GEÇİRGEN BETONUN YAPISAL VE HİDROLİK TASARIMI

Ahmet GÖKSU

T. C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEÇİRGEN BETONUN YAPISAL VE HİDROLİK TASARIMI

Ahmet GÖKSU
0000-0003-0240-3340

Prof. Dr. Serdar KORKMAZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2021
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GEÇİRGEN BETONUN YAPISAL VE HİDROLİK TASARIMI

Ahmet GÖKSU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serdar KORKMAZ

Geçirgen beton; yüksek gözenekliliğe sahip özel bir beton türüdür. Bu çalışmada geçirgen betonun yapısal ve hidrolik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen geçirgen betonlarda Portland çimentosu ve üç farklı boyutta (0-3 mm, 5-15 mm, 15-25 mm) kırma kireçtaşı agrega kullanılmıştır. Betonlarda katkı maddesi kullanılmamıştır. Tüm karışımlar için hava oranı %22 ve çimento miktarı 305 kg/m^3 olarak alınmıştır. Üç farklı su/çimento oranı (0,28; 0,31; 0,34) belirlenmiştir. Agregalar kendi içlerinde hacimce belirli oranlarda karıştırılarak sekiz farklı gradasyon elde edilmiştir. Üç farklı su/çimento oranı ve sekiz farklı gradasyon ile yirmi dört farklı karışım tasarlanmıştır. Yapılan deneylerde 28 günlük en yüksek basınç dayanımı 21,85 MPa olarak bulunmuştur. İnfiltrasyon testlerine göre en yüksek sızma oranı ise 70736 mm/sa olarak bulunmuştur. Verilere göre optimum olarak görülen geçirgen beton, 19,15 MPa basınç dayanımı ve 44502 mm/sa sızma oranına sahiptir. İnfiltrasyon testlerinden yola çıkılarak Darcy-Forchheimer parametreleri belirlenmiştir. Testler, belirlenen parametreler kullanılarak bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan OpenFOAM tabanlı SimFlow programında modellenmiştir. SimFlow analizleri ile infiltrasyon test sonuçları birbirleriyle uyumlu çıkmıştır. Hassasiyet analizi kapsamında Darcy-Forchheimer parametrelerinin infiltrasyona olan etkisi incelenmiştir. Boyut analizi yapılarak sızma oranını etkileyen parametreler ile Reynolds sayısı arasında grafiksel ilişki kurulmuştur.

Anahtar kelimeler: Geçirgen beton, Poroz ortam, Basınç dayanımı, İnfiltrasyon, SimFlow, Darcy-Forchheimer

2021, viii+69 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

STRUCTURAL AND HYDRAULIC DESIGN OF PERMEABLE CONCRETE

Ahmet GÖKSU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Serdar KORKMAZ

Permeable concrete is a special type of concrete with high porosity. In this study, the structural and hydraulic properties of permeable concrete were investigated. Portland cement and crushed limestone aggregate in three different sizes (0-3 mm, 5-15 mm, 15-25 mm) were used in the permeable concretes produced within the scope of this study. The concretes do not contain any additives. For all mixtures, the void ratio is 22% and the cement amount is 305 kg/m^3. Three different water/cement ratios (0.28; 0.31; 0.34) were determined. Eight different gradations were obtained by mixing the aggregates in specific proportions by volume. Twenty-four different mixes were designed with three different water/cement ratios and eight different gradations. In the experiments, the highest compressive strength for 28 days was found to be 21,85 MPa. According to the infiltration tests, the highest infiltration rate was found to be 70736 mm/hr. According to the data, permeable concrete which is determined as optimum has a compressive strengh of 19,15 MPa and infitration rate of 44502 mm/sa. Darcy-Forchheimer parameters were determined based on the infiltration tests. The tests were modeled using the determined parameters in the OpenFOAM based computational fluid dynamics (CFD) software SimFlow. SimFlow analysis and infiltration test results are found to be in agreement. A sensitivity analysis was conducted and the effect of Darcy-Forchheimer parameters on infiltration was investigated. By applying a dimensional analysis, a relationship was obtained between parameters affecting infiltration and the Reynolds number.

Keywords: Permeable concrete, Porous media, Compressive strength, Infiltration, SimFlow, Darcy-Forchheimer

2021, viii+69 pages

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimiz boyunca bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaşan ve her alanda bize destek olan değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Murat KANKAL ve Sayın Prof. Dr. Adem AKPINAR'a; tez çalışmam boyunca ihtiyaç duyduğum her an yanımda olup bana yol gösteren, değerli bilgisini ve zamanını benimle paylaşan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Serdar KORKMAZ'a; ihtiyacım olduğunda bilgi ve desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Ali MARDANI-AGHABAGLOU'na saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Katkılarından ötürü saygıdeğer jüri üyelerine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan ve asla desteğini eksik etmeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu yüksek lisans tezindeki deneysel çalışmalar, 218M585 numaralı "Geçirimli Betonun Yapısal ve Hidrolik Tasarımı" isimli TÜBİTAK projesi kapsamında yapılmıştır. Desteğinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Ahmet GÖKSU
06/09/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER DİZİNİ v
KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Kaynak Araştırması 3
2.2. Geçirgen Beton 11
2.3. SimFlow 12
2.4. Navier-Stokes Denklemi 14
2.5. Sıvı Hacmi Yöntemi (VOF) 16
2.6. Darcy-Forchheimer Denklemi 17
2.7. Poroz Ortamda Reynolds Sayısı 18
3. MATERYAL VE YÖNTEM 19
3.1. Kullanılan Malzemeler 19
3.2. Karışım oranları 21
3.3. Beton Basınç Dayanımı Deneyi 22
3.4. Beton İnfiltrasyon Testi 22
3.5. SimFlow ile Modelleme 26
3.5.1. Darcy-Forchheimer parametrelerinin belirlenmesi 26
3.5.2. Model oluşturma ve simülasyon ayarları 29
3.5.3. Çözüm ağı yakınsaması 37
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 38
4.1. Beton Basınç Dayanımı Testi Sonuçları 38
4.2. Beton İnfiltrasyon Testi Sonuçları 39
4.3. Ekonomik Analiz 40
4.4. Optimum Geçirgen Beton 40
4.5. Tane Çapı ve Sızma İlişkisi 41
4.6. İnfiltrasyon Testlerinde Reynolds Sayıları 42
4.7. İnfiltrasyon Testlerinin SimFlow ile Simülasyonu 42
4.8. Hassasiyet Analizi 48
4.8.1. Darcy-Forchheimer parametrelerinin sızma oranına etkisi 48
4.8.2. Darcy-Forchheimer parametrelerine karşılık efektif çapın belirlenmesi 50
4.8.3. Simülasyonlardaki Reynolds sayılarının bulunması 52
4.9. Boyut Analizi 54
4.10. Tartışma 56
5. SONUÇ 57
KAYNAKLAR 60
ÖZGEÇMİŞ 69

SİMGELER DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
κ_2	Atalet permeabilitesi
$\kappa(x)$	Arayüz eğriliği
$\vec{n}$	Arayüz normal birim vektörü
P	Basınç
σ_e	Basınç dayanımı
ΔP	Basınç farkı
Π	Boyutsuz değişken (Buckingham teoremi)
Co	Courant sayısı
d	Darcy parametresi
μ	Dinamik viskozite
∇	Diverjans operatörü
D_{10}	Efektif tane çapı
f	Forchheimer parametresi
h	Halka içi su yüksekliği
$\vec{V}$	Hız vektörü
H	Hidrolik yük (Hydraulic head)
γ	Hücredeki akışkan hacminin bulunduğu hücre hacmine oranı
κ_1	İntrinsik permeabilite
D	İnfiltrasyon halkası iç çapı
a	İvme
$\vec{g}$	İvme vektörü
υ	Kinematik viskozite
F	Kuvvet
m	Kütle
D_{50}	Ortalama tane çapı
q	Özgül debi
n	Porozite
Re	Reynolds sayısı
F_s	Serbest yüzey gerilme kuvveti
u	Sıvı hızı
ρ	Sıvı yoğunluğu
L	Sıvının ortamda aldığı yol (Beton kalınlığı)
M	Sızan su kütlesi
I	Sızma oranı
t	Sızma süresi (Suyun beton yüzeyinden çekilme süresi)
Δx	Simülasyon modeli hücre ayrıt uzunluğu
I_s	Simülasyon ortalama sızma oranı
Δt	Simülasyon zaman adımı
t_s	Simülasyonda suyun beton yüzeyinden çekilme süresi
τ_{ij}	Stres tensörü
σ	Yüzey gerilme tensörü

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
A/Ç	Agrega/Çimento oranı
BHA	Birim Hacim Ağırlık
DRIT	Double Ring Infiltration Test (Çift halka infiltrasyon testi)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
RSIT	Rain Simulation Infiltration Test (Yağmur simülasyonu infiltrasyon testi)
SWMM	Storm Water Management Model (Yağmur suyu yönetim modeli)
S/Ç	Su/Çimento oranı
SVR	Support Vector Regression (Destek vektör regresyonu)
SuDS	Sustainable Drainage Systems (Sürdürülebilir drenaj sistemleri)
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
USEPA	US Environmental Protection Agency (ABD Çevre koruma ajansı)
VOF	Volume of Fluid Method (Akışkan hacmi yöntemi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Fazlar arası kademeli geçiş (γ=1 için kırmızı, γ=0 için mavi) 16
Şekil 3.1. Eleme sonrası agrega örnekleri a) 15-25 mm, b) 5-15 mm ve c) 0-3 mm 19
Şekil 3.2. Basınç dayanımı testi 22
Şekil 3.3. İnfiltrasyon testi için üretilen 50x50x10 cm ebatlarındaki numuneler 23
Şekil 3.4. İnfiltrasyon testi sırasında beton alt yüzeyi 23
Şekil 3.5. İnfiltrasyon test düzeneği 24
Şekil 3.6. İnfiltrasyon testi sırasında halka içi 25
Şekil 3.7. İnfiltrasyon testi üzerinde basınç farkı gösterimi 27
Şekil 3.8. İnfiltrasyon testleri hız-basınç eğrileri a) A, b) B, c) C serisi 28
Şekil 3.9. Musluk için konum ve boyut tanımlama 29
Şekil 3.10. Cisim yüzey grubu oluşturma 30
Şekil 3.11. Cisimler için tanımlama kutucukları ve sıklaştırma seviyesi 31
Şekil 3.12. Simülasyon hacmi yüzey sınır ve tiplerinin belirlenmesi 32
Şekil 3.13. Hücresel bölge için model ve parametre girişi 33
Şekil 3.14. Musluk giriş sınır koşulları ve debi talosu 34
Şekil 3.15. Görselleştirme programı Paraview arayüzü 36
Şekil 4.1. S/Ç oranlarına göre 28 günlük basınç dayanımları 38
Şekil 4.2. S/Ç oranlarına göre numune sızma oranları 39
Şekil 4.3. Numunelerin dayanım ve sızma oranına göre karşılaştırması 40
Şekil 4.4. Gradasyon tane çapı ve sızma arasındaki ilişki 41
Şekil 4.5. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı 43
Şekil 4.6. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı (devamı) 44
Şekil 4.7. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı (devamı) 45
Şekil 4.8. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı (devamı) 46
Şekil 4.9. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı (devamı) 47
Şekil 4.10. *d* ve *f* parametrelerinin sızma oranı (I_s) üzerine etkisi 49
Şekil 4.11. Simülasyon sızma oranlarının (I_s) tekabül ettiği sabit su seviyeleri (h) 50
Şekil 4.12. 3 cm infiltrasyon testi I-D_{10} ilişkisi en uygun eğrisi ve bu eğriye göre h_s=5 cm simülasyonu sızma oranlarına (I_s) karşılık D_{10} değerlerinin belirlenmesi 51
Şekil 4.13. 18 farklı *d*-*f* ve h_s=10 cm ile yapılan simülasyonlara ait I_s-D_{10} noktalarının, 5 cm infiltrasyon testlerine ait I-D_{10} ilişkisi en uygun eğrisi ile validasyonu 51
Şekil 4.14. L=10 cm, h_s=5 cm için *d*-*f* parametrelerine göre sızma oranı I_s (L/dk/dm^2) 53
Şekil 4.15. Re-Π_5 grafiği 55
Şekil 4.16. *Re*-Π_6 grafiği 55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Agrega özellikleri ve elek analizi 20
Çizelge 3.2. Çimento bileşenleri ile çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri 20
Çizelge 3.3. Karışım oranları ve 1 m^3 beton imalatı için gereken malzeme miktarları .. 21
Çizelge 3.4. Simülasyon sınır koşulları 34
Çizelge 3.5. Poroz ortam parametreleri, debi ayarları ve simülasyon süreleri 35
Çizelge 3.6. Çözüm ağı yakınsama çalışması verileri..... 37
Çizelge 4.1. Beton basınç dayanımı testi sonuçları..... 38
Çizelge 4.2. İnfiltrasyon testi sızma sonuçları 39
Çizelge 4.3. Üretilen geçirgen betonların malzeme olarak metreküp maliyetleri..... 40
Çizelge 4.4. Gradasyon tane çapları ve gradasyon numarasına göre sızma ortalaması .. 41
Çizelge 4.5. İnfiltrasyon testlerinde özgül debi (q) ve Reynolds sayıları (Re) 42
Çizelge 4.6. İnfiltrasyon testi ve simülasyonda suyun yüzeyden çekilme süreleri 42
Çizelge 4.7. L=10 cm, h_s=5 cm simülasyonlarında *d-f* çiftine karşılık sızma oranı (I_s) . 48
Çizelge 4.8. *d-f* parametrelerine karşılık gelen D_{10} değerleri..... 52
Çizelge 4.9. L=10 cm, h_s=5 cm için *d-f* çiftlerine göre Reynolds sayıları (Re) 52

1. GİRİŞ

Şehirler, beton yığınlarına dönüşmektedir. Şehirler genişleyip betonlaşma arttıkça daha fazla toprak yüzeyinin hava ile teması kesilmekte ve yağış toprağa ulaşamamaktadır. Toprağa ulaşamayan su, yine beton yüzeylerden buharlaşarak nemin artmasına ve ısının daha fazla hissedilmesine neden olur. Bu da özellikle yaz aylarında iç mekânları soğutmak için çok fazla enerji harcanmasının yanı sıra soğutma sistemlerinin havayı daha da ısıtmasına ve kirletmesine sebep olur (Öztürk, 2017).

Hava sıcaklığının ve kirliliğinin artması, yağışın toprakla buluşamaması; toprağın zamanla kurumasına ve yeşil alanların azalmasına sebep olur. Zaten toprağa ulaşamayan yağış; bitki örtüsünün azalmasıyla beraber beton yüzeyle daha hızlı buluşup normal yağışlarda bile sel felaketinin görülmesine neden olur.

Kentsel ısı adası etkisinin oluşmaması, yeşil çevrenin artması, yağış akışı kontrolü ve toprağın suyla canlanması için sürdürülebilir drenaj sistemlerine (SuDS) ihtiyaç vardır. SuDS, yüzey akışını kanallar vasıtasıyla toplayıp daha sonra kullanılmak veya toprağa vermek üzere depolar. Bu sistemde, hem yağmur suyundan çeşitli alanlarda faydalanılmış olunur hem de kirlilik kontrolü yapılarak toprağa verilen suyun kalitesi arttırılır (Scholz ve Grabowiecki, 2007).

Geçirimli kaplama sistemi, sürdürülebilir drenaj sistemlerinin bir parçasıdır. Yüzey akışının kanala aktarılmasında görev alır. Çeşitli katmanlardan oluşur. En üst katman gözenekli kilitli beton blok kaplama taşları ve aralarındaki drenaj derzlerinden oluşur. Derzler ince agregayla doldurulur. Üstten ikinci katman yatak tabakasıdır ve kum gibi ince malzemeden oluşur. Bu katman filtre görevi gördüğü gibi tıkanma da burada gerçekleşir. Üçüncü katman temeldir ve çakıl gibi iri malzemeden oluşur. Drenaj boruları bu katmanda en alt kısımda bulunur. İsteğe bağlı olarak doğal yüzey ile temel tabakası arasına geotekstil malzeme serilebilir (Borgwardt, 2006; Scholz ve Grabowiecki, 2007).

Geçirimli kaplama taşları, akışı direkt olarak doğal zemine aktarmak içinde kullanılabilir. Genellikle yeşil alanlar, yürüyüş yolları, park alanları gibi yerlerde desenli parke taşları kullanılarak uygulanır. Bu taşlar arası çimlendirilebilir ya da kum ile doldurulabilir.

Geçirgen beton, boşluk oranı yüksek olan ve genellikle tek tip agrega kullanılarak yapılan özel bir betondur (Obla, 2007). Araç trafiğinin hafif olduğu alanlarda, park alanlarında, kaldırım ve yürüyüş yollarında kullanılır.

Bu çalışmada geçirgen betonların yapısal ve hidrolik özellikleri incelenmiş, en uygun geçirgen beton tasarımı oluşturulmaya çalışılmıştır. Numune üretimi ve deneysel çalışmalar, Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında üç farklı su/çimento oranı ve sekiz farklı agrega gradasyonu kullanılarak toplam yirmi dört farklı geçirgen beton karışımı tasarlanmıştır. Basınç dayanımı ve infiltrasyon testleri sonucu her karışım için yapısal ve hidrolik özellikler bulunmuştur.

Hidrolik tasarım kapsamında SimFlow programı kullanılarak infiltrasyon testleri modellenmiştir. SimFlow, açık kaynak kodlu ve ücretsiz bir yazılım olan OpenFOAM'ın bir arayüzüdür. OpenFOAM ise bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımıdır. HAD yazılımlarının temeli, doğadaki akışkanların davranışını incelememizi sağlayan Navier-Stokes denklemlerine dayanır. Bunun yanında OpenFOAM, akışkanların yüzey arakesitini belirlemede akışkan hacmi (VOF) yöntemini ve poroz ortamdaki sıvı hareketi için Darcy-Forchheimer denklemini kullanır.

Tezin ikinci bölümünde kaynak araştırması sunulmuş; geçirgen betonlar, Navier-Stokes denklemleri, VOF yöntemi ve Darcy-Forchheimer denklemi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde beton tasarım detayları, deneysel yöntemler ve modellemeyle ilgili açıklamalara yer verilmiştir. Dördüncü bölümde bulgulara yer verilmiş, hassasiyet analizi ve boyut analizi çalışmaları yapılmıştır. Beşinci bölümde sonuçlar sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

Hall (1956), toprak infiltrasyonu üzerinde çalışarak toprağın geçirgenliği, nem özellikleri, zaman ve sızma hızı arasında ilişki kurup denklemler gelişirmiş ve deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Denklemlerinin, saha durumları için tutarlı olmamasıyla birlikte laboratuvar ortamında düzenli toprakların hassas ölçüm yapılabilecek miktarları için geçerli olabileceğine dair bulgular elde etmiştir.

Dierkes, Kuhlmann, Kandasamy ve Angelis (2002) çeşitli geçirgen kaldırım parke taş kaplamaların kirlilik tutma kapasitelerini incelemişler ve kaldırım sisteminin sızma kapasitesini geri kazandırıp daha uzun süre kullanımını sağlamak amacıyla bir temizleme cihazı geliştirmişlerdir. Hunt, Stevens ve Mayes (2002), biri geçirimli kilit parke taş diğeri gözenekli beton olmak üzere iki farklı geçirimli kaldırım sistemi üzerinde çalışmışlardır. Her iki sisteminde yağıştan kaynaklanan akışı önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca yağış miktarının artmasıyla parke taş sistemin etkinliğinin azaldığını ve uygun bakım yapıldığı takdirde 25 mm'ye kadar olan şiddetteki yağışlarda akış oluşturmayacağını bulmuşlardır.

Brattebo ve Booth (2003) bir park alanında dört farklı geçirgen kaldırım sisteminin 6 yıllık etkinliğini dayanıklılık, sızma yeteneği ve sızan su kalitesi açısından incelemişlerdir. Sistemlerin hiç birinde belirgin bir aşınma görmemiş ve neredeyse hiç yüzey akıntısı tespit etmemişlerdir. Sızan suda da toksin madde miktarının risk oluşturmayacak düzeyde kaldığını bulmuşlardır. W. James, C. James ve Von Langsdorff (2003) geçirgen kaldırım tasarımı için ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) yağmur suyu yönetim modelini (SWMM) kullanan bir bilgisayar programının çalışma mantığını ve işlevlerini açıklamışlardır. W. James ve Von Langsdorff (2003) çeşitli yaşlardaki geçirgen kilitli beton parke kaplama sistemlerinin sızma kapasitelerinin yaşlarıyla ve biriken ince madde miktarlarıyla ilişkilerini ve sızan suyun kirliliğini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda geçirimli kaldırım sistemlerinden sızan suyun içindeki ağır metallerin belirlenmiş kılavuz konsantrasyonlarından daha düşük olduğunu, sistem içinde biriken ince madde miktarının sızma kapasitesini azalttığını ve periyodik olarak yapılan temizlemeyle kapasitenin geri kazanılabileceğini bulmuşlardır.

W. James (2004), geçirgen kilitli beton kaplamaların tıkanması üzerine çalışmıştır. Otopark kiri ve tozunu parçacık boyut dağılımı için analiz etmiş ve bir caddedeki kaplama yüzeyinden elde ettiği kir ve toz miktarlarıyla tortu yeniden düzenlemiştir. Sonrasında özel bir dış mekânda tam ölçekli bir geçirgen kaldırım sistemi üzerinde testler gerçekleştirmiştir. Tortu uygulanmasıyla birlikte sızma hızındaki değişimin hemen başlamadığını ve drenaj dolgu malzemesinin gözenekliliğinin sistemin performansını etkilediğini bulmuştur.

Borgwardt (2006) geçirimli beton blok kaplamların uzun vadeli sızma performansları üzerine yaptığı çalışmada infiltrasyon ve yaş arasında bir ilişki olduğunu, infiltrasyon performansının derz dolgusunda kullanılan agreganın tane boyutuna ve geçirimli beton bloğun gözenek boyutuna bağlı olduğunu bulmuştur. Yaptığı çalışmada mineral ve organik ince maddelerin geçirgen beton blok gözeneklerinde ve derz agregası arasında birikmesi sonucu sızma performansında zamanla düşüş gözlemlemiştir. Derzde kullanılan kaba agregaların ince taneli agregalara göre daha fazla sızma sergilediğini gözlemlemiştir. Ayrıca agrega tane boyutunun sızma performansı üzerinde derz açıklığından daha fazla öneme sahip olduğunu ve derz açıklığının sızma üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu bulmuştur.

Scholz ve Grabowiecki (2007) geçirgen kaldırım sistemleri üzerine yapılan çalışmaları incelemişler ve gelecekteki araştırmalar için önerilerde bulunmuşlardır. Bean, Hunt ve Bidelspach (2007a), on beşi çim parke taş, on dördü gözenekli kilitli beton blok taş ve on biri geçirimli beton olmak üzere toplam kırk farklı kaldırım kaplaması üzerinde temizleme öncesi ve sonrası olacak şekilde iki infiltrasyon testi uygulamışlardır. Yapılan çalışmada çim parke taş sistemin infiltrasyon oranlarının sürekliliğinde bakım kritik role sahipken gözenekli beton blok sistem ve geçirimli beton için düzenli toprak alanlarına kurulmasının daha önemli olduğunu, kumlu toprak alanlara kurulan geçirgen kaldırım sisteminin yaş ve tip fark etmeden yüksek yüzey infiltrasyon hızını koruduğunu gözlemlemişlerdir. Bean, Hunt ve Bidelspach (2007b), doğu Kuzey Carolina'da biri kum dolu çim parke taş, ikisi gözenekli kilitli beton blok taş ve biri geçirimli beton olmak üzere toplam dört kaldırım sitemini yüzey akıntısı açısından ve yalnızca gözenekli beton blok taş sistemlerini de su kalitesi açısından incelemişlerdir. Çim parke taş sistemin 25 mm üzerindeki yağıştan kaynaklanan çoğu akışı azalttığını,

geçirimli beton kaldırımın 30 mm'ye kadar olan yağışlarda en fazla 4 mm akışa izin verdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca önceki çalışmaları destekler nitelikte gözenekli beton blok kaldırımlardan sızan suyun azot, amonyak, çinko ve fosfor yoğunluğu açısından asfalta göre daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Chindaprasirt, Hatanaka, Chareerat, Mishima ve Yuasa (2008), gözenekli beton ve çimento hamuru özelliklerini incelemişlerdir. Gözenekli beton yapmak için %1 süper akışkanlaştırıcı ve 0,20 ila 0,25'lik düşük su/çimento oranını uygun görmüşlerdir. Yeterli sıkıştırma ve uygun hamur içeriği kullanılarak %25 boşluk oranı ile 22 MPa dayanımda ve %15 boşluk oranı ile 39 MPa dayanımda geçirimli betonlar üretmişlerdir. Collins, Hunt ve Hathaway (2008), doğu Kuzey Carolina'da bir otopark alanına yan yana kurdukları asfalt, kum dolu çim parke taş, iki farklı gözenekli kilitli beton blok taş ve geçirimli beton kaplama sistemlerini yüzey akış hacmi, toplam çıkış hacmi, pik akış hızı ve pik süresi farklılıklarını bir yıl süreyle izlemişlerdir. Genel olarak tüm geçirgen kaplamaların iyi yönde asfalttan farklı ve birbirine benzer olarak çalıştığını, ayrıca çim parke taş kaplamanın arasında bulundurduğu kumun etkisiyle diğerlerinden bir miktar ayrıldığını gözlemlemişlerdir. Gonzalez-Angullo, Castro, Rodriguez-Hernandez ve Davies (2008) laboratuvar ortamında hazırladıkları özel bir düzenekte, kırılmış inşaat döküntüsü ile tıkanmış %2 eğimli gözenekli kilitli beton blok kaldırımın değişken yağmur etkisi altında yüzey akış ve sızma özelliğini incelemişler ve bu şartlarda bile geçirgen kaldırımın önemli ölçüde sızmaya izin verdiğini görmüşlerdir.

Lian ve Zhuge (2009) kuvarsit, dolomit ve kalkerin geçirgen betonun dayanımı ve geçirgenliği üzerindeki etkilerini kıyaslamışlar ve dolomitin geçirgen beton için uygun agrega türü olabileceğini belirtmişlerdir.

Lian ve Zhuge (2010) geçirgen betonun dayanımı ve geçirgenliği üzerine farklı karışım oranları kullanarak yaptıkları çalışmada dayanım ve geçirgenliğin birbirleriyle ters orantılı olduğunu görmüş ve uygun karışım oranlarını önermişlerdir. Dayanımın artması için süper plastikleştirici veya taş ocağı kumu kullanılmasını uygun görmüşlerdir. İnce agrega ve katkı maddeleriyle birlikte su/çimento oranı 0,32 olan geçirgen betonun 28 günlük basınç dayanımının 40 MPa ve geçirgenliğinin 2 mm/s'nin üzerinde olabileceğini belirtmişlerdir. Park ve ark. (2010) geri dönüştürülmüş agrega, yapay zeolit, silika dumanı ve cam elyafı kullandıkları geçirgen betonun fiziksel, mekanik ve

deniz suyunu arıtma özellikleri üzerine çalışmışlardır. Normal agrega yerine geri dönüştürülmüş agrega kullanımının dayanımı azalttığını ancak silis dumanı ve cam elyafı karıştırılmasıyla normal betona göre %50 daha fazla basınç dayanımı ve %75 daha fazla eğilme dayanımı sergilediğini görmüşlerdir. Hedef boşluk oranı %20 iken geri dönüştürülmüş agreganın uygun karıştırma oranının %50 olduğunu ve granüler yapay zeolitin deniz suyu arıtmasında etkili olduğunu bulmuşlardır.

Lian, Zhuge ve Beecham (2011), geçirimli betonun basınç dayanımı ve gözenekliliği arasındaki ilişkiyi incelemişler ve matematiksel model geliştirmişlerdir. Mevcut denklemleri değerlendirmişler ve Griffith'in kırılma teorisinden türettikleri bir modelin malzeme gözenekliliğinden yola çıkarak basınç dayanımı tahmininde daha iyi sonuç verdiğini görmüşlerdir. Lucke ve Beecham (2011) sekiz yıl süreyle hizmet vermiş ve hiç bakım yapılmamış gözenekli kilitli beton blok kaldırım üzerinde tıkanmayı araştırmışlardır. Kilitli beton blok kaldırımın yağmur suyu akışındaki tortuları filtrelemede etkili olduğu, tortunun %90'dan fazlasının beton blok taşların hemen altındaki 2-5 milimetrelik yatak agregasında biriktiğini ve zamanla geçirgenliğin azalmasına rağmen 8 yıllık bir sürecin ardından geçirgenliğin hala yeterli düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Ajamu, Jimoh ve Oluremi (2012), agrega tane boyutu olarak 9,375 mm ve 18,75 mm, agrega/çimento oranı olarak 6/1, 8/1 ve 10/1'lik oranlar kullanarak ürettikleri geçirgen betonlar üzerinde basınç dayanımı ve geçirgenliği incelemişlerdir. Her iki tane boyutunda da 6/1'lik agrega/çimento oranına sahip örneklerin en yüksek dayanımı verdiğini, 9,375 mm agrega kullanılan örneğin 18,75 mm kullanılana göre daha yüksek dayanıma ve 18,75 mm agrega kullanılan örneğin 9,375 mm kullanılan örneğe göre daha yüksek geçirgenliğe sahip olduğunu bulmuşlardır. Sansalone, Kuang, Ying ve Ranieri (2012), geçirgen kaldırımın filtreleme ve tıkanması üzerinde çalışmışlar, elde ettikleri veriler doğrultusunda geçirgen kaldırım sistemimin üç ayda bir düzenli olarak temizlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Lucke ve Beecham (2013) 18 m^2 alana sahip gözenekli kilitli beton blok taş ve dar sızma derzlerine sahip geçirimsiz beton parke taş kaldırım prototipleri üzerinde %5 ve %10 eğimlerde infiltrasyon hızlarını test etmişlerdir. İki kaldırım siteminin de her iki eğimde çok farklı davranışlar sergilediğini ve suyun tüm akış hızlarında gözenekli beton

blok kaldırımın yüzeyinden daha derinlere indiğini görmüşlerdir. Mohammed, Nuriddin ve Dayalan (2013), uçucu kül, silika dumanı, kâğıt fabrikası külü, hurma yağı külü ve pirinç kabuğu külü kullanarak geçirgen betonun dayanımını arttırmak adına çalışma yapmışlardır. Puzolanik malzemenin çimento ile %5 oranda değiştirilmesinin dayanım, boşluk oranı ve geçirgenliği arttırdığını bulmuşlardır.

Drake, Bradford ve Van Seters (2014), iki farklı kilitli beton blok taş kaplama ve bir asfalt kontrol kaplamasını ilkbahar, yaz, sonbahar su kalitesi açısından iki yıl süre ile incelemişlerdir. Geçirgen kaldırım kullanımının, kentleşmenin yerüstü suyu üzerindeki etkisini hafifleteceğini ve mükemmel bir su arıtımı sağladığını belirtmişlerdir. Eyre ve Bhalchandra (2014) Birleşik Arap Emirliklerinin sürdürülebilir drenaj sistemleri (SuDS) programı kapsamında Dubai'deki bir alanda geçirimli kaldırım sistemleri üzerinde incelemelerde bulunmuşlar ve bu sistemlerin inşası için bir takım öneriler sunmuşlardır. Nichols, Lucke ve Dierkes (2014), gözenekli kilitli beton blok döşemeler için var olan iki farklı infiltrasyon hızı ölçüm yöntemini karşılaştırmışlardır. Çift halka infiltrometre testi (DRIT)'nin yağış simülasyonu infiltrometre testi (RSIT)'den %60 daha fazla sonuç verdiğini, iki yöntemin birbirine yakın ve aralarında pozitif bir korelasyon olduğunu, RSIT yönteminin daha gerçekçi ve güvenilir bir yöntem olduğunu bulmuşlardır.

Borgwardt (2015) uzun vadeli yaptığı çalışmalarda elde ettiği yeni bulguların daha önceki sonuçları desteklediğini ve kaldırımın yaşı arttıkça tıkanmadan dolayı sızma performansının azaldığını belirtmiştir. Leipard, Kevern ve Richardson (2015), geliştirdikleri yöntem ve düzenekle kilitli beton blok taş kaplamanın yatay ve eğimli durumlardaki infiltrasyon özelliklerini incelemişler ve eğik durumdaki kaplamanın infiltrasyon hızı ve oranının yatay duruma göre önemli ölçüde daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Adewumi, Owolabi, Alade ve Olatunji ve ark. (2016) destek vektör regresyonu (SVR) platformunda hesaplamalı zekâ yaklaşımı kullanarak geçirgen betonun fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Oluşturdukları modellerle elde ettikleri verilerin deneysel verilerle uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Deneysel olarak zaman alan özelliklerin genelleştirilmiş modeller sayesinde hızlıca tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Akkaya ve Çağatay (2016) çimento tipi ve agrega granülometrisinin geçirimli betonların basınç dayanımı üzerine etkilerini

araştırmışlardır. Kum eklenmemiş karışımlarda yalnızca CEM I 52,5 R tipi çimentolu numune 20 MPa üzerine çıkarken kum eklenmiş karışımın 72,3 MPa değerine eriştiğini görmüşler ancak dayanımı arttırmak adına kumun geçirgenliği olumsuz yönde etkilemeyecek seviyede eklenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Alyaseri ve Zhou (2016) kanalizasyon atık su miktarını azaltmak için St. Louis şehrinde yapılan yeşil sokak pilot çalışmasında geçirgen asfalt, geçirgen beton ve geçirgen blok taş kaldırımın yüzey akışlarındaki azalmayı incelemişler ve azalmanın sırasıyla %13, %36 ve %46 olduğunu görmüşlerdir. Bentarzi ve diğerleri (2016), ezilmiş beton parçaları ve organik madde karışımından elde ettikleri yeni bir geçirgen malzemenin aşırı yağış koşullarındaki hidrolik davranışlarını incelemişlerdir. Y. Kim, Gaddafi ve Yoshitake (2016), çeşitli katkı maddelerinin geçirgen beton üzerine etkilerini incelemişlerdir. Uçucu külün dayanımı düşürdüğünü, elyafın dayanımı arttırdığını, lastik yongasının da bağlayıcılardan erken parçalanma sebebiyle dayanımı düşürdüğünü bulmuşlardır. Lastik talaşının gözenekleri tıkayarak sızmayı azalttığını, liflerin infiltrasyon hızını arttırdığını ve kıvrılmış liflerin düz olanlara göre daha fazla gözenek oluşturduğunu ancak aşırı lif kullanımının gözenekleri tıkayabileceğini görmüşlerdir. Geçirgen betonun mekanik özelliklerini geliştirmek için makul miktarda katkı maddesi kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Kumar ve diğerleri (2016) bir otoparktaki geçirgen asfalt, geçirgen beton ve gözenekli beton blok taş kaplamaları yapımlarından itibaren dört yıl süreyle gözlemlemişlerdir. İlk bir yılın sonunda her üç tip geçirimli sistemde de çok az miktarda sızma oranı kaybı varken üçüncü yıldan itibaren gözeneklerin tıkanmasıyla birlikte sızmanın azaldığını tespit etmişlerdir.

Kamali, Delkash ve Tajrishy (2017), kentsel alanlardaki geçirgen kaldırımların akışa etkilerini irdelemek amacıyla laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Yatay/dikey hidrolik iletkenliğin 3,5 olduğunu ve üç yıldan sonra hidrolik iletkenlikte %20 azalma meydana geldiğini bulmuşlardır. İlk beş yılda akışta taşma olmadığını, altıncı yılda yüzey akış katsayısının %15, yedinci yılda %35 olduğunu ve yedi yılda geçirimli kaldırımın tamamen tıkandığını tespit etmişlerdir. Kirleticiler bakımından geçirgen kaldırım NH_4^+ ve PO_4^{-3} orta seviye etki gösterirken NO_3^- için olumsuz olduğunu belirtmişlerdir. Wu, Sun, Liu ve Yin (2017), geçirimli betonun ısıl davranışını incelemek adına Portland çimentolu normal beton ve Portland çimentolu geçirimli beton üzerinde çeşitli simülasyon testleri uygulamışlardır. Normal beton ile karşılaştırıldığında geçirimli

betonun daha fazla ısı enerjisi emdiğini ve daha yüksek yüzey sıcaklığına sahip olduğunu, yüksek gözeneklilik sayesinde daha düşük ısıl iletkenliğe sahip olduğunu bulmuşlardır. Rüzgârlı koşullar altında geçirgen betonun daha hızlı ısı kaybettiğini görmüşlerdir. Yazıcı ve Mardani (2017) agrega tane boyutu ve su/çimento (S/Ç) oranının geçirgen betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. S/Ç oranı 0,3 olup ince malzeme içermeyen beş karışım ve su/çimento oranı 0,35 olup ince malzeme içeren üç karışım üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, ultrasonik darbe hızı ve geçirgenlik testleri yapmışlardır. Su/çimento oranının arttırılmasına rağmen kaba agreganın %20 oranında ince malzemeyle değiştirilmesinin geçirgen betonun mukavemetini arttırdığını ancak geçirgenliğini azalttığını belirtmişlerdir. Kia, Wong ve Cheeseman (2017a) geçirgen betonun tıkanması üzerine bir literatür çalışması yapmışlar ve geçirgen betonun tıkanıklığını gidermek amacıyla düzenli olarak bakım yapılması gerektiğinin ancak tıkanma derinlerdeyse ne kadar bakım yapılırsa yapılsın geçirimliliğin tamamen geri getirilemeyeceğini belirtmişlerdir. Kia, Wong ve Cheeseman (2017b), kil, kum ve her iki materyali de içeren akışlar altında geçirgen betonun tıkanmasını incelemişlerdir. En fazla tıkanmayı aynı anda iki materyalin birden bulunduğu akışlarda gözlemlemişlerdir.

Akkaya ve Çağatay (2018) geçirimli betonun karayolları için uygunluğunu kontrol etmek amacıyla farklı agrega boyutları ve agrega/çimento oranlarıyla ürettikleri betonlar üzerinde testler yapmışlardır. Dayanım değerlerinin agrega/çimento oranı azaldıkça arttığını ve tane boyutu 8-16 mm olan karışımlarda en uygun agrega/çimento oranının 2,5 olduğunu, agrega boyutu büyüdükçe en yüksek ve en düşük dayanım değerlerinin birbirine yaklaştığını, ortalama silindir yarma dayanımın ortalama basınç dayanımı değerinin %12'si kadar olduğunu bulmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre dayanımların gerekli teknik şartnamede geçen değerlerin üzerinde olduğunu belirtmişlerdir. Kia, Wong ve Cheeseman (2018), paketlenmiş cam küreler, farklı boyutlardaki agregalar ve ticari geçirgen betonların kil, kum ve her iki materyali birden içeren akışlar altındaki tıkanmasını incelemişlerdir. Ürettikleri geçirgen betonların basınç dayanımlarının 6 ila 32 MPa arasında değiştiğini, gözenekliliğin dayanımla ters orantılı olduğunu ve her %1 gözeneklilik artışı için dayanımın %4 düştüğünü bulmuşlardır. Geçirgen betonlar için ilk geçirgenliğin 0,1 ila 1,7 cm/s, paketlenmiş cam küreler ve agregalar içinse 0,3 ila 3,5 cm/s arasında değiştiğini ayrıca artan basınçla

beraber tüm numunelerde geçirgenliğin azaldığını bulmuşlardır. Tıkanmanın, kille topaklanmış kumun numunelerin üst kısmında birikmesi sonucu oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Topçu, Felekoğlu ve Çaylak (2018) agrega türü olarak dolomit ve kireçtaşı, 3,5; 4; 4,5 agrega/çimento oranı ve ince malzeme kullanarak ürettikleri geçirgen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. İnce malzeme katılmasının dayanımı büyük ölçüde düşürdüğünü ve boşluk oranını arttırmasıyla geçirimliliği arttırdığını, agrega/çimento oranının yükseltilmesinin boşluk oranı ve geçirimliliği arttırdığını ve dayanımı azalttığını, ıslak haldeki numunelerin kuru haldekilere göre daha düşük dayanım verdiğini görmüşlerdir. Wang, Meng, Tan, L. Zhang ve Y. Zhang (2018), sinterlenmiş seramik gözenekli tuğla ve geçirgen betonun evaporatif soğutmasını dış termal ortama etkisini incelemişlerdir. Gözenekli tuğlanın su emme katsayısı ve su tutma kapasitesinin geçirgen betondan yüksek olduğunu, geçirgen kaldırım üzerine su serpmenin yayaların ısı stresini azaltabileceğini, serpmeden sonra gözenekli tuğlanın etkisini geçirgen betona göre üç gün daha fazla sürdürdüğünü belirtmişlerdir.

Alparslan ve diğerleri (2019), %100 iri agrega ve %90 iri agrega %10 kum içeren iki karışım oranı üzerinde farklı sentetik lifler kullanarak liflerin geçirimli betona etkilerini araştırmışlardır. Lif eklenmesiyle geçirimli betonların eğilme dayanımı ve aşınma dirençlerinin arttığını, mikro liflerde geçirgenliğin fazla değişmediğini ancak mikro liflerin su geçirgenliğini azalttığını ve liflerin basınç dayanımını etkilemediğini görmüşlerdir. Chen ve diğerleri (2019), geleneksel beton, geçirgen beton ve çelik lif kullandıkları yüksek iletkenliğe sahip geçirgen betonun termal özelliklerini incelemişlerdir. Kuru durumda geçirgen betonların normal betona göre daha yüksek yüzey sıcaklıklarına; ıslak durumda ise benzer veya daha düşük yüzey sıcaklıklarına sahip olduklarını görmüşlerdir. Yüksek iletkenliğe sahip geçirgen betonun pik yüzey sıcaklığının alt katmanlardaki ısı verimliliğinden dolayı geleneksel geçirgen betona göre 1 ila 3 ^{o}C daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Geçirgen beton döşemelerin güneşli günlerde normal betona oranla bir miktar daha fazla ve yağmurlu günlerdeyse bir miktar daha az ısı çıkışına izin verdiğini ayrıca termal iletkenliğin arttırılmasıyla ısı çıkışının %2,5 ila 5,2 oranında azaltabileceğini bulmuşlardır. Dai ve diğerleri (2019) geçirgen betonun agrega gradasyonu ve S/Ç oranına göre basınç ve çekme dayanımlarını incelemişler ve RFPA2D sayısal simülasyon yöntemini kullanarak test etmişlerdir.

Sonuç olarak aynı agrega gradasyonunda S/Ç oranının artmasıyla çekme ve basınç dayanımının azaldığını; S/Ç oranının sabit olması durumunda agrega tane boyutu küçüldükçe dayanımların arttığını bulmuşlardır. Ortega-Villar ve diğerleri (2019) hafif trafik için yeterli basınç dayanımı ve hidrolik iletkenliğe sahip geçirgen betonlar üretmişler ve örnekleri Fe_2O_3 içeren bir karışım ile kaplamışlardır. Yaptıkları analizlerde Fe_2O_3 içeren nanopartiküllerin beton yüzeyinde değişmeden kaldığını saptamışlar ancak geçirgen betonlarda kirleticilere karşı herhangi bir değişim gözlemleyememişlerdir. Xie, Akin ve Shi (2019), geçirimli beton kaplamaların faydaları ve dayanıklılığı üzerine genel bir literatür çalışması yapmışlar ve geçirgen betonların çevresel faydaları ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi tam olarak ortaya koymak adına daha fazla çalışma yapılması gerektiğini söylemişlerdir.

Adilah, Ayman Muhammed, Ramadhansyah, Rokiah ve Hainin (2020), farklı karışım oranlarında hazırladıkları geçirgen betonlar üzerinde iki aşamada gerçekleştirdikleri çalışmalarında ilk etapta 10 cm ayrıt uzunluklu küp numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarını incelemişler ve maksimum 10,9 MPa dayanıma ulaşmışlardır. İkinci aşamada agrega yerine sırasıyla %30-50-70 çelik cürufu kullanarak ürettikleri 20x10 cm silindir numuneler üzerinde basınç dayanımını incelemişlerdir. Çelik cürufu ilavesinin basınç dayanımını arttırdığını ancak yeterli düzeyde olmadığını belirtmişlerdir. Ürettikleri geçirgen betonların infiltrasyon hızlarının 5-14 mm/s arasında değiştiğini ve bunun yeterli olduğunu söylemişlerdir.

2.2. Geçirgen Beton

Geçirgen beton, yüksek gözenekliliğe sahip özel bir beton türüdür. İçerisindeki birbiriyle bağlantılı geniş boşluklar sayesinde suyun geçmesine izin vererek yağış ya da diğer etmenlerden kaynaklanan yüzey akışını azaltır veya tamamen ortadan kaldırır. Metrekare başına dakikada 81 ila 730 litre suyun geçişine izin veren infiltrasyon oranlarına sahiptir. Geçirgen beton; normal Portland çimentosu, kaba agrega ve sudan meydana gelir. Kullanılan agrega genelde tek tiptir. Geçirgen betonda ince agrega kullanılmaz ya da çok az miktarda kullanılır. Boşlukların birbirleriyle bağlantısına izin verecek ve kaba agregayı birbirine bağlayacak kadar çimento hamuru kullanılır. Geçirgen betonun boşluk oranı %15 ila 35 arasında değişir ancak genellikle %20 hava oranı kullanılır. Geçirgen betonun özelliklerini geliştirmek için genelde kimyasal

katkılar kullanılır ancak nadir de olsa katkısız olarak üretilebilir. Geçirgen beton karışımı normal beton karışımına göre daha katı haldedir ve çökme değeri 2 cm'nin altındadır. Ancak çökme, geçirgen beton için belirleyici bir kıstas değildir. Birim hacim ağırlığı (BHA) 1600 ila 2000 kg/m^3 arasındadır. Basınç dayanımı 2,8 ila 28 MPa arasında değişir ve genellikle 17 MPa civarındadır (ACI 522R-10).

2.3. SimFlow

Akışkanlar dinamiği problemlerini bilgisayar yardımıyla çözme isteği hesaplamalı akışkanlar dinamiğini doğurmuştur. HAD yazılımları normalde çözümü zor ve vakit alıcı olan birçok akış problemini kolay ve hızlıca çözüp zamandan tasarruf etmemizi sağladığı gibi laboratuvar ortamında kurulumu mümkün olmayan gerçek boyutlara yakın modeller tasarlamamıza izin vererek tahminlerde bulunmamızı sağlar. ANSYS, OpenFOAM, PowerFlow, SimScale, COMSOL Multiphysics, Autodesk CFD, IVRESS, FLOW-3D, Altair HyperWorks Suite, SimulationX, PIPESIM, ASL, Elmer, SU2, Ingrid Cloud, XFlow, Flow Vision gibi birçok HAD yazılımı mevuttur.

SimFlow, açık kaynak kodlu ve ücretsiz bir yazılım olan OpenFOAM'ın bir arayüzüdür. Isı transferi, türbülanslı akışlar, radyasyon, kaldırma kuvveti, çok fazlı akışlar, gözeneklilik, sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar SimFlow ile çözümlenebilir.

Bin Yusof, Bin Suhaimi, Bin Mohd Aris, ve Akhtar (2016), SimFlow 2.2 kullanarak geometrik parametrelerin girdap tüp soğutma cihazı üzerine etkilerini incelemek adına sayısal simülasyon yapmışlardır. Enteria (2016) Filipinler'de müstakil yapılar için farklı çatı tasarımlarının rüzgâr davranışlarını SimFlow ile modellemiş ve modelini tam ölçekli rüzgâr tüneli sonuçlarıyla doğrulamıştır. Nowak (2016) çeşitli ısı emicilerin viskoz ve atalet direnci katsayıları tahminini bir HAD programı olan ANSYS Fluent ile yapmıştır. Rojas-Sola, Garcia-Baena ve Hermoso-Orzaez (2016), HAD programlarının avantaj, dezavantaj ve uygulamaları üzerine çalışmış, ANSYS Fluent ve OpenFOAM programlarını incelemiştir. ANSYS Fluent'in yeterince test edilmiş, kullanımı kolay ancak maliyetinden dolayı fazla tercih edilmeyen bir program olduğunu; OpenFOAM'ın ise hala gelişmekte olan ve bazen kullanımı zor olan büyük potansiyele sahip ve ücretsiz bir program olduğunu söylemiştir.

Enteria ve Cuartero-Enteria (2017) Filipinler'de müstakil bir evde doğal havalandırmayı sağlamak için yapılacak tadilatta SimFlow'dan yararlanmışlardır. Tadilat öncesi ve sonrası pencere ve kapı açıklıklarından geçen rüzgârı simüle ederek hane halkının havalandırmaya ayırdığı enerjiyi azaltmışlardır. Rey-Martinez, McGarvie ve Perez-Fernandez (2017), normal ve hidropik kanal modellerinin kalori testinin endolenfatik akış termodinamiği hesaplamasını SimFlow kullanarak yapmışlardır.

Y. Kim, N. Kim, J. Park ve C. Park (2018), cephedeki su akışını modellemek için Drainage Polysurface ve Rhino'yu temel alan Rainflow01 ve Rainflow02 programlarını kullanmışlardır. Shaban, Mielgo, Shahid ve Buss (2018), dört çeyrek daireli rüzgâr alıcının hava akış dinamiğini SimFlow ile incelemişlerdir. Rüzgâr hızı ile rüzgâr alıcıdan çıkan akış arasında doğrusal bir ilişki olduğunu görmüşler ve hava akımının sağlanması için gereken en az hızın tahmin edilebileceğini söylemişlerdir. Okafor (2018) HAD programlarının nasıl kullanılması gerektiğini ortaya koymak amacıyla AIJ ve COST yönergelerini karşılaştırmış ve iki yönergenin de tatmin edici olduğunu söylemiştir. Okafor, Ogunoh, Ezeokonkwo ve Obodoh (2018), yaklaşık 50 m yüksekliğindeki bir binanın çevresindeki rüzgâr basınçlarını SimFlow ile simüle etmişlerdir. Buldukları sonuçları İngiliz Standardı BS6399-2. 1997 ile karşılaştırmışlar ve HAD programının rüzgâr yükünü tahmininde iyi bir araç olabileceğini söylemişlerdir.

Korkmaz ve Ghaznawi (2019) geniş tepeli savak üzerindeki akışı deneysel ve sayısal olarak modellemişler ve sayısal model için SimFlow programını kullanmışlardır. Sonuç olarak deneysel bulguların sayısal modelden elde edilen verilerle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

SimFlow ile yapılan simülasyon bir veri analizi ve görselleştirme programı olan ParaView ile görüntülenmektedir. OpenFOAM, çift fazlı bir modelde akışkanların yüzey profilini belirlemek için VOF yöntemini kullanır. Sıvı akışı hesaplamalarında Navier-Stokes ve poroz ortam içinse Darcy-Forchheimer denklemlerini kullanır. Bu çalışmada SimFlow ve ParaView programları kullanılmıştır.

2.4. Navier-Stokes Denklemi

Akışkanlar mekaniğinin temel denklemlerinden olan Navier-Stokes denklemleri doğadaki sıvıların davranışını incelemek için kullanılır. Kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu kanunlarına dayanır. Newton kanunlarının sonsuz küçüklükteki bir newtonyen akışkan hacmine uygulanmasıyla elde edilir. Kütle korunumu (süreklilik) kontrol hacminin girişi ve çıkışı arasındaki kütle farkının sıfır olduğu anlamına gelir. Süreklilik denklemi korunumsuz formu (non-conservation form) aşağıdaki gibi yazılır (Wendt, 2009):

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho.\nabla\vec{V} = 0 \tag{2.1}$$

Burada ρ yoğunluk, $\vec{V}$ hız vektörü ve ∇ diverjans operatörüdür. Yoğunluk sabitken akışkan sıkıştırılamaz kabul edilir. Süreklilik basitleştirilerek aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{d\rho}{dt} = 0$$
$$\nabla\vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2.2}$$

Momentumun korunumu, kontrol hacminde momentumun sabit tutulmasıdır. Newton'un ikinci yasasından türetilen Navier-Stokes denklemi momentumun korunumunu ifade eder. Newton'un ikinci hareket yasası aşağıda verilmiştir:

$$F = m.a$$
$$a = \frac{d\vec{V}}{dt} \tag{2.3}$$

Denklemde *F* bir cisme uygulanan net kuvvet, *m* cismin kütlesi ve *a* cismin ivmesidir. Akışkan kontrol hacmi için bu denklem aşağıdaki gibi uyarlanabilir:

$$\rho\frac{d\vec{V}}{dt} = f = f_{gövde} + f_{yüzey}$$
$$f_{gövde} = \rho.\vec{g} \tag{2.4}$$
$$f_{yüzey} = f_{basınç} + f_{viskoz} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} = -\nabla p + \nabla\tau_{ij}$$

Burada *f*, sıvı parçacığına birim hacim başına uygulanan toplam kuvvet, $f_{gövde}$ sıvının kütlesinden kaynaklanan kuvvet, $f_{yüzey}$ ise basınç ve viskoz kuvvetlerdir. Denklemde $\vec{g}$ ivme ve τ_{ij} stres tensörüdür. Stres tensörü aşağıdaki gibidir:

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \delta_{ij}.\lambda.\nabla\vec{V} \tag{2.5}$$

Newton'un momentum denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\rho\frac{d\vec{V}}{dt} = \rho.\vec{g} - \nabla p + \nabla\tau_{ij} \tag{2.6}$$

Stres tensörü τ_{ij} Newton denkleminde açılırsa newtonyen bir sıvı için Navier-Stokes denklemi elde edilir ve aşağıdaki gibi yazılır:

$$\rho\frac{d\vec{V}}{dt} = \rho.\vec{g} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \delta_{ij}.\lambda.\nabla\vec{V}\right] \tag{2.7}$$

Sıvı yoğunluğu sabitse dinamik viskozite μ sabit ve $\nabla\vec{V}$ =0 kabul edilir. Sıkıştırılamaz üç boyutlu akış için Navier-Stokes denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

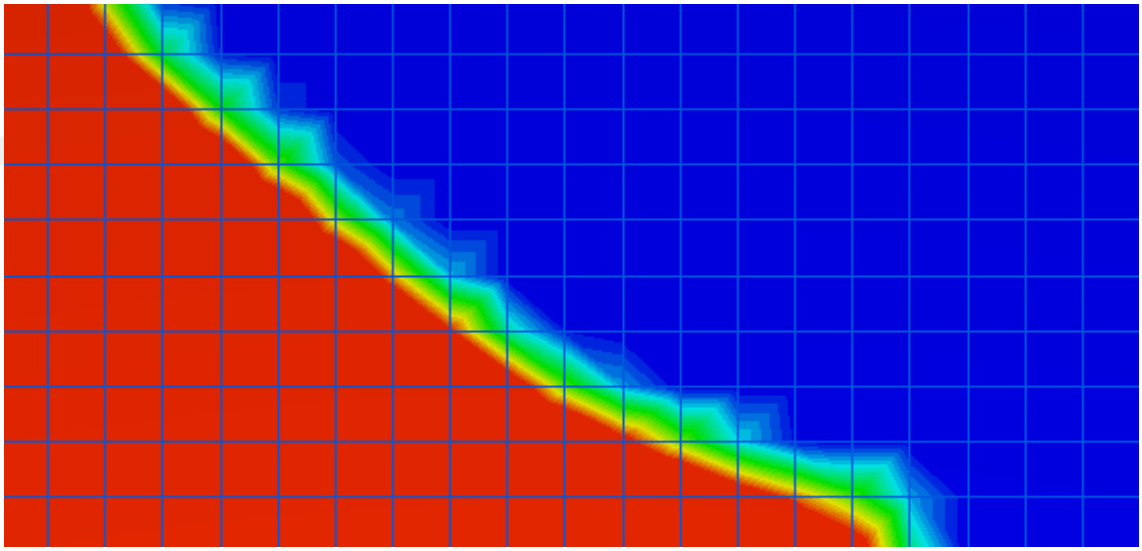
$$\rho\frac{d\vec{V}}{dt} = \rho.\vec{g} - \nabla p + \mu.\nabla^2\vec{V} \tag{2.8}$$

Hız her boyutta var olduğu zaman Navier-Stokes denklemleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \\
\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \\
\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)
\end{aligned} \tag{2.9}$$

2.5. Sıvı Hacmi Yöntemi (VOF)

VOF, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde akışkanın serbest yüzeyini veya iki akışkanın ara yüzeyini belirlemede kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, her bir hücredeki akışkan hacminin bulunduğu hücre hacmine oranı γ ile gösterilir ve 0 ila 1 arasında bir değer alır. Hücrenin tamamı akışkan ile doluysa γ=1, kısmen doluysa γ=akışkanın hücreyi doldurduğu oran, tamamen boşsa γ=0 değerini alır (Şekil 2.1). Çevre hücrelerin değerleri de kullanılarak yüzey eğimi belirlenir.



Şekil 2.1. Fazlar arası kademeli geçiş (γ=1 için kırmızı, γ=0 için mavi)

VOF yönteminde bir momentum ve bir süreklilik denklemi çözülür. VOF yöntemi için süreklilik denklemi, yoğunluk (ρ) yerine γ ifadesi yazılarak aşağıdaki gibi düzenlenir (Hemida, 2008):

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla\left(\gamma \vec{V}\right) = 0$$
$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla\left(\gamma \vec{V}\right) + \nabla\left(\gamma(1-\gamma)\vec{V_r}\right) = 0 \qquad (2.10)$$

Denklemde geçen $\vec{V_r}$ ifadesi arayüzü sıkıştırmak için uygun hızı temsil eder. Diğer yandan Navier-Stokes hareket denklemi de serbest yüzey gerilme kuvveti (F_s) eklenerek aşağıdaki gibi yazılır:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho.\vec{g} - \nabla p + \mu.\nabla^2\vec{V} - F_s$$

$$F_s = \sigma.\kappa(x).\vec{n}$$

$$\vec{n} = \frac{\nabla\gamma}{|\nabla\gamma|} \tag{2.11}$$

$$\kappa(x) = \nabla\vec{n}$$

Denklemde geçen σ yüzey gerilme tensörü, $\vec{n}$ arayüz normal birim vektörü ve $\kappa(x)$ arayüz eğriliğidir. ρ_1 ve ρ_2 akışkanların yoğunluğu olmak üzere arayüz yoğunluğu ρ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\rho = \gamma.\rho_1 + (1-\gamma).\rho_2 \tag{2.12}$$

2.6. Darcy-Forchheimer Denklemi

Darcy-Forchheimer denklemi gözenekli ortam boyunca hareket eden sıvının sürtünmesi sonucu oluşan basınç kaybını akış hızıyla ilişkilendiren deneysel bir denklemdir. Geçirgen gözenekli ortamdaki akış Darcy-Forchheimer kanunuyla tanımlanır ve basınç gradyanı aşağıdaki gibi yazılır (Bejan, 1984):

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\mu}{\kappa_1}q - \frac{\rho}{\kappa_2}q^2 \tag{2.13}$$

Burada P basıncı (Pa), μ dinamik viskoziteyi (kg/m/s), ρ sıvı yoğunluğunu (kg/m^3), q özgül debiyi (m/s), κ_1 intrinsik permeabiliteyi (m^2) ve κ_2 atalet permeabilitesini (m) temsil eder. Darcy katsayısı (d), intrinsik permeabilitenin tersidir ve Forchheimer katsayısı (f) atalet permeabilitesine bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$d = \frac{1}{\kappa_1}$$

$$f = \frac{2}{\kappa_2} \tag{2.14}$$

OpenFOAM, gözenekli ortamda sıvı akışını modellemek için Darcy-Forchheimer denklemini kullanır. Darcy-Forchheimer denklemi, Navier-Stokes hareket denklemine basınç gradyanı (∇P) olarak S terimi ile eklenir. S terimimin birimi Pa/m'dir ve denklemde aşağıdaki gibi yazılır (Hafsteinsson, 2009):

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho . \vec{g} - \nabla p + \mu . \nabla^2 \vec{V} + S$$
$$S = -\left(\mu . d_i + \frac{\rho |\vec{V}|}{2} f_i \right) \vec{V} \tag{2.15}$$

Darcy-Forchheimer denkleminde sıvının ortamda aldığı yol L (m) basınç gradyanından çekilerek eşitliğin diğer tarafına yazıldığında tek doğrultu için u sıvı hızı (m/s) olacak şekilde basınç kaybı ΔP (Pa) aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$\Delta P = \mu . d . L . u + \frac{1}{2} . \rho . f . L . u^2 \tag{2.16}$$

2.7. Poroz Ortamda Reynolds Sayısı

Atalet ve viskoz kuvvetlerin birbirine oranı olan boyutsuz Reynolds sayısı (Re) akış rejimini tanımlamada kullanılır. Bear ve Verruijt (1987)'ye göre poroz ortamlarda Re<1-10 olduğu durumda lineer Darcy denklemi kullanılır. Daha büyük değerlerde atalet kuvvetlerinin etkinliği artar ve non-lineer akım bileşeni etkili olmaya başlar. Re=150-300 arasında bir değerde akım türbülanslı hale gelir. Reynolds sayısı hesaplanırken, boru akışlarına benzer şekilde kanalın en kesitini tanımlayan bir uzunluk (D) gerekmesine rağmen genellikle belirleme kolaylığından dolayı tane boyutuyla ilişkili bir değer kullanılır. Genellikle ortalama tane çapı (D_{50}) ya da efektif çap (D_{10}) kullanılır. Daha belirleyici etkiye sahip olduğundan bu çalışmada efektif çap değerleri kullanılmıştır. Reynolds sayısı aşağıdaki gibi bulunur:

$$Re = \frac{\rho . q . D_{10}}{\mu} \tag{2.17}$$

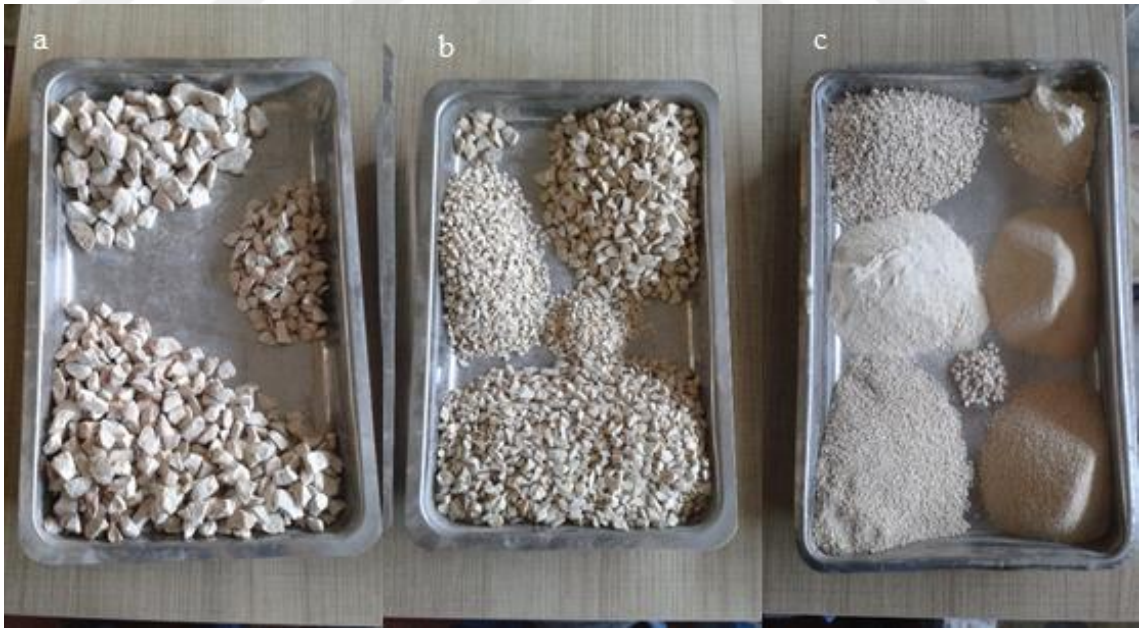
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalar, 218M585 numaralı "Geçirimli Betonun Yapısal ve Hidrolik Tasarımı" isimli TÜBİTAK projesi kapsamında Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Çalışmada Portland çimentosu ve üç farklı boyut sınıfında agrega, üç farklı S/Ç oranı (0,28; 0,31; 0,34) ile kombine edilerek kullanılmıştır. Betonların üretim ve bakımında Bursa şebeke suyu kullanılmıştır. Üretilen geçirgen betonlarda katkı maddesi kullanılmamıştır.

Beton üretiminde Bursa Beton firmasının agrega deposundan temin edilen 0-3 mm, 5-15 mm, 15-25 mm aralığında sınıflandırılan üç farklı boyut sınıfında kırma kireçtaşı agregalar kullanılmıştır (Şekil 3.1). Agregaların tane boyut dağılımı (elek analizi) TS EN 933-1, tane yoğunluğu ve su emme oranları TS EN 1097-6 standartlarına göre bulunmuştur. Kullanılan agregaların özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Eleme sonrası agrega örnekleri a) 15-25 mm, b) 5-15 mm ve c) 0-3 mm

Çizelge 3.1. Agrega özellikleri ve elek analizi

Elek açıklığı	Agrega boyutu ve elekten geçen yüzdeler		
(mm)	0-3 mm	5-15 mm	15-25 mm
32,5	100,00	100,00	100,00
22,4	100,00	100,00	100,00
16	100,00	100,00	68,21
11,2	100,00	99,12	10,02
8	100,00	64,88	0,25
5,6	100,00	18,13	0,00
4	99,20	2,37	0,00
2	76,45	0,12	0,00
1	47,67	0,00	0,00
0,5	31,65	0,00	0,00
0,25	19,18	0,00	0,00
0,063	3,91	0,00	0,00
Elek altı	0,00	0,00	0,00
KYD (g/cm^3)	2,65	2,65	2,68
Su emme (%)	2,03	1,09	0,37

Beton üretiminde bağlayıcı olarak Bursa Çimento firmasının CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özellik ve bileşenleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çimento bileşenleri ile çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Klinker Ana Bileşenleri (%)		Kimyasal ve fiziksel özellikler	
$3CaOSiO_2$	30-70	Kızdırma kaybı	≤ %5
$CaOSiO_2$	10-30	Çözünmeyen kalıntı	≤ %5
$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	10-20	pH (suda)	11-14
$3CaOAl_2O_2$	3-10	Suda çözünürlüğü	%0,1-1
Minör bileşenler (%)		Tane iriliği (Mikron)	3-100
MgO	0-4	Özgül yüzey (Blaine)	3500-3700 cm^2/g
CaO	0-3	Özgül ağırlık (H_2O=1)	3,1
SiO_2	<1	Yoğunluk	3,1-3,15 gr/cm^3
SO_3	≤4	Genleşme	≤ 10 mm
Cl	≤0,1	Priz başlama süresi	≥ 60 dk
Alçı taşı (%)		2 günlük dayanım	≥ 20 MPa
$CaSO_4.2H_2O$	5	28 günlük dayanım	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa

3.2. Karışım oranları

Bu çalışmada 1 m^3 beton üretimi için 305 kg çimento tüm karışımlar için sabit olarak alınmıştır. S/Ç oranı 0,28 (A), 0,31 (B) ve 0,34 (C) olarak üç farklı şekilde seçilmiştir. Tüm karışımlar için hava oranı %22'dir. 0-3 mm, 5-15 mm ve 15-25 mm boyut aralıklarına sahip üç farklı kırmataş agreganın belirli oranlarda karıştırılması ile sekiz farklı gradasyona sahip agrega karışımı elde edilmiştir. Sabit çimento, sabit hava oranı, üç farklı S/Ç oranı ve sekiz farklı agrega gradasyonu ile toplam 24 farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Karışım oran ve miktarları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Karışım oranları ve 1 m^3 beton imalatı için gereken malzeme miktarları

No	Hava Oranı (%)	S/Ç Oranı	Çimento (kg)	Su (kg)	Agrega (0-3)		Agrega (5-15)		Agrega (15-25)		BHA (kg/m^3)
					(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	
A1	22	0,28	305	85,40		0,00		0,00	100	1602,04	1992,44
A2	22	0,28	305	85,40		0,00	25	396,03	75	1201,53	1987,95
A3	22	0,28	305	85,40		0,00	50	792,05	50	801,02	1983,47
A4	22	0,28	305	85,40		0,00	75	1188,08	25	400,51	1978,99
A5	22	0,28	305	85,40		0,00	100	1584,10		0,00	1974,50
A6	22	0,28	305	85,40	20	316,82		0,00	80	1281,63	1988,85
A7	22	0,28	305	85,40	20	316,82	40	633,64	40	640,81	1981,68
A8	22	0,28	305	85,40	20	316,82	80	1267,28		0,00	1974,50
B1	22	0,31	305	94,55		0,00		0,00	100	1577,51	1977,06
B2	22	0,31	305	94,55		0,00	25	389,96	75	1183,14	1972,65
B3	22	0,31	305	94,55		0,00	50	779,93	50	788,76	1968,23
B4	22	0,31	305	94,55		0,00	75	1169,89	25	394,38	1963,82
B5	22	0,31	305	94,55		0,00	100	1559,86		0,00	1959,41
B6	22	0,31	305	94,55	20	311,97		0,00	80	1262,01	1973,53
B7	22	0,31	305	94,55	20	311,97	40	623,94	40	631,01	1966,47
B8	22	0,31	305	94,55	20	311,97	80	1247,88		0,00	1959,41
C1	22	0,34	305	103,70		0,00		0,00	100	1552,99	1961,69
C2	22	0,34	305	103,70		0,00	25	383,90	75	1164,74	1957,35
C3	22	0,34	305	103,70		0,00	50	767,80	50	776,50	1953,00
C4	22	0,34	305	103,70		0,00	75	1151,71	25	388,25	1948,65
C5	22	0,34	305	103,70		0,00	100	1535,61		0,00	1944,31
C6	22	0,34	305	103,70	20	307,12		0,00	80	1242,39	1958,22
C7	22	0,34	305	103,70	20	307,12	40	614,24	40	621,20	1951,26
C8	22	0,34	305	103,70	20	307,12	80	1228,49		0,00	1944,31

3.3. Beton Basınç Dayanımı Deneyi

Tasarıma göre üretilen 15x15x15 cm boyutlarındaki numuneler 28 günlük kür sürelerinin ardından TS EN 12390-3'te belirtildiği şekilde basınç dayanımı testine tabi tutulmuşlardır (Şekil 3.2). Her karışım için üçer adet numune alınarak 0,6 MPa/s yükleme hızında dayanım testine tabi tutulmuş ve elde edilen üç sonucun ortalaması numune dayanımı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.2. Basınç dayanımı testi

3.4. Beton İnfiltrasyon Testi

İnfiltrasyon testi ASTM C1701/C1701M-17a (Yerinde geçirimli beton infiltrasyon oranı için standart test metodu) temel alınarak yapılmıştır. 50x50x10 cm ebatlarındaki geçirgen beton numuneler (Şekil 3.3) sıvı geçişine izin verecek şekilde ortası boş olarak tasarlanmış kare metal sehpa üzerine yerleştirilir (Şekil 3.4). Numune üzerine standartta belirtilen 300 ± 10 mm çapında ve en az 50 mm yüksekliğinde halka ortalanarak yerleştirilir. Halka sıvı geçişine izin vermemeli ve sıvı etkisiyle şekil değiştirmeyecek kadar sert malzemeden imal edilmiş olmalıdır. Kenarlardan sıvı geçişi olmaması için halka ve betonun temas ettiği yerde halkanın etrafına cam macunu çekilir (Şekil 3.5). Ayrıca su seviyesinin tespiti için halka iç tarafından beton yüzeyinden 10 mm ve 15 mm yüksekliklerde işaretlenmiş olmalıdır (Şekil 3.6).



Şekil 3.3. İnfiltrasyon testi için üretilen 50x50x10 cm ebatlarındaki numuneler



Şekil 3.4. İnfiltrasyon testi sırasında beton alt yüzeyi



Şekil 3.5. İnfiltrasyon test düzeneği



Şekil 3.6. İnfiltrasyon testi sırasında halka içi

Teste başlamadan önce ön ıslatma işlemi gerçekleştirilir. Toplam 3,60 ± 0,05 kg su, yüzeyi iki işaret çizgisi arasında kalacak hızda dökülür. Hassasiyeti 0,1 saniye olan kronometre kullanılarak suyun betona temas ettiği anda süre başlatılır ve beton üzerinde belirgin bir su yüzeyi kalmayınca durdurulur. Ön ıslatmada elde edilen süre, deney için ne kadar su gerektiğini belirlemede kullanılır. Süre 30 saniyeden az ise deney için toplam 18,00 ± 0,25 kg su kullanılır. Eğer 30 saniye ve daha üstünde ise 3,60 ± 0,05 kg su ile deney gerçekleştirilir. Deney, ön ıslatma işleminden sonra 2 dakika içinde başlatılmalıdır. Su yüzeyinin halka üzerindeki işaretli iki seviye arasında olmasına dikkat edilmelidir. Kullanılan su miktarı 0,05 kg hassasiyetle, geçen süre ise 0,1 s hassasiyetle kaydedilmelidir. Deney tekrarlanacaksa önceki deneyin bitiminden sonraki 5 dakika içinde başlatılmalıdır. Aksi durumda tekrar ön ıslatma işlemi yapılmalıdır. Test bitiminde infiltrasyon oranı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I = \frac{B.M}{D^2.t} \tag{3.1}$$

I = Sızma oranı (mm/sa)

M = Sızan su kütlesi (kg)

D = Sızma halkasının iç çapı (mm)

B = 4 583 666 000 sabiti (mm^3.s)/(kg.sa)

t = Ölçülen suyun sızması için gereken süre (s)

3.5. SimFlow ile Modelleme

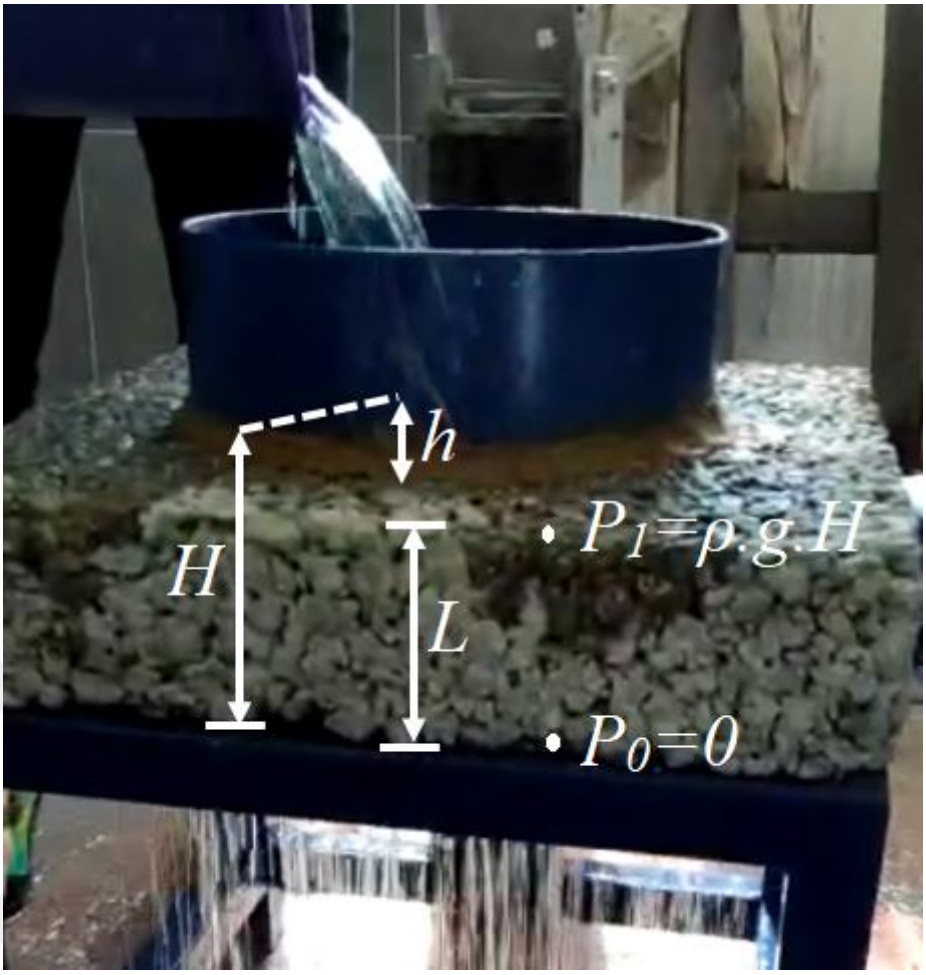
Sayısal modelleme için SimFlow 4.0 kullanılmıştır. Analiz için zamana bağlı sıkıştırılamaz akışlarda çift faz ve poroz ortam çözümünü birlikte yapabilen InterFoam çözücüsü kullanılmıştır. Akım modeli laminar olarak alınmıştır.

3.5.1. Darcy-Forchheimer parametrelerinin belirlenmesi

Sayısal modellemenin yapılabilmesi için öncelikle d ve f parametreleri gereklidir. Parametreler, deneysel veriler kullanılarak eğri oluşturma yöntemi ile bulunabilir. Darcy-Forchheimer denklemi (2.16) aşağıdaki gibi bir eğri denklemi formuna dönüştürülür (Özcan, 2020):

$$\Delta P = A.u + B.u^2$$
$$A = \mu.d.L \qquad (3.2)$$
$$B = \frac{1}{2}.\rho.f.L$$

Eğriyi oluşturabilmek için en az üç noktanın biliniyor olması gerekir. Bu yüzden infiltrasyon testi en az üç farklı su seviyesi için tekrarlanır. Bu çalışmada testler 1, 3 ve 5 cm su seviyeleri için yapılmıştır. İnfiltrasyon testinden elde edilen sızma oranı (I), hız değeri (u) olarak m/s cinsinden yazılır. L (m) beton kalınlığıdır. Denklemde beton üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasındaki basınç farkı ΔP; su yüksekliği h ve beton alt yüzeyi referans noktası ($P=0$) kabul edilerek beton üst yüzeyindeki basınç ($P=\rho.g.L+\rho.g.h$) olarak Pascal cinsinden yazılır. Hız (u) değerleri x eksenine ve basınç (P) değerleri y eksenine yerleştirilerek eğri oluşturulur (Şekil 3.8). Elde edilen eğri denkleminde A ve B katsayıları; sonrasında d ve f parametreleri bulunur. Hesaplamalarda suyun 20 ºC'deki μ ve ρ değerleri kullanılmıştır. Denklem formu gereği eğri orijinden başlar, birinci bölgededir ve eğimi pozitiftir. Darcy-Forchheimer parametrelerinin pozitif olduğu bilinmektedir. Doğal olarak A ve B katsayıları da pozitif olmalıdır. Geniş veri aralığı, parametrelerin belirlenmesinde daha net sonuçlar sağlar ancak infiltrasyon testi formatı ve doğal koşullar gereği bu pek pratik değildir.



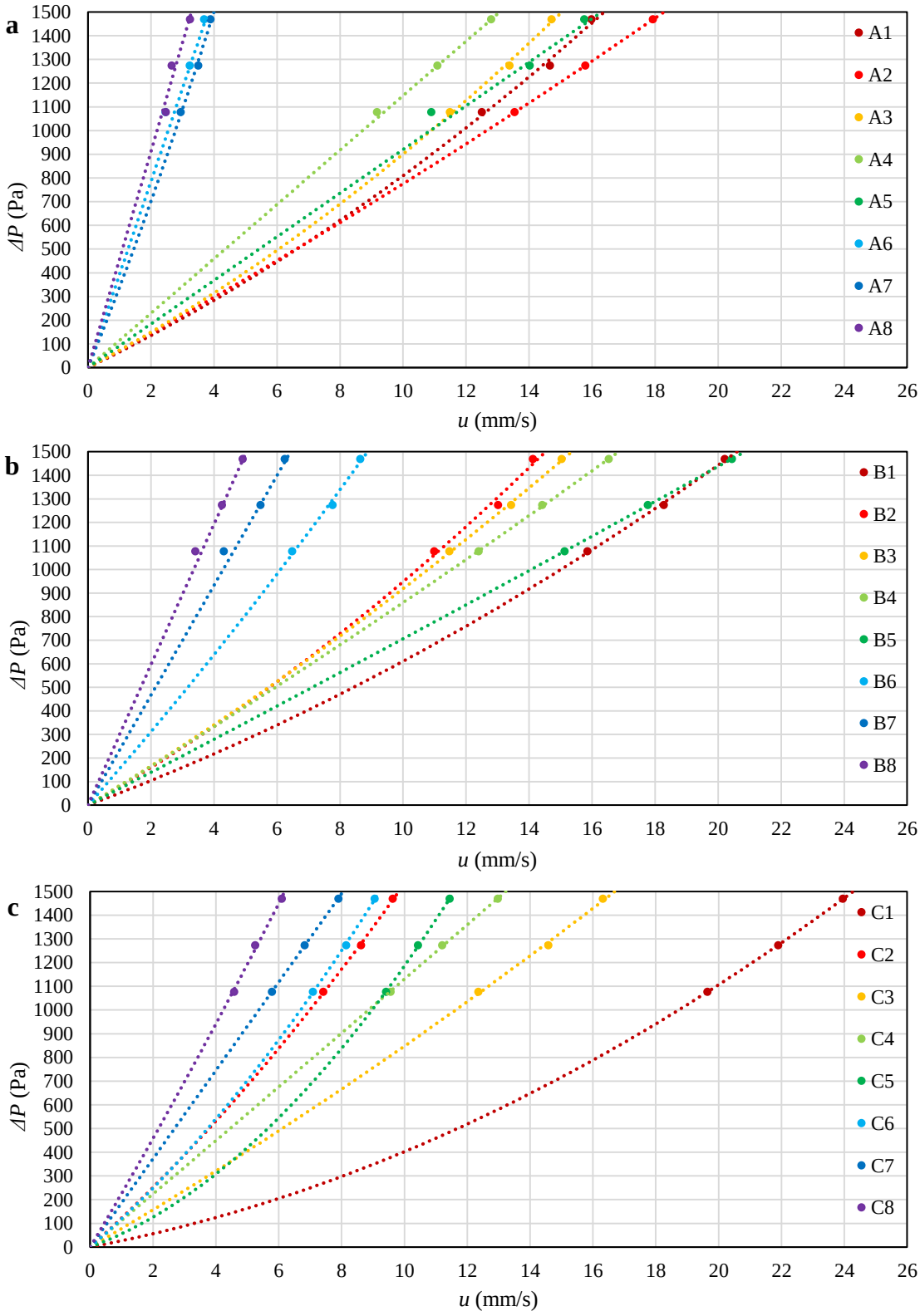
Şekil 3.7. İnfiltrasyon testi üzerinde basınç farkı gösterimi

Basınç farkını (ΔP) hesaplarken betonun üst ve alt yüzeyindeki hidrolik yükler (H) aşağıdaki Bernoulli denklemi ile bulunur:

$$H = z + \frac{p}{\rho . g} + \frac{u^2}{2 . g} \tag{3.3}$$

Betondan geçen akımın hızının (u) sabit olduğu kabul edilmiştir. Hız yükü, diğerlerine göre çok daha düşük olduğu için ihmal edilir (Çizelge 4.5) ve beton üst yüzeyi için $H=L+h$ ve alt yüzeyi için $H=0$ olur. Bu durumda beton üst yüzeyi için hidrolik yükten kaynaklanan basınç $P_1=\rho.g.H$, alt yüzeyi için $P_0=\rho.g.0=0$ olur ve basınç farkı ΔP aşağıdaki gibi bulunur:

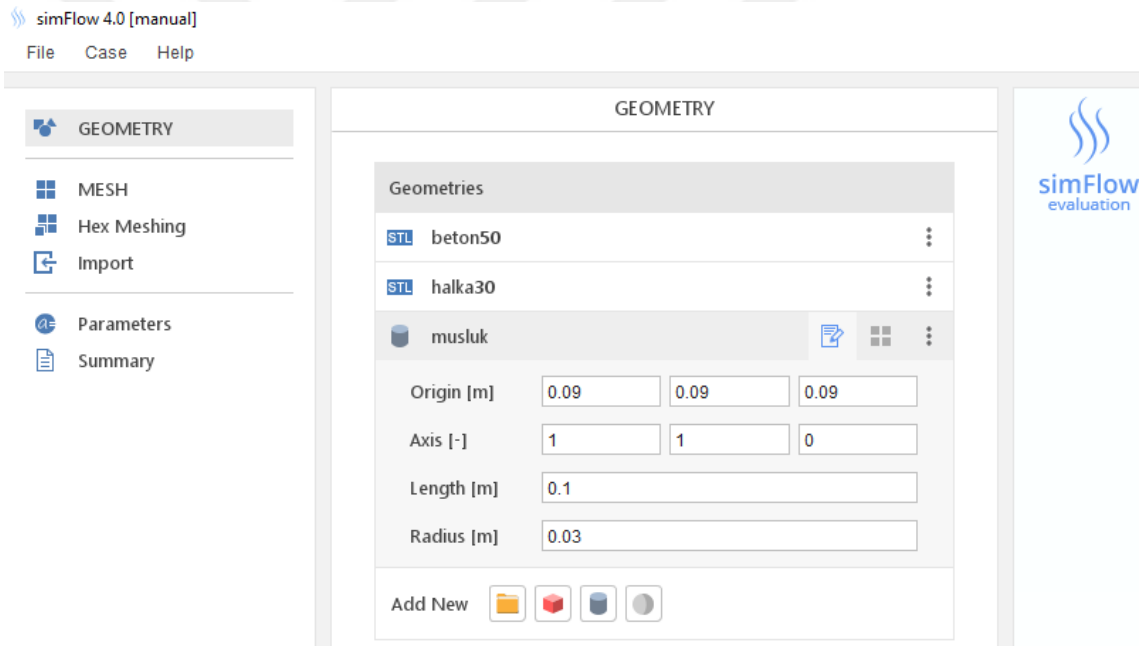
$$\Delta P = \rho . g . H \tag{3.4}$$



Şekil 3.8. İnfiltrasyon testleri hız-basınç eğrileri **a)** A, **b)** B, **c)** C serisi

3.5.2. Model oluşturma ve simülasyon ayarları

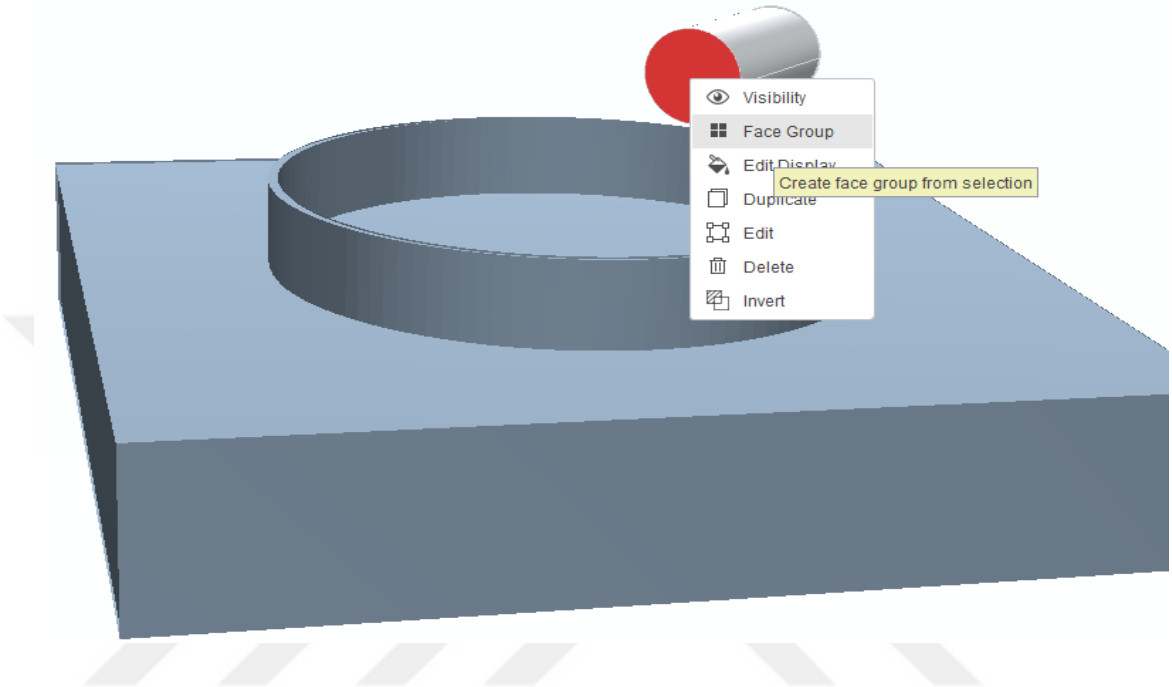
SimFlow programının kendi içinde basit geometrik modeller oluşturulabilir ancak geometri karmaşıklaştıkça ayrı bir çizim programı kullanmak gerekir. Herhangi bir çizim programında çizilen cisimler STL formatında SimFlow programına aktarılabilir. SimFlow arayüzünde 'GEOMETRY' bölümü 'Add New' kısmında dosya ikonuna tıklanarak dış kaynakta çizilen cisimler içe aktarılır. SimFlow, aktarılan cisimlerin ebatlarını metre cinsinden algılar. Bu yüzden tekrar ölçeklendirmek gerekir. Eklenen cismin satırında bulunan 3 nokta işareti cisim için yer değiştirme, döndürme, tekrar boyutlandırma, silme gbi çeşitli ayarlar içerir. SimFlow'da oluşturulan cisimler için altta açılan panelde cismin referans noktasından genel kordinat sistemine göre konumu (Origin), yönü (Axis) ve cismin boyutları girilir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Musluk için konum ve boyut tanımlama

İnfiltrasyon test düzeneği SimFlow'da birebir ölçekte modellenmiştir. İnfiltrasyon halkası ve beton dışarıdan aktarılmıştır. Debi verilebilmesi için gereken musluk ve fazlar arası net geçiş için sıklaştırma bölgesi silindir modeli kullanılarak eklenmiştir. SimFlow'da yerçekimi varsayılan olarak –z yönündedir ve varsayılan ayarlar kullanılmıştır. Halka taban merkezi x, y, z kordinatları 0, 0, 0 olacak şekilde ayarlanmıştır. Model bu referans noktasına göre oluşturulmuştur.

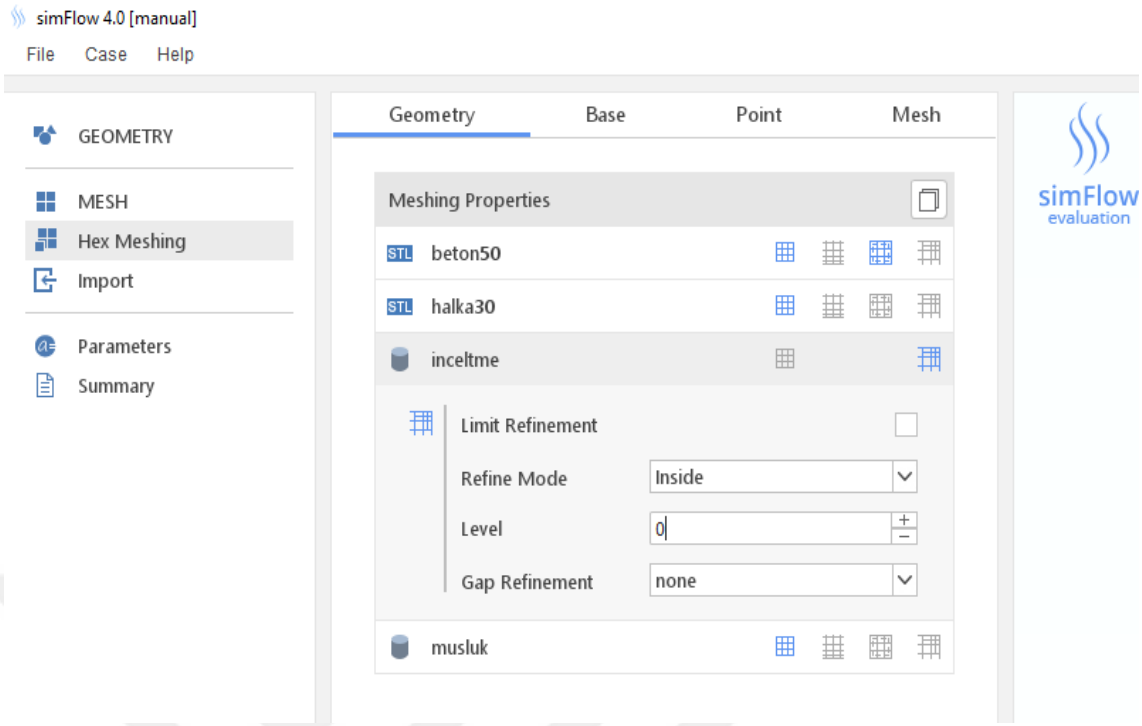
Debi verilebilmesi için bir yüzeye ihtiyaç vardır. Musluk olarak isimlendirdiğimiz silindir cismin halka içine bakan dairesel yüzeyine Ctrl tuşuna basılı tutlarak sağ tıklanır ve etkileşime geçilir. Açılan özelliklerde yine Ctrl tuşuna baılı tutularak ‘Create face group’ sol tıklanır ve bu yüzey cisimden ayrı bir grup olarak belirlenir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Cisim yüzey grubu oluşturma

Analiz programlarının çözüm sırasında geometrinin belirli bölgelerini normalden daha detaylı hesaplaması ve oluşacak hataları en aza indirmesi için sıklaştırma uygulanır. Bu çalışmada su ve hava arasındaki geçişi netleştirmek, programın faz geçişinde daha iyi hesap yapmasını sağlamak ve görsel çıktıyı netleştirmek için sıklaştırma uygulanmıştır. Sıklaştırma bölgesi; merkezi halka merkezi ve yarıçapı 15 cm olan, taban konumu betonun üst yüzeyinden 1 cm aşağıda ve yüksekliği 3 cm olan silindirik bölgedir.

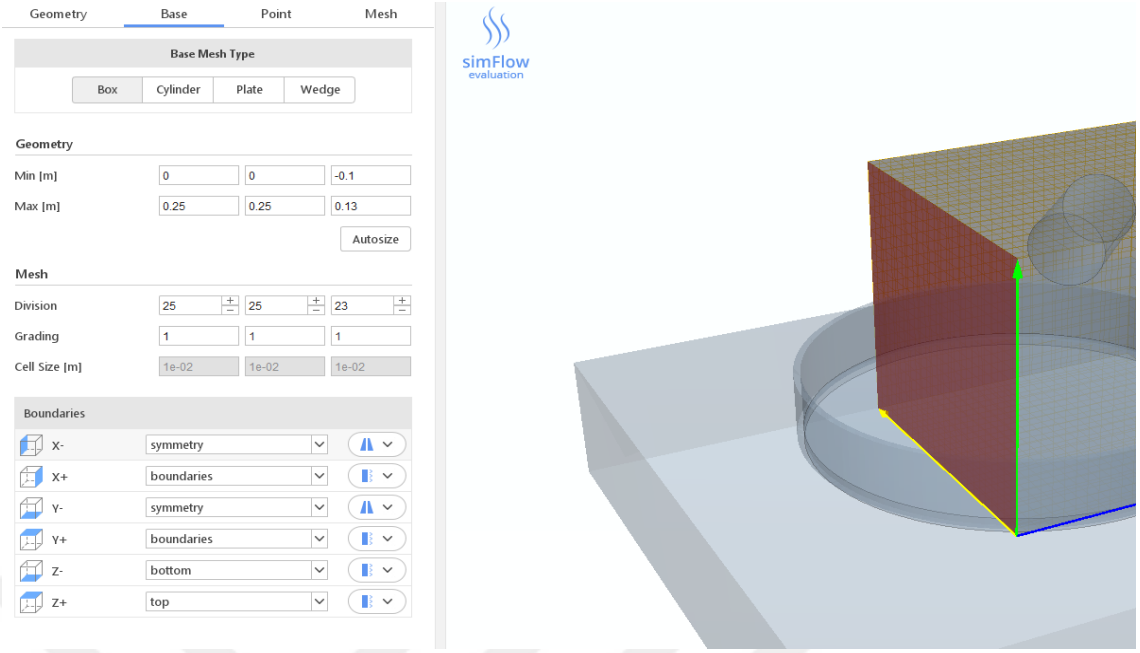
Cisimlerin konum ve boyutları belirlenince ‘Hex Meshing’ bölümüne geçilir ve ‘Geometry’ sekmesinde eklediğimiz hangi cisimlerin fiziksel olarak var olacağı ve özellikleri belirlenir. Cisimlerin sağ yanlarında kalan kutucuklarda beton, halka ve musluk için ‘Mesh Geometry’ işaretlenir. Bu seçenek onların fiziksel olarak geometride bulunacağını belirtir. Beton için ayrıca ‘Create Cell Zone’ kutucuğu işaretlenir. Bu seçenekle betonun hücresel bölge olduğu belirtilir ve sonraki aşamalarda poroz ortam olması için seçenek açılmasını sağlar (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Cisimler için tanımlama kutucukları ve sıklaştırma seviyesi

Sıklaştırma için yalnızca 'Refine Geometry' kutucuğu işaretlenir. Açılan özelliklerde sıklaştırma seviyesi girilir. Her bir seviyede normal hücre boyutu belirlenen bölgede ikiye bölünür. Seviye sıfır girilirse sıklaştırma yapılmaz. İki ve daha yüksek seviyelerde sıklaştırma bölgesi dışında kalan hücreler de geçişi karşılamak adına bölünmeye başlar. Seviye arttıkça bölge dışında bölünen hücrelerin sayısında artış olur.

'Base' sekmesinde simülasyonun gerçekleşeceği hacmin şekli ve sınırları belirlenir. Kutu şekli seçilerek 'Geometry' başlığı altında x, y ve z doğrultularından maksimum ve minimum noktalar metre cinsinden yazılır. 'Mesh' başlığı altında her bir kenarın kaça bölüneceği ve hücre boyutu belirlenir. Bu çalışmada hücreler ayrıtı 1 cm olan küp şeklinde ayarlanmıştır. 'Boundaries' başlığı altında hacim sınırlarının ismi ve cinsi belirlenir. Hücre sayısından ve analiz süresinden kazanmak adına tüm model hacme dahil edilmemiş ve dörtte biri alınmıştır. Bu yüzden debi de aynı şekilde dörtte bir oranında verilecektir. Beton içinde kalan iki yüzey simetri olarak ayarlanmıştır. Geri kalan tüm yüzler için 'patch' seçeneği kullanılır. Her yüzeyin adı olmalıdır ya da en azından cinsleri farklı olan yüzlerin adı da farklı olmalıdır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Simülasyon hacmi yüzey sınır ve tiplerinin belirlenmesi

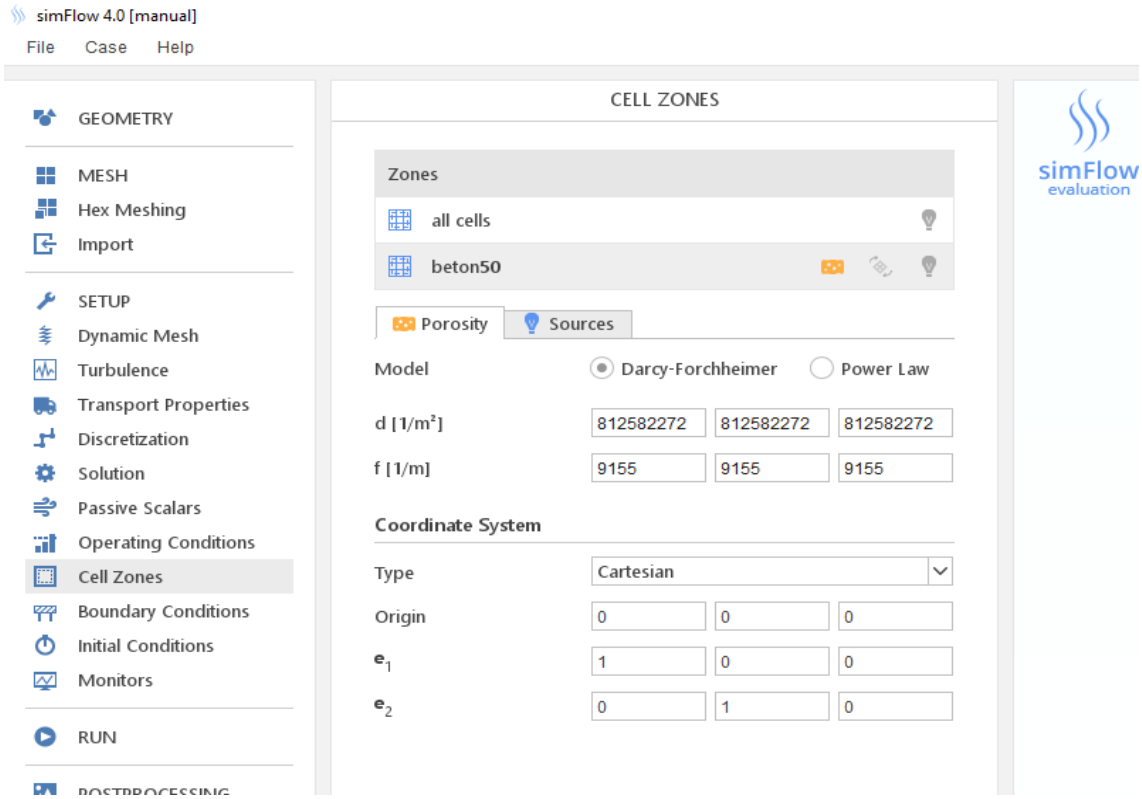
'Point' sekmesinde sınırları belirlenen hacim içinde hücrelerin oluşumunu sağlamak için nokta ya da noktalar belirlenir. Eğer belirlenen nokta 'Geometry' sekmesi altında 'Mesh Geometry' kutucuğu işaretlenmiş herhangi bir cismin (halka, beton vb.) içinde kalırsa yalnızca o cisimde belirlenen hacim hücrelere ayrılır ve geri kalan hacim için işlem yapılmaz. Eğer nokta cismin sınırında kalıyorsa hem cismin içi hemde dışı hücrelere ayrılır. Nokta cismin dışındaysa cismin içi hücrelere ayrılmaz ve boşluk olarak kalır. Noktanın veya noktaların nerede olacağı önemlidir. Bu modelde nokta beton üst yüzeyi sınırında halka dışında kalacak şekilde seçilmiştir. Yani halka ve musluk hücrelere bölünmez, içleri boşluktur. Akışkanlar o bölgelere doğru hareket edemezler. Son olarak 'Mesh' sekmesi altında 'Mesh' butonuna tıklanarak model oluşturulur.

Model oluşumu tamamlandıktan sonra 'MESH' bölümünde hacim sınırları görünür ve tekrar ayarlanabilir. 'SETUP' bölümünden probleme uygun çözücünün seçimi yapılır. Bu çalışmada zamana bağlı sıkıştırılamaz çok fazlı akış çözebilen ve poroz ortam içeren InterFoam çözücüsü kullanılmıştır. Çözücü seçimini yaptıktan sonra sol panelde yeni bölümler açılır. Bu bölümlerden çözücü ayarları, akış ve akışkan özellikleri, başlangıç ve sınır koşulları gibi ayarlar yapılır.

Akışkanların cinsi ve özellikleri ‘Transport Properties’ bölümünde belirlenir. ‘Phases’ kısmında ‘phase1’ su olarak ‘phase2’ ise hava olarak ayarlanır. ‘Material Database’ butonuyla açılan pencereden seçimleri yapılır. ‘Transport Properties’ bölümünün en başında yer alan σ ise fazlar arası yüzey gerilme tensörüdür. Varsayılan olarak su ile hava için ayarlıdır ve farklı akışkanlar kullanılacaksa değiştirilmesi gerekir.

‘Operating Conditions’ bölümünde yerçekiminin yönü ve büyüklüğü girilir. Varsayılan olarak –z yönünde 9,81 m/s^2’dir. En başta model bu şekilde oluşturulduysa değiştirmeye gerek yoktur.

‘Cell Zones’ bölümünde poroz ortam ayarları yapılır. Daha önce hücresel bölge olarak tanımlanan beton için poroz seçeneği işaretlenir. Altta açılan kısımdan kullanılacak model seçilir. Bu çalışmada Darcy-Forchheimer modeli kullanılmıştır. Kutucuklara sırasıyla x, y ve z yönleri için *d* ve *f* parametreleri girilir. Ortam izotropik ise kutucuklara her yön için aynı değer girilir (Şekil 3.13).

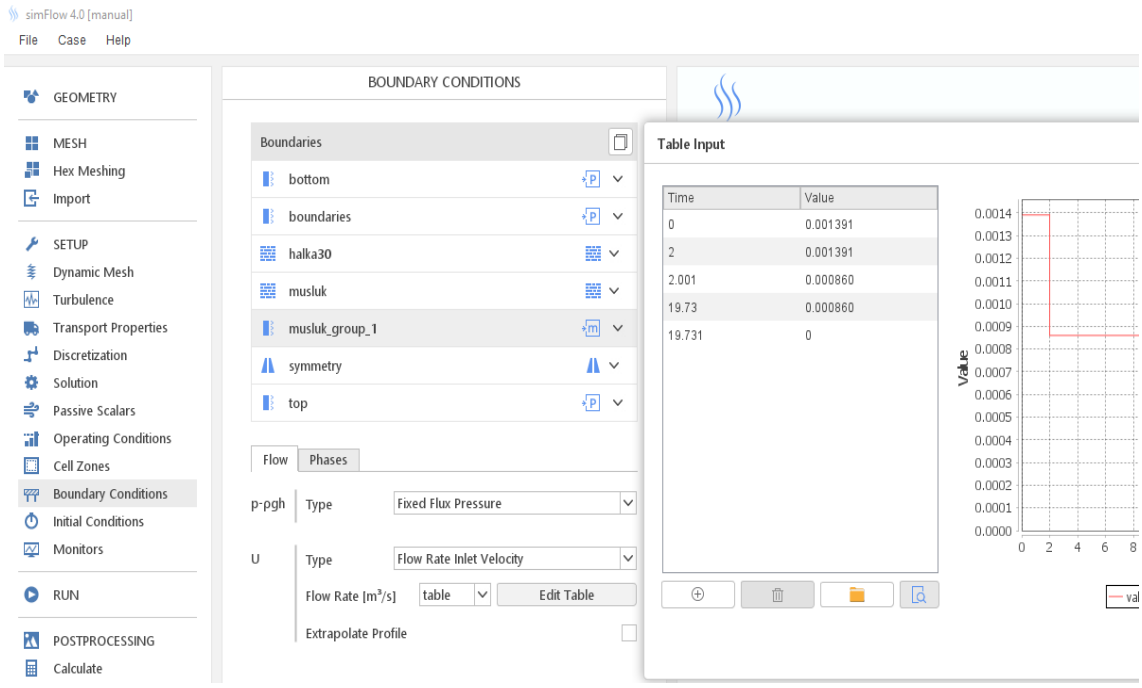


Şekil 3.13. Hücresel bölge için model ve parametre girişi

Sınır koşulları ‘Boundary Conditions’ bölümünden ayarlanır. ‘Hex Meshing’ bölümünde duvar, simetri ve boşluk olarak belirlenen sınırlarda değişiklik yapılamaz. Diğerleri için yandaki butondan hazır koşullar seçilebileceği gibi bu koşullar değiştiriledebilir. Bir sınır adının üzerine tıklanıldığında o sınır için altta ‘Flow’ ve ‘Phases’ sekmeleri açılır. ‘Flow’ sekmesinde basınç ve hız koşulları, ‘Phases’ sekmesinde ise su için faz koşulu vardır (Şekil 3.14). Sınırlar için ayarlamalar Çizelge 3.4‘te verilmiştir. Faz değerinin 0 olması su girişinin olmadığını gösterir. Faz değeri 1 olursa hız koşulunda girilen değerle aynı oranda su akışı olur. Faz değerinin 2 olması durumunda debi için girilen değerin iki katı giriş olur. Önceki kısımlarda modeli dörde böldüğümüz için faz değeri de 0,25 olarak girilmiştir.

Çizelge 3.4. Simülasyon sınır koşulları

Sınır adı	Basınç tipi	Basınç	Hız tipi	Hız	Faz tipi	Faz
Üst	Total	0	Pressure Inlet-Outlet		Inlet-Outlet	0
Dış yanlar	Total	0	Pressure Inlet-Outlet		Inlet-Outlet	0
İç yanlar	Symmetry		Symmetry		Symmetry	
Alt	Hydrostatic Total	0	Pressure Inlet-Outlet		Inlet-Outlet	0
Halka	Fixed Flux		No-Slip		Zero Gradient	
Musluk	Fixed Flux		No-Slip		Zero Gradient	
Musluk giriş	Fixed Flux		Flow Rate Inlet	Table	Inlet-Outlet	0,25



Şekil 3.14. Musluk giriş sınır koşulları ve debi talosu

Modelleme başlangıcındaki ‘GEOMETRY’ bölümünde musluktan seçilen yüzeye debi tanımlanması için ‘musluk giriş’ sınır hız koşulunda table butonuna tıklanır. Açılan pencerede zamana bağlı olarak debi girilir (Şekil 3.14). Uygun debi değerlerini bulmak vakit alabilir. Tüm geçirgen beton tiplerinin infiltrasyon sürelerine bağlı olarak hepsi için aynı hesap yöntemi kullanılarak debi modeli Excell programında oluşturulmuştur. Simülasyonlar için gerekli girdiler Çizelge 3.5‘te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Poroz ortam parametreleri, debi ayarları ve simülasyon süreleri

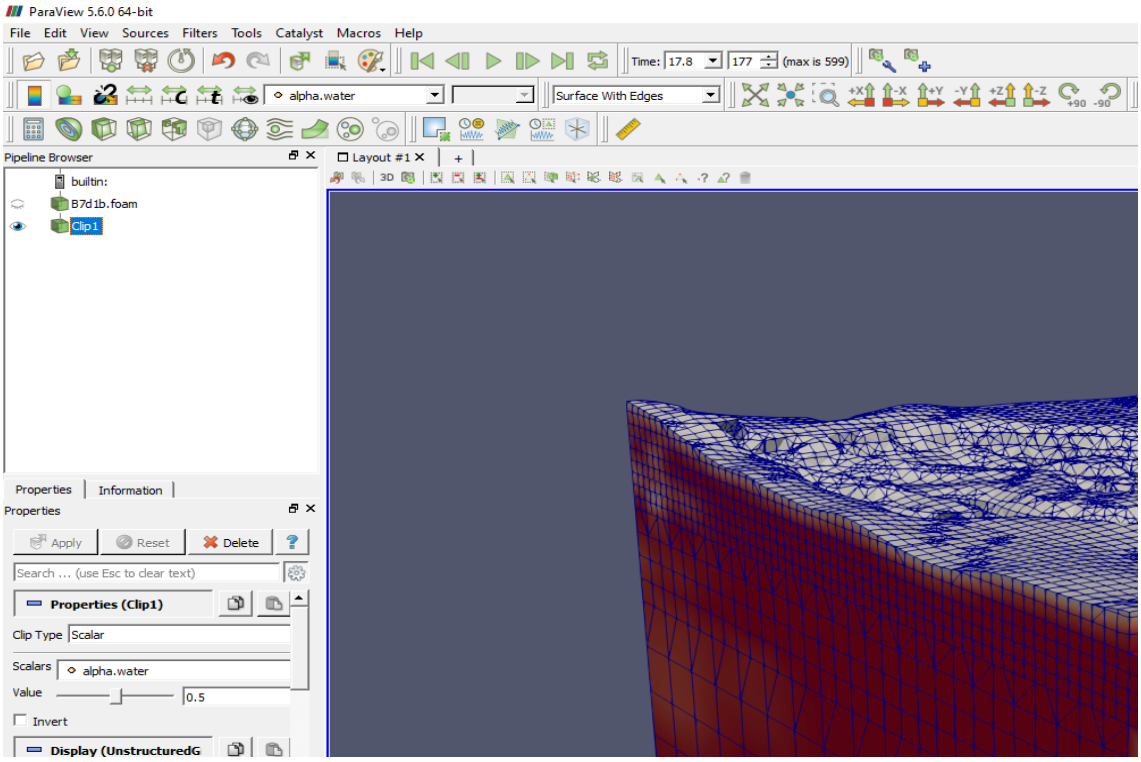
No	Darcy parametresi ($1/m^2$)	Forchheimer parametresi (1/m)	Başlangıç debisi (m^3/s)	Normal debi (m^3/s)	Debi bitiş zamanı (s)	Simülasyon Süresi (s)
A1	643112754	33178	0,001398	0,000868	19,56	21,00
A2	719494745	10968	0,001470	0,000940	18,06	19,50
A3	709172258	38211	0,001327	0,000797	21,29	23,00
A4	1145031679	60	0,001166	0,000636	26,67	28,50
A5	918591461	8	0,001286	0,000756	22,44	24,00
A6	3920673595	18	0,000701	0,000171	99,28	104,00
A7	3255274198	248300	0,000734	0,000204	83,11	87,50
A8	4547687467	7017	0,000701	0,000171	99,06	104,00
B1	499044514	22219	0,001630	0,001100	15,43	17,00
B2	758512015	37674	0,001293	0,000763	22,25	24,00
B3	807799352	21856	0,001326	0,000796	21,33	23,00
B4	812582245	9155	0,001391	0,000860	19,73	21,50
B5	692435683	2495	0,001580	0,001050	16,17	17,50
B6	1516401714	38631	0,000980	0,000450	37,72	40,00
B7	2327961203	153	0,000829	0,000299	56,74	60,00
B8	2976171459	241	0,000767	0,000237	71,70	75,50
C1	250905815	30246	0,001893	0,001363	12,45	13,50
C2	1190155677	68268	0,001045	0,000515	32,96	35,00
C3	770620060	15182	0,001388	0,000857	19,79	21,50
C4	1116119187	2481	0,001193	0,000663	25,59	27,50
C5	492244080	138804	0,001184	0,000654	25,97	28,00
C6	1138135491	106008	0,001022	0,000492	34,52	36,50
C7	1859567789	81	0,000932	0,000401	42,28	45,00
C8	2226549207	62114	0,000848	0,000318	53,35	56,50

Not: Debi tablosunda ilk iki saniye boyunca başlangıç debisi girilir. İkinci saniyeden itibaren debi bitiş zamanına kadar normal debi değeri girilir.

Çözücü çalışırken gidişatı izlemek ve belirli noktalardan ya da hacmin tamamından veri alabilmek için ‘Monitors’ bölümü kullanılır. ‘Sampling’ sekmesinden kesit ayarlanıp çözüm sırasında görsel sonuç izlenebilir veya belirli bir nokta atanarak istenilen değerlerin o noktadaki değişimi anlık olarak takip edilebilir. ‘Volume’ sekmesinden ise hacmin tamamı için istenilen değerler grafik olarak çizdirilebilir.

Simülasyon süresi ‘RUN’ bölümünde ‘Time Control’ sekmesi altında girilir. Zaman adımı otomatik olarak ayarlanır. Initial Δt ve Max Δt 0,01 s olarak ayarlanır. Courant sayısı Max Co ve Max Alpha Co 0,5 olarak girilir. Courant sayısı 1’den büyük olamaz. Hücre boyutuna ve zaman adımına göre Courant sayısı değişkenlik gösterir. $(\Delta t.\vec{V})/\Delta x_i$ formülü ile hesaplanır. Burada $\vec{V}$ akışkanın vektörel hızı ve Δx hücrenin hız doğrultusundaki uzunluğudur. ‘Output’ sekmesinde çıktıların kaç saniyede bir yazdıralacağı belirlenir. Burdaki süre görsel simülasyondaki zaman adımlarını belirler. Süre 0,1 s olarak seçilmiştir.

Analiz bitince ‘POSTPROCESSİNG’ bölümünde ‘Run ParaView’ butonu tıklanarak görselleştirme programına geçiş yapılır. Program açıldığında direkt olarak sol tarafta bulunan ‘Apply’ butonu tıklanır ve programın analiz sonuçlarını alması sağlanır. Görsel sonuç için üst panelin sol alt satırında bulunan ‘Clip’ seçeneği tıklanır. Sol panelde ‘Clip type’ için ‘Scalar’ seçilir. ‘Scalar’ için ise ‘alpha.water’ yani su fazı seçilir. Değeri 0,5 olarak ayarlanır ve ‘Invert’ kutucuğundaki tik kaldırılarak ‘Apply’ butonu tıklanır (Şekil 3.15). Yükleme tamamlanınca üst panelde su fazı, basınç, hız gibi seçenekler istenilen görsel formatta seçilir ve ölçek, renk ayarı yapılarak simülasyon başlatılır.



Şekil 3.15. Görselleştirme programı Paraview arayüzü

3.5.3. Çözüm ağı yakınsaması

Çözüme uygun olan hücre sayısının belirlenmesi için yakınsama yapılmalıdır. Bu kısımda sıklaştırma bölgesinin kalınlığına ve sıklaştırma seviyesine bağlı olarak simülasyonun ikinci saniyesinde maksimum basınç incelenmiştir. Çeşitli ağ denemeleri sonucunda %0,5'in altında kalan değişimle yakınsama sağlanmıştır. Ağ modellerine ait veriler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Çözüm ağı yakınsama çalışması verileri

Hücre sayısı	Düğüm noktası sayısı	Sıklaştırma seviyesi	Sıklaştırma bölgesi kalınlığı	2. saniyedeki maksimum basınç (Pa)	Yakınsama (%)
14051	16049	0	2 cm	801,129	
21326	24825	1	2 cm	1014,859	26,68
53281	61666	2	2 cm	989,872	2,46
66503	75586	2	3 cm	994,564	0,47

İnfiltrasyon test sürelerine bağlı olarak modeldeki musluk konumunda değişikliğe gidilmiş ve simülasyondaki görsel bozulma en aza indirilmeye çalışılmıştır. Test süreleri 30 saniyeye kadar olan betonlar için 66503 hücre ve 75586 düğüm noktasına sahip musluk konumu x, y, z doğrultularında 0,09 m, 0,09 m ve 0,09 m olan model kullanılmıştır. Test süreleri 30 saniyeden yüksek ve 60 saniyeye kadar olan betonlar için musluk konumu 0,07 m, 0,07 m ve 0.09 m olan 66495 hücreli 75587 düğüm noktası olan model kullanılmıştır. Süreleri 60 saniyeden yüksek olan betonlar için 66500 hücreli 75586 düğüm noktasına sahip ve musluk konumu 0,05 m, 0,05 m, 0,09 m olan model kullanılmıştır.

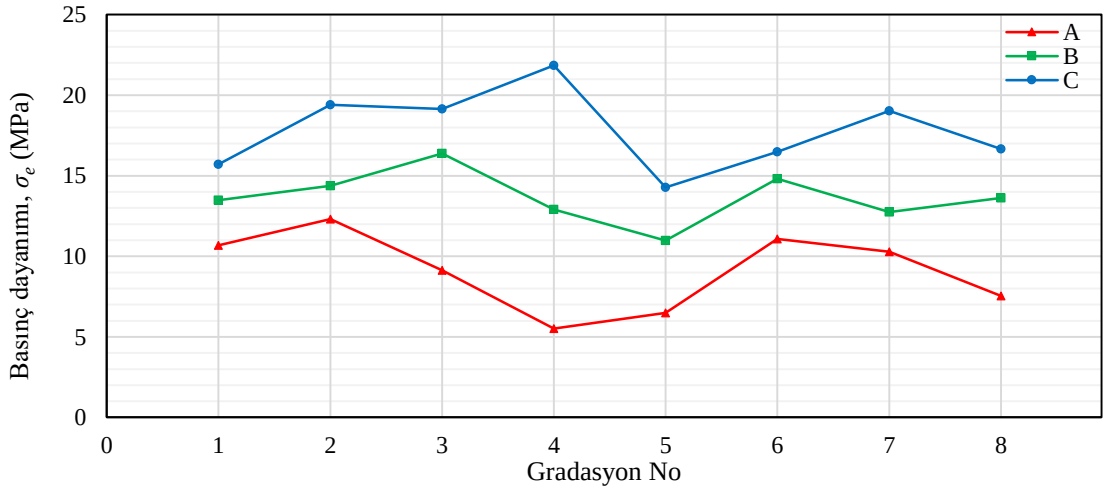
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Beton Basınç Dayanımı Testi Sonuçları

Beton dayanım testine göre 28 günlük en yüksek basınç dayanımını 21,85 MPa ile C4 karışımı vermiştir. C4 karışımını takiben C2 (19,41 MPa), C3 (19,15 MPa) ve C7 (19,03 MPa) karışımları da ACI 522R-10'da geçirgen betonlar için ortalama olarak görülen 17 MPa'ın üzerinde basınç dayanımı göstermişlerdir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Beton basınç dayanımı testi sonuçları

No	σ_e (MPa)	No	σ_e (MPa)	No	σ_e (MPa)
A1	10,68	B1	13,48	C1	15,71
A2	12,30	B2	14,38	C2	19,41
A3	9,14	B3	16,38	C3	19,15
A4	5,52	B4	12,91	C4	21,85
A5	6,49	B5	10,98	C5	14,27
A6	11,08	B6	14,82	C6	16,49
A7	10,29	B7	12,74	C7	19,03
A8	7,54	B8	13,62	C8	16,66



Şekil 4.1. S/Ç oranlarına göre 28 günlük basınç dayanımları

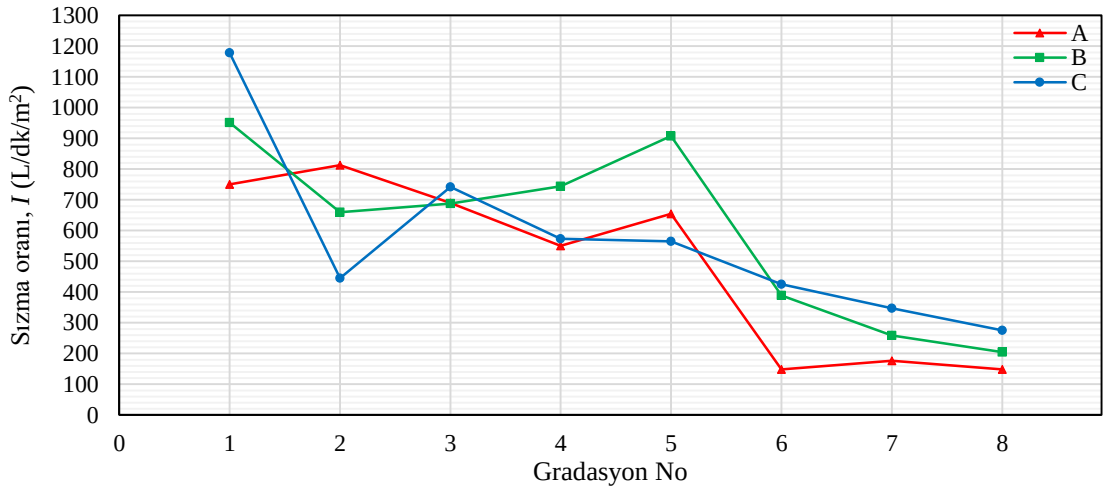
Çalışma verilerine göre S/Ç oranının artması dayanımı arttırmıştır. İnce malzeme (0-3 mm) kullanılması beklenenin aksine dayanımı belirgin bir şekilde arttırmamıştır. S/Ç oranı artarken ince malzeme kullanılmayan karışımların dayanımları kullanılanlara göre daha çok artmıştır. Düşük S/Ç oranında 15-25 mm agreganın çoğunlukta olduğu karışımların dayanımı daha yüksek iken S/Ç oranının artmasıyla 5-15 mm ve 15-25 mm agreganın beraber kullanıldığı karışımların dayanımı daha yüksek çıkmıştır (Şekil 4.1).

4.2. Beton İnfiltrasyon Testi Sonuçları

İnfiltrasyon testi sonuçlarına göre tüm betonlar ACI 522R-10'da belirtilen alt sınırın üzerinde geçirgenliğe sahiptirler. Çalışma kapsamında üretilen en geçirgen beton metrekarede dakikada 1179 litre su geçişine izin veren C1 numunesidir. C1 numunesini takiben sırasıyla B1, B5, A2, A1, B4 ve C3 numuneleri de 730 L/dk/m^2 üzerindeki infiltrasyon oranlarıyla ACI 522R-10'da belirtilen üst sınırında üzerinde geçirgenliğe sahiptirler (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. İnfiltrasyon testi sızma sonuçları

No	*I* (mm/sa)	*I* (L/dk/m^2)	No	*I* (mm/sa)	*I* (L/dk/m^2)	No	*I* (mm/sa)	*I* (L/dk/m^2)
A1	45026	750,44	B1	57082	951,36	C1	70736	1178,93
A2	48762	812,71	B2	39583	659,71	C2	26727	445,45
A3	41369	689,48	B3	41294	688,24	C3	44502	741,69
A4	33024	550,39	B4	44653	744,22	C4	34425	573,75
A5	39244	654,06	B5	54470	907,84	C5	33915	565,26
A6	8872	147,86	B6	23350	389,17	C6	25514	425,24
A7	10598	176,63	B7	15522	258,70	C7	20835	347,25
A8	8892	148,19	B8	12284	204,73	C8	16509	275,15



Şekil 4.2. S/Ç oranlarına göre numune sızma oranları

S/Ç oranının geçirgenlik üzerine belirli bir etkisi gözlemlenmemiştir. Genel olarak gradasyonlarda agrega tane boyutunun küçülmesi geçirimliliği olumsuz yönde etkilemiştir. İnce malzeme kullanımı geçirgenliği belirgin olarak düşürmüştür. Tek sınıf agrega boyutu kullanılmasının geçirgenlik açısından daha iyi sonuç verdiği söylenebilir (Şekil 4.2).

4.3. Ekonomik Analiz

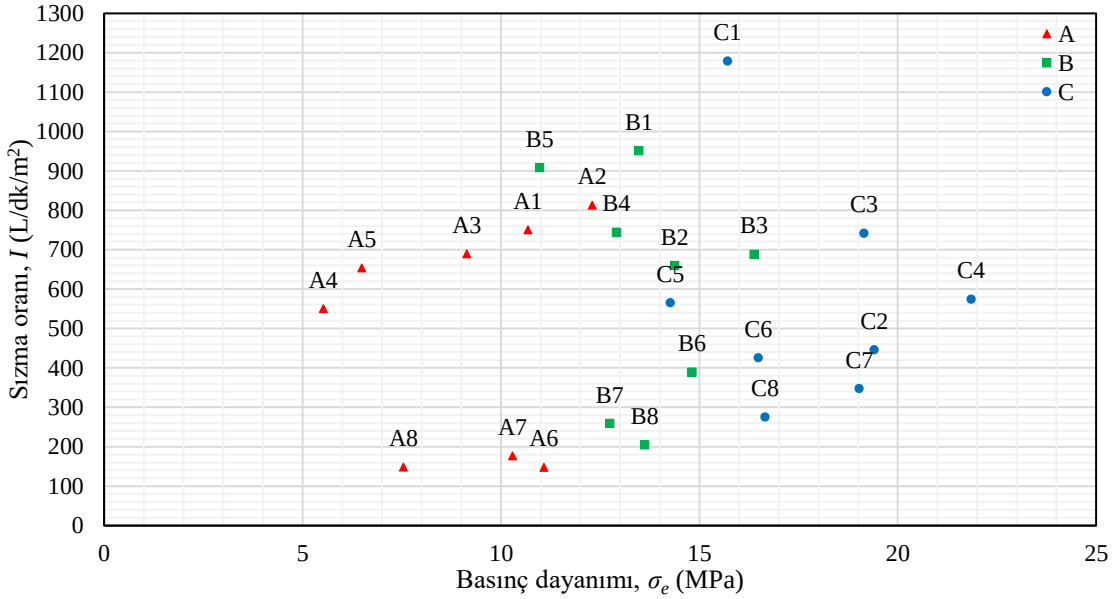
Bursa Beton firmasının 2021 agrega ve çimento fiyatlarına ve Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi 2021 Ocak ayı su tarifesine göre bu çalışma kapsamında üretilen geçirgen betonların malzeme olarak metreküp maliyetleri arasında belirgin bir fark görülmemiştir (Çizelge 4.3). Optimum geçirgen betonun seçiminde maliyetin önemli olmadığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. Üretilen geçirgen betonların malzeme olarak metreküp maliyetleri

No	Maliyet (TL/m^3)	No	Maliyet (TL/m^3)	No	Maliyet (TL/m^3)
A1	171,45	B1	170,53	C1	169,62
A2	171,27	B2	170,36	C2	169,45
A3	171,09	B3	170,18	C3	169,27
A4	170,91	B4	170,00	C4	169,10
A5	170,73	B5	169,83	C5	168,92
A6	171,31	B6	170,39	C6	169,48
A7	171,02	B7	170,11	C7	169,20
A8	170,73	B8	169,83	C8	168,92

4.4. Optimum Geçirgen Beton

Hem dayanım hem de infiltrasyon testinde yeterince iyi sonuçlara sahip C3 karışımı 19,15 MPa basınç dayanımı ve 742 L/dk/m^2 sızma oranı ile optimum karışım olarak gözükmektedir (Şekil 4.3).



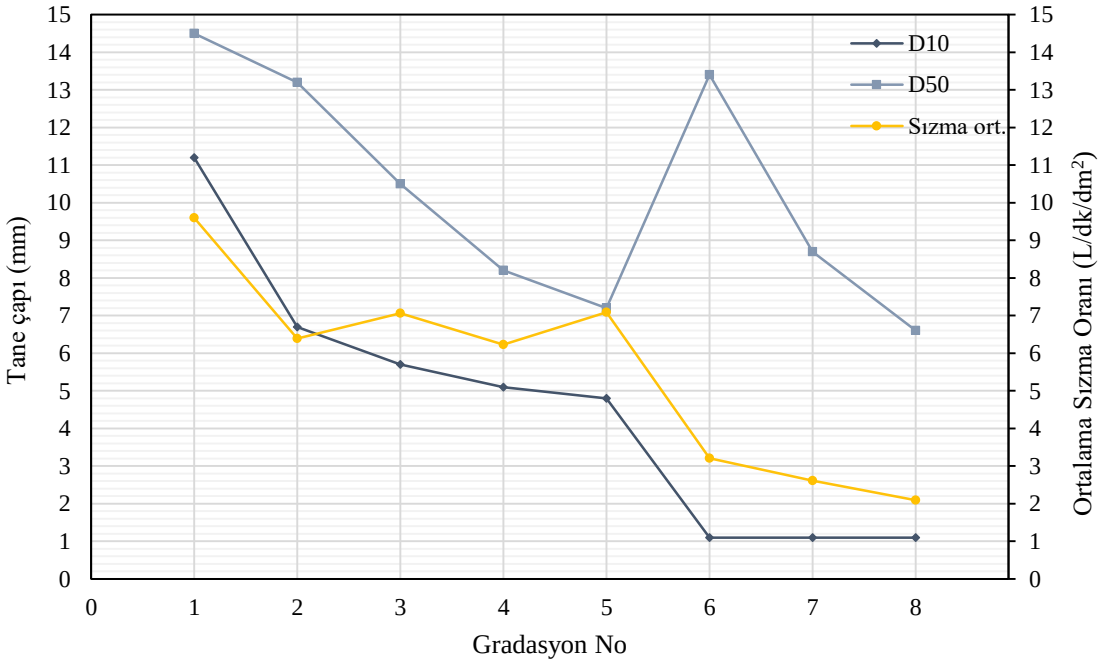
Şekil 4.3. Numunelerin dayanım ve sızma oranına göre karşılaştırması

4.5. Tane Çapı ve Sızma İlişkisi

Gradasyon ortalama tane çapı (D_{50}) ve efektif çap (D_{10}) değerleri infiltrasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında D_{10} değerlerinin sızma sonuçlarıyla uyumu göze çarpmaktadır (Çizelge 4.4). Hesaplamalarda D_{10} değerlerinin kullanımının hidrolik açıdan daha doğru sonuçlar vereceği görülmektedir (Şekil 4.4). Poroz ortam akışlarıyla ilgili hesaplamalarda hem belirleme kolaylığı hem de gösterdiği uyum sebebiyle gradasyon efektif çap değerlerinin kullanımı daha uygun olacaktır. Bu çalışmada infiltrasyon testlerinde Reynolds sayıları (Re) hesaplanırken efektif çap değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. Gradasyon tane çapları ve gradasyon numarasına göre sızma ortalaması

No	Tane çapı (mm)		Sızma Oranı, I (L/dk/dm^2)			
	D_{10}	D_{50}	A	B	C	Ortalama
1	11,2	14,5	7,50	9,51	11,79	9,6
2	6,7	13,2	8,13	6,60	4,45	6,4
3	5,7	10,5	6,89	6,88	7,42	7,1
4	5,1	8,2	5,50	7,44	5,74	6,2
5	4,8	7,2	6,54	9,08	5,65	7,1
6	1,1	13,4	1,48	3,89	4,25	3,2
7	1,1	8,7	1,77	2,59	3,47	2,6
8	1,1	6,6	1,48	2,05	2,75	2,1



Şekil 4.4. Gradasyon tane çapı ve sızma arasındaki ilişki

4.6. İnfiltrasyon Testlerinde Reynolds Sayıları

Tüm numunelerin infiltrasyon testleri için 1-10<*Re*<150-300 bulunmuştur (Çizelge 4.5). Buna göre infiltrasyon testlerinde akış, Darcy-Forchheimer denkleminin geçerli olduğu kısımdadır.

Çizelge 4.5. İnfiltrasyon testlerinde özgül debi (q) ve Reynolds sayıları (Re)

D_{10} (m)	No	q (m/s)	Re	No	q (m/s)	Re	No	q (m/s)	Re
0,0112	A1	0,012507	140	B1	0,015856	177	C1	0,019649	219
0,0067	A2	0,013545	90	B2	0,010995	73	C2	0,007424	50
0,0057	A3	0,011491	65	B3	0,011471	65	C3	0,012362	70
0,0051	A4	0,009173	47	B4	0,012404	63	C4	0,009562	49
0,0048	A5	0,010901	52	B5	0,015131	72	C5	0,009421	45
0,0011	A6	0,002464	3	B6	0,006486	7	C6	0,007087	8
0,0011	A7	0,002944	3	B7	0,004312	5	C7	0,005787	6
0,0011	A8	0,002470	3	B8	0,003412	4	C8	0,004586	5

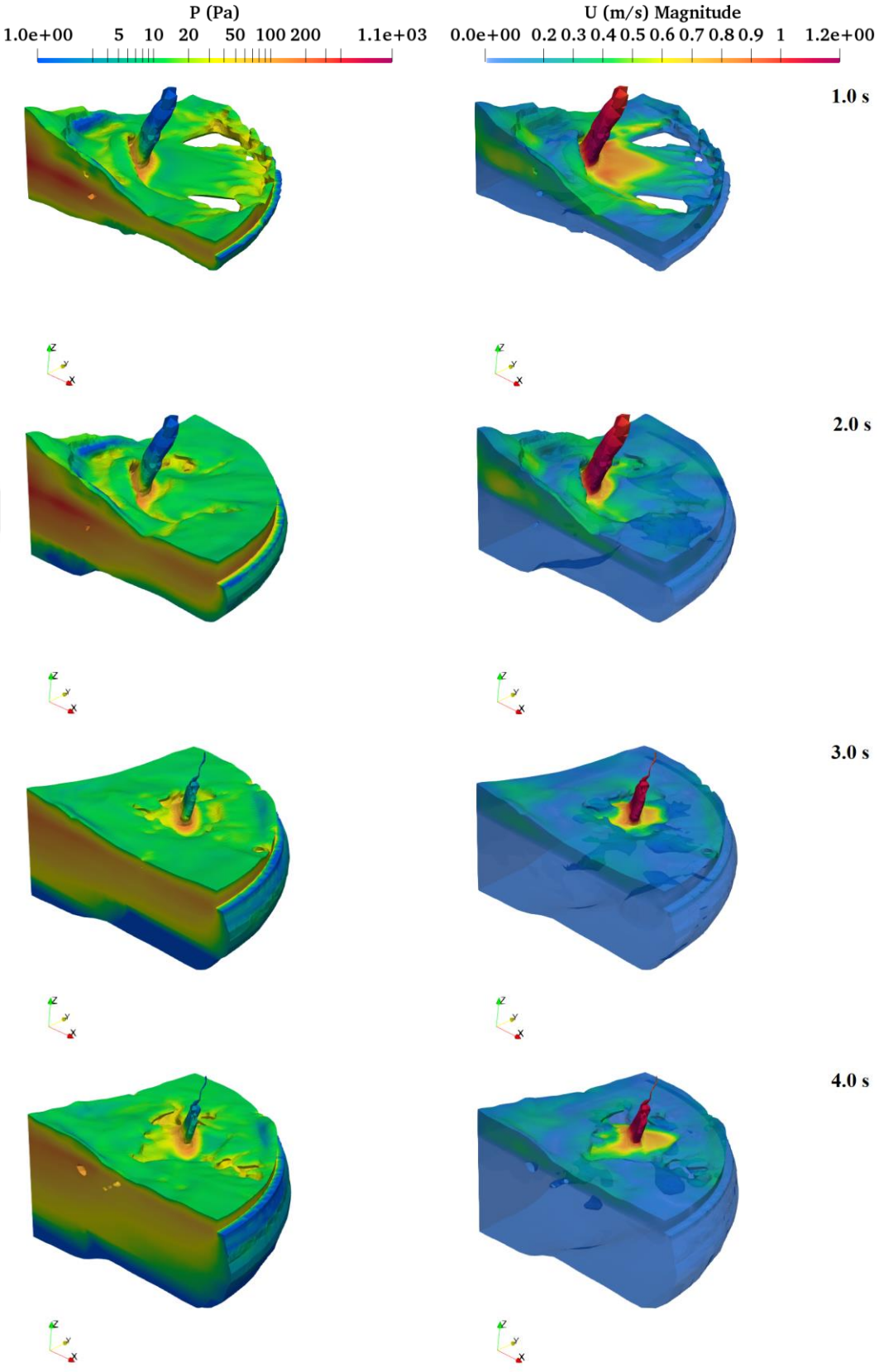
4.7. İnfiltrasyon Testlerinin SimFlow ile Simülasyonu

İnfiltrasyon testlerinde (t) ve simülasyonlarda (t_s) suyun beton yüzeyinden çekilme süreleri karşılaştırılmış ve makul derecede düşük farklar gözlenmiştir (Çizelge 4.6). SimFlow, deneysel verilerle uyumlu sonuçlar vermiştir.

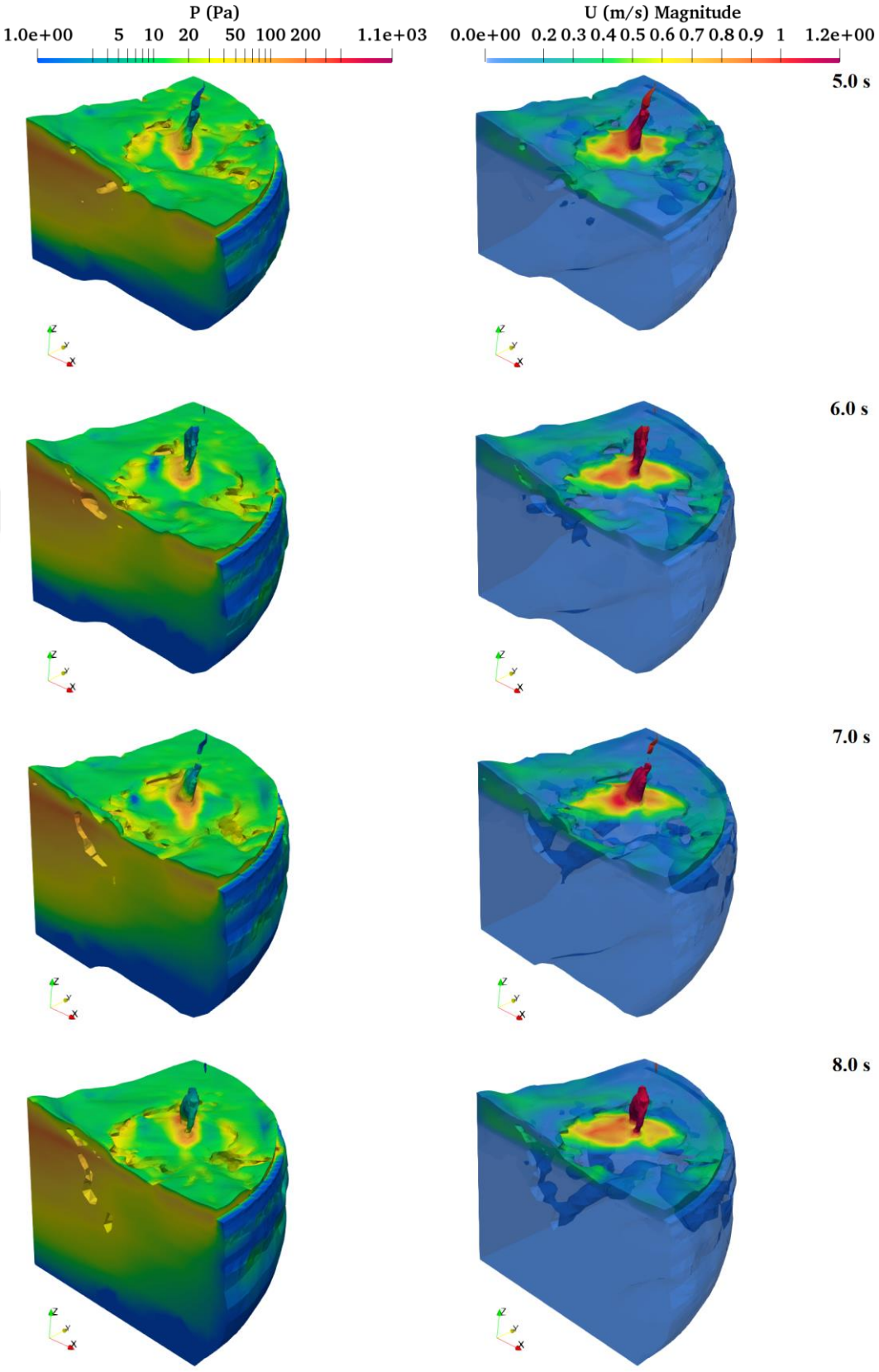
Çizelge 4.6. İnfiltrasyon testi ve simülasyonda suyun yüzeyden çekilme süreleri

No	t (s)	t_s (s)	No	t (s)	t_s (s)	No	t (s)	t_s (s)
A1	20,36	20,20	B1	16,06	15,90	C1	12,96	12,90
A2	18,80	18,60	B2	23,16	22,80	C2	34,30	33,70
A3	22,16	21,80	B3	22,20	21,90	C3	20,60	20,40
A4	27,76	27,30	B4	20,53	20,30	C4	26,63	26,20
A5	23,36	23,00	B5	16,83	16,70	C5	27,03	26,70
A6	103,33	100,20	B6	39,26	38,50	C6	35,93	35,30
A7	86,50	84,20	B7	59,06	57,50	C7	44,00	43,10
A8	103,10	100,40	B8	74,63	72,60	C8	55,53	54,30

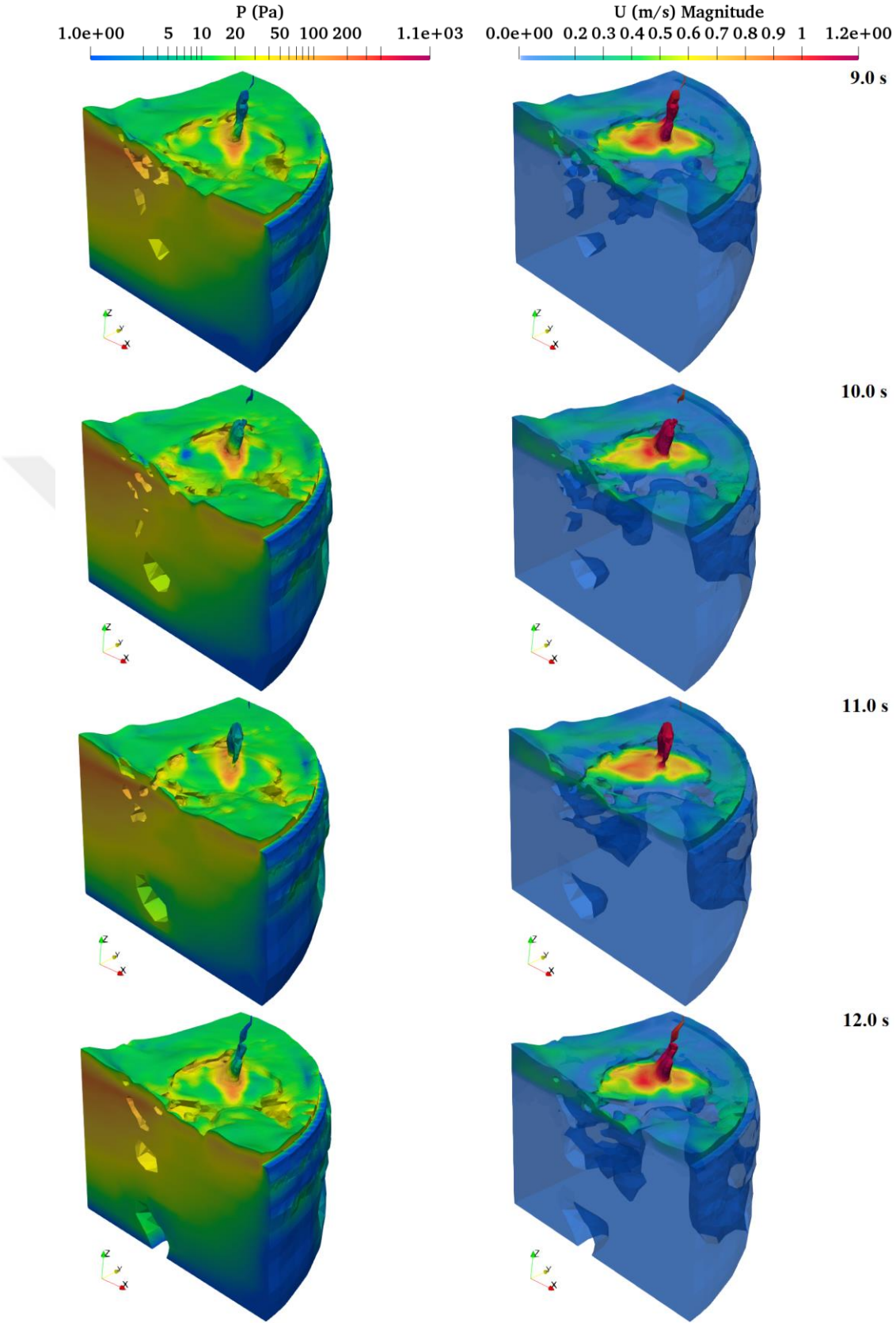
Optimum olarak seçilen C3 numunesinin simülasyonundan basınç ve hız dağılımı görselleri 1 saniye aralıklar halinde aşağıda verilmiştir. Görsellerde su-hava arayüz koşulu gereği γ değeri 0,5'in altında kalan hücreler gösterilmemiştir.



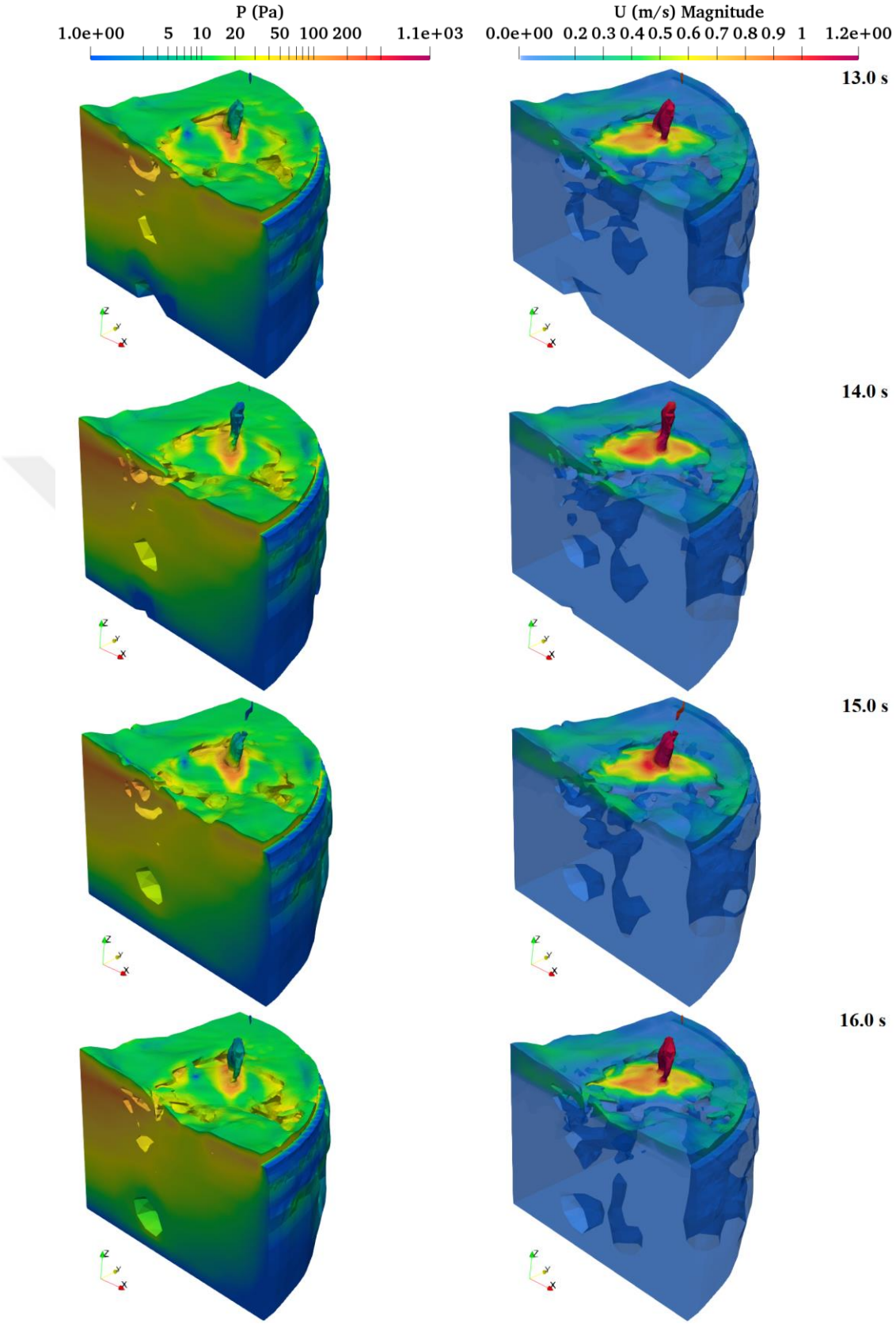
Şekil 4.5. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı



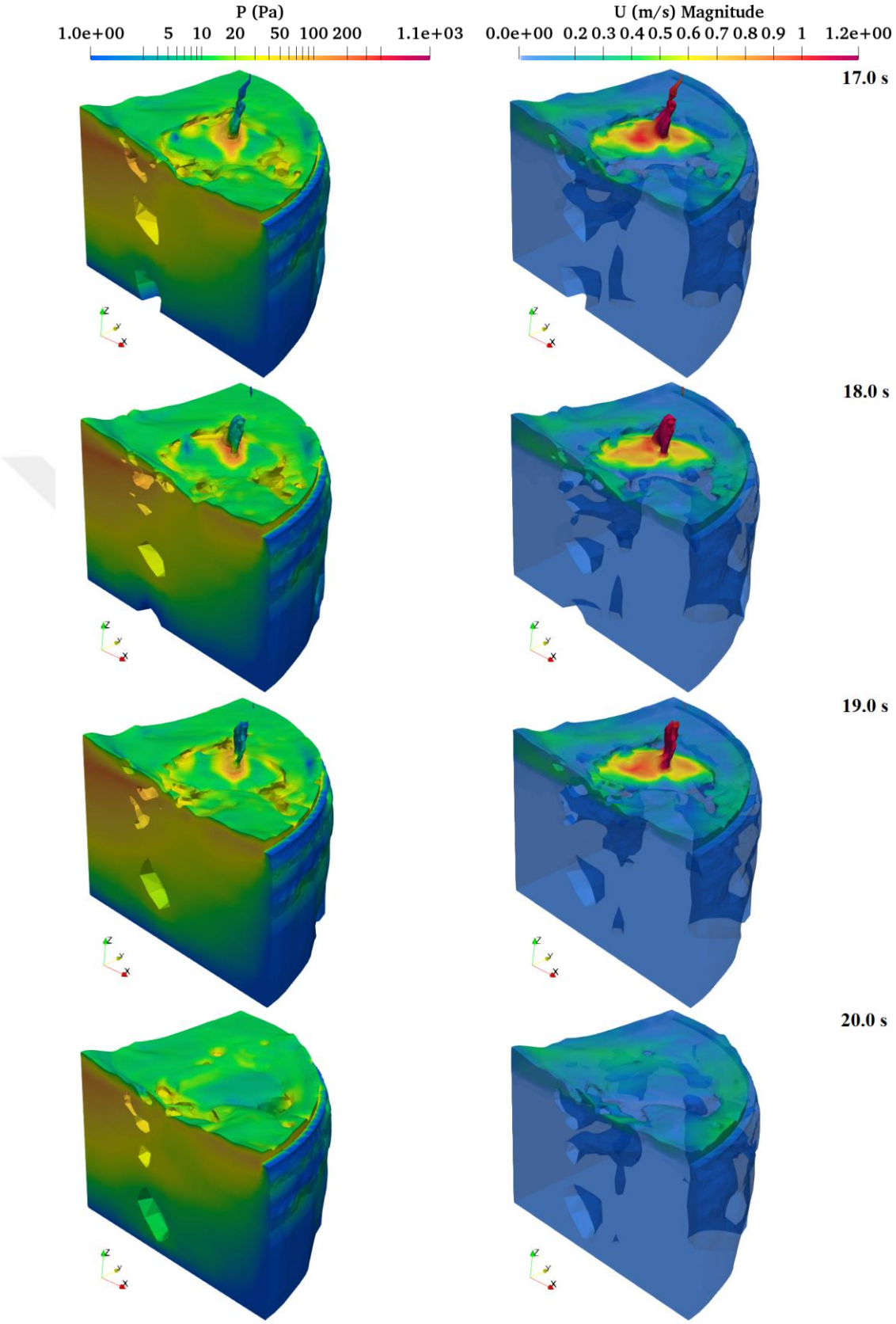
Şekil 4.6. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı (devamı)



Şekil 4.7. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı (devamı)



Şekil 4.8. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı (devamı)



Şekil 4.9. C3 simülasyonu basınç (solda) ve hız (sağda) dağılımı (devamı)

4.8. Hassasiyet Analizi

4.8.1. Darcy-Forchheimer parametrelerinin sızma oranına etkisi

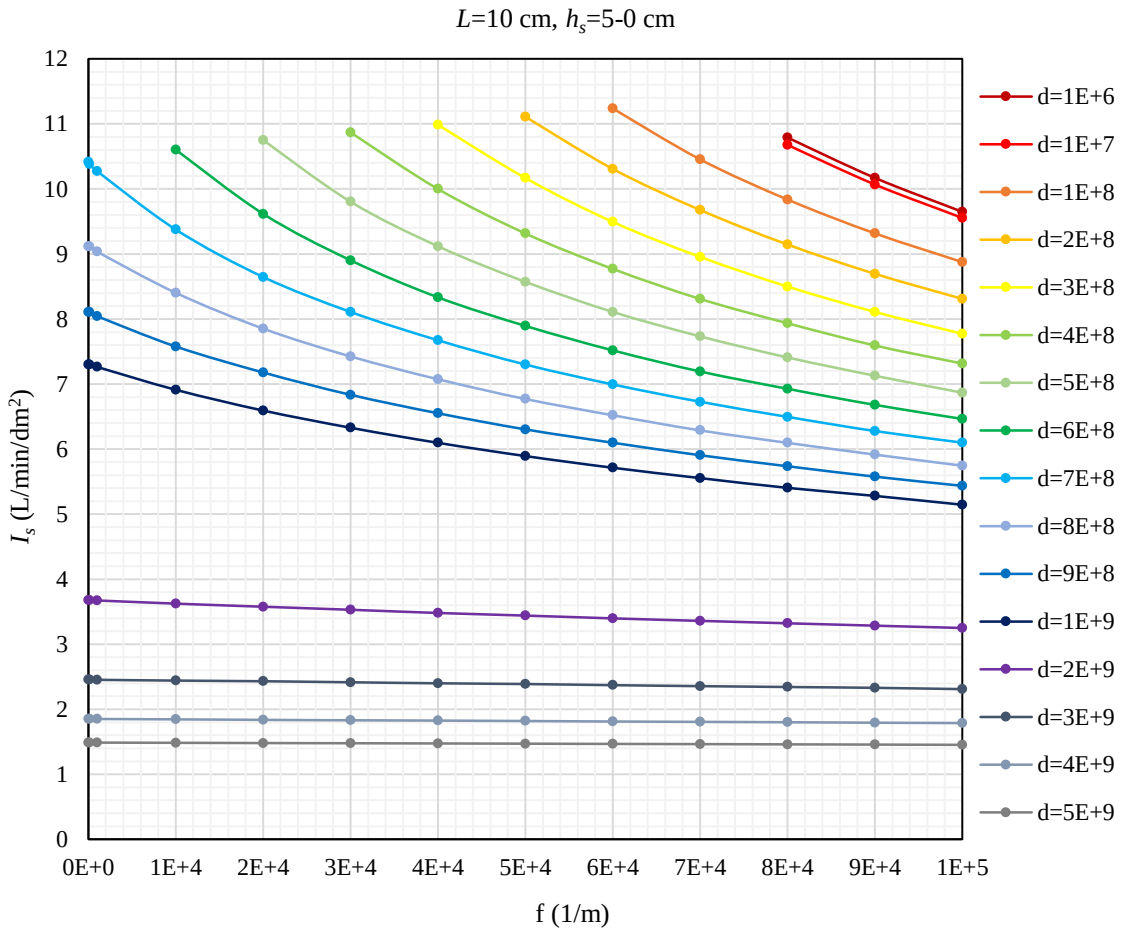
Darcy-Forchheimer (*d-f*) parametrelerinin infiltrasyona olan etkilerini görmek amaçlı ek simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlarda poroz ortam yüzeyi 10 cm x 10 cm ve ortam kalınlığı L=10 cm alınmıştır. Su seviyesini belirli bir seviyede tutacak değişken debi tanımlamak uygulanabilir değildir. Bu sebeple herhangi bir debi tanımlamadan başlangıç su seviyesi h_s=5 cm alınarak, su ortam yüzeyinden kaybolunca (h_s=0 cm) kadar geçen süre ölçülmüş ve 5 cm – 0 cm arası sızma oranı (I_s) suyun hacminin yüzey alanına ve de geçen süreye bölünmesi ile hesaplanmıştır. Modelde başlangıç koşulu olarak poroz ortam tamamen su ile dolu olarak tanımlanmıştır (h_s=5 cm, H=15 cm, Şekil 3.7'deki gibi). 16 farklı d parametresi ve 13 farklı f parametresi ile toplam 155 simülasyon yapılmıştır (Çizelge 4.7). Ayrıca farklı ortam kalınlıkları ve su seviyelerinin etkisini görmek için 18 farklı *d-f* çifti, 3 farklı ortam kalınlığı (L=10; 15; 20 cm) ve 4 farklı su seviyesi (h_s=5; 10; 15; 20 cm) ile toplam 216 simülasyon daha yapılmıştır.

Çizelge 4.7. L=10 cm, h_s=5 cm simülasyonlarında *d-f* çiftine karşılık sızma oranı (I_s)

I_s (L/dk/dm^2)	f (1/m)												
d (1/m^2)	1E+1	1E+2	1E+3	1E+4	2E+4	3E+4	4E+4	5E+4	6E+4	7E+4	8E+4	9E+4	1E+5
1E+6											10,79	10,17	9,65
1E+7											10,68	10,07	9,55
1E+8									11,24	10,45	9,84	9,32	8,88
2E+8								11,11	10,31	9,68	9,15	8,70	8,31
3E+8							10,99	10,17	9,49	8,96	8,50	8,11	7,77
4E+8						10,87	10,00	9,32	8,77	8,31	7,94	7,59	7,32
5E+8					10,75	9,80	9,12	8,57	8,11	7,73	7,41	7,13	6,86
6E+8				10,60	9,62	8,90	8,33	7,89	7,52	7,19	6,93	6,68	6,47
7E+8	10,42	10,38	10,27	9,38	8,65	8,11	7,67	7,30	6,99	6,73	6,49	6,28	6,10
8E+8	9,12	9,12	9,04	8,40	7,85	7,43	7,08	6,77	6,52	6,29	6,10	5,92	5,75
9E+8	8,11	8,11	8,04	7,58	7,18	6,83	6,55	6,30	6,10	5,91	5,74	5,58	5,43
1E+9	7,30	7,30	7,26	6,91	6,59	6,33	6,10	5,89	5,71	5,56	5,41	5,28	5,15
2E+9	3,68	3,68	3,67	3,62	3,58	3,53	3,48	3,44	3,40	3,36	3,32	3,29	3,25
3E+9	2,46	2,46	2,45	2,44	2,43	2,42	2,40	2,39	2,37	2,36	2,34	2,33	2,31
4E+9	1,85	1,85	1,85	1,85	1,84	1,83	1,83	1,82	1,81	1,81	1,80	1,79	1,79
5E+9	1,49	1,49	1,49	1,48	1,48	1,48	1,47	1,47	1,47	1,46	1,46	1,46	1,45

Darcy (d) parametresi intrinsik permeabilitenin (κ_1) tersidir. Simülasyonlarda gerçekçi olmak adına d değerleri, permeabilite (Bear, 1972, Table 5.5.1) gözetilerek seçilmiştir. Literatürde çok farklı tanımları bulunan f parametresi için ise kesin sınırlar bulunmadığından dolayı f değerleri ön simülasyon çalışması ile belirlenmiştir. Türbülanslı bölgede kalan değerler çizelgede verilmemiştir. d ve f parametrelerinin her ikisi de akışa karşı direnci temsil eder. d parametresi laminar akım durumunda

geçerliyken *f* parametresi akımın hızlandığı ve lineerliğinin bozulduğu (Forchheimer akımı) durumda *d* parametresine ek olarak devreye girer. Eğer *f* değerleri fazla yüksek tanımlanırsa akımı yavaşlatır ve lineer laminar (Darcy akımı) durumuna geçirir. Bu sebepten, *f* parametresi bir maksimum değere sahip olmalıdır.

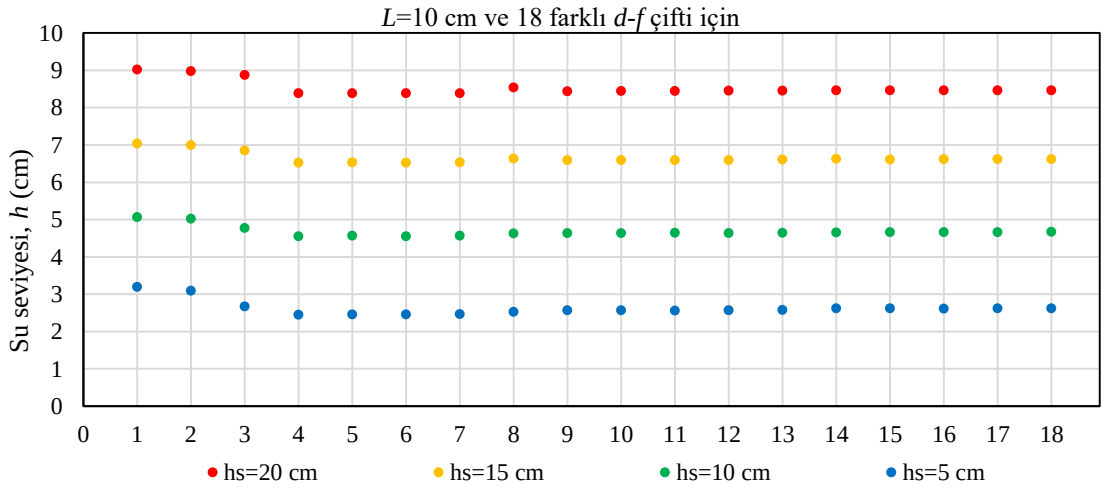


Şekil 4.10. *d* ve *f* parametrelerinin sızma oranı (I_s) üzerine etkisi

Simülasyon sonuçlarına göre *f* parametresi 10^3 değerinin altındayken, yüksek *d* değerlerinin yanında çok küçük kalmasından dolayı akıma neredeyse hiç etkisi yoktur (Çizelge 4.7). $3x10^9$ ve üzeri *d* değerlerinde, *f* parametresinin akımı pek fazla etkilemediği ve akım rejiminin lineer laminar olduğu söylenebilir (Şekil 4.10). Yine de akım rejimini daha doğru değerlendirmek için Reynolds (*Re*) sayısının bilinmesi gereklidir. *Re* sayısını hesaplamak için ise efektif çap (D_{10}) değerleri gereklidir. *d-f* parametreleri de D_{10} gibi akıştan bağımsız olarak poroz ortamın bir özelliğidir. Bu durumda her *d-f* çiftine karşılık bir D_{10} değeri belirlenebilir.

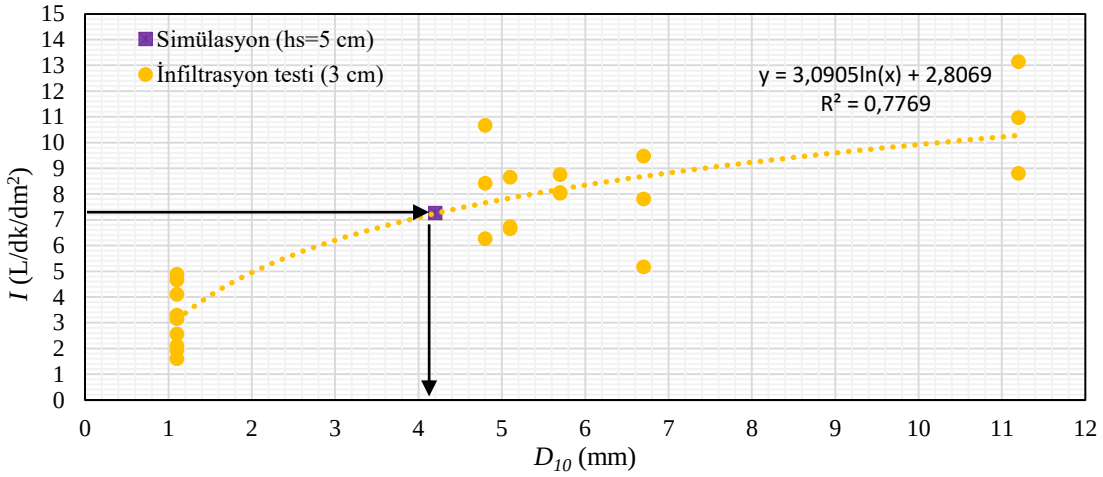
4.8.2. Darcy-Forchheimer parametrelerine karşılık efektif çapın belirlenmesi

Su seviyesi h_s'den 0'a giderken geçen süreye göre belirlenen sızma oranı (I_s) aynı zamanda, debi verilmek suretiyle su seviyesinin h_s ile 0 arasında bir değerde sabit tutularak gerçekleştirilen bir simülasyondaki sızma oranına denk olacaktır. Bu bilinmeyen seviyeyi belirlemek için kararlı durumda tanımlanmış olan Darcy-Forchheimer denkleminden (Denklem (2.16) yararlanılabilir. Bu denklemde, hız (u) yerine sızma oranı (I_s) yazılarak basınç farkı (ΔP) bulunur. Buradan hidrolik yük (H) bulunur (Denklem (3.4) ve sonrasında sabit su seviyesi (h) hesaplanır. Böylece herhangi bir h_s seviyesinden başlatılan simülasyon sonucunun hangi sabit su seviyesindeki infiltrasyon testi ile karşılaştırılacağı bulunabilir. Sabit poroz ortam kalınlığı için, başlangıç h_s seviyesi aynı olan ve farklı d-f değerlerine sahip tüm simülasyonlara karşılık Darcy-Forchheimer denkleminden (Denklem (2.16) hesaplanan sabit su seviyelerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür (Şekil 4.11).



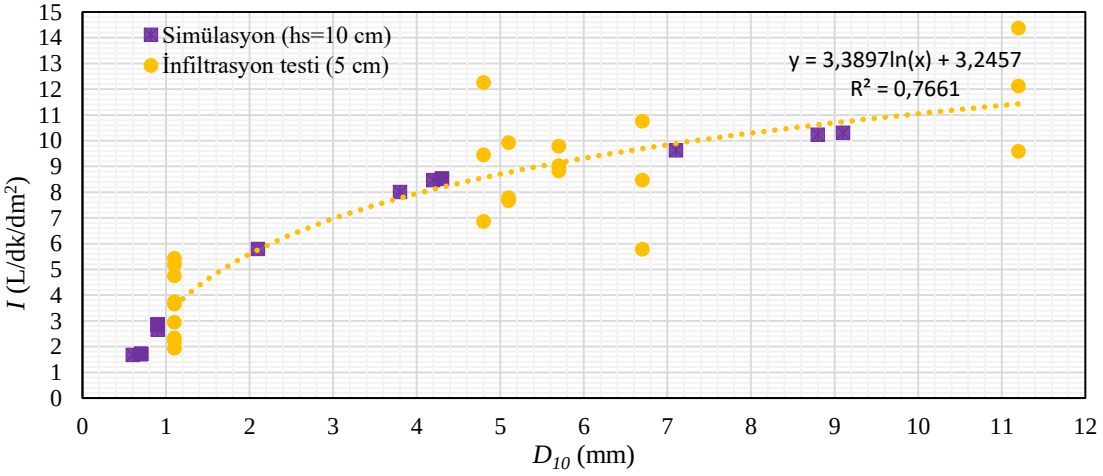
Şekil 4.11. Simülasyon sızma oranlarının (I_s) tekabül ettiği sabit su seviyeleri (h)

Şekil 4.11'e göre h_s=5 cm ile başlatılan kararsız durum simülasyonları yaklaşık olarak 3 cm sabit su seviyesi ile ve h_s=10 cm ile başlatılan kararsız durum simülasyonları ise yaklaşık olarak 5 cm sabit su seviyesi ile yapılacak infiltrasyon testleriyle aynı sızma oranını verecektir. Ancak, simülasyonlardaki ve infiltrasyon testlerindeki poroz ortam kalınlıkları (L) aynı olmak zorundadır. Böylece simülasyonlarda kullanılan her d-f çiftine karşılık bir D_{10} değeri tanımlamak mümkündür. Bunun için, bu çalışmada yapılmış olan 3 cm ve 5 cm seviyelerindeki infiltrasyon testlerinden yararlanılmıştır.



Şekil 4.12. 3 cm infiltrasyon testi *I*-D_{10} ilişkisi en uygun eğrisi ve bu eğriye göre h_s=5 cm simülasyonu sızma oranlarına (I_s) karşılık D_{10} değerlerinin belirlenmesi

3 cm sabit su seviyesinde yapılan infiltrasyon testlerinden (24 test) elde edilen sızma oranları (*I*) ve geçirgen betonların D_{10} değerlerine göre en uygun eğri çizilmiştir (Şekil 4.12). Çizilen eğri denklemine göre h_s=5 cm simülasyonlarının sızma oranları (I_s) kullanılarak 155 farklı simülasyondaki D_{10} değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4.8).



Şekil 4.13. 18 farklı *d*-*f* ve h_s=10 cm ile yapılan simülasyonlara ait I_s-D_{10} noktalarının, 5 cm infiltrasyon testlerine ait *I*-D_{10} ilişkisi en uygun eğrisi ile validasyonu

Uygulanan yöntemin validasyonu için Çizelge 4.8'den seçilmiş olan 18 farklı *d*-*f* ve h_s=10 cm alınarak yapılan simülasyonlara ait I_s-D_{10} noktaları, 5 cm sabit su seviyesinde yapılan infiltrasyon testi *I*-D_{10} en uygun eğrisi ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.13).

Simülasyon I_s-D_{10} noktalarının eğriye göre R^2 değeri 0,9941 ve korelasyon katsayısı 0,9970 bulunmuştur. Bu değerler validasyonun başarılı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.8. *d-f* parametrelerine karşılık gelen D_{10} değerleri

D_{10} (mm)	*f* (1/m)												
d (1/m²)	1E+1	1E+2	1E+3	1E+4	2E+4	3E+4	4E+4	5E+4	6E+4	7E+4	8E+4	9E+4	1E+5
1E+6											13,2	10,8	9,1
1E+7											12,7	10,4	8,8
1E+8									15,2	11,8	9,7	8,2	7,1
2E+8								14,6	11,3	9,1	7,7	6,7	5,9
3E+8							14,0	10,8	8,7	7,3	6,3	5,5	5,0
4E+8						13,5	10,2	8,2	6,9	5,9	5,2	4,7	4,3
5E+8					13,0	9,6	7,7	6,4	5,5	4,9	4,4	4,0	3,7
6E+8				12,4	9,0	7,2	6,0	5,2	4,6	4,1	3,8	3,5	3,3
7E+8	11,7	11,5	11,1	8,3	6,6	5,5	4,8	4,3	3,9	3,5	3,3	3,1	2,9
8E+8	7,7	7,7	7,5	6,1	5,1	4,4	4,0	3,6	3,3	3,1	2,9	2,7	2,6
9E+8	5,5	5,5	5,4	4,7	4,1	3,7	3,4	3,1	2,9	2,7	2,6	2,4	2,3
1E+9	4,3	4,3	4,2	3,8	3,4	3,1	2,9	2,7	2,6	2,4	2,3	2,2	2,1
2E+9	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
3E+9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
4E+9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
5E+9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6

4.8.3. Simülasyonlardaki Reynolds sayılarının bulunması

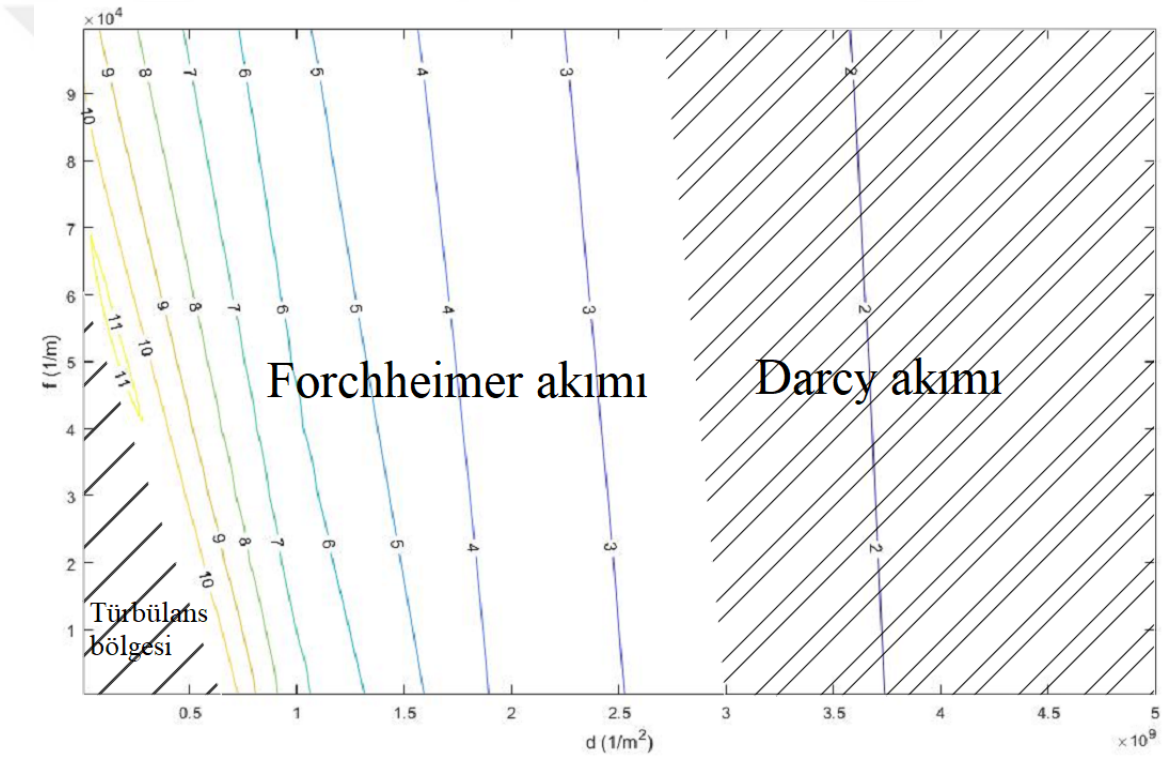
L=10 cm, h_s=5 cm ile yapılmış olan 155 adet simülasyonun sızma oranları (I_s) ve deneysel verilere dayanılarak belirlenen D_{10} değerleri ile Reynolds (*Re*) sayıları hesaplanmıştır (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. *L*=10 cm, h_s=5 cm için *d-f* çiftlerine göre Reynolds sayıları (*Re*)

Re	*f* (1/m)												
d (1/m²)	1E+1	1E+2	1E+3	1E+4	2E+4	3E+4	4E+4	5E+4	6E+4	7E+4	8E+4	9E+4	1E+5
1E+6											237	182	146
1E+7											225	174	140
1E+8									284	205	158	127	105
2E+8								269	194	146	117	97	81
3E+8							256	182	137	109	89	74	65
4E+8						244	169	127	101	81	69	59	52
5E+8					232	156	117	91	74	63	54	47	42
6E+8				218	144	106	83	68	57	49	44	39	35
7E+8	202	198	189	129	95	74	61	52	45	39	36	32	29
8E+8	117	117	113	85	67	54	47	40	36	32	29	27	25
9E+8	74	74	72	59	49	42	37	32	29	26	25	22	21
1E+9	52	52	51	44	37	33	29	26	25	22	21	19	18
2E+9	8	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7	7	6
3E+9	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
4E+9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5E+9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1

L=10 cm ve h_s=5 cm için Re sayılarına göre $3x10^9$ ve üzeri d değerlerinde akımın Darcy akımı (lineer laminar, Re<1-10) olduğu söylenebilir. Çizelge 4.9 detaylı incelendiğinde ve f parametresinin akış hızının yüksek olduğu Forchheimer akımında tanımlandığı göz önünde bulundurulduğunda, f' parametresinin en yüksek değerinin $1,0x10^5$ ila $1,5x10^5$ arasında olması gerektiği sonucuna varılmıştır. 10^3 değerinin altında etkisinin olmadığı da düşünülürse f parametresinin geçerli aralığını $1,0x10^3 < f < 1,5x10^5$ olarak tanımlamak mümkündür.

Şekil 4.14'te, Çizelge 4.7 kontur haline getirilmiş ve Çizelge 4.9'a göre belirlenen farklı akım bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.14. L=10 cm, h_s=5 cm için d-f parametrelerine göre sızma oranı I_s (L/dk/dm^2)

4.9. Boyut Analizi

$$\Delta P = H.\rho.g = \mu.d.L.u + \frac{1}{2}.\rho.f.L.u^2 \tag{4.1}$$

Yukarıda verilen Darcy-Forchheimer denklemi, υ kinematik viskozite (m^2/s) olmak üzere aşağıdaki formda yazılabilir:

$$H = \frac{\upsilon.d.L.u}{g} + \frac{f.L.u^2}{2.g} \tag{4.2}$$

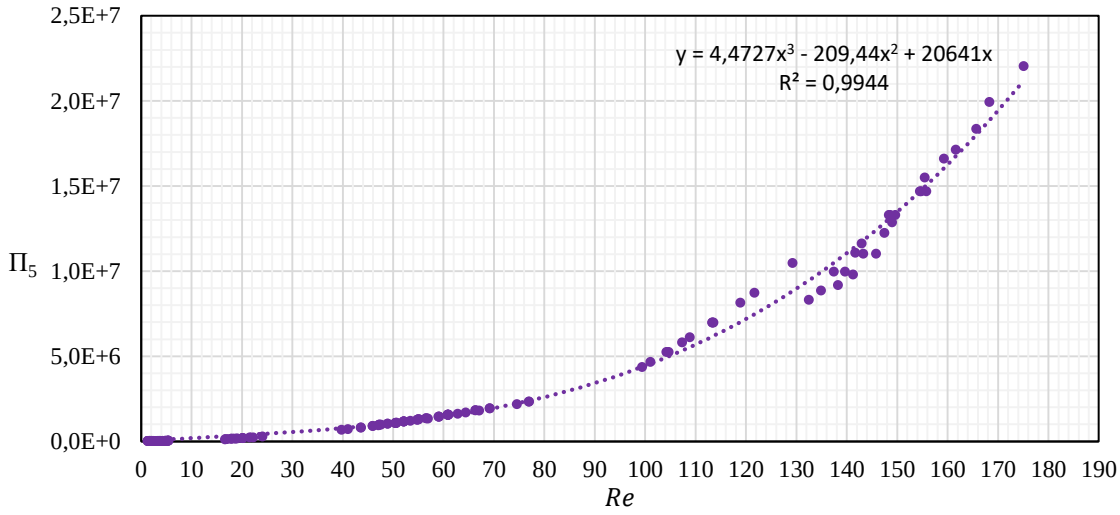
Buckingham Π teoremi Darcy-Forchheimer denklemi değişkenlerine uygulandığında bağımlı değişken *u*=F{*H, L, g, υ, d, f*} olarak tanımlanır. *d-f* parametreleri yerine D_{10} değeri yazıldığında terim sayısı azaltılmış olur. Bağımlı değişken *u*=F{*H, L, g, υ,* D_{10}} olarak tanımlandığında tüm değişkenler temel boyutlar cinsinden *u* [L/t], *H* [L], *L* [L], *g* [L/t^2], *υ* [L^2/t], D_{10} [L] olarak yazılır. İki temel boyut olduğu için iki adet tekrarlayan değişken seçilir. Π_1 terimini Reynolds sayısı yapmak için *υ* ve D_{10} tekrarlayan değişken olarak seçilmiştir. Boyutsuz Π terimleri Reynolds (*Re*) ve Galilei (*Ga*) sayılarını içerecek şekilde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\Pi_1 = \frac{u.D_{10}}{\upsilon} = Re \qquad \Pi_2 = \frac{H}{D_{10}} \qquad \Pi_3 = \frac{L}{D_{10}} \qquad \Pi_4 = \frac{g.{D_{10}}^3}{\upsilon^2} = Ga \tag{4.3}$$

Π_2, Π_3 ve Π_4=*Ga* terimleri aşağıdaki gibi bir araya getirilerek Π_5 terimi elde edilir:

$$\Pi_5 = \frac{H}{L}.\frac{g.{D_{10}}^3}{\upsilon^2} = \frac{H}{L}.Ga \tag{4.4}$$

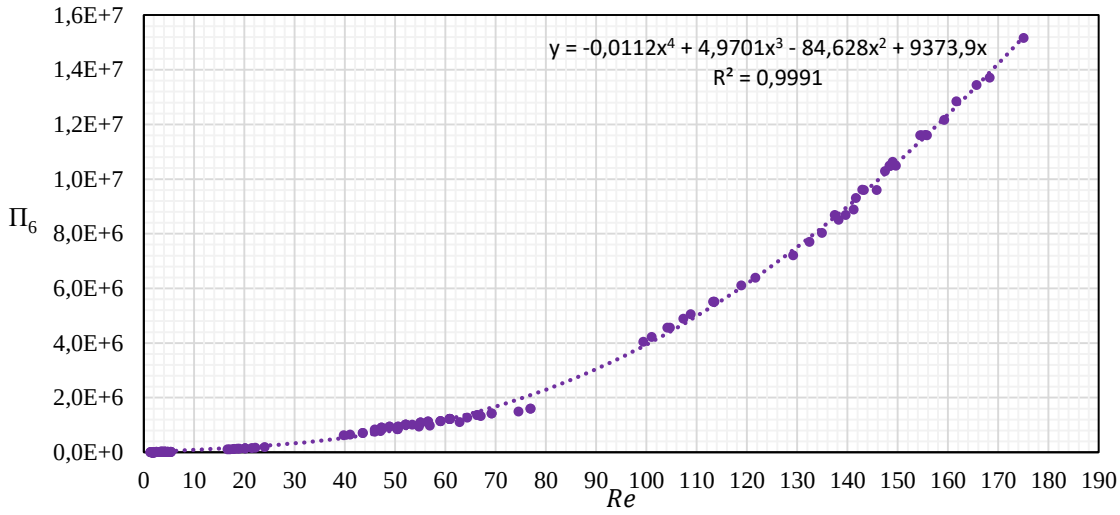
18 farklı *d-f* çifti, 3 farklı poroz ortam kalınlığı (*L*) ve 4 farklı su seviyesi (h_s) ile yapılan toplam 216 simülasyona göre Re-Π_5 ilişkisi Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Re-Π_5 grafiği

Şekil 4.15'teki R^2 değerini azaltmak amacıyla Π_5 aşağıdaki gibi tekrar düzenlenir:

$$\Pi_6 = \left(\frac{H}{L}\right)^{\frac{2}{3}} . \left(\frac{g.{D_{10}}^3}{\upsilon^2}\right) = \left(\frac{H}{L}\right)^{\frac{2}{3}} . Ga \qquad (4.5)$$



Şekil 4.16. *Re*-Π_6 grafiği

Şekil 4.16 kullanılarak, yalnızca elek analizi (D_{10}) ile farklı poroz ortam kalınlıkları (L) için istenilen su seviyesindeki (h) sızma oranını (I) yaklaşık olarak tespit etmek mümkündür. Ayrıca ilgili parametrelerden bilinmeyen herhangi biri diğerleri vasıtasıyla bulunabilir.

4.10. Tartışma

Bilindiği üzere geleneksel betonda S/Ç oranı arttıkça dayanım düşmektedir. Geleneksel betona göre daha düşük S/Ç oranlarında üretilen geçirgen betonun incelendiği bu çalışmada, S/Ç oranı arttıkça dayanımın arttığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan S/Ç oranlarından daha yüksek oranlar kullanıldığı takdirde, dayanımla ilgili bu durum tersine dönerek, geleneksel betondakine benzer bir durum oluşabilir. Bu sebeple daha yüksek S/Ç oranları kullanılarak geçirgen betonlar üretilebilir ve dayanım durumu incelenerek en uygun S/Ç oranı belirlenebilir.

İnfiltrasyon testlerinin simülasyonlarında; –z yönünde (yerçekimi yönü) ilerleyen suyun, x-y düzleminde deneylere göre daha az yayıldığı görülmüştür. Bunun sebebi SimFlow'un poroz ortam tanımından kaynaklanmaktadır. SimFlow poroz ortamda katı-boşluk ayrımı yapmamakta, bunun yerine *d-f* parametrelerine bağlı olarak akış hızını düşürmektedir. Bu durumun sonuca fazla etkisi olmasa da görsel olarak deneylerdeki yayılımın aynısını vermemektedir. Aynı yayılımı elde etmek, üretilen betonun porozite ve *d-f* değerlerine göre katı-boşluk ayrımının yapıldığı bir geometri tanımlanması ile mümkün olabilir.

İnfiltrasyon oranı, sadece gradasyona bağlı gibi gözükse de S/Ç oranının düzensiz etkisi, betonun işlenebilirliği, sıkıştırma miktarı, uygulamadaki farklılıklar ve boşluk oranı farkları gibi birçok değişkenin etkisi altındadır. Bu sebeple boyut analizi ile bulunan *Re*-Π_6 grafiği (Şekil 4.16), farklı değerler ile yapılacak simülasyonlar için düşük hata payı verecek olsa da üretilecek betonlar bahsi geçen etkilerin altında olacağından, deneysel sızma oranlarında bir miktar sapma görülebilir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada geçirgen betonların yapısal ve hidrolik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında üç farklı S/Ç oranı ve sekiz farklı agrega gradasyonu kullanılarak toplam yirmi dört farklı geçirgen beton üretilmiştir. Basınç dayanımı ve infiltrasyon testleri sonucu her karışım için yapısal ve hidrolik özellikler bulunmuştur. SimFlow programı kullanılarak infiltrasyon testleri modellenmiştir.

Tüm karışımlar için hava oranı %22 ve 1 m^3'teki çimento miktarı 305 kg olarak sabit tutulmuştur. S/Ç oranları 0,28 (A), 0,31 (B) ve 0,34 (C) olarak seçilmiştir. 0-3 mm, 5-15 mm ve 15-25 mm boyutlu kırma kireçtaşı agregalar kendi aralarında hacimce belirli oranlarda karıştırılarak sekiz farklı gradasyon elde edilmiştir. Üç farklı S/Ç oranı ve sekiz farklı gradasyonla yirmi dört farklı geçirgen beton tasarlanmıştır (Çizelge 3.3).

28 günlük basınç dayanımı testine göre sırasıyla C4, C2, C3 ve C7 karışımları ACI 522R-10'da belirtilen genel ortalama 17 MPa'ın üzerinde basınç dayanımı sergilemişlerdir (Çizelge 4.1). İnfiltrasyon testlerine göre sırasıyla C1, B1, B5, A2, A1, B4 ve C3 karışımları ACI 522R-10'da belirtilen üst sınır olan 730 L/dk/m^2'nin de üzerinde sızma oranlarına sahiptirler (Çizelge 4.2). Basınç dayanım ve infiltrasyon testlerine göre S/Ç oranı 0,34 olan, %50 oranlarında 5-15 mm ve 15-25 mm agrega içeren C3 karışımı 19,15 MPa basınç dayanımı ve 742 L/dk/m^2 sızma oranı ile en uygun karışım olarak seçilmiştir (Şekil 4.3).

Geleneksel betonda S/Ç oranının yükselmesi dayanımı düşürse de bu çalışma verilerinde göre geçirgen betonda bu durumun aksi gözlenmiş ve S/Ç oranının artması dayanımı arttırmıştır. Özellikle ince malzeme (0-3 mm) kullanılmayan karışımlardaki dayanım artışı, kullanılanlara göre daha yüksektir. Bunun sebebi çimento hamurunun agregayı daha iyi sarmasıdır. Agrega yüzey alanının azalmasıyla çimento hamurunun daha etkili çalıştığı düşünülebilir. Düşük S/Ç oranında çoğunlukla 15-25 mm agrega içeren karışımların dayanımı daha yüksek iken S/Ç oranı yükseldikçe 5-15 mm ve 15-25 mm agregayı beraber içeren karışımların dayanımı daha yüksek çıkmıştır (Şekil 4.1). S/Ç oranı ile geçirgenlik arasında bir ilişki kurulamamıştır. Gradasyonda tane boyutu küçüldükçe geçirgenlik de azalmıştır. Tek tip iri agrega kullanımının geçirgenlik açısından daha iyi sonuç verdiği söylenebilir (Şekil 4.2). İnce malzeme (0-3 mm)

kullanımı dayanımı beklendiği düzeyde arttırmasa da taneler arası boşluğu azalttığından dolayı dayanıma bir miktar katkı sağlamış olabilir ancak geçirgenliği de ciddi oranda düşürmüştür. İnce malzemenin dayanımı beklendiği gibi arttırmamasının sebebi, geleneksel betona göre daha düşük S/Ç oranlarına sahip geçirgen betonda çimento hamurunun agregayı sarmak için yetersiz kalması olabilir. Sonuç olarak geçirgen beton üretiminde 5-25 mm arası uygun tane boyut sınıfına sahip tek tip iri agreganın ince malzeme içermeksizin yüksek S/Ç oranları ile kullanılması uygun görülmektedir.

Efektif tane çapı (D_{10}) değerleri sızma oranları (I) ile paralellik göstermektedir (Şekil 4.4). Bu sebeple hidrolik hesaplamalarda D_{10} değerlerinin kullanılması daha uygun olacaktır. İnfiltrasyon testlerinde Reynolds sayıları (Re), D_{10} değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm numuneler için akış, Darcy-Forchheimer kanununun geçerli olduğu aralıktadır (Çizelge 4.5).

SimFlow ile modelleme kapsamında Darcy-Forchheimer (d-f) parametreleri, deneysel veriler kullanılarak eğri oluşturma yöntemi ile bulunmuştur. 1, 3 ve 5 cm su yüksekliklerinde gerçekleştirilen infiltrasyon testlerinden hız (u) ve basınç (P) değerleri belirlenmiştir. Grafikte hız değerleri x eksenine ve basınç değerleri y eksenine yerleştirilerek eğri oluşturulmuştur (Şekil 3.8). Eğri denkleminden d ve f parametreleri bulunmuştur (Çizelge 3.5). Daha geniş veri aralığında gerçekleştirilen infiltrasyon testleri, eğri uydurma yönteminden daha net sonuçlar alınmasını sağlayacaktır.

Çözüm ağı yakınsama çalışması sonucu %0,5'in altında kalan değişimle yakınsama sağlanmıştır (Çizelge 3.6). 66500 hücreden oluşan 75586 düğüm noktası olan model ile analiz gerçekleştirilmiştir. Analizde, zamana bağlı sıkıştırılamaz akışlarda çift faz ve poroz ortam çözümü yapabilen InterFoam çözücüsü kullanılmıştır. Analiz zaman adımları 0,01 saniyedir. Courant sayısı 0,5 olarak alınmıştır.

Simülasyonlarda suyun beton yüzeyinden çekilme süreleri belirlenmiş ve infiltrasyon test süreleri ile karşılaştırılmıştır. Süreler arasındaki farklar makul derecede düşüktür (Çizelge 4.6). SimFlow, deneysel verilerle uyumlu sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak SimFlow'un çift fazlı poroz ortam akımlarını çözmede başarılı olduğu görülmüştür. SimFlow, poroz materyallerin hidrolik özelliklerinin tahmininde kullanılabilir.

Hassasiyet analizi kapsamında *d-f* parametrelerinin birbirlerine ve sızma oranına olan etkisi gözlenmiştir. 16 farklı *d* ve 13 farklı *f* parametresi ile toplam 155 simülasyon yapılmıştır. Simülasyonlarda poroz ortam kalınlığı (*L*) 10 cm'dir. Başlangıç koşulu olarak poroz ortam su ile dolu olarak tanımlanmıştır. Su seviyesi (h_s) 5 cm'de başlatılmış ve su, ortam üst yüzeyinden kaboluncaya kadar geçen süreye göre sızma oranı (I_s) hesaplanmıştır (Çizelge 4.7). Ayrıca 18 farklı *d-f* çifti, 3 farklı ortam kalınlığı ve 4 farklı su yüksekliği için toplam 216 ek simülasyon daha yapılmıştır.

Reynolds sayılarını (*Re*) hesaplayabilmek için simülasyonlarda kullanılan *d-f* parametrelerine karşılık gelebilecek D_{10} değerlerinin bulunmasına yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Yönteme göre; hangi h_s su seviyesinde başlatılan simülasyonun, hangi sabit *h* su seviyesinde yapılmış olan infiltrasyon testi ile karşılaştırılacağı belirlenmiştir (Şekil 4.11). h_s=5 cm simülasyonlarındaki sızma oranlarının (I_s), 3 cm su seviyesinde yapılan infiltrasyon testlerinden elde edilen sızma oranları (*I*) ile kıyaslanabilir olduğu görülmüştür. Bu seviyedeki infiltrasyon testinin *I*-D_{10} değerlerine en uygun eğri oturtulmuş (Şekil 4.12) ve bu eğriye göre h_s=5 cm simülasyonları sızma oranları (I_s) kullanılarak *d-f* çiftlerine karşılık gelen D_{10} değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4.8). Belirlenen D_{10} değerleri ile h_s=10 cm simülasyonları, 5 cm'de yapılan infiltrasyon testi verileriyle karşılaştırılarak validasyonu yapılmıştır (Şekil 4.13).

Belirlenen D_{10} değerleri ve simülasyon sızma oranları (I_s) ile *L*=10 cm, h_s=5 cm için *Re* hesaplanmıştır (Çizelge 4.9). $3x10^9$ ve üzeri *d* değerlerinde *f* parametresinin akıma fazla etkisi olmadığından, akımın Darcy bölgesinde (1-10<*Re*) olduğu söylenebilir. Yüksek *d* değerleri yanında düşük kaldığından dolayı, 10^3'ten daha düşük *f* değerlerinin akıma etkisi yoktur. Forchheimer akımında (1-10<*Re*<150-300) tanımlanan *f* parametresinin, akımı yavaşlatarak Darcy akımına geçirmemesi için en fazla $1,0x10^5$ ila $1,5x10^5$ arası bir değerde olması gerekir. Böylece *f* parametresinin etkin aralığı $1,0x10^3 < f < 1,5x10^5$ olarak tanımlanabilir.

Boyut analizi çalışması sonucu bulunan boyutsuz Π_6 sayısı ile *Re* arasında grafiksel olarak ilişki kurulmuştur (Şekil 4.16). Bu grafik yardımıyla; infiltrasyona dair parametrelerden bilinmeyen herhangi biri, diğer parametreler ile bulunabilir.

KAYNAKLAR

American Concrete Institute, Committee 522. (2010). *Report on Pervious Concrete* (522R-10). Erişim adresi: https://www.concrete.org/

Adewumi, A. A., Owolabi, T. O., Alade, İ. O. ve Olatunji, S. O. (2016). Estimation of physical, mechanical and hydrological properties of permeable concrete using computational intelligence approach. *Applied Soft Computing*, *42*, 342-350. doi: 10.1016/j.asoc.2016.02.009

Adilah, A. A. G. Nadiatul, Mohammed, S. Y. Ayman, Ramadhansyah, P. J., Rokiah, O. ve Hainin, M. R. (2020). The Influence of Steel Slag as Alternative Aggregate in Permeable Concrete Pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *712*(1), 012011. doi: 10.1088/1757-899X/712/1/012011

Ajamu, S. O., Jimoh, A. A. ve Oluremi, J. R. (2012). Evaluation of structural performance of pervious concrete in construction. *International Journal of Engineering and Technology*, *2*(5), 829-836. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Johnson-Oluremi/publication/271486843

Akkaya, A. ve Çağatay, İ. H. (2016). Geçirimli betonların basınç dayanımı üzerine deneysel bir çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31*(2), 209-216. doi: 10.21605/cukurovaummfd.310279

Akkaya, A. ve Çağatay, İ. H. (2018). Geçirimli betonların yol kaplaması olarak kullanımının araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 35*(1), 51-62. Erişim adresi: https://fbe.cu.edu.tr/cu/e-dergi/makaleler/2017-yili

Alparslan, U., İzmit, İ., Kılınç, C., Uçar, S., Tarhan, A. Ö. ve Erdal, B. (2019, Mayıs). *Geçirimli betonlarda sentetik liflerin kullanımı*. Uluslararası 10. Beton Kongresi, BOAB yerleşkesi, Bursa, Türkiye. Erişim adresi: http://antalya.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/18412_33_38.pdf

Alyaseri, I. ve Zhou, J. (2016). Stormwater volume reduction in combined sewer using permeable pavement: City of St. Louis. *Journal of Environmental Engineering*, *142*(4), 04016002. doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001056

Bean, E. Z., Hunt, W. F. ve Bidelspach, D. A. (2007a). Field Survey of Permeable Pavement Surface Infiltration Rates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *133*(3), 249-255. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:3(249)

Bean, E. Z., Hunt, W. F. ve Bidelspach, D. A. (2007b). 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. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:6(583)

Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Dower Publications.

Bear, J. ve Verruijt, A. (1987). *Modelling groundwater flow and pollution*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.

Bejan, A. (2004). *Convection heat transfer*. New York, NY: John Wiley and Sons.

Bentarzi, Y., Ghenaim, A., Terfous, A., Wanko, A., Feugeas, F., Poulet, J. B. ve Mose, R. (2016). Hydrodynamic behaviour of a new permeable pavement material under high rainfall conditions. *Urban Water Journal*, *13*(7): 687-696. doi: 10.1080/1573062X.2015.1024688

Bin Yusof, M. H., Bin Suhaimi, M. F., Bin Mohd Aris, M. H. ve Akhtar, S. M. (2016, Ekim). *Numerical study on the effect of geometrical parameters on the performance of vortex tube cooling device using Simflow*. International Conference on Science, Engineering, Management and Social Science, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia. Erişim adresi: http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/16222/1/328%20-%20MOHD%20HAZWAN%20BIN%20YUSOF.pdf

Borgwardt, S. (2006, Kasım). *Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement*. The 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, CA. Erişim adresi: https://www.uni-groupusa.org/PDF/BorgwardtLongterminfiltrationPICP.pdf

Borgwardt, S. (2015, Eylül). *In-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement – New results*. The 11th International Conference on Concrete Block Pavement - ICCBP, Dresden, Germany. Erişim adresi: https://www.bwb-norderstedt.de/iccbp_2015_21_eng_final_borgwardt.pdf

Brattebo B. O. ve Booth D. B. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research, 37*(18): 4369-4376. doi: 10.1016/S0043-1354(03)00410-X

Chen, J., Chu, R., Wang, H., Zhang, L., Chen, X. ve Du, Y. (2019). Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement. *Journal of Cleaner Production, 237,* 117722. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117722

Chindaprasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N. ve Yuasa, Y. (2008). Cement paste characteristics and porous concrete properties. *Construction and Building Materials, 22*(5): 894-901. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.007

Collins, K. A., Hunt, W. F. ve Hathaway, J. M. (2008). Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern North Carolina. *Journal of Hydrologic Engineering, 13*(12): 1146-1157. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:12(1146)

Dai, S., Wu, X., Zhou, H., Li, W., Jiang, X. ve Liang, B. (2019). Experimental Study on Mechanical Properties of Permeable Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 233*(3), 032037. doi: 10.1088/1755-1315/233/3/032037

Dierkes, C., Kuhlmann, L., Kandasamy, J. ve Angelis, G. (2002). Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements. *Global Solution for Urban Drainage*, 1-13. doi: 10.1061/40644(2002)40

Drake, J., Bradford, A. ve Van Seters, T. (2014). Stormwater quality of springesummer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement. *Journal of Environmental Management, 139*, 69-79. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.11.056

Enteria, N. A. (2016). CFD evaluation of Philippine detached structure with different roofing designs. *İnfrastructures, 1*, 3. doi: 10.3390/infrastructures1010003

Enteria, N. A. ve Cuartero-Enteria, O. L. (2017). CFD evaluation on the pre- and post-renovation, and windows and doors opening, of a typical, walled, detached family house in the Philippines. *Infrastructures, 2*, 16. doi: 10.3390/infrastructures2040016

Eyre, J. ve Bhalchandra, P. (2014). Permeable concrete block paving applications in the United Arab Emirates. *International Journal of Engineering Trends and Technology, 16*(5), 227-236. Erişim adresi: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.676.9938&rep=rep1&type=pdf

Gonzalez-Angullo, N., Castro, D., Rodriguez-Hernandez, J. ve Davies, J. W. (2008). Runoff infiltration to permeable paving in clogged conditions. *Urban Water Journal, 5*(2), 117-124. doi: 10.1080/15730620701723538

Hafsteinsson, H. E. (2009). Porous media in OpenFOAM. *Chalmers University of Technology. Gothenburg*. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Haukur-Hafsteinsson/publication/265226764

Hall, W. A. (1956). Permeabilitiy and infiltration relationships in one dimensional infiltration in a uniform soil. *EOS, Transactions American Geophysical Union, 37*(5): 602-604. doi: 10.1029/TR037i005p00602

Hemida, H. (2008). OpenFOAM tutorial: Free surface tutorial using interFoam and rasInterFoam. *Chalmers University of Technology, Gothenburg*. Erişim adresi: http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2007/

Hunt, B., Stevens, S. ve Mayes, D. (2002). Permeable pavement use and research at two sites in eastern North Carolina. *Global Solution for Urban Drainage*, 1-10. doi: 10.1061/40644(2002)39

James, W. (2004). Clogging of permeable concrete block pavement by Street particulates and rain. *Journal of Water Management Modeling*, R220-29, 603-626. doi: 10.14796/JWMM.R220-29

James, W. ve Von Langsdorff, H. (2003, Ekim). *The use of permeableconcrete block pavement in controlling environmental stressors in urban areas*. The 7th International Conference on Concrete Block Paving, Sun City, South Africa. Erişim adresi: https://d3pcsg2wjq9izr.cloudfront.net/files/11067/articles/4871/027.pdf

James, W., James, W. R. C. ve Von Langsdorff, H. (2003, Ekim). *Computer aided design of permeable concrete block pavement for reducing stressors and contaminants in an urban environment.* The 7th International Conference on Concrete Block paving, Sun City, South Africa. Erişim adresi: http://www.sept.org/techpapers/1055.pdf

Kamali, M., Delkash, M. ve Tajrishy, M. (2017). Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. *Journal of Environmental Management, 187*, 43-53. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.11.027

Kia, A., Wong, H. S. ve Cheeseman, C. R. (2017a). Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management, 193*, 221-233. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.02.018

Kia, A., Wong, H. S. ve Cheeseman, C. R. (2017b, Eylül). *Clogging potential of permeable concrete*. The 37th Cement and Concrete Science Conference, University College London, UK. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Hong-S-Wong/publication/319526311

Kia, A., Wong, H. S. ve Cheeseman, C. R. (2018). Defining clogging potential for permeable concrete. *Journal of Environmental Management, 220*, 44-53. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.05.016

Kim, Y. J., Gaddafi, A. ve Yoshitake, I. (2016). Permeable concrete mixed with various admixtures. *Materials and Design, 100*(15): 110-119. doi: 10.1016/j.matdes.2016.03.109

Park, C. W., Park, J., Kim, N. ve Kim, Y. (2018). Modeling water flow on Façade. *Automation in Construction, 93,* 265-279. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.021

Korkmaz, S. ve Ghaznawi, N. A. (2019). Numerical and experimental modeling of flow ower a broad-crested weir. *Sakarya University Journal of Science, 23*(2): 252-258. doi: 10.16984/saufenbilder.423705

Kumar, K., Kozak, J., Hundal, L., Cox, A., Zhang, H. ve Granato, T. (2016). Insitu infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot - A four year study. *Journal of Environmental Management, 167,* 8-14. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.11.019

Leipard, A. R., Kevern, J. T. ve Richardson, J. R. (2015). Hydraulic characterization and design of permeable interlocking concrete pavement. World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems. doi: 10.1061/9780784479162.028

Lian, C. ve Zhuge, Y. (2009, Eylül). *Investigation the effect of aggregate on the performance of permeable concrete*. The 5th International Structural Engineering and Construction Conference, Las Vegas, NV. Erişim adresi: https://core.ac.uk/download/pdf/11039283.pdf

Lian, C. ve Zhuge, Y. (2010). Optimum mix design of enhanced permeable concrete - An experimental investigation. *Construction and Building Materials, 24*(12): 2664-2671. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057

Lian, C., Zhuge, Y. ve Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials, 25*(11): 4294-4298. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005

Lucke, T. ve Beecham, S. (2011). Field investigation of clogging in a permeable pavement system. *Building Research and Information, 39*(6): 603-615. doi: 10.1080/09613218.2011.602182

Lucke, T. ve Beecham, S. (2013). *An investigation into the differences in infiltration capacity between porous and permeable concrete pavers installed on sloping sub-catchments*. International Conference NOVATECH 2013: Planning and technologies for sustainable urban water management, Novatech Graire, France. Erişim adresi: http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/51394/1B1P15-242LUC.pdf?sequence=1

Mohammed, B. S., Nuruddin, M. F. ve Dayalan, Y. (2013, Nisan). High permeable concrete incorporating pozzolanic materials- An experimental investigation. *2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC)*, 657-661. doi: 10.1109/BEIAC.2013.6560212

Nichols, P. W. B., Lucke, T. ve Dierkes, C. (2014). Comparing two methods of determining infiltration rates of permeable interlocking concrete pavers. *Water*, *6*(8): 2353-2366. doi: 10.3390/w6082353

Nowak, R. (2016). Estimation of viscous and inertial resistance coefficients for various heat sink configurations. *Procedia Engineering*, *157*, 122-130. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.347

Obla, K. H. (2007). Pervious Concrete for Sustainable Development. *Recent advances in concrete technology* (s. 151-174). Washington, DC.

Okafor, C. V. (2018). Comparing the AIJ Guideline to COST for practical application of CFD to wind environment around single buildings. *International Journal of Scientific Engineering and Science*, *2*(6): 31-34. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Okafor-Vincent/publication/328723469

Okafor, C. V., Ogunoh, E. P., Ezeokonkwo, U. J. ve Obodoh, D. A. (2018). Atmospheric boundary layer simulation using wall function approach in OpenFoam CFD software. *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science*, *3*(2), 1-6. doi: 10.24018/ejers.2018.3.2.597

Ortega-Villar, R., Lizarraga-Mendiola, L., Coronel-Olivares, C., Lopez-Leon, L. D., Bigurra-Alzati, C. A. ve Vazquez-Rodriguez, G. A. (2019). Effect of photocatalytic

Fe_2O_3 nanoparticles on urban runoff pollutant removal by permeable concrete. *Journal of Environmental Management, 242*, 487-495. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.04.104

Özcan, M. (2020). Curve fitting approach. *SimScale Documentation*. Erişim adresi: https://www.simscale.com/knowledge-base/predict-darcy-and-forchheimer-coefficients-for-perforated-plates-using-experimental-data/

Öztürk, M. (2017). Su geçiren beton ve asfaltlar. *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*. Erişim adresi: http://www.cevresehirkutuphanesi.com/assets/files/slider_pdf/248HQ7HaxmKA.pdf

Park, S. B., Lee, B. J., Lee, J. ve Jang, Y. I. (2010). A study on the seawater purification characteristics of water-permeable concrete using recycled aggregate. *Resources, Conservation and Recycling, 54*(10): 658-665. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.11.006

Rey-Martinez, J., McGarvie, L. ve Perez-Fernandez, N. (2017). Computing simulated endolymphatic flow thermodynamics during the caloric test using normal and hydropic duct models. *Acta Oto-Laryngologica, 137*(3): 270-274. doi: 10.1080/00016489.2016.1242775

Rojas-Sola, J. I., Garcia-Baena, C. ve Hermoso-Orzaez, M. J. (2016). A review of the computational fluid dynamics simulation software: Advantages, disadvantages and main applications. *Journal of Magnetohydrodynamics, Plasma and Space Research, 23*(4): 417-424. Erişim adresi: https://search.proquest.com/docview/2049661073/abstract/254F387BBB0146FDPQ/1?accountid=17219

Sansalone, J., Kuang, X., Ying, G. ve Ranieri, V. (2012). Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage. *Water research, 46*(20): 6763-6774. doi: 10.1016/j.watres.2011.10.018

Scholz, M. ve Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment, 42*(11): 3830-3836. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.016

Shaban M., Mielgo, J., Shahid, L. ve Buss, E. (2018, Nisan). *Study of the Air Flow Dynamics through Four Quadrants Wind Catchers*. The 2nd International Conference on Basic Science and Environmental Applications, Fayoum, Egypt. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Maged_Shaban/publication/324809200

Topçu, Ö. B., Felekoğlu, B. ve Çaylak, B. (2018). Agrega kökeni, agrega/çimento oranı ve ince malzemeli agrega kullanımının geçirimli betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi üzerine bir çalışma. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12*(1): 225-234. doi: 10.18185/erzifbed.442592

Wang, J., Meng, Q., Tan, K., Zhang, L. ve Zhang, Y. (2018). Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment. *Building and Environment, 140,* 184-193. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.05.033

Wendt, J. F. (Ed.). (2009). *Computational fluid dynamics*. Berlin: Springer.

Wu, H., Sun, B., Liu, Z. ve Yin, J. (2017). Laboratory-simulated investigation on thermal behaviours of permeable concrete pavements. *Road Materials and Pavement Design, 18*(S3): 97-108. doi: 10.1080/14680629.2017.1329865

Xie, N., Akin, M. ve Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production, 210*, 1605-1621. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.134

Yazıcı, Ş. ve Mardani-Aghabaglou, A. (2017). Effect of agregate grain size distribution on properties of permeable concrete. *Journal of Fundamental and Applied Sciences, 9*(1): 323-338. doi: 10.4314/jfas.v9i1.20