birim Hacim Ağırlığı ve Boşluk İçeriği	55
5.2 Basınç Dayanımı	60
5.3 Yarmada Çekme Dayanımı	65

5.4 Geçirimsizlik	67
5.5 Aşınma Direnci	70
5.6 Parke Taşı Standartları Açısından Bulguların Değerlendirilmesi.....	71
BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR.....	74
KAYNAKLAR	76



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Geçirimli kaplama tipleri: a) Izgara tipi beton parke taşları, b) Geçirimli asfalt, c) Geçirimli beton, d) Geçirimli kilit taşı beton kaplamalar	2
Şekil 1.2 Geçirimli kilit beton taşlarının şematik gösterimi	2
Şekil 1.3 Boşluklu kaplamaların (Geçirimli beton ve asfalt) tipik şematik gösterimi	2
Şekil 1.4 Geçirimli beton	4
Şekil 1.5 Geçirimli betonun şematik modeli.....	5
Şekil 1.6 Geçirimli betonun çevresel faydaları	5
Şekil 1.7 Geçirimli betonun otopark alanında ve yaya kaldırımında kullanımı	6
Şekil 2.1 Farklı su içeriklerine sahip taze halde geçirimli beton örnekleri (top haline getirilmiş) a) az su içeriği b) yeter miktarda su içeriği c) fazla miktarda su içeriği.....	10
Şekil 2.2 Silis dumanı kullanımının basınç dayanımına etkisi	11
Şekil 2.3 Çimento pasta kalınlığı-geçirimli beton basınç dayanımı ilişkisi.....	12
Şekil 2.4 Palmiye yağı klinkeri kullanımın geçirimli betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi.....	12
Şekil 2.5 Boşluk oranı ve basınç dayanım arasındaki ilişki.....	13
Şekil 2.6 Geçirimli betonda eğilme dayanımı - basınç dayanımı arasındaki ilişki...	14
Şekil 2.7 Lif kullanımının eğilme dayanımına etkisi	14
Şekil 2.8 Yarmada çekme dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması	15
Şekil 2.9 Lif tipinin çekme dayanımına etkisi	16
Şekil 2.10 Farklı agrega içeren betonların basınç dayanımı – çekme dayanımı korelasyonu	17
Şekil 2.11 Boşluk oranı ve yoğunluk arasındaki ilişki.....	18
Şekil 2.12 Birim hacim ağırlığı ve hava içeriği arasındaki ilişki.....	18
Şekil 2.13 Boşluk içeriği ve geçirimlilik arasındaki ilişki	20
Şekil 2.14 Boşluk oranı ve geçirimlilik arasındaki ilişki	20
Şekil 2.15 300 donma çözülme döngüsü sonucu numunelerin görünüşü a) kontrol numunesi b) atık lastik kullanılmış numune.....	22

Şekil 2.16 Farklı kalınlıklardaki geçirimli betonların akustik absorpsiyon spektrumu	25
Şekil 2.17 Tıkanmaya neden olan malzemelerin tiplerine göre geçirimli betonun farklı bölgelerinde katı parçacıkların birikimi.....	25
Şekil 2.18 Geçirimli beton bakım yöntemleri a) basınçlı su ile yıkama b) vakumlu emme yöntemi	28
Şekil 3.1 Geçirimli beton kaplama şematik kesit gösterimi.....	29
Şekil 3.2 Bordürlü geçirimli kaplama sistemlerinin enine kesiti	36
Şekil 3.3 Eğimli döşemelerde, alt tabanın geçirimlilik değerinin aşılması durumunda oluşan depolama hacmi kaybı.....	37
Şekil 4.1 Geçirimli beton parke taşı karışım oranlarının geliştirme aşamaları	43
Şekil 4.2 İnce malzemenin tane boyut dağılımı	44
Şekil 4.3 İnce agreganın tane boyutu dağılımı.....	44
Şekil 4.4 a) Çimento pastasının tabana çökerek numunelerin tabanını tıkaması b) Tabanı tıkalı numunelerin yandan görünüşü	47
Şekil 4.5 Geçirimli beton üretiminde kullanılan portatif beton mikseri	49
Şekil 4.6 Basınç dayanımı deneyi	50
Şekil 4.7 Yarmada çekme dayanımı deneyi.....	51
Şekil 4.8 Geçirimlilik deneyi düzeneği.....	53
Şekil 4.9 Aşınma deneyi	54
Şekil 5.1 Agreg kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlığına etkisi.....	56
Şekil 5.2 Agreg kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin boşluk içeriğine etkisi	57
Şekil 5.3 İnce malzemeli dolomit kullanılan karışımların agreg ve çimento hamurunda topaklaşmaların meydana gelmesi.....	57
Şekil 5.4 Farklı türde agregalar ile üretilen geçirimli betonların kuru birim hacim ağırlık değerlerinin boşluk oranı ile değişimi.....	58
Şekil 5.5 İnce agreg ikamesinin geçirimli beton numunelerinin boşluk içeriğine etkisi	59
Şekil 5.6 İnce agreg ikamesinin geçirimli beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlık değerlerine etkisi	59

Şekil 5.7 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikameli geçirimli betonların kuru birim hacim ağırlık değerlerinin boşluk oranı ile değişimi	59
Şekil 5.8 Agreganın kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımına etkisi.....	61
Şekil 5.9 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesinin geçirimli beton numunelerinin basınç dayanımına etkisi	63
Şekil 5.10 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikameli geçirimli beton numunelerinin basınç dayanımının kuru birim hacim ağırlık değerleri ile değişimi.....	64
Şekil 5.11 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikameli geçirimli beton numunelerinin basınç dayanımının boşluk içerikleri ile değişimi	65
Şekil 5.12 Agreganın kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin yarmada çekme dayanımına etkisi	66
Şekil 5.13 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesinin geçirimli beton numunelerinin yarmada çekme dayanımına etkisi	67
Şekil 5.14 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikameli karışım numunelerinin basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişki.....	67
Şekil 5.15 Agreganın kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin geçirimliliğine etkisi	68
Şekil 5.16 Farklı türde agregalar ile üretilen geçirimli betonların geçirimlilik değerlerinin boşluk oranı ile değişimi	69
Şekil 5.17 Agreganın kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin geçirimliliğine etkisi	70
Şekil 5.18 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesi ile üretilen geçirimli betonların geçirimlilik değerlerinin boşluk oranı ile değişimi	70
Şekil 5.19 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesi ile üretilen geçirimli betonların kalınlık kaybı değerlerinin ince agrega ikamesi ile değişimi .	71
Şekil 5.20 F2İ0 hariç 3. aşama karışım numunelerinin basınç dayanımı ve geçirimlilik değerlerinin optimizasyonu grafiği	73

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Geçirimli kaplamaların avantaj ve dezavantajları	3
Tablo 2.1 Tipik geçirimli beton karışım oranları	7
Tablo 2.2 Araştırmacılar tarafından kullanılan geçirimli beton karışım oranları	8
Tablo 3.1 Trafik kategorileri	31
Tablo 3.2 Yerel zemin sınıfları ve yaklaşık yatak modülü (k) değerleri.....	32
Tablo 3.3 Farklı yerel zeminlere uygulanan granüle agrega alt temeli için modifiye yatak katsayısı değerleri	32
Tablo 3.4 20 yıl hizmet süresi için tavsiye edilen beton kaplama kalınlığı tablosu, inch	34
Tablo 3.5 Yerel zemin sınıfları ve geçirimsizlik değerleri.....	35
Tablo 3.6 Parke taşı standartlarında istenen dayanım gereklilikleri	41
Tablo 4.1 Tez çalışmasında kullanılan agregaların özellikleri.....	44
Tablo 4.2 CEM I 42.5R çimento ve öğütölmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	45
Tablo 4.3 AdvaFlow 135N ticari isimli süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri ..	46
Tablo 4.4 Çalışmanın ilk aşamasında üretilen geçirimli beton karışım oranları.....	46
Tablo 4.5 Çalışmanın ikinci aşamasında üretilen geçirimli beton karışım oranları...	47
Tablo 4.6 Çalışmanın üçüncü aşamasında üretilen geçirimli beton karışım oranları	48
Tablo 5.1 Geçirimli beton parke taşlarının mekanik ve fiziksel özellikleri.....	55
Tablo 5.2 Karışım numunelerinden elde edilen verilerin standartlarda istenen minimum değerler ile karşılaştırılması	73

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Geçirimli Kaplamalar

Kentleşmenin etkisiyle kullanımı gittikçe artan geçirimsiz kaplamalar yağış sularını yüzeysel su akışlarına dönüştürerek, kentlerde sellerin ve su basmalarının meydana gelmesine neden olmaktadır. Geçirimli kaplamalar yağış sularının yüzeysel su akışlarına dönüşmesini engelleyerek bu duruma engel olurlar. Aynı zamanda filtre görevi görerek yüzeysel su akışlarına karışan tortular, besin artıkları, ağır kirletici metalleri sudan temizleyerek, yağmur sularının yeraltı depolama sahalarına ve zemine drene edilmesini sağlarlar. Bundan dolayı geçirimsiz kaplamalara alternatif teşkil ederler. Kentleşmenin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla Amerika Birleşik Devletleri'nde yerel yönetimler yağmur suyu yönetimi için geçirimli kaplama kullanımını teşvik eden düzenlemeler oluşturmuşlardır. Bundan dolayı geçirimli kaplama kullanımı gittikçe artmaktadır (Bean, Hunt ve Bidelsbach, 2007).

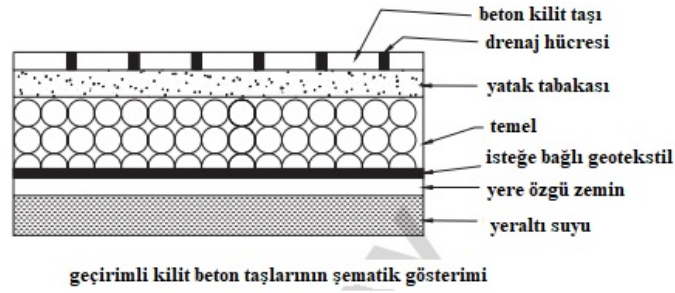
Genel olarak kullanımda olan geçirimli kaplama tipleri aşağıda sıralanmıştır (Şekil 1.1):

1. Geçirimli kilit taşı beton kaplamalar
2. Geçirimli beton
3. Geçirimli asfalt
4. Izgara tipi beton parke taşları

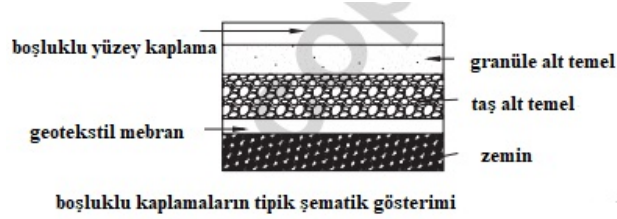
Izgara tipi beton parke taşları, bloklar arasındaki boşluklara doldurulmuş çakıl, kum gibi malzemelerden suyu drene edebilir. Geçirimli kilit taşı beton bloklar yerleştirildiklerinde kenarlarında meydana gelen boşluklara doldurulmuş tek boyutlu kumlardan suyu drene edebilir. Geçirimli beton ve asfalt ise boşluklu yapısından dolayı suyu bünyesinden geçirerek drene edebilir. Şematik gösterimlerde görüldüğü üzere geçirimli kaplamaların yapısında büyük farklar bulunmamakta olup, üstte yüzeyi kaplayan tabaka, altında suyu depolayan rezervuar katmanı ve onun da altında bir filtre tabakasından oluşmaktadır (Scholz ve Grabowiecki, 2007) (Şekil 1.2; Şekil 1.3).



Şekil 1.1 Geçirimli kaplama tipleri: a) Izgara tipi beton parke taşları, b) Geçirimli asfalt, c) Geçirimli beton, d) Geçirimli kilit taşı beton kaplamalar (Tennessee Department of Environment and Conservation [TDEC], 2014)



Şekil 1.2 Geçirimli kilit beton taşlarının şematik gösterimi (Scholz ve Grabowiecki, 2007)



Şekil 1.3 Boşluklu kaplamaların (Geçirimli beton ve asfalt) tipik şematik gösterimi (Scholz ve Grabowiecki, 2007)

Yapılarında büyük farklar olmamasına karşın her malzemede olduğu gibi geçirimli kaplamaların da kendi içerisinde avantaj ve dezavantajları bulunmakta olup Tablo 1.1’de gösterilmiştir. Günümüzde artan çevresel hassasiyetler ve bu hassasiyetlere getirilen çözümler gittikçe önem kazanmaktadır. Ülkemizde de sık sık

meydana gelen aşırı yağışlar sonucu kent içinde oluşan göllenmeler, taşkınlar, seller farklı çözüm yollarının geliştirilmesine duyulan ihtiyacı arttırmıştır. Oluşan bu ihtiyaç sonucu Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve Türkiye Hazır Beton Birliği ortak çalışmasıyla geçirimli kaplama türlerinden biri olan geçirimli beton için 2018 yılı içinde uygulama kılavuzu çıkarılmıştır.

Tablo 1.1 Geçirimli kaplamaların avantaj ve dezavantajları (TDEC, 2014)

Geçirimli kaplama türü	Avantajı	Dezavantajı	Kullanım ömrü
Geçirimli beton	Yapısal olarak en sağlam, geçirimli kaplamadır. Park alanları ve konut sokaklarına ek olarak yol şeritleri ve daha büyük araçlar için kullanımda uygundur. Düzenli bakım maliyetleri geçirimli kilit taşı beton kaplamalara göre daha düşüktür.	Karıştırma ve imalat işleri tekniğine uygun yapılmalıdır. Yoksa geçirimlilik özelliklerinde bozulmalar meydana gelebilir. Başlangıç geçirimlilik değerlerinde meydana gelen kayıpları restore etmek zordur. Bundan dolayı yeniden yapılması gerekebilir.	20-30 yıl
Geçirimli asfalt	Geniş alanlara sahip yüzeylerde uygulaması geçirimli betonlara göre çok daha ucuzdur.	Geçirimli betonlara göre daha düşük dayanıma ve daha az kullanma süresine sahiptirler. Karıştırma ve imalat işleri tekniğine uygun yapılmalıdır. Yoksa geçirimlilik özelliklerinde bozulmalar meydana gelebilir.	15-20 yıl
Geçirimli kilit taşı beton kaplamalar	Meydan, bahçeler, küçük park alanları ve konut sokakları için çok uygundur. Geçirimli beton ve asfaltla karşılaştırıldığında tıkanma sonrası değiştirme maliyetleri daha düşüktür.	En yüksek başlangıç yapım maliyetine sahip olması ve drenajı sağlayan çakılların bakımının/yenilenmesinin sürekli yapılması gerektiğinden geçirimli beton ve asfaltla göre daha pahalıdır.	20-30 yıl
Izgara tipi beton bloklar	Geçirimli kilit taşı beton kaplamalara göre biraz daha ucuzdur.	Uygulama yapıldığı alanlarda farklı oturma problemleri yaratabilir. Boşluk bölgesi zamanla bitki ve toprak birikiminden dolayı tıkanabilmektedir.	-

1.2 Geçirimli Beton

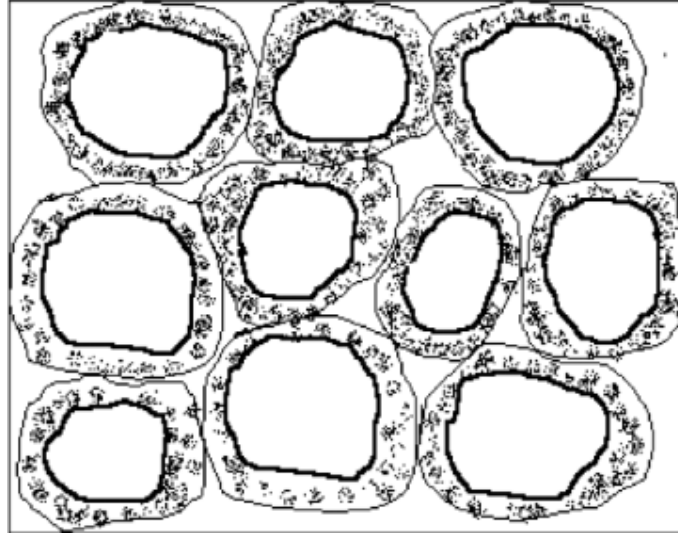
Geçirimli beton terimi tipik olarak; Portland çimentosu, kaba agrega, kimyasal katkı, su ve az miktarda ya da hiç ince agrega kullanılmadan oluşturulan neredeyse sıfıra yakın çökme gösteren boşluklu yapıya sahip beton olarak tanımlanabilir (Şekil 1.4). Bu malzemelerin kombinasyonu sonucu birbirleriyle bağlantılı boşluklara sahip

ve bu boşluklardan suyun kolayca geçebildiği bir ürün oluşturulur (Şekil 1.5) (American Concrete Institute [ACI] 522R-10, 2010).



Şekil 1.4 Geçirimli beton (Obla, 2010)

Kentsel gelişmişliğin arttığı bölgelerde yağış sularının zemine drene edilememesi, su kirliliğine ve yeraltı su kaynaklarında azalmaya yol açmaktadır. Kentleşmenin artması (çevre düzeni, yollar, park alanları, çatı alanlardaki artış); yağış sularının daha fazla oranda yüzeyde birikmesine, bu durum da sel ve erozyonlara neden olmaktadır. Doğru tasarlanmış geçirimli beton yağışın akışa dönüş oranını azaltmada başarılı bir malzemedir. Aynı zamanda: geçirimli betonun içerdiği boşluklar sayesinde araç tekerlerinden kaynaklanan gürültüyü emebilmesi, ağır kirletici metalleri bünyesinde tutarak drene edilen suyun kalitesini arttırması (filtreleyici), bünyesindeki boşlukların sıcaklığı hapsedebilmesi sayesinde şehirlerde oluşan kentsel ısı adası etkisini elimine edebilmesi en önemli avantajlarından (Yang ve Jiang, 2003; Welker, Jenkins, McCarty ve Nemirovsky, 2013; Xie, Akin ve Shi, 2019) (Şekil 1.6).



Şekil 1.5 Geçirimli betonun şematik modeli (Yang ve Jiang, 2003)

Geçirimli beton yüzeyler kentleşmenin bu olumsuz etkisini yüzeysel su akışlarını azaltarak etkisizleştirmekte ve drenajla beraber su kaynaklarını korumaktadırlar. Buna ek olarak geçirimli betonlar, boşluklu bir yapıya sahip olmasıyla saklama alanı olarak da görev alarak yağmur suyunun filtrasyon sürecini, boşluklarındaki aerobik bakterilerin zararlı kirleticiler ve kimyasalların yıkanmasına yardımcı olmasıyla, sağlayarak temiz suyun toprağa iletilmesini sağlayabilirler (Tennis, Leming ve Akers, 2004).



Şekil 1.6 Geçirimli betonun çevresel faydaları (Xie ve diğer., 2019)

1.3 Geçirimli Beton Uygulamaları

Geçirimli betonun yüksek oranda içerdiği boşluklardan 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 Birleşik Devletler Çevre Koruma Dairesi tarafından en iyi “yağmur suyu yönetim çözümlerinden biri” olarak tanımlanmış ve yerleşim yoğunluğu düşük bölgelerde uygulama yükümlülüğü getirilmiştir (Tennis ve diğer., 2004). Geçirimli betonun daha yaygın olarak kullanıldığı alanlar aşağıda sıralanmıştır (ACI 522R-10, 2010) (Şekil 1.7) :

- Kaldırımlar ve yollar,
- Otoparklar,
- Yaya geçitleri,
- Tenis kortları,
- Bahçe avluları,
- Yüzme havuzu kenarları,
- Geçirimli temel uygulamaları,
- Sera altı döşemeleri ve
- Peyzaj düzenlemeleri.



Şekil 1.7 Geçirimli betonun otopark alanında ve yaya kaldırımında kullanımı (Tennis ve diğer., 2004)

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Geçirimli Beton Karışım Oranları

Geçirimli betonda geçirimsizlik özelliğinin sağlanması için karışım tasarımının beton bünyesinde birbirleriyle bağlantılı boşluk oluşumuna izin vermesi gerekmektedir. Bundan dolayı geçirimsiz betonun karışım oranları geleneksel betondan farklılık göstermektedir. Geçirimli betonun mekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametreler: agrega/çimento ve su/çimento oranıdır. Agrega/çimento oranının geçirimsiz betonun mekanik özellikleri üzerine etkisi daha barizdir (ACI, 2010). Geçirimli beton için çeşitli karışım tasarım metotları önerilmiştir. Bunlardan en çok kullanılanı “mutlak hacim” yöntemidir (ACI 522R-10, 2010). Bundan başka araştırmacılar tarafından önerilen “artık çimento hamuru” teorisine (excess paste theory) dayanan karışım tasarım metodu da bulunmaktadır (Nguyen, Sebaibi, Boutouil, Leleyter ve Baurd, 2014). Geçirimli beton için önerilen tipik karışım oranları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Tipik geçirimsiz beton karışım oranları (ACI, 2010)

Malzemeler	ACI 522R’ye göre
Bağlayıcı malzeme (kg/m ³)	270-415
Agrega (kg/m ³)	1190-1480
Agrega/çimento oranı (ağırlıkça)	4:1-5,5:1
Su/çimento oranı (ağırlıkça)	0,27-0,34

Geçirimli betonun dünya çapında kabul edilen tek bir karışım tasarımı metodu bulunmaması ve farklı performans isteklerinden ötürü araştırmacılar tarafından kullanılan karışım oranları büyük farklılıklar göstermektedir. Tablo 2.2’de farklı araştırmacılar tarafından kullanılan karışım oranları gösterilmiştir. Açıkça görüldüğü üzere araştırmacılar tarafından büyük bir aralıkta değişen (3,15:1-12:1) agrega/çimento ve su/bağlayıcı malzeme oranlarına (0,24-0,418) sahip karışım

tasarımları kullanılmıştır. Bu farklılık geçirimli betonda kullanılan agregaların boyut ve gradasyon farkından kaynaklanmış olabilir. Geleneksel betonla karşılaştırıldığında su/çimento oranının düşük olduğu da görülmektedir. En önemli husus karışımda kullanılan suyun agrega etrafında yeterli miktarda çimento pasta kalınlığını sağlamasıdır (Chandrappa ve Biligiri, 2016).

Tablo 2.2 Araştırmacılar tarafından kullanılan geçirimli beton karışım oranları (Chandrappa ve Biligiri, 2016)

Agrega (kg/m ³)	Bağlayıcı malzeme (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Agrega/çimento oranı	Su/bağlayıcı malzeme oranı	Araştırmacı
1651,2	412,83	153,57	4:1	0,372	(Ghaffori ve Dutta, 1995)
1692	376	143,25	4,5:1	0,381	
1740	348	135,72	5:1	0,390	
1800	300	125,4	6:1	0,418	
1541,93	344,69	105,01	4,47:1	0,3	(Crouch ve diğer., 2007)
1620,24	287,15	87,21	5,64:1	0,3	
1820	180	50	10:1	0,28	(Kevern ve diğer., 2009)
1700	260	70	6,5:1	0,27	
1620	310	80	5,2:1	0,26	
1580	330	90	4,78:1	0,27	
1550	360	100	4,3:1	0,28	
1510	380	100	3,97:1	0,26	
1600	340	80	4,70:1	0,24	
1570	330	100	4,75:1	0,30	
1560	330	100	4,72:1	0,30	
1440,8	320,2	112,1	4,5:1	0,35	(Huang ve diğer., 2010)
1486,9	330,4	115,6	4,5:1	0,35	
1586,9	352,6	123,4	4,5:1	0,35	
1559	312	103	5:1	0,33	(Neithalath ve diğer., 2010)
1568	314	104	5:1	0,33	
1558	312	103	5:1	0,33	
1524	305	101	5:1	0,33	
1546	309	102	5:1	0,33	
1544	309	102	5:1	0,33	
1560	367	110,1	4,25:1	0,30	(Lim ve diğer., 2013)
1560	242	72,96	6,44:1	0,30	
1560	367	73,4	4,25:1	0,30	
1560	367	110,1	4,25:1	0,30	
1560	430	110,1	3,62:1	0,30	
1560	495	148,5	3,15:1	0,30	
1600	200	70	8:1	0,35	(İbrahim ve diğer., 2014)
1800	150	52,85	12:1	0,35	

2.2 Geçirimli Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler

2.2.1 Agregalar

Geçirimli beton yapımında kullanılan agrega kalitesi geleneksel betonda kullanılan agregada olduğu gibi önemlidir. Yassı ve uzun agregalardan kaçınılmalıdır. İnce agregalar birbirleriyle bağlantılı boşluklu yapı istenmesinden dolayı ya az miktarda kullanılmakta ya da hiç kullanılmamaktadır. Kaba agrega tane boyut dağılımı ise genellikle dar bir alanda tutulmaktadır. Kaba agrega büyüklükleri genellikle 9,5 mm ile 19 mm arasında değişse de çeşitli araştırmalarda daha küçük ve büyük agregalar da kullanılmaktadır (ACI 522R-10, 2010). Agregalar ASTM D 448 ve TS 706 EN 12620 standartlarına uygun olarak seçilmelidir.

2.2.2 Bağlayıcı Malzemeler

Geleneksel betonda olduğu gibi; Portland çimentosu ana bağlayıcı malzeme olarak kullanılır. Tamamlayıcı bağlayıcı malzemeler olarak uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, silis dumanı Portland çimentosuna ilave ederek kullanılabilir. Ancak bu malzemelerin hangi miktarlarda ilave edileceğine; geçirimli betonun boşluk yapısı, dayanımı, geçirimliliği ve hidrasyona başlama süresi gibi özellikleri üzerinde ne gibi etkileri olduğunun önceden test edilerek doğrulanmasıyla karar verilmesi doğru olacaktır.

2.2.3 Su

Kullanılacak suyun kalitesi geleneksel betonda olduğu üzere içilebilir kalitede olmalıdır (ACI 301). Göreceli olarak daha düşük su/çimento oranı (0,26-0,40) kullanılmalıdır çünkü fazla miktardaki su gözenekli sistemdeki boşlukların çimento hamuru ile tıkanmasına yol açacaktır fakat az miktarda su kullanılması da kıvamı etkileyeceğinden sıkıştırma problemlerine yol açabilecektir (ACI 522R-10, 2010). Geleneksel beton için geçerli olan su/çimento oranıyla basınç dayanımı ilişkisi geçirimli beton için geçerli değildir. Yüksek oranda su/çimento oranı agregalardan çimento pastasının akmasına neden olarak boşlukları doldurabilir, düşük su/çimento oranı ise agregalar arası adhezyon azalmasına yol açabilir (Tennis ve diğer., 2004; ACI 522R-10, 2010). Tennis ve diğer., (2004) doğru miktarda su içeriğinin, taze

haldeki geçirimli betonun agregaları arasından çimento pastasının akarak boşluk sistemine zarar vermeyecek ve avuca alındığında taze haldeki betonun top şekline getirebilecek miktarda olduğunu belirtmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Farklı su içeriklerine sahip taze halde geçirimli beton örnekleri (top haline getirilmiş) a) az su içeriği b) yeter miktarda su içeriği c) fazla miktarda su içeriği (Tennis ve diğer., 2004)

2.2.4 Kimyasal Katkılar

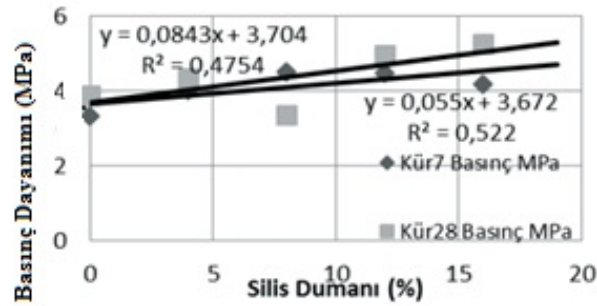
Geleneksel betonda kullanıldığı üzere geçirimli betonda da bazı özel iyileştirmeler yapmak için kimyasal katkıları kullanılabilmektedir. Geçirimli betonun hızlı priz almasından dolayı özellikle sıcak havalarda priz geciktirici katkıları kullanılırlar. Soğuk havalarda ise priz hızlandırıcı katkıları (ASTM C494) kullanılabılır. Geçirimli betonun donma çözülme direncini arttırmaya yönelik hava sürükleyici katkıları (ASTM C260) kullanılabılır. Ancak birden çok sayıda kimyasal katkının beton karışımına eklenmesinden önce, bu kimyasalların karışımının betonun üzerindeki etkilerini deneme karışımları üzerinde test edilerek doğrulanması, istenen taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin sürekli bir şekilde sağlandığından emin olunması gerekmektedir.

2.3 Geçirimli Betonun Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

2.3.1 Basınç Dayanımı

Geçirimli betonun yüksek oranda boşluk içermesinden ötürü genel olarak basınç dayanımı değeri düşüktür ve basınç dayanımı 3,5 MPa ile 28 MPa aralığında değişir (Tennis ve diğer., 2004). Ancak bu düşük değerler beton karışımına bazı katkı maddeleri eklenerek yükseltilebilir. Yang ve Jiang (2003) silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı kullanarak geçirimlilik değeri büyük bir kayıpla beraber basınç dayanımının 50 MPa'a kadar arttırılabileceğini bildirmiştir. Kim, Gaddafi ve Yoshitake

(2016) uçucu kül kullanımının geçirimli betonun erken yaşlarında basınç dayanımını düşürdüğünü, ticari isimleri green-net ve ferro-green olan liflerin kullanılmasıyla basınç dayanımında artış meydana geldiğini bildirmiştir. Lian ve Zhuge (2010), aynı tane boyutu aralığında ve farklı türde kaba agregalar kullanarak yaptığı çalışmada agrega türünün de geçirimli betonun dayanım değerlerini etkilediğini bildirmiştir. Karpuz, Aydın ve Tanrıverdi (2015) yaptığı çalışmada kaba agrega, su ve toplam bağlayıcı malzeme miktarını sabit tutup, çimento miktarının ağırlıkça %4-8-12-16'sı kadar silis dumanıyla yer değiştirerek ürettiği numunelerin basınç dayanım değerlerindeki değişimi Şekil 2.2'de görüldüğü gibi belirlemiştir.

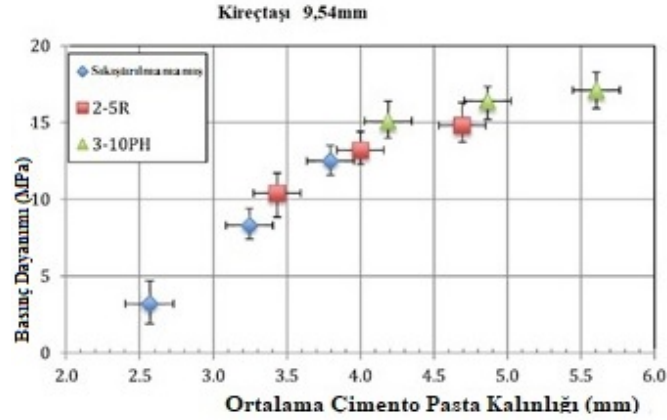


Şekil 2.2 Silis Dumanı kullanımının basınç dayanımına etkisi (Karpuz ve diğer., 2015)

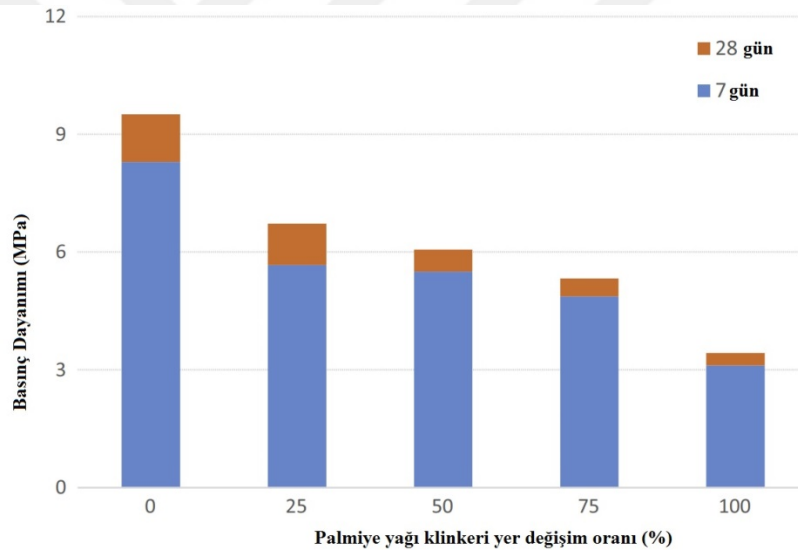
Torres, Hu ve Ramos (2015) geçirimli beton karışımında kullanılan agrega tane büyüklüğünü, çimento içeriği ve karışıma uygulanan sıkıştırma derecesinin geçirimli betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Ürettikleri numuneler üzerinde; ortalama çimento pasta kalınlığı ve geçirimli betonun mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak için analizler yapmışlardır. Bu analizler sonucunda çimento içeriğinin çimento pasta kalınlığı üzerinde etkili olduğu, betonun basınç dayanımının çimento pasta kalınlığı arttıkça arttığı rapor edilmiştir (Şekil 2.3). Şekil 2.3'te mavi noktalar sıkıştırılmamış numuneleri, kırmızı noktalar orta derecede sıkıştırılmış numuneleri ve yeşil noktalar ise yüksek derecede sıkıştırılmış numuneleri göstermektedir. Görüldüğü gibi numunelerin sıkıştırma derecesi arttıkça basınç dayanımı gelişmektedir.

İbrahim ve Razak (2016) geçirimli betonda kaba agrega olarak granit ve palmye yağı klinkerini birlikte kullandığı çalışmasında, karışımda palmye yağı klinkeri içeriğinin artmasının 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde azalmaya yol

açtığını bunun da kırılmanın daha çok palmiye yağı klinkerinde meydana gelmesinden kaynaklandığını bildirmiştir (Şekil 2.4).



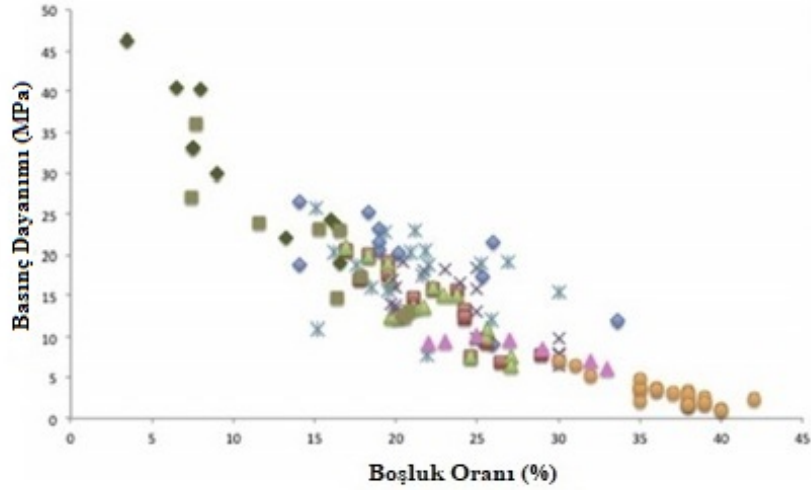
Şekil 2.3 Çimento pasta kalınlığı-geçirimli beton basınç dayanımı ilişkisi (Torres ve diğer., 2015)



Şekil 2.4 Palmiye yağı klinkeri kullanımının geçirimli betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi (İbrahim ve Razak, 2016)

Geçirimli betonun basınç dayanımı ile boşluk oranı arasındaki ilişki ters orantılıdır. Wang, Schaefer, Kevern ve Suleiman (2006) kaba agregası olarak kireçtaşı ve nehir çakılını kullandığı numuneler üzerinde yaptığı deneylerde boşluk içeriği artışının basınç dayanımında azalmaya yol açtığını bildirmişlerdir. Meininger (1988) iki farklı büyüklüğe sahip kaba agregası kullanarak, sıkıştırma enerjisi ve agregası tane boyutunu değiştirerek yaptığı deneylerde basınç dayanımı ve boşluk oranı arasında aynı ilişkiyi tespit etmiştir. Kia, Wong ve Cheeseman (2017) çok sayıda çalışmadan

topladığı verileri kullanarak oluşturduğu grafikte boşluk oranı ve basınç dayanımı arasında güçlü bir bağlantının olduğunu göstermiş ve ortalama olarak boşluk içeriğindeki %1 artışın dayanımda %3'lük kayba yol açtığını belirtmiştir (Şekil 2.5).



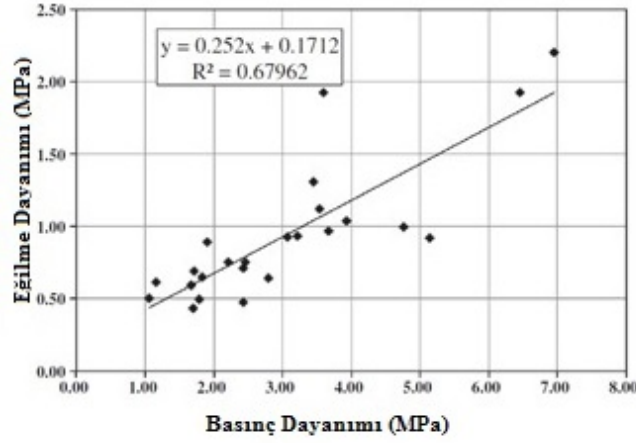
Şekil 2.5 Boşluk oranı ve basınç dayanım arasındaki ilişki (Kia ve diğer., 2017)

Wang ve diğer. (2006) geçirimli beton karışımında kullanılan agrega büyüklüğünün geçirimli betonun mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, karışımında kullanılan agrega büyüklüğündeki artışın geçirimli betonun basınç dayanımında azalışa neden olduğunu bildirmiştir. Bu durumun tane büyüklüğü fazla olan agregayla, çimento pastası arasında oluşan zayıf geçiş bölgesinden kaynaklandığı rapor edilmiştir.

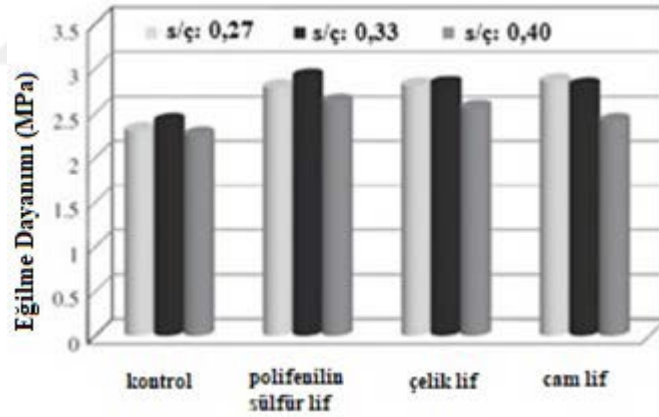
2.3.2 Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımını özellikle etkileyen parametreler; sıkıştırma enerjisi, boşluk oranı ve agrega/çimento oranıdır (Yang ve Jiang, 2003). Meininger (1988) kırış numuneleri üzerinde gerçekleştirilen seri testlere dayanan araştırmasında, geçirimli betonun boşluk içeriğinde artışın, eğilme dayanımında azalmaya yol açtığını bildirmiştir. İbrahim, Mahmoud, Yamin ve Patibandla (2014) 24 farklı karışım kullanarak hazırladığı geçirimli beton numuneleri üzerinde yaptığı çalışma sonucu, basınç dayanımının artmasıyla birlikte eğilme ve çekme dayanım değerlerinin arttığını bildirmiştir (Şekil 2.6). Eğilme dayanımını katkı kullanarak (kimyasal veya mineral) modifiye etmek mümkündür. Yang ve Jiang (2003) yaptığı çalışmada

karışıma silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı ekleyerek 6 MPa eğilme dayanımı elde etmişlerdir. Hesami, Ahmadi, Nematzadeh (2014) geçirimli betonda lif kullanımının, betonun basınç ve çekme dayanımında yarattığı etkiye benzer olarak eğilme dayanımını da arttırdığını bildirmişlerdir (Şekil 2.7).



Şekil 2.6 Geçirimli betonda eğilme dayanımı- basınç dayanımı arasındaki ilişki (İbrahim ve diğer., 2014)

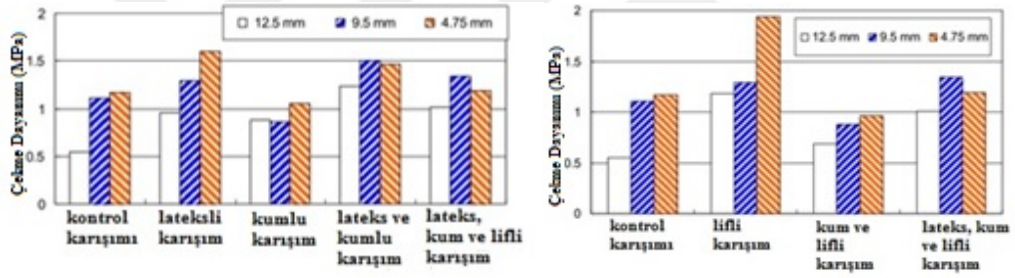


Şekil 2.7 Lif kullanımının eğilme dayanımına etkisi (Hesami ve diğer., 2014)

2.3.3 Yarmada Çekme Dayanımı

Shehata, Sucic, Dolatabadi ve Alaica (2010) yaptığı yarmada çekme deneylerinde yarıлма düzleminin agrega yerine çimento pastası boyunca meydana geldiğini gözlemlemiştir. Çekme dayanımı testlerinde de volastonit ve polipropilen lif kullanımının çimento pastası dayanımını arttırdığını bildirmişlerdir. Huang, Wu, Shu ve Burdette (2010) lateks, lif, ince malzeme modifikasyonunun geçirimli betonun

mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde etkisini incelediği çalışmasında, daha küçük agrega boyutuna sahip beton karışımlarının yarmada çekme dayanımının daha yüksek seviyede olduğunu, ince agrega kullanılan karışımların basınç dayanımlarının iyileştiğini ancak bu iyileşmenin çekme dayanımlarında görülmediğini rapor etmiştir. Lateks kullanımının çekme dayanımını önemli oranda arttırdığını bunun ise çimento hidratasyon ürünleri ile lateksin birbirinin içine işlemesi sırasında oluşan lateks ağı sayesinde olduğunu bildirmiştir. Lif kullanılan karışımlardan alınan sonuçlardan da lif kullanımının yarmada çekme dayanımında önemli oranda artış sağladığı rapor edilmiştir (Şekil 2.8). Rodin, Rangelov, Nassiri ve Englund (2018) karbon lif kullanımının (hacimce %3, 4, 5 oranlarında) geçirimli betonun çekme dayanımını arttırdığını, bu artışın 7 günlük numuneler için %44 ile %65 arasında, 28 günlük numuneler için %57 ile %85 arasında olduğunu, hacimce %3 ve %4 karbon lif kullanılan numunelerin en yüksek çekme dayanımını verdiğini bildirmiştir.



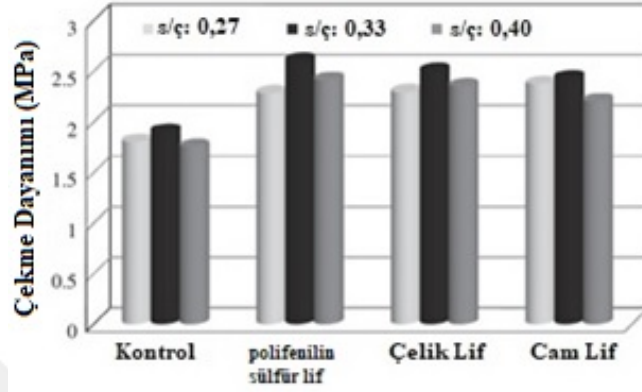
a) Lateks ve ince malzeme kullanımının etkisi

b) Lif kullanımının etkisi

Şekil 2.8 Yarmada çekme dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması (Huang ve diğer., 2010)

Torres ve diğer. (2015) çimento pasta kalınlığının artmasının geçirimli betonun basınç dayanımında olduğu üzere çekme dayanımını da arttırdığını, daha küçük boyutlu agregalardan oluşan karışımlarda daha iri agrega kullanılan karışımlara göre nispeten daha iyi dayanım değerleri elde edildiğini, bu sonucun ise daha önceki çalışmalarla benzer olduğunu bildirmiştir. Hesami ve diğer. (2014) farklı lif tipleri (çelik, cam lifi ve polifenilin sülfür) ve farklı oranlarda pirinç kabuğu külü (mineral katkı) kullanımının geçirimli betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmada; lif kullanımının betonun çekme dayanımında gelişme sağladığını, kullanılan farklı lif tipleri arasında polifenilin sülfürün çekme dayanımına etkisinin cam ve çelik life göre çok daha iyi olduğunu, bunun ise

polifenilin sülfürün çimento matrisine daha iyi kenetlenmesinden kaynaklandığını rapor etmiştir (Şekil 2.9). Pirinç çeltik külü ve liflerin beraber kullanımında ise çeltik külünün çimento pastasını güçlendirmesinden kaynaklı olarak kullanılmadığı duruma kıyasla daha iyi çekme dayanımı değerleri elde edildiği bildirilmiştir.



Şekil 2.9 Lif tipinin çekme dayanımına etkisi (Hesami ve diğer., 2014)

Geadicke, Torres, Huynh ve Marines (2016) geçirimli betonun basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi analiz etmek amacıyla, üç farklı agregası (çakıl taşı, kireç taşı ve geri dönüştürülmüş beton agregası) içeren, farklı karışım içeriklerine sahip karot ve döküm numuneleri üzerinde incelemeler yapmıştır. Bu incelemeler sonucunda agregası tipinden bağımsız olarak tüm betonlar için aşağıdaki denklem önerilmiştir (Şekil 2.10).

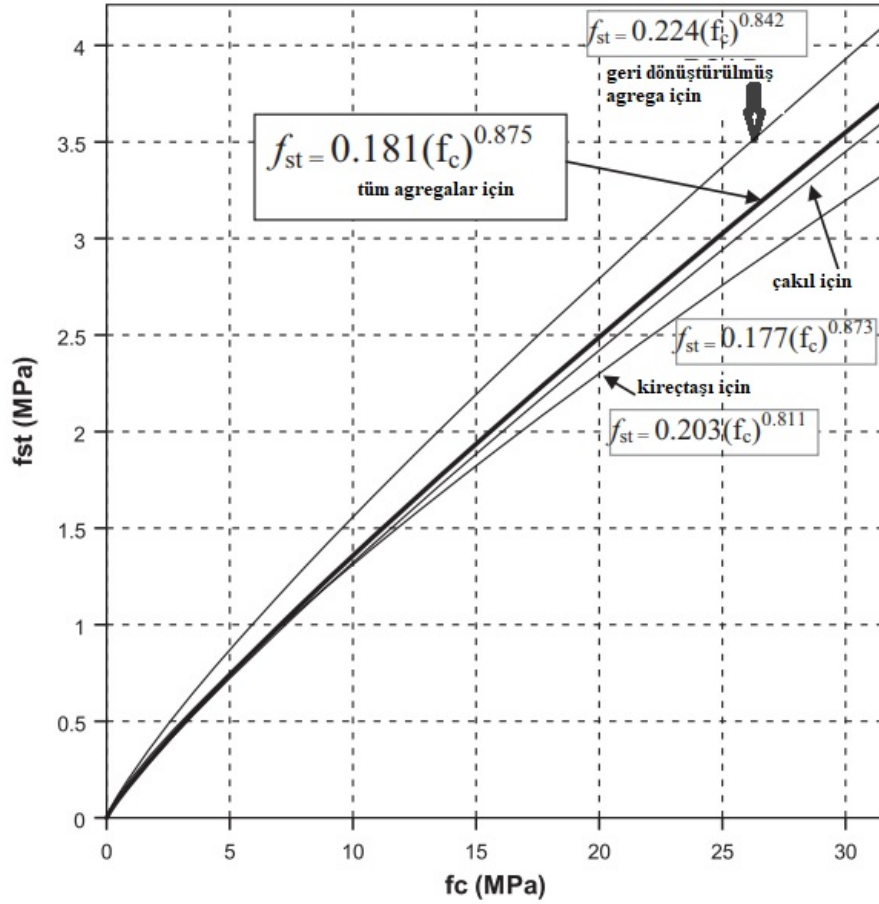
$$F_{st} = 0,181(F_c)^{0,875} \quad (2.1)$$

F_{st} = yarmada çekme dayanımı (MPa)

F_c = basınç dayanımı (MPa)

Aynı çalışmada kullanılan agregası tipinin basınç dayanımı ve çekme dayanımı arasındaki korelasyon üzerinde etkili olduğu, özellikle geri dönüştürülmüş agregalardan oluşan karışımların verilen belirli basınç dayanım değerinde daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu bildirilmiştir. Gesoğlu, Güneyisi, Khoshnaw ve İpek (2014a) agregası ile hacimce 4 farklı oranda (%0, %5, %10, %15) yer değiştirerek ve 3 farklı parçacık büyüklüğüne (çok ince, ince, ve kaba) sahip atık lastik kullanımının geçirimli betonun mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırdığı

çalışmasında; atık lastik kullanımının genel olarak basınç ve çekme dayanımında azalmaya yol açtığını rapor etmiştir.

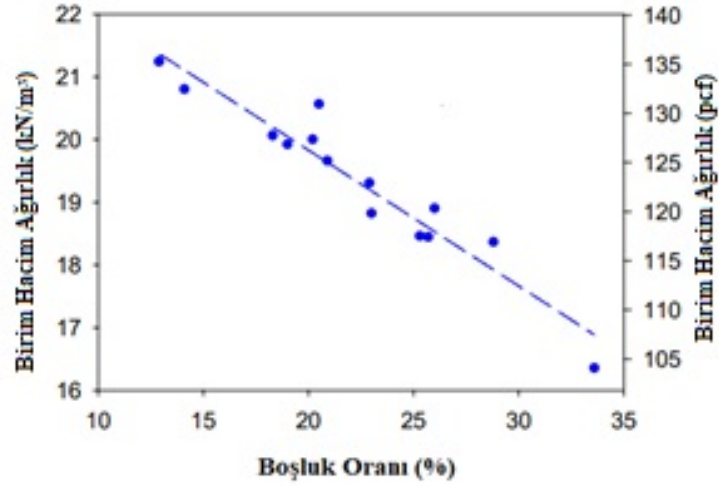


Şekil 2.10 Farklı agregalar içeren betonların basınç dayanımı – çekme dayanımı korelasyonu (Gaedicke ve diğer., 2016)

2.3.4 Boşluk İçeriği ve Birim Hacim Ağırlığı

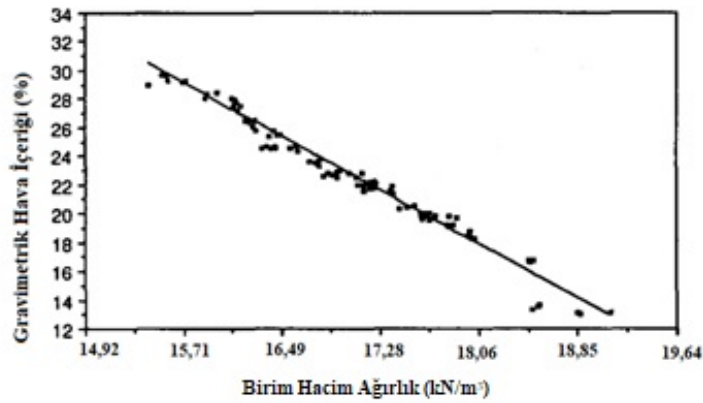
Geçirimli beton, boyutları 2 mm ile 8 mm arasında değişen birbirleriyle bağlantılı büyük boşluklardan oluşmaktadır. Bu boşluklar; kullanılan karışım oranları, agregat tipi ve sıkıştırma derecesinden etkilenmektedir (Kia ve diğer., 2017). Genellikle geçirimli betonda boşluk oranı %15 ile %35 arasında değişir. Geçirimli betonun yüksek oranda boşluklu oluşu dayanımını ve birim hacim ağırlığını oldukça düşürür. Wang ve diğer. (2006) yaptığı çalışmada boşluk oranı ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiyi ters orantılı olarak bildirmişlerdir. İbrahim ve diğer. (2014) karışımında farklı büyüklükte agregalar kullandığı geçirimli beton numuneleri

üzerinde yaptığı deneylerde birim hacim ağırlık artışının, boşluk oranı ve geçirimsizlik değerlerini azalttığını bildirmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Boşluk oranı ve yoğunluk arasındaki ilişki (1 pcf=0,157 kN/m³) (İbrahim ve diğer., 2014)

Ghafoori ve Dutta (1995) farklı agrega/çimento oranlarına sahip numuneler üzerinde yaptığı çalışmada sıkıştırma enerjisi değerlerindeki artışın geçirimli betonun boşluk içeriğinde azalmaya, birim hacim ağırlık değerlerinde ise artışa yol açtığını bildirmiştir. Ayrıca birim hacim ağırlık artışının betonun boşluk içeriğinde azalmaya neden olduğunu bildirmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Birim hacim ağırlığı ve hava içeriği arasındaki ilişki (Ghafoori ve Dutta, 1995)

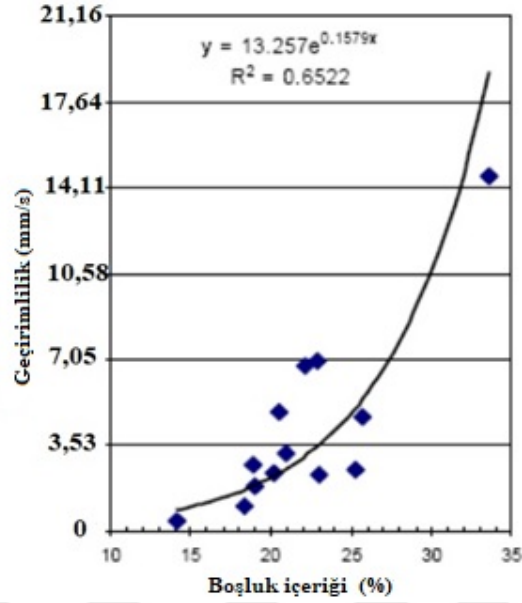
2.3.5 Permeabilite (Geçirimsizlik)

Geçirimli betonun en önemli özelliği, suyu boşluklarının arasından kısa sürede sızdırma kabiliyetidir. Bu sızdırma özelliği ise sadece boşluk oranına bağlı olmayıp boşlukların boyut dağılımına, şekline, birbirleriyle bağlantısına ve boşlukların dolaşıklığına (tortuosity) bağlıdır. Literatürde geçirimsizlik değerleri 0,003'ten 3,3 cm/s'ye kadar değişmektedir (Kia ve diğer., 2017). Geçirimli betonun toplam boşluk içeriği kabaca üçe bölünebilir: birbirleriyle bağlantılı makro boşluklar, kapiler boşluklar ve bağlantısız boşluklar. Betona geçirimsizlik özelliğini kazandıran birbirleriyle bağlantılı boşluklardır ve efektif boşluk içeriği olarak adlandırılırlar (Chandrappa ve Biligiri, 2016). Meininger (1988) yaptığı çalışmada anlamlı bir sızdırma hızının sağlanabilmesi için (birbirleriyle bağlantılı boşluk oluşumu için) geçirimsiz betonun toplam boşluk oranının en az %15 oranında sağlanması gerektiğini ortaya koymuştur. Cosic, Korat, Ducman, ve Netinger (2015) yaptığı çalışmada efektif boşluk içerik değerlerinin, toplam boşluk içeriği değerlerinin %50 ile %75'i arasında değiştiğini belirtmiştir. Wang ve diğer. (2006) çeşitli karışım tasarımları üzerinde yaptığı araştırmada, geçirimsiz betonun boşluk içeriği ve su geçirgenliği arasındaki ilişkinin üstel olduğunu bildirmişlerdir (Şekil 2.13).

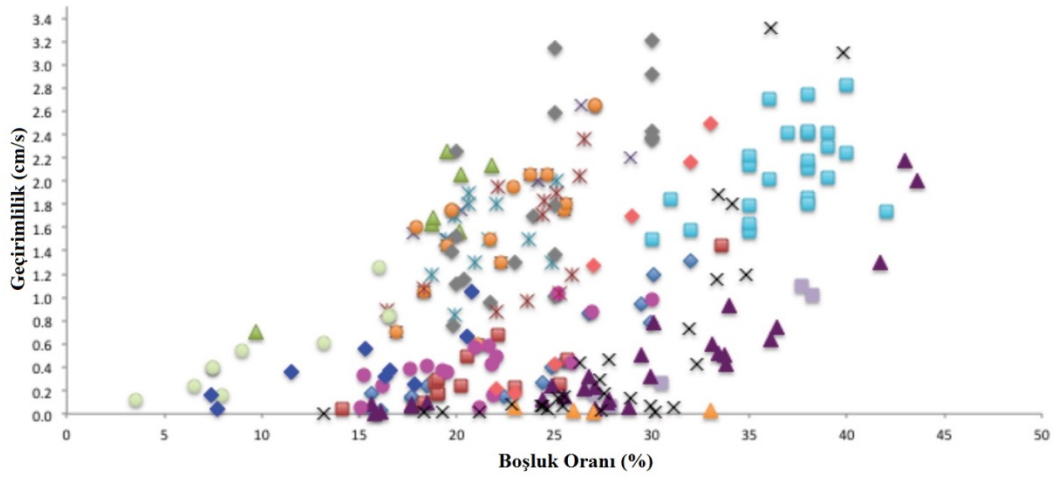
Kia ve diğer. (2017) çok sayıda çalışmadan elde ettiği verilerden derlediği grafikte boşluk oranının arttıkça geçirimsizliğin de genel olarak arttığını belirtse de; basınç dayanımı ve boşluk oranı arasında bulunan güçlü korelasyonun, boşluk oranı ve geçirimsizlik arasında bulunmadığını bildirmiştir (Şekil 2.14). Karpuz ve diğer. (2015) çimento miktarını ağırlıkça %15, %30, %45 ve %60 oranlarında 1,000 - 0,125 mm aralığında tane boyut dağılımına sahip ince kum ile yer değiştirerek tasarladığı karışım numuneleri üzerinde yaptığı çalışmalarda ince kum miktarı artışının geçirimsizlik kapasitesinde azalmaya yol açtığını bildirilmiştir.

Kılınç ve Akakın (2012) kontrol betonunda (geleneksel beton) kullanılan ince kum miktarının %0, %25, %50 oranlarında ince agregası kullanarak (yıkılmış kırma ve doğal kum) tasarladığı geçirimsiz beton numuneleri üzerinde yaptığı çalışmalarda karışımda ince agregası miktarı artışının basınç dayanımında artışa ancak su geçirimsizliğinde azalmaya yol açtığını bildirmiştir. Buradan ince malzeme kullanarak

da geçirimli beton elde edilebileceği ve geçirimli beton özelliklerinin ince malzeme kullanarak istenen yönde modifiye edilebileceği sonucu çıkmaktadır.



Şekil 2.13 Boşluk içeriği ve geçirimlilik arasındaki ilişki (Wang ve diğer., 2006)



Şekil 2.14 Boşluk oranı ve geçirimlilik arasındaki ilişki (Kia ve diğer., 2017)

Akkaya ve Çağatay (2017a) agrega boyutunun ve agrega/bağlayıcı oranının geçirimli betonun permeabilite değerleri üzerinde etkisini incelediği çalışmada: agrega/bağlayıcı oranı azaldıkça geçirimlilik ve boşluk oranı değerlerinin azaldığını belirlemiştir. Aynı yazarlar karışım türlerinden bağımsız olarak geçirimli beton

numunelerinde sabit seviyeli permeabilite ölçüm yöntemiyle belirlenen geçirimsizlik değerlerinin düşen seviyeli permeabilite ölçüm yöntemiyle belirlenen geçirimsizlik değerlerinin yaklaşık %75'i kadar olduğunu bildirmiştir.

2.4 Geçirimli Beton Dayanıklılık Özellikleri

2.4.1 Donma-Çözülme Direnci

Geçirimli betonun donma-çözülme direnci, donma durumunda boşlukların suya doygun olma seviyesine bağlıdır. Geniş aralıklı boşlukların doymuş olma durumunda, donma-çözülmenin yalnızca birkaç devirde meydana gelmesi ciddi hasara neden olabilir. Ancak, bu durumun sahada meydana gelmesi geçirimsiz betonun yüksek drenaj kabiliyetinden ötürü engellenmektedir (Tennis ve diğer., 2004). Wang ve diğer. (2006) geçirimsiz betona küçük miktarda ince malzeme ve sentetik lif eklenmesinin donma-çözülme direncini artırdığını rapor etmişlerdir. Shu, Huang, Wu, Dong ve Burdette (2011) hem saha hem laboratuvarında yaptığı çalışmada hava sürükleyici katkı kullanılan geçirimsiz betonların kullanılmayanlara göre donma-çözülme dirençlerinin çok daha iyi olduğunu bildirmiştir. Yang (2011) su ile kür edilmiş geçirimsiz beton numunelerinde silis dumanı ve polipropilen lif kullanımının donma-çözülme direncini geliştirdiğini raporlamıştır. Kevern, Wang ve Schaefer (2010) kaba agreganın özelliklerinin geçirimsiz betonun donma-çözülme direnci üzerine etkisini incelediği çalışmada; agreganın su emme değerinin geçirimsiz betonun donma-çözülme direnci üzerinde büyük etkisinin bulunduğunu belirtmiştir. Kabul edilebilir bir donma-çözülme direnci gösteren karışımlarda kullanılan agregaların su emme değerlerinin ortalamasının %0,82 olarak tespit edilmiştir.

Gesoğlu ve diğer. (2014b) agreganın hacimce %10 ve %20 oranında yer değiştirerek kullandığı atık lastiklerin (lastik kırıntıları, parçaları, ince lastik kırıntıları) geçirimsiz betonun aşınma direnci ve donma-çözülme direnci üzerinde etkisini araştırmıştır. Atık lastik kullanımının 300 donma-çözülme döngüsü geçirmiş geçirimsiz beton numuneleri üzerinde kayda değer donma-çözülme direnci sağladığını ve ince atık lastik parçalarının daha yüksek yüzey alanına sahip olmasından dolayı mikro ölçekli boşlukların oluşmasının kaba atık lastik parçalarına kıyasla daha iyi performans göstermelerinde etkili olduğunu bildirmiştir (Şekil 2.15). Wu, Liu, Sun

ve Yin (2016) geçirimli betonun donma-çözülme direnci performansını incelediği çalışmada: uygun miktarda hava sürükleyici katkı kullanımının betonun donma-çözülme direncini bir dereceye kadar arttırdığını belirlemiştir. Lateks modifiyeli karışımların bağlayıcı matrisindeki arayüz bağlarını güçlendirmesinden dolayı daha iyi donma-çözülme direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Laboratuvar ve sahada üretilen geçirimli beton numuneleri karşılaştırılmasında, sahada üretilenlerin genel olarak daha kötü mekanik performans gösterdiğini, özellikle de donma-çözülme direncinde yaklaşık %25 kayıp oluştuğunu rapor etmiştir.



Şekil 2.15 300 donma çözülme döngüsü sonucu numunelerin görünüşü a) kontrol numunesi b) atık lastik kullanılmış numune (Gesoğlu ve diğer., 2014b)

Kevern, Wang ve Schaefer (2008) ince malzeme miktarı, lif miktarı, su/çimento oranı, sıkıştırma seviyesi, hava içeriği, çimento ile uçucu kül ve silis dumanı yer değişimi, lateks polimer eklenmesi, kaba agrega tipi olmak üzere 9 adet parametrenin geçirimli betonun donma-çözülme direnci üzerindeki etkisini araştırdığı çalışmada:

- Az miktarda (kütlece %7) kaba agrega yerine ince agrega kullanımının,
- Özellikle kum içermeyen karışımlara polipropilen lif eklenmesinin,
- İşlenebilirliği ve yoğunluğu artırmak için biraz yüksek s/ç kullanımının (0,32'ye yakın),
- Sıkıştırmayı arttırmanın ve boşluk içeriğinin azaltılmasının,
- Çimento pastası hacmini arttırmaya yönelik hava sürükleyici katkı kullanımının,
- Çimentonun silis dumanı ile kütlece % 5'e kadar yer değiştirilmesinin,

donma-çözülme direncini arttırdığını;

- %5'in üzerinde silis dumanı yer değişiminin,

- Agregada su emmesinin artmasının,
- Uçucu kül çimento ikamesinin ise

donma-çözülme direncini azalttığını bildirmiştir.

2.4.2 Aşınma Direnci

Geçirimli betonun kaba yüzey dokusu ve açık yapısı nedeniyle dış etkiye maruz kalan yüzeyinde bulunan agrega parçacıklarının aşınması ve sökülmesi bir problem teşkil etmektedir. Bu durum karayolları gibi ağır trafik yüküne maruz kalan kaplamalarda kullanılmasına engel olmaktadır. Çoğu geçirimli betonun trafiğe açıldığı ilk günlerde yüzeyinde gevşek durumda bulunan agregaları sökülmeğe uğrarlar. Sökülme miktarı birkaç haftadan sonra yüzeyin kararlı duruma gelmesiyle önemli ölçüde azalır. Aşınmaya karşı geçirimli betonun direnme kabiliyeti, uzun dönemli dayanıklılığı için kritik önem taşımaktadır. Kevern, Schaefer ve Wang (2009) aşınma direncini arttırmak için çeşitli yüzey uygulamaları ve kürleme yöntemlerini (plastik tabakayla örtme, beyaz pigment kürü, soya yağı emülsiyonu kürü) test ettiği çalışmasında; plastik tabakayla kaplayarak bekletilen geçirimli betonun en etkin aşınma direncini sağladığını ve bu kürleme sürenin arttıkça (7 günden 28 güne) aşınma direncinin de arttığını bildirmiştir.

Gaedicke, Marines ve Miankodila (2014) kütlece farklı oranlarda mineral katkı (öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu) içeren ve farklı agrega tiplerine sahip döküm ve karot numuneleri üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda:

- Agregada tipinin, benzer agrega/pasta içeriğine ve boşluk oranına sahip geçirimli betonların aşınmaya karşı direnci üzerinde etkisinin olduğunu,
- %30'a kadar mineral katkı kullanımının orta derecede pasta içeriğine sahip kireçtaşı ve geri dönüştürülmüş agregalardan oluşan karışımların yüzey kütle kaybı değerini sırasıyla %30 ve %19 azalttığını,
- Kireçtaşından oluşan karışımlarda pasta içeriğinin artmasının kütle kaybı değerini %52 azalttığını bildirmiştir.

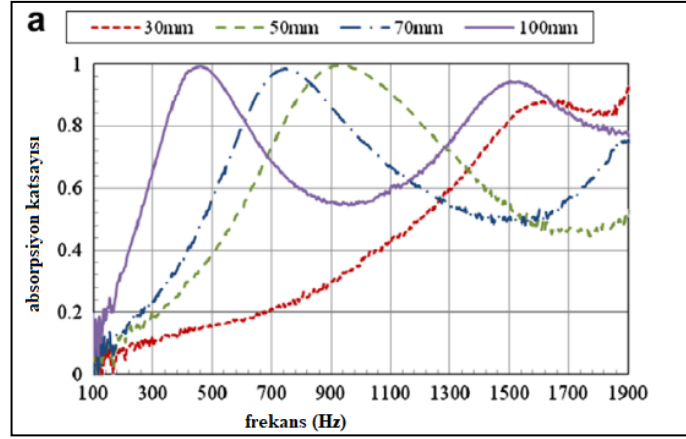
Akkaya ve Çağatay (2017b) aynı agrega büyüklüğüne ve tipine sahip geçirimli beton karışımlarında agrega/bağlayıcı oranı azaldıkça aşınma direncinde artış

olduğunu rapor etmiştir. Rodin ve diğer. (2018) karbon lif kullanımının geçirimli betonun aşınma dayanımında gelişim sağladığını bildirmiştir. Gesoğlu ve diğer. (2014b) farklı miktarda ve büyüklükte atık lastik kullanımının geçirimli betonun yüzey özelliklerini ve aşınma direncini geliştirdiğini, en iyi sonucun ise ince lastik kırıntısı kullanımında elde edildiğini rapor etmiştir.

2.5 Geçirimli Beton Akustik Özellikleri

Kentsel alanlarda gittikçe artan gürültü insan sağlığı için önemli bir problem haline gelmiştir. Bu gürültü çeşitli büyüklükte araçların yolda hareket etmesinden, fabrikalardan, uçaklardan, inşaat sahalarından kaynaklanmaktadır (Kim ve Lee, 2010). Geçirimli betonun kayda değer hacimde birbirleriyle bağlantılı boşluklu yapıya sahip olması ses emiciliği katsayısının yüksek olmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı beton yüzeylerin lastikle temas yüzeyinde oluşan gürültüyü azaltmak için bir araç olarak kullanılabilir (ACI 522R-10, 2010).

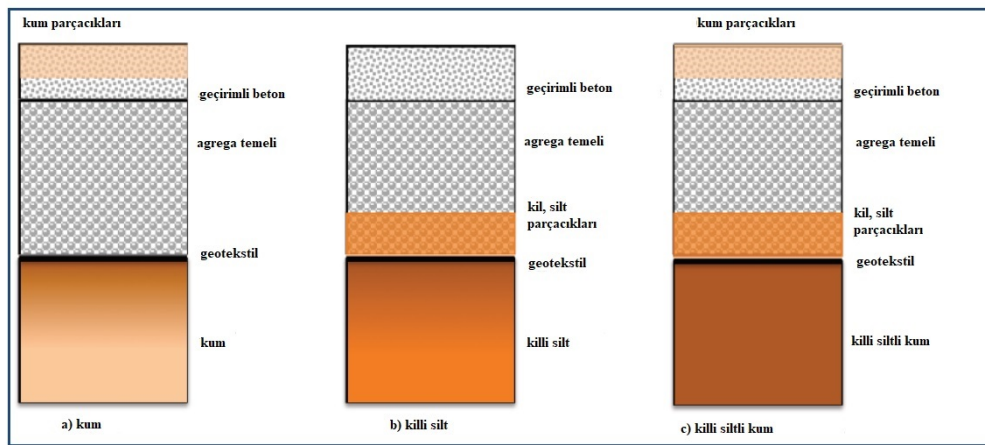
Ses yutma katsayısı malzemenin ses yutma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Ses yutma katsayısının 1 olması materyalin tamamen ses emici olduğunu, 0 olması ise tamamen ses yansıtıcı olduğunu göstermektedir. Geleneksel betonun ses yutma katsayısı 0,03 ile 0,05 arasında değişmektedir. Geçirimli betonun ise 0,1'den (zayıf performanslı karışımlar) yaklaşık 1'e kadar (optimum boşluk hacim ve boyutları olan karışımlar için) değişmektedir. Ses yutma katsayısının, çarpan ses dalgalarının frekansına bağlı olduğu göz önüne alındığında, geçirimli betonun istenen frekanstaki (insan kulağı için 800 Hz'den 1200 Hz'e kadar sakıncalıdır) sesi minimize edebilmesi için uygun kalınlıkta seçilmesi gerekmektedir (ACI 522R-10, 2010). Akustik absorpsiyon davranışı geçirimli betonun kaplama kalınlığına, yapımında kullanılan agregaların boyutlarına, boşluk içeriğine, boşluklarının dolaşıklılığına (tortuosity) bağlıdır (Arenas ve Crocker, 2010). Üniorm büyüklüğe sahip agregalar yerine farklı büyüklükteki kaba agrega karışımları kullanılması akustik absorpsiyon açısından çok daha etkilidir. Geçirimli betonda polipropilen lif kullanılması da maksimum akustik absorpsiyon katsayısını arttırmaktadır (Neithalath, 2004). Kim ve Lee (2010) hazırladığı geçirimli betonun farklı kalınlıklara sahip numeneleri üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda akustik absorpsiyon spektrumunu elde etmiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Farklı kalınlıklardaki geçirimli betonların akustik absorpsiyon spektrumu (Kim ve Lee, 2010)

2.6 Geçirimli Betonda Tıkanma

Geçirimli betonun en önemli özelliği bünyesinde bulunan boşluklardan suyu kolayca ve hızlı geçirerek zemine drene edebilmesi olduğu için, bu özelliğin sürekli olarak sağlanabilmesi beklenir. Beton bünyesinde bulunan boşlukların servis ömrü boyunca açık kalması kritik öneme sahiptir. Ancak zamanla katı parçacıkların yağış suyu ve diğer taşınım yollarıyla geçirimli beton bünyesinde bulunan boşluklara nüfuz ederek, boşluklarda birikmesi ve bu boşlukları doldurması (tıkaması) nedeniyle geçirimli betonun geçirimlilik oranı ve su iletme kapasitesi gittikçe azalmaktadır. Bundan dolayı geçirimli beton üzerinde suyun taşması ve göllenmesi gibi durumlar meydana gelebilir (Kia ve diğer., 2017).



Şekil 2.17 Tıkanmaya neden olan malzemelerin tiplerine göre geçirimli betonun farklı bölgelerinde katı parçacıkların birikimi (Tong, 2011)

Geçirimli betonun tıkanma derecesi; tıkayan malzemenin özelliklerine, geçirimli betonun özelliklerine, yağmur suyu akışına, çevresel duruma ve geçirimli betonun bakım özelliklerine bağlıdır. Tıkanmaya neden olan malzemeler boyutlarından dolayı geçirimli betonun farklı bölgelerinde toplanmaktadırlar. Daha kaba kum parçacıklar geçirimli betonun yüzeyinde toplanmaya eğilimlidirler, daha ince kum parçacıkları betona nüfuz ederek bünyesinde asılı kalırlar, daha da ince malzemeler (kil ve silt) ise betonun zeminle temas eden yüzeyine kadar inebilirler (Şekil 2.17) (Tong, 2011). Bundan dolayı geçirimli betonun basınçlı su ve vakumlu süpürme yoluyla temizlenmesi kaba parçacıklarla tıkalı olan kaplamalarda daha etkili olmaktadır. Bazı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda daha büyük boyutlara sahip sedimentlerin, betonun yüzey boşluklarından içeri girmesi zorlaştığı için, geçirimlilik özelliğini büyük ölçüde azaltmadıkları belirtilmiştir (Deo, Sumanasooriya ve Neithalath, 2010; Coughlin, Campbell ve Mays, 2012). Ancak, bunun tersi olarak bazı araştırmacılar da kumlu sedimentlerin, siltli killi sedimentlere göre geçirimlilik özelliklerini daha fazla etkilediklerini iddia etmektedir (Schaefer, 2011). Çalışmaların birbirleriyle uyumlu olmaması; numunelerin boşluk yapılarının, kullanılan tıkama materyallerinin ve maruz kaldıkları koşulların farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Kia ve diğer., 2017). Burada özellikle geçirimli betonun yüzey boşluklarının etkisi olduğu değerlendirilmektedir. Yüzey boşluklarından daha büyük boyutlara sahip olan katı parçacıklar yüzeyde birikmekte, daha küçük olan parçacıklar ise boyutları sayesinde yüzeyden daha içlere geçerek boşluklarda veya geçirimli betonun alt temelle birleştiği yüzeye kadar inebilmektedir (Kia ve diğer., 2017; Mata ve Leming, 2012).

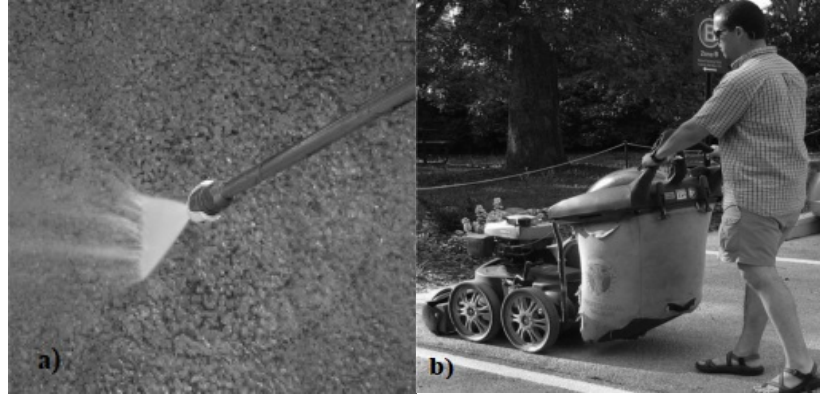
Welker ve diğer. (2013) yaptıkları saha araştırmasında; aynı açık otopark içinde bulunan ve aynı iklim şartlarına, kirlilik yoğunluğuna maruz kalan geçirimli beton ve asfalt kaplamadan vakumlu süpürme yöntemiyle topladıkları sedimentler üzerinde yaptıkları analizlerde: toplanan sedimentlerin büyük bölümünün kaplamanın parçalarından oluştuğunu, küçük bir kısmının ise çok ince malzemeler ve organik maddelerden oluştuğunu rapor etmişlerdir. Guthrie, Carson ve Dennis (2010) geçirimli betonun farklı seviyelerde tıkalı ve suya doymun olma durumlarının donma-çözülme direnci üzerine etkisini incelediği çalışmada; tıkalı ve/ya da tam olarak

suya doygun geçirimli beton numunelerinin tıkalı olmayan, suya doygun olmayan numunelere göre çok daha hızlı bir şekilde bozulmaya uğradığını rapor etmiştir.

Belirtildiği üzere tıkanma geçirimli betonun servis ömrü ve dayanıklılığı açısından problem yaratmaktadır. Bundan dolayı tıkanmanın önüne geçilmesi hususu önem arz etmektedir. Boşluklarda birikerek tıkanmaya yol açan organik ve inorganik materyaller genellikle geçirimli betonun oluşturan bileşenleriyle kimyasal olarak reaksiyona uğramazlar. Kimyasal olarak bağlanmayan bu materyalleri, uygulanan bakım yöntemleriyle (basınçlı suyla yıkama veya vakumlu süpürme ya da bunların kombinasyonu) geçirimli betonun bünyesinden çekip çıkarmak ya da uzaklaştırmak mümkündür (Chopra, Kakuturu, Ballock, Spence ve Wanielista, 2010) (şekil 2.18). ACI 522R-10 (2010)'a göre en iyi yöntem vakumlu emme sonrası basınçlı suyla yıkamadır. Buna paralel olarak yapılan araştırmalarda da geirimlilikte en iyi iyileşmenin bu iki yöntemin kombinasyon olarak kullanılmasında elde edildiğini bildirilmiştir (Chopra ve diğer., 2010; Schaefer, 2011). Fakat geçirimlilik özelliğinde gözlenen bu iyileşme kısıtlı miktardadır (Tong, 2011; Schaefer, 2011). Tong (2011) yaptığı çalışmada basınçlı suyla yıkama ve vakumlu süpürme yöntemi kombinasyonun kullanımıyla geçirimlilik oranındaki iyileşmenin %25'in altında olduğunu raporlamıştır. Mata ve Leming (2012) basınçlı suyla yıkama yönteminin kumla tıkanmış numunelerde başlangıç geçirimlilik oranına göre %30'a kadar, kil ve siltle tıkanmış numunelerde ise %20'nin altında iyileşme sağladığını bildirmiştir. En kötü iyileşme kum, kil ve siltle tıkanmış numunelerde elde edilmiştir.

Henderson ve Tighe (2011) süpürme yönteminin geçirimli betonun yüzeyinde toplanan birikintiler için etkili olabileceğini, ancak içindeki boşluklarda toplanmış birikintileri boşluk sisteminden uzaklaştıramayacağını bundan dolayı geçirimlilik oranlarında iyileşmeyi yeterli miktarda sağlayamayacağını belirtmiştir. Ancak, yüzeyi büyük çaplı hortumla yıkama yöntemiyle boşluklarda toplanan tıkanma malzemelerinin boşluk sisteminden çıkarılabileceğini de eklemiştir. Geçirimli beton yüzeylerinin kumla tıkanmış olması durumunda, kuma hapsolmüş suyun donma etkisine maruz kalması sonucunda su genleşerek imento pastasını aşındırmakta bu da yüzeyde parça kopmasına neden olmaktadır (Henderson ve Tighe, 2010). Bundan

dolayı donma-çözülme sezonu gelmeden önce yüzeydeki birikintilerin minimize edilmesi için bakım yapılması önerilmektedir (Henderson ve Tighe, 2011).



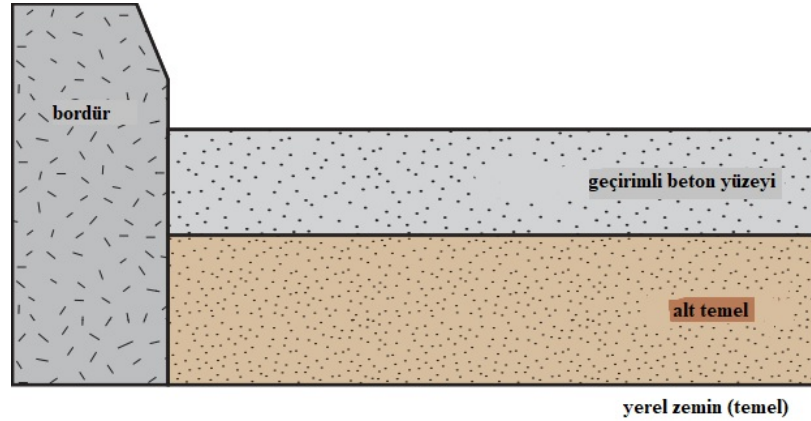
Şekil 2.18 Geçirimli beton bakım yöntemleri a) basınçlı su ile yıkama b) vakumlu emme yöntemi (Hein, Dougherty ve Hobbs, 2013)

BÖLÜM ÜÇ

GEÇİRİMLİ BETON KAPLAMA TASARIMI, İNŞAASI VE PARKE TAŞI STANDARTLARI

3.1 Geçirimli Beton Kaplama Sistemi Tasarımı

Önceki bölümlerde geçirimli betonun özellikleri, uygulamaları ve avantajları hakkında bilgi verilmişti. Bu bölümde geçirimli beton kaplamaların bir sistem olarak tasarımı hakkında bilgi verilecektir. Geçirimli beton kaplama sistemleri üç ana bileşenden oluşmaktadırlar: geçirimli beton kaplama yüzeyi, uygun ölçüde sıkıştırılmış granüle bir alt temel ve üstüne inşa edilen yerel zemin (Şekil 3.1). Bunlara ek olarak yerel zemin özelliklerine göre alt temel ve yerel zemin arasında geotekstil kullanılabilmektedir. Geçirimli beton kaplama sistemi tasarımı, uygulanacak yerlerin özelliklerinden (meteorolojik veriler, zemin özellikleri), geçirimli betonun dayanım özelliklerinden ve kullanım amaçlarından (otopark, kaldırım, yol vs.) etkilenmektedir. Bundan dolayı 2 ana başlık altında tasarımları yapılmaktadır: biri yapısal yeterlilik için, diğeri ise hidrolik-hidrolojik nitelikleri içindir (ACI 522R-10, 2010). Bu iki niteliğin birbirlerini etkilemelerinden dolayı dikkatle ele alınmaları gerekmektedir.



Şekil 3.1 Geçirimli beton kaplama şematik kesit gösterimi (Tennis ve diğ., 2004)

3.1.1 Yapısal Tasarımı

Geçirimli beton kaplama sistemlerinin yapısal tasarımları için dünyaca kabul edilmiş bir standardın yokluğundan dolayı tasarımında geleneksel beton kaplamaların yapısal tasarım standartları kullanılmaktadır. Bunlardan yollar için kullanılan ACI 325.12R ve AASHTO, otopark alanları için kullanılan ACI 330R gibi standartlar ve şartnameler örnek gösterilebilir (Tong, 2011).

3.1.1.1 Yerel Zemin (Temel) ve Alt Temel

Alt temel tabakası geçirimli kaplama yüzeyinin altında bulunan ve granüle kaba agregadan oluşan katmandır. Temel ise beton kaplama yüzeyi ve alt temel tabakasının altında bulunan yerel zemindir. Alt temel tabakası geçirimli kaplamaya düşey yükler altında destek sağlar, suyu depolar ve filtreler (ACI 522R-10, 2010). Bazı yerel zeminlerin yeterli drenaj kabiliyetine sahip olması ve kaplamaya yeterli derecede destek sunmasından ötürü alt temel opsiyonel olarak kullanılmayabilir. Ancak yerel zeminlerin genelde kil oranına bağlı olarak kısıtlı derecede suyu drene edebilmeleri ve kaplamaya destek sunabilmelerinden ötürü genel olarak alt temel kullanılır. Alt temel tabakası kalınlığı suyu depolama vazifesi gördüğü için hidrolojik tasarımda önemli bir yer tutar ve kalınlığı genel olarak 150 mm ile 300 mm arasında değişir (Tennis ve diğer., 2004). Bazı yerel zeminlerin özelliklerinden ötürü iyileştirilmeleri veya yer değiştirilmeleri gerekebilir. Özellikle şişen yerel zeminler, nem değişimiyle beraber hacimsel stabilitesini kaybettikleri için kimyasal olarak iyileştirilmeleri veya belli bir derinliğe kadar kazılarak kabarmayan zeminlerle yer değiştirilmeleri gerekmektedir (Tennis ve diğer., 2004). Aynı zamanda bazı zeminlerin donma şişmesine uğramasından ötürü don şişmesine uğramayan zeminlerle yer değiştirilmeleri gerekebilir (ACI 522R-10, 2010).

3.1.1.2 Geçirimli Beton Dayanım Gerekliği

Geçirimli betonun bünyesinde bulunan yüksek orandaki boşluklardan dolayı genel olarak basınç dayanımları geleneksel betona kıyasla düşüktür. 3,5 MPa ile 28 MPa arasında değişmektedir (Tennis ve diğer., 2004). Ancak uygulama alanlarına göre maruz kalacakları taşıt ve benzeri yükleri taşıyabilmeleri için belirli bir dayanım değerini sağlamaları gerekmektedir. Kia ve diğer. (2017) literatürü değerlendirdikleri

çalışmasında araç yüküne maruz kalmayan kaplamalar ve kaldırımlar için basınç dayanımının 13,8 MPa, düşük hız ve seyrek kullanımlı araç yüküne maruz kalan kaplamalar için ise basınç dayanımının en az 20,7 MPa olması gerektiğini bildirmişlerdir.

3.1.1.3 Geçirimli Beton Kaplama Kalınlığı

Geçirimli betonun sıklıkla uygulandığı alanlardan birisi de araç park yerleridir. ACI 330R standardında beton park alanlarının tasarımında geçirimli beton kalınlığı; geçirimli betonun eğilme dayanımına, yerel zemin özelliklerine, alt temel tabakasının özelliklerine, öngörülen yükleme koşullarına (trafik kategorisi), günlük ortalama taşıt trafiğine ve tasarlanan hizmet süresine bağlıdır. Söz konusu standartta bulunan trafik kategorileri Tablo 3.1’de verilmiştir. Tablo 3.1 de görüleceği üzere kategori A’dan B’ye doğru gidildikçe araç yükleri artmaktadır.

Tablo 3.1 Trafik kategorileri (ACI 330R)

Trafik Kategorileri			
Kategori A	Kategori B	Kategori C	Kategori D
Taksi araçların otopark alanları ve erişim yolları	a) Alışveriş merkezlerine giriş ve servis yolları b) Otobüs park alanları ve iç yolları c) Tek üniteli kamyonlar için park alanları ve iç yolları	a) Otobüsler için park giriş ve çıkış yolları b) İki veya daha fazla üniteli kamyonlar için park alanları ve iç yolları c) Tek üniteli kamyonlar için park giriş ve çıkış yolları	İki veya daha fazla üniteli kamyonlar için park giriş ve çıkış yolları

Yatak katsayısı zeminin herhangi bir noktasındaki basınç ile aynı noktanın oturması arasındaki oran olarak tanımlanır ve geçirimli beton kaplamaların kalınlık değerlerinin belirlenmesinde uygulanacağı yerel zeminin yatak katsayısı değeri büyük önem arz etmektedir. ACI 330R standardında bulunan yerel zemin özelliklerine göre değişen yatak katsayısı (k) değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Tablo 3.2’de görüleceği üzere zemin sınıfı kötüleştikçe yatak katsayısı değerleri giderek düşmektedir. Ancak uygulamalarda genel olarak geçirimli beton kaplamalar direkt yerel zemin üzerine inşa edilmezler. Geçirimli beton kaplamasıyla yerel zemin

arasında suyun depolanıp, filtre edilebileceği granüle kaba agrega alt temel tabakası bulunur (Şekil 3.1). Bundan dolayı yatak katsayısı değerlerinde bu alt temel kalınlığına da bağlı olarak sınırlı düzeyde bir iyileşme gözlenir. Tablo 3.3’de bu etki görülmektedir.

Tablo 3.2 Yerel zemin sınıfları ve yaklaşık yatak katsayısı (*k*) değerleri (ACI 330R)

Zemin Cinsi	<i>k</i> (psi/in.)	<i>k</i> (MPa/m)
Kısmen plastik ince malzeme içermeyen kum ve kumlu çakıllı karışımlar	180-220	48,6-59,4
Orta miktarda silt ve kil içeren kum ve kumlu çakıllı karışımlar	130-170	35,1-45,9
Silt ve kil büyüklüğünde partiküllerin baskın olduğu ince malzemeli zeminler	75-120	20,2-32,4

Tablo 3.3 Farklı yerel zeminlere uygulanan granüle agrega alt temeli için modifiye yatak katsayısı değerleri (ACI 330R)

	Granüle alt temel kalınlığı, inch (mm)				
	0 in. (0 mm)	4 in. (101,6 mm)	6 in. (152,4 mm)	9 in. (228,6 mm)	12 in. (304,8 mm)
Zemin	50 (13,5)	65 (17,5)	75 (20,2)	85 (22,9)	110 (29,7)
yatak	100 (27)	130 (35)	140 (37,8)	160 (43,2)	190 (51,3)
katsayısı	200 (54)	220 (59,4)	230 (62,1)	270 (72,9)	320 (86,4)
<i>k</i>					
psi/inch	300 (81)	320 (86,4)	330 (89,1)	370 (99,9)	430 (116,1)
(MPa/m)					

1 inch: 25,4mm; 1 psi/in.: 0,27MPa/m

Rijit kaplama tasarımı, yükü alt zemine üniform olarak dağıtan kaplamaların dayanıma önemli derecede bağlı olduğundan kaplamada kullanılan malzemenin eğilme dayanımı değeri de tasarımda önem arz etmektedir (Tennis ve diğer., 2004). Ghafoori ve Dutta (1995) geçirimli betonun Poisson oranının geleneksel betonla benzer olduğunu ve 0,15-0,20 arasında değiştiğini belirlemiştir. Geçirimli betonun basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki için aynı yazarlar tarafından denklem 3.1 önerilmiştir.

$$F_b = 8,72(F_c)^{0,5} \quad (3.1)$$

F_b : Eğilme dayanımı (psi)

F_c : Basınç dayanımı (psi)

Denklem 3.1'in ACI 330R standardında geleneksel betonun basınç dayanımıyla eğilme dayanımı arasındaki ilişki için önerilen denklemle benzer olduğu görülmektedir. Geçirimli kaplamaların maruz kalacağı öngörülen trafik yükleri; ortalama günlük trafik veya ortalama günlük kamyon trafiği olarak tanımlanabilir. Kamyon trafiği, kaplamaları arabalardan çok daha fazla etkilediği için geçirimli kaplamaları kullanacak kamyonların tahminini yapmak uzun süreli kullanımı istenen geçirimli kaplamalar için önem arz etmektedir (Tennis ve diğer., 2004). ACI 330R standardında yukarıda özetlenen parametrelere bağlı olarak 20 yıl hizmet ömrüne göre tasarlanan otopark beton kaplamaları için Tablo 3.4'te gösterilen kalınlık değerleri tavsiye edilmiştir. Tablo 3.4'te görüleceği üzere eğilme dayanımı 3,45 MPa ile 4,49 MPa (500 psi ile 650 psi) arasında değişen betonlar için önerilen beton kaplama kalınlığı 100 mm - 225 mm (4 inch ile 9 inch) arasında değişmektedir. Görüleceği üzere yaklaşık 22,7 MPa (3300 psi) basınç dayanımına sahip geçirimli betonun eğilme dayanımı denklem 3.1 kullanılarak 3,44 MPa (500 psi) elde edilmektedir. Bu dayanıma sahip geçirimli betonun kaplama kalınlığı, maruz kalacağı diğer koşulların da belirlenmesiyle Tablo 3.4 yardımıyla kolaylıkla belirlenebilmektedir. Ancak daha fazla trafik taşıma yüküne, daha az eğilme dayanımına sahip veya farklı hizmet süresi planlanan kaplamalar için gerekli hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalar için ACI 330R standardının Ek A bölümüne bakılabilir.

Aynı koşullara sahip beton kaplamaların hesaplanan kalınlık değerleri kullanılan standartlara göre de değişebilmektedir. Ghafoori ve Dutta (1995) beton yollar için hazırlanmış standartlara (AASHTO, 1993 ve PCA, 1990) göre hesaplanan geçirimli beton kaplama kalınlıklarını incelediği çalışmasında: düşük trafik yükleri için AASHTO (1993) metoduyla yapılan hesaplamalarda çıkan kalınlık değerlerinin PCA (1990) metoduna göre daha düşük olduğunu; ancak yüksek trafik yükleri içinse AASHTO (1993) metoduyla yapılan hesaplamalardan çıkan kalınlık değerlerinin PCA (1990) metoduna göre daha yüksek olduğunu bildirmiştir.

Tablo 3.4 20 yıl hizmet süresi için tavsiye edilen beton kaplama kalınlığı tablosu, inch (ACI 330R)

		$k = 500 \text{ psi/in. (CBR = 50; } R = 86)$				$k = 400 \text{ psi/in. (CBR = 38; } R = 80)$				$k = 300 \text{ psi/in. (CBR = 26; } R = 67)$			
MOR, psi:		650	600	550	500	650	600	550	500	650	600	550	500
Trafik kategorisi *	A (ADTT = 1)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.5
	A (ADTT = 10)	4.0	4.0	4.0	4.5	4.0	4.0	4.5	4.5	4.0	4.5	4.5	4.5
	B (ADTT = 25)	4.0	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	5.0	5.5	4.5	4.5	5.0	5.5
	B (ADTT = 300)	5.0	5.0	5.5	5.5	5.0	5.0	5.5	5.5	5.0	5.5	5.5	6.0
	C (ADTT = 100)	5.0	5.0	5.5	5.5	5.0	5.5	5.5	6.0	5.5	5.5	6.0	6.0
	C (ADTT = 300)	5.0	5.5	5.5	6.0	5.5	5.5	6.0	6.0	5.5	6.0	6.0	6.5
	C (ADTT = 700)	5.5	5.5	6.0	6.0	5.5	5.5	6.0	6.5	5.5	6.0	6.5	6.5
	D (ADTT = 700) [†]	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
		$k = 200 \text{ psi/in. (CBR = 10; } R = 48)$				$k = 100 \text{ psi/in. (CBR = 3; } R = 18)$				$k = 50 \text{ psi/in. (CBR = 2; } R = 5)$			
MOR, psi:		650	600	550	500	650	600	550	500	650	600	550	500
Trafik kategorisi *	A (ADTT = 1)	4.0	4.0	4.0	4.5	4.0	4.5	4.5	5.0	4.5	5.0	5.0	5.5
	A (ADTT = 10)	4.5	4.5	5.0	5.0	4.5	5.0	5.0	5.5	5.0	5.5	5.5	6.0
	B (ADTT = 25)	5.0	5.0	5.5	6.0	5.5	5.5	6.0	6.0	6.0	6.0	6.5	7.0
	B (ADTT = 300)	5.5	5.5	6.0	6.5	6.0	6.0	6.5	7.0	6.5	7.0	7.0	7.5
	C (ADTT = 100)	5.5	6.0	6.0	6.5	6.0	6.5	6.5	7.0	6.5	7.0	7.5	7.5
	C (ADTT = 300)	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5	6.5	7.0	7.5	7.0	7.5	7.5	8.0
	C (ADTT = 700)	6.0	6.5	6.5	7.0	6.5	7.0	7.0	7.5	7.0	7.5	8.0	8.5
	D (ADTT = 700) [†]	7.0	7.0	7.0	7.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0

^x ADTT: ortalama günlük kamyon trafiği. Buradaki kamyonlardan kasıt en az 6 tekerli olan taşıttır.

k: yatak katsayısı; CBR: kaliforniya taşıma oranı; R: direnç değeri; MOR: kopma modülü (eğilme dayanımı)

1 inch: 25,4mm; 1 psi: 0,0069 MPa; 1 psi/in.: 0,27 MPa/m

3.1.2 Hidrolojik Tasarımı

Geçirimli betonların en önemli özelliklerinden biri suyu bünyesindeki boşluklardan zemine drene edebilme kabiliyetidir. Bu özelliği sayesinde tasarlandıkları yağış koşulunda oluşacak yüzey akış sularının tamamını veya önemli bir kısmını depolayabilirler. Aktif ve pasif yüzey akış suyu azaltma sistemleri olmak üzere 2 farklı sistem olarak tasarlanabilirler. Aktif sistemde geçirimli kaplamayla beraber geçirimli kaplamaya yönlendirilen geçirimsiz kaplamalar üzerinde oluşan yağmur suyu akışları da dikkate alınır. Pasif sistemde ise yalnızca geçirimsiz kaplamayla yer değiştirmiş geçirimli kaplamaya düşen su miktarı dikkate alınır. Ancak aktif sistem tasarımı yaparken geçirimli kaplamaya ulaşarak sistemde tıkanmaya yol açabilecek sediment birikiminin önüne geçecek önlemler alınmalıdır (Tennis ve diğer., 2004).

Hidrolojik tasarımlarında genel olarak 2 ve 10 yıllık fırtınalar kullanılır. Burada 2 yıllık fırtına teriminden, bu büyüklükte fırtınanın 2 yılda bir gerçekleşmesinin beklendiği anlaşılmaktadır. Hidrolojik tasarımlarındaki en önemli üç parametre yerel zemin özellikleri, geçirimli beton karakteristikleri ve tasarımı yapılan fırtınada oluşması beklenen yağmur suyu miktarıdır (Tennis ve diğer., 2004). Geçirimli

betonun ve alt temelde bulunan agrega tabakasının geçirimsizlik değerleri genel olarak yerel zeminin geçirimsizlik değerlerinden yüksek olduğu için, depolanan suyun tahliyesinde en önemli faktör yerel zeminin geçirimsizlik değeridir. Bundan dolayı geçirimsiz betonun geçirimsizlik değerleri hidrolojik tasarımda kısıtlayıcı bir faktör değildir (Leming, Malcolm ve Tennis, 2007) (Tablo 3.5).

Tablo 3.5 Yerel zemin sınıfları ve geçirimsizlik değerleri (Leming ve diğer., 2007)

Genel yerel zemin sınıfları	Geçirimsizlik değerleri, cm/saat
Kumlu zeminler	1,3-2,5
Siltli zeminler	0,3
Killi zeminler	0,03

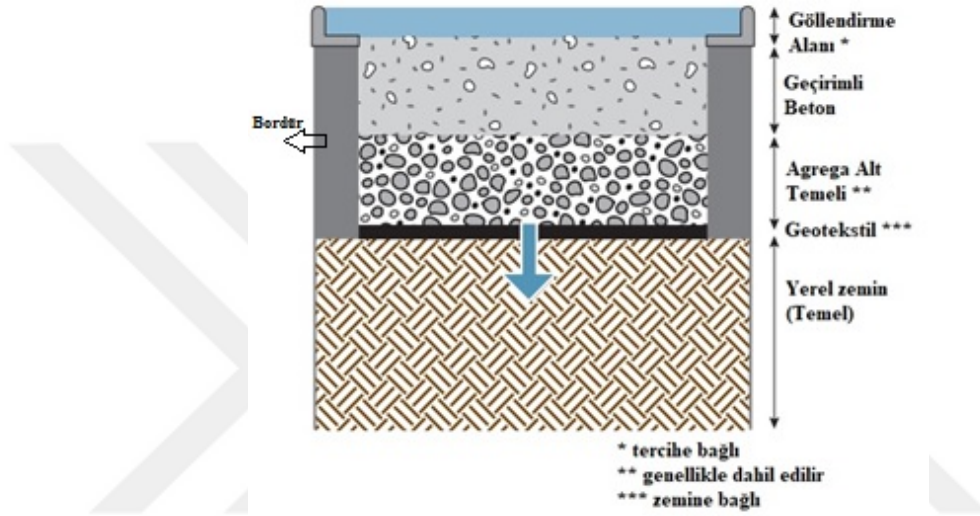
3.1.2.1 Depolama Kapasitesi ve Eğim Etkisi

Geçirimsiz beton kaplama sistemlerinin suyu depolama kapasitelerinin hesabında; geçirimsiz kaplamanın kendisi ve alt temel olarak kullanılan agrega katmanı genel olarak dikkate alınır. Ancak bunlara ek olarak depolama kapasitesi, tercihe bağlı olarak kullanılan bordür ve yeraltına yapılan depolama tankları sayesinde de artırılabilir (Leming ve diğer., 2007; Tennis ve diğer., 2004). Geçirimsiz beton kaplamanın tüm boşluklarının birbiriyle bağlantılı olmaması ve bazı boşluklarının suyla doldurulamaması sebebiyle, depolama kapasitesi hesabında suyun drene edilebilmesini sağlayan efektif boşluk içeriğinin dikkate alınması daha uygun olacaktır (Leming ve diğer, 2007).

Bordür kullanılan geçirimsiz beton kaplama sistemlerinde, bordür yüksekliğince suyun göllenebileceği bir alan oluşturulduğundan, sistemin suyu depolama kapasitesinde artış meydana gelmektedir. Ancak bordür kullanılarak yapılan bu tasarım, ticari işletmeler ve yoğun yaya trafiğine maruz kalacak yerlerde pek kullanılmaz. Özellikle yüksek geçirimsizlik değerlerine sahip yerel zeminler üzerine kurulmuş ve böylece bu göllenmenin kısa süreceği düşük kullanımlı ve düşük trafik yoğunluğuna sahip park alanlarında kullanılabilir. Söz konusu tasarımın göllenme süresince donma etkisine maruz kalmayacak yerlerde kullanılması gerekmektedir (Leming ve diğer., 2007) (Şekil 3.2).

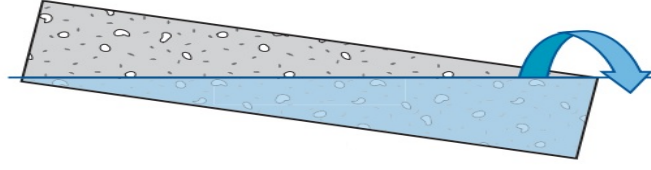
Göllendirme alanı uygulanarak tasarlanan geçirimli beton kaplama sistemlerinin depolama kapasitesi hesapları aşağıdaki şekilde yapılmaktadır. Bordür kullanılmayan sistemlerde göllendirme alanı etkisi çıkarılarak depolama kapasitesi bulunabilir (Leming ve diğer., 2007).

Kaplama	+	Alt temel	+	Göllendirme alanı	= Toplam depolama kapasitesi
(% 15 efektif boşluk)		(% 40 boşluk)		(% 100 boşluk)	= 175 mm
100 mm kalınlık		150 mm kalınlık		100 mm yükseklik	



Şekil 3.2 Bordürlü geçirimli kaplama sistemlerinin enine kesiti (Leming ve diğer, 2007)

Yukarıdaki hesaplamalarda kritik olan varsayım sistemin düz inşa edilmesidir. Ancak sistem düz olarak değil de eğimli olarak inşa edilir ve yerel zeminin geçirimlilik kapasitesi aşılsa, döşemenin daha üstte bulunan bölümleri tam olarak suyla dolmayacak ve su aşağıda bulunan bölümlere akarak burayı dolduracaktır. Bu bölümün dolması sonucunda su kaplamadan dışarıya akacak ve geçirimli betonun faydalı etkileri sınırlanacaktır (Tennis ve diğer., 2004). Eğimden dolayı depolama kapasitesinde oluşan bu kayıplara dikkate edilmeli ve olabildiğince düz inşa edilmelidir (Şekil 3.3). Eğim zorunlu ise drenaj sistemi planlanmalıdır.



Şekil 3.3 Eğimli döşemelerde, alt tabanın geçirimsizlik değerinin aşılması durumunda oluşan depolama hacmi kaybı (Tennis ve diğer., 2004)

3.1.2.2 Hidrolojik Tasarım Metotları

Geçirimli beton kaplama sistemlerinin hidrolojik tasarımında kullanılan metotlar şunlardır: Soil Conservation Metodu, Los Angeles County Metodu, Rational Metodu, Curve Number Metodudur. Rodden ve Smith (2011) yaptıkları çalışma kapsamında geçirimsiz beton kaplama sistemlerinin hidrolojik tasarımında Los Angeles County Metodunu uygulamış ve çalışmalarında aşağıdaki eşitlikleri kullanmışlardır.

$$V = (Ap + Ab) * I \quad (3.2)$$

V : tasarımda drene edilecek suyun hacmi (m^3)

Ap : geçirimsiz beton yüzey alanı (m^2)

Ab : geçirimsiz yüzey alanı (m^2)

I : yağmur yoğunluğu (m)

Rodden ve Smith (2011) tasarımda gerekli olan geçirimsiz beton kaplama alanının belirlenmesinde eşitlik 3.3'ü önermiştir.

$$Ap = \frac{V}{rs*hs+rc*hc+hcurb} \quad (3.3)$$

rs : alt temel (rezarvuar tabakası) boşluk oranı (%)

hs : alt temel (rezarvuar tabakası) kalınlığı (m)

$hcurb$: göllenme yüksekliği (m)

rc : geçirimsiz beton kaplamanın boşluk oranı (%)

hc : geçirimsiz beton kaplamanın yüksekliği (m)

Geçirimli beton kaplama alanının belirlenmesinden ve yapısal tasarım yapılırken hesaplanan diğer değişkenler belirlendikten sonra alt temel tabakasının kalınlığı eşitlik 3.4’le belirlenebilir.

$$hs = \frac{1}{rs} \left(\frac{V}{Ap} - hcurb - rc * hc \right) \quad (3.4)$$

Ancak depolanan suyun sürekli sistem içinde bulunmaması yerel zemine aktarılması gerektiğinden, sistem içinde alıkonulan suyun belirli bir sürede zemine drene edilebilmesi gerekmektedir ve bu süre genellikle 24 saattir (Rodden ve Smith, 2011). Bu sürenin belirlenmesinde eşitlik 3.5 kullanılır ve rezervuar kalınlığının yeterli olup olmadığı bu eşitlikle kontrol edilir.

$$td = \frac{rs*hs+rc*hc+hcurb}{E} \quad (3.5)$$

E: yerel zeminin geçirimsizlik değeri (m/saat)

td: geçirimli beton kaplama sisteminde bulunan suyun yerel zemine maksimum drene edilebilme süresi (saat)

3.2 Geçirimli Beton Kaplama İnşası

Yapısal ve hidrolojik tasarımı ile projelendirmesi yapılmış olan geçirimli beton kaplama sistemlerinin inşasında öncelikle alt temel tabakasının yerel zemine uygun şekilde hazırlanması gerekmektedir. Önceki bölümlerde belirtildiği üzere alt temel ve yerel zemin tabakası geçirimli kaplamaya destek sağlamada ve kaplama sisteminin su depolama kapasitesinde önemli bir parametredir. Yerel zemin ve alt temel tabakasının iyi derecede kaplamaya destek sağlaması için düzgün bir şekilde sıkıştırılmalı ve eğimi ayarlanmalıdır. Geçirimli betonun yüksek boşluk içeriğine sahip olması ve düşük oranda su içermesinden ötürü bünyesinden su kaybının meydana gelmemesi için yerleştirilmesinden önce alt temel tabakası nemli tutulmalıdır. Böylece kaplamanın alt yüzeyinden su kaybının meydana gelmesi önlenerek, geçirimli betonda dayanım kaybının önüne geçilir (ACI 522R-10, 2010).

Geçirimli beton pompayla sahaya ulaştırılamadığından, hazır beton mikser kamyonlarının sahaya ulaştırılması iyi planlanmalı; geçirimli beton yerleştirilmeye başlamadan önce alt temel tabakasının hazırlığı ve kalıpların yerleştirilmesi

tamamlanmalıdır. Yerleştirilme ve sıkıştırılma aşaması 20 dakika içinde tamamlanmalı ve hidrasyon için gereken suyun kaybedilmesi önlenmelidir (ACI 522R-10, 2010). Geçirimli betonlar genel olarak tasarlanan seviyeden 15 ile 20 mm daha yüksek seviyede dökülürler. Bu pay sıkıştırma işlemlerinin yapılabilmesi için bırakılmaktadır. Sıkıştırma işlemleri için çelik silindir veya vibrasyonlu master (daldırma tipi değil) kullanılır (Tennis ve diğer., 2004).

Geçirimli betonlar geleneksel betona göre daha az büzölmelerinden dolayı derz kesim aralığı için 6 m tavsiye edilmektedir. Derzler yalancı derz şeklinde olmalı ve çatlamayı önlemek için kaplama kalınlığının 1/4'ü kadar olmalıdır (Tennis ve diğer., 2004). Yüksek boşluk içeriğı ve geniş yüzey alanlarından dolayı geçirimli beton kaplamalarda kurumunun meydana gelmemesi için kür işleminin çabuk yapılması gerekmektedir. Bundan dolayı yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin tamamlanmasının hemen ardından yüzeyin plastik örtüyle kapatılması gerekmektedir. Uygun kür süresi olarak mineral katkı kullanılmamış karışımlar için 7 gün, kullanılan karışımlar için 10 gün tavsiye edilmektedir. Soğuk havalar için bu süre uzatılabilir (ACI 522R-10, 2010). Kür süresince kaplamaya trafik yükü uygulanmamalıdır. Trafiğe açıldıktan sonra, çevre düzenlenmesi için hazırlanmış materyaller kaplama yüzeyinde tıkanmanın oluşmaması için kaplama üzerine konulmamalıdır.

3.3 Beton Parke Taşı Standartları

Geçirimli betonun düşük miktarda su içeriğine sahip oluşu ve yüksek oranda boşluk içermesinden dolayı dayanımında düşüş meydana gelmemesi için uygulama alanlarına hızlı bir şekilde taşınması ve yerleştirilmesi gerekmektedir. Geçirimli betonun yerleştirilmesi sırasında gerekli önlemler alınmalı, alt temel ve temelin hazırlıkları önceden tamamlanmış olmalıdır. İşçilerin yerleştirilme süresince hızlı bir şekilde çalışarak kaplamadan meydana gelebilecek su kayıplarına izin vermemesi gerekmektedir. Aynı zamanda su kaybı üzerinde etkili olan hava ve rüzgâr şartlarına karşı da önlem alınmalıdır. Sıkıştırma işleminde standart ve şartnameler gözetilmeli, geçirimli beton yüzeyinde oluşabilecek çatlaklara karşı derzlerin teşkili sağlanmalıdır.

Özetle geçirimli beton kaplamaların geçirimlilik ve dayanım özellikleri sadece karışım oranlarına bağlı olmamakta; karışımın uygulanacak sahaya taşınmasından yerleştirilmesine; sahanın hava şartlarından işçilerin tecrübesine kadar birçok parametreden etkilenmektedir. Bundan dolayı bu tez kapsamında geçirimli betonun yerleştirilme esnasında dayanım ve geçirimlilik özelliklerinde oluşabilecek kayıpların önüne geçilmesi için ön üretimli parke taşı tarzında geçirimli beton kaplamaların geliştirilmesine çalışılmıştır. Bunun için parke taşı standartları incelenmiştir.

Günümüzde beton parke taşları hızlı bir şekilde imal edilebilmesi, ekonomik oluşları, yerli malzemeyle üretilibilmeleri, bozulan yüzeylerinin kolay onarımı yapılabilmesi gibi nedenlerle araç trafiğine maruz kalan şehir içi sokaklarda, yaya kaldırımlarında, meydanlarda, açık otoparklarda, yeşil alanlarda büyük ölçüde kullanılmaktadır (Semiz, 2006). Beton parke taşları kullanıldıkları yerlere ve amaçlara bağlı olarak çeşitli zorlamalara (aşınma, çarpma, çekme, eğilme) maruz kalırlar. Bu zorlamalar betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilediğinden betonun bu etkilere karşı yeterli mukavemete sahip olmaları gerekmektedir. Birçok ülke kullanılacak beton parke taşları için standartlar oluşturmuş ve bu standartlarında beton parke taşlarının dayanım, aşınma ve dayanıklılığı için kriterler öne sürmüşlerdir.

Bu çalışma kapsamında incelenen parke taşı standartları: TS 2824 EN 1338: 2005-04, ASTM C 936, Sri Lanka Standart Specifications for Concrete Paving Block ve Indian Standart IS 15658:2006'dır. İncelenen standartlarda beton parke taşının sahip olması istenen dayanım türü ve değerleri benzer olmayıp farklılıklar göstermekte olduğundan, Tablo 3.6' da bu değerler kıyaslamalı olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.6'da görüleceği üzere TS 2824 EN 1338 ve ASTM C936 standartlarında istenen dayanım gerekliliklerinde parke taşı kaplamalarının maruz kalacağı trafik koşulları dikkate alınmamış, iki standartta da tek dayanım limiti konulmuştur. ASTM C936 standardında basınç dayanım değeri belirtilirken, TS 2824 EN 1338 standardında ise yarmada çekme dayanım değeri belirtilmiştir. Ancak Hindistan ve

Sri Lanka Standartlarında ağırlaşan trafik yüklemeleriyle beraber artan basınç dayanımı gereklilikleri bulunmaktadır.

Tablo 3.6 Parke taşı standartlarında istenen dayanım gereklilikleri

Gereklilikler	TS 2824 EN 1338	ASTM C936	Sri Lanka Standart	Indian Standart
Basınç dayanımı (MPa)	X	Ortalama ≥ 55 MPa	A sınıfı 50 MPa B sınıfı 40 MPa C sınıfı 30 MPa Yaya yolu için 15 MPa	Trafik olmayan 30 MPa Hafif trafik 35 MPa Orta trafik 40 MPa Ağır trafik 50 MPa Çok ağır trafik 55 MPa
Çekme dayanımı (MPa)	Ortalama $\geq 3,6$ MPa Tek sonuç $>2,9$ MPa Min. Kırılma yükü 250 N/mm	x	x	x
Su emme (%)	A sınıfı için yok B sınıfı için ≤ 6	≤ 5	≤ 6	≤ 6
Aşınma	F sınıfı için yok H sınıfı için $\leq 20 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$ I sınıfı için $\leq 18 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$	$\leq 15 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$	$\leq 18 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$ (yaya yolu için kullanılacak beton parke taşları için yok)	x

Üretilen parke taşlarının yaya yolundan ağır trafik yüklerine kadar uygulanacak alanların özelliklerine göre çok farklı yüklemelere maruz kalabilecekleri göz önüne alındığında dayanım gerekliliklerinde trafik yüklemelerinin dikkate alınmasının daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL ÇALIŞMALAR, MATERYAL VE METOD

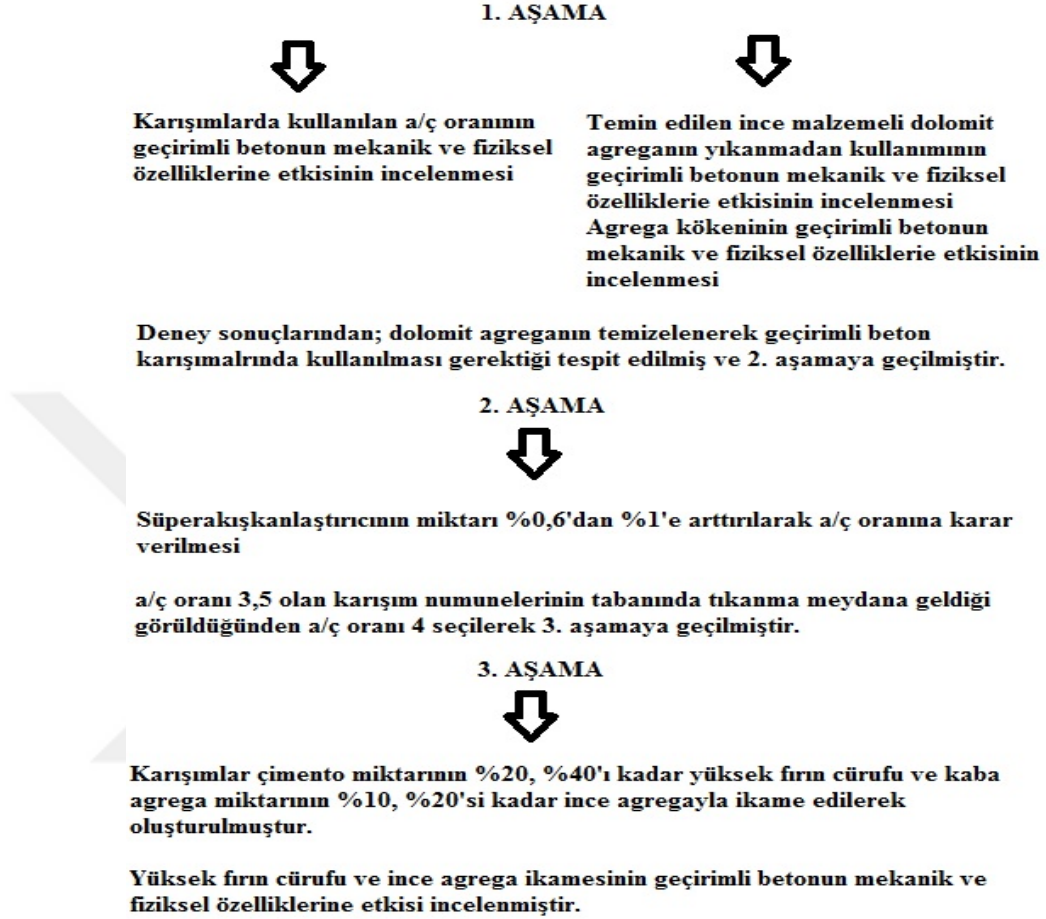
4.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma kapsamında yaya trafiğine ve hafif trafik koşullarına maruz kalacak kaplamalar için uygulanabilecek geçirimli beton parke taşları için karışım oranlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geçirimli beton; yaya yolu, park yeri, düşük yoğunluklu trafiğe sahip yol vb. uygulamalar için tasarlanan bir kaplama malzemesi olması nedeniyle yağışa maruz kalmaktadır. Bundan dolayı geçirimli betonun nem içeriğinde sürekli olarak bir değişim olduğundan geçirimli beton parke taşı numunelerinin ıslak ve kuru haldeki basınç dayanımları da bu çalışma kapsamında karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Geçirimli beton parke taşı karışım oranlarının belirlenmesi için çalışma temel olarak üç aşamaya bölünmüştür. İlk iki aşama son aşamanın ön çalışması gibi düşünülebilir. İlk aşamada Dere Madencilik firmasından temin edilen ince malzemeli dolomit agregaların geçirimli beton karışımında yıkanmadan kullanılıp kullanılamayacağı ve dolomit agregalarla oluşturulan karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin, Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda mevcut olan kireçtaşı agregalarıyla oluşturulan karışımlarla kıyaslanması yapılmıştır. Buna ek olarak geçirimli betonun dayanım özelliklerinde doğrudan etkisi olan agrega/çimento oranının dayanım değerleri üzerine etkisini görmek de amaçlanmıştır.

İkinci aşamada, ilk aşamadan çıkan sonuçlara göre karışımlarda dolomit agregaların yıkanarak kullanılmasının geçirimli beton parke taşının daha iyi mekanik dayanım verdiğinin tespit edilmesi üzerine, temiz (yıkılmış) dolomit ile hazırlanan karışımlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarı arttırılarak karışımların kalıp içinde daha iyi sıkışması amaçlanmıştır. Ancak a/ç oranı 3,5 olan karışımın geçirimli beton parke taşı numunelerinin alt yüzeyinde tıkanma meydana geldiği görüldüğünden, a/ç oranı 4 olarak seçilerek üçüncü aşamaya geçilmiştir.

Üçüncü aşamada, karışımda kullanılacak agrega tipine ve karışımın a/ç oranına karar verilmiş geçirimli beton karışımlarına, çimentonun ağırlıkça %20 ve %40 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile ikamesi; kaba agreganın ağırlıkça %10 ve

%20 oranında ince agrega ile ikamesi yapılarak hazırlanan geçirimli beton parke taşlarının dayanım, dayanıklılık ve geçirimlilik özellikleri incelenmiştir. Bu üç aşama Şekil 4.1’de özetlenmiştir.



Şekil 4.1 Geçirimli beton parke taşı karışım oranlarının geliştirme aşamaları

4.2 Kullanılan Malzemeler

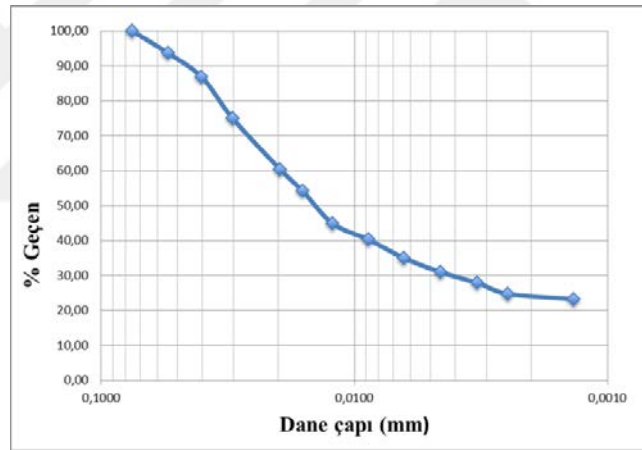
4.2.1 İnce ve Kaba Agregalar

Bu çalışmada; kireçtaşı agrega, ince malzemeli dolomit agrega, temiz (yıkamış) dolomit agrega ve ince agrega kullanılmıştır. İnce malzemeli dolomit agregası Dere Madencilik firmasından temin edilmiş olup ince malzemesi yıkanmadan kullanılmıştır. Temiz dolomit agregası ise ince malzemeli dolomit agreganın 0.063 mm elekten yıkanarak geçirilip temizlenmesi suretiyle elde edilmiştir. Kireçtaşı agregası ise Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'ndan elde edilmiştir. Tüm kaba agregaların elekten geçirilerek aynı tane boyutu (4 mm - 8 mm)

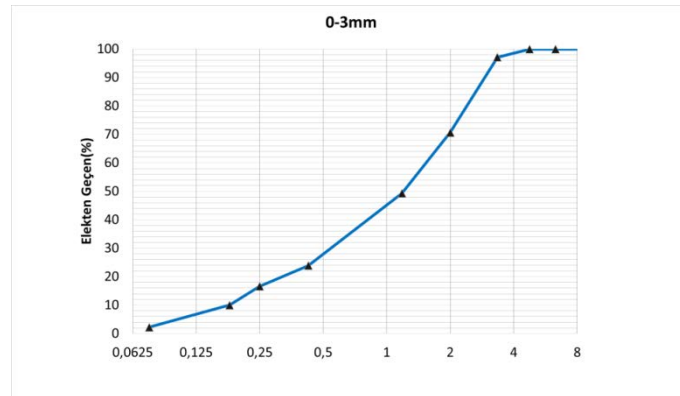
aralığında kalması sağlanmıştır. Kaba agregaların ve ince agreganın özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. İnce malzemeli dolomit agregaların kütlece %2’si ince malzemeden oluşmaktadır. İnce malzemenin %75.88’i siltten, %24.12’ si ise kilden oluşmaktadır. Kil-silt miktarı ASTM D 422 - 63 standardı kullanılarak bulunmuş olup, ince malzemenin hidrometrik yöntemle belirlenen tane boyut dağılımı Şekil 4.2’de verilmiştir. İnce agreganın tane boyut dağılımı da Şekil 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Tez çalışmasında kullanılan agregaların özellikleri

Agrega tipi	Agrega tane boyutu	Özgül Ağırlık	Su emme (%)	İnce malzeme içeriği (kütlece, %)
Kireçtaşı agregası	4-8 mm	2,70	0,3	-
İnce malzemeli dolomit agregası	4-8 mm	2,82	0,8	2
Dolomit agregası	4-8 mm	2,82	0,8	-
İnce agregası	0-3 mm	2,70	2,05	-



Şekil 4.2 İnce malzemenin tane boyut dağılımı



Şekil 4.3 İnce agreganın tane boyutu dağılımı

4.2.2 Çimento ve Yüksek Fırın Cürufu

Deneylede çimento olarak Çimentaş firması tarafından üretilen CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çalışmada Portland çimentosuna ek olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu da kullanılmıştır. Portland çimentosu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri üreticiden temin edilmiş olup, Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 CEM I 42.5R çimento ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal ve fiziksel özellikleri		Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	CEM I 42.5R
Kimyasal Bileşimi (%)	SiO ₂	39,98	18,11
	Al ₂ O ₃	11,06	4,42
	Fe ₂ O ₃	0,77	3,09
	CaO	32,95	63,43
	MgO	10,26	1,31
	Na ₂ O	-	0,41
	K ₂ O	-	0,79
	SO ₃	0,34	3,54
	Kızdırma kaybı	2,34	3,80
	Cl	0,0075	0,010
Özgül ağırlık		2,87	3,09
Özgül yüzey (m ² /kg)		550	315
28 günlük basınç dayanımı (MPa)		-	51
Priz başlangıç/bitiş süresi (dk)		-	200/285

4.2.3 Su ve Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

Tüm karışımlarda şehir şebekesi suyu kullanılmıştır. Ayrıca bağlayıcı malzeme içeriğinin kütlege %0,6'sı ile %1'i arasında değişen Grace firmasının ürettiği AdvaFlow 135N ticari isimli süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Söz konusu katkı TS EN 934-2 standardına uygun olup, üreticiden temin edilen özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 AdvaFlow 135N ticari isimli süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Malzemenin yapısı	Modifiye edilmiş sentetik polikarboksilat polimer
Yoğunluğu	1,070 ± 0,02 g/cm ³
pH değeri	4,5 ± 1,0
Alkali içeriği (%)	< 7,0
Klorür içeriği (%)	< 0,10

4.3 Karışım Oranları

Çalışmanın ilk aşamasındaki geçirimli beton karışımlarında üç tip kaba agreg (kireçtaşı, dolomit ve ince malzemeli dolomit) kullanılmış ve 3,5;4;4,5 olmak üzere üç adet agreg/çimento oranı literatür taraması baz alınarak belirlenmiştir. Tüm karışımlar için su/çimento oranı sabit olup 0,3'tür. İlk aşamadaki geçirimli beton karışım oranları Tablo 4.4'de verilmiştir. Tablo 4.4'de karışım isimlendirmeleri agreg kökeni ve a/ç oranına göre yapılmıştır.

Tablo 4.4 Çalışmanın ilk aşamasında üretilen geçirimli beton karışım oranları

Agrega tipi	Karışım kodu	Su/çimento (ağırlıkça)	Agrega/çimento oranı (ağırlıkça)	Süperakışkanlaştırıcı/çimento (%)
Kireçtaşı	K3,5	0,3/1	3,5/1	0,6
	K4,0	0,3/1	4/1	0,6
	K4,5	0,3/1	4,5/1	0,6
Yıkanmış Temiz Dolomit	D3,5	0,3/1	3,5/1	0,6
	D4,0	0,3/1	4/1	0,6
	D4,5	0,3/1	4,5/1	0,6
İnce Malzemeli Dolomit	İD3,5	0,3/1	3,5/1	0,6
	İD4,5	0,3/1	4,5/1	0,6

* İnce malzemeli dolomit agregası, a/ç oranının üst ve alt sınır değerlerinde (3,5 ve 4,5) kullanılmıştır

Çalışmanın ikinci aşamasında temiz dolomit kullanılan karışımlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarı %0,6'dan %1'e çıkarılmıştır. Üretilen numunelerin tabanlarında tıkanma meydana gelip gelmediği gözlenmiş ve a/ç oranı 3,5 olan karışım numunelerinin tabanlarında tıkanma meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 4.4). Bundan dolayı çalışmanın üçüncü bölümünde kullanılacak a/ç oranı 4 olarak belirlenmiştir. İkinci aşamada üretilen geçirimli beton numunelerinin karışım oranları Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5 Çalışmanın ikinci aşamasında üretilen geçirimli beton karışım oranları

Agrega tipi	Agrega/çimento (ağırlıkça)	Su/çimento (ağırlıkça)	Süperakışkanlaştırıcı/çimento (%)	Tabanda tıkanma oluşumu
Yıkanmış Temiz Dolomit	3,5/1	0,3/1	1	✓
	4/1	0,3/1	1	×
	4,5/1	0,3/1	1	×



Şekil 4.4 a) Çimento pastasının tabana çökerek numunelerin tabanını tıkaması b) Tabanı tıkalı numunelerin yandan görünüşü (Kişisel arşiv, 2019)

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında karışımlarda temiz dolomit agrega kullanılmasına ve a/ç oranının 4 olarak seçilmesine karar verilmiştir. Bu geçirimli beton karışımlarında, çimento miktarının %20 ve %40 oranlarında yüksek fırın cürufuyla ikamesi ve kaba agrega miktarının da %10 ve %20 oranında ince kum agregayla ikamesi yapılarak karışım oranları hazırlanmıştır. Üçüncü aşamadaki geçirimli beton karışım oranları Tablo 4.6'da verilmiştir. Tablo 4.6'da karışım isimlendirmeleri yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesine göre yapılmıştır.

Tablo 4.6 Çalışmanın üçüncü aşamasında üretilen geçirimli beton karışım oranları

Karışım Kodu	Kaba agrega/ İnce agrega (ağırlıkça)	Su/bağlayıcı malzeme (ağırlıkça)	Agrega/bağlayıcı malzeme (ağırlıkça)	Çimento/yüksek fırın cürufu (ağırlıkça)	S.akışkanlaştırıcı/ bağlayıcı malzeme (%)
F0İ0	4/0	0,3/1	4/1	1/0	1
F0İ1	3,6/0,4	0,3/1	4/1	1/0	1
F0İ2	3,2/0,8	0,3/1	4/1	1/0	1
F2İ0	4/0	0,3/1	4/1	0,8/0,2	0,6
F2İ1	3,6/0,4	0,3/1	4/1	0,8/0,2	1
F2İ2	3,2/0,8	0,3/1	4/1	0,8/0,2	1
F4İ0	4/0	0,3/1	4/1	0,6/0,4	0,6
F4İ1	3,6/0,4	0,3/1	4/1	0,6/0,4	0,8
F4İ2	3,2/0,8	0,3/1	4/1	0,6/0,4	0,8

4.4 Beton Karışımlarının ve Numunelerinin Hazırlanması

Taze betonun karıştırılmasında 12.5 dm³ etkin karıştırma kapasiteli eğik eksenli 30 devir/dakika dönüş hızlı bir portatif laboratuvar mikseri kullanılmıştır (Şekil 4.5). Beton karıştırma süreci 3 aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada kuru karışım (çimento, agregalar ve varsa mineral katkı) 1 dakika karıştırılmıştır. İkinci aşamada karışım hesabında bulunan su miktarının 2/3'ü karışıma ilave edilmiş karışım 1 dakika daha karıştırılmıştır. Üçüncü aşamada kalan su ve süperakışkanlaştırıcının tamamı karışıma eklenerek karışım 1 dakika daha karıştırılmış ve sonlandırılmıştır.

Basınç ve yarmada çekme deneyleri için üçer adet, boşluk oranı ve geçirimsizlik deneyleri için ise üç adet olmak üzere her bir karışım için dokuz adet 100 mm ayrıtlı küp numune hazırlanmıştır. Bunlara ek olarak çalışmanın üçüncü aşamasını oluşturan karışımlar içinde aşınma deneylerinde kullanılmak üzere her bir karışım için 3 adet 71 mm ayrıtlı küp numune hazırlanmıştır. Karışımlar kalıplara 2 katman halinde ve her katmanda 25 kez şişleme yapılarak yerleştirilmiştir. Numuneler 1 gün kalıp içinde bekletildikten sonra kalıptan çıkarılarak su kaybına uğramayacak şekilde ince plastik film ile sarılmıştır. Numuneler 27. güne kadar laboratuvar ortamında bekletilerek kür edilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasını oluşturan karışım numunelerinden her bir karışım için 9 tanesi 27. günde 40 °C'de etüve yerleştirilmiştir. Numuneler 1 gün süreyle etüvde bekletildikten sonra çıkartılmıştır. Etüvde bekletilen numunelerden her bir karışım için kuru halde 3 adedi 28. günde basınç testine 3 adedi ise yarmada çekme testine

tabi tutulmuşlardır. Etüvde kalan üçü ise yoğunluk, boşluk oranı ve geçirimsizlik deneyleri için 1 gün daha 40 °C'de etüvde bekletilmiştir. Söz konusu numunelerin 29. günde yoğunluk, boşluk oranı ve geçirimsizlik değerleri belirlenmiş ve bu deneyler belirtilen sırada gerçekleştirildikten sonra ıslak haldeki numuneler de basınç dayanım testine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 4.5 Geçirimli beton üretiminde kullanılan portatif beton mikseri (Kişisel arşiv, 2019)

Çalışmanın üçüncü aşamasını oluşturan karışımların numunelerinden her bir karışım için 6 tanesi 27. günde 40 °C'de etüve yerleştirilmiş kalan üçü ise su dolu tanka yerleştirilmiştir. Numuneler 1 gün süreyle etüvde ve su dolu tankta bekletildikten sonra çıkartılmıştır. Etüvde bekletilen numunelerden her bir karışım için 3 adedi kuru halde 28. günde basınç testine ve su dolu tanka atılan 3 adedi ise sudan çıkarılıp numunenin yüzey suyu temizlendikten sonra yarmada çekme testine tabi tutulmuşlardır. Etüvde kalan üçü ise yoğunluk, boşluk oranı ve geçirimsizlik deneyleri için 1 gün daha 40 °C'de etüvde bekletilmiştir. Söz konusu numunelerin

29. günde yoğunluk, boşluk oranı ve geçirimsilik değerleri belirlenmiş ve bu deneyler belirtilen sırada gerçekleştirildikten sonra ıslak haldeki numuneler de basınç dayanım testine tabi tutulmuşlardır. Aşınma deneyi için hazırlanan küp numuneler ise 28. günde deneye tabi tutulmuşlardır.

4.5 Deney Yöntemleri

4.5.1 Basınç ve Yarmada Çekme Deneyleri

Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri sırasıyla TS EN 12390-3 ve TS 2824 EN 1338 standartlarındaki yükleme şartlarına uygun olarak 100 mm ayrıtlı küp numunelerde gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımının belirlenmesinde her bir karışım için 3 adet numune 28. günde etüvden çıkarıldıktan sonra başka bir deneye tabi tutulmadan kuru halde, boşluk oranı ve geçirimsilik deneyi yapılan örnekler ise 29. günde ıslak halde basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı değerlerinin belirlenmesinde eşitlik 4.1 kullanılmıştır.

$$F_c = \frac{P}{A_c} \quad (4.1)$$

F_c : Basınç dayanımı (MPa)

P : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük (N)

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı (mm²)



Şekil 4.6 Basınç dayanımı deneyi (Kişisel arşiv, 2019)

Yarmada çekme dayanımı deneyi 28. günde her bir karışım için 3 adet ıslak numunenin su dolu tanktan çıkarılıp suyunun süzülmesinin beklenmesinden sonra gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının ayrı ayrı ortalaması alınarak ıslak ve kuru haldeki betonun basınç dayanımı ve ıslak haldeki betonun yarmada çekme dayanımı değerleri belirlenmiştir. Yarmada çekme deney değerlerinin belirlenmesinde TS EN 1338 standardında verilen eşitlik 4.2 kullanılmıştır. Parke taşı kalınlığı düzeltme katsayısı küpün ayırıtı 100 mm olduğu için 1,11 alınmıştır.

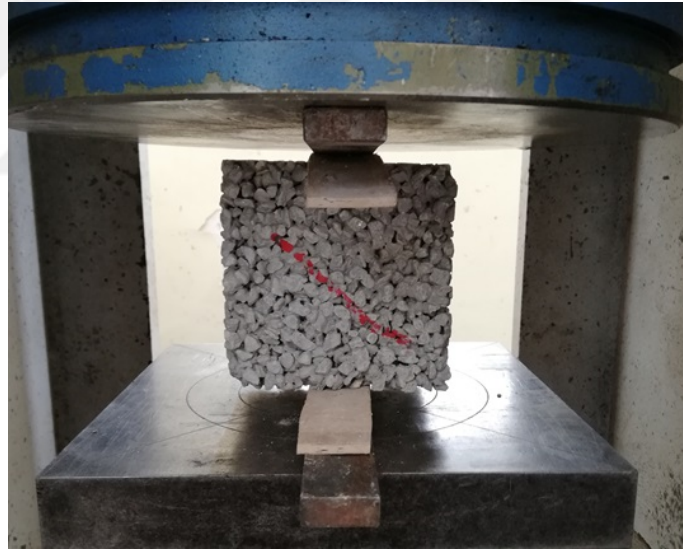
$$T = \frac{0.637kP}{S} \quad (4.2)$$

T : Dayanım (MPa)

P : Kırılma yükü (N)

k : Parke taşı kalınlığı düzeltme katsayısı

S : Kırılma alanı (mm²)



Şekil 4.7 Yarmada çekme dayanımı deneyi (Kişisel arşiv, 2019)

4.5.2 Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Geçirimsizlik Deneyleri

Birim Hacim Ağırlık değerleri; numunelerin etüv kurusu ağırlığının (40°C de 2 gün bekletilen etüv kurusu ağırlığı), hacim değerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Numunelerin hacmi kumpas ile her kenarından 2 ölçümün ortalaması alınarak bulunan uzunlukların çarpımıyla hesaplanmıştır.

Boşluk oranı ASTM C1754/C1754M-12 standardında belirtilen A metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu metot kullanılarak geçirimli betonun boşluk oranı değerinin belirlenmesinden sonra diğer özelliklerinin de (dayanım ve geçirimlilik gibi) belirlenmesi mümkün olduğundan A metodu kullanılmıştır. Bu metoda göre deneylerin yapılabilmesi için numunelerin 40°C'de 24 saat boyunca etüve atılmasından önce ve sonrasında tespit edilen ağırlıklarının arasındaki farkın %0.5 in altına inmesi gerektiğinden numunelerin toplamda 2 gün etüvde 40°C'de kalması gerekmiştir. Bundan dolayı birim hacim ağırlık ve boşluk oranı deneyi 29. günde yapılmıştır. Söz konusu deneylerin tamamlanmasından sonra geçirimlilik deneyi yapılmıştır. Boşluk oranı tayininde eşitlik 4.3 kullanılmıştır.

$$P = \left[1 - \left(\frac{W_2 - W_1}{\rho_w Vol} \right) \right] 100(\%) \quad (4.3)$$

P : Boşluk oranı (%)

W_1 : Numunenin su içindeki ağırlığı (g)

W_2 : Numunenin fırın kurusu ağırlığı (g)

Vol : Numunenin hacmi (cm³)

ρ_w : Suyun yoğunluğu (g/cm³)

Geçirimlilik değerlerinin belirlenmesinde ASTM C1701/C1701M-17a standardından esinlenilmiştir. Geçirimli beton parke taşı numunelerinin yanıl yüzeylerinden akışın meydana gelmemesi için etrafı lateks membranla sarılıp sızdırmazlık sağlanmıştır. Sonrasında 60,5 mm iç çaplı şeffaf boru küp numune üzerine yerleştirilmiştir. Borunun numuneye temas ettiği yüzeyden de sızmanın meydana gelmemesi için plastik kıvamlı hamur ile etrafı sarılmış ve düzenek deneye hazırlanmıştır (Şekil 4.8). Boruya 600 cm³ su konulup su sütununun 400 cm³'ten 200 cm³'e düşmesine kadar geçen süre ölçülmüştür. Eşitlik 4.4 kullanılarak geçirimlilik değeri belirlenmiştir.

$$\Phi = \frac{V_w}{A \cdot t} \quad (4.4)$$

Φ : Geçirimlilik (cm/s)

V_w : Tutulan süre içerisinde geçen su hacmi (200 cm³)

t : 200 cm³ suyun geçme süresi (s)

A : Numune yüzey alanı (100 cm²)



Şekil 4.8 Geçirimlilik deneyi düzeneği (Kişisel arşiv, 2019)

4.5.3 Aşınma Deneyi

Bu çalışmada tasarlanan geçirimli beton küp parke taşlarının yol kaplaması için standarda uygunluğu değerlendirmek istendiğinden aşınma direncinin belirlenmesinde TS 2824 EN 1338 standardının Ek H başlığı altında anlatılan alternatif metot olan Böhme deneyi kullanılmıştır (Şekil 4.9). Bu deneyde öncelikle numunelerin yoğunluğu boyutların 0,1 mm kütlelerin 0,1 g yaklaşımla ölçülmesi yoluyla bulunmuştur. Sonrasında deney izine 20 g standart aşındırıcı konulmuş ve numune eksenel olarak 294 N ile yüklenmiştir. Sonrasında numuneye her biri 22 dönüşten meydana gelen toplamda 16 çevrim uygulanmıştır. Her bir çevrim içerisinde numune 90⁰ döndürülmüş, disk ve temas yüzü temizlenmiştir. Her 4

evrimden sonra numune 0,1 g doğrulukla tartılmış ve 16 çevrim sonunda kütle kaybı bulunmuştur. Eşitlik 4.5 kullanılarak hacim kaybı değerleri bulunmuştur.

$$\Delta I = \frac{\Delta m}{\rho R * A} \quad (4.5)$$

ΔI : 16 evrimden sonra kalınlık kaybı (mm³/mm²)

Δm : 16 çevrimden sonra kütle kaybı (g)

ρR : Numunenin yoğunluğu (g/mm³)

A : Numunenin yüzey alanı (mm²)



şekil 4.9 Aşınma deneyi (Kişisel arşiv, 2019)

BÖLÜM BEŞ

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Deneysel çalışmadan elde edilen tüm veriler (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, boşluk oranı, geçirimsizlik değerleri, kuru birim hacim ağırlıkları, aşınma direnci) Tablo 5.1’de 3’er numune ortalaması alınarak verilmiştir. Bu bölümde deneysel çalışmadan elde edilen tüm veriler grafiklerle desteklenerek değerlendirilmiş ve tartışılmıştır.

Tablo 5.1 Geçirimli beton parke taşlarının mekanik ve fiziksel özellikleri

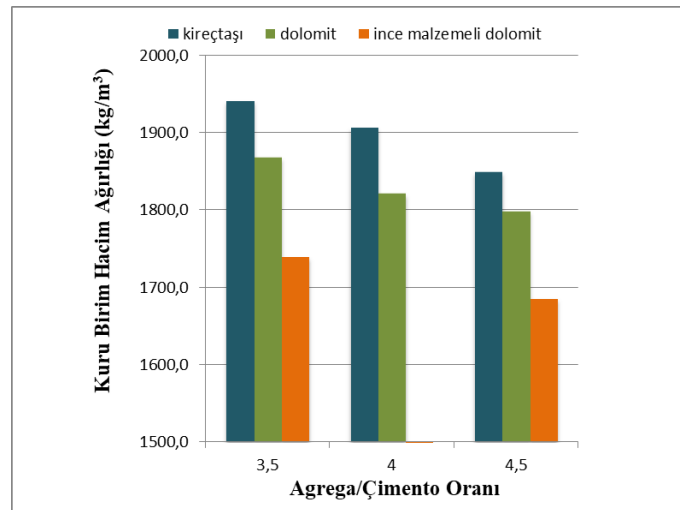
	Karışım kodu	Kuru birim hacim ağırlık (kg/m ³)	Boşluk içeriği (%)	Kuru basınç dayanımı (MPa)	Islak basınç Dayanımı (MPa)	Yarmada çekme dayanımı (MPa)	Geçirimsizlik (cm/s)	Aşınma Sonucu Kalınlık kaybı (mm ³ /mm ²)
1. Aşama Karışımları	K3,5	1941,5	21,9	20,0	16,1	2,79	0,32	x
	K4,0	1906,7	24,2	16,2	12,8	2,23	0,63	x
	K4,5	1849,5	27,7	15,4	11,4	2,07	0,89	x
	D3,5	1868,1	24,0	17,5	15,3	2,49	0,53	x
	D4,0	1821,1	28,9	15,4	12,3	2,07	1,00	x
	D4,5	1798,5	30,0	14,1	11,3	1,77	1,35	x
	İD3,5	1739,9	30,0	10,6	7,7	1,70	1,28	x
	İD4,5	1685,7	33,5	7,0	5,5	1,30	3,04	x
3. Aşama Karışımları	F0İ0	1907,1	24,7	22,8	19,1	2,61	0,72	4,8
	F0İ1	1933,2	19,3	24,9	21,2	3,24	0,27	4,2
	F0İ2	2010,3	16,0	28,6	24,0	3,60	0,05	3,9
	F2İ0	1833,1	29,3	20,1	14,6	2,34	1,00	5,1
	F2İ1	1966,3	21,0	28,5	23,5	3,13	0,45	4,1
	F2İ2	2014,5	16,0	30,9	25,4	3,33	0,08	3,6
	F4İ0	1836,7	26,7	21,3	17,5	2,16	0,92	5,0
	F4İ1	1870,5	21,0	24,3	19,7	2,94	0,40	4,3
	F4İ2	1948,9	15,7	26,1	23,2	3,44	0,11	4,1

* 2. Aşama karışımları için sadece tıkanma kontrolü yapılmıştır.

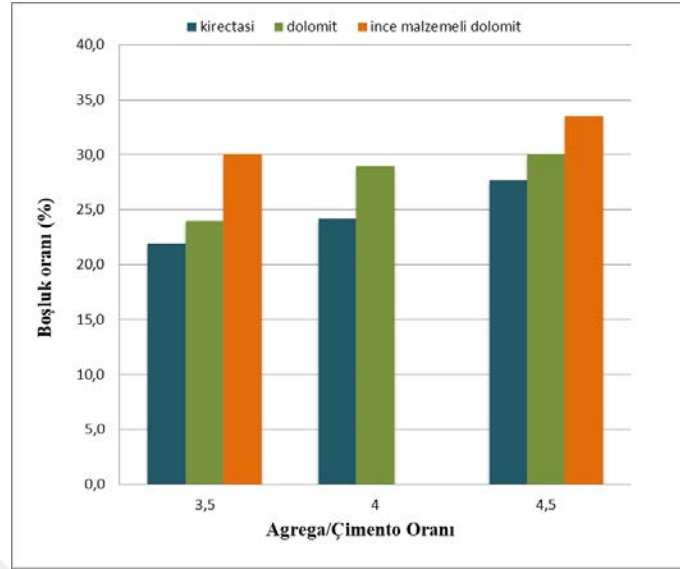
5.1 Kuru Birim Hacim Ağırlığı ve Boşluk İçeriği

Deneysel çalışmanın ilk aşamasındaki karışımlarda kullanılan a/ç oranı ve agrega kökenin geçirimli betonun boşluk içeriği ve kuru birim hacim ağırlığına etkisi Şekil

5.1 ve 5.2’de gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere karışımda kullanılan a/ç oranı arttıkça sertleşmiş numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarında düşüş meydana gelmektedir. Agregada etrafını kaplayan çimento pasta kalınlığı, a/ç oranının artmasıyla beraber azalmakta böylece geçirimli beton numunelerinin boşluk içeriklerinde artış meydana gelmektedir. Bu da numunelerin kuru birim hacimde ağırlık değerlerinde azalmaya yol açmaktadır. Karışımlarda aynı tane boyut dağılımı aralığında kireçtaşı ve dolomit agregası kullanılmış olsa da agregaların boyut dağılımı 4-8 mm arasında dahi farklılık gösterebilmektedir. Bundan dolayı agregada etrafında oluşan çimento pastası kalınlığı değişebilmektedir. Her bir agregası tipi için aynı a/ç oranında karışımlar tasarlanmış olmasına rağmen, agregaların 4-8 mm arasındaki olası farklı boyut dağılımından ötürü, temiz dolomit kullanılan numunelerin kireçtaşı kullanılan numunelere göre boşluk oranı değerlerinin daha fazla olduğu düşünülmektedir. İnce malzemeli dolomit kullanılan numunelerin temiz yıkanmış dolomit kullanılan numunelerle karşılaştırıldığında, boşluk oranı değerlerinin aynı a/ç oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. İnce malzemeli dolomit kullanılan karışımlarda; agregası ve çimento hamurunda topaklaşmalar meydana gelmiştir. Böylece çimento hamuru numune içerisinde homojen dağılamamış ve belirli bölgelerde yoğunlaşmıştır (Şekil 5.3). Bundan dolayı boşluk oranı değerlerinin aynı a/ç oranında temiz dolomit kullanılan numunelere göre daha yüksek ve kuru birim hacim ağırlık değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.1 Agregası kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlığına etkisi (İnce malzemeli dolomit agregası, a/ç oranının üst ve alt sınır değerlerinde (3,5 ve 4,5) kullanılmıştır)

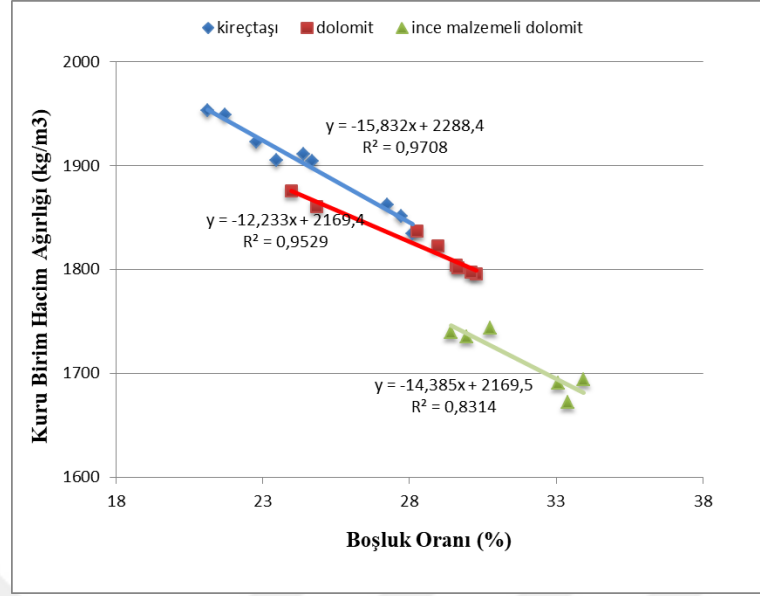


Şekil 5.2 Agregat kökeninin ve a/ç oranının geçirimsiz beton numunelerinin boşluk içeriğine etkisi



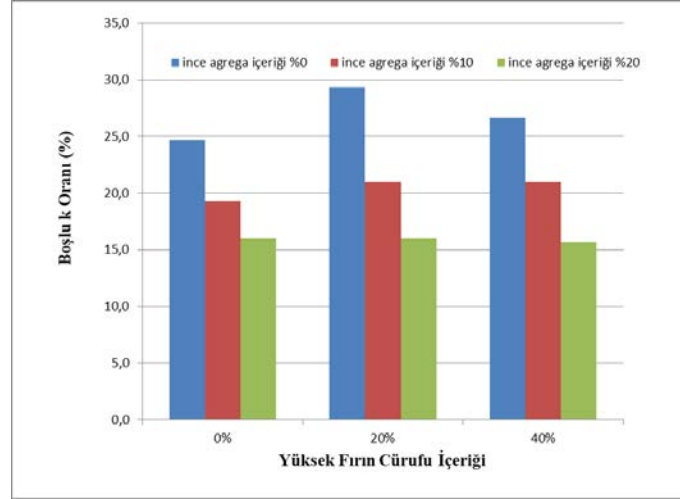
Şekil 5.3 İnce malzemeli dolomit kullanılan karışımların agrega ve çimento hamurunda topaklaşmaların meydana gelmesi (Kişisel arşiv, 2019)

İlk aşamadan elde edilen sertleşmiş beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlık ve boşluk oranları Şekil 5.4’de karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 5.4’de görüldüğü üzere sertleşmiş numunelerin boşluk içeriğindeki artış, kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalışa neden olmuştur.

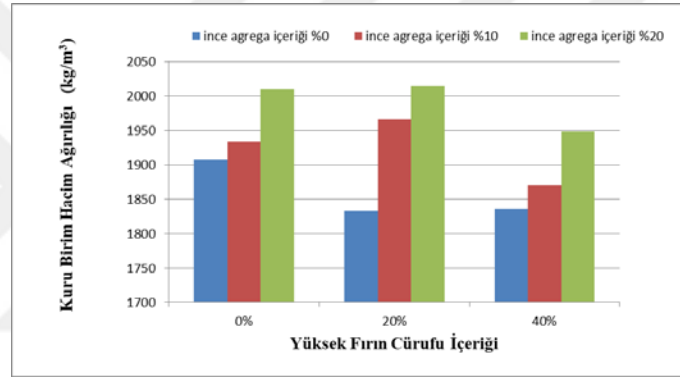


Şekil 5.4 Farklı türde agregalar ile üretilen geçirimli betonların kuru birim hacim ağırlık değerlerinin boşluk oranı ile değişimi

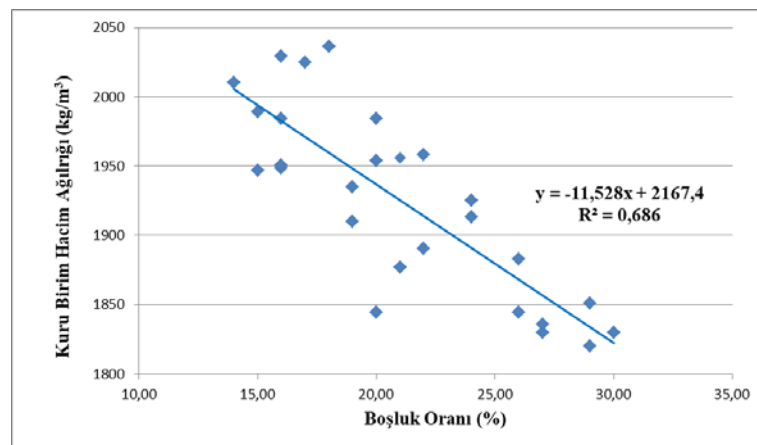
Deneysel çalışmanın üçüncü aşamasında karışımlara yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikame edilerek karışımlar oluşturulmuştur. Şekil 5.5 ve 5.6’da görüldüğü üzere ince agrega ikamesi arttıkça sertleşmiş numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri artmakta, boşluk içerikleri ise azalmaktadır. İnce agregalar küçük tane boyutlarından dolayı karışımlarda oluşan boşlukların bir bölümünü tıkarlar. Böylece numunelerin daha yoğun bir yapıya sahip olmasını sağlarlar. Bundan dolayı sertleşmiş numuneler daha yüksek kuru birim hacim ağırlığına ve daha az boşluk içeriklerine sahip olurlar. Şekil 5.7’de görüldüğü gibi yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikameli geçirimli beton numuneleri toplu halde değerlendirilecek olursa, numunelerin boşluk içeriği artışı ile beraber kuru birim hacim ağırlıklarında düşüş eğilimi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.5 İnce agrega ikamesinin geçirimli beton numunelerinin boşluk içeriğine etkisi



Şekil 5.6 İnce agrega ikamesinin geçirimli beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlık değerlerine etkisi



Şekil 5.7 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikameli geçirimli betonların kuru birim hacim ağırlık değerlerinin boşluk oranı ile değişimi

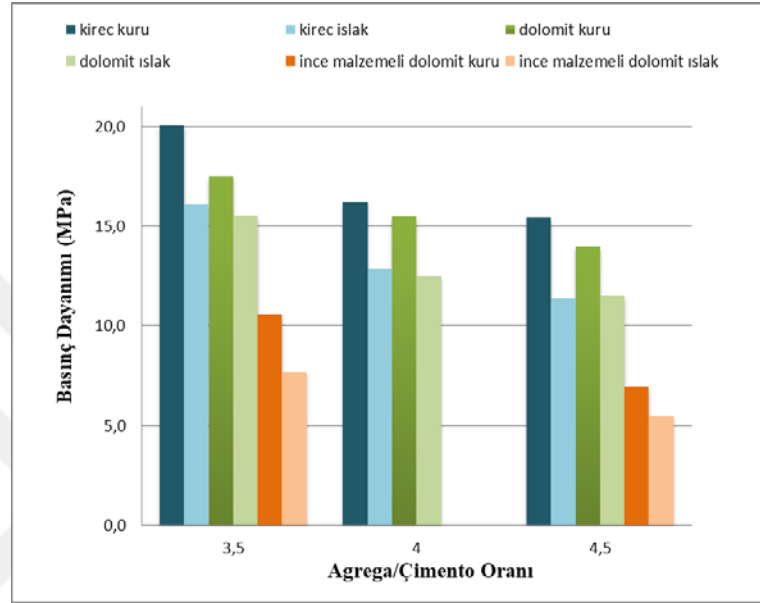
5.2 Basınç Dayanımı

Çalışmanın ilk aşamasındaki karışımlardan, aynı a/ç oranında kireçtaşı kullanılan numunelerin basınç dayanımları; temiz dolomit kullanılan numunelere göre, temiz dolomit kullanılan numunelerin ise ince malzemeli dolomit kullanılan numunelere göre daha fazladır (Şekil 5.8). Aynı zamanda karışımda kullanılan a/ç oranı arttıkça geçirimli beton numunelerinin basınç dayanım değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Agregada etrafında oluşan çimento hamuru kalınlığı, karışımların çimento içeriğinin artışı ile beraber (a/ç oranının düşmesi) artmaktadır. Çimento hamuru kalınlığı artışı geçirimli betonların dayanım değerlerinde artış meydana getirmektedir (Torres ve diğer., 2015). Karışımlarda her ne kadar aynı tane boyut aralığında agregalar kullanılsa da agregaların 4-8 mm arasındaki olası farklı boyut dağılımından ötürü kireçtaşı agregası kullanılan geçirimli beton numunelerinin aynı a/ç oranında, temiz dolomit ve ince malzemeli dolomit agregada kullanılan numunelere göre daha fazla dayanım gösterdikleri düşünülmektedir. Diğer yandan agregada kökeni de (minerolojik farklılıklar) basınç dayanımındaki azalmalar üzerinde etkili olmuş olabilir.

Şekil 5.8’de görüldüğü üzere ince malzemeli dolomit agregada kullanımı geçirimli betonun basınç dayanımı büyük ölçüde azaltmıştır. İnce malzeme çimento hamuru ve agregaların topaklaşmasına neden olmuştur. Böylece geçirimli betonun homojen yapısını bozarak, boşluk içeriğinde artışa neden olmuş ve basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Geçirimli betonların ıslak ve kuru olma durumlarına göre de basınç dayanımları değişmektedir (Şekil 5.8). Kuru basınç dayanımları ile ıslak basınç dayanımları arasındaki fark: Kireçtaşı agregası kullanılan numuneler için %19,5-26,2 arasında, dolomit agregada kullanılan numuneler için %13,3-19,7 arasında, ince malzemeli dolomit kullanılan numuneler için ise %21,3-27,4 arasında değişmektedir. Bu sonuçlara paralel olarak Ghafoori ve Dutta, (1995) geçirimli betonlar üzerinde yaptıkları incelemede, hava kurusu numunelerin basınç dayanımının ıslak durumdaki numunelerine göre %13 daha fazla olduğunu bildirmiştir. Her geçirimli beton grubu için kuru basınç dayanımı ıslak basınç dayanımından fazladır. Geleneksel betona benzer şekilde nemli durumdaki geçirimli beton numunelerinin de daha düşük basınç

dayanımı verme nedeninin; çimento hamur fazındaki CSH jeline adsorbe olan su moleküllerinin tabakaları birbirinden uzaklaştırması ve bu nedenle Van der Waals bağlarının zayıflaması olduğu düşünülmektedir. Bu konuda literatürde geleneksel beton için de benzer bulgular elde edilmiştir (Neville, 2011; Chen, Huang ve Zhou, 2012).



Şekil 5.8 Agregat kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımına etkisi

Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesi yapılan karışımların kuru ve ıslak basınç dayanım değerlerindeki değişim Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Yüksek fırın cürufu içermeyen numunelerin kuru basınç dayanımları 22,8 MPa ile 28,6 MPa arasında, ıslak basınç dayanımları ise 19,1 MPa ile 24 MPa arasında değişmektedir. %20 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan numunelerde kuru basınç dayanımları 20,1 MPa ile 30,9 MPa arasında, ıslak basınç dayanımları ise 14,6 MPa ile 25,4 MPa arasında değişmektedir. %40 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan numunelerde kuru basınç dayanımları 21,3 MPa ile 26,1 MPa, ıslak basınç dayanımları ise 17,5 MPa ile 23,2 MPa arasında değişmektedir.

Şekilde de görüldüğü üzere ince agrega ikamesi arttıkça (%0'dan %20'ye) geçirimli beton numunelerinin ıslak ve kuru basınç dayanım değerlerinde artış meydana gelmektedir. Bunun nedeninin ince agrega ikamesiyle beraber azalan boşluk içeriğinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Daha önce belirtildiği üzere

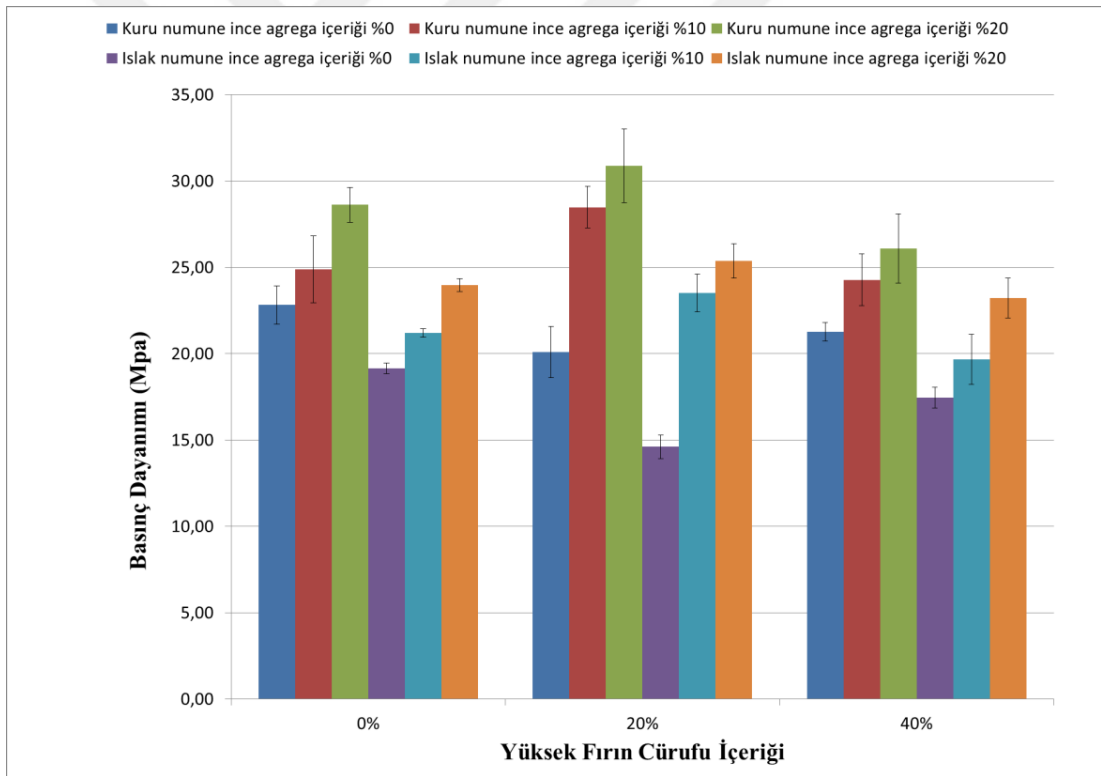
basınç dayanımı ve boşluk içeriği arasında güçlü bir korelasyon bağlantısı vardır ve geçirimli betonun boşluk içeriğindeki azalış basınç dayanımında artış meydana getirmektedir (Kia ve diğer., 2017).

Geçirimli betonların agrega ve çimento pastası arasındaki ara yüzey bağlayıcı bölgesinin dayanımı düşük olduğu için yük altında kırılma bu ara yüzeylerde meydana gelmektedir (Yang ve Jiang, 2003). Bundan dolayı çimento bağlayıcı matriksini kuvvetlendirerek geçirimli betonun dayanımında artış sağlanabilir. Şekil 5.8’de görüldüğü üzere %20 oranında yüksek fırın cürufu ikamesi %10 ve %20 oranında ince agrega ikamesi yapılan karışımlarda (F2İ1 ve F2İ2) en yüksek dayanım değerleri elde edilmesini sağlamıştır. Ancak, ince agrega ikamesi yapılmayan karışım (F2İ0) numunesinde %20 yüksek fırın cürufu ikamesi dayanımda düşüşe neden olmuştur. Yüksek fırın cürufu partikülleri yüzey özellikleri ve pürüzsüzlüklerinden dolayı betonun işlenebilirlik özelliklerini artırırlar. Bundan dolayı %20 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmış ancak ince agrega ikamesi yapılmamış karışımda (F2İ0) kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarı numune altında tıkanma olmaması için %1’den %0,6’ya düşürülmüştür. Dolayısıyla F2İ0 karışımından üretilen geçirimli beton numuneleri, katkı azlığından daha boşluklu yapıya sahip oldukları için daha düşük dayanım gösterdikleri düşünülmektedir. Buna paralel olarak Şekil 5.5’te de görüldüğü üzere en yüksek boşluk içeriği F2İ0 karışım numunelerinde elde edilmiştir.

Tüm karışım sonuçları incelendiğinde, ASTM C936 parke taşı standardında istenen 55 MPa basınç dayanımı gerekliliğinin geçirimli beton numuneleriyle sağlanamadığı görülmüştür. ASTM C936 standardında trafik yüklemelerinin basınç dayanım gerekliliği üzerinde etkisi olmayıp, tek değer olarak 55 MPa dayanım istenmektedir. Bu dayanım değerinin neredeyse tamamen dolu geleneksel beton parke taşlarında bile sağlanması zorken, yüksek oranda boşluk içeren geçirimli beton kaplamalarında elde edilmesi çok daha güçtür. Bundan dolayı standardın, geçirimli betonlar için özelleştirilmesinde fayda olduğu değerlendirilmektedir.

En yüksek basınç dayanım değerlerinin %20 yüksek fırın cürufu ve %10-%20 ince agrega ikamesi yapılan numunelerde elde edildiği tespit edilmiştir. %20 yüksek fırın cürufu ve %20 ince agrega ikamesi yapılan geçirimli beton numunelerinde kuru

basınç dayanım ortalaması Sri Lanka standardında C sınıfı trafik kategorisi ve Hindistan standardında trafik olmayan kaplamalar için istenen 30 MPa'ı aşmıştır. Ancak, bu dayanım ıslak durumda 25,4 MPa'a gerilemiştir. Tüm karışım grupları için ıslak basınç dayanımları, standartlarda en düşük trafik kategorisi için istenen dayanım değerlerinin altında kalmıştır. Ancak Sri Lanka standardında kaldırım gibi sadece yaya kullanıma açık alanlarda kullanılmak üzere üretilen kaplamalar için gerekli olan 15 MPa dayanım değeri; F2İ0 karışım numuneleri hariç tüm karışım numuneleri için elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufu ikamesi %40'a çıkarılan karışım numunelerinden elde edilen basınç dayanım değerleri incelendiğinde 28 gün için, %20 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan karışım numunelerindeki dayanım gelişiminin kaybedildiği görülmektedir. %40 yüksek fırın cürufu ikameli serilerin uzun vadede dayanımı geç puzolanik ve hidrolik aktivitesi nedeniyle gelişebilir.



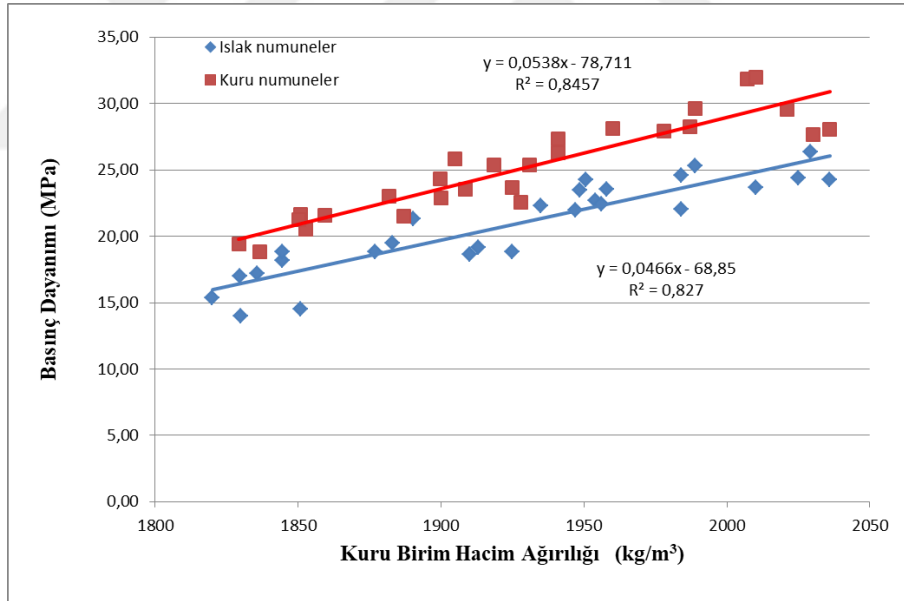
Şekil 5.9 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesinin geçirimli beton numunelerinin basınç dayanımına etkisi (hata çubukları $\pm$ standart sapmadır)

%40 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan karışım sonuçlarıyla, yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmayan karışım sonuçları karşılaştırıldığında birbirine benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Özellikle yaya kaldırımları gibi yüklemelere maruz

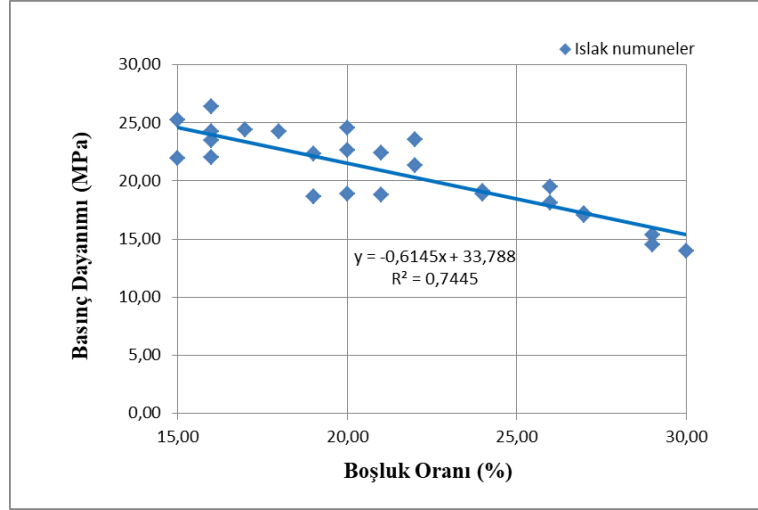
kalacak kaplamalar için tasarlanan karışımlarda, yüksek oranda yüksek fırın cürufu ikamesi yapılarak çimento tasarrufu yapılabileceği değerlendirilmektedir.

Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesi yapılan geçirimli beton numunelerinin de her bir karışım grubu için kuru basınç dayanımları ıslak basınç dayanım değerlerinden daha fazladır (Şekil 5.9). Şekil 5.10'da numunelerin ıslak ve kuru basınç dayanım değerlerinin kuru birim hacim ağırlığı ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.10'da görüldüğü üzere numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri arttıkça geçirimli beton numunelerinin ıslak ve kuru basınç dayanım değerleri artmaktadır.

Daha önce belirtildiği üzere basınç dayanımıyla geçirimli betonun boşluk içeriği arasında güçlü bir ilişki vardır. Şekil 5.11'de yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikameli karışım numunelerinin boşluk oranı ve ıslak basınç dayanımları arasındaki ilişki gösterilmiştir.



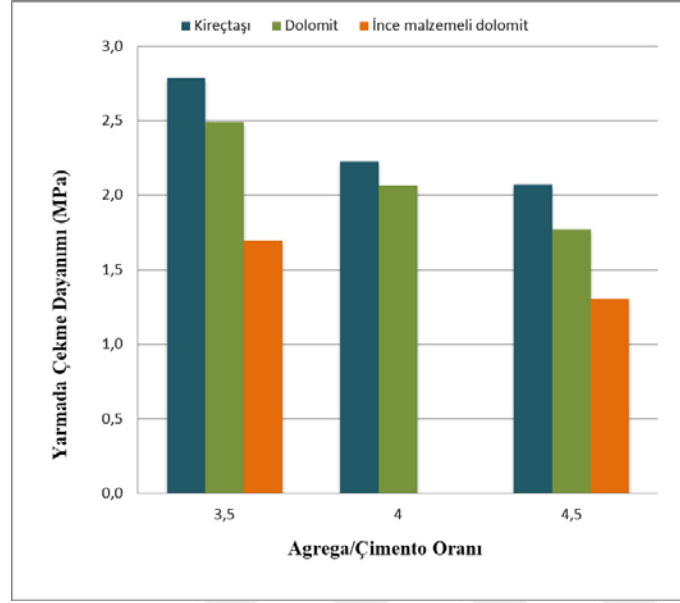
Şekil 5.10 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikameli geçirimli beton numunelerinin basınç dayanımının kuru birim hacim ağırlık değerleri ile değişimi



Şekil 5.11 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikameli geçirimli beton numunelerinin basınç dayanımının boşluk içerikleri ile değişimi

5.3 Yarmada Çekme Dayanımı

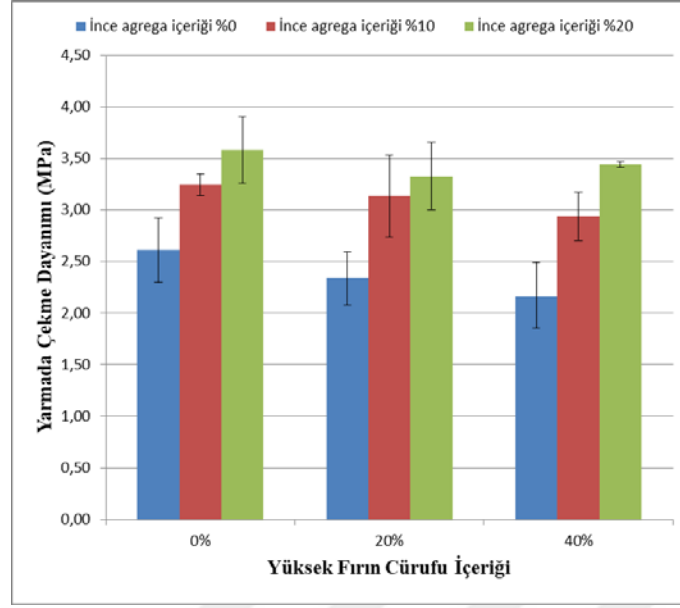
Çalışmanın ilk aşamasında hazırlanan karışım numunelerinin yarmada çekme dayanım sonuçları Şekil 5.12’de grafik halinde verilmiştir. Aynı a/ç oranında kireçtaşı kullanılan numunelerin yarmada çekme dayanımları; temiz dolomit kullanılan numunelere göre, temiz dolomit kullanılan numunelerin ise ince malzemeli dolomit kullanılan numunelere göre daha fazladır. Aynı zamanda karışımda kullanılan a/ç oranı arttıkça geçirimli beton numunelerinin yarmada çekme dayanım değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bu sonuçlar literatürde bulunan sonuçlarla paralellik göstermektedir (Torres ve diğer., 2015). İnce malzemeli dolomit kullanımı; numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına benzer olarak yarmada çekme dayanımları da düşürmektedir. Sonuçlar kıyaslandığında a/ç oranı 3,5 olan karışım numunelerinde, ince malzemeli dolomit agrega kullanımıyla yarmada çekme dayanımı değeri 2,49 MPa’dan 1,70 MPa’a; a/ç oranı 4,5 kullanılan karışım numunelerinde ise 1,77 MPa’dan 1,30 MPa’a düşmüştür.



Şekil 5.12 Agregra kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin yarmada çekme dayanımına etkisi

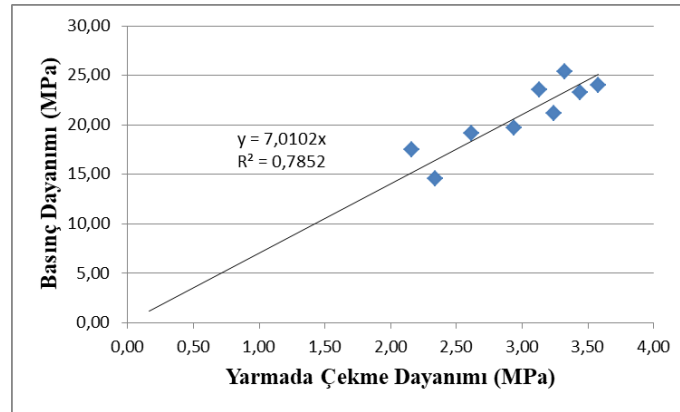
Yüksek fırın cürufu ve ince agregra ikamesi yapılan karışım numunelerinin yarmada çekme dayanım sonuçları Şekil 5.13'te grafik halinde gösterilmiştir. Yarmada çekme dayanımları, yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmayan numunelerde 2,61 MPa ile 3,60 MPa arasında; %20 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan numunelerde 2,34 MPa ile 3,33 MPa arasında; %40 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan karışımlarda 2,16 MPa ile 3,44 MPa arasında değişmektedir. Şekil 5.13'te görüldüğü üzere ince agregra ikamesi arttıkça tüm karışım grupları numunelerinde yarmada çekme dayanım değerleri artmaktadır. Ancak karışımlarda yüksek fırın cürufu ikamesi ise basınç dayanımı üzerinde gösterdiği gelişmeyi yarmada çekme dayanımı değerlerinin gelişmesinde gösterememiştir.

F0İ2 karışım serisi dışındaki tüm karışım gruplarında ortalama yarmada çekme dayanım değerleri TS 2824 EN 1338 beton parke taşı standardında istenen 3,6 MPa karakteristik yarmada çekme dayanım değerinin altında kalmıştır. Ancak F0İ1, F0İ2, F2İ2, F4İ2 karışım numunelerinin tümü, aynı standartta belirtilen tek deney sonuçlarının minimum koşulu olan 2,9 MPa değerini sağlamışlardır. Karışımların tümünde ise istenen minimum kırılma yükü değeri (250 N/mm) aşılmıştır.



Şekil 5.13 Yüksek fırın cürufu ve ince agregası ikamesinin geçirimli beton numunelerinin yarmada çekme dayanımına etkisi

Şekil 5.14'te yüksek fırın cürufu ve ince agregası ikameli karışım numunelerinin basınç dayanımları ile yarmada çekme dayanım değerlerinin ortalamaları arasındaki ilişki gösterilmiştir.



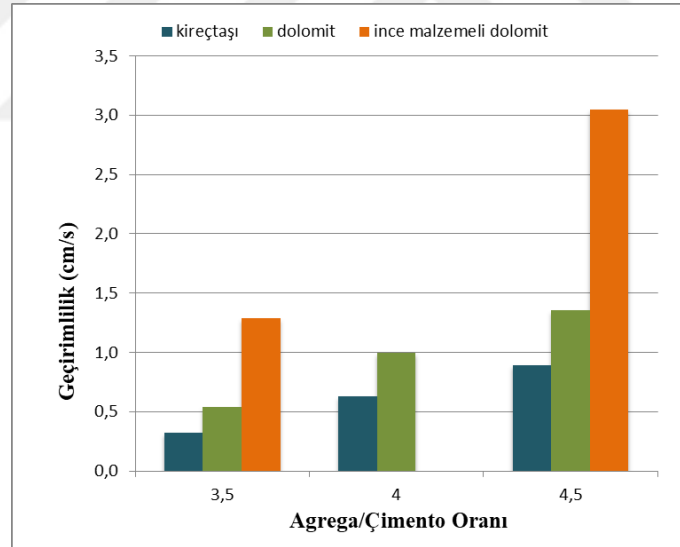
Şekil 5.14 Yüksek fırın cürufu ve ince agregası ikameli karışım numunelerinin basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişki

5.4 Geçirimsizlik

Deneysel çalışmanın ilk aşamasındaki karışım numunelerinin geçirimsizlik değerleri Şekil 5.15'de grafik halinde verilmiştir. Kireçtaşı kullanılan numunelerin geçirimsizlik değerleri 0,32 cm/s ile 0,85 cm/s arasında; yıkanmış temiz dolomit

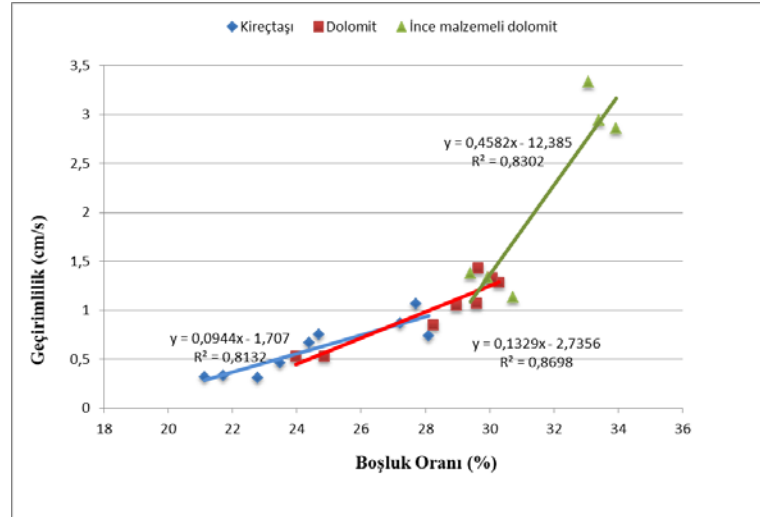
kullanılan numunelerin geçirimsizlik değerleri 0,53 cm/s ile 1,35 cm/s arasında; ince malzemeli dolomit kullanılan numunelerin geçirimsizlik değerleri 1,28 cm/s ile 3,04 cm/s arasında değişmektedir. Şekil 5.15’de görüleceği üzere karışımların a/ç oranı arttıkça geçirimsizlik değerlerinde artış meydana gelmektedir. Agrega etrafını kaplayan çimento pastası kalınlığının a/ç oranı arttıkça azalmasından dolayı suyun geçebileceği bağlantılı boşluk miktarı artmaktadır. Böylece a/ç oranı arttıkça geçirimsizlik değerleri de artmaktadır.

İnce malzemeli dolomit kullanımı da numunelerin geçirimsizlik değerlerini arttırmaktadır. Özellikle a/ç oranı 4,5 olan numuneler incelendiğinde, ince malzemeli dolomit agregası kullanımı geçirimsizlik değerini 3 cm/s’ye yükseltmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere ince malzeme çimento pastası ve agregaların topaklaşmasına neden olarak geçirimli betonun homojen yapısını bozmuştur. Bundan dolayı numuneler daha boşluklu yapıya sahip olmuşlardır. Numunelerin boşluk içeriğindeki bu artış geçirimsizlik değerlerinin de artışına neden olmuştur.



Şekil 5.15 Agrega kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin geçirimsizliğine etkisi

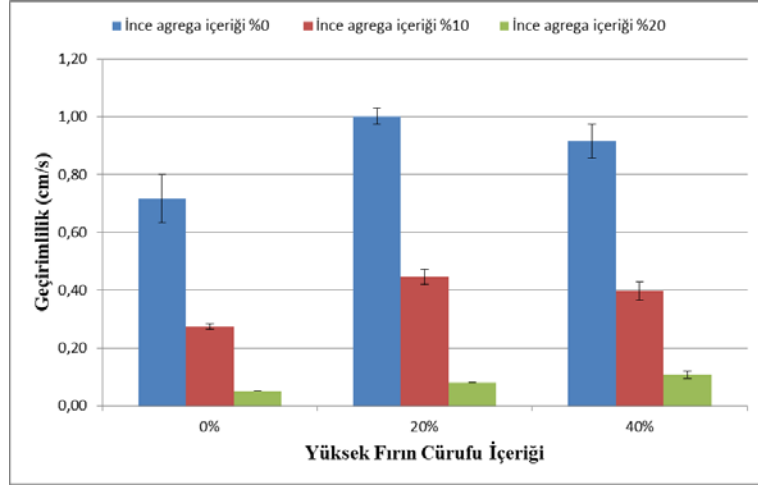
Farklı türde agregalar ile üretilen geçirimli betonların boşluk içerikleri ve geçirimsizlik değerlerinin arasındaki ilişkiyi gösteren Şekil 5.16’daki grafik incelendiğinde; geçirimli betonun boşluk içeriğindeki artışın geçirimsizlik değerini de arttırdığı ve her agrega türü için yüksek korelasyon oranlarına sahip ilişkiler elde edildiği görülmektedir.



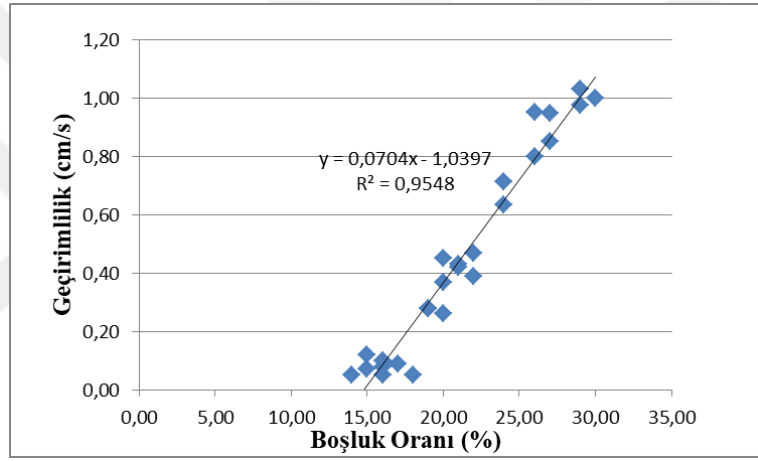
Şekil 5.16 Farklı türde agregalar ile üretilen geçirimli betonların geçirimsizlik değerlerinin boşluk oranı ile değişimi

Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesi yapılan karışım numunelerinin geçirimsizlik değerleri Şekil 5.17’de grafik halinde gösterilmiştir. Geçirimsizlik değerleri yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmayan numunelerde 0,05 cm/s ile 0,72 cm/s arasında; %20 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan numunelerde 0,08 cm/s ile 1,0 cm/s arasında; %40 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan karışımlarda 0,11 cm/s ile 0,92 cm/s arasında değişmektedir. Şekil 5.17’de görüldüğü üzere karışımlarda kullanılan ince agrega miktarı arttıkça numunelerin geçirimsizlik değerleri azalmaktadır. Hatta karışımlarda ince agrega ikamesinin %20’ye çıkması ince agrega ikamesi yapılmayan numunelere göre geçirimsizlik değerlerinde %89 ile %93 arasında azalmaya yol açmıştır.

Şekil 5.18’de yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesi yapılan karışım numunelerinin boşluk içerikleri ve geçirimsizlik değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik incelendiğinde; boşluk içeriğindeki artışın geçirimsizlik değerlerini de arttırdığı görülmektedir. Boşluk içeriği ile geçirimsizlik arasındaki ilişkinin ise doğrusal olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.17 Agrega kökeninin ve a/ç oranının geçirimli beton numunelerinin geçirimsizliğine etkisi



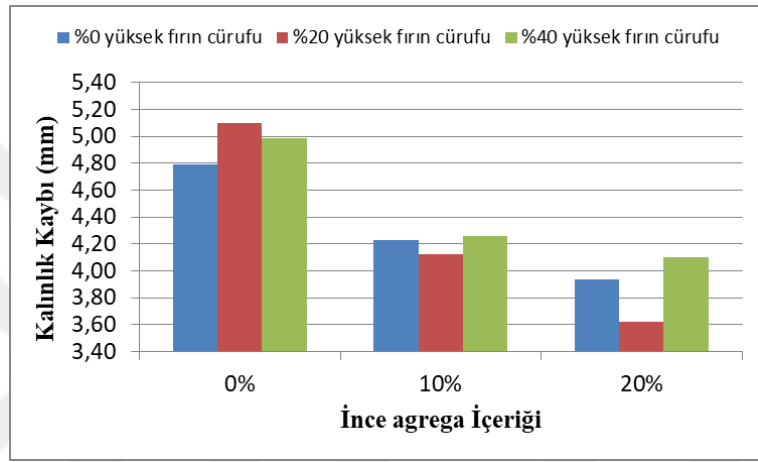
Şekil 5.18 Yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesi ile üretilen geçirimli betonların geçirimsizlik değerlerinin boşluk oranı ile değişimi

5.5 Aşınma Direnci

Çalışmanın üçüncü aşamasında üretilen numunelerin aşınma deneyleri yapılmış olup, sonuçları grafik halinde Şekil 5.19'da verilmiştir. İnce agrega ikamesi artması, geçirimli beton numunelerinin aşınma direncinde gelişim sağlamıştır. Yüksek fırın cürufu ikamesi yapılmayan karışımlarda ince agrega ikamesinin %0'dan %20'ye çıkmasıyla, kalınlık kaybı değeri %18,8 düşmüştür. %20 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan karışımlarda ince agrega ikamesinin %0'dan %20'ye çıkmasıyla, kalınlık kaybı değeri %29 düşmüştür. %40 yüksek fırın cürufu ikamesi yapılan karışımlarda ince agrega ikamesinin %0'dan %20'ye çıkmasıyla, kalınlık kaybı değeri %18 düşmüştür. Bu sonuçlardan, geçirimli beton numunelerinin ince agrega ikamesiyle

beraber boşluk oranlarında meydana gelen azalma, numunelerin basınç dayanımında gelişmeye yol açmasına paralel olarak aşınma direncini de geliştirdiği görülmektedir.

Tüm sonuçlar incelendiğinde TS 2824 EN 1338 standardında H sınıfı için istenen 4 mm ortalama kalınlık kaybı değerinin F2İ2, F0İ2 karışımı kullanılarak üretilen geçirimli beton numunelerinde elde edildiği görülmektedir. Ancak ASTM C936 (3 mm) ve yaya yolları hariç Sri Lanka standardında (3,6 mm) istenen aşınma direncini hiçbir karışım numunesi gösterememiştir.



Şekil 5.19 Yüksek fırın cürufu ve ince agregası ikamesi ile üretilen geçirimli betonların kalınlık kaybı değerlerinin ince agregası ikamesi ile değişimi

5.6 Parke Taşı Standartları Açısından Bulguların Değerlendirilmesi

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasındaki karışım numunelerinin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, aşınma direnci verileri incelenmiş ve parke taşı standartları açısından minimum dayanım ve aşınma direnci gerekliliklerini sağlayıp sağlamadıklarının kontrolü yapılmıştır. Elde edilen verilere göre yapılan kontroller sonucunda Tablo 5.2 oluşturulmuştur. Geçirimli beton parke taşlarının yağmura maruz kalan koşullarda da hizmet vereceği göz önüne alındığında, basınç dayanımı verileri incelenirken standartlardaki minimum dayanım gerekliliklerinin kontrolünde ıslak durumdaki numune sonuçları dikkate alınmıştır. Çünkü basınç dayanımı sonuçlarından da görüleceği üzere numunelerin ıslak durumdaki basınç dayanımları kuru durumdaki basınç dayanımlarından düşüktür.

Tablo 5.2’de görüleceği üzere karışım numunelerinin sonuçları ASTM C936 parke taşı standardının basınç dayanımı ve aşınma direnci gerekliliklerini sağlayamamıştır. ASTM C936 standardında basınç dayanımı için sadece tek değer olarak 55 MPa istenmektedir. Hindistan standardında ise ASTM C936 standardından farklı olarak beton parke taşları için gerekli basınç dayanımı değerleri kaplamanın maruz kalacağı trafik yüklemeleriyle değişmektedir. Hindistan standardında en düşük basınç dayanım gerekliliği 30 MPa’dır. Ancak bu dayanım F2İ2 karışım serisinin kuru numunelerinde elde edilmişse de, ıslak numunelerin basınç dayanım değerleri daha düşük olduğu için standarda uygun olmadığı kabul edilmiştir.

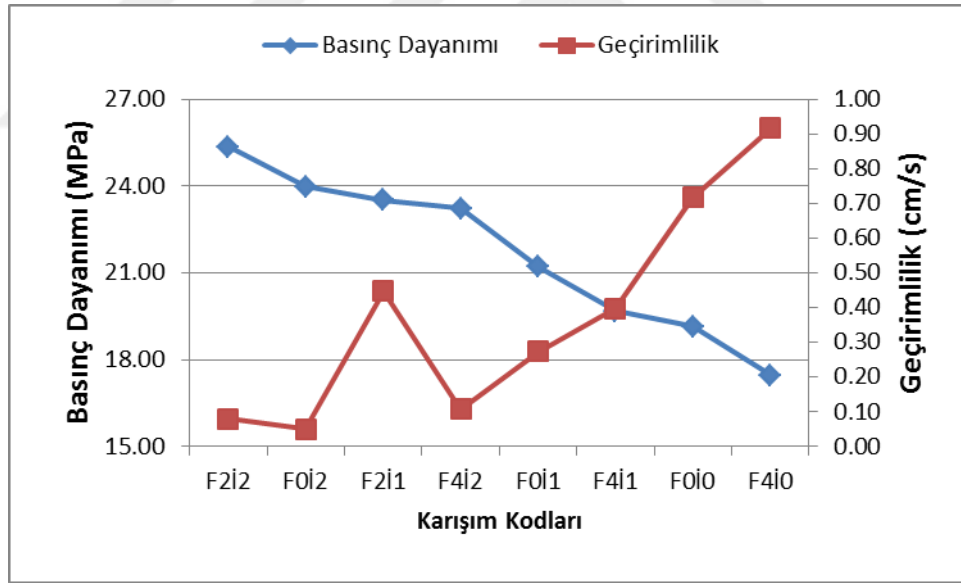
Yarmada çekme dayanım verilerine bakıldığında F0İ2 karışım numuneleri TSE 2824 EN 1338 standardında gerekli olan karakteristik yarmada çekme dayanım değerini (3,6 MPa) sağlamıştır. Aynı zamanda bu karışım numuneleri aynı standartta bulunan H sınıfı için gerekli aşınma direnci değerlerini de sağlamışlardır. F0İ2 karışım numunelerinin hem aşınma direnci hem de yarmada çekme dayanım sonuçları, TSE 2824 EN 1338 standardında belirtilen gerekli sınır koşullarını sağladıkları için ülkemizde yol kaplaması için kullanılmaları önerilebilir.

Sri Lanka Standardı açısından için ise kaldırım gibi sadece yayalara hizmet eden kaplamalar için gerekli olan 15 MPa dayanım değeri F2İ0 hariç tüm karışım numuneleri için elde edilmiştir. Bundan dolayı yaya yolları için F2İ0 hariç tüm karışım sonuçlarının basınç dayanımı ve geçirimlilik değerlerinin optimizasyonunun yapılmasında fayda görülmüştür. Şekil 5.20’de F2İ0 hariç tüm karışımların geçirimlilik ve basınç dayanımları arasındaki optimizasyon grafiği verilmektedir. Söz konusu grafiğin karışım kodlarını gösteren eksen sıralamasında basınç dayanım sonuçlarını dikkate alınmış olup, F4İ1 karışımının geçirimlilik ve basınç dayanım eğrilerinin kesim noktasında yer aldığı için en uygun karışım olduğu tespit edilmiştir. F4İ1 karışım numunelerinde yüksek oranda yüksek fırın cürufu ikamesi yapıldığından (%40) karışımında önemli miktarda çimento tasarrufu yapılmıştır. Böylece karışım maliyetinde de önemli derecede düşüş sağlanacaktır.

Tablo 5.2 Karışım numunelerinden elde edilen verilerin standartlarda istenen minimum değerler ile karşılaştırılması

	Minimum basınç dayanım gerekliliği				Çekme dayanımı gerekliliği	Minimum aşınma direnci gerekliliği (ortalama kalınlık kaybı)		
Karışım Kodu	ASTM C936 (55 MPa)	Indian Standart (30 MPa)	Sri Lanka Standart (15 MPa)	Sri Lanka Standart (30 MPa)	TSE 2824 EN 1338 (3,6 MPa)	TSE 2824 EN 1338 (20 cm ³ /50 cm ²)*	ASTM C936 (15 cm ³ /50 cm ²)**	Sri Lanka Standart (18cm ³ /50cm ² ***)
F0İ0	×	×	✓	×	×	×	×	×
F0İ1	×	×	✓	×	×	×	×	×
F0İ2	×	×	✓	×	✓	✓	×	×
F2İ0	×	×	×	×	×	×	×	×
F2İ1	×	×	✓	×	×	×	×	×
F2İ2	×	×	✓	×	×	✓	×	×
F4İ0	×	×	✓	×	×	×	×	×
F4İ1	×	×	✓	×	×	×	×	×
F4İ2	×	×	✓	×	×	×	×	×

* kalınlık kaybı 4 mm ** kalınlık kaybı 3 mm *** kalınlık kaybı 3,6 mm



Şekil 5.20 F2İ0 hariç 3. aşama karışım numunelerinin basınç dayanımı ve geçirimsilik değerlerinin optimizasyonu grafiği

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında ilk aşamayı oluşturan karışımlarda: agrega kökeninin, ince malzemeli (kil-silt) agrega kullanımının, karışımda kullanılan a/ç oranının geçirimli beton parke taşlarının mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi ve karışım numunelerin ıslak-kuru haldeki durumlarının basınç dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Geçirimli beton karışımlarında ince malzeme içeren agregaların kullanılması durumunda, geçirimli beton parke taşlarının basınç dayanımının büyük ölçüde düştüğü tespit edilmiştir.
- Geçirimli betonun a/ç değeri arttıkça boşluk oranı ve geçirimlilik değeri artmakta ve yarmada çekme-basınç dayanımında ise azalma meydana gelmektedir.
- Tüm geçirimli beton parke taşı gruplarında kuru haldeki basınç dayanımı, ıslak haldeki basınç dayanımından daha fazla olduğundan, geçirimli beton parke taşlarının basınç dayanımı tayininde ıslak durumdaki numunelerin dikkate alınması gerektiği değerlendirilmiştir.

İkinci aşamayı oluşturan karışımlarda ise kullanılan akışkanlaştırıcı miktarı artırılarak, üçüncü aşama karışımlarında kullanılacak a/ç oranına karar verilmiştir. Akışkanlaştırıcı miktarı arttırılan numunelerin incelenmesinden aşağıdaki sonuç elde edilmiştir.

- Karışımda kullanılacak akışkanlaştırıcı miktarının arttırılması, çimento pastasının agrega etrafında katılaşmadan kalıbın aşağısına doğru akmasına neden olarak numunelerin altının tıkanmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı a/ç oranı seçilirken akışkanlaştırıcının miktarına dikkat edilmeli ön deneyler mutlaka yapılmalıdır.

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında ise yüksek fırın cürufu ve ince agrega ikamesinin geçirimli beton parke taşlarının mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi ve karışım numunelerin ıslak-kuru haldeki durumlarının basınç dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- %20 yüksek fırın cürufu ikamesi geçirimli beton parke taşlarının basınç dayanımında gelişme sağlamaktadır. Ancak basınç dayanımındaki bu gelişme yarmada çekme dayanımında görülmemektedir.
- İnce agregâ ikamesinin artırılması (%0'dan %20'ye) geçirimli beton parke taşlarının basınç-yarmada çekme dayanımlarını ve aşınma direncini geliştirmektedir. Ancak numunelerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerindeki bu gelişme geçirimlilik değerlerinde kayba neden olmaktadır.
- Yüksek fırın cürufu ve ince agregâ ikamesi yapılmış tüm geçirimli beton parke taşı gruplarında kuru haldeki basınç dayanımı, ıslak haldeki basınç dayanımından daha fazla olduğundan, geçirimli beton parke taşlarının basınç dayanımı tayininde ıslak durumdaki numunelerin dikkate alınması gerektiği değerlendirilmiştir.
- F0İ2 karışım numuneleri TSE 2824 EN 1338 standardında belirtilen ortalama yarmada çekme dayanım değerini (3,6 MPa) ve H sınıfı için aşınma sınır koşullarını (3,9 mm < 4 mm) sağladığından kaplama malzemesi olarak kullanılabilirler.
- Yaya yolları için kaplama malzemesi olarak F2İ0 hariç tüm karışım numuneleri kullanılabilir. Ancak geçirimlilik ve basınç dayanımları optimizasyonu yapıldığında F4İ1 karışım numunelerinin daha uygun olduğu değerlendirilmektedir. F4İ1 karışım numunelerinin ıslak basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, geçirimlilik değeri, aşınma kalınlık kaybı sırasıyla; 19,7 MPa, 2,94 MPa, 0,40 cm/s, 4,3 mm'dir. Aynı zamanda söz konusu karışım da yüksek oranda çimento tasarrufu sağlanması çevre için daha faydalı olmaktadır.

KAYNAKLAR

- ACI. 522R-10, (2010). Report on Pervious Concrete. *ACI Committee 522*, United States.
- ACI. 330R-08, (2008). Guide for the Design and Construction of Concrete Parking Lots. *ACI Committee 330*, United States.
- ACI. 325.12R-02, (2002). Guide for Design of Jointed Concrete Pavements for Streets and Local Roads. *ACI Committee 325*, United States.
- Akkaya, A., Çağatay, İ.H. (2017a) Geçirimli Betonların Permeabilite Ölçümleri Üzerine Deneyisel Bir Çalışma. *2 nd International Mediterranean Science and Engineering Congress*, October 25-27, 2017, Adana / Türkiye.
- Akkaya, A., Çağatay, İ.H. (2017b) Geçirimli Betonların Aşınma Dayanımları Üzerine Deneyisel Bir Çalışma. *2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress*, October 25-27, 2017, Adana / Türkiye.
- Arenas, J. P., Crocker, M. J., (2010). Recent Trends in Porous Sound-absorbing Materials. *Sound & Vibration*, 44, 12-18.
- AASHTO (1993), *Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, United States.
- ASTM, C1701/C1701M-17a, (2017). Standard Test Method for Infiltration of In Place Pervious Concrete, *ASTM International*, United States.
- ASTM, D448 – 12, (2017). Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction, *ASTM International*, United States.
- ASTM, C494/C494M – 17, (2017). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, *ASTM International*, United States.
- ASTM, C260/C260M - 10a, (2016). Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete, *ASTM International*, United States.

- ASTM, C936/C936M – 18, (2018). Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units, *ASTM International*, United States.
- ASTM, D422 – 63 (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, *ASTM International*, United States.
- ASTM, C1754/C1754M – 12 (2012). Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete, *ASTM International*, United States.
- Bean, E. Z., Hunt, W. F., Bidelsbach, D. A., (2007) Evaluation of Four Permeable Pavement Sites in Eastern North Carolina for Runoff Reduction and Water Quality Impacts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133, (6), 583-592.
- Chandrappa, A. K., Biligiri, K. P. (2016). Pervious Concrete as A Sustainable Pavement Material- Research Findings and Future Prospects: A State-of-the-Art-Review. *Construction and Building Materials*, 111, 262-274.
- Chen, X., Huang, W., Zhou, J. (2012). Effect of Moisture Content on Compressive and Split Tensile Strength of Concrete. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 19, 427-435.
- 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 Hydrological Engineering*, 15, (6), 426-433.
- 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.
- Cosic, K., Korat, L., Ducman, V., Netinger, I., (2015). Influence of Aggregate Type and Size on Properties of Permeable Concrete. *Construction and Building Materials*, 78, 69-76.
- 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, 561-568.

- Deo, O., Sumanasooriya, M., Neithalath, N. (2010). Permeability Reduction in Pervious Concrete Due to Clogging: Experiments and Modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22, (7), 741-751.
- Gaedicke, C., Torres, A., Huynh, K.C.T., Marines, A. (2016). A Method to Correlate Splitting Tensile Strength and Compressive Strength of Pervious Concrete Cylinders and Cores. *Construction and Building Materials*, 125, 271-278.
- Gaedicke, C., Marines, A., Miankodila F. (2014). Assessing the Abrasion Resistance of Cores in Virgin and Recycled Aggregate Pervious Concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 701–708.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., İpek, S. (2014a). Investigating Properties of Pervious Concretes Containing Waste Tire Rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206–213.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., İpek, S. (2014b). 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.
- Guthrie, W.S., Carson, B.D., Dennis, L.E. (2010). Effect of Soil Clogging and Water Saturation on Freeze-Thaw Durability of Pervious Concrete. *Journal of the Transportation Research Board*, 2164, 89-97.
- Hein, M.F., Dougherty, M., Hobbs, T. (2013). Cleaning Methods for Pervious Concrete Pavements, *International Journal of Construction Education and Research*, 9, 102-116.
- Henderson, V., and Tighe, S.L. (2010). Pervious Concrete Pavement Performance in Field Applications and Laboratory Testing. *In Proceedings of the Transportation Association of Canada Annual Conference*, Halifax, NS, 26–29 September 2010.

- Henderson, V., Tighe, S. L. (2011). Evaluation of Pervious Concrete Pavement Permeability Renewal Maintenance Methods at Field Sites in Canada. *Canada Journal of Civil Engineering*, 38, 1404-1413.
- Hesami, S., Ahmadi, S., Nematzadeh, M. (2014). Effects of Rice Husk Ash and Fiber on Mechanical Properties Ofpervious 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, 818–823.
- IS 15658:2006, (2016). *Indian Standard, Precast Concrete Blocks for Paving – Specification Bureau of Indian Standards*, India.
- 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., Razak, H. A. (2016). Effect of Palm Oil Clinker Incorporation on Properties of Pervious Concrete. *Construction and Building Materials*, 115, 70–77.
- Karpuz, O., Aydın, M.M., Tanrıverdi, T. (2015). Silis Dumanı ve İnce Kumun Poroz Kaplama Betonu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. 9. *Ulusal Beton Kongresi, Nisan 16-18, 2015, Antalya, Türkiye*.
- Kevern, J.T., Wang, K., Schaefer, V.R. (2008). Pervious Concrete in Severe Exposures. *Concrete International*, 30, (7), 43-49.
- Kevern, J.T., Schaefer V.R., Wang, K. (2009). The Effect of Curing Regime on Pervious Concrete Abrasion Resistance. *Journal of Testing and Evaluation*, 37, (4), 337-342.
- Kevern, J.T., Wang, K., Schaefer, V.R. (2010). Effect of Coarse Aggregate on The Freezethaw Durability of Permeable Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22, 469-475.

- Kılınç, C., Akakın, T. (2012). Farklı Agregata Tane Dağılımına Sahip Geçirimli Betonların İncelenmesi. *Hazır Beton Dergisi*, 110, 79-84.
- Kia, A., Wong, H. S., Cheeseman, C. R. (2017). Clogging in Permeable Concrete: A Review. *Journal of Environmental Management*, 193, 221-233.
- Kim, Y. J., Gaddafi, A., Yoshitake, I. (2016). Permeable Concrete Mixed with Various Admixtures. *Materials and Design*, 100, 110-119.
- Kim, H.K., Lee, H.K. (2010). Influence of Cement Flow and Aggregate Type on The Mechanical and Acoustic Characteristics of Porous Concrete. *Applied Acoustics*, 71, 607-615.
- Leming, M.L., Malcom, H.R., Tennis, P.D. (2007). Hydrologic Design of Pervious Concrete. *Portland Cement Association*, Maryland, USA.
- Lian, C., Zhuge, Y. (2010). Optimum Mix Design of Enhanced Permeable Concrete – An Experimental Investigation. *Construction and Building Materials*, 24, 2664–2671.
- Lim, E., Twan, K.H., Fwa, T.F. (2013). Effect of Mix Proportion on Strength and Permeability of Pervious Concrete for Use in Pavement. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10, 1565-1575.
- Mata, L. A., Leming, M. L. (2012). Vertical Distribution of Sediments in Pervious Concrete Pavement Systems. *ACI Materials Journal*, 109, (2), 149-155.
- Meininger, R. C. (1988). No-fines Pervious Concrete for Paving. *Concrete International*, 10, (8), 20-27.
- Neithalath, N. (2004). *Development and characterization of acoustically efficient cementitious materials*. Doktora Tezi, Purdue University, Indiana.
- Neithalath, N., Sumanasooriya, M.S., Deo, O. (2010). Characterizing Pore Volume, Sizes and Connectivity in Pervious Concretes for Permeability Prediction. *Materials Characterization*, 61, 802-813.

- Neville, A.M. (2011). *Properties of Concrete 5th ed.* England: Pearson Education, 602-603.
- Nguyen, D.H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., Baraud, F. (2014). A Modified Method for the Design of Permeable Concrete Mixture. *Construction and Building Materials*, 73, 271-282.
- Obla, K. H. (2010). Pervious Concrete - An Overview. *The Indian Concrete Journal*, August, 9-18.
- PCA, (1990). *Thickness Design of Highway and Street Pavements*. United States: Portland Cement Association.
- Rodden, R., Smith, T. (2011). *Structural and Hydrological Design of Sustainable Pervious Concrete Pavements*. 7 Mart 2018, <http://conf.tac-atc.ca/english/annualconference/tac2011/docs/p4/rodden.pdf>.
- Rodin, H., Rangelov, M., Nassiri, S., Englund, K. (2018). Enhancing Mechanical Properties of Pervious Concrete Using Carbon Fiber Composite Reinforcement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30, (3), 04018012.
- Schaefer, V.R., Kevern, J.T. (2011). *An Integrated Study of Pervious Concrete Mixture Design for Wearing Course Applications*. 7 Mart 2019, http://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/150.
- Scholz, M., Grabowiecki, P. (2007). Review of Permeable Pavement Systems. *Building and Environment*, 42, 3830-3836.
- Semiz, M. (2006). *Beton kilit taşlarının fiziksel özellikleri ve alternatif üretimin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Shehata, M., Sucic, A., Dolatabadi, M.H., Alaica, A.L. (2010). Optimizing the Strength and Permeability of Pervious Concrete. *Of The 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Halifax, Nova Scotia.
- Shu, X., Huang, B., Wu, H., Dong, Q., Burdette, E.G. (2011). Performance Comparison of Laboratory and Field Produced Pervious Concrete Mixtures. *Construction and Building Materials*, 25, 3187–3192.

- S. L. Standart (2016). *Sri Lanka Standart Specifications for concrete paving blocks*, Sri Lanka.
- Tennis, P.D., Leming, M.L., Akers, D.J. (2004). *Pervious concrete pavements*. Portland Cement Association, Maryland, USA.
- Tennessee Department of Environment and Conservation [TDEC], (2014). *Tennessee Permanent Stormwater Management and Design Guidance Manual*. 7 Mart 2019, <https://tnpermanentstormwater.org/manual.asp>.
- Tong, B. (2011). *Clogging effects of portland cement pervious concrete*. Yüksek Lisans Tezi, Iowa State University, Iowa.
- 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.
- TSE, (2005). *TSE 2824 EN 1338 Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları*. 62s, Ankara.
- TSE, (2010). *TSE EN 12390-3 Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*. 19s, Ankara.
- TSE, (2003). *TSE 706 EN 12620 Beton agregaları*. 46s, Ankara.
- TSE, (2002). *TSE EN 934-2 Beton katkıları- Tarifler ve özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme*. 30s, Ankara.
- Wang, K., Schaefer, V.R., Kevern, J.T., Suleiman, M.T. (2006). Development of Mix Proportion for Functional and Durable Pervious Concrete. *NRMCA Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete*, May 24-25, Nashville, TN.
- Welker, A. L., Jenkins, K.G., McCaerthy, L., Nemirovsky, E. (2013). Examination of the Material Found in the Pore Spaces of Two Permeable Pavements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139, (4), 278-284.

- Wu, H., Liu, Z., Sun, B., Yin, J. (2016). Experimental Investigation On Freeze–Thaw Durability of Portland Cement Pervious Concrete. *Construction and Building Materials*, 117, 63–71.
- Xie, N., Akin, M., Shi, X. (2019). Permeable Concrete Pavements: A Review of Environmental Benefits and Durability. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1605-1621.
- Yang, J., Jiang, G. (2003). Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials. *Cement Concrete Research*, 33, 381–386.
- Yang, Z., (2011). Freezing-and-Thawing Durability of Permeable Concrete Under Simulated Field Conditions. *ACI Materials Journal*, 108, (2), 187-195.