

T.C.  
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**DENEYSSEL BİR YEŞİL TERAS ÇATIYI SİMÜLE EDEN LİZİMETRENİN  
HİDROLOJİK TEPKİLERİNİN HYDRUS-1D İLE MODELLENMESİ**

**Murat SÜR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
Doç. Dr. Deniz YILMAZ**

**TUNCELİ – 2023**

T.C.  
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DENEYSEL BİR YEŞİL TERAS ÇATIYI SİMÜLE EDEN LİZİMETRENİN  
HİDROLOJİK TEPKİLERİNİN HYDRUS-1D İLE MODELLENMESİ

Murat SÜR  
(200150033)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN  
Doç. Dr. Deniz YILMAZ

TUNCELİ- 2023

**T.C.**  
**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DENEYSSEL BİR YEŞİL TERAS ÇATIYI SİMÜLE EDEN LİZİMETRENİN**  
**HİDROLOJİK TEPKİLERİNİN HYDRUS-1D İLE MODELLENMESİ**

**Murat SÜR**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 09/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

**İmza:.....**

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa  
TUNÇ (Fırat Üniversitesi)

**BAŞKAN**

**İmza:... ..**

Doç. Dr. DENİZ YILMAZ  
(Munzur Üniversitesi)

**DANIŞMAN**

**İmza:.....**

Dr. Öğr. Üyesi Hilal  
ARSLANOĞLU IŞIK  
(Munzur Üniversitesi)

**ÜYE**

Bu tez, Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Enstitü Müdürü

**NOT:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı "Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu"ndaki hükümlere tabidir.

09/ 06/ 2023

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza  
Murat SÜR

Danışman  
Doç. Dr. Deniz YILMAZ

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimim ve tez çalışmamın başından sonuna kadar yardımını esirgemeyen ve çevreye duyarlı bir konu seçmem konusunda beni yönlendiren çok değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Deniz Yılmaz'a, başta Munzur Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü olmak üzere bütün Üniversite personeline ayrıca bana hep destek olan Aileme, tez aşamasında yardımını gördüğüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

**Murat SÜR**  
**TUNCELİ-2023**



## İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	I
TEŞEKKÜR .....	II
İÇİNDEKİLER .....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	IV
TABLOLAR LİSTESİ .....	V
RESİMLER LİSTESİ .....	VI
SEMBOLLER LİSTESİ .....	VII
KISALTMALAR LİSTESİ .....	VIII
ÖZET .....	IX
ABSTRACT .....	X
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Yeşil Teras Çatılar .....	3
1.1.1. Yoğun yeşil teras çatılar .....	4
1.1.1. Seyrek yeşil teras çatılar .....	4
1.1.3. Yeşil teras çatıların faydaları .....	5
1.2. Araştırmanın Konusu .....	6
1.3. Araştırmanın Amacı .....	6
1.4. Araştırmanın Yöntemi .....	6
1.5. Araştırmanın Önemi .....	7
<b>2. MATERYAL VE METOT</b> .....	<b>8</b>
2.1. Zemin Genel Tanıtımı .....	8
2.1.1. USDA tekstür sınıflandırması .....	9
2.1.2. Zemin ile ilgili önemli ilişkiler .....	11
2.1.2.1. Su, katı ve gaz fazları .....	11
2.1.2.2. Zemin parametreleri .....	12
2.1.2.3. Kapiler basınç .....	13
2.1.2.4. Emme basıncı .....	14
2.2. Doygun Zeminlerde Akış .....	14
2.2.1. Darcy Kanunu .....	14
2.2.2. Süreklilik ve Laplace Denklemi .....	16
2.3. Doygun Olmayan Zeminlerde Akış: Richards Denklemi .....	17
2.4. Doygun Olmayan Zeminlerde Çift Permeabiliteli Akış .....	17
2.5. Zemin Hidrolik Fonksiyonları .....	18
2.5.1. Su emme karakteristik eğrisi .....	19
2.5.2. Hidrolik iletkenlik eğrisi .....	20
2.6. İnfiltrasyon Deneylerinden Zemin Fonksiyonları Belirlemek .....	20
2.7. Hydrus-1D (H1D) ile Modelleme .....	20
2.8. Buharlaşma ve Terleme .....	21
2.9. Hidrolik Modelleme .....	24
2.9.1. Tek permeabilite yaklaşım ile modelleme .....	24
2.9.2. Dual (Çift) permeabilite yaklaşımı ile modelleme .....	25
2.10. Deneysel Lizimetre .....	26
2.10.1. Deneysel lizimetre boyutları .....	26
2.10.2. Yetiştirme katmanı .....	28
2.10.3. <i>Sedum album</i> .....	30

2.10.4. Ölçüm aletleri .....	31
2.10.4.1. Meteoroloji istasyonu .....	31
2.10.4.2. Yetiştirme katmanındaki su muhtevası ölçümü .....	32
2.10.4.3. Lizimetreden debi ölçümü .....	32
2.10.4.4. Veri toplama (data logger) .....	33
2.11. Araştırılan Periyot ve Kayıt Edilen Veriler .....	34
2.12. Hydrus-1D Yazılımı ile Hidrolik Tepkilerin Simülasyonu .....	34
2.13. Meteorolojik Veriler .....	36
2.13.1. Basınç .....	36
2.13.2. Sıcaklık .....	36
2.13.3. Yağmur .....	37
2.14. Ölçülen Hidrolojik Tepkiler.....	38
2.14.1. TDR ölçümler .....	38
2.14.2. Hidrolojik tepkiler: kümülatif debi ve anlık debi (runoff) .....	39
2.15. Hydrus-1D Direk Simülasyonu .....	40
2.15.1. Sonlu eleman konfigürasyonu .....	40
2.15.2. Başlangıç koşulu .....	41
2.15.3. Zemin karakteristik parametreleri .....	42
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>50</b>
3.1. Tek Permeabilite Akış Modelinin Simülasyon Sonuçları .....	50
3.2. Çift Permeabilite Akış Modelinin Simülasyon Sonuçları .....	51
<b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>57</b>
<b>5. KAYNAKLAR .....</b>	<b>60</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	
<b>EKLER</b>	

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yerleşim yerlerinde ısı adası oluşumu .....	1
Şekil 1.2. Yoğun (intensif) yeşil çatı uygulanan binalarla ilgili görseller .....	4
Şekil 1.3. Seyrek (ekstensif) yeşil çatı uygulanan binalarla ilgili görseller .....	5
Şekil 2.1. Usda üçgen sınıflandırma diyagramı .....	10
Şekil 2.2. Zeminlerin su içeriğine göre fazları .....	11
Şekil 2.3. Borularda kapilarite olayının şematik gösterimi .....	14
Şekil 2.4. Darcy tarafından hazırlanan deney düzeneği .....	15
Şekil 2.5. İki akış bölgesi arasındaki su akışı görselleri .....	18
Şekil 2.6. Örnek su emme eğrisi.....	19
Şekil 2.7. Dünya üzerinde gerçekleşen su döngüsü diyagramı .....	22
Şekil 2.8. Hydrus-1D tek permeabilite yaklaşımında van Genuchten-Mualem modeli .....	24
Şekil 2.9. Hydrus-1D çift permeabilite yaklaşımında Gerke ve van Genuchten modeli .....	25
Şekil 2.10. Örnek bir lizimetre düzeneği ve saha uygulaması .....	26
Şekil 2.11. Deneysel lizimetre boya uygulaması ve polistiren katman kaplanması .....	27
Şekil 2.12. Deneysel lizimetre pvc boru ve süzgeç tertibatı montajı .....	28
Şekil 2.13. Deneysel lizimetre üzerine yerleştirilmiş 12 cm lik yetiştirme katmanı .....	29
Şekil 2.14. Yetiştirme katmanı üzerine <i>Sedum album</i> bitkisinin yerleştirilmesi .....	30
Şekil 2.15. Verilerin elde edildiği meteorolojik istasyonun görünümü .....	31
Şekil 2.16. TDR CS616 campbell scientific ve lizimetredeki konumları .....	32
Şekil 2.17. Lizimetre altına yerleştirilmiş mekanik debi ölçer düzeneği .....	33
Şekil 2.18. Meteorolojik istasyondan alınan verileri depolayan CRX3000 datalog-ger Campbell scientific veri kayıt cihazı .....	34
Şekil 2.19. Atmosferik hava basıncının değişimi gösteren grafik .....	36
Şekil 2.20. Yetiştirme katmanı ve yüzey sıcaklıkları .....	37
Şekil 2.21. Meteorolojik istasyondan alınan yağış verileri .....	37
Şekil 2.22. Yetiştirme katmanında bulunan dört adet probun su muhtevası grafiği .....	38
Şekil 2.23. Kümülatif debi (üst) ve anlık debi (runoff) (alt) .....	39
Şekil 2.24. H1D sonlu eleman konfigürasyonu .....	40
Şekil 2.25. Başlangıç su muhteva profili .....	41
Şekil 2.26. Hydrus-1D yazılımı temel süreçler .....	42
Şekil 2.27. Hydrus-1D yazılımı yetiştirme katmanının geometrik bilgileri .....	43
Şekil 2.28. Hydrus-1D yazılımı zaman verileri ile ilgili bilgiler .....	44
Şekil 2.29. Hydrus-1D yazılımı yazıcı ile ilgili bilgiler .....	45
Şekil 2.30. Hydrus-1D yazılımı iterasyon (yineleme) kriterleri .....	45
Şekil 2.31. Hydrus-1D yazılımı yetiştirme katmanı hidrolik modeli .....	46
Şekil 2.32. Hydrus-1D yazılımı su akış parametreleri .....	43
Şekil 2.33. Hydrus-1D yazılımı su akışı sınır koşulları .....	48
Şekil 3.1. Tek permeabilite modeli 1. Veri setine göre anlık debi (sol) ve kümülatif debi (sağ) grafikleri .....	50
Şekil 3.2. Tek permeabilite modeli 2. verilere göre anlık debi (üst) ve kümülatif debi (alt) grafikleri.....	51
Şekil 3.3. 1. dual permeabilite verilerinin 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 su akış fraksiyonları sonucu oluşan kümülatif (üst) ve anlık(alt) debi karşılaştırmaları.....	52
Şekil 3.4. 2. dual permeabilite verilerinin 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 su akış fraksiyonları sonucu oluşan kümülatif (üst) ve anlık(alt) debi karşılaştırmaları.....	53,54

**Şekil 3.5.** 1. ve 2. dual permeabilite verilerinin ortalamalarına göre 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 su akış fraksiyonları sonucu oluşan kümülatif (üst) ve anlık (alt) debi karşılaştırmaları.....55



## TABLULAR LİSTESİ

<b>Tablo 2.1.</b> Çeşitli standartlara göre zeminlerin sınıflandırılması .....	8
<b>Tablo 2.2.</b> ET hesaplanması için kullanılan <i>Sedum</i> yüzey dirençleri .....	23
<b>Tablo 2.3.</b> Yetiştirme katmanı malzeme dağılımı .....	29
<b>Tablo 2.4.</b> Tek (TK) ve Çift (DK) permeabilite modellemesinde kullanılan deneysel çatı verileri .....	35



## SEMBOLLER LİSTESİ

$h_1$	: 1. boru su yüksekliği
$h_2$	: 2. boru su yüksekliği
$T$	: 2 m yükseklikte ortalama hava sıcaklığı
$u_2$	: 2 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı
$r_a$	: Aerodinamik direnç
$q$	: Akış hızı
$LAI_{aktif}$	: Aktif yaprak hava indeksi
$R_n$	: Bitki yüzeyindeki net radyasyon
$\Delta$	: Buhar basıncı eğrisinin eğimi
$V_a$	: Hava (boşluk) hacmi
$Q$	: Debi
$A$	: Deney tüpü kesit alanı
$L$	: Deney tüpü zemin kütesinin uzunluğu
$\rho_n$	: Doğal yoğunluk
$S_d$	: Doygunluk derecesi
$\theta_s$	: Doygun haldeki hacimsel su içeriği
$e_s$	: Doymuş buhar basıncı
$e_s - e_a$	: Doymuş buhar basıncı açığı
$h$	: Emme basıncı
$h_g$	: Emme basıncı eğrisinde bükülme noktası
$^{\circ}F$	: Fahrenheit
$n$	: Gözenek boyutu dağılım indeksi
$\theta$	: Hacimsel su içeriği
$V_h$	: Hava hacmi
$M_a$	: Hava (boşluk kütle)
$q_f$	: Hızlı akış bölgesindeki su içeriği
$i$	: Hidrolik eğim
$k$	: Hidrolik iletkenlik
$\theta_r$	: İndirgenemez (rezidüel) su içeriği
$h$	: Kapiler basınç su yüksekliği
$V_s$	: Katı hacmi
$kPa$	: Kilo pascal
$V_s$	: Katı hacim
$M_s$	: Katı kütle
$r_s$	: Kütle yüzey direnci
$\omega$	: Kütleli su içeriği
$q_m$	: Matris bölgesindeki su içeriği
$e_a$	: Mevcut buhar basıncı
$\rho$	: Özgül kütle
$\gamma$	: Psikometrik sabit
$ET_o$	: Referans evapotranspirasyon
$\rho_n$	: Sahadaki yoğunluk
$^{\circ}C$	: Santigrat derece
$M_w$	: Sıvı kütle
$r_o$	: Sıvının yoğunluğu
$V_w$	: Su hacmi

$\rho_w$	: Suyun yoğunluğu
$\Delta h$	: Su yükseklik farkı
$V$	: Suyun akış hızı
$\alpha$	: Temas açısı (su ve tane yüzeyi arası)
$H$	: Toplam hidrolik yük
$M_t$	: Toplam kütle
$V_t$	: Toplam zemin hacim
$r$	: Tüpün yarıçapı
$g$	: Yer çekimi ivmesi
$z$	: Yerçekimi kotu
$w$	: Yüzey akış fraksiyon parametresi
$\gamma$	: Yüzey sıvı gerilimi
$\Psi$	: Zemin emmesi
$W_K$	: Zemin hacminde bulunan katı danelerin ağırlığı
$W_w$	: Zemin hacminde bulunan suyun ağırlığı
$K$	: Zemin hidrolik iletkenlik
$G$	: Zemin ısı değişim yoğunluğu

## KISALTMALAR LİSTESİ

USGS	: Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu
USDA	: Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı
BEST	: Beerkan Estimation Soil Transfer (Beerkan Tahmini Toprak Transferi)
FAO	: Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
BS	: Britanya Standartları
DK	: Çift permeabilite modeli
MTDI	: Çoklu Gerilim Diski İnfiltrometresi
ET	: Evapotranspirasyon
ANR	: Fransa Ulusal Araştırma Enstitüsü
CSTB	: Fransa Yapı Bilim Merkezi
Hydrus-1D	: Hydrus Bir Boyutlu
Hydrus-2D	: Hydrus İki Boyutlu
Hydrus-2D/3D	: Hydrus İki ve Üç boyutlu
M.Ö.	: Milattan Önce
PM	: Penman- Montheit
Ref	: Referans
h	: Saat
TS	: Türk Standartları
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
vb.	: Ve benzeri
TDR	: Time Domain Reflectometry (Zaman Alanlı Reflektometre)
vd.	: Ve diğerleri
VegDUD	: Sürdürülebilir kentsel gelişimde bitkilerin rolü: klimatoloji, hidroloji, enerji yönetimi ve atmosfer ile ilgili konulara dayalı bir yaklaşım
t	: Zaman

## ÖZET

Bu yüksek lisans tezinde, Fransa'nın Ulusal Araştırma Enstitüsü (ANR) tarafından finanse edilen "VegDUD" (Sürdürülebilir kentsel gelişimde bitkilerin rolü: klimatoloji, hidroloji, enerji yönetimi ve atmosfer ile ilgili konulara dayalı bir yaklaşım) araştırma programı kapsamında ve Fransa'nın Yapı Bilim Merkezinde (CSTB, Nantes) inşa edilen çeşitli seyrek tip yeşil teras çatı konfigürasyonunu simüle eden deneysel lizimetre verileri kullanılmıştır. Bu deneysel yeşil teras çatı sistemleri tabii tutulduğu Nantes kentinin (Fransa) atmosferik hava koşullarındaki yağmur epizotlarına karşı hidrolojik tepkileri ölçülmüştür. Bu tezin amacı, 12 cm suni toprak katmanı olan ve üzerinde "*Sedum album*" bitki örtüsü olan, lizimetrenin hidrolojik tepkilerini 1 boyutlu Richards Denklemi sonlu eleman tekniği ile çözümleyerek, hidrolojik tepkilerini modellemektir. Bunun için Richards Denklemi sayısal ortamda sonlu elemanlar metodu ile çözülebilen ve ücretsiz lisans kullanımı olan Hydrus-1D yazılımı kullanılmıştır.

Tez çalışmasında 12 cm katmanı olan ve üzerinde "*Sedum album*" bitki örtüsü olan ve 2011 yaz aylarında kaydedilen veriler: anlık yağmur suyu miktarı, sistemden süzülen su debisi, meteorolojik istasyon ölçümleri ve katmanın içindeki su muhtevasını ölçen zaman alanlı reflektometre (TDR) sensör verileri kullanılmıştır. Problemin üst sınır koşulu olan potansiyel terleme ve buharlaşma (Potential Evapo-transpiration) için Penman- Montheith modeli kullanılarak problem çözümlenmiştir. Yetiştirme katmanının hidrolojik fonksiyonları olan su tutma eğrisi ve iletkenlik fonksiyonları için van Genuchten-Mualem (vGM) modeli tercih edilmiştir. Bu fonksiyonların parametreleri ise, VegDUD programı kapsamında yürütülen infiltrasyon deneylerin ve literatürde ters yöntem ile elde edilen zemin hidrolik parametreleri kullanılmıştır. Yetiştirme katmanı ilk aşamada sade (homojen) bir akış modeli (tek permeabilite) izlenerek simüle edilmeye çalışılmıştır. Ancak lizimetreten süzülen su miktarının gerçek ve modellenen su miktarı arasında ciddi farklar olduğu gözlemlendi. Özellikle, sistemden çıkan yağmur suyu miktarın gerçekten çok daha düşük olduğu gözlemlendi. Bu nedenle, ikinci bir aşamada, çift akışlı bir model tercih edilmiştir (çift permeabilite). Bu durumda, modellenen "runoff" debisi, gerçeğe daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ancak çift-permeabilite modelin daha çok parametre gerektiğinden, bu parametrelerin tespiti için kullanılan infiltrasyon verilerin çoğaltılması ve zemin hidrolik parametrelerin tayini için ters yöntem metotlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, tercih edilen 1D boyutlu yaklaşım 3 boyutlu sistemin davranışı temsiliyetinde yetersiz kalabilir, özellikle hafif olan eğimin etkisi konfigüre edilememiştir.

Sonuç olarak, yeşil çatı sistemlerin hidrolojik davranışlarını modellemek için homojen (tek permeabilite) modelin pek uygun olmadığı görüldü. Bunun yerine çift permeabilite modelin daha uygun olduğunu görüldü. Araştırma perspektifi olarak çift permeabilite modelin zemin hidrolik parametrelerin daha doğru tayin edilmesi için daha fazla infiltrasyon deneyleri ve geliştirilmiş BEST-2K yöntemi kullanarak tayin edilmesi ve akışın 3 boyutlu bir ortamda modellenmesi öngörülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Çift permeabilite model, evapotranspirasyon, Hydrus-1D, Richards Denklemi, yeşil çatı

## ABSTRACT

### **Modeling the hydrological response of a lysimeter simulating an experimental green terrace roof with Hydrus-1D**

In this master's thesis, experimental lysimeter data were used to simulate various configurations of extensive green terrace roofs constructed at the Centre for Building Science of France (CSTB, Nantes) under the research program "VegDUD" (The role of vegetation in sustainable urban development: an approach based on climatology, hydrology, energy management and atmospheric issues) funded by the National Research Institute of France (ANR). These experimental green terrace roof systems were subjected to atmospheric weather conditions of the city of Nantes (France), where their hydrological response to rainfall episodes was measured. The aim of this thesis is to model the hydrological response of the lysimeter with 12 cm growing soil layer and "*Sedum album*" vegetation by solving the 1-dimensional Richards Equation with the finite element technique. For this purpose, Hydrus 1D software, which can solve the Richards Equation by finite element method in a numerical environment and is available for free license use, was used.

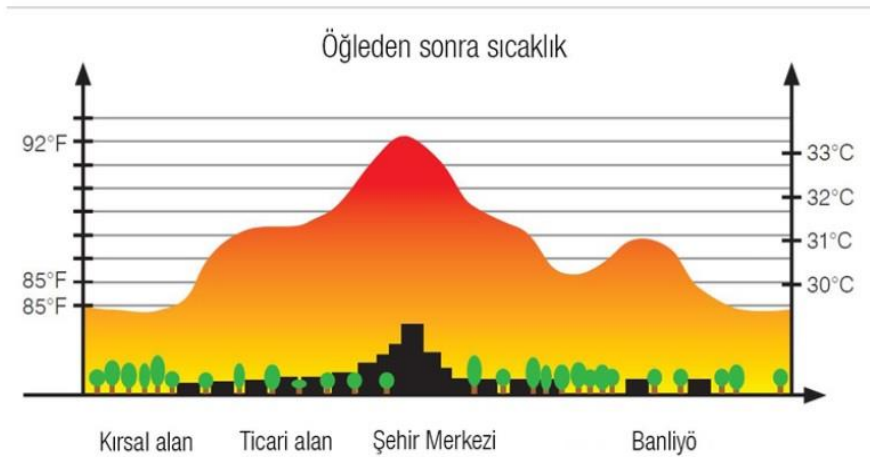
In the thesis study, the data recorded in the summer of 2011 in a 12 cm layer with "*Sedum album*" vegetation on it: instantaneous rainwater amount, water flow rate percolating through the system, meteorological station measurements and TDR sensor data measuring the water content inside the layer were used. The problem was solved using the Penman-Montheith model for potential evapo-transpiration, which is the upper boundary condition of the problem. The van Genuchten-Mualem (vGM) model was preferred for the water retention curve and water hydraulic conductivity functions, which are the hydraulic characteristic functions of the growing layer. For estimation of the parameters of these functions, the soil hydraulic parameters were obtained by using inverse method of infiltration experiments conducted within the scope of VegDUD program. In the first stage, the growing layer was tried to be simulated by following a simple (homogeneous) flow model (single permeability). However, it was observed that there was a significant difference between the actual and modeled amount of runoff water through the lysimeter. In particular, it was observed that the amount of rainwater leaving the system was actually very low. Therefore, in a second stage, a double flow model (double permeability) was chosen. In this case, the modeled "runoff" flow rate was observed to be closer to reality. However, since the double-permeability model requires more parameters, it is necessary to increase the replicability of the infiltration data used for the determination of these parameters and to develop inverse method methods for the determination of soil hydraulic parameters. Furthermore, the preferred 1D dimensional approach may be insufficient to represent the behavior of the 3D system, especially the effect of the slight slope could not be configured.

As a result, it was seen that the homogeneous (single permeability) model is not well suitable for modeling the hydrological behavior of green roof systems. Instead, a double permeability model was found to be more appropriate. As a research perspective, it is envisaged that the double permeability model will be validated using more infiltration experiments and improved BEST-2K method to more accurately determine the soil hydraulic parameters and model the flow in a 3D environment.

**Key words:** Double permeability model, evapotranspiration, Hydrus-1D, Richards Equation, green roof,

## 1. GİRİŞ

Kırsal alanlardan kentlere göçlerin artmasıyla, nüfusun barındırma ve buna bağlı ekonomik faaliyetlerinden dolayı kentler sürekli büyümektedir (Yılmaz, 2016). Bu nedenle yakınındaki doğal ortamlara yayılarak büyüyen kentsel alanlar bitkisel toprak alanları (yeşil alanlar, parklar, şehir bahçeleri vb.) yapılaşma ile inşaat malzemeleri gibi (beton, çatı malzemeleri, yol malzemeleri, taş duvarlar vb.) güneş ışığını emen malzemelerle kaplanmıştır. Yeşil alanların kentsel ortamlarda azalması sonucu bazı çevresel, iklimsel ve insan konforu açısından sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu sorunların en önemlilerinden biri kentsel ısı adası dediğimiz sorundur. Bu sorun kentsel alanların çevresindeki kırsal (bitkisel, yeşil) alanlara göre ısıyı daha fazla emerek sıcaklık değerlerinin yükselmesi sorunudur. Gündüz kentsel alanlar kırsal alanlara göre güneş ışınlarını daha fazla emer ve emdiği güneş ışınları ısıya dönüştürerek atmosfere salar. Salınan ısı kentsel alanlardaki hava sıcaklığının gün boyunca artmasına neden olur. Kırsal alanlarda ise buharlaşma daha fazla olacağı için enerji kaybı oluşturur ve oluşan bu enerji kaybı havanı soğumasını sağlamaktadır. Bu nedenle kırsal alanlardaki özellikle gece sıcaklığı yanındaki kentsel alanlardaki sıcaklığa göre 4°C'ye kadar daha düşük seyretmektedir. Bitkisel alanların bulunduğu bölgelerin sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasında negatif, geçirimsizlik indeksi yüksek olan buharlaşmanın daha az olduğu kentsel alanların sıcaklığı arasında pozitif bir doğrusal ilişki olduğu ortaya çıkmıştır (Gerçek ve Türkmenoğlu, 2014). Şekil 1.1'de kentsel ve kırsal alanlardaki sıcaklık değişimleri görülmektedir.



Şekil 1.1. Yerleşim yerlerinde ısı adası oluşumu (URL-1, 2023)

Kırsal alanlardaki sıcaklık 29°C civarında iken kentsel alanlara göre daha az, kırsal alanlara göre ise daha fazla yapılaşma bulunan banliyö alanlarında sıcaklık 31°C civarındadır. En yüksek sıcaklığın ise yaklaşık 33°C yapılaşmanın en fazla olduğu kentsel alanlarda olduğu görülmektedir. Bu durum kentsel ısı adası sorununu net bir şekilde kanıtlamaktadır.

Bir diğer sorun ise kentsel alanlardaki su geçirimsizliğin azalması ve geçirimsizlik indeksinin yüksek olmasıdır. İnşaat malzemeleri ile kaplı olan şehirlerin permeabiliteyi yok denilecek kadar az olduğundan, kentsel alanlara gelen yağmurlar sürüklenerek yağmur suyunu toprağa sızdırmamaktadır ve suyun doğal döngüsünü bozmaktadır. Kentsel alanlara gelen yağmurlar, yağmur suyu ve pis su şebekelerine yönlendirilmektedir. Bu şebekelerde su yükü fazla olduğu zaman yağmur sularının sellere, taşkınlarla dönüşmesi ve altyapı ile üstyapıya zarar vermesi söz konusu olmaktadır. İstanbul, İzmir ve Ankara'nın yanı sıra, ülkemizdeki birçok şehir bu problemleri yaşamaktadır. Örnek olarak, 3 Aralık 2001 tarihinde Mersin'de meydana gelen sel olaylarında çarpık kentleşmenin yanında çok yoğun kentsel yapılaşmadan dolayı geçirimsiz yüzeylerin fazla olması ve kırsal alanların tahrip edilmesi selin nedenleri olarak gösterilmiştir (Karabulut vd., 2007). Sönmez ve Kesici (2012) 'ye göre Kilis şehrinde meydana gelen sel olaylarının nedenleri arasında ise doğal drenaj alanı olan kırsal alanlarının yapılaşması olarak gösterilmiştir. Ayrıca Kilis'te meydana gelen sel kaynaklı hasarın miktarının kentsel alanlarla orantılı olarak arttığı da belirtilmiştir (Sönmez ve Kesici, 2012). Özçelik ve Benli (2020)'ye göre ise süresi uzun olmasa da sağanak yağışların, geçirimsizlik indeksinin yüksek olduğu alanlarda taşkınlarla dönüşmesi büyük bir sorundur. Son olarak ta 15 Mart 2023 tarihinde Adıyaman ve Şanlıurfa'da meydana gelen ve yirmi bir kişinin hayatını kaybettiği selde hasarın bu kadar fazla olmasında bahsedilen nedenlerle benzer etkenlerin etkili olduğu söylenebilir. Sel felaketinin önüne geçilebilmesi veya selin etkisinin minimuma indirilerek sorunların çözülebilmesi için ani debi piklerinin düşürülerek kentsel alanlara zarar vermeyecek şekilde kontrollü olarak drene edilmesi gerekmektedir. Yeşil çatıların üzerlerine gelen yağışın %40 ile %80 arasındaki kısmını tutabildiği belirtilmiştir (Ekşi ve Uzun, 2016). Bu noktada yeşil çatılar kentsel alanlardaki geçirimsiz yüzeylerin artırılarak yüzey akışının azaltılmasında, sel ve taşkınların önlenmesinde büyük önem arz etmektedir.

Bahsedilen her iki soruna da çözüm olabilmesi bağlamında bina vb. yapılarda kullanılabilecek olan yeşil teras çatılar büyük önem arz etmektedir. Bu noktada yeşil teras çatı bir diğer adıyla bitkilendirilmiş çatının pozitif etkisi dünya genelinde birçok çalışmada vurgulanmıştır (Soulis vd., 2017; Yılmaz vd., 2016; Bouzouidja vd., 2017).

## 1.1. Yeşil Teras Çatılar

Çatılar pek çok etkene göre sınıflandırılabilir: kullanım amaçlarına göre, kaplama malzemesine göre, yağış sularını uzaklaştırma şekillerine göre, kullanım amacına göre, eğimlerine göre sınıflandırma bunlardan birkaçıdır. Bununla birlikte bu sistemlerin birleştirilmesi ile oluşan çatılar da mevcuttur. Yeşil teras (düz) çatı da bu birleştirme ile oluşan çatı sistemlerinden biridir. Teras yani düz çatı eğimine ya da formuna göre sınıflandırmanın, yeşil çatı ise kaplama malzemesine göre sınıflandırmanın parçalarıdır. Teras çatılar ekseriyetle kurak iklimin etkili olduğu bölgelerde tercih edilir. Türkiye’de bu yerler Güney Doğu Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi’dir. Yeşil çatılar için böyle bir sınırlama olmayıp her türlü iklim bölgesinde kullanıma uygundur.

Bilinen ilk yeşil çatı uygulamaları yaklaşık olarak M.Ö. 4000 yıllardan itibaren Sümerler ve civarlarındaki Orta Doğu halklarının inşa ettikleri ziggurat adlı tapınaklarda görülmüştür (Küleççi, 2017). Ayrıca yeşil çatılar İzlanda, Norveç, İsveç, Danimarka gibi İskandinav ülkelerinde soğuk hava şartlarından korunmak için yüzyıllardır kullanılmaktadır. Modern yeşil çatı uygulamaları ise 20. Yüzyılın başlarında Fransız Mimar Le Corbusier (Charles-Édouard Jeanneret) tarafından sistemli hale getirilmiştir. Avrupa’nın genelinde ise 1970’li yıllardan itibaren Almanya öncülüğünde gelişme göstermeye başlamıştır. Türkiye’de mevzuat ve diğer düzenlemelerle teşvik edici politikalar olmadığı için yeşil çatılarla ilgili bilimsel uygulamaların ve bilimsel çalışmaların sayısı gelişmiş ülkelerin gerisinde kalmıştır. Bu geri kalmanın nedeni olarak Türkiye’de yeşil çatı sistemlerinin doğrudan ve dolaylı faydalarının tam olarak bilinmemesi gösterilebilir (Aras, 2019). Bir diğer neden ise Avrupa ve Amerika’da yeşil çatılarla ilgili kanuni zorunluluk ve teşvik edici mevzuat bulunurken Türkiye’de böyle bir durum söz konusu değildir (Aras, 2019).

Yeşil çatılar genel olarak en üst katmandaki bitki türü ve toprak yüksekliğinin ile yapısına göre iki ana başlığa ayrılmıştır. Bunlardan biri yoğun (intensif) yeşil çatı bir diğeri ise seyrek (ekstensif) yeşil çatı sistemidir. Ayrıca son zamanlarda yeni bir uygulama olarak bu iki sistemin birlikte uygulanmasıyla oluşturulan yarı intensif sistemlerde ortaya çıkmıştır (Ekşi ve Uzun, 2016).

### 1.1.1. Yoğun yeşil teras çatı

Bu çatının ana özellikleri toprak katmanının 15 cm ile 150 cm arasında olması ve üzerinde ağaç, çalı ve çimen dahil birçok bitkinin yetişmesidir. Şekil 1.2’de teras çatılarda yoğun yeşil teras uygulamasına ait örnekler görülmektedir.



Şekil 1.2. Yoğun (intensif) yeşil çatı uygulanan binalarla ilgili görseller (URL-2, 2023 ve URL-3, 2023)

Yoğun yeşil çatı bina statğine 300-400 kg/m<sup>2</sup> yük bindirmektedir. Yoğun yeşil çatılara yürüyüş alanları ve araç yolları yapılabilir. Bu çatıların bakımı seyrek çatılara göre daha fazladır.

### 1.1.2. Seyrek yeşil teras çatı

Seyrek tip yeşil çatılarda toprak kalınlığı 2-15 cm arasındadır. Genelde *Sedum* türü bitkiler yetiştirilir. Bu tip çatılarda %1,5 civarındaki eğim drenajın sağlıklı çalışması için en uygun eğimdir (Solmaz, 2020). Şekil 1.3’te iki adet seyrek tip yeşil teras çatı uygulaması görülmektedir.



**Şekil 1.3.** Seyrek (ekstensif) yeşil çatı uygulanan binalarla ilgili görseller (URL-4, 2023 ve URL-5, 2023)

Seyrek tip yeşil teras çatı uygulaması fazla bakım gerektirmez. Üzerinde yürüyüş ve rekreasyon alanları yapmaya uygun değildir. Çatıya ortalama  $100 \text{ kg/m}^2$  yük bindirmektedir (Küleççi, 2017). Seyrek yeşil çatılar hem düz hem de eğimli yüzeylere rahatlıkla uygulanabilmektedir.

### 1.1.3. Yeşil teras çatıların faydaları

Yeşil çatıların ekonomik, ekolojik, sosyal ve sağlık gibi birçok alanda faydası bulunmaktadır:

*Ekolojik faydaları:* En büyük faydası kentsel ısı adası oluşumunu azaltır. Yağmur suyu yönetilmesini kolaylaştırarak sel ve taşkınların önlenmesinde yardımcı olur. Egzoz gazlarıyla havaya salınan partiküllerin tutulmasını sağlar.

*Ekonomik faydaları:* Isı yalıtımı sağlar bu klima kullanımı ve ısıtma ile soğutma giderlerini azaltır. Organik tarım alanları oluşturularak tarım ürünleri yetiştirilmesi sağlanabilir.

*Sosyal faydaları:* Rekreasyon alanları oluşturularak insanlara sosyal alanlar sunulur.

*Sağlık faydaları:* Hava kirliliğini ve havadaki partiküllerin salınımını engelleyerek insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri önler. Kentlerdeki hava kalitesini artırır.

## 1.2. Araştırmanın Konusu

Fransa'nın Ulusal Araştırma Enstitüsünün (ANR) finanse ettiği VegDUD araştırma programı kapsamında çeşitli seyrek tip yeşil teras çatı konfigürasyonunu simüle eden deneysel yedi adet lizimetre tasarlanmıştır. Bu lizimetreler Nantes (Fransa) kentinin atmosferik hava koşullarındaki yağmurlara karşı hidrolik tepkileri ölçülmüştür. Araştırmanın konusu bu lizimetrelerden biri olan, üzerinde 12 cm yetiştirme katmanına bulunan onunda üzerinde *Sedum album* bitki örtüsü bulunan lizimetreden elde edilmiş hidrolik tepkileri 1-boyutlu Richards Denklemi kullanarak modellemektir. Modelleme ile ulaşılan değerlerin gerçek verilerle karşılaştırması yapılmış bunun akabinde örtüşen ve örtüşmeyen verilerin sebepleri üzerinde durularak modellemenin kullanılabilirliği vurgulanmıştır.

## 1.2. Araştırmanın Amacı

Kentsel ısı adası sorunu ve kentsel yağmur suyu problemlerine karşı yeşil çatılar alternatif bir yaklaşımdır. Bunun içinde yeşil sistemlerin hidrolojik davranışlarını tespit etmek zorunludur. Tezin amacı, deneysel bir yeşil çatının bulunması zorunlu olan bu hidrolojik davranışlarını fiziki bir yaklaşım olan çift permeabilite akış modeli ile simülasyon yaparak gerçek değerlerle karşılaştırmaktır. Deneysel lizimetre ölçeğinde yapılan bu modelleme, kentsel havza ölçeğindeki modelleme çalışmaları ile yeşil çatı sistemlerinin kent çapındaki etkisi değerlendirilebilir.

## 1.3. Araştırmanın Yöntemi

Araştırmada doygun olmayan gözenekli ortamlardaki akışı temsil eden Richards Denklemi sayısal ortamda sonlu elemanlar metodu ile çözebilen ücretsiz Hydrus-1D yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Yetiştirme katmanı 12 cm olan, *Sedum album* bitkili lizimetrenin 2011 ve 2012 yılları yaz aylarındaki deneysel verilerini: anlık yağmur suyu, sistemden süzülen su, meteorolojik istasyon ölçümleri ve katmanın içindeki su muhtevasını ölçen time domain reflectometry (TDR) sensör verileri kullanılmıştır. Problemin üst sınır koşulu olarak potansiyel terleme ve buharlaşma (Potential Evapo-transpiration) için Penman- Montheith modeli kullanılmıştır.

#### 1.4. Araştırmanın Önemi

Yeşil çatı, kentsel ısı adası sorununun negatif etkisine karşı, yağmur suyu şebekelerin yükünün azalmasını ve kentlerin sürdürülebilirliği açısından biyo çeşitlilik katarak önemli bir rol alabilir. Kabuloğlu vd. (2023)'ne göre yeşil çatılar veya benzeri uygulamalar yağmur suyunun yönetilmesinde ve kentsel ısı adası sorununun çözümünde fayda sağlayan bir yöntemdir. Bu yüzden kent planlamasında karar verici konumda olan belediyeler, ilgili bakanlıklar ve diğer kurumların mevcut yapılarıdaki çatıların yeşil çatıya dönüştürülmesi veya yeni yapılarıdaki çatıların yeşil çatı olarak tasarlanmasını mevzuatlarına alması için ikna edici bilimsel çalışmaların ortaya konulması şarttır (Yılmaz, 2016). Yeşil çatı uygulamaları insanların fiziksel ve zihinsel sağlıklarına pozitif etki yapmakta, stresi azalmaktadır (WHO, 2016). Ayrıca yeşil çatılar, rekreasyon alanı olmasının yanında organik tarım ürünleri yetiştirilebilecek alanlar olarak kullanılarak daha verimli hale getirilebilirler (Özer ve Yetkin, 2023). Bu konuda somut çalışmalardan biri DeNardo ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan bir çalışmadır. Son yirmi sekiz yılın yağış verileri kullanılarak bir akış modellemesi yapılmış bunun sonucunda yeşil çatının yıllık yağış miktarının %45-55'si arasında yağış tuttuğunu gözlemlemişlerdir. Bu ve buna benzer yapılacak bilimsel çalışmalar neticesinde yeşil çatıların fiziki bir model ile hidrolojik tepkilerini tahmin etmek ve daha büyük ölçekte örneğin kent hidrolojisinin modelleyen bir model ile birleştirerek sel veya taşkın sorunu yaşayan kentlerin sorunlarının çözümünde yeşil teras çatının pozitif etkisi modellenebilecektir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Zemin Genel Tanıtım

Zemin, yer kabuğunu oluşturan kayaçların fiziksel veya kimyasal yollarla ayrışması sonucu oluşan ayırık daneli (taneli) doğal malzeme oluşumlarına denir. Zemin hem yük taşıyan bir kütle hem de yol, baraj, dolgu, set gibi toprak yapıların oluşturulmasına kullanılan başlıca malzemedir. Ayrıca zeminin tarım, jeoloji, madencilik, sanayi gibi alanlarda çok önemli yeri bulunmaktadır. Zeminin birçok alanda yer tutmasından dolayı değişen şartlara göre davranışlarının ve özelliklerinin tespit edilerek güvenli bir şekilde kullanılması gerektiği sonucunu doğurmuştur. Bu noktada zemin mekaniği ve geoteknik bilimleri ortaya çıkmıştır. Zemin mekaniği ile ilgili ilk modern kitap 1925 yılında Karl Von Terzaghi tarafından Eurbau Mechanic adıyla yayımlanmıştır (Özudođru K., 2010)

Zeminleri oluşturan dane çapları metrelerce büyüklükten gözle görülemeyecek kadar küçük boyutlarda olmak üzere çok geniş bir skaladadır. Bu nedenle mühendisler arasında ortak bir dil oluşması zeminlerle ilgili yapılan çalışmaların sistematik olması ve kolaylaşması için zeminlerin çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Tablo 2.1'de Türk standartlarına göre, Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu standartlarına (ASTM) göre ve İngiliz standartlarına göre zeminlerin sınıflandırılması belirtilmiştir.

**Tablo 2.1.** Çeşitli standartlara göre zeminlerin sınıflandırılması (Bozbeý, 2016)

Malzeme	TS	ASTM	BS
	mm	mm	mm
Taş, Blok	>60	>75	>60
Çakıl	60-2	75-4.75	60-2
Kum	2-0.075	4.75-0.075	2-0.06
Silt	0.075-0.002	0.075-0.002	0.06-0.002
Kil	<0.002	<0.002	<0.002

Türk ve Britanya standartları taş,blok ve çakıl zeminler için eşit dane büyüklük standartları için aynı değerleri kabul etmişken ASTM standartları taş,blok için 75 mm, çakıl için ise 75-

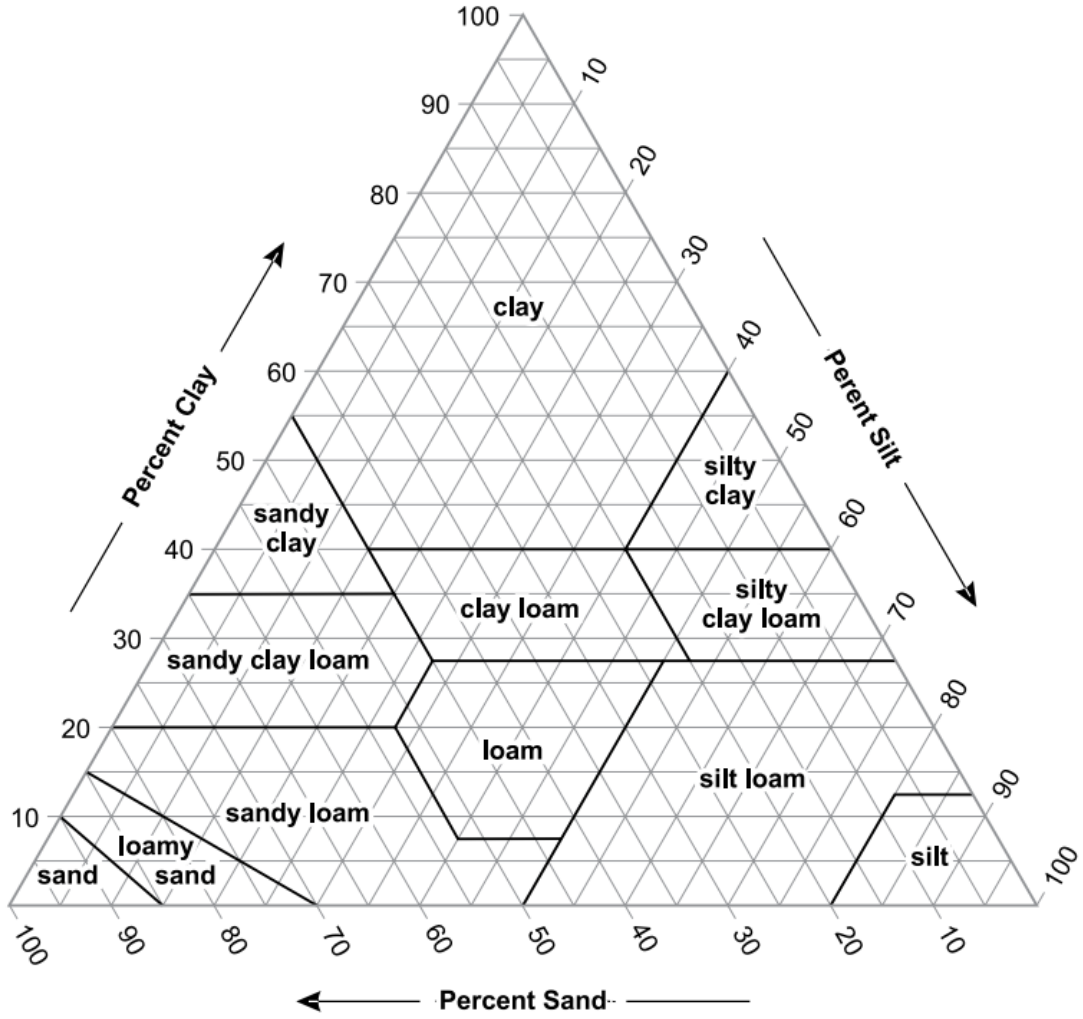
4.75 mm aralığındaki değerleri kabul etmiştir. Kum zeminlerde üç standartta biri birinden farklı değerleri kabul etmiştir. Silt zeminlerde ise TS ve ASTM aynı değerleri kullanırken BS bunlardan farklı olarak 0.06-0.002 mm aralığındaki değerleri kullanır. Killi zeminlerde ise TS, ASTM ve BS aynı değer aralığı olan 0.002 mm'den küçük değerleri kabul eder.

Zeminlerin ayırt edilmesinde kullanılan birçok zemin parametresi bulunmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde en yaygın kullanılan Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırma Kurumu (USGS) tarafından geliştirilen dane boyutuna göre sınıflandırmadır. Dane boyutuna göre sınıflandırmada 200 nolu (0,075 mm) elekten geçen malzemeye göre zemin ince ve iri (kaba) daneli zemin olmak üzere ikiye ayrılır. 200 nolu elekten zemin danelerinin yüzde elliden fazlası geçerse ince daneli zemin, yüzde elliden fazlası elek üzerinde kalırsa buna iri (kaba) daneli zemin denir. Ayrıca iri daneli zeminler dane boyutlarına göre, ince daneli zeminler ise plastitelerine göre alt sınıflara ayrılmaktadır.

İnce daneli zeminlere örnek olarak killer ve siltler iri daneli zeminlere örnek olarakta çakıllar ve kumlar gösterilebilir.

### **2.1.1. USDA tekstür sınıflandırması**

Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA) tarafından geliştirilen en eski zemin sınıflandırma sistemlerinden biri olup üçgen sınıflandırma sistemi olarak ta bilinmektedir. USDA tarafından geliştirilen on iki temel zemin sınıfındaki kum, kil, silt yüzdelerini gösteren üçgen sınıflandırma Şekil 2.1'de sistemi görülmektedir.



**Şekil 2.1.** USDA üçgen sınıflandırma diyagramı (USDA, 2017:125)

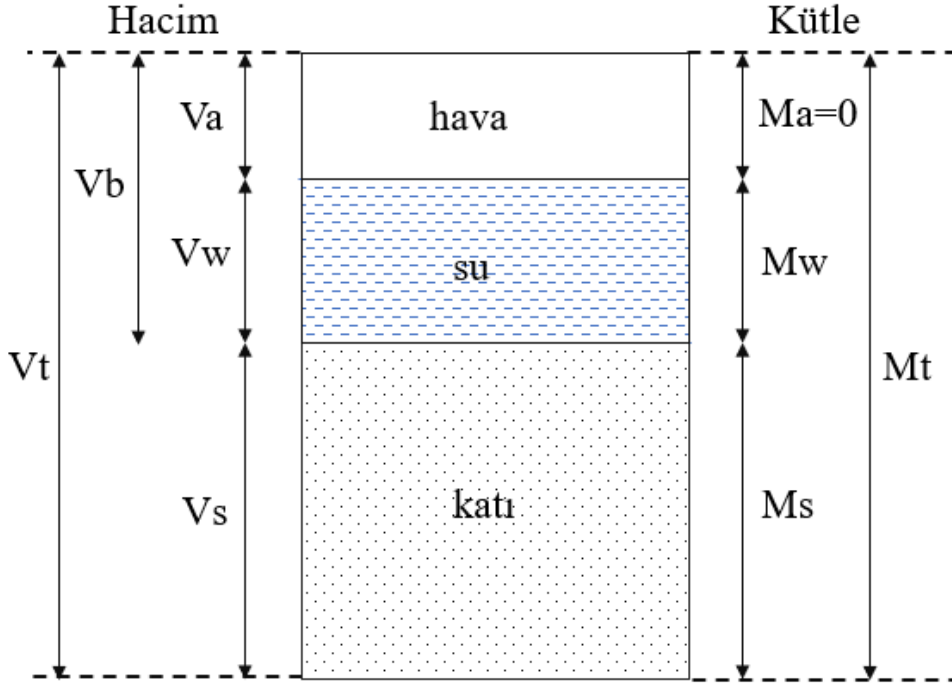
USDA sınıflandırma sisteminde zeminin içeriğindeki kum, kil ve silt yüzdeleri kullanılır. Sınıflandırma işleminde öncelikle zeminin granülometri eğrisi çizilir. Zeminde varsa çakıl yüzdesi çıkarılır ve kalan kum, kil, silt malzemeleri yüzdelerinin tamamı %100 olacak şekilde yeniden yüzdeler belirlenir. Diyagramda bulunan lem (loam-balçık) %20'den az kil içeren ve tarıma elverişli toprağın adıdır.

USDA sınıflandırma sistemi zemin tekstürünün zirai mahsuller üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla geliştirilmiştir (Dingil, 2020). Murthy'e (2002:69) göre yalnızca dane çapı dağılımını kullanarak sınıflandırma yapan bu sistem, karmaşık olmamasından dolayı zirai alanlarda yapılan çalışmalarda çok sık kullanılmaktadır (Dingil, 2020).

## 2.1.2. Zemin ile ilgili önemli ilişkiler

### 2.1.2.1. Su, katı ve gaz fazları

Zeminler üç ana fazdan oluşmaktadır. Zeminlerin su içeriğine göre katı, su ve gaz fazları Şekil 2.2' de belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Üç fazlı zemin sisteminin şematik gösterimi (Castellini vd., 2016)

$V_a$ : Boşluk hacmi

$V_w$ : Su hacmi

$V_s$ : Katı hacmi

$V_b$ : Boşluk hacmi ( $V_a + V_w$ )

$V_t$ : Toplam zemin hacmi

$M_a$ : Hava kütlesi

$M_w$ : Su kütlesi

$M_s$ : Katı kütlesi

$M_t$ : Toplam zemin kütlesi

Zemin fazları; katı (dane) faz, su fazı ve boşluk fazıdır. Zeminler iki faz halinde de bulunabilirler havanın olmadığı ya da ihmal edilecek kadar az olduğu faz durumu olan doymuş (kohezyonlu) zemin, bir diğeri ise suyun olmadığı veya ihmal edilebilecek kadar az olduğu katı ve gaz fazından oluşan kuru (kohezyonsuz) zemindir.

### 2.1.2.2. Zemin parametreleri

Doğal bir zeminin toplam kütesinin toplam hacmine oranına, zeminin doğal (sahadaki) yoğunluğu denilmektedir.  $\rho_n$  [ $\text{mg.m}^{-3}$ ] ile ifade edilmektedir.  $M_a$ 'nın değeri sıfırdır.

$$\rho_n = \frac{M_t}{V_T} = \frac{M_w+M_s}{V_t} = \frac{M_w+M_s}{V_w+V_s+V_a} \quad (2.1)$$

Doğal ve kuru olan zeminlerde, kuru kütlelerin zeminin toplam hacmine oranına doğal kuru yoğunluk denilmektedir.  $\rho_s$  [ $\text{mg.m}^{-3}$ ] simgesi ile ifade edilmektedir.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_t} \quad (2.2)$$

Kütlesel su içeriği veya su içeriği (water content), genellikle zeminin kuru kütesinin su kütesine oranı olarak ifade edilmektedir. Kütlesel su içeriği, yüzdesel olarak ifade edilir.  $\omega$  simgesi ile ifade edilir.

$$\omega = \frac{M_w}{M_K} \quad (2.3)$$

Kütlesel su içeriği, zemin kütleleri içerisindeki suyun ağırlığının katı taneciklerin ağırlığına oranlanarak bulunur.  $M_w$  zemin hacminde bulunan suyun ağırlığı,  $M_s$  zemin hacminde katı danelerin ağırlığıdır.

Hacimsel su içeriği,  $\theta$  ( $\text{L}^3\cdot\text{L}^{-3}$ ), zeminin su hacminin toplam hacme oranı ile ifade edilir.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_s+V_w+V_a} \quad (2.4)$$

Teorik olarak porozitesi eşit olan doygunluktaki hacimsel su içeriği,  $\theta_s$  ( $\text{L}^3\cdot\text{L}^{-3}$ ), kumlu zeminlerde yaklaşık olarak 0,40 ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ) ile killi zeminlerde yaklaşık olarak 0,60 ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ) değerlerine sahiptirler. Evapotranspirasyon nedeniyle zeminden ayrılan suyun veya yağışlarla zemine giren suyun hesaplanmasında hacimsel su içeriği büyük önem arz etmektedir. İndirgenemez su içeriği,  $\theta_r$  ( $\text{L}^3\cdot\text{L}^{-3}$ ), zeminin kurutulsa dahi yapısında kalan su içeriğidir. Daha kuru bir durum, yani  $V_w$ 'nin sıfıra yaklaşması, zeminden alınan numune cam kap içerisinde etüve konulur. 105-110 °C' aralığında 24 saat bekletilerek kurutulur.  $\theta_r$ ' nin fiziksel karşılığı net değildir (Haverkamp vd., 2006). Kavramsal olarak, indirgenemez su içeriği, kuru bir toprak profili içinde absorbe kuvvetler tarafından partikül yüzeylerindeki filmlerde, partiküller arasındaki boşluklarda ve zemin gözenekleri içinde tutulan hareketsiz su ile olarak tanımlanabilir. Uygulamada, değeri genellikle  $\theta_r$ ' yi kullanılan veri noktaları

aralığıyla sınırlı ampirik bir parametreye indirgeyen ölçülen su tutma verilerine bir denklem yudurularak tahmin edilir. Kütle ve hacimsel su içeriği arasındaki ilişki şöyledir:

$$\theta = w \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (2.5)$$

Denklem 2.3'te  $\rho_w$  (M. L<sup>3</sup>) suyun yoğunluğudur. Standart sıcaklık ve basınçta 1000 kg.m<sup>3</sup> 'e eşittir.

Genel olarak hidrolojik uygulamalarda, hacimsel su içeriği birimsiz (boyutsuz) biçimde kullanılır ( $S_e$ ):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.6)$$

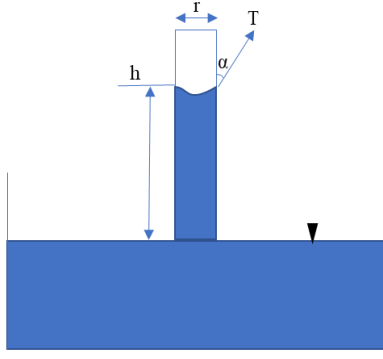
Hacimsel su içeriği, zeminin toplam gözenek alanına,  $f$  (L<sup>3</sup>.L<sup>-3</sup>) oranlandığında doygunluk derecesi ( $S_d$ ) elde edilir:

$$S_d = \frac{V_w}{V_w + V_a} \quad (2.7)$$

Doygunluk derecesinin bir diğer ismi ise saturasyon derecesidir. Zemin boşluklarının tamamen su ile dolu olduğu durumu ifade eder yani su hacminin boşluk hacmine oranına denir. Doygunluk derecesi, 0-100 arasındaki değerleri alır. Tamamen kuru zeminlerde %0 tamamen doymuş zeminlerde ise %100 değerini alır.

### 2.1.2.3. Kapiler basınç

Kapilerite veya kapiler su, zemin içerisinde gözeneklerde bulunan serbestçe hareket edemeyen zemin yüzeyindeki gerilmeler tarafından tutulan, alçalan veya yükselen sudur. Suyun tutulmasını sağlayan güce de kapiler kuvvet denilmektedir. Zemin daneleri arasında bulunan boşluklar birbirine bağlıdır ve kılcal bir kanal oluştururlar, zemin içerisinde bulunan su da bu boşluklarda hareket eder. Sıvılara batırılan küçük çaplı borulardaki sıvı yükselmesi de zeminlerde gözlenen kapilerite olayı ile aynı fiziksel nedenlerle oluşmaktadır. Kapiler su sayesinde doygunluğa ulaşan zeminlerin taşıma güçleri azalmaktadır. Kapiler kuvvet yüzey gerilmesine, gözeneklerin büyüklüğüne ve düzenine göre değişmektedir. Şekil 2.3' te sıvı içerisine yerleştirilen boruda gerçekleşen kapiler yükselme olayı şematik olarak görülmektedir.



**Şekil 2.3.** Borularda kapilarite olayının şematik gösterimi (Özel, 2019)

$$h = -\frac{(2\gamma\cos\alpha)}{\rho gr} \quad (2.8)$$

$\gamma$ : Yüzey sıvı gerilimi ( $\text{j/m}^2$  ya da  $\text{n/m}$ )

$\alpha$ : Temas açısı

$\rho$ : Sıvının yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$ : Yer çekimi ivmesi ( $\text{m/s}^2$ )

$r$ : Tüpün yarıçapı

Denklem 2.8’de görüldüğü üzere kapiler yükselme boru çapı ile ters orantılıdır. Büyük çaplı borudaki su yüksekliği küçük çaplıdan daha az olacaktır. İnce taneli zeminlerde kapilerite daha büyüktür.

#### 2.1.2.4. Emme basıncı

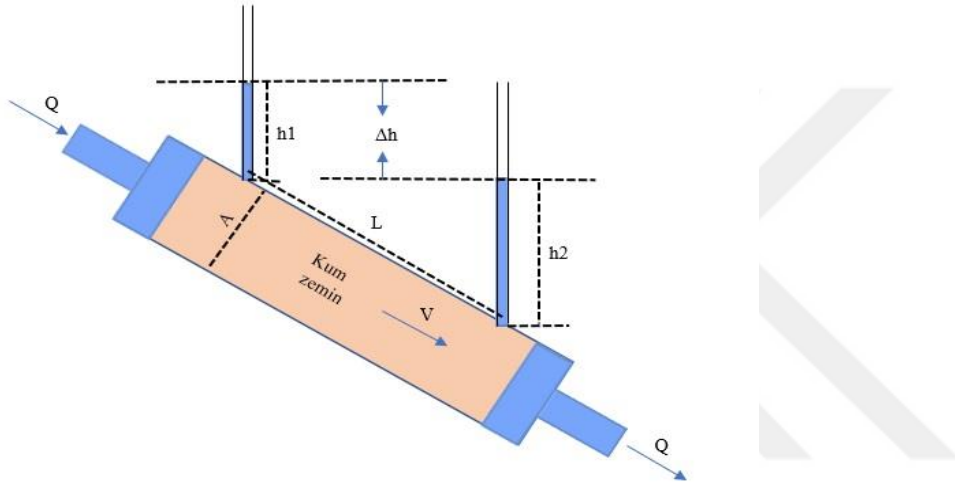
Emme basıncı dış kuvvetlerin etkisinde olmayan, zeminin üzerinde bulunan su yüküne uyguladığı çekme kuvveti yani çekme basıncıdır. Doymun zeminlerin karakteristik özelliklerinin tespitinde önemli etken düşey gerilme, doymun olmayan zeminlerde ise bu etken su emme basıncı- su muhtevası ilişkisidir (Kocaman, 2018).

## 2.2. Doymun Zeminlerde Akış

### 2.2.1. Darcy kanunu

Su gözenekli zemin içerisinde hareket ederken, zeminde bulunan katı maddelerin neden olduğu dirençle karşılaşır. Bir boru içerisinde olan akışlar ile akışkanlar mekaniği kanunları suyun zemin içerisindeki akışı içinde geçerli olmaktadır (Özdemir, 2018).

Zeminlerin içerisindeki su akışı ilk kez 1856 yılında Fransız mühendis Henry Darcy tarafından bir hastaneye temiz su getirme projesi kapsamında deneysel ortamda yapılmıştır. Darcy Şekil 7. de görülen silindirik ve içerisine kum doldurulmuş kaplardaki giriş ve çıkıştaki basınç farkını ölçerek deneylerini gerçekleştirmiştir. Böylece doymuş zemin ortamında laminer akış özelliğine sahip suyun hızının hidrolik eğim ile orantılı olduğunu kanıtlamıştır. Darcy yasası inşaat mühendisliği, petrol mühendisliği, jeoloji mühendisliği vb. birçok bilim dalında kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Darcy tarafından hazırlanan deney düzeneği (Özdemir, 2018)

$k$ : Hidrolik iletkenlik (permeabilite katsayısı)

$i$ : Hidrolik eğim ( $\Delta h/L$ )

$L$ : Zemin kütlesinin uzunluğu

$V$ : Suyun akış hızı

Darcy Şekil 2.4. deki düzeneği kullanarak 2.9 denklemini elde etmiştir.

$$V = \frac{Q}{A} = k \times i \quad (2.9)$$

Bu denklemde hızın suyun debisi ile doğru, zemin kütlesinin çapı ile ters orantılı olduğunu tespit etmiştir.

Bu ilişki Slichter (1899) tarafından doymuş gözenekli ortama ve üç boyutlu uzaya genelleştirilmiştir:

$$q = -K\nabla H \quad q = -K\Delta H \quad (2.10)$$

Burada  $q$  akışa dik birim alan başına akı veya akış hızı, üç boyutta hidrolik yükseklik gradyanı ve  $K$  doymunluktaki hidrolik iletkenliktir (üç boyutlu tensör). Topraklarda, toplam hidrolik yükseklik  $H$  ile tanımlanır:

$$H = z + h \quad (2.11)$$

$z$ : yerçekimi yükü (m)

Permeabilite katsayısı laboratuvarında yapılan deneylerle elde edilebilmektedir. Genel olarak iri daneli zeminlerde sabit seviyeli permeametre deneyi ile ince daneli zeminlerde ise düşen seviyeli permeametre deneyi ile elde edilir. Bu deneylere alternatif olarak konsolidasyon deneyi ve üç eksenli kesme deneyi ile de bulunabilmektedir. Laboratuvar deneyleri dışında arazi de kuyu açılarak permeabilite katsayısının tespit edilmesi mümkündür.

Laboratuvarında yapılan deneylerle permeabilite katsayısının bulunması titizlik ve deneyim gerektiren bir iş olması dolayısıyla hata payı yüksektir. Arazide yapılan deneylerle tespit ise laboratuvarında yapılan deneylere oranla daha doğru sonuçlar verir fakat maliyet ve işçilik artacağından ekonomik sorunlar yaratır. Bu gibi nedenlerden dolayı alternatif bir metod olarak hem sürekli yapmanın kolay olması hem de süratli netice vermesi açısından elektriksel metotlar geliştirilmiştir (Keskin, 2013). “Time Domain Reflectometry” kısaca TDR denilen elektriksel cihaz ile ölçüm bu metotlardan biri olarak bilinmektedir (Keskin, 2013).

### 2.2.2. Süreklilik ve Laplace denklemi

Süreklilik denklemini (2.10) ve Darcy denklemini (2.9) birleştirerek doymuş akış denklemini (2.13) elde ederiz:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot q \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla(-K\nabla H) \quad (2.13)$$

Homojen, sıkıştırılmaz ve doymuş bir ortamdaki sürekli akış için ve  $K$  tensörünü köşegenleştiren koordinat sisteminde, (2.14) denklemini elde ederiz:

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (2.14)$$

$K_x$ ,  $K_y$  ve  $K_z$ ;  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönlerindeki hidrolik iletkenliklerdir. Diğer adı ile doymun ortamlardaki bu denkleme Laplace denklemi denilir.

### 2.3. Doymun Olmayan Zeminlerde Akış: Richards Denklemi

Doymun ortamlar için kullanılan Darcy Yasası Richards (1931) tarafından doymun olmayan ortamlar için genelleştirilmiştir; burada hidrolik iletkenlik,  $K=K(h)$  olacak şekilde kılcal basınç  $h$ 'nin bir fonksiyonu ile temsil edilmektedir.

Darcy denklemi, sürekli ortam denklemi ile birleştirildiğinde genelleştirilmiş Richards Denklemi verir:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K_z(h)}{\partial z} \quad (2.15)$$

Richards denklemi analitik olarak çözülebilir değildir (bazı çok basitleştirilmiş koşullar dışında). Su içeriği  $\theta$  'nın kapiler basınç  $h$ 'ye göre türevi olan kapiler kapasite  $C(h)$  kullanılarak ve su içeriği ile kapiler basınç arasındaki  $h(\theta)$  ilişkisi ve hidrolik iletkenlik ile su içeriği arasındaki  $K(\theta)$  ilişkisi bilinerek, Richards Denklemi sınır ve başlangıç koşulları bilindiği takdirde sayısal olarak çözülebilir hale gelir.

Bu çalışmada Richards Denklemi dikey bir boyutlu hali ve sonlu eleman yöntemini kullanarak çözülecektir. Bunun için Hydrus-1D ücretsiz yazılımı kullanılacaktır (Simunek vd., 2005).

### 2.4. Doymun Olmayan Zeminlerde Çift Permeabiliteli Akış

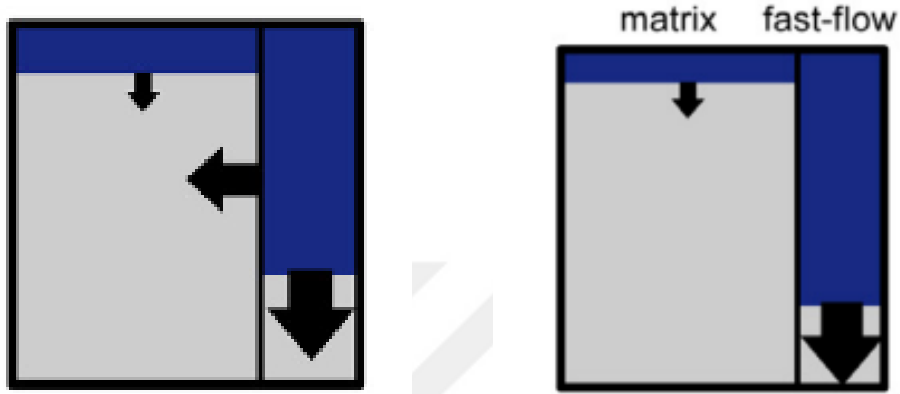
Çift geçirgenlikli ortam, geçirgen bir ara yüz ile ayrılmış iki tek geçirgenlikli ortamdır oluşur. Hızlı akış bölgesi (alt simge  $f$ ) ve matris (alt simge  $m$ ) için akış denklemleri sırasıyla şunlardır (Gerke ve van Genuchten, 1993)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_f}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_f(h_f) \frac{\partial h_f}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_f(h_f) \frac{\partial h_f}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_f(h_f) \frac{\partial h_f}{\partial z} + K_f(h_f) \right] - \frac{\Gamma_w}{w} - \Phi_f \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_m(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_m(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_m(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial z} + K_m(h_m) \right] + \frac{\Gamma_w}{1-w} - \Phi_m \end{aligned} \quad (2.17)$$

Burada  $q_m$  ve  $q_f$  [ $L^3 L^{-3}$ ] sırasıyla matris ve hızlı akış bölgelerindeki su içeriklerini;  $K_m$  ve  $K_f$  [ $L T^{-1}$ ] sırasıyla matris ve hızlı akış bölgelerindeki hidrolik iletkenlikleri göstermektedir;  $h_m$  and  $h_f$  [ $L$ ] matris ve hızlı akış bölgelerindeki basınç yükseklikleri,  $\Gamma_w$  [ $T^{-1}$ ] matris ve hızlı

akış bölgeleri arasındaki su değişimi,  $\Phi_m$  ve  $\Phi_f [T^{-1}]$  iki bölgedeki yutak-kaynak terimleri,  $w$   $[L^3 L^{-3}]$  hızlı akış bölgesi tarafından işgal edilen hacmin toplam hacme oranı ve  $x$ ,  $y$  ve  $z$  Kartezyen koordinatları olup  $z$  dikey koordinata karşılık gelmektedir. Şekil 2.5 (Lassabatere vd., 2014) bu iki akış bölgesi arasındaki su akışını temsil etmektedir.



**Şekil 2.5.** İki akış bölgesi arasındaki su akışını görselleri (Lassabatere vd., 2014)

İki bölge arasındaki “Exchange” akışı bu çalışmada yok olarak varsayacağız (sağ şekil kullanılacaktır). Nedeni ise, infiltrasyon eğrilerinden iki bölge arasındaki akış tespit edilemez. Bunun için laboratuvar ortamında trasör deneylerinde elde edilmesi gerekmektedir.

## 2.5. Zemin Hidrolik Fonksiyonları

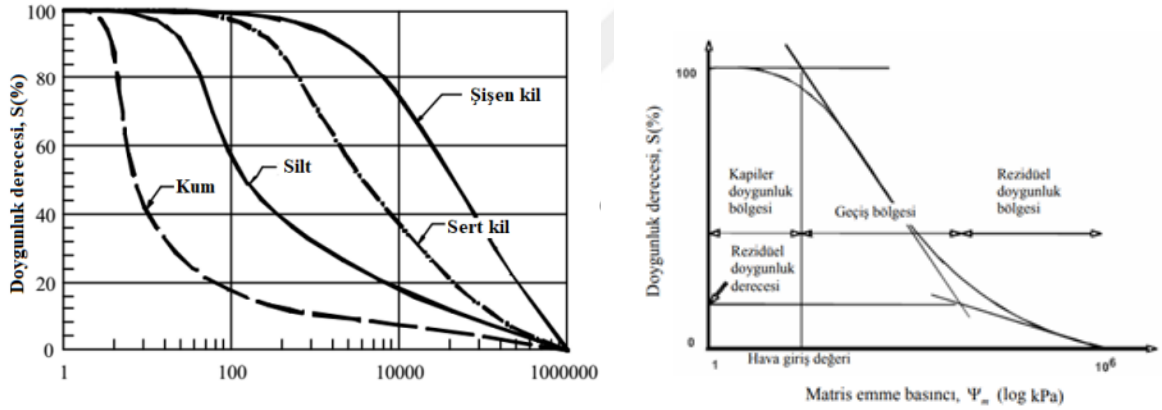
Zemin hidrolik fonksiyonları, ıslanma veya kuruma sürecini belirleyen zeminin su emme karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik eğrisidir. Bu iki eğri çok önemli olup, doymun olmayan ortamlarda akışı modellemek için gerekmektedir. Richards Denklemi sayısal olarak çözülebilen bir problem değildir. Denklemi çözmek için su emme eğrisi, hidrolik iletkenlik fonksiyonu ve üst sınır koşullarının bilinmesi gereklidir.

### 2.5.1. Su emme karakteristik eğrisi

Su emme karakteristik eğrisi veya su tutma eğrisi (SWRC : soil water retention curve) doymun olmayan zemindeki su emme basıncı ile hacimsel su içeriği arasındaki bağıntıyı verir. Bu fonksiyonu modellemek için bir çok matematik model mevcuttur. En yaygın kullanılan denklem 2.18'de gösterilen Van-Genuchten (1980) modelidir

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ 1 + \left( \frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad (2.18)$$

Burada  $\theta$ ,  $\theta_s$  ve  $\theta_r$  sırası ile zemin hacimsel, doymun (sature olmuş) hacimsel ve indirgenemez (rezidüel durumda) hacimsel su içeriği;  $h$  emme basıncı ve  $h_g$  eğrinin bükülme noktası ile ilişkilendirilen bir ölçek parametresidir;  $n$  ve  $m$  zeminin tekstür parametreleri olarak kabul edilir. Şekil 2.6'da kum, silt ve kil için oluşabilecek örnek bir emme basıncı grafiği görülmektedir.



Şekil 2.6. Su emme eğrisi (Vanapallı vd., 1999 ; Montanez, 2002)

Bu eğrinin elde edilmesinde kullanılan birçok yöntem mevcuttur. Laboratuvar ortamında direk ölçüm ile su emme karakteristiği, porus plaka deneyi ve kurutma deneyleri tayinleri tercih edilir. Bu yöntemler zaman aldıklarından ve pahalı olduklarından, infiltrasyon eğrilerinde ve pedotransfer fonksiyonlarında artık kullanılmaktadır (Lassabatere vd., 2006; Castellini vd., 2021).

Zeminin su emme karakteristik eğrisini bulmak bize şevlerin stabilite hesaplarında, zemindeki suyun ne zaman doymun olacağını hesaplanmasında, zemindeki su içeriğinin nasıl dağıldığını ve bitkilere ne kadar basınç uygulandığının bulunmasında, yeşil çatılardaki

technosol zeminlerin su tutma kapasitelerinin belirlenmesinde ayrıca çevre mühendisliği dalında atık depolama tesislerinin zemin infiltrasyon hesaplarında kullanılan önemli bir parametredir.

### 2.5.2. Hidrolik iletkenlik eğrisi

Hidrolik iletkenlik fonksiyonu zeminin hidrolik parametlerinden biri olup su emme karakteristik eğrisi ile aynı uygulama alanlarında kullanılır En yaygın kullanılan zemin iletkenlik fonksiyonlarından yine denklem 2.19'daki Van Genuchten modelidir (1980):

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2.19)$$

Bu eğri zemin içindeki hacimsel su içeriğine karşılık hidrolik iletkenlik değerini verir. Burada  $K_s$  sahadaki doygun haldeki zeminin hidrolik iletkenliği temsil etmektedir. Genellikle ,  $K_s$  ile permeabilite katsayı birbirine eşit kabul edilir.

### 2.6. İnfiltrasyon Deneylerinden Zemin Fonksiyonları Belirlemek

İnfiltrasyon tanım olarak suyun zemine sızdırma sürecidir denilebilir. İnfiltrasyonu etkileyen ana başlıklar zeminin hidrolik özellikleri, yapısı, dokusu ve başlangıç koşullarıdır. Kümülatif infiltrasyon ise  $I(t)$ , zeminin bir fonksiyonu olarak zeminden infiltre olan suyun toplam hacmidir. Kümülatif infiltrasyon bulunurken öncelikle kümülatif infiltrasyon eğrisi elde edilmelidir. Bu eğri infiltrometre testleri deneysel olarak elde edilir. En yaygın olarak kullanılan infiltrasyon deneyleri Borehole, disk infiltrometre ve tek (single) halkalı infiltrometre deneyi infiltrometre deneyleridir.

Bu tez çalışmasında Lassabaterre vd. (2014) MTDI (multiple tension disk infiltrometre) infiltrasyon deney verisini ve ters yöntem metodu ile tahmin edilen zemin karakteristik fonksiyonları kullanılacaktır.

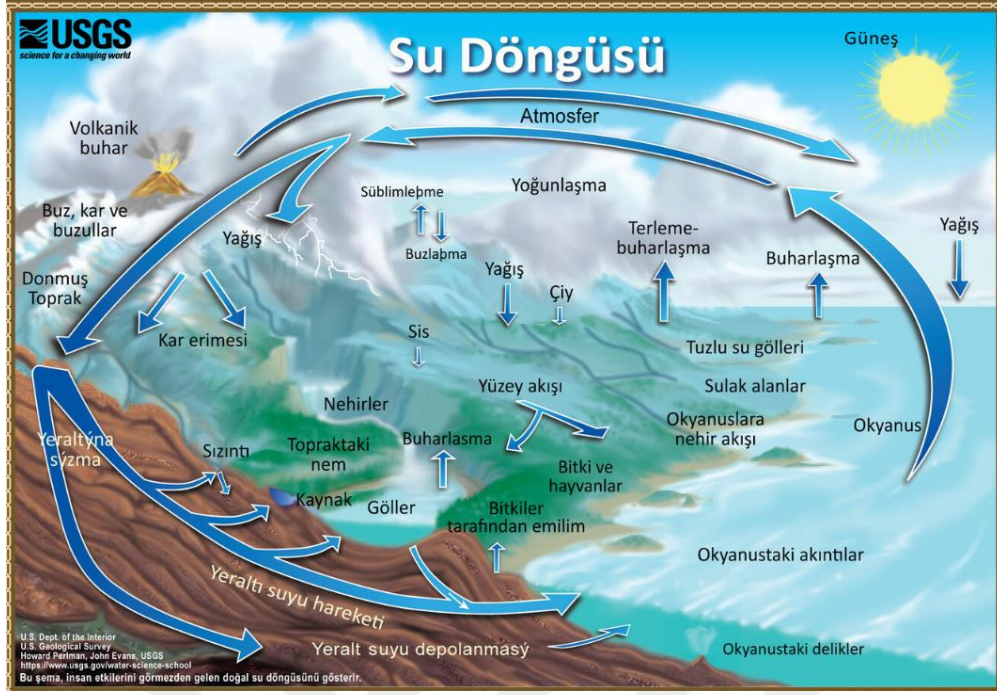
### 2.7. Hydrus-1D (H1D) ile Modelleme

Çeşitli saha deneyleri ile zemin içerisindeki su akışının tespit edilmesi zor olmamakla birlikte çok fazla maliyet, zaman ve personel gerektirmektedir. Bu tür zorlukları aşmak için

bazı veriler kullanılarak tahmini olarak zemin modellemesi yapan bilgisayar programları geliştirilmiştir. Hydrus, modflow, swim bunların başlıcalarıdır. Hydrus programı su akışı modellemesi konusunda en yaygın kullanılan programdır (Simunek vd., 2008). Bu program bir, iki veya üç boyutlu değişken doymuş ortamlardasü akışı, kimyasal taşınım, ısı taşınımı, kök büyümesi ve kök su salınımı simüle edebilmektedir. Hydrus programı dünya üzerinde birçok kurum ve şirket tarafından ayrıca 2014 yılındaki verilere göre dünyanın en iyi yüz üniversitesinin %50'sine yakını tarafından kullanılmaktadır (URL-6, 2023). Hydrus programı, su akışı modellemesi için Richards denklemini sayısal çözer. Hydrus programının problemin durumuna göre kullanılan birden fazla yazılımı bulunmaktadır (Hydrus-1D, Hydrus-2D, Hydrus-2D/3D). Simunek vd. (2008a)' ne göre lizimetre, toprakta ve parsellerde bir boyutlu problemleri Hydrus-1D yazılımı; arazi ve laboratuvar çalışmalarında karşılaşılan iki boyutlu problemlerin çözümünde Hydrus-2D yazılımı; Hydrus-2D/3D yazılımı ise genel olarak iki ve üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılır (Demirel, 2014). Hydrus, zemin içerisinde sürekli akışın olmadığı doymuş ve doymuş olmayan koşullar için Richards Denklemini bilgisayarda sayısal olarak çözen bir programdır (Demirel, 2014). Richards Denklemi genel bir denklem olup Hydrus yazılımında Van Genuchten, Brooks and Corey, Durner gibi başka denklemlerde bulunmaktadır (Blonquist vd. 2006).

## **2.8. Buharlaşma ve Terleme**

Hidrolojik döngü ya da su döngüsü, dünya yüzeyinin üzerinde veya altında bulunan suyun güneş tarafından yönlendirilerek buharlaşma-terleme yoluyla sürekli döngü halinde olması olarak tanımlanmaktadır. Su döngüsünün önemli bir parçası olan evapotranspirasyon (ET), bitkilerin bulunduğu topraktan buharlaşmayla bitkilerden ise terleme yoluyla meydana gelen su kaybının toplamına denilmektedir. Şekil 2.7' de Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) tarafından hazırlanan dünya üzerinde gerçekleşen su döngüsü aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.7. Dünya üzerinde gerçekleşen su döngüsü diyagramı (URL-7, 2023)

Temiz su kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması ayrıca bitkilerin su ihtiyaçlarının hesaplanmasında, sulama projelerinin en az hatayla oluşturulmasında ET'nin tahmin edilmesi büyük önem arz etmektedir (Çobaner vd., 2016). ET değerlerinin hesaplanmasında doğrudan lizimetre kullanılabileceği gibi iklimsel veriler kullanılarak ampirik yöntemlerle de tahmin edilebilmektedir (Yelkara, 2015). Karaca vd. (2017)'ne göre evapotranspirasyon değerlerinin ölçülmesi için lizimetreler en doğru sonucu vermektedir fakat pahalı bir yöntem olmasının yanında uygulamasının titizlik istemesi ve zorluklarından dolayı birçok ampirik formül geliştirilmiştir (Bircan ve Kızıl, 2021). Geliştirilen ampirik formüllerden en çok kullanılanlardan biriside Penman-Montheit metodudur. Penman açık su yüzeyinden buharlaşma formülünü oluştururken sıcaklık değerleri, güneşlenme süresi, rüzgâr vb. iklimsel verileri kullanmıştır (Bayramoğlu, 2013). Penman ayrıca bu yöntemin kısa boylu yeşil-çim kaplı zeminlere de uygulanabileceğini belirtmiştir (Şarлак ve Bahçacı, 2020). Penman'ın geliştirdiği yöntemi bitkiler için Montheit daha da geliştirmiş ve aerodinamik direnci ve yüzey direnci parametrelerini eklemiş, bitkilerde oluşan terlemeyi tahmin edebilecek bir yonteme dönüştürmüştür (Bayramoğlu, 2013). 1990 yılında Birleşmiş Milletler çatısı altındaki Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) birçok uzmanı bir araya getirerek bir çalışma yapmış ve Penman- Montheit yönteminin diğer yöntemlere göre daha doğru sonuçlar verdiğini tespit etmiştir. Bu nedenle FAO bu yöntemi referans model kabul ederek

adını da FA0-56 PM yöntemi olarak belirlemiştir. ET, Penman-Monteith denklemi kullanılarak saatlik enerji dengesi üzerinden 2.20 denklemindeki gibi hesaplanır:

$$ET = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2.20)$$

2.20 denkleminde,  $\Delta$  (kPa.°C<sup>-1</sup>) buhar basıncı eğrisinin eğimi,  $R_n$  (MJ.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) bitki yüzeyindeki net radyasyon,  $G$  (MJ.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) zemindeki hissedilebilir ısı akışı,  $\rho_a$  (kg.m<sup>-3</sup>) sabit basınçtaki ortalama hava yoğunluğu,  $c_p$  (MJ.kg<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup>) havanın özgül ısısı,  $e_s$  ve  $e_a$  (kPa) sırasıyla havanın doymuş ve mevcut buhar basıncı,  $r_a$  (s.m<sup>-1</sup>) aerodinamik direnç,  $r_s$  (s.m<sup>-1</sup>) kütle yüzey direnci,  $\gamma$  (kPa.°C<sup>-1</sup>) psikometrik sabit ve  $\lambda$  (MJ.kg<sup>-1</sup>) buharlaşmanın gizli ısısıdır. Aerodinamik direnç  $r_a$ , rüzgâr hızına ve bitki örtüsünün yüksekliğine bağlıdır. Yığın yüzey direnci  $r_s$  aşağıdaki 2.21 denklem aracılığıyla hesaplanır

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{aktif}} \quad (2.21)$$

Burada  $r_l$  yığın stoma direncidir (s.m<sup>-1</sup>).  $LAI_{aktif}$  aktif yaprak hava indeksidir negatiftir. Yoğun bitki örtüsü için eşitliği için 2.22 denklemi kullanılır:

$$LAI_{active} = 0.5LAI \quad (2.22)$$

*Sedum album* için LAI değeri CRITT horticole (Fransa) tarafından -3 olarak ölçülmüştür. Yığın yüzey direnci  $r_s$ 'nin biri gündüz diğeri gece için olmak üzere iki değeri vardır. *Sedum* türleri için bu değerler su stresi durumuna bağlıdır. Toprak nemi düşük olduğunda, çim bitkileri metabolizması su stresindedir, bu durumda bitki stomaları bu süre boyunca kapalıdır. Aksi takdirde, bitki stomaları açıktır. Tablo 2.2'de *Sedum* türleri için toprak nemi ve dönem süresine göre farklı  $r_s$  değerlerini göstermektedir. Bu değerler CRITT Horticole (Fransa'da bir dernek) tarafından hesaplanmıştır. Net radyasyon  $R_n$  negatif veya sıfır olduğunda gece dönemi olarak kabul edilir.

Tablo 2.2. ET hesaplanması için kullanılan *Sedum* yüzey dirençleri (Yılmaz vd., 2012)

	<i>Sedum</i>
Height (m)	0.05
$r_a$ (s.m <sup>-1</sup> )	342/u
$r_s$ (wet-day)	70
$r_s$ (wet-night)	150
$r_s$ (stress-d)	150
$r_s$ (stress-n)	40

*Sedum* türleri için *ET* hesaplamasında dikkate alınan aerodinamik direnç  $r_a$  ( $s.m^{-1}$ ) ve kütle yüzey direnci  $r_s$  ( $s.m^{-1}$ )

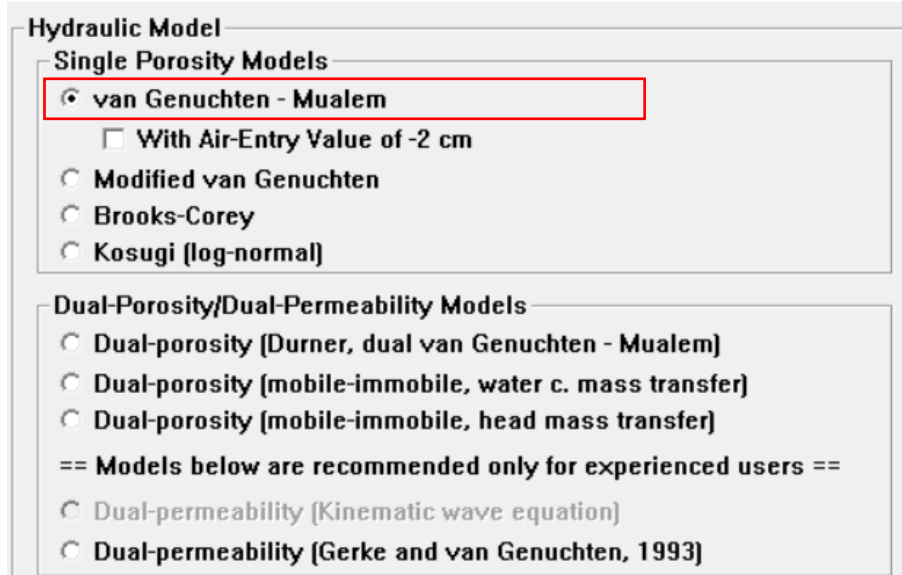
## 2.9. Hidrolik Modelleme

Yeşil çatı ölçeğinde hidrolik modelleme amacıyla iki yaklaşım kullanılmaktadır. İlk yaklaşım homojen bir gözenekli ortam hipotezine dayanmaktadır. İkinci yaklaşım ise iki farklı hidrolik fonksiyona sahip iki bölgeye dayanmaktadır. Bu iki yaklaşımı modellemek için Hydrus-1D yazılımı kullanılmıştır.

### 2.9.1. Tek permeabilite yaklaşım ile modelleme

Şekil 2.8’de belirtilen üzere Hydrus-1D yazılımında tek permeabilite yaklaşımda van Genuchten-Mualem modeli seçilmiştir. Tek permeabilite için Brooks-Corey ve Kosugi modelleri de Hydrus-1D yazılım arayüzünde bulunan diğer seçeneklerdir.

Soil Hydraulic Model



**Hydraulic Model**

**Single Porosity Models**

- van Genuchten - Mualem
- With Air-Entry Value of -2 cm
- Modified van Genuchten
- Brooks-Corey
- Kosugi (log-normal)

**Dual-Porosity/Dual-Permeability Models**

- Dual-porosity (Durner, dual van Genuchten - Mualem)
- Dual-porosity (mobile-immobile, water c. mass transfer)
- Dual-porosity (mobile-immobile, head mass transfer)
- == Models below are recommended only for experienced users ==
- Dual-permeability (Kinematic wave equation)
- Dual-permeability (Gerke and van Genuchten, 1993)

Şekil 2.8. Hydrus-1D tek permeabilite yaklaşımda van Genuchten-Mualem modeli

Burada ana denklem Richard’ın tek boyutlu denklemidir (1931). Su tutma (denklem 2.23a ve 2.23b) ve hidrolik iletkenlik (denklem 2.23c) fonksiyonları van Genuchten-Mualem modeli kullanılarak tanımlanmıştır (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ 1 + \left( \left| \frac{h}{h_g} \right| \right)^n \right]^{-m} \quad (2.23a)$$

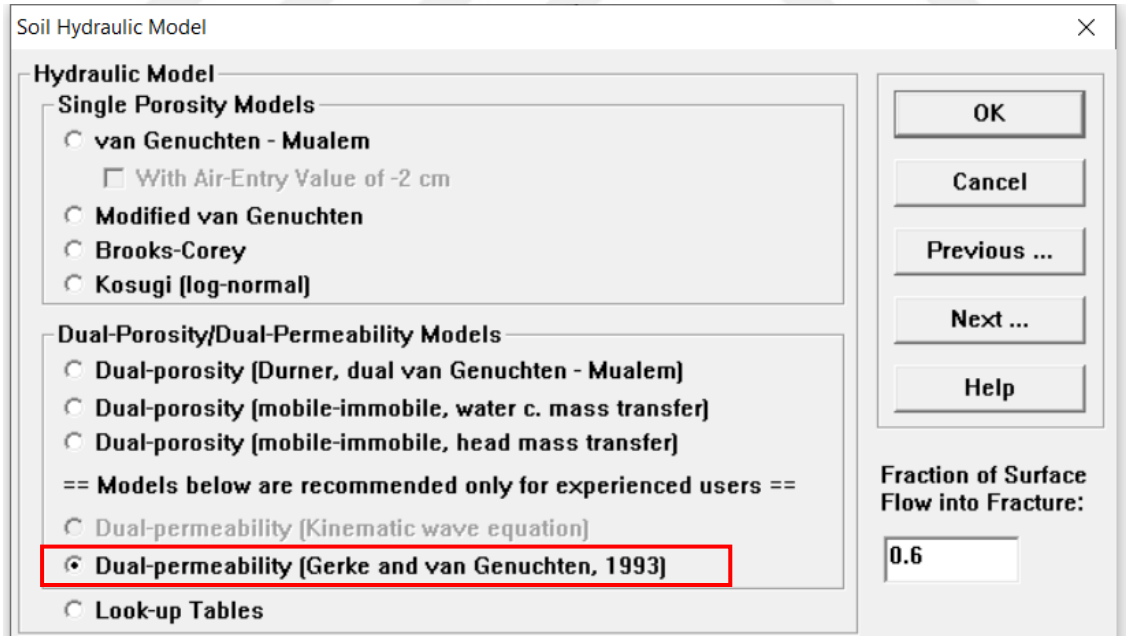
$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2.23b)$$

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (2.23c)$$

Burada  $\theta_r$  ve  $\theta_s$  sırasıyla indirgenemez su içeriğini ve doymun hacimsel su içeriklerini gösterir;  $K_s$  doymuş hidrolik iletkenlik,  $h_g$  su basıncı için ölçek parametresi,  $n$  gözenek boyutu dağılım indeksi ve Mualem (1976) tarafından 0,5 olduğu varsayılan bir gözenek-bağlanabilirlik parametresidir.

## 2.9.2. Dual (Çift) permeabilite yaklaşımı ile modelleme

İkili geçirgenlik yaklaşımı, ortamı iki bölge halinde ele alır. Her bölgenin kendi geçirgenliği vardır. Bu bölgeler geçirgen bir arayüz ile ayrılır. Şekil 2.9'da Hydrus-1D yazılımında çift permeabilite modelinin bulunduğu aşama görülmektedir.



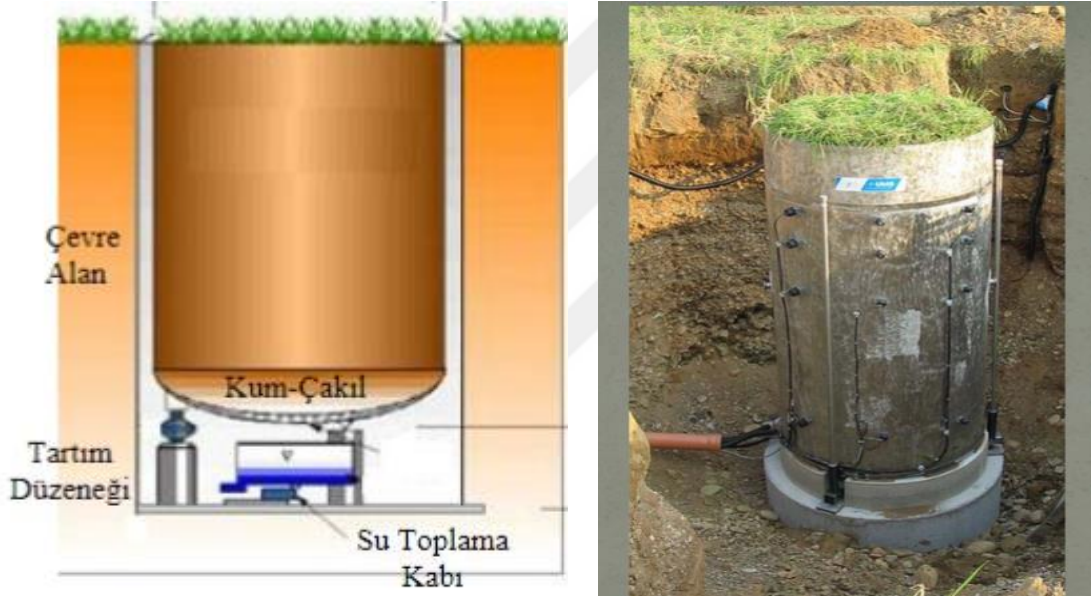
Şekil 2.9. Hydrus çift permeabilite yaklaşımında Gerke ve van Genuchten,1993 modeli

İlk bölgeyi matris bölgesi (alt simge  $m$ ) ve ikinci bölgeyi makro gözenek bölgesi gibi hızlı akış bölgesi (alt simge  $f$ ) olarak kabul ediyoruz. Hızlı akış bölgesi ve matris akış bölgesi denklemleri birbirinden farklıdır. Her iki bölge için Gerke ve van Genuchten (1993) denklem

modeli kullanılmaktadır. Hızlı akış bölgesi için denklem 2.16, matris akış bölgesi için ise denklem 2.17 kullanılmaktadır.

## 2.10. Deneysel Lizimetre

Çevresinden ayrılmış bitki örtüsü, bitki veya çıplak topraktaki evapotranspirasyon, yağmur suları, sulama vb. yollarla oluşan zemin kütleindeki değişimleri ölçmeye yarayan düzeneklere lizimetre denilmektedir. Şekil 2.10' da örnek bir lizimetre ve bu lizimetrenin sahadaki uygulaması görülmektedir.



**Şekil 2.10.** Örnek bir lizimetre düzenneği (sol) ve saha uygulaması (sağ) (Aydınşakir ve Büyüktaş, 2005 ; Koç, 2018)

Lizimetre ile ilgili ilk çalışmalar iklim bilimci ve matematikçi De La Hare tarafından 1688 yılında Paris'te gerçekleştirilmiştir. Lizimetreler yapımlarının basit olması ve kolay ölçüm yapılması dolayısı ile geniş bir kullanım alanına sahiptirler. (Aydınşakir ve Büyüktaş, 2005).

### 2.10.1. Deneysel lizimetre boyutları

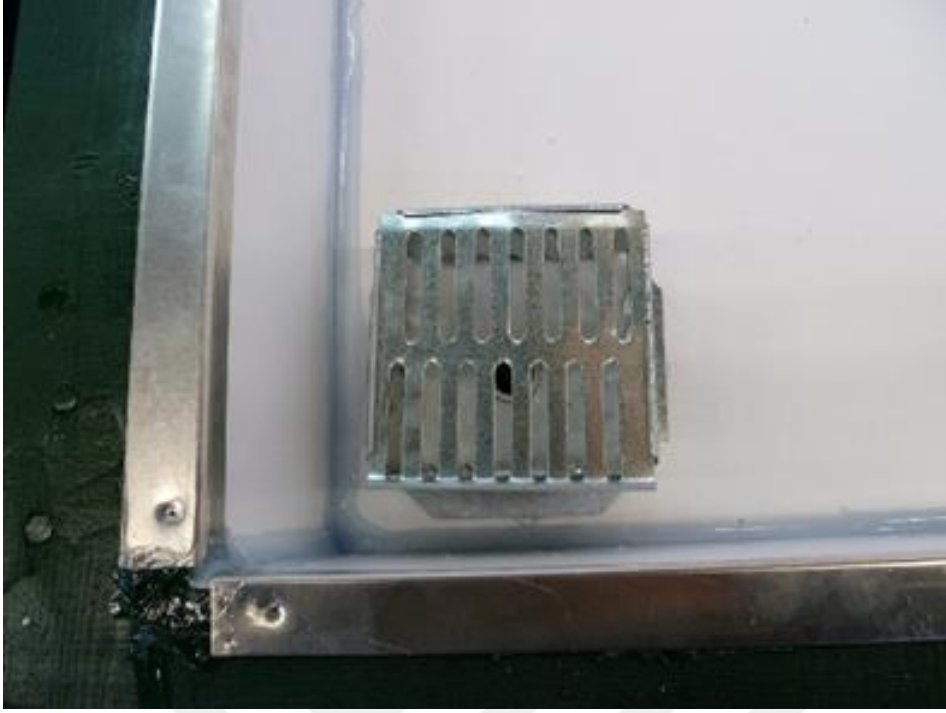
Bu çalışmada kullanılan hidrolojik veriler elde edilirken oluşturulan deneysel lizimetre çatı platformu Şekil 2.11'de görülmektedir.



**Şekil 2.11.** Deneysel lizimetre boya ve polistiren katman kaplanması (Yılmaz vd., 2016)

Deneysel çatı platformu aşama aşama oluşturulmuştur. Her bir lizimetre platformu 1500 mm\*1500 mm ölçülerinde oluşturulmuştur. Deneysel çatı platformları her biri eşit yükseklikte, tabanları eğimsiz dört adet ayak üzerine oturtulmuştur. Platformun her tarafına bir kat ahşap koruyucu boya uygulanmıştır. Ahşap 5 mm kalınlığında bitümlü buhar katmanı ile kaplanmış üzerine yalıtım katmanı olarak 60 mm kalınlıkta polistiren katman uygulanmıştır. Deneysel çatı platformu oluşturulurken Fransa bina yönetmeliği göz önünde bulundurulmuştur.

Boya ve polistiren kaplamasından sonraki hazırlık aşaması süzgeç yerleştirilmesi aşamasıdır. Şekil 2.12’de deneysel çatı platformu üzerine su tahliyesini gerçekleştirmek amacıyla yerleştirilmiş süzgeç görülmektedir.



**Şekil 2.12.** Deneysel lizimetre pvc boru ve süzgeç tertibatı montajı (Yılmaz vd., 2016)

Su tahliye çıkışı Fransız çatı kurallarına göre tasarlanmıştır. Platformun köşelerinden 120 mm uzakta olacak şekilde 30 mm çapındaki pvc malzemeden boru kullanılarak tasarlanmış ve üzerine süzgeç yerleştirilmiştir.

### **2.10.2. Yetiştirme katmanı**

Çatının yetiştirme katmanının %70'i mineral maddelerden %30'u ise organik maddelerden oluşturulmuştur. Mineral kısım 3/20 mm ponza taşları ve 7/15 mm puzolan karışımından meydana gelmiştir. Organik kısım ise deniz çamından elde edilen kompostlaşmış kabuk, 3/20 mm siyah torf ve 3/20 mm sarı torf karışımından oluşmuştur. Deneysel lizimetre üzerine eşit yükseklikte serilmiş yetiştirme katmanı Şekil 2.13'te görülmektedir.



**Şekil 2.13.** Deneysel lizimetre üzerine yerleştirilmiş 12 cm lik yetiştirme katmanı (Yılmaz vd., 2016)

Yetiştirme katmanı %5 azot, %3,5 susuz fosforik asit ve %8 potasyum oksit karışımından oluşan  $3 \text{ kg/m}^3$  uzun süreli mineral gübre içermektedir. Yetiştirme katmanında kullanılan gübre, katmandaki bitkilere altı ay yetecek kadar mineral sağlayacak şekilde ayarlanmıştır (Yılmaz vd., 2016). Deneysel çatılar  $1,5^\circ$  eğimli bir yol üzerine yerleştirilmiştir. Bu ortamın dane boyutu dağılımı tablo 2.3'te gösterilmiştir.

**Tablo 2.3.** Yetiştirme katmanı malzeme dağılımı (Yılmaz vd., 2016)

Çap (mm)	%malzeme
>31.5	0
>16	4.1
>8	50.9
>4	32.3
>2	5.3
>1	3
>0.2	0.5
>0.063	0.6
>0.02	1.7
>0.002	0.9
<0.002	0.7

Bu çalışmada 12 cm yetiştirme katmanlı ve üzerinde *Sedum album* bitkisi ile örtülü olan deneysel lizimetre verileri kullanılacaktır. Bunu lizimetrenin meteorolojik hadiselerle karşı hidrolojik tepkileri (su tutma ve yüzeysel akış “runoff”) verileri simülasyon yolu ile ve çift permeabilite yöntemi ile karşılaştırılacaktır.

### 2.10.3. *Sedum album*

Şekil 2.14’te deneysel lizimetre üzerine yerleştirilmiş *sedum album* bitki örtüsü görülmektedir.



**Şekil 2.14.** Yetiştirme katmanı üzerine *Sedum album* bitkisinin yerleştirilmesi (Yılmaz vd., 2016)

Yeşil çatı katmanlarını oluştururken en fazla kullanılan bulunan bitki çeşidi sukulent diğer adıyla etli bitkilerdir (Yılmaz vd., 2016). Yaprakları dolgun ve etli olduğu için etli bitkiler ismini almışlardır. Yetiştirme katmanında bulunan *Sedum album*’da bu sukulent çeşitlerinden biridir. Bu bitki Anadolu’da Çobankavurgası adıyla bilinmektedir. *Sedum album* kuraklığa oldukça dayanıklı ve çok yıllık bir bitki türüdür. Ayrıca bu bitkinin bakıma oldukça az ihtiyaç duyması da yeşil teras çatılarda kullanılmasında ki bir diğer nedendir.

## 2.10.4. Ölçüm aletleri

### 2.10.4.1. Meteoroloji istasyonu

Deneysel çatı katmanı sıcaklıkları, oluşturulan deneysel katmanın ortasına yerleştirilen prob lar aracılığıyla kaydedilmiştir. Radyasyon ve atmosferik hava sıcaklığı Şekil 2.15’te görülen meteoroloji istasyonu yardımıyla ölçülmüştür.



**Şekil 2.15.** Verilerin elde edildiği meteorolojik istasyonun görünümü (Yılmaz vd., 2016)

Gece dönemi radyasyonu sıfır olarak kabul edilirken gündüz dönemi radyasyonu sıfırdan farklı pozitif değer olarak tespit edilmiştir. Meteoroloji istasyonu yağış, hava sıcaklığı, havanın bağıl nemi, atmosferik basınç, radyasyon ve rüzgâr hızı ile yönünü bir dakikalık frekansta ölçmektedir.

#### 2.10.4.2. Yetiştirme katmanındaki su muhtevası ölçümü

İki adet sıcaklık probu yetiştirme katmanının yüzeyine ve ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Yetiştirme katmanının içerisindeki hacimsel su içeriğini ölçmek için alan frekans tepkisine duyarlı dört adet su içeriği probu (CS616, Campell Scientific) kullanılmıştır. Şekil 2.16'da lizimetre üzerindeki bir prob ve bu problemlerin deneysel lizimetreye nasıl yerleştirildiği mesafeler görülmektedir.

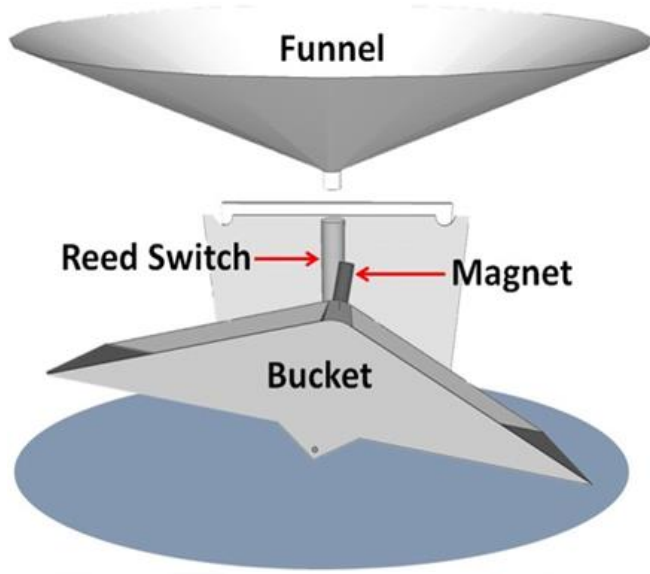


Şekil 2.16. TDR CS616 campbell scientific (sol) ve lizimetredeki konumları (sağ) (Yılmaz vd., 2016)

Problar deneysel çatının her bir köşesinden 300 mm kenarından ise 50 mm uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Hacimsel su içeriğini ölçen su problemlerinin kalibrasyonu Rudiger ve diğerleri (2010) tarafından önerilen yöntemine göre yapılmıştır. Deneysel çatıların ortalama su muhtevası kullanılan dört adet probun ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

#### 2.10.4.3. Lizimetreden debi ölçümü

Deneysel lizimetreye gelen yağışın debisini ölçmek için mekanik debi ölçer mekanizması kullanılmıştır. Şekil 2.17'de mekanik debi ölçer mekanizmasını meydana getiren bütün elemanları belirtilmiştir.



**Şekil 2.17.** Lizimetre altına yerleştirilmiş mekanik debi ölçer düzeneği (Yılmaz vd., 2016)

Deneysel çatıya gelen yağış zeminden aşağı süzölmeye başlar ve alttaki drenaj katmanına kadar gelir. Drenaj katmanına gelen yağış, üzerine süzgeç yerleştirilen çıkışa akar. Deneysel çatıdan çıkan yağış, üst kısmında geniş bir huni (funnel) bulunan mekanik debi ölçer aletine gelir. Huniden süzölen yağış her yirmi milimetre yağış dolunca devrilmek üzere ayarlanmış devrilme kovası (bucket)'nda toplanır. Mekanik anahtar ile ayarlanmış devrilme kovası her yirmi milimetrelik yağışa ulaştığında devrilir ve debi ölçümü yapılır.

#### **2.10.4.4. Veri toplama (data logger)**

Bu çalışmada kullanılan yağış ve diğer bütün meteorolojik veriler Şekil 2.18'de görölen kayıt cihazına aktarılmıştır.



**Şekil 2.18.** Meteorolojik istasyondan alınan verileri depolayan CRX3000 datalog-ger Campbell scientific veri kayıt cihazı (Yılmaz vd., 2016)

Birden çok sensör içeren karmaşık uygulamaları destekleyen ve meteorolojik verileri kaydetmede sıklıkla kullanılan CRX3000 Campell Scientific Datalog-ger isimli veri kaydedicide onar dakika aralıklarla depolanmıştır.

### **2.11. Araştırılan Periyot ve Kayıt Edilen Veriler**

14 Temmuz 2011 ile 28 Temmuz 2011 arası (toplam 15 gün), meteorolojik olaylar (yağmur, sıcaklık, rüzgâr vb.), ve 12 cm yetiştirme katmanlı üzerinde *Sedum album* bitki örtüsü bulunan lizimetrenin verileri kaydedilmiştir. Araştırmada bu veriler kullanılmıştır.

### **2.12. Hydrus-1D Yazılımı ile Hidrolik Tepkilerin Simülasyonu**

Elde edilen meteorolojik veriler, H1D sonlu eleman çözümü yapabilmesi için üst koşullu olarak kullanılmıştır (yağış ve terleme-buharlaştırma). Başlangıç koşullu ise, zemin içindeki su muhtevası, TDR ölçümleri kullanılmıştır.

Zeminin karakteristik fonksiyonları tek ve çift permeabilite akış modeli varsayımı için Lassabatere vd. (2014)'nin infiltrasyon deneylerinden türettikleri veriler aşağıdaki Tablo 2.4'te özetlenmiştir.

**Tablo 2.4.** Tek (TK) ve Çift (DK) permeabilite modellemesinde kullanılan deneysel çatı verileri (Lassabatere vd., 2014)

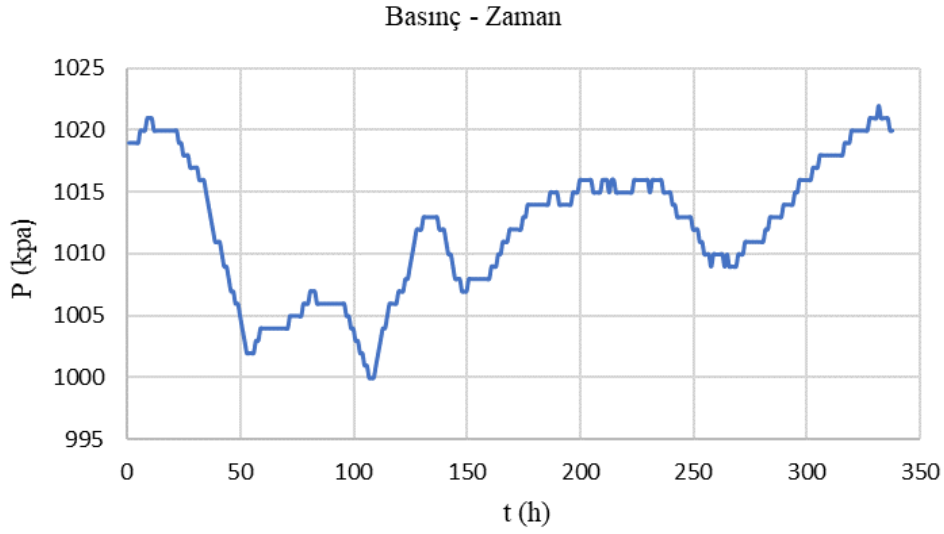
Parametreler	Yetiştirme katmanı					
	1. Veri seti		2. Veri seti		Ortalama veri seti	
	TK	DK	TK	DK	TK	DK
$\theta_{r,m}$	0	0	0	0	0	0
$\theta_{s,m}$	0.681	0.681	0.681	0.681	0.681	0.681
$\alpha_m, mm^{-1}$	$8.90 \times 10^{-3}$	$4.18 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-3}$	$2.28 \times 10^{-3}$	$5.59 \times 10^{-3}$	$3.23 \times 10^{-3}$
$K_{s,m}, mm \text{ min}^{-1}$	$3.36 \times 10^{-1}$	$1.35 \times 10^{-1}$	$1.64 \times 10^{-1}$	$6.62 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-1}$	$6.78 \times 10^{-1}$
$n_m$	1.24	1.23	1.13	2.27	1.19	1.75
$l_m$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$\theta_{r,f}$	-	0	-	0	-	0
$\theta_{s,f}$	-	0.681	-	0.681	-	0.681
$\alpha_f, mm^{-1}$	-	$3.08 \times 10^{-2}$	-	$2.20 \times 10^{-2}$	-	$2.64 \times 10^{-2}$
$K_{f,m}, mm \text{ min}^{-1}$	-	$3.39 \times 10^0$	-	$1.48 \times 10^0$	-	$2.44 \times 10^0$
$n_f$	-	1.84	-	1.96	-	1.9
$l_f$	-	0.5	-	0.5	-	0.5
$w$	-	0.027	-	0.027	-	0.027

$\theta_r$ : Rezidüal (indirgenemez) hacimsel su içeriği,  $\theta_s$ : doygun hacimsel su içeriği,  $\alpha$ : ampirik parametre ile ilgili su basıncı yüksekliği,  $K_s$ : permeabilite katsayısı,  $n$ : gözeklerin dağılım indeksi,  $l$ : gözeneklerin bağlanabilirlik parametresi,  $w$ : hızlı akış bölgesindeki hacmin bütün hacme oranını belirtir. Hızlı akış bölgesi için alt simge “ $f$ ” matris akış bölgesi için ise alt simge “ $m$ ” kullanılmıştır. Matris akış bölgesi ile hızlı akış bölgesi hidrolik özellikleri arasında ciddi farklılıklar olmadığı Tablo 2.4'ten görülmüştür. Buna karşın  $K_s$  değerleri arasında dikkate alınacak derecede farklılıklar mevcuttur.

## 2.13. Meteorolojik Veriler

### 2.13.1. Basınç

Meteorolojik istasyondan alınan verilere göre şekil 2.19'daki basınç-zaman grafiği elde edilmiştir.

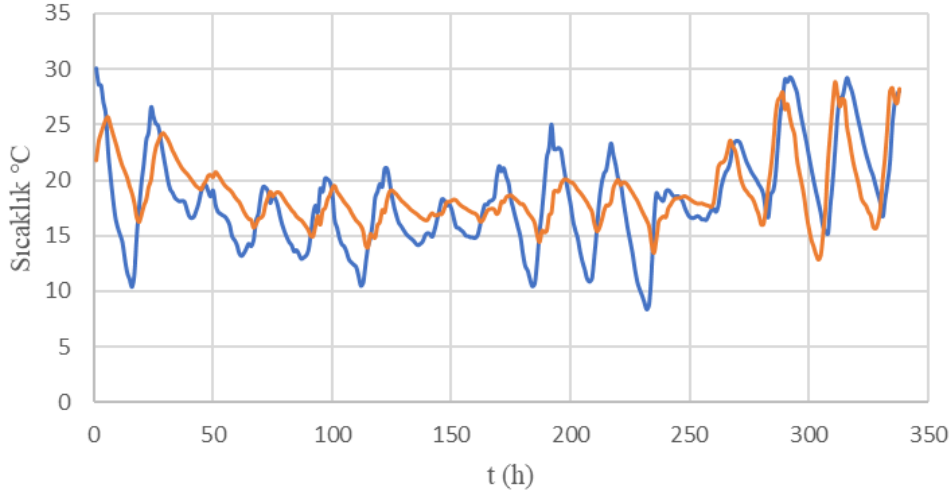


Şekil 2.19. Atmosferik hava basıncının değişimi gösteren grafik

Ölçüm yapılan zaman aralığında atmosferik hava basıncı 1021-1000 kilo paskal (kpa) değerleri arasında değişkenlik göstermiştir.

### 2.13.2. Sıcaklık

Meteorolojik istasyondan alınan veriler neticesinde Şekil 2.20'de görülen katman sıcaklıkları ve yüzey sıcaklıkları değerleri elde edilmiştir.

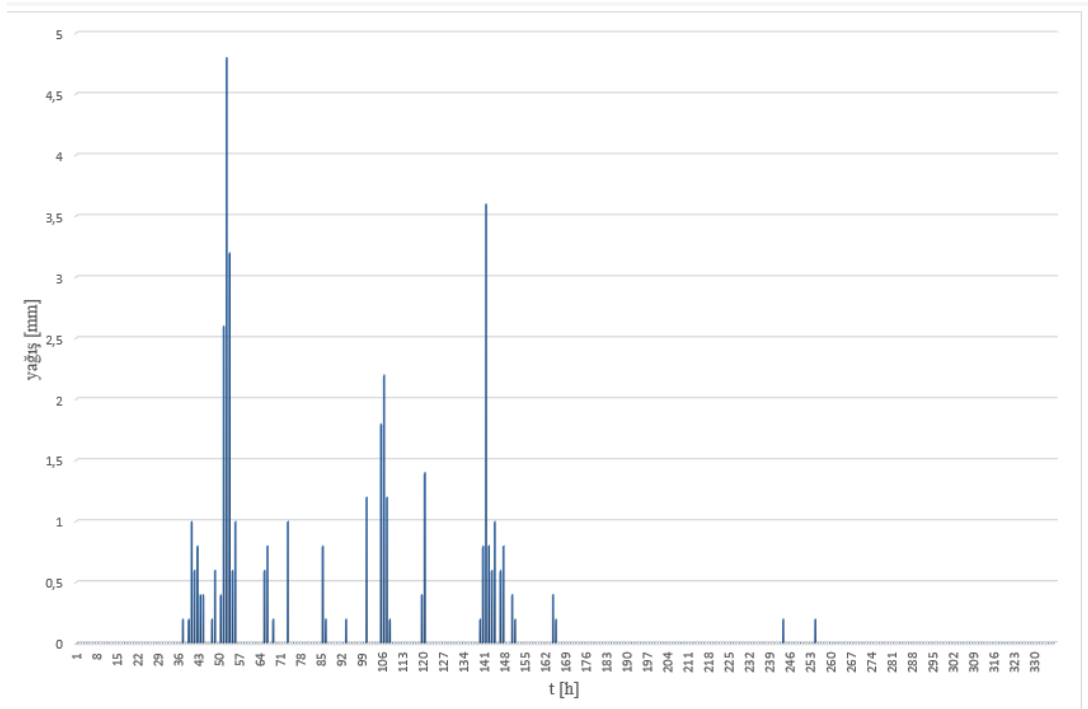


**Şekil 2.20.** Yetiştirme katmanı (mavi) ve yüzey (portakal) sıcaklıkları

Görüldüğü üzere yüzey ve katman sıcaklık değerleri genel olarak paralellik göstermiştir. En yüksek sıcaklık yaklaşık olarak 30°C, en düşük sıcaklıkta 8.3°C olarak ölçülmüştür.

### 2.13.3. Yağmur

Meteorolojik istasyondan alınan verilere göre Şekil 2.21'deki grafik oluşturulmuştur.



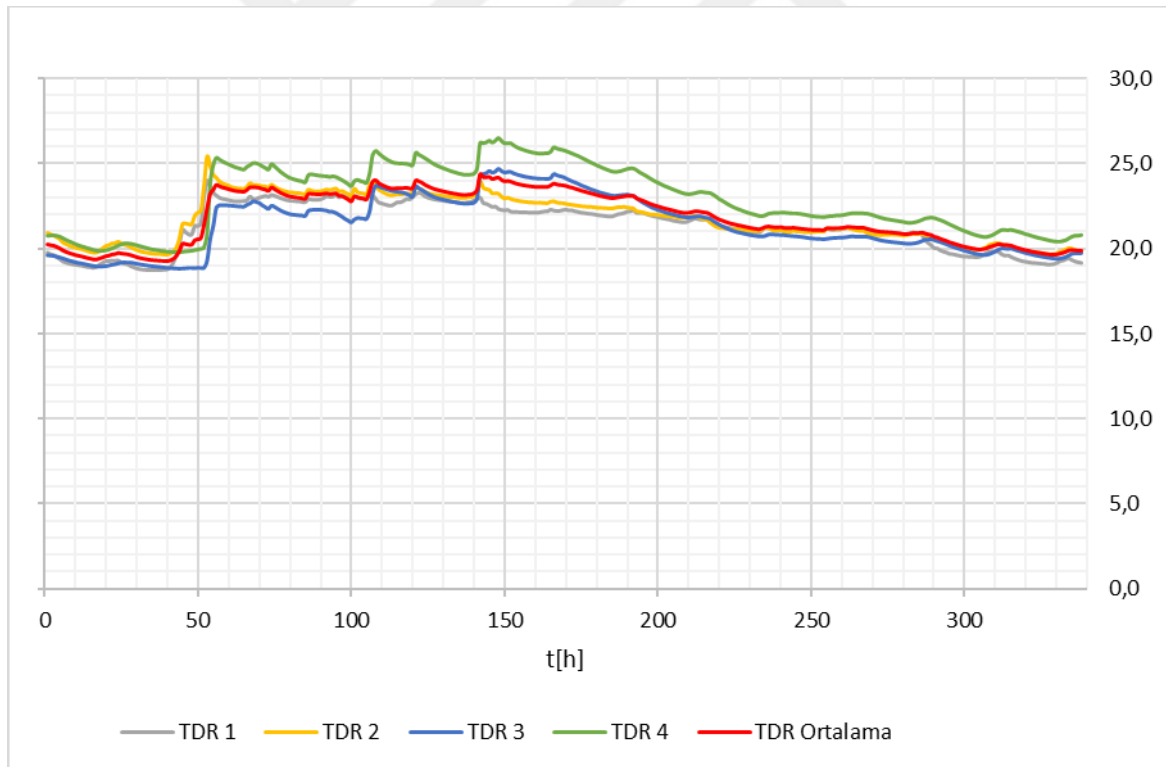
**Şekil 2.21.** Meteorolojik istasyondan alınan yağış verileri

On dört günlük (336 saat) izleme periyodunda, toplam 39,2 mm yağmur ölçülmüştür. Bu on dört günlük yağmur hadisesi içerisinde önemli olarak üç ayrı pik noktası oluştuğu söylenebilmektedir. Bahsedilen pik noktaları, 53. Saatte 4,8 mm, 107. Saatte 2,2 mm, 142. Saatte 3,6 mm yağış olarak gerçekleşen pik noktalarıdır.

## 2.14. Ölçülen Hidrolojik Tepkiler

### 2.14.1. TDR ölçümler

DeneySEL çatı içerisine yerleştirilen kalibrasyonu yapılmış dört adet TDR CS616 problarından alınan verilere göre su muhtevası ölçümleri yapılmıştır. Şekil 2.22’de dört adet probun ölçümleri ve ortalama su muhtevası gösterilmiştir. Su muhtevası kavramı birimsizdir.



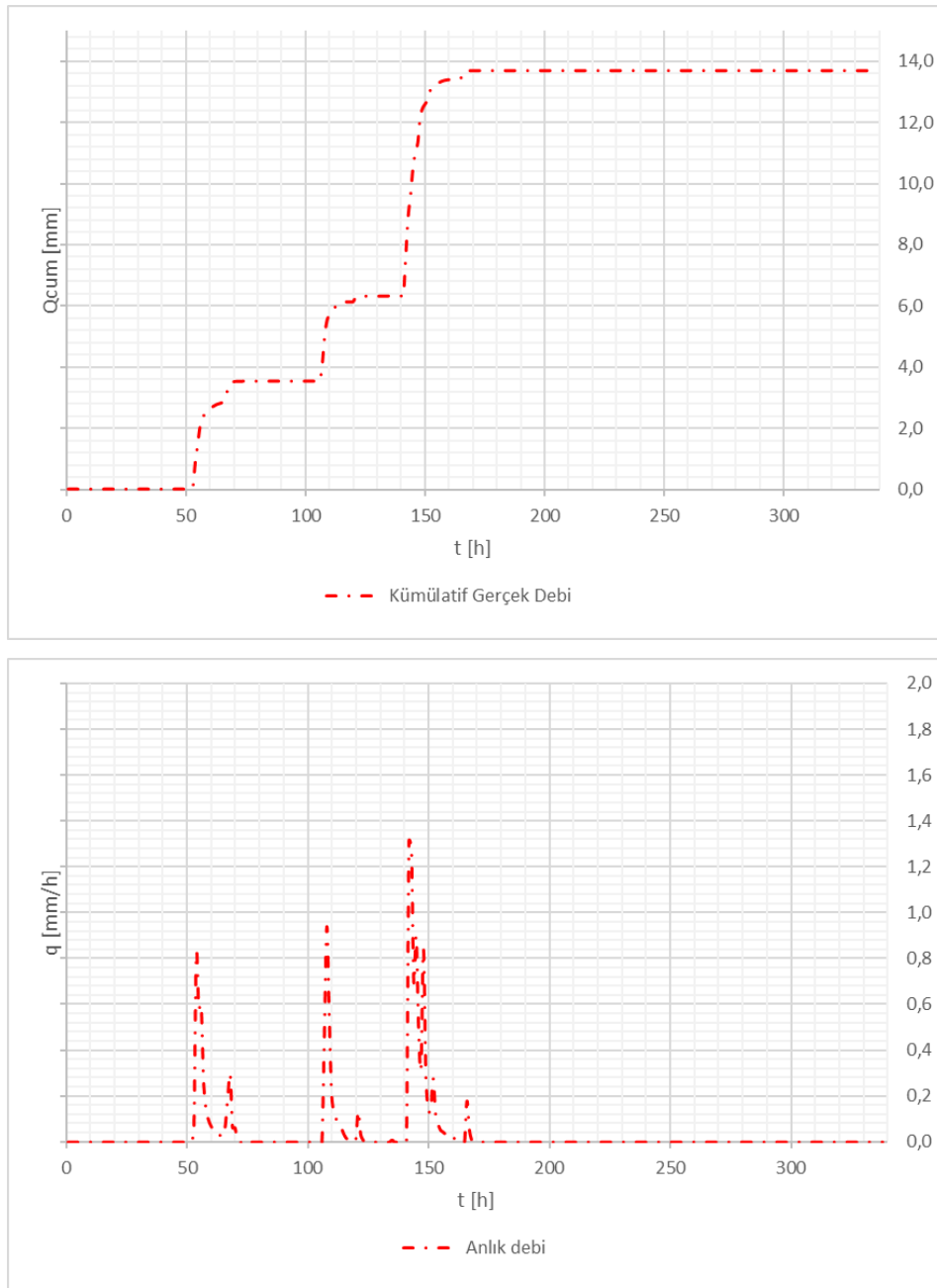
Şekil 2.22. Yetiştirme katmanında bulunan dört adet probun su muhtevası grafiği

TDR1 probunda 18,75 en düşük su muhtevası, 23,98 en büyük su muhtevası; TDR2 probunda 19,70 en düşük su muhtevası, 25,39 en yüksek su muhtevası; TDR3 probunda

18,80 en düşük su muhtevası, 24,66 en büyük su muhtevası; TDR4 probunda 19,80 en düşük su muhtevası, 26,47 en büyük su muhtevası olarak ölçülmüştür.

### 2.14.2. Hidrolojik tepkiler: kümülatif debi ve anlık debi (runoff)

Deneysel lizimetreden elde edilen veriler kullanılarak Şekil 2.23'te görülen kümülatif debi-zaman ve debi-zaman grafikleri oluşturulmuştur.



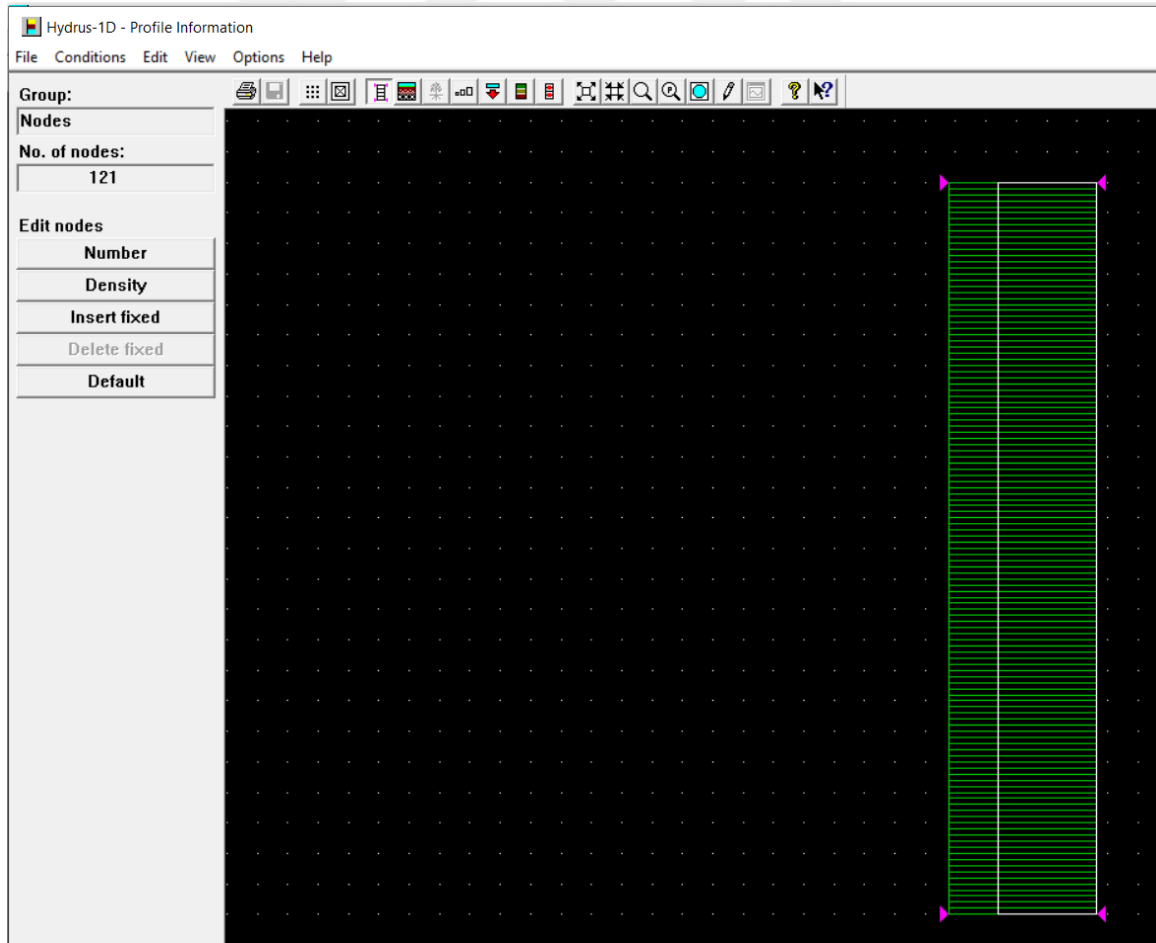
Şekil 2.23. Kümülatif debi (üst) ve anlık debi (runoff) (alt)

İlk olarak 53. saatte 0.8 mm/saat şiddetinde bir akış debisi gözlemlenmiştir. İkinci debi akışı 104. saate 0.95 mm/saat şiddetinde maksimum bir debi gözlenmiştir. En son gözlemlenen debi akışı 169. saattedir, şiddeti 1.3 mm/saat olmak üzere ölçülen en yüksek piktir. Bu son debi hadisesinden sonra anlık debi değeri sıfırlanmıştır. Kümülatif gerçek debide bahsedilen 169. saatte 13,6905 mm olarak pik değerine ulaşmıştır ve yağmur olmadığında bu değerde kalmıştır. Ölçülen toplam yağmur miktarı bu zaman aralığı için 39.2 mm olduğunda, deneysel yeşil çatı yağmur suyunun %65'inin tutmuştur.

## 2.15. H1D Direk Simülasyonu

### 2.15.1. Sonlu eleman konfigürasyonu

Şekil 2.24'te H1D yazılımındaki elemanların konfigürasyonu gösterilmiştir.

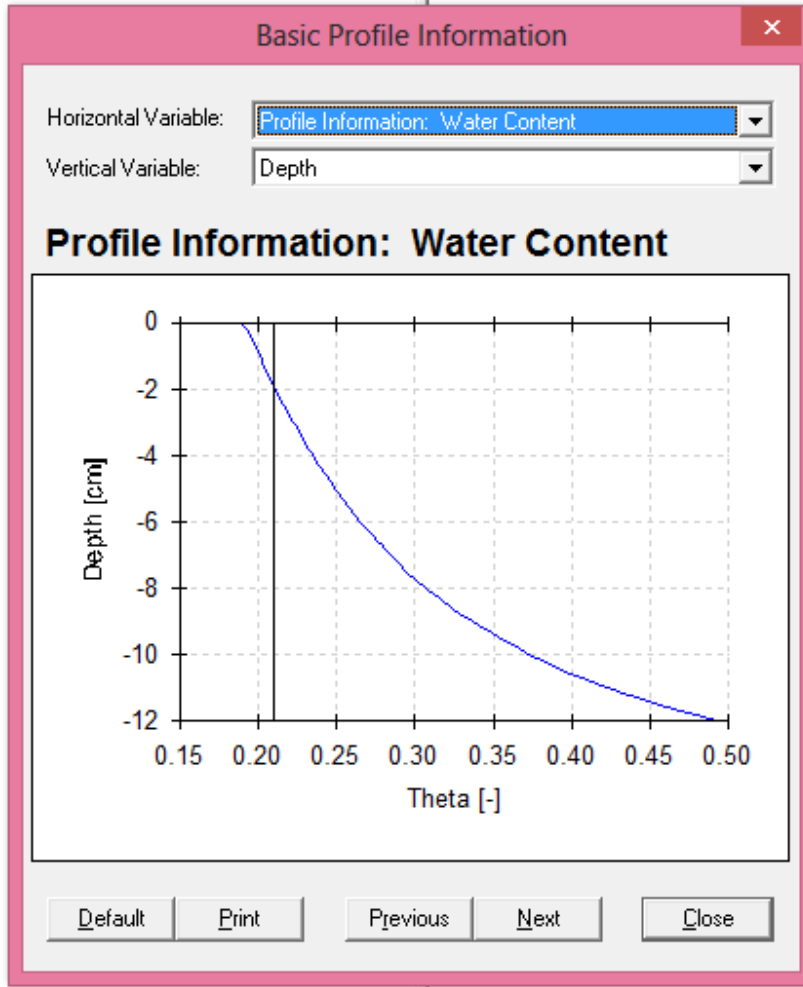


Şekil 2.24. H1D sonlu eleman konfigürasyonu

12 cm yetiştirme katman, 121 sonlu eleman ile tasarlanmıştır. Konfigürasyondaki her elemanın boyutu yaklaşık olarak (12 cm /121) 0,1 cm ye tekabül etmektedir.

### 2.15.2. Başlangıç koşulu

Başlangıç su muhtevası TDR ölçümleri esas alınarak, homojen dik bir profil kullanılmıştır. Şekil 2.25'te Hydrus-1D yazılımındaki bu dik profil görülmektedir.

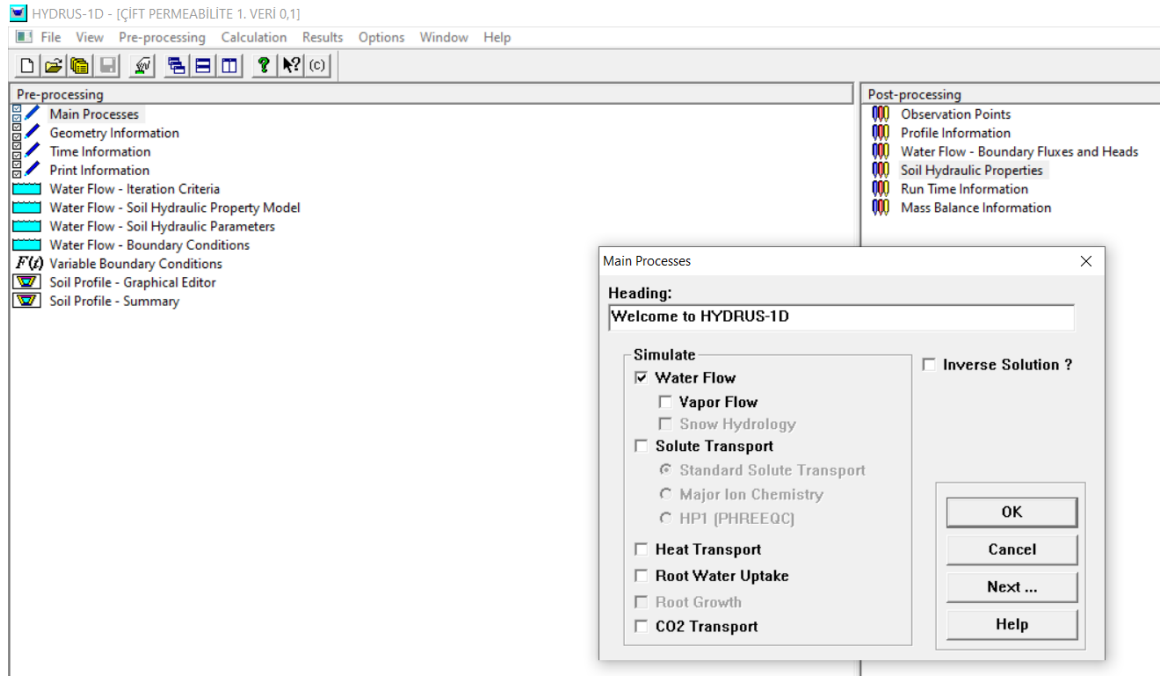


Şekil 2.25. Başlangıç su muhteva profili ( $\theta_i=0.21$ )

$\theta_i=0,21$  olarak giriş parametresi olarak konfigürasyon sayfasında girilmiştir (siyah dik çizgi). Mavi eğri ise simülasyonun sonundaki su muhtevası profili. Hydrus yazılımında önceden belirtmek üzere, istenilen belli zamanlarda su muhtevası profili istenebilir. Bu özellikle “printed time” fonksiyonu kullanılarak mümkündür.

### 2.15.3. Zemin karakteristik parametreleri

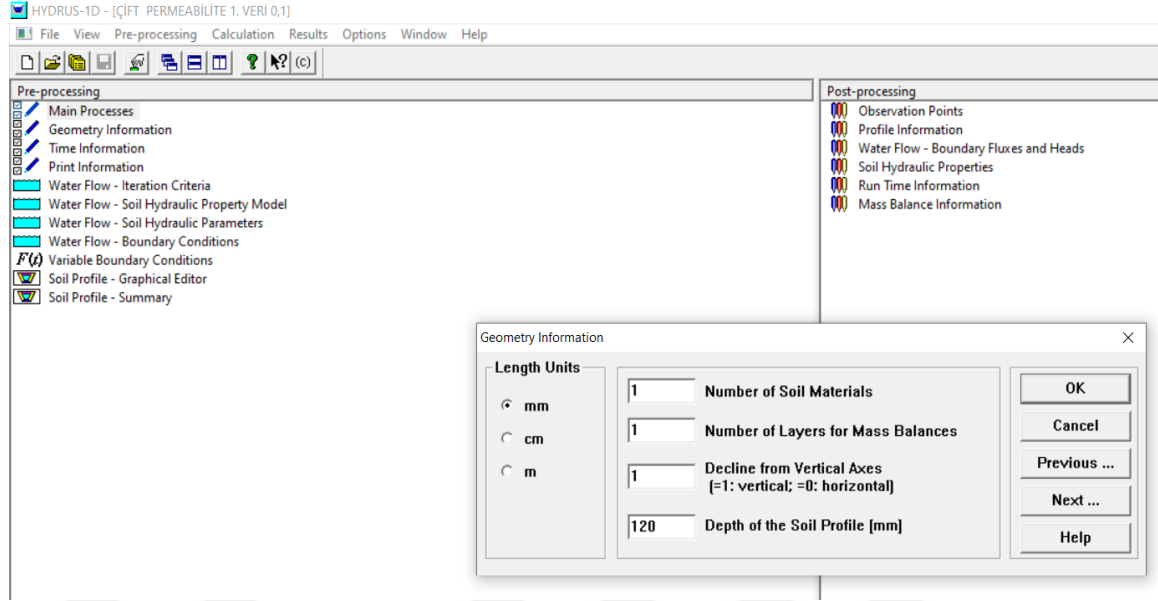
H1D yazılımında 12 cm'lik yetiştirme katmanı konfigürasyonu yapılırken ilk adım olarak programın temel süreçler başlığı altındaki su akışı (water flow) parametresi seçilerek başlanılmıştır. Şekil 2.26'da bu işlem görülmektedir.



Şekil 2.26. Hydrus-1D yazılımı temel süreçler

Ana süreçler başlığı altındaki seçilen su akışı parametresi ve bu başlıkta bulunan solute transport (çözünen madde taşınımı), heat transport (ısı taşınımı), root water uptake (kökten su alımı), CO<sub>2</sub> transport (karbon dioksit taşınımı) gibi H1D yazılımının konfigüre ettiği diğer parametrelerde görülmektedir.

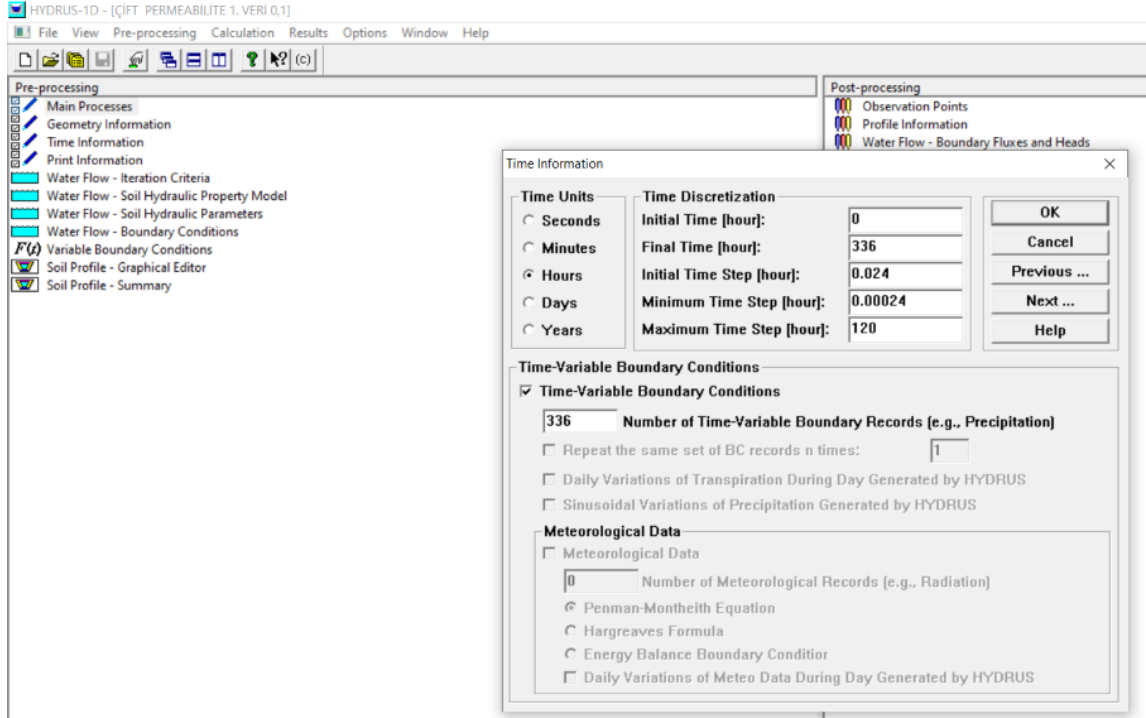
H1D yazılımında konfigürasyonun ikinci aşaması Şekil 2.27'de görülen yetiştirme katmanının yüksekliği/derinliği parametresinin seçildiği aşama gelmektedir.



Şekil 2.27. Hydrus-1D yazılımı yetiştirme katmanının geometrik bilgileri

Toprak profilinin derinliği “*depth of the soil profile*” parametresi 120 milimetre olarak konfigürasyon sistemine girilmiştir. Bu değer deneysel lizimetrede bulunan toprak katmanının yüksekliğidir.

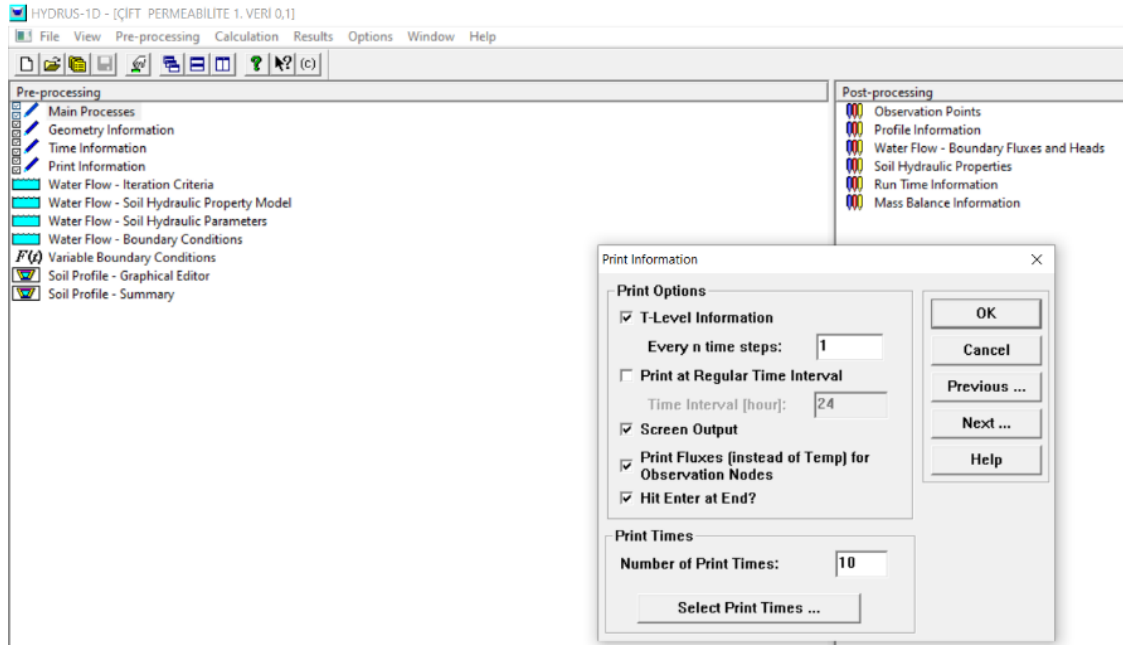
Konfigürasyonun üçüncü aşamasında meteorolojik istasyondan alınan zaman ile ilgili bilgiler H1D yazılımına girilmiştir. Başlangıç saati 0, bitiş saati ise 336. saattir. Şekil 2.28’de görülen üzere zaman ile ilgili veriler saat cinsinden olmak üzere toplamda 336 saattir.



Şekil 2.28. Hydrus-1D yazılımı zaman verileri ile ilgili bilgiler

Burada saniye, dakika, gün ve yıl üzerinden farklı zaman periyotları mevcuttur. Minimum ve maksimum zaman adımları sistemin otomatik verileridir, bunlarda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Meteorolojik veri (meteorological data) parametresinde ise Penman-Montheith Denklemi H1D yazılımı tarafından otomatik olarak işaretlemiştir.

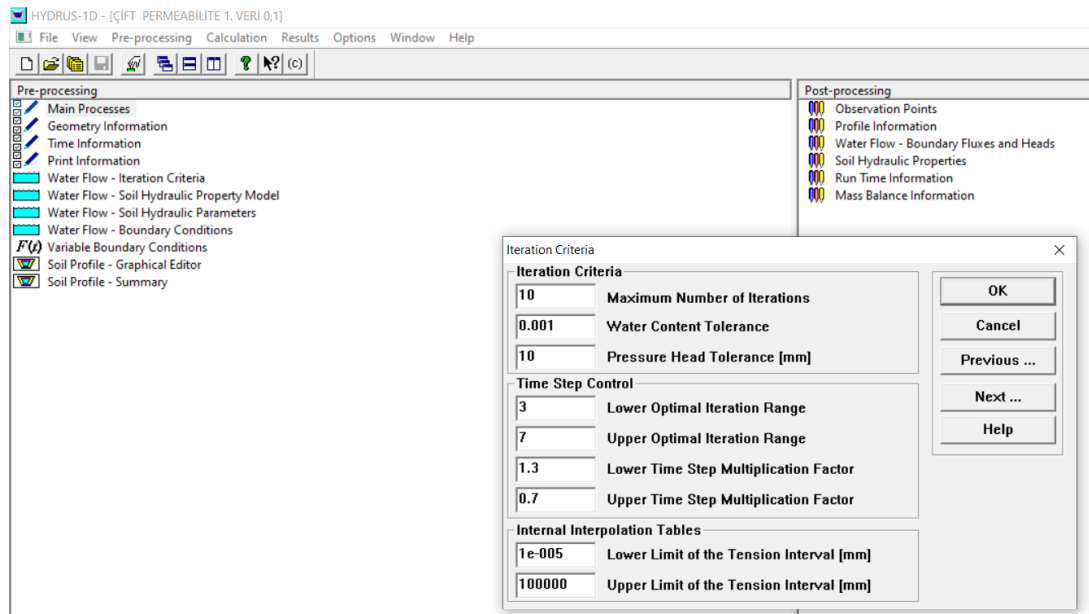
Konfigürasyon yapılırken yazılımın otomatik olarak verdiği yazıcı ile ilgili bilgilerde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Şekil 2.29'da H1D yazılımında mevcut olan parametreler görülmektedir.



Şekil 2.29. Hydrus-1D yazılımı yazıcı ile ilgili bilgiler

Buradaki veriler programın otomatik atadığı verilerdir. Bu verilerde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

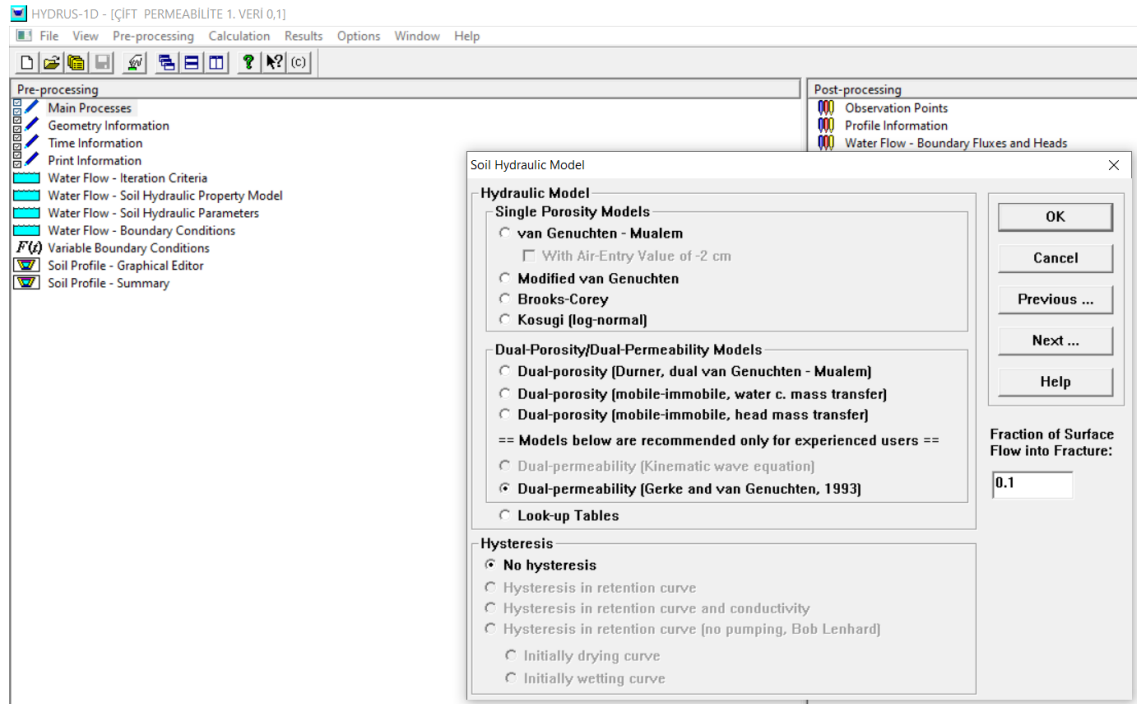
Konfigürasyonun yazıcı parametreleri aşamasından sonra gelen aşama olan Şekil 2.30'da görülen iterasyon parametresine ait verilerin girilmesi gereken aşama gelmektedir.



Şekil 2.30. Hydrus-1D yazılımı iterasyon (yineleme) kriterleri

Buradaki veri girişlerinde de herhangi bir değişiklik yapılması ihtiyacı görülmediğinden Hydrus-1D yazılımının otomatik verileri kullanılmıştır.

İterasyon parametrelerinden sonra yetiştirme katmanının konfigürasyonunda kullanılacak olan hidrolik modelin tespiti aşaması gelmektedir. Şekil 2.31’de Hydrus-1D yazılımındaki hidrolik modellemeler görülmektedir.



Şekil 2.31. Hydrus-1D yazılımı yetiştirme katmanı hidrolik modeli

Burada konfigürasyonumuz için dual permeabilite (Gerke and van Genuchten, 1993) modeli seçilmiştir. Aynı şekilde farklı akış modelleri tercih edilebilir. Örneğin homojen yaklaşım “single permeability” model tercih edilebilir. Bu takdirde, van Genuchten, Brooks Corey ve Kosugi modelleri tercih edilebilir. Dual permeabilite modeli seçilmesi durumunda, matris ve makropore bölgeleri için Hydrus çift permeabilite model için zemin karakteristik fonksiyonlarından sadece van Genuchten modelini seçmektedir. Yani bu durumda Brooks-Corey gibi model tercih edilmesini mümkün kılmıyor. Bu durumlarda, başka bir yazılım veya openFoam tarzı açık yazılımlara istenilen fonksiyonlar programlana bilir.

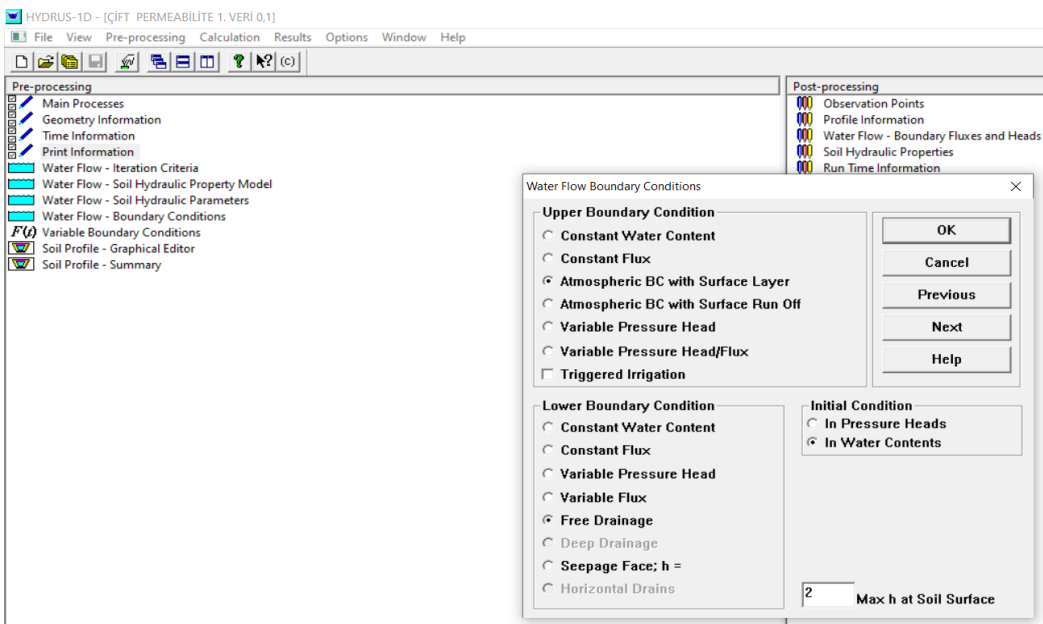
Bu aşamada ayrıca şekil 2.31’de sağ sütündeki boşluk kutucuğuna ile gösterilen yüzey akışı parametresi (fraction of surface) için veri girişi yapılması istenilmektedir. Bu parametreyi  $w_{\text{yüzey}}$  ( $w$ ) olarak adlandırıyoruz. Buradaki söz konusu yüzey akışın matris ve makropor fraksiyonun temsil eden parametresidir. Örneğin 0.1 değeri için, yüzeydeki akışın yüzde 10’nun makropor bölgesine temas ettiğini ve geri kalanı normal matrisle sızdığını belirtmektedir. Bu durum sadece 1 boyutlu akış için geçerlidir. 3 Boyutlu akışta, bu türden bir parametre girilmemektedir. Yüzey dışı konumlar için, Hydrus-1D çift permeabilite modelin ( $w$ ) değerini kullanıyor (Tablo 2.4). Söz konusu  $w_{\text{yüzey}}$  değerinin başlangıçta ne olduğu bilmediğimiz için 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 değerleri ayrı ayrı konfigüre edilmiş Şekil 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 ve 3.5’deki grafikler elde edilmiştir. Yüzey akışı parametresinin 0.5 ten büyük seçilen değerleri gerçek değerlerden fazla uzaklaştığı için 0.5’e kadar konfigürasyon durumları test edilmiştir. Yüzey akış matris ve makropor fraksiyonun temsil eden bu parametre, permeabilite modelindeki  $w$  farklı olabilir. Şekil 2.31’de hidrolik model ve yüzey akış parametresinin 0.1 seçildiği bir örnek görülmektedir. Yine çift permeabilite akış modeli tercih edildiğinde “hysteresis” seçilmesini mümkün kılmıyor. Bu aşamada konfigürasyonda su akışı parametreleri bölümü bulunmaktadır. Burada tek permeabilite veya çift permeabilite için zemin hidrolik fonksiyonların parametreleri girilir. Şekil 2.32’de bu parametreler görülmektedir.



Şekil 2.32. Hydrus-1D yazılımı su akış parametreleri

Burada kullanılan veriler Tablo 2.4'deki tek ve çift (dual) permeabilite başlığı altında belirtilen Lassabatere vd. (2014)'nin infiltrasyon deneylerinden türettikleri verilerden oluşmaktadır. Şekil 2.32'de çift permeabilite akış modeli için Tablo 2.4'ün verilerinin Hydrus-1D yazılımına girildiği görülmektedir. Bu çalışmada iki akış bölgesi arasında "Exchange" yani difüzyon mekanizmasının oluşturduğu, su akışının olmadığını varsaydık. Aslında bu iki bölge arasındaki difüzyon akış parametrelerini tayin etmek için, laboratuvar ortamında "tracer" deneyi yapılması gerekmektedir ve bu iki bölge arasındaki difüzyon akış parametreleri tayin etmek mümkündür. Araştırmada, bu türden bir veri elimizde olmadığı için ve yeşil çatının gözenekli katmanın sadece 12 cm olduğunu öngördüğümüz için iki bölge arasındaki difüzyon akışının ihmal edilebileceğini varsaydık. Bunun içinde  $K_{sa}$  parametresini 0 cm/saat olarak seçtik. Yine burada gamma,  $\beta$  ve  $a$  parametreleri (Şekil 2.32, sağ alt şekil) zemini oluşturan taneciklerin geometrik şekilleri ile ilgili olduğu ve iki bölge arasındaki difüzyon akışı hesaplamalarında kullanıldığı için bu değerleri değiştirmedik (Hydrus modelin sunduğu parametreleri Gerke ve ark, 1993 kullandığı değerlerdir).

Simülasyon parametre konfigürasyonunun bu aşamasında, sınır koşulları verilerine göre, hesaplamalar ya emme basıncı ("in Pressure Heads) ya su muhtevası ("in Water Contents) ile tercih edilir. Şekil 2.33'te su muhtevasının seçildiği görülmektedir.



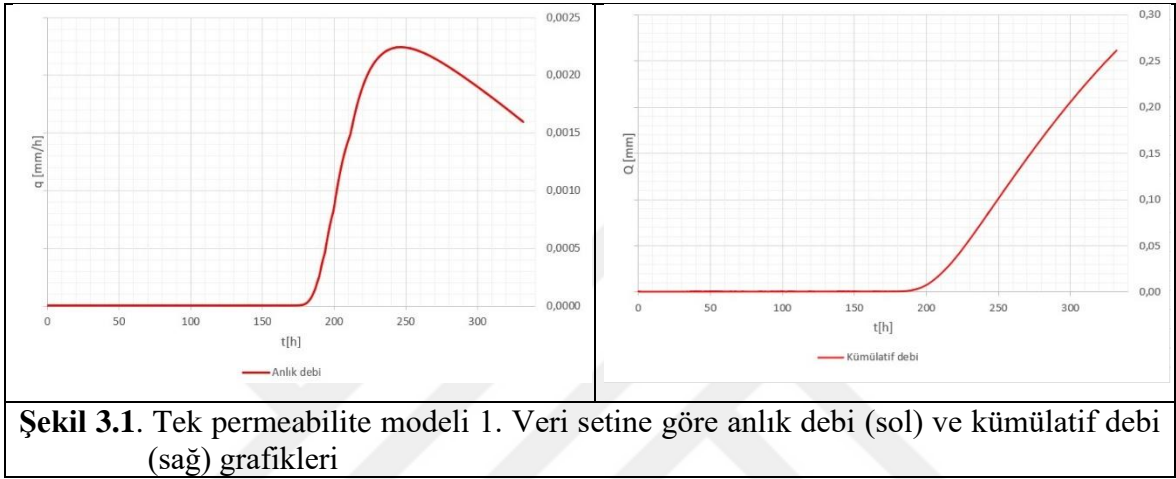
Şekil 2.33. Hydrus-1D yazılımı su akışı sınır koşulları

Zeminin su muhtevasının basit örnekleme sayesinde laboratuvar ortamında elde edildiği için çoğu zaman başlangıç koşullun su muhtevası olarak girildiği hallerde su muhtevası ile hesaplar yapılır. Tam tersine, örneğin doygun haldeki bir durumda, sınır koşulu  $h=0$  cm olduğunda, o zaman hesaplar emme basıncı ile yapıla bilinir. Yine bu seçiminize göre üst ve alt sınır koşullarını (boundary conditions - B.C) belirtmemiz gerekmektedir. Bu tezde gerçek atmosferik meteorolojik veriler kullanıldığından “Atmosferik B.C “tercih edilmiştir. Burada yüzey akışın mümkün olmadığı, yani sistemin dışına su çıkmadığından “runoff” tercih edilmemiştir. Burada yağmur suyunun çatının üzerinde belli bir miktarda bir su yükü oluştura bileceğini var saydık. Bu durumda, çok şiddetli yağmurda ve permeabilitenin üstünde bir akış var ise, su yükü geçici olarak oluşa bilecektir ve sağ alt kutucukta maksimum su yükünü belirte biliriz. Bu örnekte 2 mm su yükü oluşmasını izin verdik. Alt sınır koşul içinde serbest drenaj opsiyonu tercih edilmiştir. Yine probleminiz şartlarına göre, değişik sınır koşuları tercih edilebilir.

### 3. BULGULAR VE TARTIRŞMA

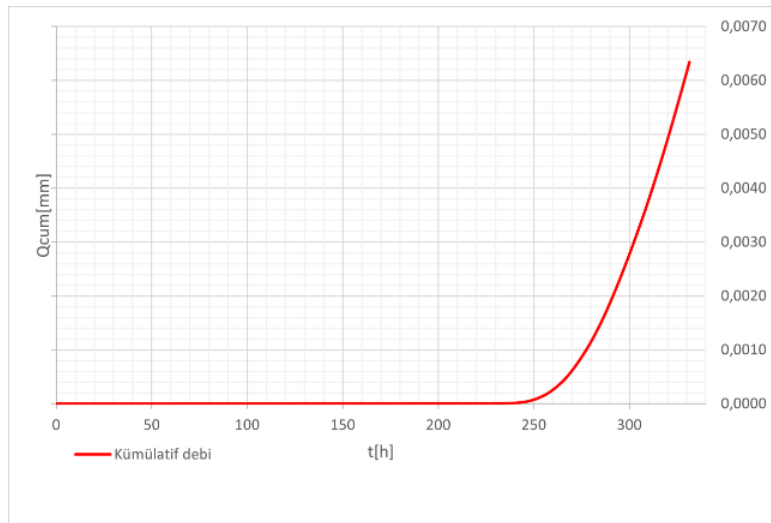
#### 3.1. Tek Permeabilite Akış Modelinin Simülasyon Sonuçları

Şekil 3.1’de tek permeabilite (TK) modeli ve Tablo 2.4 birinci sütun verileri ile simüle edilen kümülatif debi ile gerçek debi sonuçları gösterilmektedir.



TK modeli toplam 0.26 mm kümülatif debi simüle etmiştir. Buda gerçek kümülatif debi 13.9 mm olan debinin çok çok altında ve oran olarak yağmur suyun %99 yeşil çatı sistemin tarafından tutulduğu anlamına gelmektedir. Anlık debi ise (Şekil 3.1, sol), 175. saatlerde oluşmakta ve simülasyon sonuna kadar devam etmektedir.

Tablo 2.4’te bulunan ortalama veri setindeki verilere göre TK modeli ile simüle edilmiş ve Şekil 3.2’deki grafik ortaya çıkmıştır.



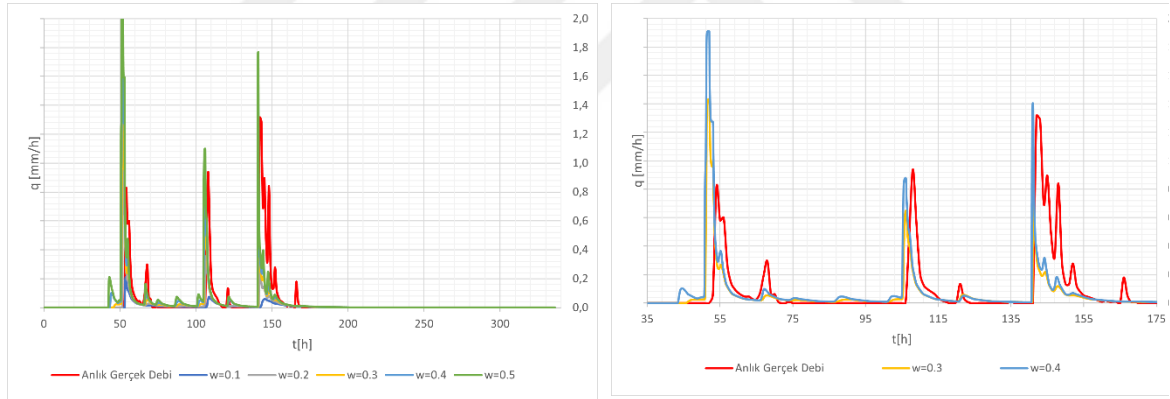
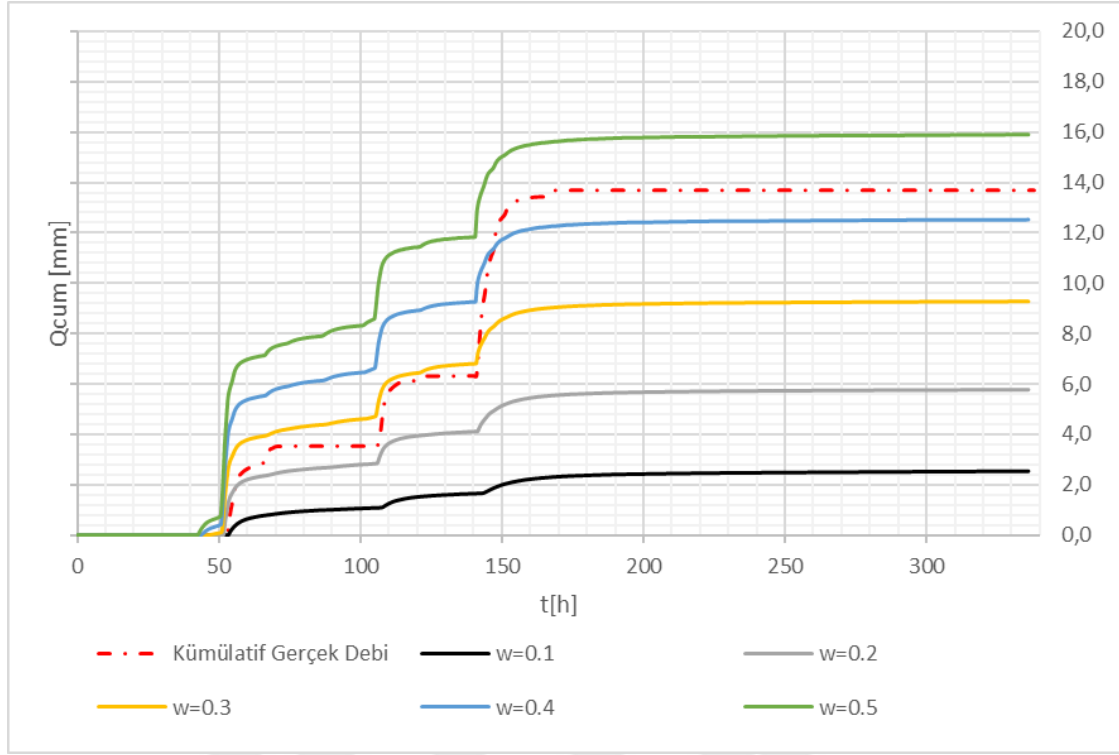
Şekil 3.2. Tek permeabilite modeli 2. veri setine göre kümülatif debi

Grafiğe göre Hydrus-1D yazılımı kümülatif debi ve anlık debi için herhangi bir su sistemden çıkmadığını modellemiştir. Buda sisteme gelen bütün yağmur suyunun ya su muhtevası olarak tutulduğunu ya da buharlaşarak atmosfere döndüğünü gösteriyor. Bir önceki simülasyona gibi bu tek permeabilite veri seti gerçekte ölçülen veriler hiç uyuşmamaktadır. Tablo 2.4'deki veriler, infiltrasyon deneylerinden türetildiğinden iki deneyin çok farklı infiltrasyon verisi verdiğinden, zemin hidrolik parametrelerin farklı çıkmasına ve modellemede farklı sonuçlara yol açmasına sebep olmuştur. Sahada aynı alanda yapılan infiltrasyon deneylerinin farklı tepkiler vermesi doğal zeminin özünde olan bir izlenimdir. Bundan dolayı o alanın ortalama davranışı temsil edecek parametreler tercih edilir. Elimizde bulunan iki veri setinin ortalamasını alarak 3. bir simülasyon gerçekleştirdik. Debi akışının daha geç başladığını (250. saate) ve toplam kümülatif debinin 1. veri setinin daha az olduğu görülmüştür.

Genel olarak, tek permeabilite modelin hangi veri seti seçilse de (Tablo 2.4.) ölçülen gerçek debilerden çok uzak sonuçlar olduğu gözlenmiştir. Buda bu tek permeabilite akış modelin, deneysel yeşil çatımızın hidrolojik davranışı simüle etmek için uygun olmadığını göstermektedir.

### **3.2. Çift Permeableti Akış Modeli İçin Simülasyon Sonuçları**

Hydrus-1D yazılımı, yüzeydeki iki akış alanının (matris ile hızlı akış bölgesini) oranını girilmesini istemektedir ( $w_{yüzey}$ ). Bu oran 0 ile 1 arası olup 0 ise yüzey akışın tümünün matris bölgesinden oluştuğunu, 1 ise yüzey akışının tümünün hızlı akış bölgesinden oluştuğunu vurgulamaktadır. Bu nedenle bu parametre 0.1; 0.2; 0.3; 0.4 ve 0.5 değerleri ayrı ayrı seçilerek simülasyon yapılmıştır. Burada 0.5 suyun yarısı matris ve yarısı hızlı bölgeden aktığını belirtmektedir. Tablo 2.4'te bulunan 1. veri setindeki verilere göre DK modeli ile simüle edilmiş ve Şekil 3.3'teki kümülatif ve anlık debilere ulaşılmıştır.



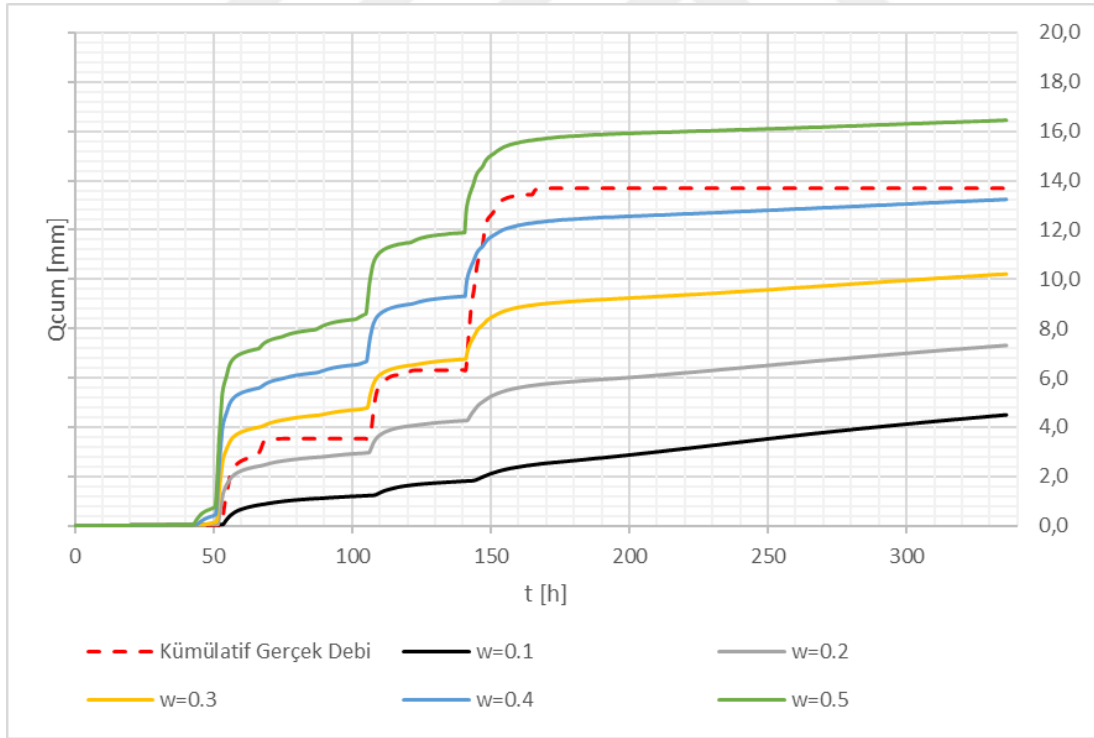
**Şekil 3.3. 1.** dual permeabilite verilerinin 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 su akış fraksiyonları sonucu oluşan kümülatif (üst) ve anlık(alt) debi karşılaştırmaları

Şekil 2.23'teki gerçek anlık ve kümülatif debiler ile karşılaştırıldığında şekil 3.3'teki simülasyon trendinin TK modeline göre gerçek değerlere ve trendlere daha yakın olduğu görülmüştür. Bu veri seti için kendi içinde kıyaslama yapıldığında ise toplam gerçek kümülatif debiye en yakın değer "0.4"lük su akış fraksiyonunda gerçekleştiği görülmüştür. Ancak daha detaylı incelendiğinde, başlangıç kümülatif debi fazla olduğunu görülmektedir. Ayrıca 2. ve 3. basamak arasındaki kümülatif debi gerçek ölçümde daha fazla olduğu görülmektedir. Buda son hadisedeki, debi artışını fiziki model tam olarak yansıtamadığı

görülmektedir. Aslında bu yansıma olmuş olsa idi,  $w=0.3$  değerli simülasyon gerçeği daha fazla yansıtmış olacaktı.

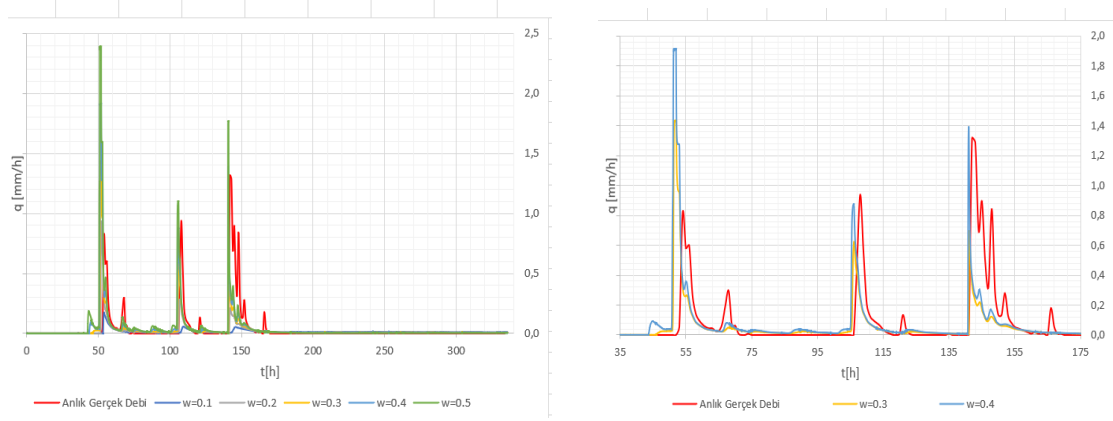
Ölçülen gerçek debi pikleri, sırasıyla 0.8, 0.9 ve 1.4 mm/saat değerlerine yakın olup, simüle edilen  $w_{\text{yüzey}}=0.4$  için bu piklerin yaklaşık 1.8, 0.9 ve 1.4 mm/saat ve  $w_{\text{yüzey}}=0.3$  için piklerin seviyeleri 1.4, 0.6 ve 0.7 mm/saat olduğunu görüyoruz. Başlangıç pikinin özellikle gerçek ölçülen debiye göre hem daha erken hem daha nicel olarak simüle edildiğini gözlenmektedir. İkinci pik için, birinci pik gibi model daha erken sistemden su çıkışını simüle etmektedir, ancak zaman aralığı iki hidrolojik tepki arasında (gerçek – fiziki model) daha kısa olduğu görülmektedir. Üçüncü pikte ise, “runoff” yani sistemden çıkan su debileri tamamen aynı anda oluştuğu gözlenmektedir. Ancak, bu hadisede simüle edilen su niceliği daha az olmaktadır.  $w_{\text{yüzey}}=0.3$  için, simülen edilen debi pikleri daha az şiddetli olduğu görülmektedir.

Tablo 2.4’te bulunan 2. veri setindeki verilere göre DK modeli ile simüle edilmiş ve Şekil 3.4’deki kümülatif ve anlık debilere ulaşılmıştır.



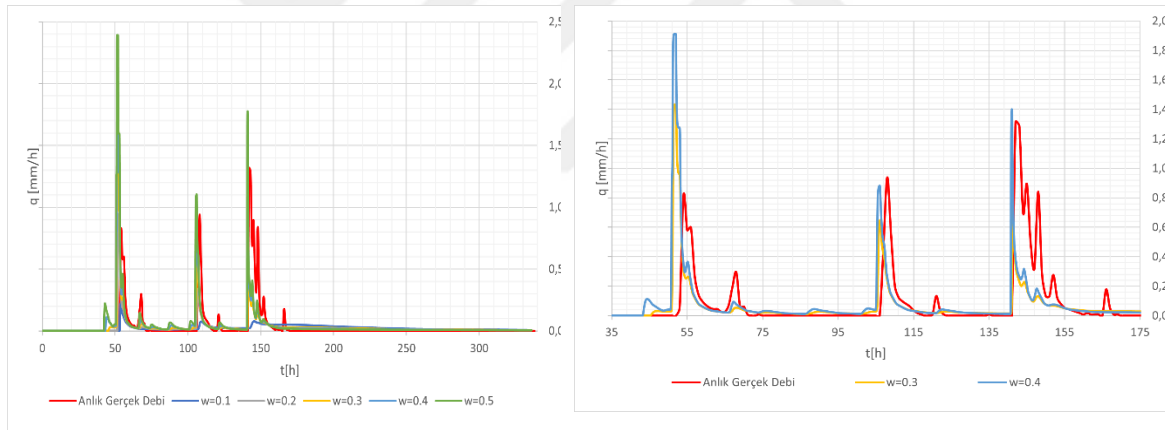
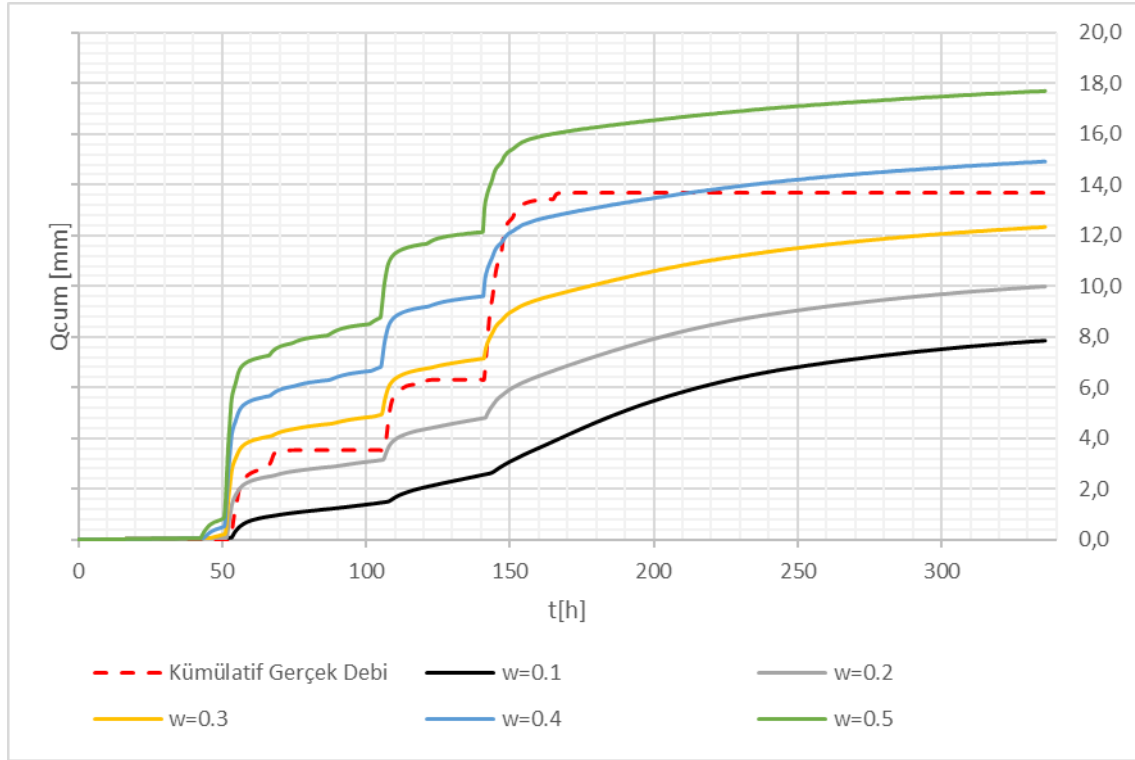
**Şekil 3.4.** 2. dual permeabilite verilerinin 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 su akış fraksiyonları sonucu oluşan kümülatif (üst) ve anlık (alt) debi karşılaştırmaları

### Şekil 3.4'ün devamı



Şekil 2.23'teki gerçek anlık ve kümülatif debiler ile karşılaştırıldığında Şekil 3.4'teki simülasyon trendinin, birinci veri setine benzer bir şekilde, gerçek değerlere ve trendlere çok daha yakın olduğu görülmüştür. TK 2. veri seti parametreleri kullanıldığında, simülasyonda herhangi bir akış olmamıştı, ancak çift permeabilite modelde akışın 1. veri setine benzer bir trend göstermesi, hızlı bölge (veya makropor) bölgesinin akış mekanizmasının daha ağırlıklı hâkim olduğunu göstermektedir. Bu iki veri setini hızlı akış bölgesine tekabül eden zemin hidrolik parametreleri (Tablo 2.4) birbirine yakınlık göstermektedir. Buna karşın, 2. veri seti için sonuçları kümülatif debi olarak incelediğimizde birinci veri seti ile küçük farklılıklar görülmektedir. Örneğin  $w_{\text{yüzey}}=0.4$  için, toplam kümülatif debi gerçek debiye daha yakınlığını ve bu yakınlaşmanın daha gerçek değerlere daha yakın olduğu görülmektedir.

Son olarak iki veri setinin ortalaması alınarak (Tablo 2.4.) Şekil 3.5'teki kümülatif ve anlık debi grafik sonuçlarına ulaşılmıştır. Farklı  $w_{\text{yüzey}}$  parametresi için gösterilmiştir.



**Şekil 3.5.** 1. ve 2. dual permeabilite verilerinin ortalamalarına göre 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 su akış fraksiyonları sonucu oluşan kümülatif (üst) ve anlık(alt) debi karşılaştırmaları

İlginç bir şekilde,  $w_{\text{yüzey}}=0.4$  parametresi için kümülatif debi bu kez 15 mm'ye kadar simüle edildi. Bu değer ilk iki veri setinin simülasyon toplam kümülatif değerden fazla olduğu görülmektedir. Gerçek anlık debiler ile karşılaştırıldığında Şekil 3.5'teki simülasyon trendinin bir önceki veri setlerin simülasyon sonuçlarına çok benzer gözlenmiştir. Ancak ilk debi pikinin 2.4 mm/saat değerine yakın bir şiddet simüle edilmiştir. Buarad bir önceki simülasyon değerlerinden daha şiddetli bir debi olduğu gözlemlendi. Başlangıçta oluşan nicel debi toplam kümülatif debinin yükselmesine sebep olmuştur. Bir önceki simülasyon senaryolarına benzer olarak da simüle edilen debinin daha erken oluştuğu gözlenmiştir.

Gerçek konfigürasyonda, deneysel çatının hafif bir eğimli yüzeyde bulunduğundan ve debi oluğun köşeden birkaç cm de geri olması nedeni ile drene edilen yağmur suyu hemen oluğa hemen gitmemektedir (Şekil 2.12). Sistemden drene edilen yağmur suyu ilk önce en alt kot seviyesinde boşlukta birikir ve su yükü oluk seviyesine geldiğinde ancak debi hareketi olur.



#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında deneysel teras çatuların hidroloik tepkilerini (anlık drene edilen su) Hydrus-1D yazılımı ile modellenirken TK veya DK modelleri ile oluşan simülasyon sonuçları sahada ölçülen değerlerle karşılaştırılarak doğrulunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ancak sonuçları etki edecek çok fazla bileşen olduğundan ve her birinin hata payları oluşacağından gerçek debi trendini fiziki bir model kullanarak yakalamak güçtür. Bu anlamda tezde yapılan çalışma, bu alanda geliştirilen fiziki bir çift akış modeli kullanarak ilk defa bir yeşil teras çatı üzerinde uygulanmıştır.

Ortaya konulan bulgular DK modeli yaklaşımının gerçek debi trendlerine yakın olduğunu göstermiştir. Simülasyonları yapabilmek için başta zeminin tez çalışmasında yetiştirme katmanı olarak adlandırdığımız suni toprak karışımının hidrolik karakteristiklerini belirlemek amacı ile infiltrasyon deneylerinden elden edilen sonuçlar kullanılmıştır. Kendi başına bir araştırma konusu olan infiltrasyon eğrilerinden zemin karakteristik fonksiyonlarını türetilmesi konusuna girilmemiştir.

Literatürde sunulan yeşil çatı zemin hidrolik fonksiyon verileri bu tezde kullanılmıştır ancak bu verilerin az olması (2 deney), tekrarlanan ve temsili açıdan zemin hidrolik parametrelerinin modellenmesinde yeterli olmadığı görülmüştür. Ayrıca daha sonra geliştirilen BEST-2K yönteminde iki ayrı sınır koşulu olan hafif bir sabit su yükü (Beerkan) tipi infiltrasyon ve gerilme diski tipi infiltrasyon ölçüm aletleri kullanarak hem matris hem makropor bölgesini ayrı bir şekilde DK modeli parametrelerini tayin etmek için daha metodik bir yöntem olarak önerilmiştir.

Tezde, literatürde kullanılan hidrolik parametreler ise sadece disk tipi infiltrasyon verileri kullanılarak ve BEST-2K modeline manüel bir uyarlama (*fitting*) ile elde edildiğini göz önünde bulundurmak gerekir. İkinci önemli etken, 1 boyutlu olarak simülen edilen hidrolojik tepkilerde 3 boyuttaki eğimin etkisi gösterilememektedir. Yüzeyin hafif bir eğimi olsa dahi (%1,5) bunun hidrolojik tepkilerde bir etkisi öngörülmektedir. Bir başka etken, yüzey sınır koşulları Penmann-Monteith kullanılarak ve *Sedum album* bitki türüne uyarlanmıştır. Normal bir çimin (12 cm bitki yüksekliği) benzer koşullardaki buharlaşma ve terlemenin potansiyel miktarına 0.7 katsayısı kadar eşit olarak kullanılmıştır. Simülasyon için çok önemli olan başlangıç su muhtevası için tek TDR ölçümün değerini dik homojen su muhtevası profili olarak kabul edilmiştir.

Son olarak da DK modelindeki iki hayali bölge (matris ve makropor) arasında geçiş (“Exchange”) olmadığı varsayıldı. Bu “Exchange” parametrelerin difüzyon akış mekaniğine ile yönetildiği için laboratuvar ortamında “tracer” testleri ile elde edilebilir. Ancak literatürde herhangi bir veri bulunmadığından iki bölge arasında geçişlerin ihmal edildiğini varsayıldı.

TK modeli ile simülasyonlarında ya debi oluşumu gözlenmemiştir ya da oluşan debi gözlenen debiler ile çok farklılık göstermiştir. TK model ile yapılan simülasyonlar neticesinde hiçbir şekilde üç ayrı noktada pik hadisesi trendi görülmemiştir. Bu nedenle ikinci adım olarak çift permeabilite modeli (DK) ile simülasyon yapılmıştır. DK modeli ile yapılan simülasyonda TK modelinden farklı olarak yüzeydeki su akışın fraksiyon parametresi belirlenmesi gerekiyordu. Bu olgu tamamen Hydrus-1D tek boyutlu yazılımına spesifik bir konudur. Programının Richards Denklemine çözebilmesi için başlangıçtan yüzeyde parametresine ihtiyaç duymaktadır. Bu parametre için 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 olmak üzere beş ayrı değer olarak her bir veri seti için Hydrus-1D yazılımına girilmiştir. Bunun sonucunda yapılan simülasyonlarda görülmüştür ki gerçek ve anlık debi trend ve değerlerine en fazla 0.4'lük fraksiyon değerinde yaklaşılmıştır. Özellikle 3 ayrı hidrolik veri seti parametresi için yapılan simülasyonlarda her defasında 3 ayrı pik hadise trendi gözlemlenmiştir. Bu hadiselerin gerçek debiden daha erken oluştuğu gözlemlendi ve debi pikinin şiddeti daha fazla olarak simüle edildi. Bir başka gözlemlenen önemli fark gerçek ile simülasyon arasındaki 3. Debi pikte gözlenmiştir. Bu durumda simülen edilen pikin dağılımı çok daha dar ve nicel olarak daha az su sistemden drene edildiğini simüle etmektedir. Başlangıçtan fazla simülen edilen debi miktarı, sonlarda daha az simüle edilerek, bu iki karşıt davranış birbirini dengelemiştir ve gerçeğe yakın bir kümülatif debi değeri bulunmuştur. Modelin daha uzun bir zaman (3 aylık bir yaz periyodu örneğin) için simülasyonu sonuçları bir başka araştırmada incelenecektir.

Sonuç olarak, çift permeabilite akış modelinin gerçeğe çok daha yakın davranışlar sergilediği gözlemlendi. Şehir planlamasında yeşil sistemlerin teşviki için ve yeşil çatıların kent veya mahalle ölçeğindeki kentin yağmur suyu hidrolojisine etkisini simüle etmek için kent hidrolojik modellere yeşil çatı katmanının davranışları çift permeabilite modeli kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu modelin giriş parametrelerini beslemek asıl sorundur. Tezde bir boyutlu ortamda, kısa sürede elde edilen ve sınırlı sayıda (2 adet) infiltrasyon deneylerinden elde edilen hidrolojik veriler kullanarak uyguladık. Yapılan simülasyonla bu verilerin yeterince temsiliyeti olmadığı görüldü. Zemin hidrolik parametrelerinin daha doğru

tain edilebilmesi için infiltrasyon deneylerinin sayısı artırılmalı, deney süresi uzatılmalı ve 3 boyutlu bir ortamda modelleme yapılmasının gerektiği uygun görülmektedir. Tezde infiltrasyon verilerinden türetilen hidrolik zemin parametreleri doğru bir yaklaşım olduğunu gösterdi. Homojen akışlı modellerin ise uygun olmadığı gözlemlendi.



## 5. KAYNAKLAR

- Aras, B. B.** 2019. Kentsel sürdürülebilirlik kapsamında yeşil çatı uygulamaları. *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(1), 469-504.
- Aydınşakir, K. ve Büyüktaş, D.** 2014. Lizimetreler ve bitki sularının kullanım süreleri boyunca kullanımı. *Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Derim Dergisi*, 22 (1), 49-58
- Benli, K., Özçelik, C.** 2020. 22-23 Eylül 2015 Bodrum sel felaketi. *Teknik Dergi*, 31(3), 10013-10032.
- Bircan, N., Kızıl, Ü.** 2021. Referans Evapotranspirasyon Hesabında Kullanılacak Android Tabanlı Bir Uygulamanın Geliştirilmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9(2), 247-257.
- Blonquist Jr, J. M., Jones, S. B., Robinson, D. A.** 2006. Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor. *Agricultural water management*, 84(1-2), 153-165.
- Bouzouidja, R., Séré, G., Claverie, R., Ouvrard, S., Nuttens, L., Lacroix, D.** 2018. Green roof aging: Quantifying the impact of substrate evolution on hydraulic performances at the lab-scale. *Journal of Hydrology*, 564, 416-423.
- Bozbey, İ., Geoteknik, A. B. D.** 2016. Zemin sınıflandırması ve zemin özellikleri-Laboratuvar deneyleri. *İnşaat Mühendisleri Odası Geoteknik Kursu*.
- Castellini, M., Di Prima, S., Moret-Fernández, D., Lassabatere, L.** 2021. Rapid and accurate measurement methods for determining soil hydraulic properties: A review. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 69(2), 121-139.
- Castellini, M., Stellacci, A. M., Di Prima, S., Iovino, M., Bagarello, V.** 2021. Improved Beerkan run methodology to assess water impact effects on infiltration and hydraulic properties of a loam soil under conventional-and no-tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 85(2), 235-248.
- Çobaner, M., Çıtakoğlu, H., Haktanır, T., Yelkara, F.** 2016. Akdeniz bölgesi için en uygun Hargreaves-samani eşitliğinin belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(2), 181-189.
- Demirel, K.** 2014. Toprak nem değişiminin HYDRUS programı yardımıyla modellenmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2(2), 1-8.
- DeNardo, J. C., Jarrett, A. R., Manbeck, H. B., Beattie, D. J., Berghage, R. D.** 2005. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the ASAE*, 48(4), 1491-1496.
- Dingil, M.** 2020. Zemin mekaniğinde endeks deneyleri için internet tabanlı bir uygulamanın geliştirilmesi, *Yüksek lisans tezi*, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, 202s.

- Ekşi, M., Uzun, A.** 2016. Yeşil çatı sistemlerinin su ve enerji dengesi açısından değerlendirilmesi. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 66(1), 119-138.
- Gerçek, D., Türkmenoğlu Bayraktar, N.** 2014. Kentsel Isı Adası Etkisinin Uzaktan Algılama İle Tespiti ve Değerlendirilmesi: İzmit Kenti Örneği. 5. *Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (14-17 Ekim 2014), İstanbul* <https://www.kongresistemi.com/root/dosyalar/uzalcbs2014/360.pdf>.
- Gerke, H. H., Van Genuchten, M. T.** 1993. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water resources research*, 29(2), 305-319.
- Gonca, Ö. Z. E. R., YETKİN, E. G.** 2023. Yeşil Çatı Uygulamalarının Yaygınlaştırılması: Organik Tarıma Elverişli Yeşil Çatı. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 6(1), 74-81.
- Delleur, J. W.** 2006. Soil Properties and Moisture Movement in the Unsaturated Zone. In *The Handbook of Groundwater Engineering* (pp. 255-314). CRC Press.
- Haverkamp, R., Debionne, S., Angulo-Jaramillo, R., de Condappa, D.** 2016. Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone. In *The handbook of groundwater engineering* (pp. 167-208). CRC Press.
- Kabuloğlu, S., Yavuz, Z. B., Özdamar, E. G.** 2023 Kentsel Alanların Adaptasyonu: İklim Sığınakları ve Avrupa Örneği.
- Karabulut, M., Sandal, E. K., Gürbüz, M.** 20 Kasım-9 Aralık 2001. Mersin Sel Felaketleri: Meteorolojik ve Hidrolojik Açıdan Bir İnceleme. *KSU Journal of Science and Engineering*, 10(1), 13-24.
- Karaca, C., Tekelioğlu, B., Büyüктаş, D., Baştuğ, R.** 2017. Kıyas Bitki Su Tüketiminin Hesaplanmasında Kullanılan Eşitliklerin Değerlendirilmesi. *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 144, 161.
- Kesici, Ö., Sönmez, M. E., Kaplan, İ., İş, İ., Eroğlu, M. Z.** 2012. Kilis Şehrinin Fizyonomik Özellikleri ve Gelişimi, 1. *Ulusal Coğrafya Sempozyumu*, 743-751.
- Keskin, E.** 2013. Zemin permeabilitesinin elektriksel analogi ile belirlenmesi, *Doktora tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 241s.
- Koç, G.** 2018. docplayer. <https://docplayer.biz.tr/68637086-Hidrolojik-dongu-su-dongusu.html>, 15 Nisan 2023.
- Külekcı, E. A.** (2017). Geçmişten günümüze yeşil çatı sistemleri ve yeşil çatılarda kalite standartlarının belirlenmesine yönelik bir araştırma. *ATA planlama ve Tasarım Dergisi*, 1(1), 35-53.

- Kocaman, K.** 2018. Killi zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi ile boşluk boyutu ilişkisi, *Yüksek lisans tezi*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 139s.
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J. M., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R.** 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 521-532.
- Lassabatere, L., Yilmaz, D., Peyrard, X., Peyneau, P. E., Lenoir, T., Šimůnek, J., Angulo-Jaramillo, R.** 2014. New analytical model for cumulative infiltration into dual-permeability soils. *Vadose Zone Journal*, 13(12).
- Montanez, J.E.C.,** 2002. Suction and volume changes of compacted sand-bentonite mixtures, *A thesis submitted to the University of London (Imperial College of Science, Technology and Medicine) in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering*. London.
- Mualem, Y.** 1974. A conceptual model of hysteresis. *Water resources research*, 10(3), 514-520.
- Murthy, V. N. S.** 2002. *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. CRC press.
- Musy, M., Rodriguez, F., Gutleben, C., Rosant, J. M., Mestayer, P., Inard, C., Long, N.** 2012, August. VegDUD project: Role of vegetation in sustainable urban development. In *ICUC: 8th International Conference on Urban Climates* (p. 4p).
- Richards, L. A.** 1931 Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333.
- Özdemir, Ç. Ö.** 2018. Zeminlerin permeabilite özelliklerinin konsolidasyon ve düşen seviyeli permeabilite deneyleriyle belirlenmesi, *Yüksek lisans tezi*, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 78s.
- Özel, E.** 2019. Artık Toprak Zeminlerin Zemin-Su Karakteristik Eğrilerinin Belirlenmesi. *Yüksek lisans tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 129s.
- Özüdoğru, K.** 2010. Modern zemin mekaniğinin kuruluşu: Karl Terzaghi ve Türkiye. *İtüdergisi/d*, 2(5).
- Solmaz, Z.** 2020. Sürdürülebilir çatı sistemlerinin örnekler üzerinden karşılaştırılması, *Yüksek lisans tezi*, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, 187s.
- Sönmez, M. E., Kesici, Ö.** 2010. İklim değişikliği ve plansız şehirleşmenin kilis şehrinde yol açtığı sel felaketleri. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 17(28), 57-77.
- Şarлак, N., Bağçacı, S.** 2020. Ampirik potansiyel evapotranspirasyon tahmin yöntemlerinin değerlendirilmesi: Uygulama Konya kapalı havzası. *Teknik Dergi*, 31(1), 9755-9772.

- Soulis, K. X., Ntoulas, N., Nektarios, P. A., Kargas, G.** 2017. Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover. *Ecological engineering*, 102, 80-89.
- Simunek, J., Van Genuchten, M. T., Sejna, M.** 2005. The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *University of California-Riverside Research Reports*, 3, 1-240.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M. T., Šejna, M.** 2016. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*, 15(7).
- USDA Soil Science Division Staff.** 2017. Soil survey manual. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. Pufahl, D.E.,** 1999. Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Geotechnique*, 49(2): 143-159.
- Van Genuchten, M. T.** 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- World Health Organization.** 2016. *Urban green spaces and health* (No. WHO/EURO: 2016-3352-43111-60341). World Health Organization. Regional Office for Europe.
- Wray, W. K.** 1984, January. The principle of soil suction and its geotechnical engineering applications. In *Fifth International Conference on Expansive Soils 1984: Preprints of Papers: Preprints of Papers* (pp. 114-118). Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia.
- Yılmaz, D.** 2016. İstanbul'un Yağmur Suyu Taşkınlarına Karşı Yeşil Teras Çatıların Önleyici Rolü. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 1-6.
- Yılmaz, D., Sabre, M., Lassabatère, L., Dal, M., Rodriguez, F.** 2016. Storm water retention and actual evapotranspiration performances of experimental green roofs in French oceanic climate. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(3), 344-362.
- Yılmaz, D., Sabre, M., Tétard, Y.** 2012. Actual Evapotranspiration measurement from experimental green roofs, Paper No 124, In *ICUC: 8th International Conference on Urban Climates*
- URL-1,** 2023. [www.yalova.csb.gov.tr/isi-adasi-etkisi-nedir-haber-220002](http://www.yalova.csb.gov.tr/isi-adasi-etkisi-nedir-haber-220002). Isı adası etkisi nedir. 20 Ocak 2023

- URL-2,** 2023. [www.tr.decorexpro.com/krysha/zelenaya/](http://www.tr.decorexpro.com/krysha/zelenaya/). Yeşil çatılar: Çim çatı teknolojisi. 10 Ocak 2023.
- URL-3,** 2023. [www.tr.decorexpro.com/krysha/zelenaya/](http://www.tr.decorexpro.com/krysha/zelenaya/). Yeşil çatılar: Çim çatı teknolojisi. 10 Ocak 2023.
- URL-4,** 2023. [www.decortips.com/tr/evler/yesil-catilar-bilmeniz-gereken/](http://www.decortips.com/tr/evler/yesil-catilar-bilmeniz-gereken/). Seyrek yeşil teras çatı uygulaması. 11 Ocak 2023
- URL-5,** 2023. [www.yapikatalogu.com/ince-yapi-bitirme-isleri/yesil-cati-yesil-bahce-sistemi/onduline-cati-kaplama-ondugreen\\_15849](http://www.yapikatalogu.com/ince-yapi-bitirme-isleri/yesil-cati-yesil-bahce-sistemi/onduline-cati-kaplama-ondugreen_15849). Seyrek yeşil çatı uygulaması. 11 Ocak 2023
- URL-6,** 2023. [www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus](http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus). Hydrus 1D yazılımını kullanan kuruluşlar. 05 Ocak 2023.
- URL-7,** 2023. [www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/su-dongusu-water-cycle-turkish](http://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/su-dongusu-water-cycle-turkish). Dünya üzerinde gerçekleşen su döngüsü. 4 Nisan 2023.



## **EKLER**

**Ek-1.** Deneysel lizimetreden ve meteorolojik istasyondan elde edilen hidrolik verileri içeren CD

