T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

BİTKİLİ KURU YAĞMUR HENDEĞİNİN PERFORMANSININ DENEYSEL ve MATEMATİKSEL MODELLEME ile DEĞERLENDİRİLMESİ

Kebir Emre SARAÇOĞLU

DANIŞMAN
Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Temmuz, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Kebir Emre SARAÇOĞLU tarafından, **Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN** danışmanlığında hazırlanan **"BİTKİLİ KURU YAĞMUR HENDEĞİNİN PERFORMANSININ DENEYSEL ve MATEMATİKSEL MODELLEME ile DEĞERLENDİRİLMESİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **13/06/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Hidrolik Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Nadim COPTY Boğaziçi Üniversitesi Çevre Teknolojisi Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Berna AYAT AYDOĞAN Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Sezar GÜLBAZ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Hidrolik Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Hidrolik Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret

Aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

BİTKİLİ KURU YAĞMUR HENDEĞİNİN PERFORMANSININ DENEYSEL ve MATEMATİKSEL MODELLEME ile DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 32929

Ayrıca bu çalışmaya Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2211-C Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında bursiyer desteği verilmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan, beni sabırla destekleyen annem Selma Saraçoğlu, sevgili eşim Fevziye Ayça Saraçoğlu ve oğlum Erdem Saraçoğlu'na sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunuyorum. Bu tezi canımdan çok sevdiğim aileme ithaf ediyorum.

Yaşadığım bu zorlu süreçte, engin tecrübesi, bilgi birikimi ve öğrencilerine olan sıcak yaklaşımıyla yol gösteren, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve değerli vaktinin büyük bir bölümünü öğrencilerine adamış tez danışmanım Prof. Dr. Cevza Melek Kazezyılmaz Alhan'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam süresince, görüş ve tavsiyeleriyle tezime değerli katkılarını sunan Prof. Dr. Nadim Copty, Doç. Dr. Sezar Gülbaz, Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren Akyüz, Dr. Öğr. Üyesi Uğur Boyraz'a desteklerinden ötürü şükranlarımı sunarım.

Deneylerim ve çim yetiştirme süresince yardımlarını esirgemeyen ve bana destek olan Tekniker Ramazan Özdemir ve Tekniker Oğuz Firidin'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında hiçbir zaman yardımını esirgemeyen, desteğiyle beni yalnız bırakmayan Araş. Gör. Kaan İlker Demirezen'e çok teşekkür ederim.

2211-C Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında bursiyer olarak beni desteklediğinden ötürü Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz 2022 **Kebir Emre SARAÇOĞLU**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **iv**
TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xviii**
ABSTRACT ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **5**
2.1. DÜŞÜK ETKİLİ KENTLEŞME YÖNTEMLERİ 5
2.1.1. Bitkili Yağmur Hendeği 5
2.1.2. Bitkili Yağmur Hendeği Uygulamalarının Avantajları ve Dezavantajları 11
2.1.3. Bitkili Yağmur Hendeklerinin Tasarım Kriterleri 12
2.1.4. Bitkili Yağmur Hendeğinin Tasarım Aşamaları 17
2.2. ÇALIŞMANIN AMACI ve KAPSAMI 18
3. YÖNTEM **26**
3.1. YAĞIŞ-HAVZA-YAĞMUR HENDEĞİ DENEY DÜZENEĞİNİN TASARIMI ve KURULUMU 26
3.1.1. Hendek Konfigürasyonları 31
3.1.2. Hendek 6 Yüzeyi İçin Çim Yetiştirilmesi 36
3.1.3. Deney Sisteminin Hazır Hale Getirilmesi ve Deney Prosedürü 45
3.2. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİNİN EPA SWMM ile MODELLENMESİ 46
3.2.1. EPA SWMM 46
3.2.2. EPA SWMM ile Yağmur Hendeğinin Duyarlılık Analizi 52
3.2.3. EPA SWMM ile YHY Deney Düzeneğinin Modellenmesi 57

3.3. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİ HİDROLOJİSİ İÇİN MATEMATİKSEL MODEL GELİŞTİRİLMESİ 66
3.3.1. Hendek Yüzeysel Akış Modeli 66
3.3.2. Hendek Drenaj Akış Modeli 70
4. BULGULAR 73
4.1. DENEYSEL ÇALIŞMALARA AİT BULGULAR 73
4.1.1. Mekanik Analizler 73
4.1.2. YHY ile Yapılan Hidrolojik Deneylere Ait Bulgular 81
4.2. EPA SWMM ile BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİNİN MODELLENMESİNE AİT BULGULAR 99
4.3. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİ HİDROLOJİSİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELE AİT BULGULAR 113
5. TARTIŞMA 132
5.1. YHY ile YAPILAN HİDROLOJİK DENEYLERE AİT TARTIŞMA 132
5.2. EPA SWMM ile YHY DENEY DÜZENEĞİNİN MODELLENMESİ AİT TARTIŞMA 135
5.3. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİ HİDROLOJİSİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELE AİT TARTIŞMA 137
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 138
6.1. YHY ile YAPILAN HİDROLOJİK DENEYLERE AİT SONUÇ ve ÖNERİLER 138
6.2. EPA SWMM ile YHY DENEY DÜZENEĞİNİN MODELLENMESİNE AİT SONUÇ ve ÖNERİLER 140
6.3. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİ HİDROLOJİSİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELE AİT SONUÇ ve ÖNERİLER 141
KAYNAKLAR 142
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 150
ETİK KURUL İZİN YAZISI 151
KURUM İZNİ YAZILARI 152

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Kentleşmenin sızma ve yüzeysel akışa etkileri (Calkins (2012)'den uyarlanmıştır). 2

Şekil 1.2: Kentleşme ile yüzeysel akış hidrografında gözlemlenen değişim (Leopold (1968)'den uyarlanmıştır)..... 3

Şekil 2.1: Bitkili yağmur hendeği şematiği (Calkins (2012)'den uyarlanmıştır)..... 6

Şekil 2.2: Bitkili kuru yağmur hendeği kesiti (Wilson ve diğ. (2004)'den uyarlanmıştır)..... 7

Şekil 2.3: Bitkili kuru yağmur hendeği uygulamasına ilişkin plan ve kesit görüntüleri (Vermont Agency of Natural Resources (2002)'den uyarlanmıştır). 8

Şekil 2.4: Bitkili ıslak yağmur hendeği kesiti (Wilson ve diğ. (2004)'den uyarlanmıştır). 9

Şekil 2.5: Bitkili ıslak yağmur hendeği uygulamasına ilişkin plan ve kesit görüntüleri (Vermont Agency of Natural Resources (2002)'den uyarlanmıştır). 10

Şekil 2.6: Bitkili yağmur hendeklerindeki kontrol bendi uygulamasına ilişkin örnek görüntü. 15

Şekil 2.7: Bitkili yağmur hendeklerinin tasarım aşamaları (Gold Coastal Planning Scheme Policies (2005))..... 17

Şekil 3.1: Yağış-Havza-Biyotutma deney düzeneği..... 26

Şekil 3.2: Yağmur hendeği modülü..... 27

Şekil 3.3: Şeffaf çatı kaplaması malzemesiyle kapatılmış olan deney düzeneği. 28

Şekil 3.4: YHY deney sistemi plan ve bileşenleri..... 29

Şekil 3.5: Hendek konfigürasyonlarının şematik çizimleri. 32

Şekil 3.6: Hendeklerin malzemeler ile doldurulması ve deneylere hazır hale getirilmesi. 34

Şekil 3.7: Çimlerin yetiştirilmesi için tasarlanan kalıplara ilişkin plan ve kesit görüntüleri... 37

Şekil 3.8: Çimlerin yetiştirildiği kalıplar..... 38

Şekil 3.9: Kalıpların toprakla doldurulması ve çim ekme işlemleri..... 39

Şekil 3.10: Yüzeye uygulanan kükürtleme işlemi..... 41

Şekil 3.11: Gübreleme işlemi. 41

Şekil 3.12: Çim biçme işlemi öncesi ve sonrası. 42

Şekil 3.13: Çimlerin kalıplardan çıkartıldıktan sonra hendek yüzeyine serilmeleri. 44

Şekil 3.14: Hendeklerin deneylere hazır hale getirilmesinde izlenecek adımlar. 45

Şekil 3.15: Deney prosedürü akış şeması. 45

Şekil 3.16: EPA SWMM bitkili yağmur hendeği ekran görüntüsü (Rossman ve Huber (2016)'dan uyarlanmıştır) 47

Şekil 3.17: Biyotutma DEK kontrol editörü. 49

Şekil 3.18: Yağmur bahçesi DEK kontrol editörü. 49

Şekil 3.19: Yeşil çatı DEK kontrol editörü. 50

Şekil 3.20: Sızdırma hendeği DEK kontrol editörü. 50

Şekil 3.21: Geçirgen kaldırım DEK kontrol editörü. 50

Şekil 3.22: Yağmur tankı DEK kontrol editörü. 51

Şekil 3.23: Bitkili yağmur hendeği DEK kontrol editörü. 51

Şekil 3.24: Duyarlılık analizi için oluşturulan EPA SWMM model alanı. 52

Şekil 3.25: Aşma yüksekliğindeki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri. 53

Şekil 3.26: Bitkili hacim oranındaki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri. 54

Şekil 3.27: Yüzey pürüzlülüğündeki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri. 54

Şekil 3.28: Yüzey eğimindeki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri. 55

Şekil 3.29: Şev eğimindeki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri. 55

Şekil 3.30: YHY deney sistemi kesit görüntüsü. 57

Şekil 3.31: EPA SWMM programında oluşturulan havza alanı modeli (R-A). 58

Şekil 3.32: EPA SWMM programında ikinci model. 59

Şekil 3.33: EPA SWMM programında oluşturulan üçüncü model. 60

Şekil 3.34: Bitkili yağmur hendeği kesit görüntüsü. 61

Şekil 3.35: R-A yağış senaryosu için oluşturulan EPA SWMM modeli. 63

Şekil 3.36: R-B ve R-C yağış senaryoları için oluşturulan EPA SWMM modeli. 63

Şekil 3.37: R-D yağış senaryosu için oluşturulan EPA SWMM modeli. 64

Şekil 3.38: R-D yağış senaryosu için oluşturulan nihai EPA SWMM modeli. 64

Şekil 3.39: Hendek drenaj akış modeli. 70

Şekil 4.1: Deneylerde kullanılan kum, çakıl ve bitkisel toprak malzemeleri. 74

Şekil 4.2: Elek analizinde kullanılan kum, çakıl ve bitkisel toprak malzemeleri. 74

Şekil 4.3: Elek analizi deneyleri. 75

Şekil 4.4: Bahçe toprağı, ince kum, iri kum ve çakıl malzemeleri için elde edilen tane çapı dağılımı eğrileri. 77

Şekil 4.5: Hidrometre deneyi. 79

Şekil 4.6: Hidrolik iletkenlik deneyi. 80

Şekil 4.7: Deney sistemi kesit çizimi. 81

Şekil 4.8: Altı farklı hendek konfigürasyonu. 83

Şekil 4.9: Toprak nemi ölçümleri. 84

Şekil 4.10: 6 Farklı hendek konfigürasyonunun aynı yağış şiddeti, süresi ve yağış senaryosu altındaki yüzeysel akış davranışlarının kıyaslanması (i=20 mm/sa & tr=25 dk & R-A). 85

Şekil 4.11: 5 Farklı hendek konfigürasyonunun aynı yağış şiddeti, süresi ve yağış senaryosu altındaki yüzeysel akış davranışlarının kıyaslanması (i=30 mm/sa & t_r=25 dk & R-A). 85

Şekil 4.12: Hendek 6'nın aynı yağış senaryosu ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (R-A & hç=7 cm). 86

Şekil 4.13: Hendek 6'nın aynı yağış senaryosu ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (R-D & hç=7 cm). 86

Şekil 4.14: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (i=20 mm/sa & tr=25 dk & hç=7 cm). 87

Şekil 4.15: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (i=30 mm/sa & tr=25 dk & hç=7 cm). 87

Şekil 4.16: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (tr=25 dk & R-A). 88

Şekil 4.17: 6 Farklı hendek konfigürasyonunun aynı yağış şiddeti, süresi ve yağış senaryosu altındaki drenaj akış davranışlarının kıyaslanması (i=20 mm/sa & tr=25 dk & R-A). 89

Şekil 4.18: 5 Farklı hendek konfigürasyonunun aynı yağış şiddeti, süresi ve yağış senaryosu altındaki drenaj akış davranışlarının kıyaslanması (i=30 mm/sa & tr=25 dk & R-A)..... 89

Şekil 4.19: Hendek 6'nın aynı yağış senaryosu ve çim boyu koşulları altındaki drenaj akış davranışının kıyaslanması (R-A & hç=7 cm)..... 90

Şekil 4.20: Hendek 6'nın aynı yağış senaryosu ve çim boyu koşulları altındaki drenaj akış davranışının kıyaslanması (R-D & hç=7 cm)..... 90

Şekil 4.21: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki drenaj akış davranışının kıyaslanması (i=20 mm/sa & tr=25 dk & hç=7 cm)..... 91

Şekil 4.22: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki drenaj akış davranışının kıyaslanması (i=30 mm/sa & tr=25 dk & hç=7 cm)..... 91

Şekil 4.23: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (tr=25 dk & R-A)..... 92

Şekil 4.24: R-A yağış senaryosu altında havza çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, t_r=15 dk (b) i=20 mm/sa, t_r=25 dk (c) i=30 mm/sa, t_r=15 dk (d) i=30 mm/sa, t_r=25 dk..... 100

Şekil 4.25: 25 dk'lık yağış süresi altında havza çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, R-B (b) i=20 mm/sa, R-C (c) i=30 mm/sa, R-B (d) i=30 mm/sa, R-C..... 101

Şekil 4.26: R-D yağış senaryosu altında havza çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr=15 dk (b) i=20 mm/sa, tr=25 dk (c) i=30 mm/sa, tr=15 dk (d) i=30 mm/sa, tr=25 dk..... 102

Şekil 4.27: 20 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D..... 103

Şekil 4.28: R-A yağış senaryosu ve 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr= 15 dk..... 104

Şekil 4.29: 25 dk yağış süresi ve R-A yağış senaryosu altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, hç=7 cm (b) i=30 mm/sa, hç=7 cm (c) i=20 mm/sa, hç=11 cm (d) i=30 mm/sa, hç=11 cm. 105

Şekil 4.30: 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D..... 106

Şekil 4.31: R-D yağış senaryosu ve $h_ç$=7 cm çim koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, t_r= 25 dk (b) i=30 mm/sa, t_r= 25 dk (c) i=20 mm/sa, t_r= 15 dk (d) i=30 mm/sa, t_r= 15 dk..... 107

Şekil 4.32: 20 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D. 117

Şekil 4.33: R-A yağış senaryosu ve 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr= 15 dk. 118

Şekil 4.34: 25 dk yağış süresi ve R-A yağış senaryosu altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, hç=7 cm (b) i=30 mm/sa, hç=7 cm (c) i=20 mm/sa, hç=11 cm (d) i=30 mm/sa, hç=11 cm. 119

Şekil 4.35: 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D. 120

Şekil 4.36: R-D yağış senaryosu ve hç=7 cm çim koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr= 15. 121

Şekil 4.37: 20 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek drenaj akış çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D. 122

Şekil 4.38: R-A yağış senaryosu ve 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek drenaj akış çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr=15dk. ... 123

Şekil 4.39: 25 dk yağış süresi ve R-A yağış senaryosu altında hendek drenaj akış çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, hç=7 cm (b) i=30 mm/sa, hç=7 cm (c) i=20 mm/sa, hç=11 cm (d) i=30 mm/sa, hç=11 cm. 124

Şekil 4.40: 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek drenaj çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D. 125

Şekil 4.41: R-D yağış senaryosu ve hç=7 cm çim koşulları altında hendek drenaj akış çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr= 15. 126

Şekil 4.42: Ölçüm ve model pik hendek yüzeysel akış değerlerinin saçılım grafiği. 131

Şekil 4.43: Ölçüm ve model pik drenaj akış değerlerinin saçılım grafiği. 131

Şekil 5.1: Rulo çimin yetiştirildiği toprak tabakası ile hendek ana toprak tabakası arasındaki görsel fark. 134

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1: Kentsel bölgelerdeki yüzeysel akışlarda karşılaşılan yayılı kirlilik maddeleri ve konsantrasyon değerleri (lbs/dönüm-yıl) (Burton ve Pitt, 2002). 4

Tablo 2.1: Bitkili yağmur hendeği boyuna eğim değerleri ile kontrol bentleri arasındaki mesafe (MPCA (2000)). 14

Tablo 3.1: Duyarlılık analizinde kullanılan parametre değerleri. 53

Tablo 3.2: Havza model alanları için EPA SWMM programında kullanılan parametre değerleri. 61

Tablo 3.3: Bitkili yağmur hendekleri için tipik tasarım parametresi değer aralıkları (Rossman ve Huber (2016)). 62

Tablo 3.4: Bitkili yağmur hendeği modelinde kullanılan parametre değerleri. 62

Tablo 4.1: Bahçe toprağı için elde edilen elek analizi sonuçları. 75

Tablo 4.2: İnce kum için elde edilen elek analizi sonuçları. 76

Tablo 4.3: İri kum için elde edilen elek analizi sonuçları. 76

Tablo 4.4: Çakıl için elde edilen elek analizi sonuçları. 77

Tablo 4.5: Hidrometre deney sonuç tablosu. 79

Tablo 4.6: Deney setleri. 96

Tablo 4.7: Hendek konfigürasyonlarının pik debileri düşürme oranları. 97

Tablo 4.8: Havza, hendek ve drenaj çıkışlarında ölçülen toplam akış hacimleri ile hendeklerin depolama hacim değerleri. 98

Tablo 4.9: Havza çıkışında elde edilen ölçüm ve model yüzeysel akış sonuçlarının istatistiksel analizi. 110

Tablo 4.10: Hendek çıkışında elde edilen ölçüm ve model yüzeysel akış sonuçlarının istatistiksel analizi. 111

Tablo 4.11: Deneyler esnasında ölçülen minimum ve pik drenaj debisi değerleri ile grup numaraları. 114

Tablo 4.12: Optimizasyon ile hesaplanan katsayı değerleri. 115

Tablo 4.13: Yağmur hendeğinin matematiksel modelinde kullanılan parametre değerleri. . 115

Tablo 4.14: Hendek yüzeysel akışı için elde edilen ölçüm ve matematiksel model sonuçlarının istatistiksel analizi. 129

Tablo 4.15: Hendek drenaj akışı için elde edilen ölçüm ve matematiksel model sonuçlarının istatistiksel analizi. 130

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\%$	: Yüzde
C_a	: Çözücü Madde Düzeltmesi
C_m	: Menisküs Düzeltmesi
C_t	: Sıcaklık Düzeltmesi
H_e	: Etkili Derinlik (L)
Q_∞	: Minimum Drenaj Debisi (L^3/T)
Q_{drenaj}	: Drenaj Debisi (L^3/T)
Q_{pik_drenaj}	: Pik Drenaj Debisi (L^3/T)
$Q_{pik_yüzeysel}$	: Pik Hendek Yüzeysel Akış Debisi (L^3/T)
Q_0	: Maksimum Drenaj Debisi (L^3/T)
R^2	: Belirtme Katsayısı
S_f	: Enerji Çizgisi Eğimi (L/L)
e_1	: Yüzey Evapotranspirasyon Oranı (L/T)
f_1	: Sızma Hızı (L/T)
q_{drenaj}	: Drenaj Hızı (L^3/L^2T)
q_{havza}	: Havza Üzerinde Oluşan Yüzey Akışının Hendek Birim Alanı Üzerine Ulaşan Miktarı (L^2/T)
q_{hendek}	: Hendek Yüzeyinde Oluşan Birim Debi (L^2/T)
q_0	: Giriş Akımı (L/T)
t_w	: Yükselme Eğrisi İçin Zamansal Katsayı Değeri (T)
$\overline{x}$	: Ölçüm Verilerinin Ortalaması
x_i	: Ölçüm Verisi Değeri
$\overline{y}$	: Model Verilerinin Ortalaması
y_i	: Model Verisi Değeri
$\emptyset$	: Hendek Yüzeyindeki Bitki Tabakası Tarafından Alıkonan Hacim (L^3)
A	: Yüzey Alanı (L^2)
C	: Chezy Katsayısı ($L^{1/2}/T$)
cm	: Santimetre (L)

$\boldsymbol{D}$	: Çap (L)
$\boldsymbol{d}$	: Su Derinliği (L)
$\boldsymbol{dk}$	: Dakika (T)
$\boldsymbol{ft}$	: Feet (L)
$\boldsymbol{gr}$	: Gram (M)
$\boldsymbol{h_ç}$	: Çim Boyu (L)
$\boldsymbol{i}$	: Yağış Şiddeti (L/T)
$\boldsymbol{l}$	: Litre (L^3)
$\boldsymbol{m}$	: Katsayı
$\boldsymbol{m}$	: Metre (L)
$\boldsymbol{m^3}$	: Metreküp (L^3)
$\boldsymbol{mm}$	: Milimetre (L)
$\boldsymbol{n}$	: Manning Katsayısı
$\boldsymbol{NSE}$	: Nash Sutcliffe Verim İndeksi
$\boldsymbol{q}$	: Birim Debi (L^2/T)
$\boldsymbol{Q}$	: Debi (L^3/T)
$\boldsymbol{R}$	: Hidrolik Yarıçap (L)
$\boldsymbol{RMSE}$	: Kök Ortalama Kare Hatası
$\boldsymbol{S}$	: Boyuna Eğim (L/L)
$\boldsymbol{s}$	: Saniye (T)
$\boldsymbol{S_0}$	: Taban Eğimi (L/L)
$\boldsymbol{sa}$	: Saat (T)
$\boldsymbol{T}$	: Sıcaklık ($°C$)
$\boldsymbol{t}$	: Zaman (T)
$\boldsymbol{V}$	: Ortalama Akım Hızı (L/T)
$\boldsymbol{W}$	: Hendek Genişliği (L)
$\boldsymbol{x}$	: Mesafe (L)
$\mathbf{y}$	: Su Derinliği (L)
$\boldsymbol{\alpha}$	: Yükselme Eğrisi Katsayısı ($1/T$)
$\boldsymbol{\beta}$	: Çekilme Eğrisi Katsayısı ($1/T$)
$\boldsymbol{f}$	: Sızma Hızı (L/T)
$\boldsymbol{g}$	: Yerçekimi İvmesi (L/T^2)

Kısaltmalar	Açıklama
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DEK	: Düşük Etkili Kentleşme
DRE	: Dünya Risk Endeksi
EİYU	: En İyi Yönetim Uygulamaları
EPA SWMM	: Environmental Protection Agency Storm Water Management Model
LCC	: Life Cycle Cost (Yaşam Döngü Maliyeti)
L-THIA-LID	: Long-Term Hydrologic Impact Assessment-Low Impact Development
MPCA	: Minnesota Kirlilik Kontrol Ajansı
MUSIC	: Model of Urban Stormwater Improvement Conceptualisation
PVC	: Polivinil Klorür
RWB	: Rainfall-Watershed-Bioretention
RWS	: Rainfall-Watershed-Swale
SUSTAIN	: System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration
SWMM	: Storm Water Management Model
YHB	: Yağış-Havza-Biyotutma
YHY	: Yağış-Havza-Yağmur Hendeği

ÖZET

[DOKTORA TEZİ]

[BİTKİLİ KURU YAĞMUR HENDEĞİNİN PERFORMANSININ DENEYSEL ve MATEMATİKSEL MODELLEME ile DEĞERLENDİRİLMESİ]

[Kebir Emre SARAÇOĞLU]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

[Danışman: Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN]

[Yaşanan hızlı kentleşme süreçleri yaşam alanlarında ve havzalarda değişimler meydana getirmektedir. Bu değişimler havza alanlarında olumsuz etkilere neden olmaktadır. Havza alanlarında inşa edilen bina, yol ve park alanları gibi yapılar geçirimsiz yüzeylerin artmasına neden olmaktadır. Geçirimsiz yüzey alanlarının artmasıyla yağışlar hızla akışa dönüşmektedir. Kentleşmenin beraberinde getirdiği hidrolojik olumsuzluklara ilaveten küresel iklim değişikliğiyle birlikte kentsel bölgelerde karşılaşılan problemler oldukça farklı bir boyut kazanmıştır. Taşkın olaylarının hem görülme hem de yıkıcı etkileri günden güne artmaktadır. Küresel iklim değişikliğinin alınacak tedbirlere rağmen etkilerini uzun süreler daha sürdüreceği açıktır. Olası doğal afetlere hazırlıkta, kentsel bölgelerin çevre dostu ve sürdürülebilir çözüm yöntemleriyle bu yıkıcı etkilere karşı daha dirençli bir yapıya dönüştürülmeleri gerekmektedir. Bu bağlamda, geleneksel altyapı sistemleri tek başına yetersiz kalmış ve bu sistemlere entegre edilebilen birçok yöntem geliştirilmiştir. Biyotutma, yağmur bahçesi, yeşil çatı, sızdırma hendeği, geçirgen kaldırım, yağmur tankı ve bitkili yağmur hendekleri, Düşük Etkili Kentleşme

(DEK) En İyi Yönetim Uygulamaları (EİYU) olup yeşil alt yapı olarak da bilinmekte ve su miktarı ile kalitesini kontrol edebilen doğa tabanlı yöntemler arasında yer almaktadır. Özellikle gelişmiş ülkelerde bu tip yağmur suyu yönetim stratejilerine verilen önem son 10 yılda artmıştır. Bu öneme istinaden, Düşük Etkili Kentleşmelere (DEK) ilişkin birçok çalışma yürütülmektedir. Bu çalışmaların büyük bir bölümünün su kalitesi performansının belirlenmesine yönelik oldukları görülmüştür. Ancak bitkili yağmur hendeklerinin hidrolojik performansını ortaya koymak amacıyla yürütülen az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışma kapsamında literatürdeki bu boşluğun doldurulması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik performansı büyük ölçekli laboratuvar deneyleri ve modelleme çalışmalarıyla ortaya konmuştur. Bu kapsamda yürütülen çalışma 3 ana başlık altında toplanmaktadır:

(i) Deneysel çalışmalar için bitkili yağmur hendeği modülü tasarlanmış ve Yağış-Havza-Biyotutma (YHB) deney sistemine entegre edilmiştir. Yağış-Havza-Yağmur Hendeği (YHY) olarak adlandırılan deney sistemi oluşturulmuştur. Bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik davranışını belirlemek amacıyla 6 farklı hendek konfigürasyonundan yararlanılmıştır. Deneylerde bitkili yağmur hendeği davranışında etkin olduğu düşünülen yağış şiddeti, yağış süresi, alansal yağış senaryosu, toprak tipi ve farklı hendek yüzeylerin etkileri test edilmiştir. Deneyler esnasında havza yüzey akışı, hendek yüzey akışı ve hendek drenaj akışına ait hidrograflar elde edilmiştir.

(ii) Literatürde DEK modellemesi için sıklıkla kullanılan Çevre Koruma Ajansı Yağmursuyu Yönetim Modelinin (Environmental Protection Agency Storm Water Management Model/EPA SWMM) bitkili yağmur hendeğini modelleme kapasitesi test edilmiştir. Bu bağlamda, deneysel çalışmalardan elde edilen ölçüm sonuçları kullanılmıştır. Havza ve hendek yüzeysel akış değerleri ile model sonuçları kıyaslanmış ve belirtme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, model ile ölçüm sonuçlarının oldukça uyumlu oldukları görülmüştür. Böylece EPA SWMM programının bitkili yağmur hendeği performansını modellemek için kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Diğer yandan EPA SWMM modelinin hendek drenaj akışını hesaplayamaması, modelin bir eksikliği olarak tespit edilmiştir.

(iii) Son olarak, bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik davranışını bütüncül olarak ortaya koymak amacıyla matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model, Hendek Yüzeysel Akış Modeli ile Hendek Drenaj Akış Modelinden meydana gelmektedir. Geliştirilen matematiksel modelin doğruluğu ölçüm sonuçları kullanılarak ortaya konmuştur. Modelin hem hendek yüzeysel akışı hem de hendek drenaj akışını hesaplamada oldukça yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Temmuz 2022 , 178 sayfa.

Anahtar kelimeler: Bitkili Yağmur Hendeği, Düşük Etkili Kentleşme, Yeşil Altyapı, Doğa Tabanlı Çözümler, Hidrolojik Performans, EPA SWMM, Matematiksel Model

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

EVALUATION of VEGETATIVE SWALE PERFORMANCE VIA EXPERIMENTAL and MATHEMATICAL MODELING

Kebir Emre SARAÇOĞLU

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Civil Engineering Programme

Supervisor : Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

Rapid urbanization has led to dramatic changes in living areas, and watersheds. These changes cause adverse effects in the watersheds. Structures such as buildings, roads and parking lots built in watersheds cause an increase in impermeable surfaces. Rainfall turns rapidly into surface flows with the increase of impermeable surfaces. In addition to the hydrological problems due to the urbanization, problems encountered in urban areas increase also with the growing severity of global climate change. Both the frequency and the damage level caused by floods are increasing day by day. It is clear that the effects of global climate change will continue despite the measures currently being taken. In order to reduce the negative effects of the potential natural disasters, urban areas should be transformed into resilient structures with environmentally friendly and sustainable methods. In this context, traditional infrastructure systems have become insufficient, and many methods have been developed that can be integrated into traditional infrastructure systems.

Bioretention, rain garden, green roof, infiltration trench, permeable pavement, rain barrel, and grass swale are Low Impact Development Best Management Practices and are also known as green infrastructure. They are among the nature-based solutions that can control the quantity and quality of water. These stormwater management strategies have gained attention in the last decade, especially in developed countries. Many studies have been conducted on LIDs in order to ensure their effectiveness. Most of these studies are aimed at determining their water quality performance. However, few studies have focused on the hydrological performance of grass swale. This study aims to fill this gap in the literature.

Within the scope of this thesis, the hydrological performance of the grass swale was demonstrated through field-scale laboratory experiments and modeling studies. The study carried out in this context is presented in three main parts:

(i) The Swale Module was designed for experiments and integrated into the Rainfall-Watershed-Bioretention (RWB) system. The experimental setup called Rainfall-Watershed-Swale (RWS) was developed. Six different swale configurations were used to determine the hydrological behavior of the grass swale. The effects of rainfall intensity, rainfall duration, areal rainfall scenarios, soil type, and different swale surfaces were tested which are potentially effective in grass swale hydrological behavior. During the experiments, hydrographs of overland flow, overflow, and drainage flow were obtained.

(ii) The grass swale modeling capacity of Environmental Protection Agency Storm Water Management Model (EPA SWMM), which is commonly used for modeling of LIDs in the literature, was tested. In this context, the measurements obtained from the experimental studies were used. The model results were compared with the measurements of overland flow, overflow, and the coefficient of determination was calculated. Based on the evaluations, the model results were quite compatible with the measured data. Therefore, it was demonstrated that the EPA SWMM can be used to model the performance of grass swale. On the other hand, the lack of drainage flow calculation of the EPA SWMM was identified as a drawback of the model.

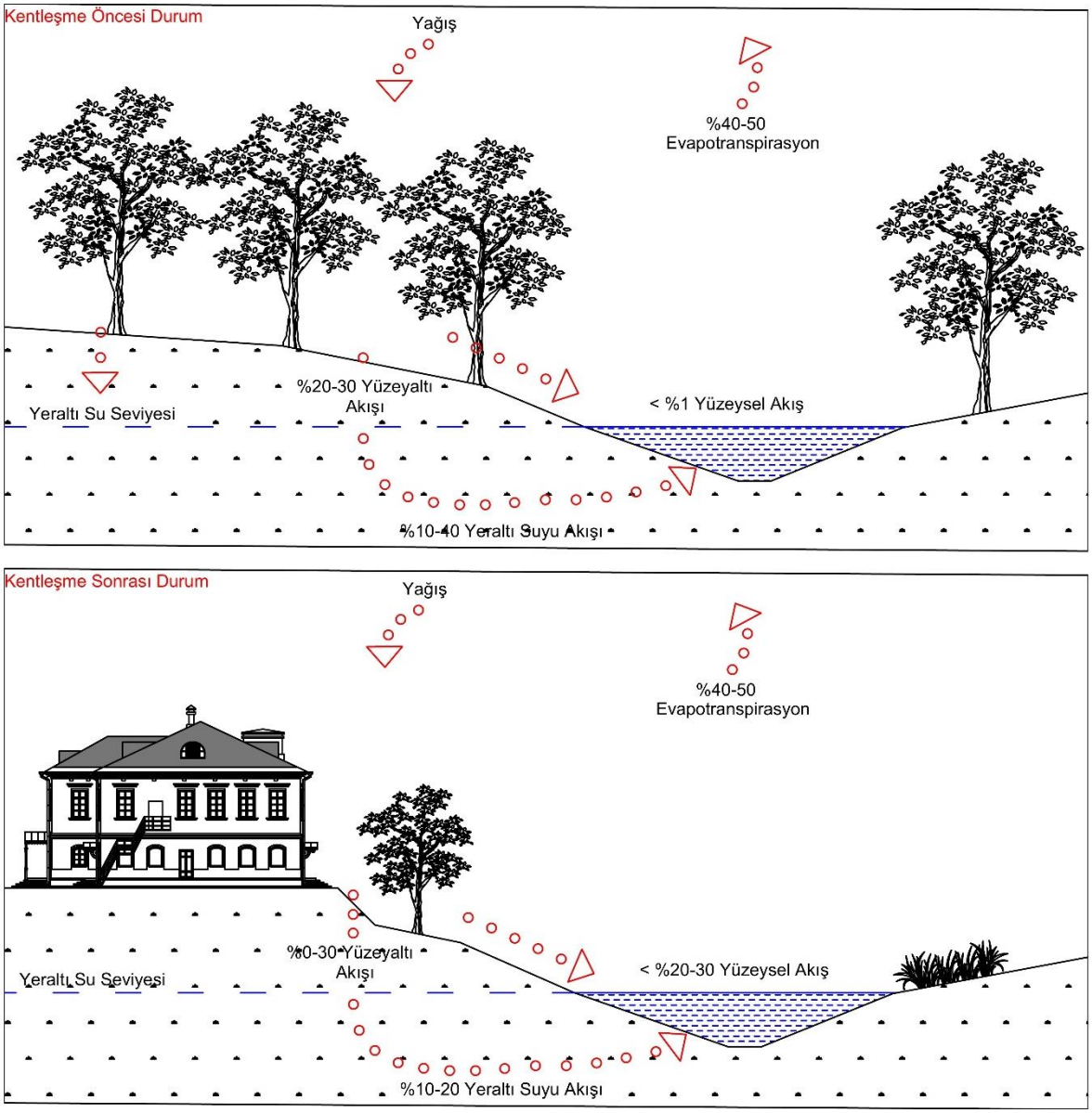
(iii) Finally, an intergrated mathematical model was developed in order to simulate the hydrological behavior of the grass swale. This model couples the Swale Overflow Model and the Swale Drainage Model. The developed mathematical model was validated with the measurements. It was concluded that the mathematical model simulates both swale overflow and drainage flow behavior quite well.

July 2022, 178 pages.

Keywords: Grass Swale, Low Impact Development, Green Infrustructure, Nature-Based Solutions, Hydrological Performance, EPA SWMM, Mathematical Modeling

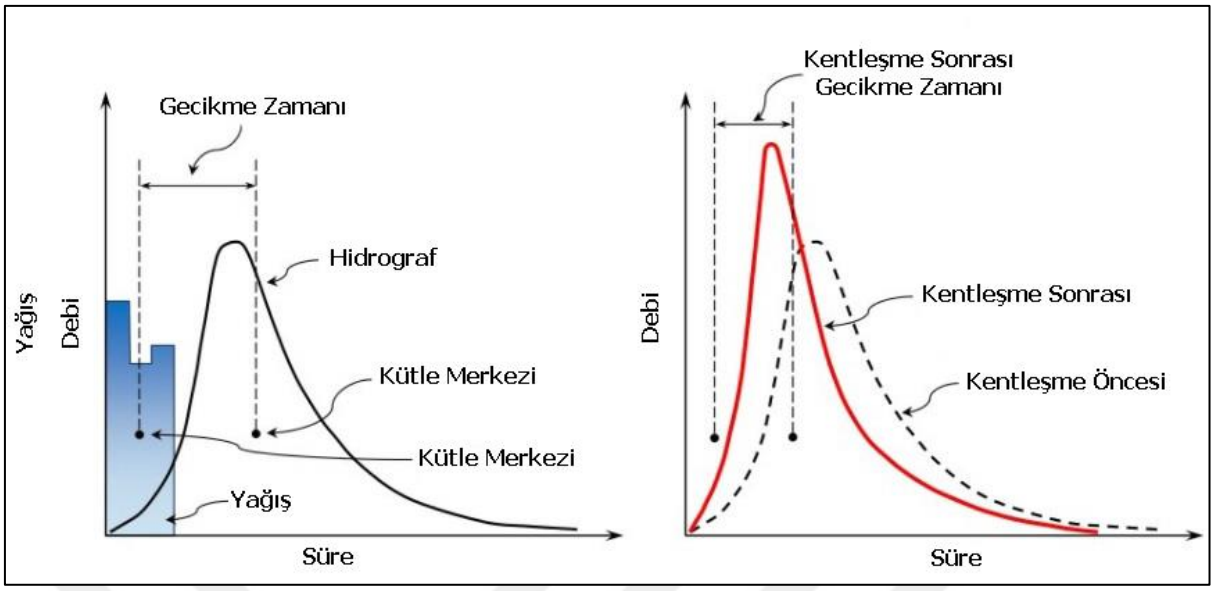
1. GİRİŞ

19. yüzyıldan önce dünya nüfusunun büyük bir bölümü kırsal bölgelerde yaşarken, sanayi devrimiyle birlikte kırsal bölgelerde yaşayan nüfusun önemli bir kısmı sosyal ve ekonomik nedenlerden dolayı kentsel bölgelere göç etmek zorunda kalmıştır. Birleşmiş Milletlerin 2014 yılında yayınlanan raporu kentsel bölgelerde yaşayan nüfusun, kırsal bölgelerde yaşayan nüfustan fazla olduğunu göstermektedir. Yine aynı rapora göre 1950 yılında, dünya nüfusunun %30'u kentsel bölgelerde yaşarken bu oran 2014 yılında %50'ye ulaşmıştır. Bu oranın ise 2050 yılına kadar %60'a ulaşması beklenmektedir (UN World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, 2014). Ortaya çıkan hızlı kentleşmeyle birlikte doğal bitki örtüsünün bulunduğu alanlara inşa edilen binalar, yollar ve otopark alanları ile geçirimli yüzeyler geçirimsiz yüzey alanlarına dönüşmüştür. Bu durum, doğal drenaj sistemlerinin insan yapımı altyapı sistemlerine dönüştürülmesine neden olmaktadır. Günümüzde artan kentleşmeyle birlikte hidrolojik döngü süreçleri de olumsuz olarak etkilenmektedir. Yaşam alanlarındaki geçirimsiz yüzeylerin artmasıyla yağmur suyunun bir noktadan diğer bir noktaya ulaşma süreleri ile sızma miktarları azalmakta, akışa geçen yağış miktarı artmaktadır (Leopold, 1968). Hidrolojik döngüde yaşanan bu değişimler taşkın olaylarının yaşanma sıklıklarının ve yıkıcı etkilerinin artmasına neden olmuştur. Dünya Risk Endeksi (DRE), 180 ülkede olağandışı doğa olayları sonucunda meydana gelebilecek afet riskini tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Türkiye, 180 ülke arasında Dünya Risk Endeksi bakımından en riskli 113. ülke konumundadır. 2019 yılında Türkiye'de 273 sel ve su baskını olayı ile karşılaşılmıştır (Afet Yönetimi Kapsamında 2019 Yılına Bakış ve Doğa Kaynaklı Olay İstatistikleri, 2020). Küresel iklim değişikliği etkileriyle birlikte gelecekte görülebilecek doğal afet olaylarının sıklığının ve yıkıcı etkilerinin artması beklenmektedir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, özellikle sel ve su baskını olayları açısından kentsel bölgelerdeki yaşam alanlarında geleneksel altyapı sistemlerinin yeterli olmadığı görülmektedir. Geleneksel altyapı sistemlerinde toplanan yağmur suları, boru sistemleri vasıtasıyla iletilmektedir. Geleneksel sistemlerin, pik debilerde düşüş ve sızma miktarlarında artış gibi kentleşme sonucunda ortaya çıkan olumsuz etkileri hafifletme etkisi yoktur. Kentleşmenin sızma ve yüzeysel akışa etkileri Şekil 1.1'de net olarak görülmektedir.



Şekil 1.1: Kentleşmenin sızma ve yüzeysel akışa etkileri (Calkins (2012)'den uyarlanmıştır).

Kentleşmeyle birlikte geçirimsiz yüzeylerdeki artış sızma miktarlarını önemli ölçüde düşürürken, yağışın hızla yüzeysel akışa geçmesine neden olmaktadır. Kentleşme öncesinde yüzeysel akışa geçen miktar %1'den düşük iken, kentleşmeyle birlikte bu oran %20-30'a çıkmaktadır. Sızma miktarlarındaki değişim ise belirgin bir şekilde düşmektedir. Kentleşme öncesinde %10-40 yeraltı suyu akışı gözlemlenirken bu oran kentleşmeyle birlikte %10-20'lere düşmektedir (Şekil 1.1). Benzer etkiler yüzeysel akış hidrograflarına da yansımaktadır. Şekil 1.2'de kentleşmenin yüzeysel akış hidrografına etkileri görülmektedir.



Şekil 1.2: Kentleşme ile yüzeysel akış hidrografında gözlemlenen değişim (Leopold (1968)'den uyarlanmıştır).

Kentsel bölgelerdeki geçirimsiz yüzey alanlarının artmasıyla birlikte hidrografın pik debisinde de artış meydana gelmektedir. Bununla birlikte, kentleşmenin gecikme zamanında da değişime neden olduğu görülmektedir. Gecikme zamanının düşmesiyle birlikte pik debiye ulaşma süresi de kısalacaktır.

Bahsedilen etkiler dışında, kentleşmenin diğer olumsuz etkilerinden birisi de su kalitesinde meydana getirdiği düşüşlerdir. Gelişmiş ülkelerde, kentleşmenin su kalitesi üzerine etkileri son 20 yılda büyük önem kazanmıştır. Kar erimeleri ve yağışlarla toplanan suyun büyük bir bölümü geçirimsiz yüzeylerde biriken suni ve doğal kirlilik maddeleriyle bir araya gelmekte, yüzeysel akışla birlikte nehirler ve göller gibi içme suyu kaynaklarına iletilmektedir. Bu durum içme suyu kaynaklarımız açısından büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı'na (U.S. Environmental Protection Agency) göre yüzeysel akış en büyük yayılı su kirliliği kaynağıdır. Su kalitesinin düşüşüne neden olan yüzeysel akışın başlıca kirlilik kaynakları, gübreler, ağır metaller, hidrokarbonlar, koliformlar ve katı maddelerdir. Aşağıda sunulan tabloda kentsel bölgelerdeki yüzeysel akışlarda karşılaşılan yayılı kirlilik maddeleri ve konsantrasyon değerleri yer almaktadır (Tablo 1.1).

Tablo 1.1: Kentsel bölgelerdeki yüzeysel akışlarda karşılaşılan yayılı kirlilik maddeleri ve konsantrasyon değerleri (lbs/dönüm-yıl) (Burton ve Pitt, 2002).

Arazi Kullanımı	Kirleticiler									
	TSS	**TP**	**TKN**	**NH_3-N**	**NO_2+NO_3-N**	**BOD**	**COD**	**Pb**	**Zn**	**Cu**
Ticari Alan	1000	1.5	6.7	1.9	3.1	62	420	2.7	2.1	0.4
Park Alanı	400	0.7	5.1	2.0	2.9	47	270	0.8	0.8	0.04
YYY	420	1.0	4.2	0.8	2.0	27	170	0.8	0.7	0.03
OYY	190	0.5	2.5	0.5	1.4	13	72	0.2	0.2	0.14
DYY	10	0.04	0.03	0.02	0.1	-	-	0.01	0.04	0.01
Otoyol	880	0.9	7.9	1.5	4.2	-	-	4.5	2.1	0.37
Endüstriyel Alan	860	1.3	3.8	0.2	0.3	-	-	2.4	7.3	0.5

*YYY: Yüksek yoğunluklu yerleşim alanı, OYY: Orta yoğunluklu yerleşim alanı, DYY: Düşük yoğunluklu yerleşim alanı

Tablo 1.1'de yer alan konsantrasyon değerleri göz önünde bulundurulduğunda, kirlilik maddelerinin hem insan sağlığı hem de ekolojik sistem içerisinde yer alan diğer canlı türleri açısından ne kadar ciddi bir tehdit oluşturdukları görülmektedir.

Kentleşmenin hem hidrolojik hem de su kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini anlamak, yorumlamak ve azaltmak amacıyla yeni çözüm yöntemleri geliştirilmektedir. Bu bağlamda, Düşük Etkili Kentleşme (DEK) uygulamaları, 1990'lı yıllarda ortaya konan ekolojik mühendislik yöntemleri olup yeşil altyapı olarak da bilinmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, en sık uygulanan DEK yöntemlerinden biri olan bitkili yağmur hendeklerinin hidrolojik performansı deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

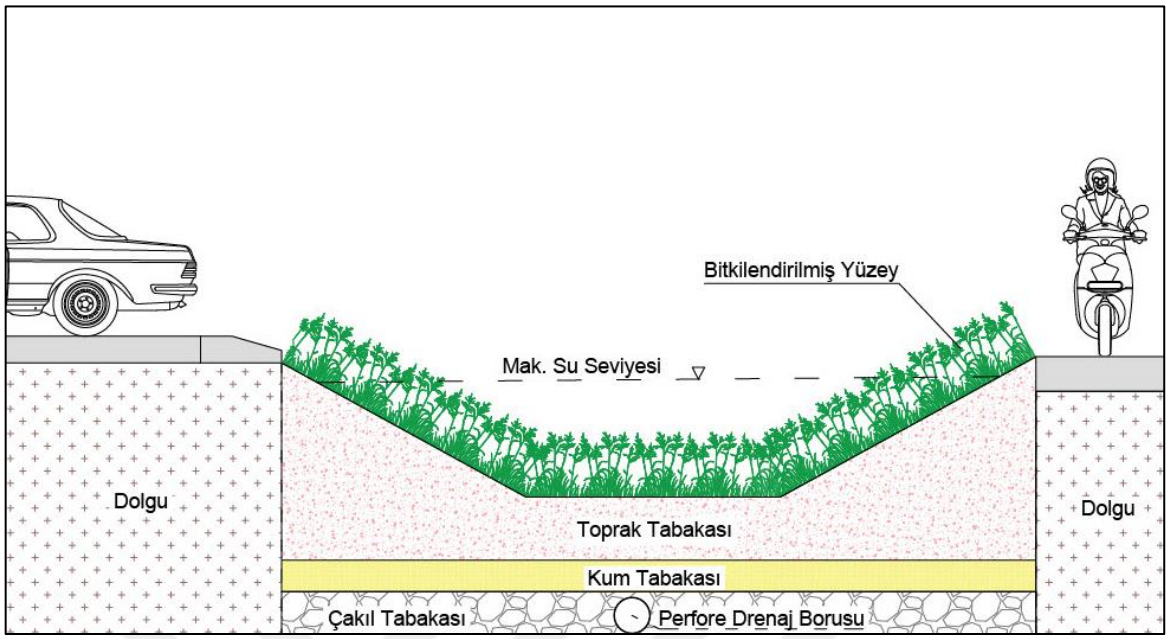
2.1. DÜŞÜK ETKİLİ KENTLEŞME YÖNTEMLERİ

Kentleşmenin hem su miktarı hem de su kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini anlamak, yorumlamak ve azaltmak amacıyla yeni çözüm yöntemleri araştırılmaktadır. Bu bağlamda, Düşük Etkili Kentleşme (DEK) uygulamaları, 1990'lı yıllarda ortaya konan bir ekolojik mühendislik yöntemidir. En İyi Yönetim Uygulamaları'nın (EİYU) alt havza ya da parsel bazında yapılanları olup literatürde yeşil alt yapı (green infrastructure) veya doğa tabanlı çözümler (nature-based solutions) olarak da bilinmektedir. Yaygın olarak uygulanan DEK yöntemleri; biyotutma (bioretention), yağmur bahçesi (rain garden), yeşil çatı (green roof), sızdırma hendeği (infiltration trench), geçirgen kaldırım (permeable pavement), yağmur tankı (rain barrel) ve bitkili yağmur hendeği (vegetative swale)'dir.

2.1.1. Bitkili Yağmur Hendeği

Bitkili yağmur hendekleri, yüzeysel akışın taşınması, depolanması, drene edilmesi ve suyun arıtılması için kullanılan bitkilendirilmiş doğal açık kanal yapılarıdır. Bitkili yağmur hendekleri, yüzeysel akışı bir noktadan farklı bir noktaya iletirken, teşkil edildikleri toprağın iletkenlik özelliklerine bağlı olarak akışın belli bir miktarının sızmasına olanak sağlayıp yeraltı suyunun beslenmesinde de önemli görev üstlenmektedirler. Aynı zamanda, bu yapılar doğal hidrolojik döngü içerisinde hem yüzeysel akışı yavaşlatma hem de su kalitesinde iyileşmeye neden olmaktadır. Hendek içinde kullanılan bitkiler pik debiyi kontrol etmekte ve özellikle uygun bitki türlerinin kullanılması, bitki kökleri tarafından tutulan kirlilik maddelerinin sistemden kolaylıkla uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Bitkili yağmur hendekleri genellikle yol kenarlarında uygulanırken bazen de peyzaj amaçlı olarak tercih edilmektedir. Bu yapılar, bacalar vasıtasıyla toplanan yağmur sularının iletim borularıyla aktarıldığı geleneksel altyapı sistemlerine alternatif olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Doğru tasarlanan ve düzenli olarak bakımları yapılan bitkili yağmur hendekleri hem çevre dostu hem de etkin ekonomik çözümler olabilmektedir. Şekil 2.1'de tipik bir bitkili yağmur hendeği şematiği görülmektedir.

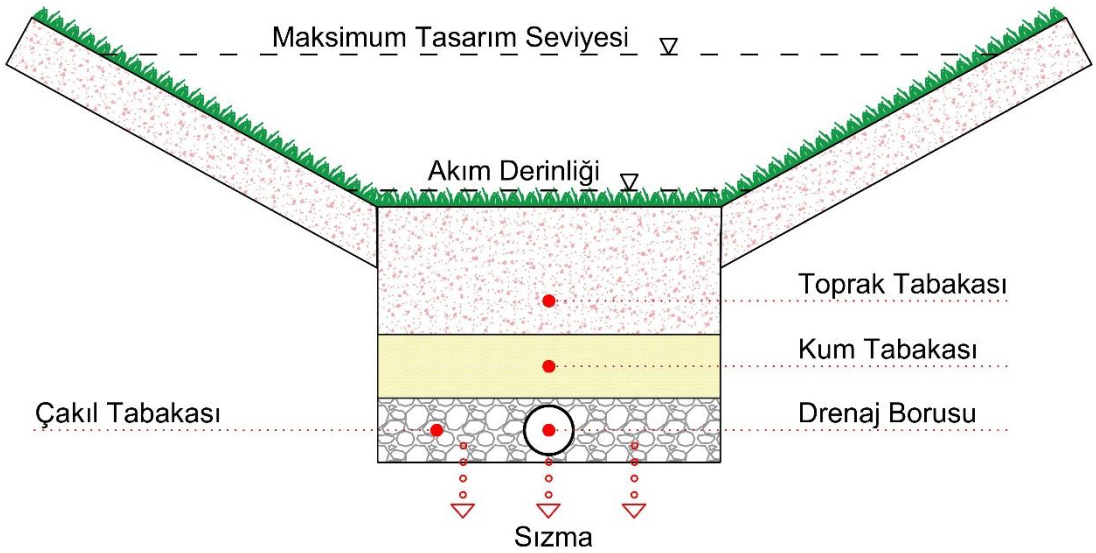


Şekil 2.1: Bitkili yağmur hendeği şematiği (Calkins (2012)'den uyarlanmıştır).

Bitkili yağmur hendekleri kuru ve ıslak yağmur hendekleri olmak üzere iki farklı şekilde tasarlanıp uygulanabilmektedir.

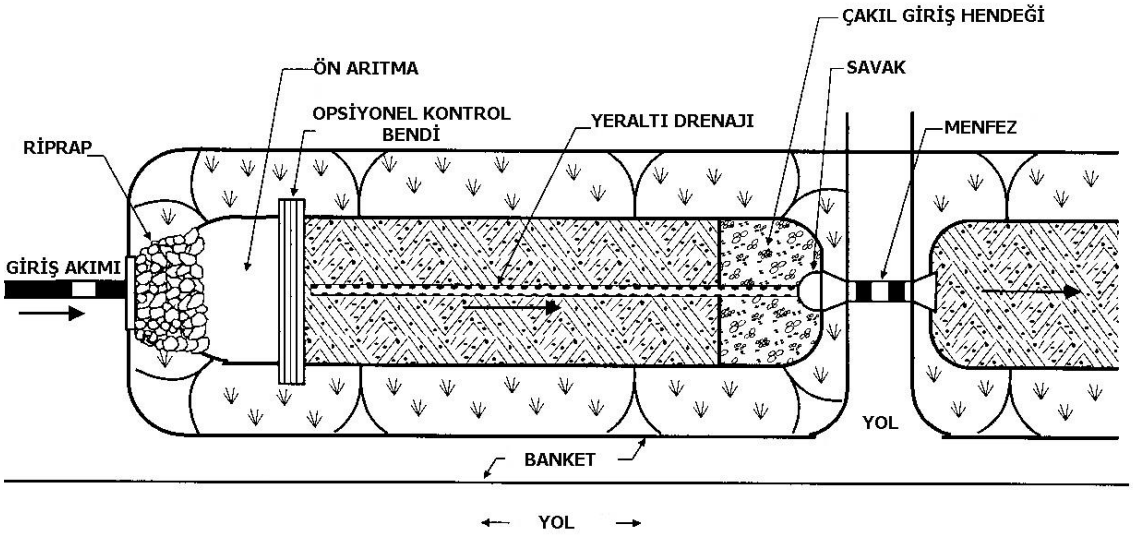
2.1.1.1. Bitkili Kuru Yağmur Hendeği

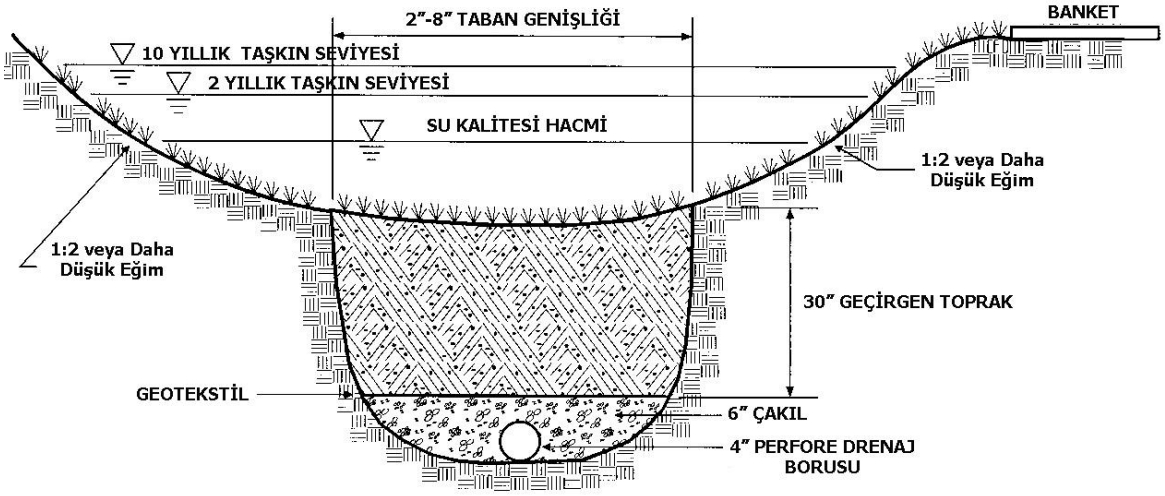
Bitkili kuru yağmur hendekleri, sahip oldukları filtre tabakasının sızmaya izin vermesi nedeniyle hendeğin çoğu zaman kuru kalmasına olanak sağlamaktadır. Bu nedenle bitkili kuru yağmur hendekleri olarak adlandırılırlar. Şekil 2.2'de tipik bir bitkili kuru yağmur hendeği kesit görüntüsü yer almaktadır. Buna ilaveten Şekil 2.3'te yol kenarına inşa edilen bitkili kuru yağmur hendeği uygulamasına ilişkin plan ve kesit görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 2.2: Bitkili kuru yağmur hendeği kesiti (Wilson ve diğ. (2004)'den uyarlanmıştır).

Akım hızının yüksek olduğu durumlarda bu tip yapılara kontrol bentleri (check dams) de eklenerek akımı geciktirme süreleri arttırılabilmektedir. Bitkili kuru yağmur hendeklerinin sızma performanslarını arttırmak için de filtre tabakasının özellikleri tasarım aşamasında çok daha geçirgen bir yapıya sahip olacak şekilde tasarlanabilmektedir. İlaveten, drenaj borularının kullanımı sızma miktarının artmasına ve sızan suyun hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasına olanak sağlayacaktır. Bitkili kuru yağmur hendekleri, sahip oldukları bu özellikler sayesinde doğal yapılı açık kanallar arasında hem peyzaj hem de hidrolik ve hidrolojik açıdan sıklıkla tercih edilebilecek çözüm yöntemlerine dönüşmektedirler.

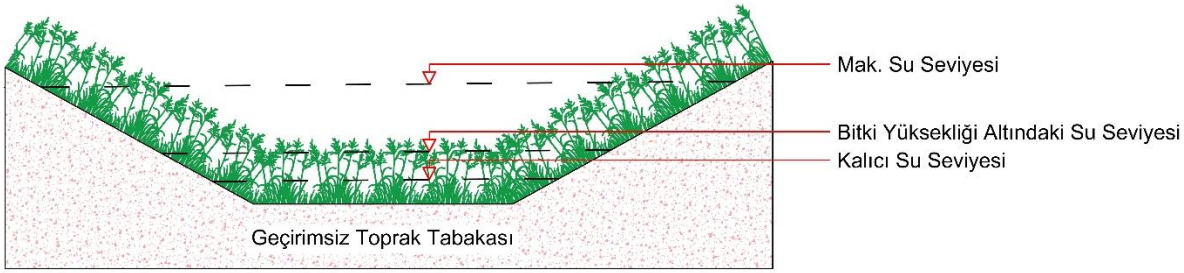




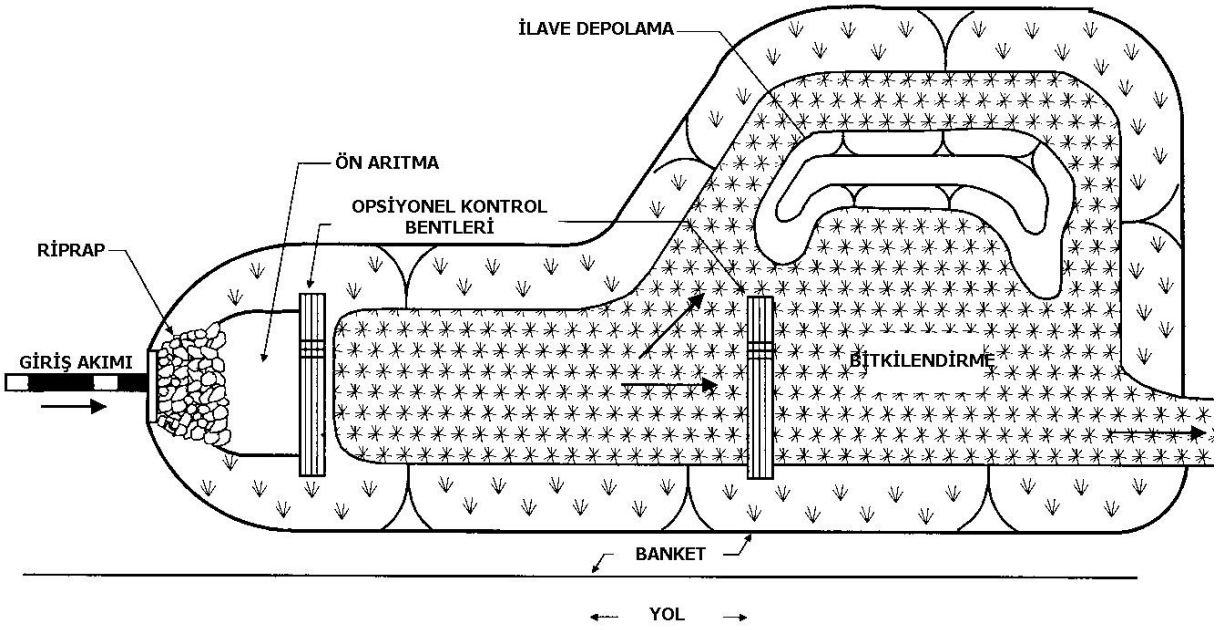
Şekil 2.3: Bitkili kuru yağmur hendeği uygulamasına ilişkin plan ve kesit görüntüleri (Vermont Agency of Natural Resources (2002)'den uyarlanmıştır).

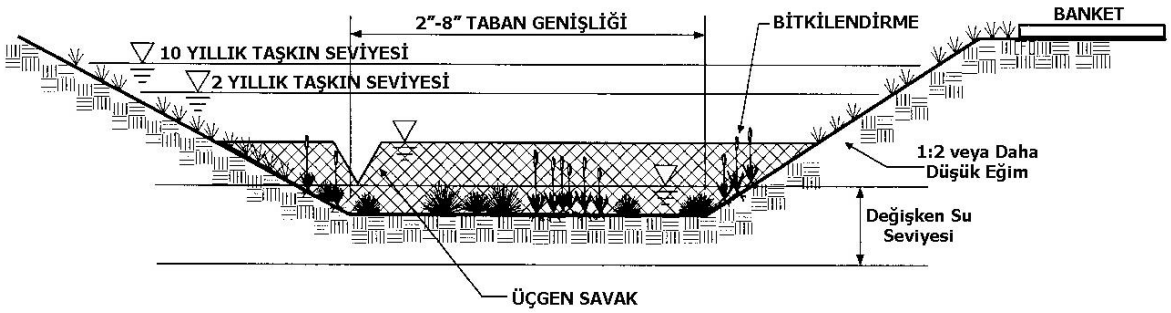
2.1.1.2. Bitkili Islak Yağmur Hendeği

Bitkili ıslak yağmur hendekleri, geçirimsiz toprak tabakaları üzerine teşkil edildiklerinden dolayı yağmur suyunun sızmasına olanak sağlamamaktadırlar. Yağmur suyunun hendek kanalında kalmasından dolayı ıslak yağmur hendekleri olarak adlandırılmaktadırlar. Şekil 2.4'te bitkili ıslak yağmur hendeği kesit görüntüsü ile Şekil 2.5'te uygulamaya ilişkin plan ve kesit görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 2.4: Bitkili ıslak yağmur hendeği kesiti (Wilson ve diğ. (2004)'den uyarlanmıştır).





Şekil 2.5: Bitkili ıslak yağmur hendeği uygulamasına ilişkin plan ve kesit görüntüleri (Vermont Agency of Natural Resources (2002)'den uyarlanmıştır).

2.1.2. Bitkili Yağmur Hendeği Uygulamalarının Avantajları ve Dezavantajları

Bitkili yağmur hendekleri hem peyzaj hem de hidrolik ve hidrolojik açıdan tercih edilen mühendislik uygulamalarıdır. Tasarlanması ve uygulaması görece kolay çözüm yöntemleridir. Genellikle park alanları, otoyol kenarları gibi alanlarda tercih edilmektedirler. Bitkili yağmur hendeklerinin tercih edilebilmesi için toprak ve yeraltı suyu koşullarının uygun olması gerekmektedir. Bitkili yağmur hendeklerinin teşkil edildiği bölgelerdeki toprak özelliklerinin seçilen bitki türleri için uygun olması beklenmektedir. Bitkili yağmur hendekleri sağladıkları birçok avantaj nedeniyle günümüzde tercih sebebi olmaktadır. Bu tip uygulamaların sağladığı avantajlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Pik debi değerlerinin düşürülmesi,
- Sızma miktarının arttırılması,
- Pik debiye ulaşma sürelerinin geciktirilmesi,
- Peyzaj uygulamalarına uyumlu çözümler olmaları,
- Düşük maliyetli olmaları,
- Bakım giderlerinin düşük olması,
- Çevre dostu yapılar olmaları,
- Yüzeysel akışla birlikte taşınan kirletici maddelerin tutularak kirleticilerin su kaynaklarına iletilmesine engel olmalarıdır (Wilson ve diğ. (2004)).

Sağladıkları birçok avantaja rağmen bu tip uygulamaların beraberinde getirecekleri dezavantajlar da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Düşük yağış şiddetine sahip yağış olaylarında etkin olmalarına rağmen yağış şiddeti arttıkça performanslarında belirgin düşüşlerin yaşanması,
- Erozyonun önlenmesinin güç olduğu topraklarda uygulama zorlukları,
- Çok dik ya da çok düşük eğimli arazilerde pratik çözümler olmamaları,
- Tekerrür aralığı büyük olan yağışlar için büyük tasarım boyutlarına ihtiyaç duyulması,

- Tasarımlarının uygun yapılmaması durumunda etkin performans sergilememeleridir (Wilson ve diğ. (2004)).

2.1.3. Bitkili Yağmur Hendeklerinin Tasarım Kriterleri

Bitkili yağmur hendekleri inşa edildikleri alanlarda meydana gelebilecek erozyon problemlerinin önüne geçilmesi amacıyla iri kumlu zeminlerde tercih edilmemelidir. Çünkü iri kumlu zeminler yoğun bitki oluşumu açısından elverişsiz bir ortam oluşturmaktadır. Sızma hızı ise 10^{-6} m/s'den daha büyük olmalıdır (Watkins (1995), Bettess (1996)). Yağmur hendekleri için killi zeminler sızma hızında düşüşe neden olduklarından dolayı genellikle uygun olmamaktadır. Sızma problemlerinin yaşanmaması amacıyla yağmur hendeklerinin inşası esnasında kompaksiyon işlemi önerilmemektedir. Yeraltı suyu seviyesi hendek tabanından en az 1 m aşağıda olmalıdır (Wilson ve diğ. (2004)).

Yağmur hendekleri tasarımı için gerekli olan koşullar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Su kalitesi açısından hendek yüzeyinde oluşan akım yüksekliğinin bitki yüksekliğinden daha düşük olması,
- Uygun depolama hacminin sağlanması,
- Yüzeysel akışla beraber taşınan yağmur suyunun kontrollü bir şekilde iletilmesi ve uzaklaştırılmasına olanak sağlanmasıdır.

Hendek yüzeyindeki akım hızının hesaplanmasında Manning denkleminden yararlanılmaktadır:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} \tag{2.1}$$

Bu denklemde; V, ortalama akım hızını(L/T), n, Manning pürüzlülük katsayısını, R, hidrolik yarıçapı (L), S_0 kanal eğimini (L/L) ifade etmektedir. Manning denklemindeki pürüzlülük katsayısı, hendeğin akıma karşı göstereceği direnci temsil etmektedir. Bu direnç, pik debiye ulaşma süreleri ile pik debi değerlerini etkilemektedir. Tasarım aşamasında pürüzlülük katsayısı değerinin yanlış seçilmesi akım hızının beklenenden daha yüksek ya da daha düşük olmasına neden olacaktır. Akım hızının beklenenden daha büyük olması hendek yüzeyinde aşınma veya

erozyona neden olacakken, akım hızının beklenenden daha düşük olması da taşkın gibi gerçekleşmesini istemediğimiz olayların riskini arttıracaktır.

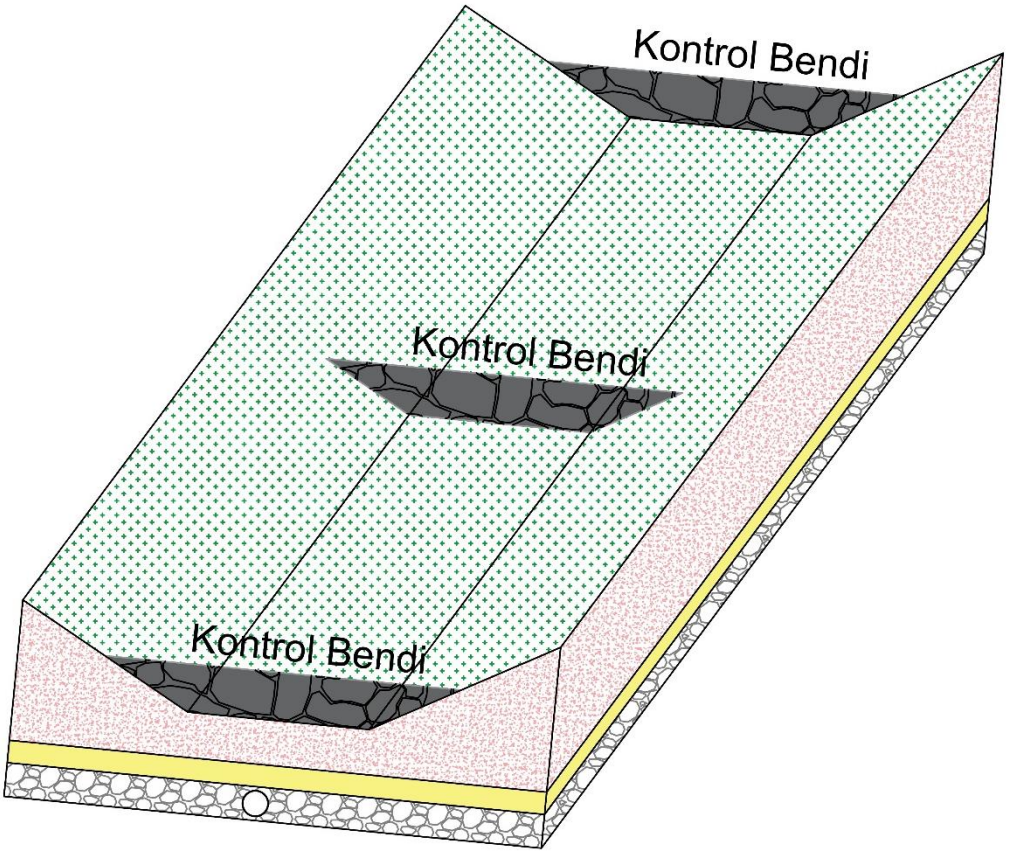
Hendek yüzeyinde meydana gelebilecek erozyonun önüne geçmek amacıyla akım hızı değerinin kritik değerden düşük olması gerekmektedir. Maksimum akım hızı değeri 1 m/s'den 2 m/s'ye kadar değişiklik gösterebilmektedir (City of Eugene Stormwater Management Program (2002), Richman ve diğ. (1998)). Bu değişikliğe neden olan etmenler eğim, toprak özellikleri ve bitki türüdür.

Bitkili yağmur hendekleri, hidrolik ve hidrolojik performansları açısından inşa kolaylığı için trapez ya da parabolik kesitli olarak tasarlanabilmektedirler (Wilson ve diğ. (2004)). Bitkili yağmur hendekleri şev eğimlerine sahip açık kanal yapılarıdır. Bu nedenle şev eğimi değerlerine ilişkin de tasarım kriterleri bulunmaktadır. Bunun altında yatan neden hendek yüzeyinde ince bir tabaka akışı sağlamak, maksimum ıslak yarıçap değerine ulaşmak ve oluşabilecek aşınma ve erozyonu azaltmaktır. Daha önce de belirtildiği üzere, hendek yüzeyinde oluşan ortalama akım hızı değeri Manning Denklemi yardımıyla hesaplanmaktadır. Manning Denkleminde yer alan hidrolik yarıçap (R), hendek kesit alanının ıslak çevreye oranıdır. Maksimum hidrolik yarıçap değerine ulaşabilmek içinde hendek kesit alanının büyük, ıslak çevre oranının da küçük olması gerekmektedir. Zemin özellikleri dikkate alınarak şev stabilitesi problemlerine yol açmamak adına maksimum şev eğimi değeri 1:3 olarak tasarım aşamasında dikkate alınabilmektedir. Yağmur hendeklerinin taban genişlikleri hendek yüzeyinde oluşacak akım özellikleri ile hendeğin bakım işlemleri açısından kolaylık sağlamaktadır. Bu hususlar göz önünde bulundurulduğunda, yağmur hendeği maksimum taban genişliği değerinin 2.5-3.0 m olarak sınırlandırılması uygun olmaktadır. Bitkili yağmur hendeklerinin tasarımında dikkat edilmesi gereken bir diğer parametre hendeklerin boyuna eğim değeridir. Hendeklerin boyuna eğim değeri, hem akış hızı nedenli olarak oluşabilecek risklerin önüne geçmek hem de sızma performansının arttırılması açısından önemlidir. Manning Denkleminde (Denklem 2.1) S_0 olarak ifade edilen eğim değerinin artması hendek yüzeyinde oluşacak ortalama akım hızı değerinin de artmasına neden olacaktır. Bununla birlikte, hendek boyuna eğim değerinin artması hendeğin alt katmanlarına sızacak su miktarının da düşmesi anlamına gelmektedir. Hem erozyon ve aşınma riskinin artması hem de sızma performansının düşmesi, bitkili yağmur hendeklerinin hidrolik ve hidrolojik performansı açısından istenmeyen bir durum olacaktır. Bu nedenle uygun hendek eğimi değerinin Manning Denklemi kullanılarak hesaplanması gerekmektedir. Yüksek eğim değerlerinde akım hızını düşürmek amacıyla

kontrol bendi (check dam) uygulamaları tercih edilebilmektedir. Yağmur hendeğinin boyuna eğim değerinin %4'ü aşması durumunda kontrol bendi uygulaması zaruri olmaktadır. Kontrol bentlerinin uygulandığı durumlarda bentler arası mesafe önem arz etmektedir. Minnesota Kirlilik Kontrol Ajansı (Minnesota Pollution Control Agency (MPCA) (2000))'e göre hendek eğimi ile kontrol bentleri arasındaki önerilen mesafe ilişkisi Tablo 2.1'de yer almaktadır. Tablo 2.1'de verilen değerler incelendiğinde, yağmur hendeğinin boyuna eğim değeri arttıkça uygulanacak kontrol bentleri arasındaki mesafenin düştüğü görülmektedir. Yani kontrol bentlerinin hendeğin boyuna eğim değeri arttıkça daha fazla sayıda uygulanması gerekmektedir. Kontrol bentlerinin kullanıldığı bitkili yağmur hendeği uygulamasına ilişkin görsel Şekil 2.6'da yer almaktadır.

Tablo 2.1: Bitkili yağmur hendeği boyuna eğim değerleri ile kontrol bentleri arasındaki mesafe (MPCA (2000)).

Yağmur Hendeği Boyuna Eğim Değeri (%)	Kontrol Bentleri Arasındaki Mesafe (m)
1	60
2	30
4	15
6	10
8	8
10	6



Şekil 2.6: Bitkili yağmur hendeklerindeki kontrol bendi uygulamasına ilişkin örnek görüntü.

Bitkili yağmur hendekleri için bitki türü seçimi hem işlevsellik hem de estetik açıdan önemlidir. Bitki türü seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Bitki türünün iklim koşulları göz önünde bulundurularak seçilmesi gerekmektedir. Özellikle kuraklığa yatkın bölgelerde bu koşullara dayanıklı bitki türleri tercih edilmelidir.

- Hendekler yeterli bitki yoğunluğuna sahip olmalıdır. Yeterli bitki yoğunluğuna sahip olunmaması durumunda hendek yüzeyinde oyulmaların ve erozyonun oluşma riski artmaktadır.

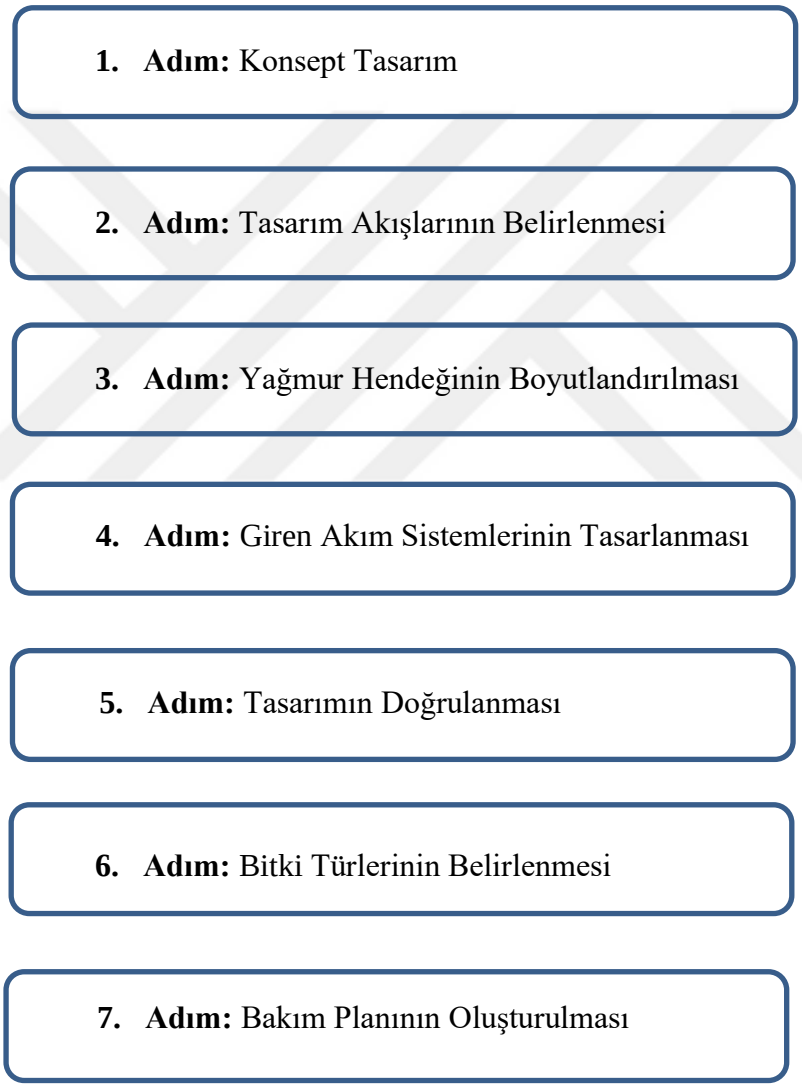
- Su arıtımı performansı dikkate alındığında daha yoğun bitkilerin seçilmesi önerilmektedir. Böylelikle kirletici maddelerin bitkiler tarafından tutulumu kolaylaşmakta ve tutulum oranı artmaktadır.

- Bitki türü seçiminde estetik amaçlar da dikkate alınmalıdır.
- Bitki türü seçiminde toprak özellikleri büyük önem arz etmektedir. Toprak özellikleri dikkate alınarak yapılan bitki türü seçimi ile uzun dönemde karşılaşılabilecek olumsuz durumlar ortadan kalkacaktır.
- Seçilecek bitki türleri, hendek bakım planlamaları açısından önemlidir. Bitki seçiminde bakım planlamaları da göz önünde bulundurulmalıdır.

Bitkili yağmur hendeklerinin görevlerini uygun bir şekilde yerine getirebilmeleri için hem doğru tasarlanmaları hem de düzenli olarak bakımlarının yapılması gerekmektedir. Birçok yağmur suyu yönetim stratejisine göre bitkili yağmur hendekleri bakım masrafları açısından ekonomik çözümlerdir.

2.1.4. Bitkili Yağmur Hendeğinin Tasarım Aşamaları

Bitkili yağmur hendeklerinin tasarım süreci, hendekten beklenen akış ya da arıtım gereksinimlerinin belirlenip hendeğin nihai tasarım değerlerine ulaşılması olarak tanımlanabilmektedir. Bu tasarım süreci birçok adımdan meydana gelmektedir. Bu sürecin amacı bitkili yağmur hendeği performansının optimize edilmesidir. Bitkili yağmur hendeklerinin tasarım sürecine ilişkin akış diyagramı Şekil 2.7'de sunulmuştur.



Şekil 2.7: Bitkili yağmur hendeklerinin tasarım aşamaları (Gold Coastal Planning Scheme Policies (2005)).

2.2. ÇALIŞMANIN AMACI ve KAPSAMI

Bitkili yağmur hendeklerine ilişkin literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, su miktarı ve kalitesi ile ilgili çeşitli sayısal ve deneysel çalışmalar olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların büyük kısmı saha ölçekli çalışmaları içermektedir.

Yağmur hendeklerinin hidrolojik davranışını ortaya koymak üzere yürütülen çalışmalar su kalitesine ilişkin çalışmalara göre oldukça kısıtlıdır. Bitkili yağmur hendeklerine ilişkin yürütülen laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar ise oldukça az sayıdadır. Bu tez çalışması kapsamında literatürdeki bu boşluğun doldurulması amaçlanmıştır.

Wu ve diğ. (1998) yürütmüş oldukları çalışmada Kuzey Carolina'nın Piedmont Bölgesindeki 3 farklı sahada Ağustos 1995 – Temmuz 1996 dönemini kapsayacak şekilde 31 yağış olayı için bitkili yağmur hendeğinin su kalitesi performansını gözlemlemişlerdir. Pik debi değerlerinde %10-20 oranında düşüşlerin olduğunu raporlamışlardır.

Bäckström (2002), 9 farklı hendek kullanarak bitkili yağmur hendeğindeki katı madde taşınımını incelemiştir. Bu bağlamda hem laboratuvar deneyleri hem de saha ölçümleri gerçekleştirmiştir. Laboratuvar deneylerinde 5 m uzunluğundaki 2 adet suni çimli hendekten yararlanırken, saha ölçümleri ise İsveç'in Luleå Bölgesindeki 7 bitkili yağmur hendeğinde yürütülmüştür. Ancak klasik bitkili yağmur hendeği kesitinin aksine bu çalışmada kullanılan hendekler dikdörtgen kesitlidir. Yürütülen deneyler sonucunda, askıda katı madde tutulum oranlarının %79 ile %98 arasında değiştiği görülmüştür.

Bir diğer saha ölçekli çalışma da Rujner ve diğ. (2018) tarafından yürütülmüştür. Başlangıç toprak nemi (initial soil moisture) koşullarının hendek akış hidrografına etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada 1956 ve 2006 yıllarında inşa edilen 30 m uzunluğunda ve trapez kesitli iki bitkili yağmur hendeği kullanılmıştır. Deneylerde başlangıç toprak nemi değerleri 0.18 m^3/m^3 ile 0.43 m^3/m^3 aralığında değişmektedir. Elde edilen bulgularda, başlangıç toprak nemi değerinin hendek davranışını belirgin bir şekilde etkilediği görülmüştür.

Bitkili yağmur hendeklerinin uygulama alanları olarak genellikle otoyol ve park alanları gibi bölgeler tercih edilmektedir. Rushton (2001), Tampa (ABD)'de Florida Akvaryumu park alanında bulunan bitkili yağmur hendeğinin su kalitesi ve yüzeysel akış üzerindeki davranışını incelemiştir. Bu çalışma kapsamında park alanının küçük bir kısmına dahi yerleştirilen hendeğin, yüzeysel akışın miktar ve kalitesi üzerinde belirgin farklılıklara neden olduğu ortaya

konulmuştur. 2 yıllık çalışmanın ilk yılına ilişkin sonuçları değerlendiren Rushton (2001), bitkili yağmur hendeğinin ortalama akış değerlerinde %30 azalmaya neden olduğu sonucuna varmıştır.

Barrett (2005), çalışmasında En İyi Yönetim Uygulamalarının (Best Management Practices) yapısal performanslarını karşılaştırmıştır. California'nın (ABD) farklı bölgelerindeki Geciktirme Havzası (Detention Basin), Kum Filtresi (Sand Filter) ve Bitkili Yağmur Hendeği uygulamalarının su kalitesi performanslarını gözlemleyerek karşılaştırmıştır. Bitkili yağmur hendeğinin ortalama akış hacminde %30 oranında düşüşe neden olduğunu gözlemlemiş ve raporlamıştır.

Davis ve diğ. (2012), Maryland (ABD)'de bulunan 4 şeritli otoyolda inşa edilmiş bitkili yağmur hendeğinin hidrolik performansını, yürütmüş olduğu çalışma ile ortaya koymuştur. İki yaygın yağmur hendeği alternatifi olan Filtre Şeridi (Filter Strip) ile Bitkili Yağmur Hendeği 4.5 yıl boyunca 52 yağış sırasında gözlemlenmiştir. Hendeklerin toplam su hacmi ile akış değerlerinde belirgin düşüşlere neden oldukları görülmüştür. Kontrol bendi uygulamasının da etkilerini ortaya koyan bu çalışmada, kontrol bentlerinin, hendeklerin hidrolik performansında belirgin katkılarının olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, bitkili yağmur hendeğinin neden olduğu ortalama su hacmi düşüşü ise %59 olarak belirlenmiştir.

Bitkili yağmur hendeklerine ilişkin modelleme çalışmalarının da literatürde yaygın bir şekilde yer aldığı görülmüştür. Bu çalışmalardan ilki Deletic (2001) tarafından yürütülen çalışmadır. Bu çalışmada, çim alanlar üzerindeki katı madde taşınımının matematiksel modeli geliştirilmiştir. Bir boyutlu olan matematiksel model, akışın gelişimi ve katı madde taşınımı olmak üzere iki temel süreci modelleyebilmektedir. Bu model kapsamında, yüzeysel akış için Kinematik Dalga Modelinden yararlanılırken, sızma davranışı için ise Geliştirilmiş Green-Ampt Modeli kullanılmıştır. Ayrıca kentsel bir bölgedeki matematiksel model uygulamasına ilişkin bir örnek de çalışma kapsamında sunulmuştur.

Deletic ve Fletcher (2006), çim filtrelerinin (grass filters) performansını saha ölçekli ve modelleme çalışmasıyla ortaya koymuşlardır. Bu çalışmayla, Aberdeen (İskoçya)'daki sızdırma şeridi (filter strip) ile Brisbane (Avustralya)'daki bitkili yağmur hendeğine yönelik kontrollü saha deneylerinden elde edilen su kalitesi performansına ait sonuçlar ortaya konmuştur. Bununla birlikte, deneysel çalışma çıktıları kullanılarak TRAVA adında matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda, TRAVA modelinin çim

filtrelerinin performansını belirlemede kullanılabilecek güvenilir bir model olduğunu ortaya koymuştur.

Wong ve diğ. (2006), sulak alanlar, göletler, bitkili yağmur hendekleri, çökeltme havuzu ve biofiltrelerin performasını tek bir algoritma ile ortaya koyan bir model geliştirmişlerdir. Bu model iki temel süreci modelleyebilmektedir. Bunlar; su kalitesi davranışı ile hidrodinamik davranıştır. Model kapsamında su kalitesi davranışı Birinci Mertebe Kinematik Bozunma Modeliyle tanımlanırken, hidrodinamik davranışta ise Karıştırmalı Tank Reaktörü konsepti benimsenmiştir. Geliştirilen bu model bir dizi sulak alan, gölet ve bitkili yağmur hendeği gibi arıtma yapısında test edilmiştir.

Abida ve diğ. (2007), perfore drenaj borulu bitkili yağmur hendeği sisteminin tasarım ve analizi için bir model geliştirmişlerdir. ANSWAPPS adını verdikleri bu modelin kalibrasyonu ve doğrulamasında deneysel çıktılardan yararlanmışlardır. Modelleme çalışmasında hendek performansını etkileyecek hendek boyutları, boru uzunluğu, orifis sayısı gibi parametreler dikkate alınmış ve bu parametrelerdeki değişimin hendek performansına etkileri ortaya konulmuştur.

Ackerman ve Stein (2008), En İyi Yönetim Uygulamalarının performanslarını ortaya koyan ampirik değerlendirmelerin yeterli olmadığını öne sürerek dinamik bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu dinamik modelde, kalibrasyonu ve doğrulaması yapılan arazi kullanım modelinden elde edilmiş saatlik çıktılar kullanılmaktadır. Dinamik model ile En İyi Yönetim uygulamalarının su kalitesi performansları değerlendirilmiştir.

Ciou ve diğ. (2012), Kuzey Tayvan'da bulunan Feitsui Havzasında En İyi Yönetim Uygulamalarının optimum yerleşimi için bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu optimizasyon modelinde, bir bekletme havuzu, bir bitkili yağmur hendeği ile bir sızdırma hendeği, En İyi Yönetim uygulaması örnekleri olarak seçilmiştir. Geliştirilen model, Havza Su Kalitesi Modeli, Rezervuar Su Kalitesi Modeli ile Optimizasyon Modelinden meydana gelmektedir. Model sonuçları, belirtilen En İyi Yönetim Uygulamalarının yerleşimi için etkin bir şekilde optimizasyon modelinin kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Avustralya'da geliştirilen ve yaygın bir şekilde kullanılan MUSIC (Model of Urban Stormwater Improvement Conceptualisation) modeli kirlilik maddelerinin taşınımının hesaplanmasında tercih edilebilmektedir. Imteaz ve diğ. (2013), yürütmüş oldukları çalışmada farklı yağmursuyu arıtım seçenekleri için MUSIC modelinin doğruluğunu test etmişlerdir. Bahsi geçen çalışma kapsamında biyotutma, bitkili yağmur hendeği, geçirgen kaldırım gibi yağmursuyu arıtım seçenekleri için saha ölçekli olarak elde edilen ölçümler kullanılarak modelleme çalışması yürütmüşler ve deneysel çıktılar ile MUSIC model sonuçlarını kıyaslamışlardır. Elde edilen sonuçlarda, modelin akım koşullarını iyi bir şekilde modelleyebildiği görülürken, Toplam Askıda Katı Madde (TSS), Toplam Fosfor (Total Phosphorus) ve Toplam Azot (Total Nitrogen) arıtma performansında ise değişiklikler gösterdiğini ortaya koymuştur.

Gao ve diğ. (2015), bitkili yağmur hendeği, geçirgen kaldırım, yeşil çatı, ıslak göletler ve biyotutma havzalarını, En İyi Yönetim Uygulamaları örnekleri olarak seçerek Çin'in Ma'anshan şehrinde bulunan bir fabrika alanı için analiz ve planlama çalışması yürütmüşlerdir. Planlama çalışmasının ardından, seçilen En İyi Yönetim Uygulamalarının performansını SUSTAIN (System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration) modeliyle değerlendirmişlerdir. SUSTAIN modelinin optimizasyon modülü kullanılarak En İyi Yönetim Uygulamalarının boyutları ayarlanmıştır. Yürütülen analizler sonucunda, En İyi Yönetim Uygulamalarının toplam akış hacmi, toplam askıda katı madde, çözünmüş çinko (dissolved zinc), toplam azot, toplam fosfor ve kimyasal oksijen gereksinim (chemical oxygen demand) yüklerini sırasıyla %41, %62, %55, %57 ve %60 düşürdüğü görülmüştür.

Liu ve diğ. (2015), havza ölçekli bir yağış-akış modeli kullanarak En İyi Yönetim Uygulamalarının etkinliklerini ortaya koymuşlardır. Amerika Birleşik Devletleri'nin Indiana Eyaletinde bulunan Crooked Creek Havzası çalışma alanı olarak belirlenmiştir. En İyi Yönetim Uygulamaları olarak ise yeşil çatı, yağmur tankı, biyotutma, bitkili yağmur hendeği, geçirgen kaldırım gibi çok sayıda yapı seçilmiştir. Seçilen En İyi Yönetim Uygulamalarının su miktarı ve su kalitesi üzerine etkilerini belirlemek için L-THIA-LID 2.1 (Long-Term Hydrologic Impact Assessment-Low Impact Development 2.1) modeli 16 farklı senaryo için kullanılmıştır. Modelleme çalışması sonucunda, seçilen En İyi Yönetim Uygulamalarının akış hacmi ile su kalitesi davranışına etkileri ortaya konmuştur.

Düşük Etkili Kentleşme Yöntemlerinin modellenebildiği bir diğer program da Mike SHE programıdır. Rujner ve diğ. (2018), Mike SHE programını kullanarak bitkili yağmur hendeği

davranışını modellemişlerdir. Modellenen bitkili yağmur hendeği, trapez kesitli ve %1.5 boyuna eğime sahiptir. Hendek uzunluğu ise 30 m'dir. Kalibrasyonu gerçekleştirilen model sonuçları ile gözlem sonuçlarının kıyaslanması için istatistiksel analize başvurulmuştur. Bu bağlamda, model ve gözlem sonuçları arasındaki uyum Nash-Sutcliffe katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir. Modelleme çalışması sonucunda, Mike SHE programının küçük ölçekli bitkili yağmur hendeklerinin akış hidrograflarını modellemede etkili olduğu ortaya konmuştur.

Mei ve diğ. (2018), taşkın önlemleri (Flood Mitigation) için Düşük Etkili Kentleşme Yöntemlerinin etkilerini SWMM modeli ve LCC (Yaşam Döngü Maliyeti/Life Cycle Cost) analizi ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışma alanı olarak Çin'in başkenti Pekin'de bulunan Liangshuihe Havzası seçilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında Liangshuihe Havzasının SWMM modeli oluşturulmuştur. Ardından modelin kalibrasyonu ve doğrulaması yapılmıştır. Farklı Düşük Etkili Kentleşme ve yağış senaryoları kullanılarak Düşük Etkili Kentleşmelerin hidrolojik davranışa etkileri saptanmıştır. Bununla birlikte LCC Analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, biyotutma ile bitkili yağmur hendeğinin birlikte kullanıldığı DEK senaryosunun tüm yağış senaryoları altında en uygun maliyete sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Gao ve diğ. (2019), Çin'deki bir otoyol servis alanında tesis edilen Düşük Etkili Kentleşme vaziyet planının hidrolojik davranışa etkilerini EPA SWMM programıyla araştırmışlardır. Burada 3 farklı Düşük Etkili Kentleşme durumu dikkate alınmıştır. Bunlar; biyotutma uygulaması, geçirgen kaldırım uygulaması ile biyotutma, geçirgen kaldırım ile bitkili yağmur hendeği uygulamasıdır. Modelleme çalışmaları sonucunda, biyotutma alanındaki artışın pik debide düşüş ve geciktirme sürelerinde artışa neden olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, geçirgen kaldırım uygulamasının biyotutma yükünde belirgin bir düşüşe neden olduğu saptanırken, bitkili yağmur hendeğinin ise düşük bir etkiye neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Li ve diğ. (2020), SWMM 5 (Yağmursuyu Yönetim Modeli/Storm Water Management Model) ve LCC yöntemini kullanarak optimum Düşük Etkili Kentleşme tasarımı ve hidrolojik performansı araştırmışlardır. Bitkili yağmur hendeği, biyotutma ve geçirgen kaldırım gibi Düşük Etkili Kentleşme uygulamalarının farklı yağış senaryoları altında yağmursuyu etkilerinin hafifletilmesinde oldukça etkin olduklarını göstermişlerdir. Bununla birlikte, bu yapılar maliyet etkinliği açısından değerlendirildiklerinde, öncelik sıralamasının bitkiliği yağmur hendeği, biyotutma ve geçirgen kaldırım olduğu sonucuna varılmıştır.

Rezaei (2021), EPA SWMM modeli ile Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonunu ilişkilendirerek bir simülasyon-optimizasyon modeli geliştirmiştir. EPA SWMM modeli, Kuala Lumpur'da bulunan Bunus Havzasından (Malezya) elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuştur. EPA SWMM modelinde kirlilik maddesi/kirletici olarak Toplam Askıda Katı Madde (Total Suspended Solids) ve Toplam Azot (Total Nitrogen) seçilirken, Düşük Etkili Kentleşme Yöntemi olarak bitkili yağmur hendeği ve yağmur bahçesi dikkate alınmıştır. Çalışmanın amacı, minimum sayıda DEK uygulaması kullanılarak pik akış, toplam askıda katı madde ve toplam azot konsantrasyonlarının düşürülmesidir. Çalışma sonucunda ulaşılan bulgular, askıda katı madde, toplam azot ve pik debideki düşüş değerlerinin sırasıyla %38, %24 ve %13 olduğunu göstermiştir.

Bitkili yağmur hendeklerine ilişkin yürütülen çalışmalar incelendiğinde, laboratuvar ölçekli çalışmaların oldukça az sayıda olduğu görülmüştür. Kirby ve diğ. (2005), yürütmüş oldukları laboratuvar deneyleriyle üç farklı çim türü için Geciktirme Eğrilerini elde etmişlerdir.

Abida ve Sabourin (2006), bitkili yağmur hendeği-perfore drenaj borusu sisteminin performansını ortaya koymak amacıyla hem laboratuvar hem de saha ölçekli deneyler yürütmüşlerdir. Waterloo Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında (Kanada) yürütülen çalışmalarda, perfore drenaj boru sisteminin farklı tasarım senaryoları altındaki performansları incelenmiştir. Bununla birlikte, çalışmanın diğer aşamasında saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 5 farklı sahada gerçekleştirilen bu deneylerde infiltrometre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yürütülen çalışma sonucunda bitkili yağmur hendeği- perfore boru sisteminin toprak yapısının geçirgen olduğu durumlarda tercih edilmesi gerektiğine ulaşılmıştır.

Monrabal-Martinez ve diğ. (2018), yağmur hendeklerinin hidrolik performansını ortaya koymak amacıyla laboratuvar deneyleri yürütmüşlerdir. Bu deneylerde geleneksel bitkili yağmur hendeği enkesitinin aksine dikdörtgen kesitli hendeklerden yararlanılmıştır. 3 farklı hendek konfigürasyonun kullanıldığı deneylerde, 1 ve 2 Numaralı hendeklerde ana gövde olarak kum tabakası kullanılırken, 3 Numaralı Hendekte toprak tabakası kullanılmıştır. 1 ve 2 Numaralı Hendeklerin yüzeyinde agrega seriliyken, 3 Numaralı Hendek yüzeyi çimlendirilmiştir. Hendeklerin alt drenaj tabakaları farklılık göstermektedir. Bununla birlikte toprak nemini ölçmek amacıyla nem sensörleri kullanılmıştır. Çalışmanın bir diğer aşamasında deneysel çalışmalardan elde edilen çıktılar kullanılarak hendek tasarım parametrelerinin hidrolik performansa etkilerini ortaya koymak amacıyla boyutsuz parametreler elde edilmiştir.

Literatürde yürütülen çalışmaların büyük bir bölümünün ise su kalitesi çalışmalarına yönelik olduğu görülmektedir (Wu ve diğ. (1998), Rushton (2001), Bäckström (2002), Barrett (2005), Deletic (2005), Deletic ve diğ. (2006), Barrett ve diğ. (2008), Bedan ve diğ. (2009), Li ve diğ. (2011), Stagge ve diğ. (2012), Bouchard ve diğ. (2013), Moores ve diğ. (2013), Yu ve diğ. (2013), Koch ve diğ. (2014), Perales-Momparler ve diğ. (2014), Hwang ve diğ. (2015), Leroy ve diğ. (2015), Liu ve diğ. (2015), Trenouth ve diğ. (2015), Hwang ve diğ. (2016), Horstmeyer ve diğ. (2016), Leroy ve diğ. (2016), Kavehei ve diğ. (2018), Fiala ve diğ. (2019), Gavrić ve diğ. (2019a), Gavrić ve diğ. (2019b), Rommel ve diğ. (2019), Yuan ve diğ. (2019), Robinson (2020), Gavrić ve diğ. (2021), Tang ve diğ. (2021), Valenca ve diğ. (2021)). Literatür taraması incelendiğinde, yapılmış olan çalışmalarda bitkili yağmur hendeklerinin su kalitesi üzerindeki etkilerine yoğunlaşıldığı ve hidrolojik performanslarını ortaya koyan çalışmaların daha az sayıda ve ikinci planda kaldığı görülmektedir. Bitkili yağmur hendeklerinin hidrolojik davranışının anlaşılmasının su kalitesi performansını da etkileyeceği düşünülmektedir. Bu nedenle, bitkili yağmur hendeklerinin hidrolojik davranışını kontrollü laboratuvar deneyleriyle ortaya koyan bu tez çalışmasının literatürdeki önemi daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Yukarıda açıklandığı üzere bitkili yağmur hendekleri ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalara katkıda bulunmak amacıyla bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmanın hedefleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir:

1. Büyük ölçekli laboratuvar deneylerinin yürütülebilmesi için bitkili yağmur hendeğini temsil edecek büyük ölçekli bir modüler kanal tasarlanması ve mevcut yağış-havza-biyotutma deney düzeneğine entegre edilmesi.

2. Tasarlanan modüler kanal içinde farklı toprak tipi ve yüzey katmanı malzemesi kullanarak farklı konfigürasyonlarda hendeklerin oluşturulması ve bu farklı tipte hendeklerin hidrolojik performansının test edilmesi.

3. Farklı tip hendekler ile hidrolik iletkenlik, yüzey pürüzlülüğü ve çim boyu gibi yüzey ve toprak katmanının karakteristiğini ifade eden parametrelerin etkinliğinin belirlenmesi.

4. Bitkili yağmur hendeklerinin hidrolojik performansı üzerinde etkin olduğu düşünülen farklı tip yağışların test edilmesi.

5. Farklı tip yağışların karakteristiğini ifade eden yağış şiddeti, yağış süresi ve alansal yağış parametrelerinin etkinliğinin belirlenmesi.

6. Yukarıda verilmiş olan hendek ve yağış tiplerinin farklı kombinasyonları için bitkili yağmur hendeklerinin yüzeysel akış ve drenaj akışı üzerindeki etkisinin gözlemlenmesi.

7. Bitkili yağmur hendeği deney düzeneğinin literatürde yaygın olarak kullanılan Çevre Koruma Ajansı Yağmursuyu Yönetim Modeli (Environmental Protection Agency Storm Water Management Model/EPA SWMM) programı kullanılarak hidrolojik modelinin oluşturulması.

8. Bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik davranışını açıklayan matematiksel model geliştirilmesi.

9. Deneysel çıktılar ile EPA SMMM modeli çıktıları ve geliştirilmiş matematiksel model çıktılarının kıyaslanması ve bu modellerin bitkili yağmur hendeğinin performansını ortaya koymadaki yetkinliklerinin değerlendirilmesi.

10. Tüm tez kapsamında elde edilen çıktılar ışığında bitkili yağmur hendeklerinin tasarım kriterlerinin iyileştirilmesi.

3. YÖNTEM

3.1. YAĞIŞ-HAVZA-YAĞMUR HENDEĞİ DENEY DÜZENEĞİNİN TASARIMI ve KURULUMU

Bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik performansını ortaya koymak üzere İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler için bitkili yağmur hendeğini temsil edecek modüler açık kanal tasarlanarak Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan (2016) tarafından tasarlanmış olan Yağış-Havza-Biyotutma (YHB) deney düzeneğine entegre edilmiştir. Mevcut YHB deney düzeneğine ilişkin görsel Şekil 3.1'de yer almaktadır.



Şekil 3.1: Yağış-Havza-Biyotutma deney düzeneği.

YHB deney sisteminden biyotutma kolonları çıkartıldıktan sonra deney sistemine yağmur hendeği modülü eklenmiştir. Yağmur hendeği modülüne ilişkin görsel Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.2: Yağmur hendeği modülü.

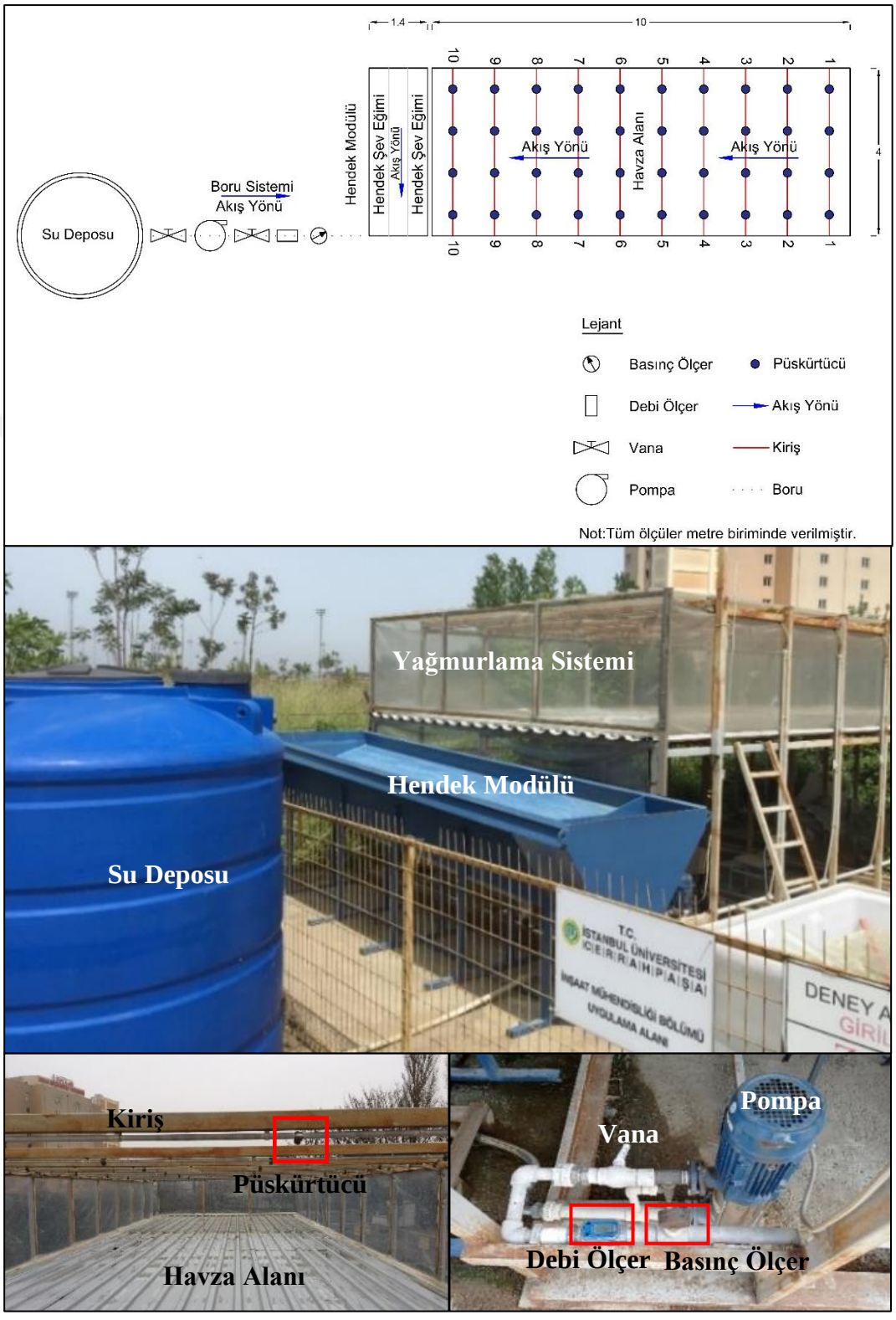
Mevcut deney sistemine yağmur hendeği modülü eklendikten sonra oluşturulan yeni sistem Yağış-Havza-Yağmur Hendeği (YHY) olarak adlandırılmıştır. YHY açık alanda teşkil edilmiş büyük ölçekli bir deney sistemidir. YHY deney sistemi havzayı temsil eden 40 m^2'lik paslanmaz çelik levhadan oluşan yüzey alanına sahiptir. Bu alanın eni 4 m, uzunluğu ise 10 m'dir. Alanın yerden yüksekliği 1.8 m'dir ve eğimi %0.5-1.5 arasında değişen değerler için ayarlanabilmektedir. Bu tez kapsamında yürütülen deneyler esnasında %0.7'lik sabit eğim değeri kullanılmıştır. Havza alanını temsil eden çelik yüzey alanın 1 m üzerinde 10 adet çelik kiriş üzerine sabitlenmiş yağmur püskürtücüleri bulunmaktadır. Her bir kiriş üzerinde 4 adet olmak üzere toplamda 40 adet püskürtücü vardır. Bu yağmurlama sistemi yardımıyla istenilen yağış şiddetinde suni yağış oluşturulabilmektedir. Deneyler esnasında kullanılan su, 5 m^3'lük su deposundan sağlanmıştır. Pompa sistemi yardımıyla depodaki su, püskürtücülere iletilmektedir. İlaveten, deney sisteminde açma-kapama vanası, debi ölçer, basınç ölçer ve iletim boruları da bulunmaktadır. Deney sistemine entegre edilen yağmur hendeği modülü çelik malzemeden üretilmiştir. Hendek modülünün uzunluğu 4.4 m'dir. Yağmur hendeği modülünün taban genişliği 0.5 m iken üst genişliği 1.40 m'dir. Yağmur hendeğinin yerden maksimum ve minimum yükseklik değerleri sırasıyla 1.70 m ile 1.48 m'dir. Hendek modülünün boyuna eğim değeri literatürdeki değerler göz önünde tutularak %5 seçilmiştir. Hendek modülünün bitiminde hendek üzerinde oluşan yüzeysel akışın savaklanıp toplanabilmesi için 40 cm genişliğinde bir biriktirme haznesi oluşturulmuştur. Biriktirme haznesinin tabanında çapı 10.5 cm olan bir

tahliye deliği yer almaktadır. Deneyler esnasında hendek çıkışındaki yüzeysel akış ölçümleri bu noktada gerçekleştirilmiştir. İlaveten, hendek modülünün tabanında çapları 7.54 cm olan 7 adet drenaj deliği bulunmaktadır. Hendeğin içindeki topraktan sızarak drenaj deliklerinden drene edilen su, çapı 7.54 cm olan PVC boru sistemi yardımıyla toplanarak tek bir çıkış noktasına iletilmektedir. Deneyler süresince drenaj akışı ölçümleri bu çıkış noktasında gerçekleştirilmiştir. Deney sisteminin açık alanda olması ve rüzgar etkisiyle deneyler esnasında gerçekleşebilecek su kayıplarını önlemek amacıyla yağmurlama sisteminin üstü şeffaf çatı kaplaması malzemeleriyle kapatılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Şeffaf çatı kaplaması malzemesiyle kapatılmış olan deney düzeneği.

Yağmur hendeği modülünün şev eğimleri 1:3'tür. YHY deney sistemine ilişkin plan görüntüsü ve deney sistemini oluşturan modüller ile detayları Şekil 3.4'te görülmektedir.



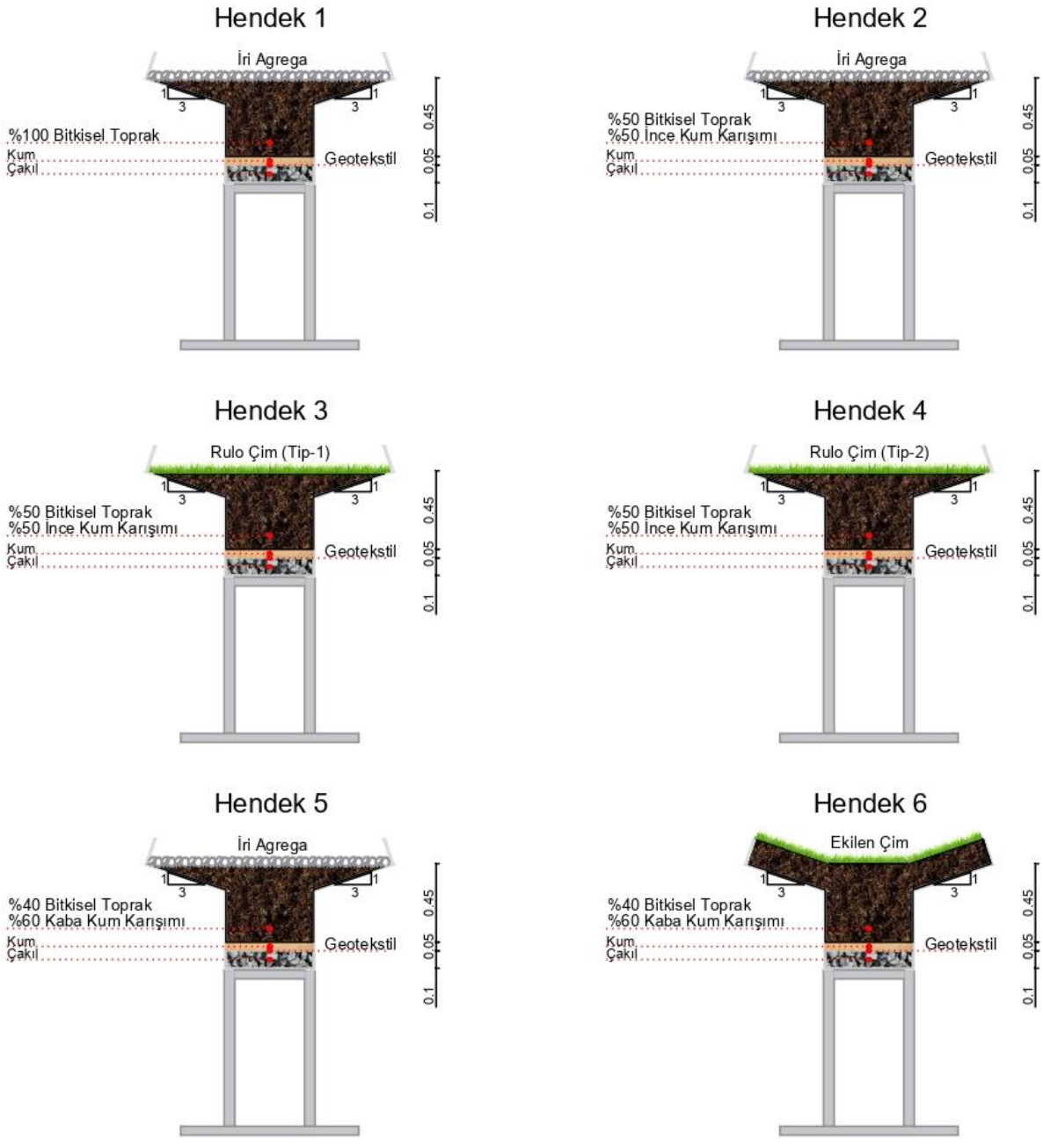
Şekil 3.4: YHY deney sistemi plan ve bileşenleri.



Şekil 3.4 (devam): YHY deney sistemi plan ve bileşenleri.

3.1.1. Hendek Konfigürasyonları

Hendeklerin hidrolojik performansını ortaya koymayı amaçlayan bu çalışmadaki deneylerde 6 farklı hendek konfigürasyonu oluşturulmuştur. Bu konfigürasyonlar, Hendek 1, Hendek 2, Hendek 3, Hendek 4, Hendek 5 ve Hendek 6 (Bitkili yağmur hendeği) olarak adlandırılmıştır. Her bir hendek konfigürasyonunun şematik çizimi Şekil 3.5'te görülmektedir. Tüm hendekler, tabanlarından itibaren 10 cm yüksekliğinde çakıl, 5 cm yüksekliğinde kum, 45 cm yüksekliğinde toprak tabakalarından oluşmaktadır. Bununla birlikte kum ile çakıl tabakaları arasına geotekstil malzeme serilmiştir. Yüksek geçirgenliğe sahip SF32 Dupont geotekstil malzemesi, deneyler esnasında bitkisel toprağın ihtiva ettiği ince malzemenin drene edilen su ile akmasını ve tıkanmayı önlemek amacıyla kullanılmıştır. Yağmur hendeğinin yüksek performanslı olabilmesi için yüzeyine düşen suyu büyük oranda sızdırabilmesi tercih edildiğinden yağmur hendeklerinin inşası esnasında kompaksiyon işlemi önerilmemektedir (Wilson ve diğ. (2004)). Bu nedenle, hendeklerin malzemelerle doldurulması esnasında sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. İlaveten, yürütülen deneylerde her bir konfigürasyon için benzer koşulların sağlanabilmesi hususu da kompaksiyon yapılmamasına ikincil bir neden teşkil etmektedir.



Şekil 3.5: Hendek konfigürasyonlarının şematik çizimleri.

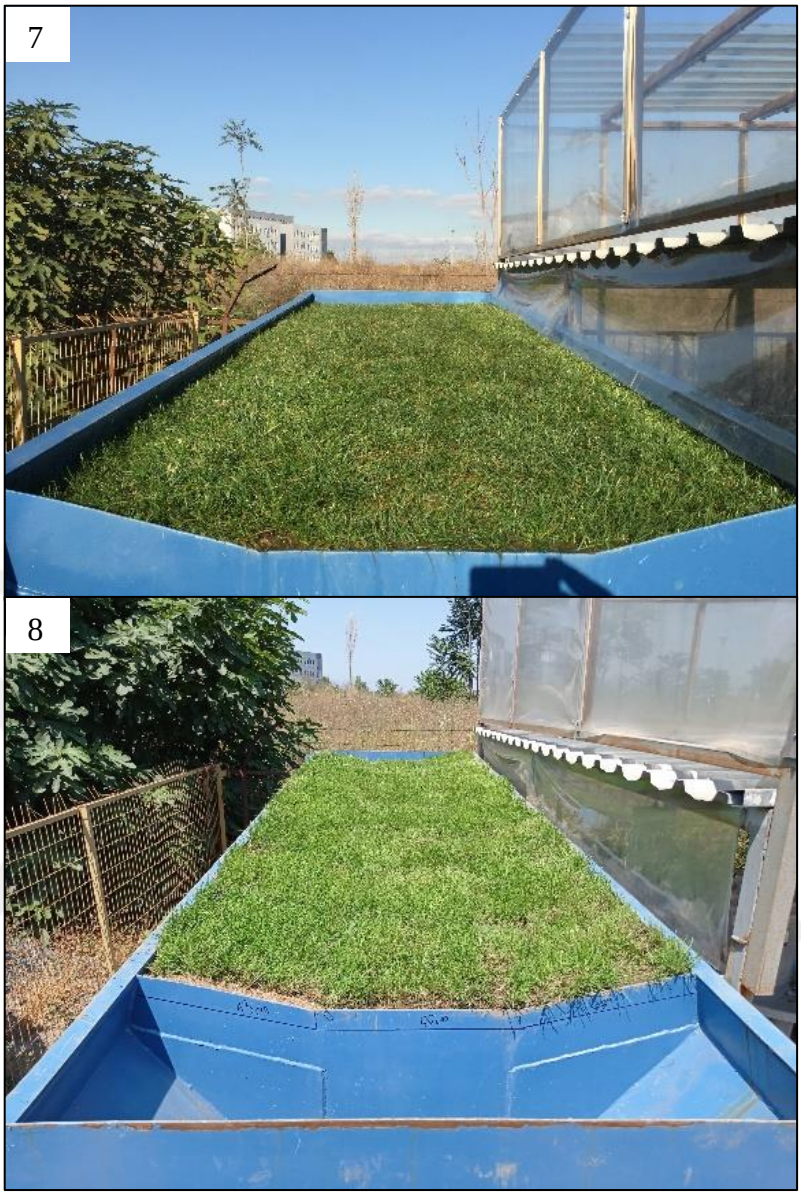
Tüm hendek konfigürasyonlarının toprak katmanında gübreli Kırklareli bahçe toprağı kullanılmıştır. Sadece Hendek 1'in toprak katmanının tamamı bahçe toprağından oluşturulmuş ancak drenaj akışının çok düşük olduğu gözlemlendiğinden dolayı diğer hendeklerde drenaj akışını arttıracak şekilde farklı toprak-kum karışımları test edilmiştir. Hendek 2, Hendek 3 ve Hendek 4'teki toprak katmanlarında hacim olarak %50 oranında bahçe toprağı, %50 oranında ince kum karışımı kullanılırken, Hendek 5 ve Hendek 6'da ise hacim olarak %40 oranında bahçe toprağı ile %60 oranında iri kum karışımı kullanılmıştır. Tüm toprak-kum karışımları homojen bir yapıya ulaşıncaya kadar karıştırıldıktan sonra hendeklere serme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Hendek 1, Hendek 2, Hendek 3, Hendek 4 ve Hendek 5'in yüzeyleri düz iken, Hendek 6'nın yüzeyinde 1:3 oranında şev eğimi bulunmaktadır. Farklı yüzey tiplerinin etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla Hendek 1, Hendek 2 ve Hendek 5'in yüzeylerine iri agregalar serilmiştir. İri agrega serilmeden yapılmış olan ön-deneylerde hendek yüzeyindeki malzemenin yüzeysel akışla birlikte hem oyulduğu hem de taşındığı görülmüştür. Hendek yüzeyine iri agregaların serilmesi yüzeysel akışla birlikte katı madde taşınımını da önlemiştir. Hendek 3 ve Hendek 4'ün yüzeylerine ise farklı tipte rulo çimler serilmiştir. Hendek 6'nın yüzeyine ise yetiştirilmiş çim serilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan yağmur hendeği modülünün eğimi %5'tir. Arazi eğiminin %1.5'ten büyük olduğu durumlarda tohum ekimi yapılarak çimlendirmeye gidilmesi hem verimin azalmasına hem de yağış, rüzgar ve sulama etkisiyle birlikte çim tohumlarının yüzeye çıkıp yüzeysel akışla birlikte taşınmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu olumsuz durumlar göz önünde tutulduğunda Hendek 6'nın yüzeyinde doğrudan çim yetiştirilmesinin uygun olmayacağına karar verilmiştir. Bu nedenden dolayı da çimlerin bağımsız kalıplarda yetiştirildikten sonra rulo çim uygulamasına benzer şekilde hendek yüzeyine serilmesi uygun bulunmuştur.

Hendeklerin deneylere hazır hale gelmesi için tamamlanan aşamalar adım adım Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6: Hendeklerin malzemeler ile doldurulması ve deneylere hazır hale getirilmesi.



Şekil 3.6 (devam): Hendeklerin malzemeler ile doldurulması ve deneylere hazır hale getirilmesi.

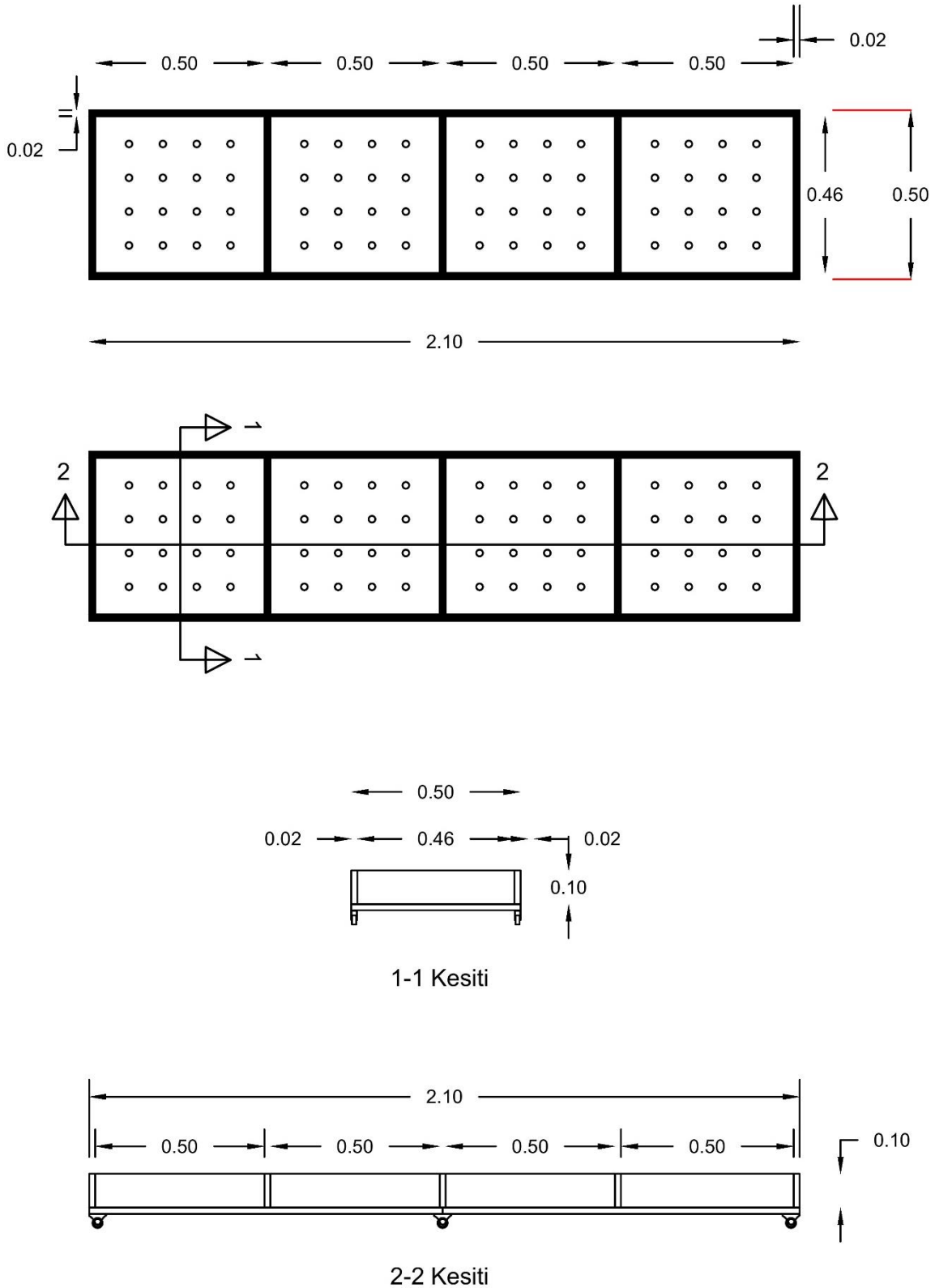
Şekil 3.6'da yer alan 1 Numaralı fotoğrafta hendeğin boş hali görünmektedir. 2 Numaralı fotoğrafta, hendek tabanından itibaren 10 cm yüksekliğinde serilen çakıl tabakası yer almaktadır. 3 Numaralı fotoğrafta ise SF32 Dupont geotekstil malzemesinin serim işlemi görülmektedir. Geotekstil malzemesi üzerine 5 cm yüksekliğinde serilen kum tabakası 4 Numaralı fotoğrafta bulunmaktadır. 5 Numaralı fotoğraftan, kum tabakası üzerine 45 cm yüksekliğinde serilen ana toprak tabakası ve yüzey düzeltme işlemi görülebilir. 6-7-8 Numaralı fotoğraflarda ise sırasıyla iri agregalı, rulo çimli ve ekilen çimin serildiği hendeklere ilişkin görüntüler yer almaktadır.

3.1.2. Hendek 6 Yüzeyi İçin Çim Yetiştirilmesi

Hendek 6'nın yüzeyine serilmesi için bağımsız kalıplarda yetiştirilen çim için ilk olarak kullanılacak olan kalıpların tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kalıpların tasarım aşamasında aşağıdaki hususlar dikkate alınmıştır:

- Çimlerin sağlıklı şekilde yetiştirilebilmesi için kalıpların uygun derinlikte olmaları,
- Üniform yapıda olmaları,
- Gerekli drenajı sağlayabilmeleri,
- Dayanıklı olmaları,
- Taşınabilir olmaları.

Hendek geometrisi de göz önünde bulundurularak kalıp tasarımları gerçekleştirilmiştir. Böylelikle bağımsız kalıplarda yetiştirilen çimlerin hazır rulo çime benzer şekilde hendek yüzeyine serim işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıp planlarına ilişkin kesit görüntüleri Şekil 3.7'de yer almaktadır.



Şekil 3.7: Çimlerin yetiştirilmesi için tasarlanan kalıplara ilişkin plan ve kesit görüntüleri.

Toplamda 6 adet kalıp üretilmiştir. Her bir kalıp 4 bölmeden oluşmaktadır. Kalıp tabanlarında fazla suyun drene edilebilmesi için 16 adet delik yer almaktadır. Toprağın kalıp tabanına yapışması ve yetiştirilmiş çim rulolarının kalıplardan çıkartılması esnasında yaşanabilecek zorluklar göz önünde tutularak kalıp tabanlarına şeffaf brandalar serilmiştir. Üretilen kalıplara ilişkin görüntüler Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8: Çimlerin yetiştirildiği kalıplar.

Çim tohumlarının sağlıklı bir şekilde gelişimi ve yetişen çimlerin kök salabilmeleri için yeterli miktarda toprağa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple kalıplarda kullanılacak toprak yüksekliği 7 cm olarak belirlenmiştir. Çim yetiştirilmesi için kullanılan toprak karışımında %40 oranında gübreli Kırklareli toprağı ile %60 oranında iri kum kullanılmıştır. Homojen bir karışım elde edildikten sonra toprağın kalıplara serilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan toprak, gübre ihtiva ettiği için bu aşamada gübreleme yapılmamıştır. Homojen olarak tüm yüzeylere tohum serpme işlemi gerçekleştirildikten sonra yüzey 1 cm yüksekliğinde toprak-kum karışımıyla

kaplanmıştır. En son olarak yüzey düzeltme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalara ilişkin görseller aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 3.9: Kalıpların toprakla doldurulması ve çim ekme işlemleri.

Çim ekme işlemi elle serpme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem küçük alanlarda çim ekimi için tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem uygulanırken dikkat edilmesi gereken hususlar; uygulamanın rüzgarsız havada yapılması ve tohum seriminin homojen olarak gerçekleştirilmesidir. Homojen tohum seriminin gerçekleştirilebilmesi için birbirine dik iki yönde serpme işlemi gerçekleştirilmelidir. Değişik iklim koşullarında yetişen birçok çim türü bulunmaktadır. Çim türü seçiminde iklim ve sulama koşulları gibi birçok faktör etkilidir. Bu faktörler dikkate alındığında, ülkemizde yaygın olarak tercih edilen ve kolay yetişen DSV 4'lü çim tohum karışımı tercih edilmiştir. Bu tohum karışımı, metrekareye 50 gram olacak şekilde uygulanmıştır. Bu tohum karışımında;

- %40 oranında Lolium perenne temprano,
- %35 oranında Festuca arundinacea starlett,
- %10 oranında Lolium perenne turfgold,
- %15 oranında Festuca rubra rubra maxima çim tohumu bulunmaktadır.

Çim alanlarda sulama, gübreleme, biçme ve havalandırma gibi işlemlerin düzenli olarak yapılması gerekmektedir. Sulama işleminde, sulamanın zamanı, verilecek su miktarı ve sıklığı önem arz etmektedir. Bu gibi hususlara dikkat edilmediği takdirde çimler gelişimini sağlıklı bir şekilde tamamlayamaz.

Çim ekim işlemi gerçekleştirildikten sonra toprağın nemli kalması, çim tohumlarının filizlenmesi için çok önemlidir. Bu nedenle günde 2 defa sulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Çim ekiminden 7 gün sonra kükürtleme işlemi uygulanmıştır. Toprak yüzeyine serpilen kükürt, topraktaki bakterilerin sülfürik asit üretimine neden olmaktadır. Bu doğal reaksiyon, toprağın pH derecesini yavaşça düşürmekte ve çimin daha sağlıklı bir şekilde gelişmesini sağlamaktadır. Kükürtleme işlemi, toprak yüzeyini kaplayacak şekilde kükürtün serpilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu işleme ilişkin görseller aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 3.10: Yüzeye uygulanan kükürtleme işlemi.

Çimin sağlıklı bir şekilde gelişmesi için bir diğer önemli işlem gübrelemedir. Bu işlem için granül gübre kullanılmıştır. Çim ekiminden 10 gün sonra ilk gübreleme gerçekleştirilmiştir. Toprak yüzeyine homojen olarak metrekareye 25 gr granül gübre serpilmiştir. Bu işleme ilişkin görseller Şekil 3.11'de yer almaktadır. Çim biçme işlemi diğer bitki türlerine nazaran daha fazla yapıldığı için gübre ihtiyaçları da daha fazla olmaktadır. Bu nedenle, gübreleme işlemi aylık olarak tekrarlanmaktadır.



Şekil 3.11: Gübreleme işlemi.

Çimin gelişimi hızlandığında, çimler 10-12 günde bir biçilmelidir. Bu işlem, çimin hem kök hem de yaprak gelişimi açısından büyük önem arz etmektedir. Şekil 3.12'de çim biçme işlemi öncesi ve sonrasına ait görseller yer almaktadır.



Şekil 3.12: Çim biçme işlemi öncesi ve sonrası.

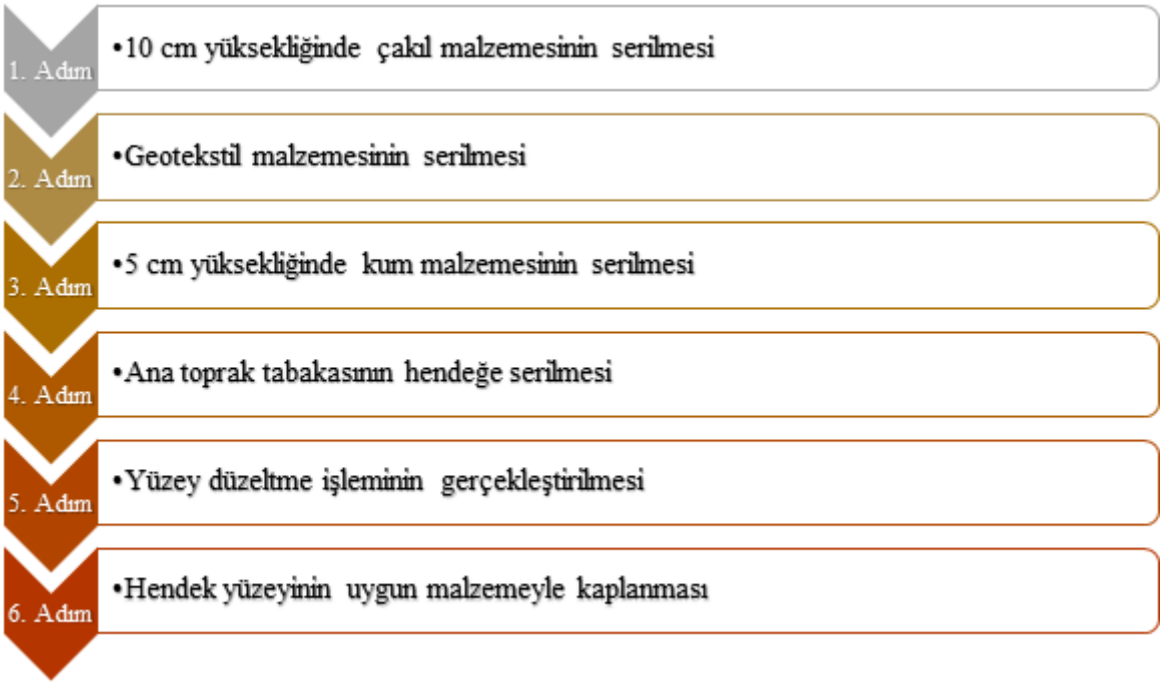
Çimler 2 ay boyunca kalıplarda yetiştirildikten sonra hendek yüzeyine serilmeleri için hazır hale geldiler. Çimlerin kalıplardan kolaylıkla çıkartılabilmeleri için bu işlem öncesinde sulama gerçekleştirilmiştir. Kalıplardan çıkartılan çimler rulo çim uygulamasında olduğu gibi hendek yüzeyine serilmiştir. Bu aşamalara ilişkin görüntüler Şekil 3.13'te yer almaktadır.



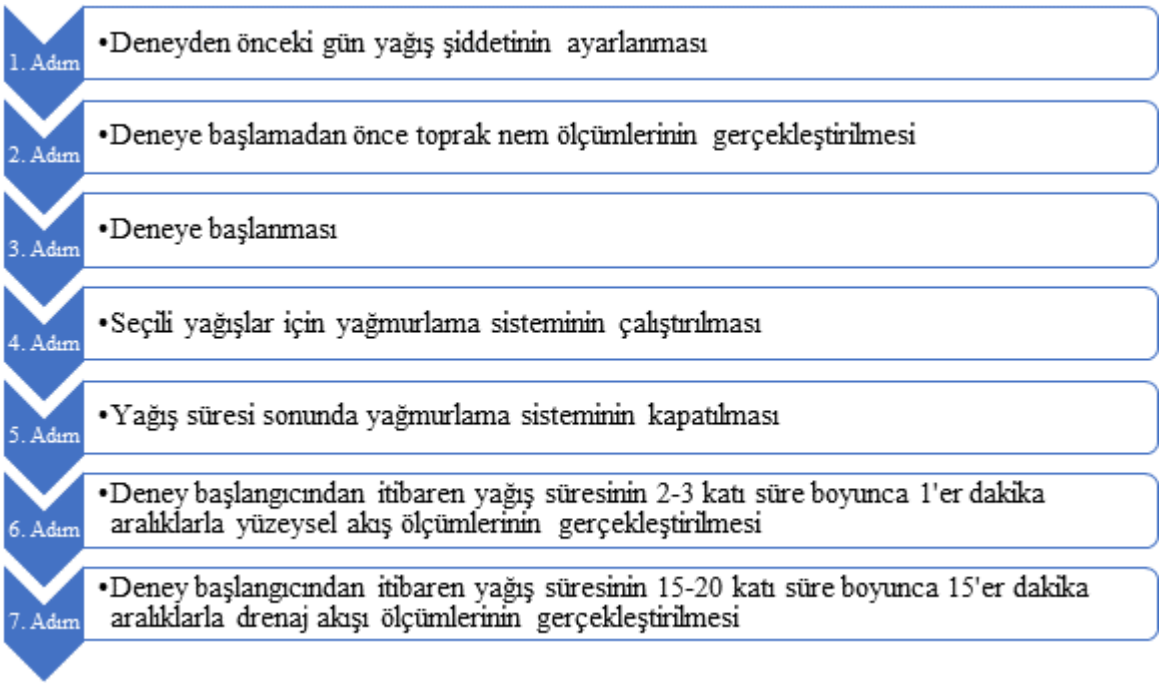
Şekil 3.13: Çimlerin kalıplardan çıkartıldıktan sonra hendek yüzeyine serilmeleri.

3.1.3. Deney Sisteminin Hazır Hale Getirilmesi ve Deney Prosedürü

Önceki bölümlerde değinilen deney sisteminin hazır hale getirilmesi ve deneyler esnasında izlenecek adımları içeren akış şemaları sırasıyla Şekil 3.14 ile Şekil 3.15'te sunulmuştur. Oluşturulan bu akış şemalarının yürütülecek benzer deneyler için yol gösterici olacağı düşünülmüştür.



Şekil 3.14: Hendeklerin deneylere hazır hale getirilmesinde izlenecek adımlar.



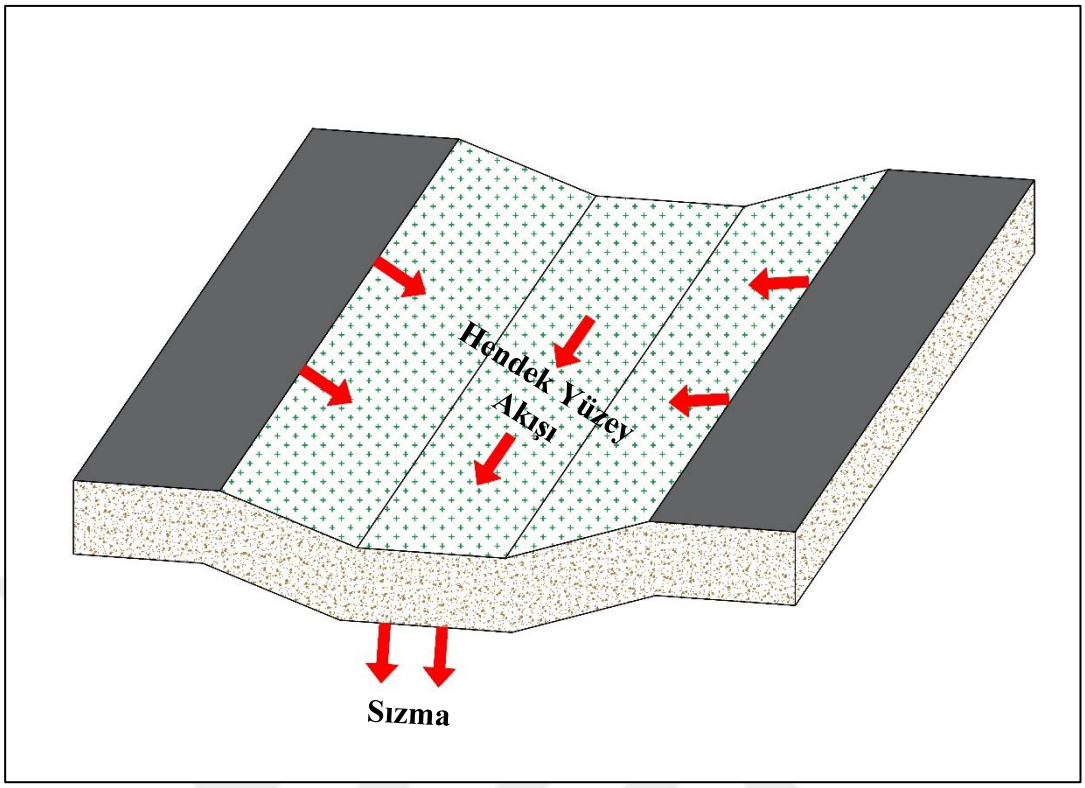
Şekil 3.15: Deney prosedürü akış şeması.

3.2. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİNİN EPA SWMM ile MODELLENMESİ

Bitkili yağmur hendekleri yağışın hızla akışa geçmesini yavaşlatma ve pik debilere ulaşma sürelerini arttırmada tercih edilen Düşük Etkili Kentleşme (DEK) Yöntemlerinden birisidir. Ancak bu tip uygulamaların etkin bir şekilde kullanılabilmeleri için tasarımlarının uygun şekilde yapılması gerekmektedir. Günümüzde tasarım aşamaları için bilgisayar programları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak Düşük Etkili Kentleşme Yöntemlerinin hidrolojik ve su kalitesi davranışlarını modellemek için kullanılan az sayıda bilgisayar programı bulunmaktadır. Bu programlardan bir tanesi de Çevre Koruma Ajansı Yağmursuyu Yönetim Modelidir (Environmental Protection Agency Storm Water Management Model/EPA SWMM). Bu çalışma kapsamında, bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik modellemesi için EPA SWMM programı kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarında, deneysel çalışmalardan elde edilen ölçümler ile literatürde bitkili yağmur hendekleri için esas alınan parametre değerleri dikkate alınarak modellerin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Ardından model sonuçları ile deneysel çalışmalarla elde edilen ölçüm sonuçları kıyaslanarak EPA SWMM programının bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik performansını belirlemedeki etkinliği ortaya konmuştur.

3.2.1. EPA SWMM

Bilgisayar modelleri, matematiksel denklemlere dayanan ve fiziksel mekanizmaların karmaşık davranışlarını çözümleyebilen yöntemlerdir. EPA SWMM modeli; akış değerleri, pik debiler, akış hacimlerinin ve su kalitesinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan bir yağış-akış modelidir (Rossman, 2015). EPA SWMM ile bitkili yağmur hendekleri için hidrolojik modelleme yapılabilmektedir. Böylelikle farklı hendek tasarımları ve hidrolojik koşullar altında bitkili yağmur hendeklerinin hidrolojik davranışları incelenebilmektedir. EPA SWMM modelinde bitkili yağmur hendekleri, çimlendirilmiş trapez kesitli kanallar olarak tanımlanmaktadır (Rossman ve Huber, 2016). Bu yapılar, yağışla birlikte oluşan yüzeysel akışı hem bir noktadan diğer noktaya taşımakta hem de yağmur suyunun bir kısmının hendeğin alt katmanlarına sızmasına olanak sağlamaktadır. EPA SWMM programında tanımlanan bitkili yağmur hendeği için şematik çizim Şekil 3.16'da görülmektedir. Aynı zamanda modelin çözümlediği süreklilik denklemi de Denklem (3.1)'de sunulmuştur.



Şekil 3.16: EPA SWMM bitkili yağmur hendeği ekran görüntüsü (Rossman ve Huber (2016)'dan uyarlanmıştır).

$$A_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = (i + q_0)A - (e_1 + f_1)A_1 - q_1 A \tag{3.1}$$

Yukarıdaki denklemde; A_1, d_1 su derinliğindeki yüzey alanını, A, D_1 derinliği için yüzey alanını, D_1 ise hendek derinliğini ifade etmektedir. Bununla birlikte Denklem (3.1)'de yer alan i, yağış şiddetini (L/T), q_0, giriş akım değerini (L/T), e_1, yüzey evapotranpirasyon oranını (L/T), f_1, sızma hızını (L/T), t ise süreyi (T) ifade etmektedir. EPA SWMM modelinde diğer DEK uygulamalarından farklı olarak bitkili yağmur hendeğinin tek katmanlı olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte A_1 yüzey alanı ile akış derinliği d_1 arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir.

$$A_1 = \frac{A}{W_1} [W_1 - 2S_x(D_1 - d_1)] \tag{3.2}$$

Akış derinliği (d_1) ile yüzey alanı (A_1) arasındaki ilişkiyi veren denklemde; W_1, D_1 derinliğinde hendeğin yüzey genişliğini, S_x ise hendeğin şev eğimini ifade etmektedir. Yağmur hendeğinde

toplanacak olan su hacmi V_1, kanalın boyuna uzunluğu (A/W_1) ile ıslak enkesit alanının (A_x) çarpımıyla hesaplanmaktadır.

$$V_1 = (A/W_1)A_x \tag{3.3}$$

Denklem (3.3)'de yer alan ıslak enkesit alanı aşağıdaki ifade yardımıyla belirlenmektedir.

$$A_x = d_1(W_x + d_1 S_x)\emptyset_1 \tag{3.4}$$

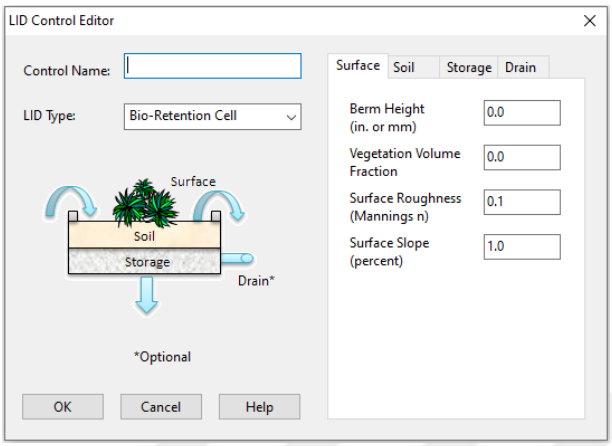
Bu denklemde; W_x hendek taban genişliği, $\emptyset_1$ de hendek yüzeyindeki bitkisiz yüzey oranını temsil etmektedir. Hendeğin çıkışındaki hendek yüzey akış debisi $(q_1 A)$ Manning Denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$q_1 A = \frac{1.49}{n_1}\sqrt{S_1}A_x R_x^{2/3} \tag{3.5}$$

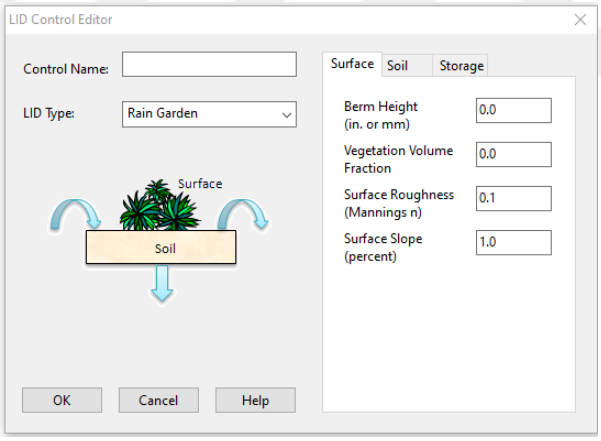
Manning Denkleminde yer alan n_1 parametresi hendeğin yüzey pürüzlülüğünü, S_1 ise akım yönündeki hendek eğimini göstermektedir. Denklemde R_x (ft) olarak tanımlanan hidrolik yarıçap değeri aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$R_x = \frac{A_x}{(W_x + 2d_1\sqrt{1+S_x^2})} \tag{3.6}$$

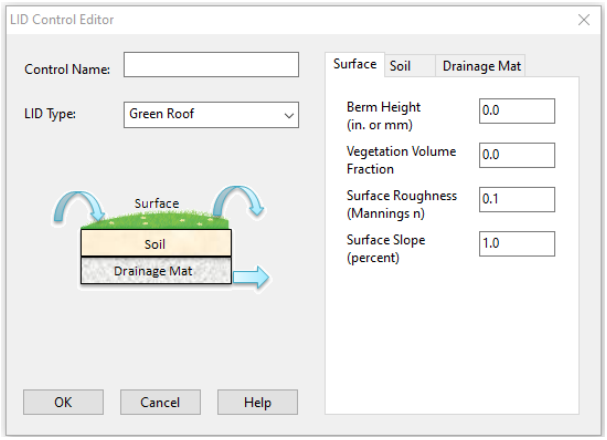
EPA SWMM programında herhangi bir DEK uygulaması, DEK Kontrol Editörü yardımıyla tanımlanmaktadır. EPA SWMM programı, bitkili yağmur hendeğine ilaveten biyotutma, yağmur bahçesi, yeşil çatı, sızdırma hendeği, geçirgen kaldırım, yağmur tankı gibi birçok DEK türünün modellenmesine olanak sağlamaktadır. EPA SWMM programı kullanılarak DEK uygulamaları modellenirken birçok tasarım parametresine ihtiyaç duyulmaktadır. DEK Kontrol Editöründe farklı DEK uygulamaları için; yüzey (surface), toprak (soil), depolama (storage), drenaj (drain) ve kaldırım (pavement) gibi farklı katmanlar tanımlanmıştır. EPA SWMM programındaki her bir DEK yöntemi için DEK Kontrol Editörü pencereleri Şekil 3.17-3.23 arasında sunulmuştur.



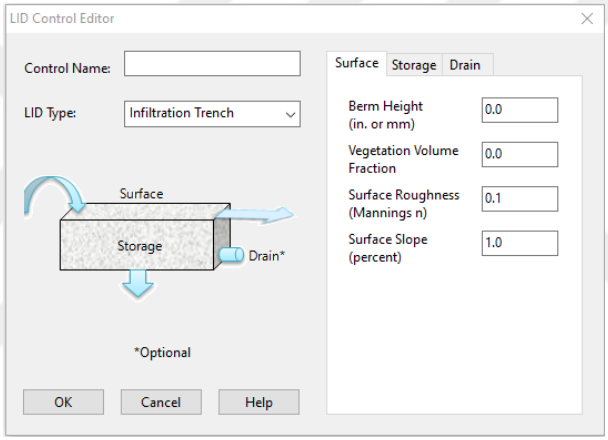
Şekil 3.17: Biyotutma DEK kontrol editörü.



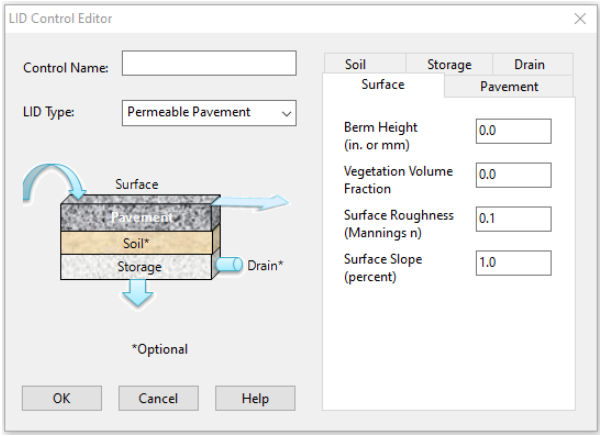
Şekil 3.18: Yağmur bahçesi DEK kontrol editörü.



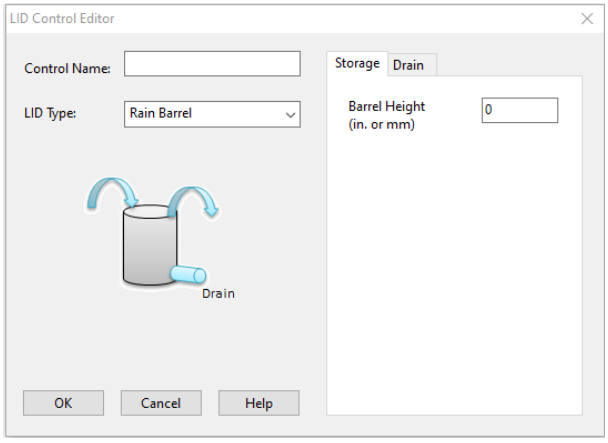
Şekil 3.19: Yeşil çatı DEK kontrol editörü.



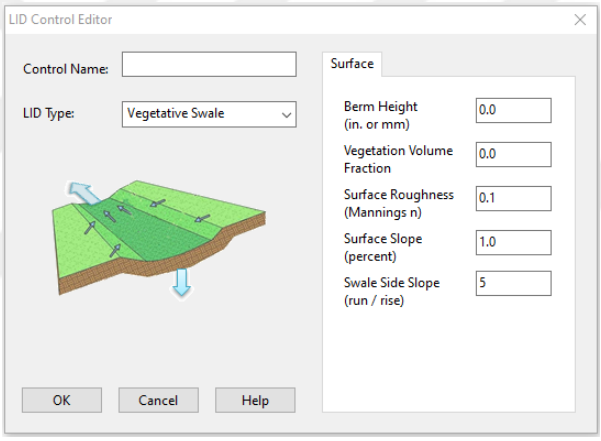
Şekil 3.20: Sızdırma hendeği DEK kontrol editörü.



Şekil 3.21: Geçirgen kaldırım DEK kontrol editörü.



Şekil 3.22: Yağmur tankı DEK kontrol editörü.



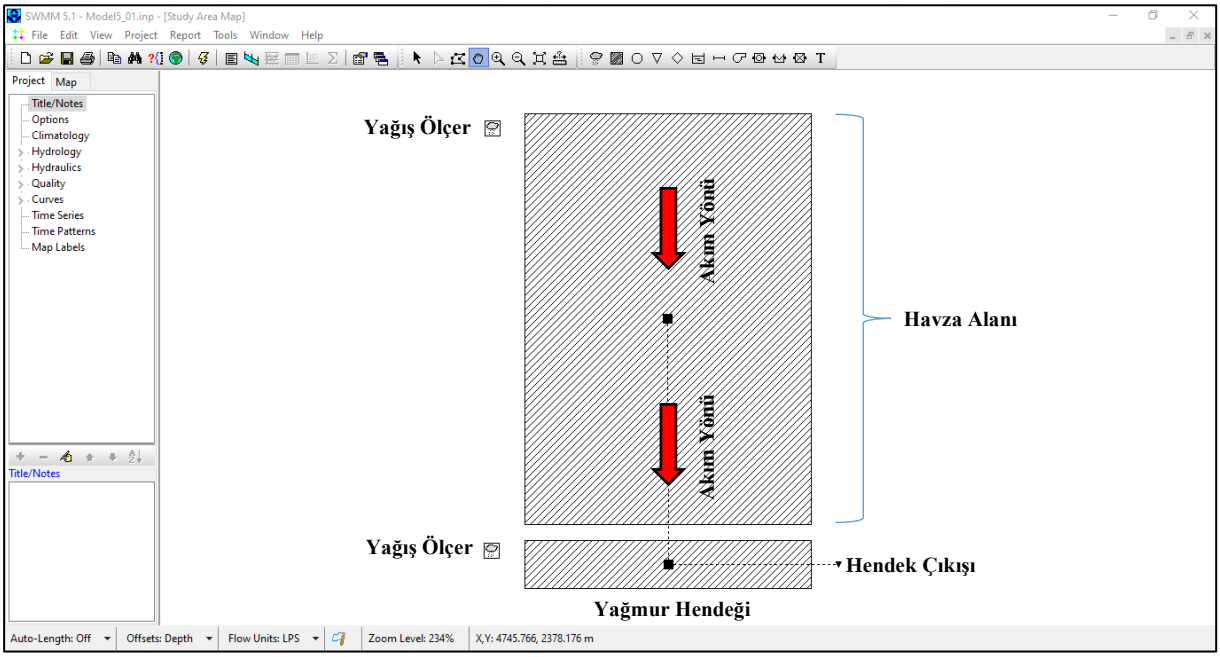
Şekil 3.23: Bitkili yağmur hendeği DEK kontrol editörü.

EPA SWMM programında DEK uygulamalarının tanımlanması için kullanılan DEK Kontrol Editörleri incelendiğinde her bir DEK yapısı için farklı sayıda tasarım parametresinin kullanıldığı görülmektedir. Bu DEK türleri arasında en az tasarım parametresi barındıran bitkili yağmur hendeğidir. Diğer DEK türlerinin birçoğunda yüzey, toprak, depolama ve drenaj için çok sayıda tasarım parametresi bulunmaktadır. Bitkili yağmur hendeğinin DEK Kontrol Editöründe sadece yüzey katmanı için tasarım parametreleri yer almaktadır. Bu tasarım parametreleri; aşma yüksekliği (berm height), bitkili hacim oranı (vegetation volume fraction), yüzey pürüzlülüğü (surface roughness), yüzey eğimi (surface slope) ve şev eğimidir (side slope). Bu çalışma kapsamındaki deney sistemi göz önünde bulundurulduğunda, bitkili yağmur hendeği için Kontrol Editöründe yer alan 5 parametreden 3'ünün sabit olduğu görülmektedir.

Hendek modülünün geometrisinden kaynaklanan ve sabit olan bu parametreler aşma yüksekliği, boyuna eğim ve şev eğimi değerleridir.

3.2.2. EPA SWMM ile Yağmur Hendeğinin Duyarlılık Analizi

YHY Deney sisteminin EPA SWMM programıyla modellenmesinden önce LID Kontrol Editöründe yer alan Aşma Yüksekliği, Bitkili Hacim Oranı, Yüzey Pürüzlülüğü, Yüzey ile Şev Eğimi parametrelerindeki değişimin model sonucunda elde edilen hendek yüzeysel akışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla duyarlılık analizi yürütülmüştür. Bu amaçla oluşturulan model alanı Şekil 3.24'te yer almaktadır.



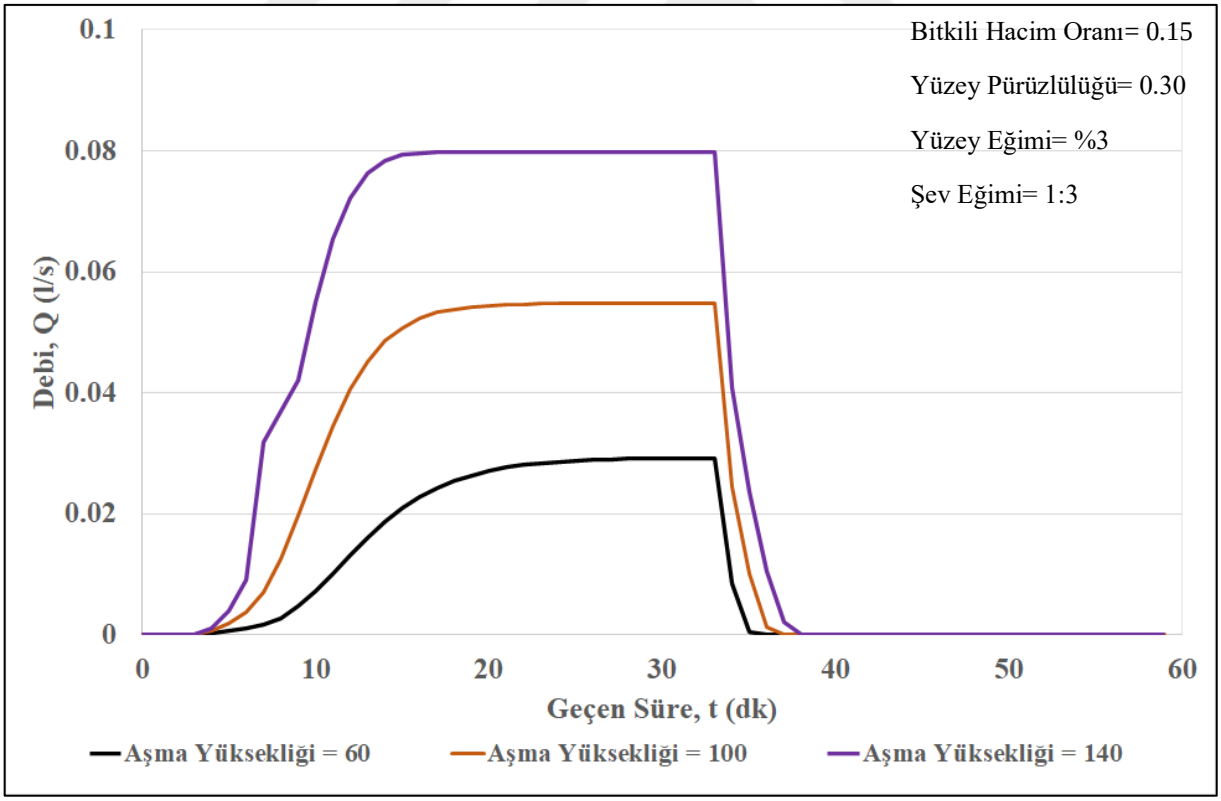
Şekil 3.24: Duyarlılık analizi için oluşturulan EPA SWMM model alanı.

Duyarlılık analizinin yürütülebilmesi için oluşturulan EPA SWMM modeli 1adet havza, 1 adet yağmur hendeği ile 2 adet yağış ölçerden meydana gelmektedir. Havza üzerinde oluşan yüzeysel akış yağmur hendeğine iletilmekte ve yağmur hendeğinin eğimiyle birlikte de hendek çıkışına ulaşmaktadır. Geliştirilen bu model alanıyla farklı değerlerdeki tasarım parametrelerinin hendek çıkışında oluşacak yüzeysel akış davranışına etkileri incelenmiştir. Bunun için seçilen parametre değerleri aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

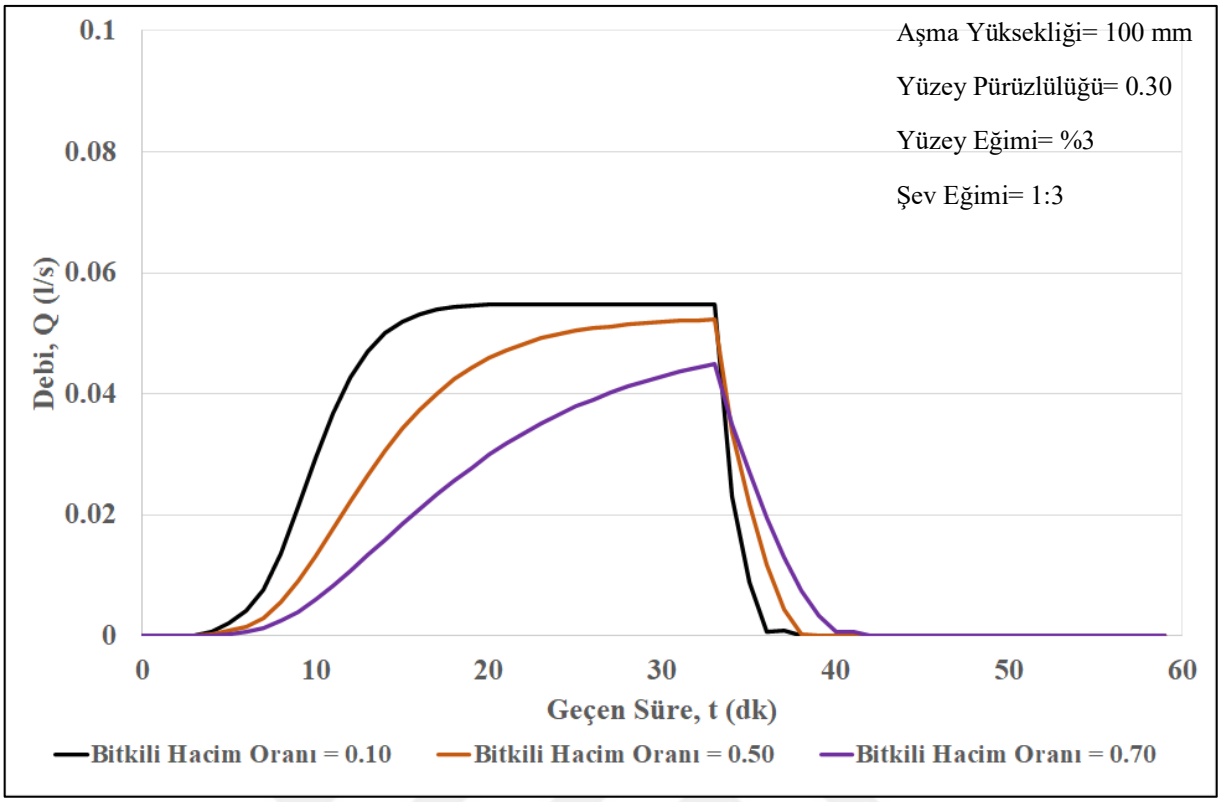
Tablo 3.1: Duyarlılık analizinde kullanılan parametre değerleri.

Parametreler	Kullanılan Parametre Değerleri
Yağış Şiddeti, i (mm/sa)	15
Yağış Süresi (dk)	20
Havza Alanı Eğim Değeri, S_0 (m/m)	0.0007
Havza Yüzey Pürüzlülüğü, n	0.009
Havza Geçirimsiz Yüzey Alanı Yüzdesi (%)	100
Hendek Aşma Yüksekliği (mm)	60, 100, 140
Hendek Bitkili Hacim Oranı	0.10, 0.50, 0.70
Hendek Yüzey Pürüzlülüğü	0.1, 0.3, 0.5
Hendek Yüzey Eğimi	%1, %3, %5
Hendek Şev Eğimleri	1:2, 1:3: 1:4

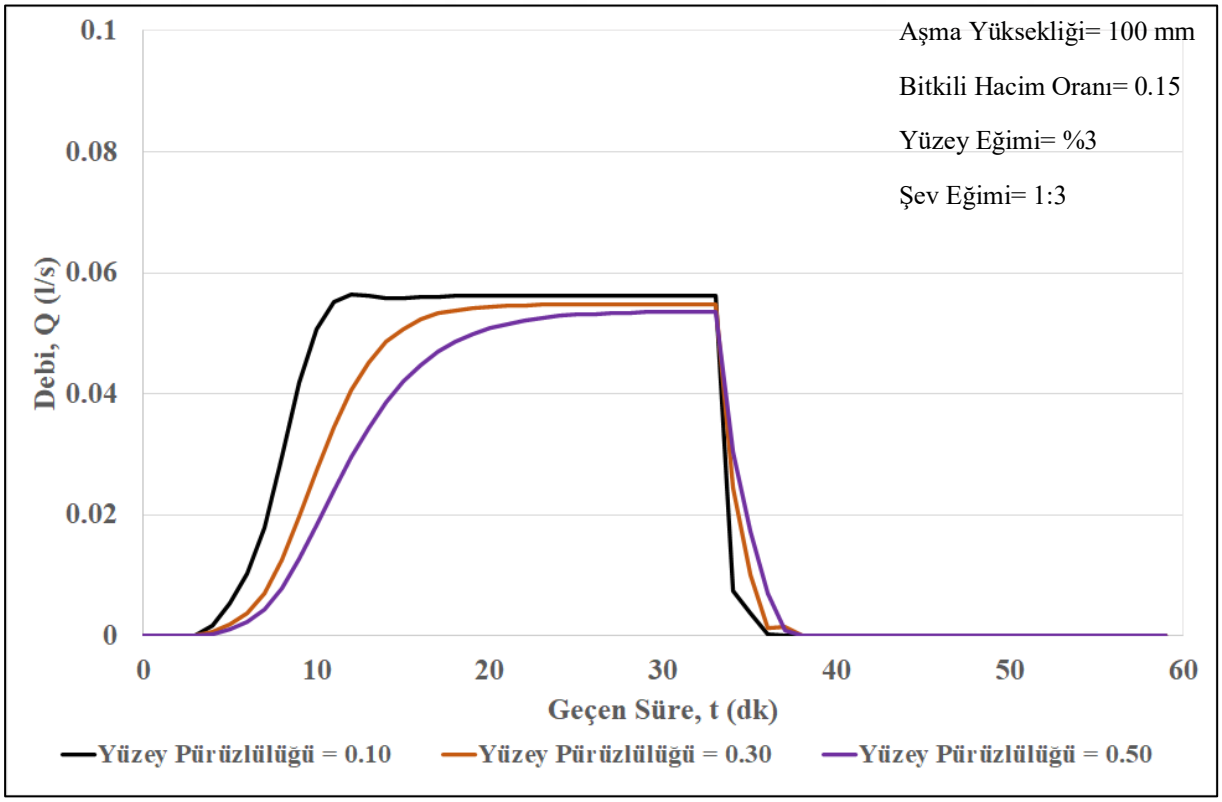
Aşma Yüksekliği, Bitkili Hacim Oranı, Hendek Yüzey Pürüzlülüğü, Hendek Yüzey Eğimi ile Hendek Şev Eğimlerindeki değişimlerin hendek çıkışında hesaplanan yüzeysel akış değerlerine etkilerini ortaya koyan model sonuçları sırasıyla Şekil 3.25-Şekil 3.29'da yer almaktadır.



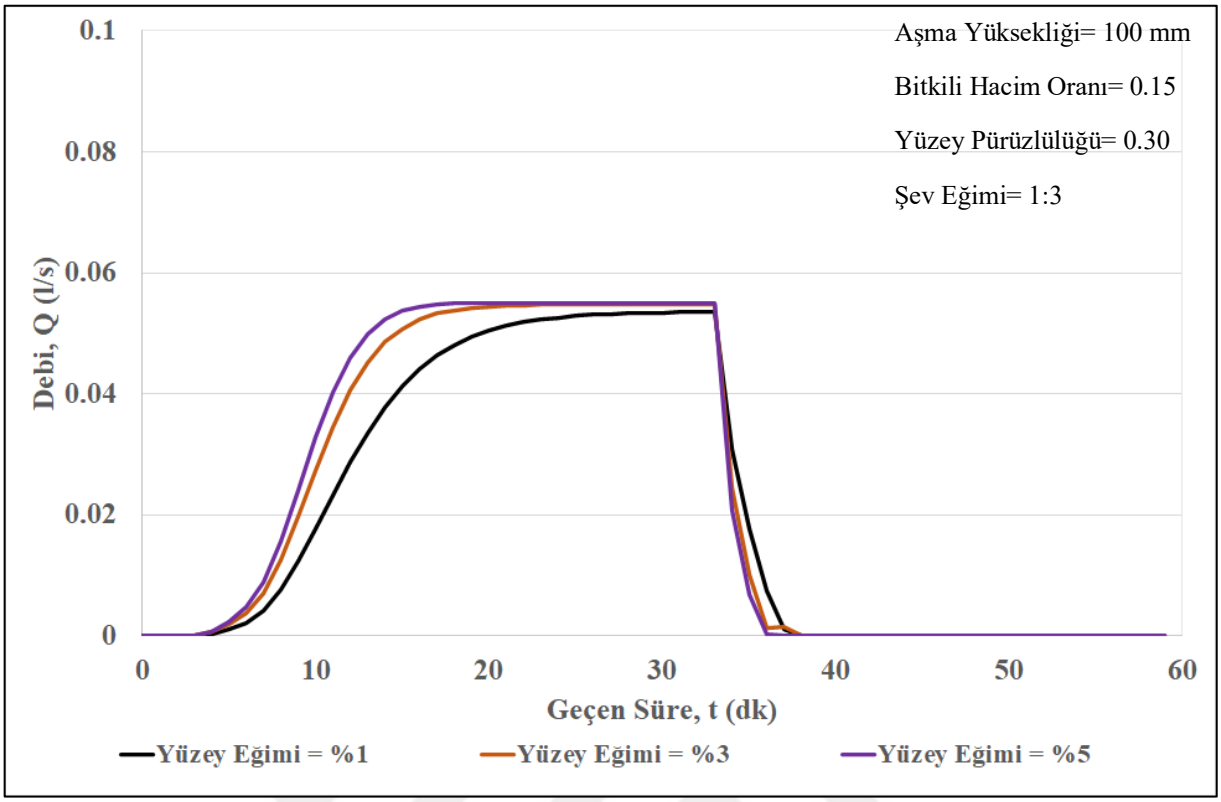
Şekil 3.25: Aşma yüksekliğindeki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri.



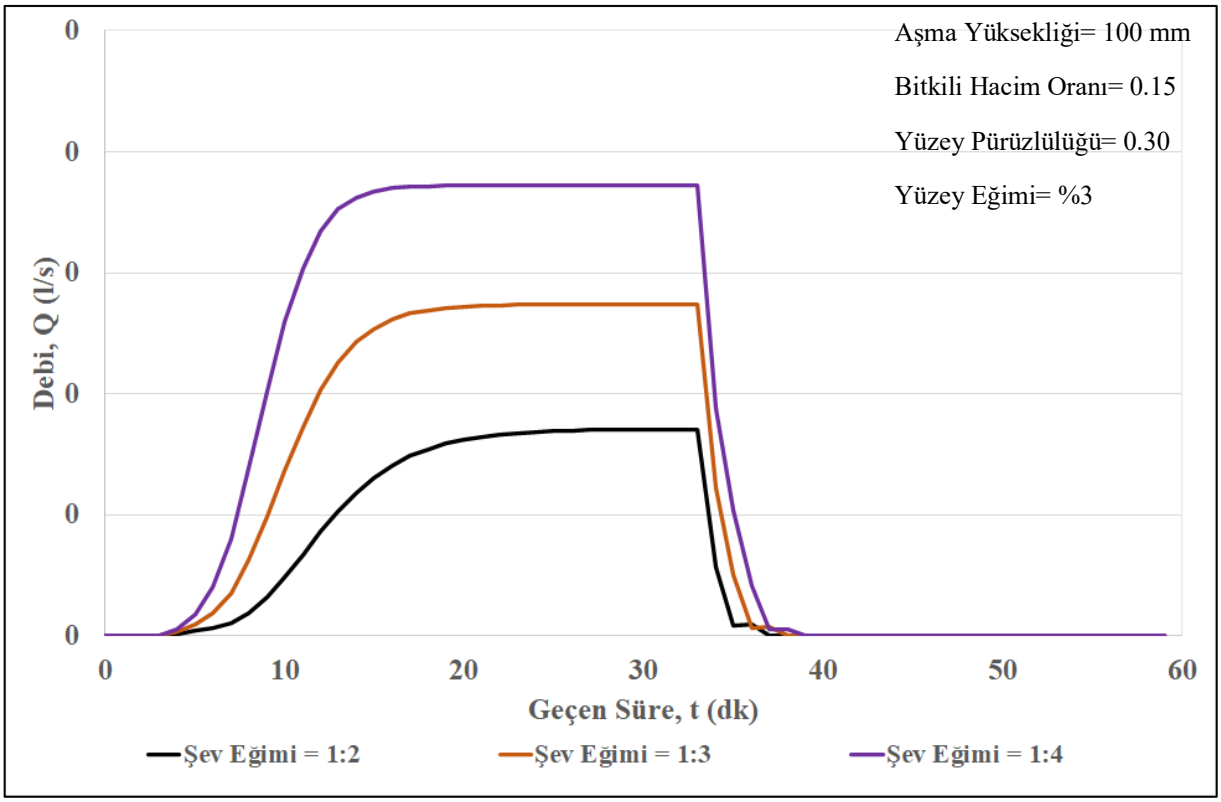
Şekil 3.26: Bitkili hacim oranındaki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri.



Şekil 3.27: Yüzey pürüzlülüğündeki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri.



Şekil 3.28: Yüzey eğimindeki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri.

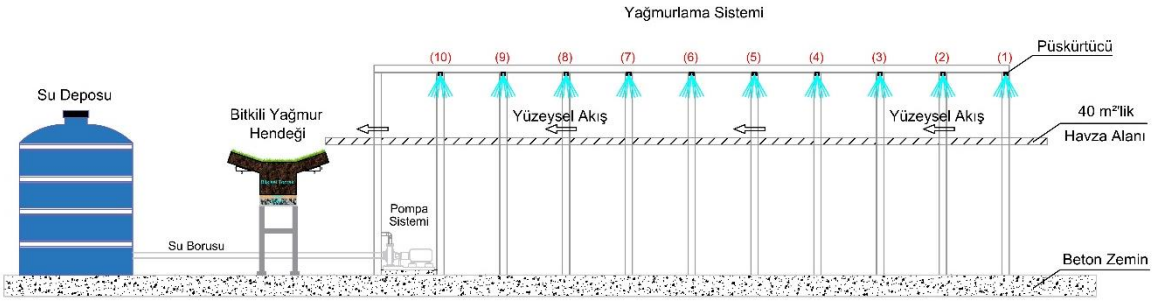


Şekil 3.29: Şev eğimindeki değişimin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkileri.

Aşma yüksekliğindeki değişimin etkilerini incelemek amacıyla 3 farklı aşma yüksekliği değeri seçilmiştir. Bu değerler, 60, 100 ve 140 mm'dir. Aşma yüksekliği değeri arttıkça hendek çıkışında hesaplanan pik debi değerlerinin arttığı görülmektedir (Bkz. Şekil 3.25). Bununla birlikte, düşük aşma yüksekliği değerinde pik debiye ulaşma süresi artmıştır. Bitkili hacim oranındaki değişimi incelemek amacıyla seçilen değerler sırasıyla 0.10, 0.50 ve 0.70'tir. Bitkili hacim oranı değeri arttıkça pik debi değeri ile pik debiye ulaşma süreleri azalmaktadır. Aynı model için yüzey pürüzlülüğünün etkilerini araştırmak amacıyla 3 farklı yüzey pürüzlülük katsayı değeri belirlenmiştir. Bu değerler, 0.10, 0.30 ve 0.50'dir. Yüzey pürüzlülüğünün temel etkisinin akımı geciktirmek oluğu Şekil 3.27'de kolaylıkla görülmektedir. Yüzey eğiminin hendek çıkışındaki yüzeysel akış davranışına etkilerini incelemek amacıyla seçilen eğim değerleri sırasıyla %1, %3 ve %5'tir. Bu eğim değerleri düşük, orta ve yüksek eğimleri temsil etmektedir. Model sonuçları, yüzey pürüzlülük katsayında olduğu gibi yüzey eğimi değerindeki değişimde esas olarak pik debiye ulaşma sürelerini etkilediğini göstermektedir. Bir diğer tasarım parametresi de hendek şev eğimidir. Bu amaçla seçilen 1:2, 1:3 ve 1:4 şev eğimi değerlerinin etkileri araştırılmıştır. Şekil 3.29'da sunulan model sonuçları değerlendirildiğinde, şev eğimi değerindeki artışın hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerlerinde de artışa neden olduğu görülmektedir. Şev eğimi değeri arttıkça yüzeysel akışın daha hızlı bir şekilde hendek çıkışına ulaştığı sonucuna varılmıştır.

3.2.3. EPA SWMM ile YHY Deney Düzeneğinin Modellenmesi

EPA SWMM programı kullanılarak oluşturulacak modelleme çalışması iki temel unsurun modellenmesinden meydana gelmektedir. Bu unsurlardan ilki havza alanının modellenmesi diğeri ise bitkili yağmur hendeğinin modellenmesidir. Havzanın toplam yüzey alanı 40 m^2'dir. Havza alanının 1 m yukarısında yer alan 10 adet çelik profil kiriş üzerine sabitlenmiş ve her bir kiriş üzerinde 4 adet olmak üzere toplamda 40 adet püskürtücü bulunmaktadır. Bu püskürtücüler sayesinde yağmurlama alanı yüzeyine yağışın homojen olarak düşmesi sağlanmaktadır. Belirli bir yağış süresince, yağmurlama alanına düşen yağış havzanın eğimi sayesinde bitkili yağmur hendeğine iletilmektedir. Deney sisteminin kesit görüntüsü Şekil 3.30'da sunulmuştur.



Şekil 3.30: YHY deney sistemi kesit görüntüsü.

3.2.3.1. EPA SWMM Programı ile Havza Alanı ile Yağmur Hendeğinin Modellenmesi

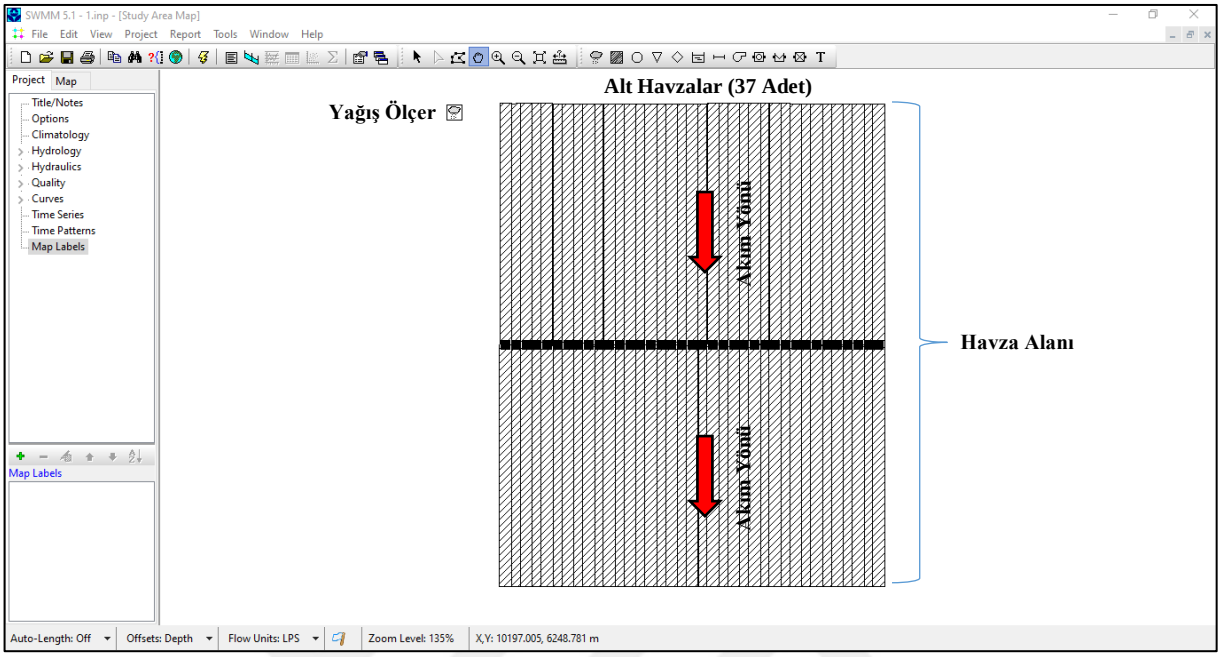
EPA SWMM Programı kullanılarak oluşturulan havza alanı modellerinde 3 farklı durum göz önünde tutulmuştur. Bunlar;

1. Tüm püskürtücülerin açık olduğu durumu temsil eden 40 m^2'lik havza alanının modellendiği durum (R-A).

2. Sadece (1)'den (5)'e kadar ve sadece (6)'dan (10)'a kadar numaralandırılmış kirişlerdeki püskürtücülerin açık olduğu durumu temsil eden havza alanının 20 m^2'lik iki farklı alana bölündüğü durum (R-B ve R-C).

3. Sadece (1), (3), (5), (7) ve (9) numaralı kirişlerdeki püskürtücülerin açık olduğu durumu temsil eden havza alanının 4 m^2'lik 10 farklı alana bölündüğü durum (R-D).

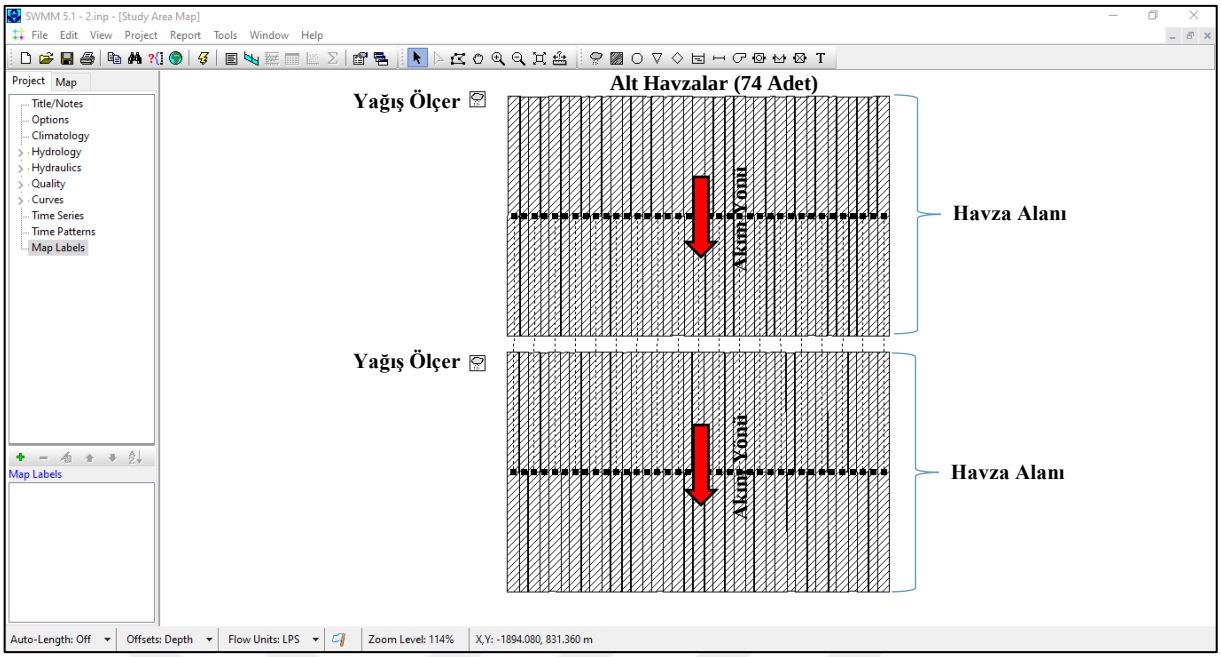
Tüm püskürtücülerin çalıştığı ve yağışın 40 m^2'lik havza alanının tamamına düştüğü durum (R-A) için oluşturulan ilk havza alanı modeli Şekil 3.31'de görülmektedir.



Şekil 3.31: EPA SWMM programında oluşturulan havza alanı modeli (R-A).

Şekil 3.31'de yer alan havza alanı modeli incelendiğinde, model alanının 37 alt havzaya bölündüğü görülmektedir. Model alanının alt havzalara ayrılması, deney sisteminde kullanılan saç levhaların tasarımıyla uyumlu olacak şekilde yapılmıştır. İlaveten, yağış verisi girdisi için modele 1 adet yağış ölçer tanımlanmıştır.

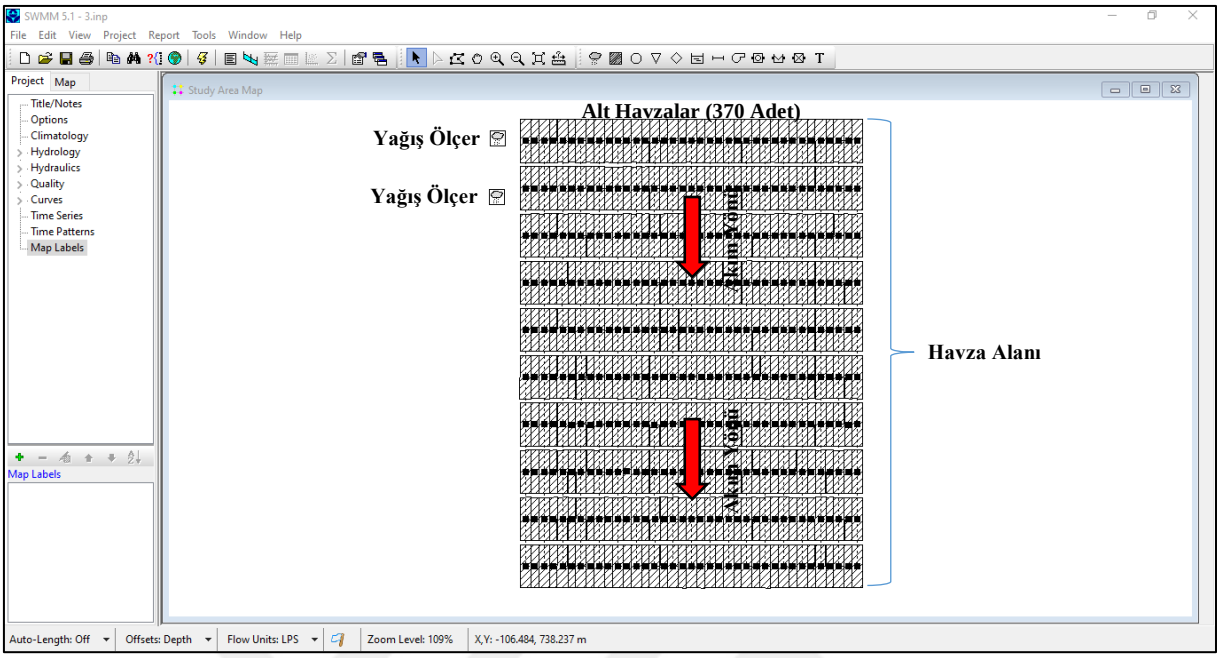
İkinci havza alanı modeline ilişkin görüntü Şekil 3.32'de sunulmuştur.



Şekil 3.32: EPA SWMM programında ikinci model.

İkinci modelde toplam havza alanı ikiye ayrılmış olup (Bkz. Şekil 3.32) toplamda 74 adet alt havzadan meydana gelmektedir. Deney sistemindeki havza alanı için kullanılan malzeme ve tasarım parametreleri göz önünde bulundurularak her bir alt havza için parametreler modele girdi olarak sunulmuştur. İlaveten, 2 bağımsız alan için 2 farklı yağış ölçer tanımlanmıştır.

Püskürtücülerin bir sıra açık-bir sıra kapalı olduğu durumu temsil eden üçüncü havza alanı modeli Şekil 3.33'te görülmektedir.



Şekil 3.33: EPA SWMM programında oluşturulan üçüncü model.

Şekil 3.33'te yer alan havza alanı modelinde havza 10 ayrı alana bölünmüş olup toplam olarak 370 alt havzadan oluşturulmuştur. Yine ikinci modelde olduğu gibi 2 adet yağış ölçer tanımlanmıştır. Bu yağış ölçerden birine yağış şiddeti tanımlanırken diğer yağış ölçere ise kapalı püskürtücüleri ifade etmek için sıfır yağış tanımlanmıştır. Böylelikle çalıştırılan ve çalıştırılmayan püskürtücüler için iki farklı yağış ölçer kullanılmıştır.

Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te yer alan havza model alanlarındaki alt havzalar için deney sisteminde ölçülen genişlik, alan ve eğim değerleri ile Manning Katsayısı değerleri modele işlenmiştir. Havza alanında kullanılan sac levhalar tamamen geçirimsiz yapıda olduklarından dolayı bu bilgi alt havzalar tanımlanırken "%100 Geçirimsiz Yüzey" olarak tanımlanmıştır. Bu durumda tanımlanan havza alanları için sızma olayı gerçekleşmeyecektir. Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te yer alan havza model alanları için EPA SWMM programında girdi olarak kullanılan parametreler Tablo 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 3.2: Havza model alanları için EPA SWMM programında kullanılan parametre değerleri.

Parametreler	Kullanılan Parametre Değerleri
Yağış Şiddetleri, i (mm/sa)	20 ve 30
Alansal Yağış Senaryosu	R-A, R-B, R-C, R-D
Yağış Süreleri (dk)	15 ve 25
Toplam Havza Alanı Genişliği (m)	4
Havza Alanı Eğim Değeri, S_0 (m/m)	0.0007
Manning Katsayısı, n	0.009
Geçirimsiz Yüzey Alanı Yüzdesi (%)	100

3.2.3.2. EPA SWMM Programı ile Bitkili Yağmur Hendeğinin Modellenmesi

Modelleme çalışmasının bir sonraki aşaması bitkili yağmur hendeğinin modellenmesidir. Deneysel çalışmalardaki bitkili yağmur hendeğine ilişkin enkesit görüntüsü Şekil 3.34'te yer alan şematik çizimde görülmektedir.



Şekil 3.34: Bitkili yağmur hendeği kesit görüntüsü.

EPA SWMM programında yer alan bitkili yağmur hendeği Kontrol Editöründeki aşma yüksekliği, yüzey eğimi değeri ile şev eğimi değeri YHY deney düzeneğindeki hendek modülü geometrisi göz önünde bulundurularak sırasıyla 140 mm, %5 ve 1:3 olarak girilmiştir. Diğer parametreler ise literatürdeki değerler göz önünde bulundurularak seçilmiştir (Rossman ve Huber (2016)). Bitkili yağmur hendekleri için tipik tasarım parametresi değer aralıkları Tablo 3.3'te görülmektedir. Kontrol Editörüne girilen tasarım parametreleri Tablo 3.4'te yer almaktadır.

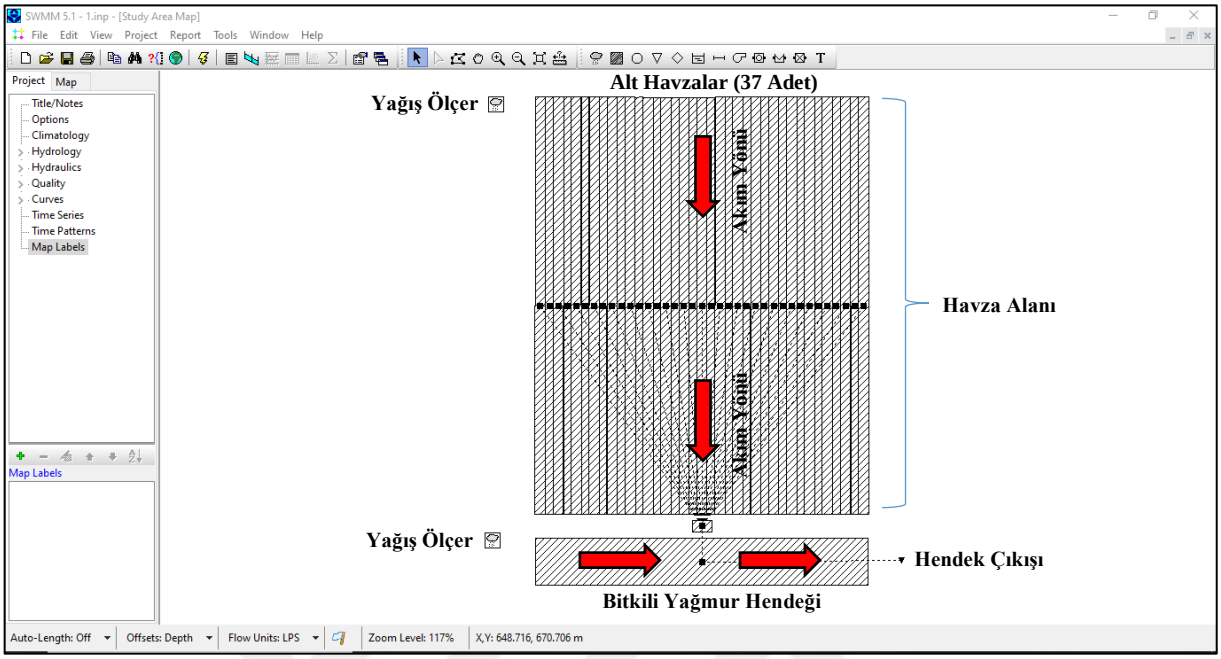
Tablo 3.3: Bitkili yağmur hendekleri için tipik tasarım parametresi değer aralıkları (Rossman ve Huber (2016)).

Parametreler	Değer
Maksimum Derinlik (cm)	15.24 (0.5 ft)-60.96 (2.0 ft)
Bitkisiz Yüzey Oranı	0.8-1.0
Şev Eğimi (m/m)	1:2.5-1:4
Yüzey Pürüzlülüğü	0.03-0.2

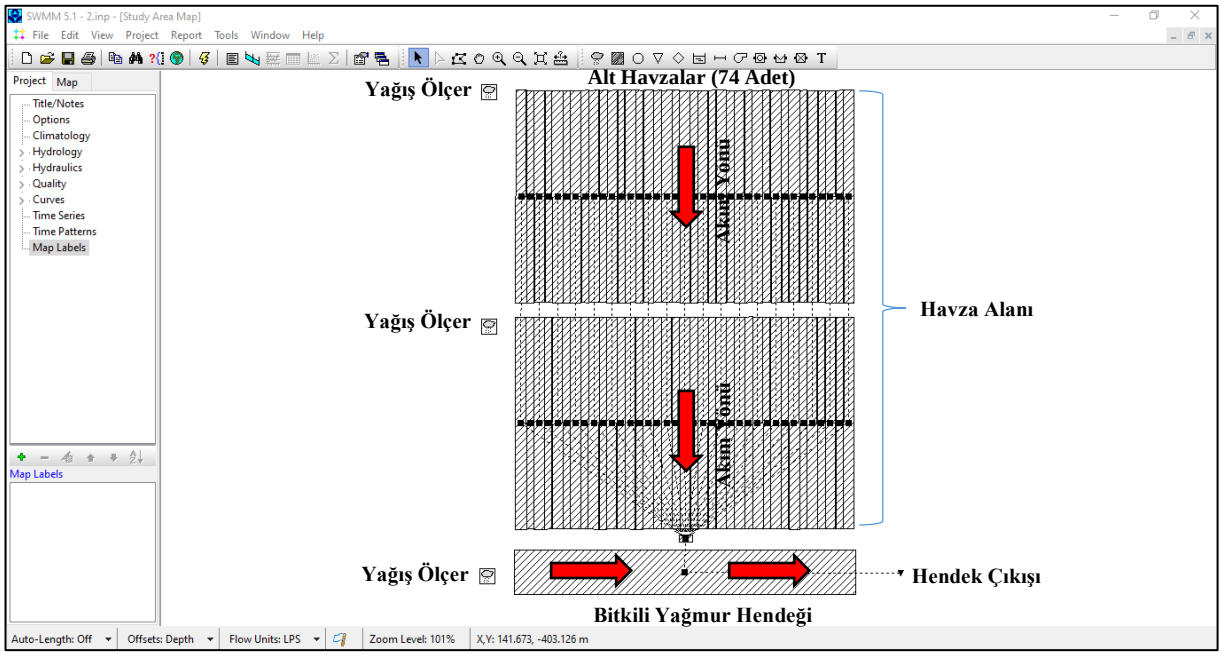
Tablo 3.4: Bitkili yağmur hendeği modelinde kullanılan parametre değerleri.

Parametreler	Kullanılan Parametre Değerleri
Aşma Yüksekliği (mm)	140
Bitkili Hacim Oranı	0.1
Yüzey Pürüzlülüğü, n	0.2
Yüzey Eğimi, S (%)	5
Şev Eğimi (m/m)	1:3

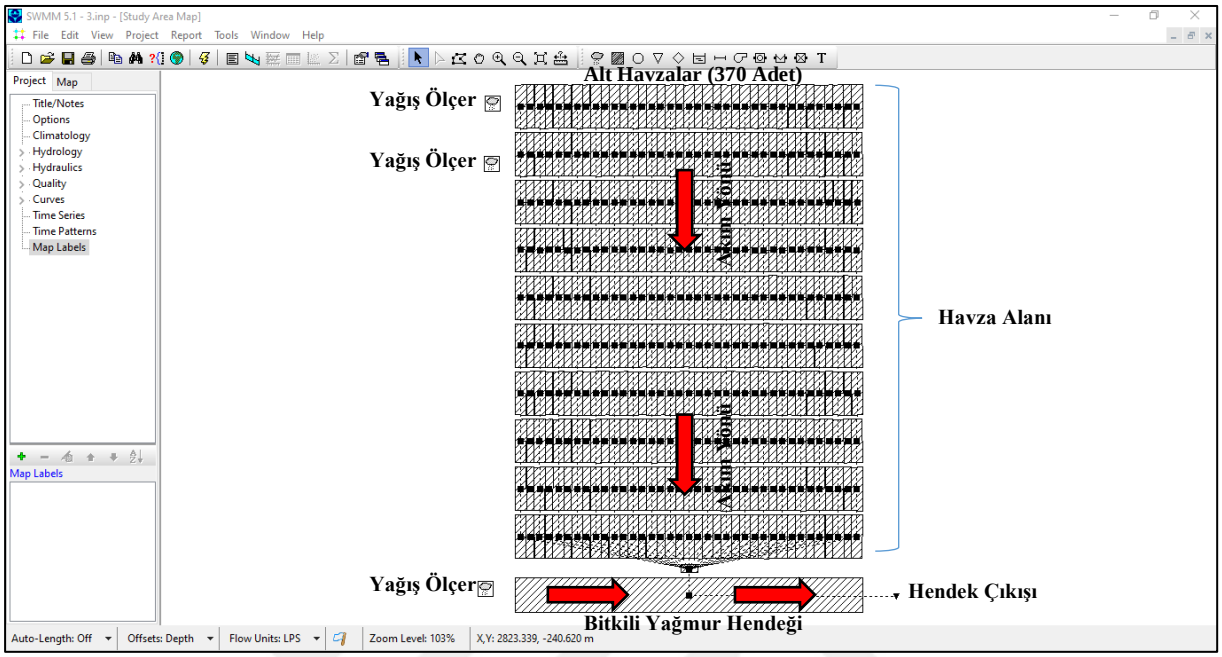
Farklı yağış senaryoları altında havza alanı üzerinde oluşan havza yüzey akışı %0.7'lik havza alanı eğimi sayesinde bitkili yağmur hendeğine taşınmaktadır. EPA SWMM programında oluşturulan modelde de önce havza alanı üzerinde yağış olayı simüle edilmekte, havza alanı üzerinde oluşan yüzeysel akış yağmur hendeğine aktarılmaktadır. Ardından hendek üzerinde oluşan yüzey akışı yağmur hendeği çıkışına iletilmektedir. Modelde tanımlanan bitkili yağmur hendeği içinde bir adet yağış ölçer tanımlanmak zorundadır. Ancak deneyler esnasında hendek yüzeyine yağış düşmediğinden dolayı, tanımlanan bu yağış ölçere yağış tanımlanmamıştır. Bu durum EPA SWMM programında tanımlanan her bir DEK için yağış ölçer tanımlama zorunluluğundan kaynaklanmaktadır. Farklı yağış senaryoları için oluşturulan havza model alanları ile DEK Editörü kullanılarak oluşturulan yağmur hendeği model alan görüntüleri Şekil 3.35-3.38 arasında sunulmuştur.



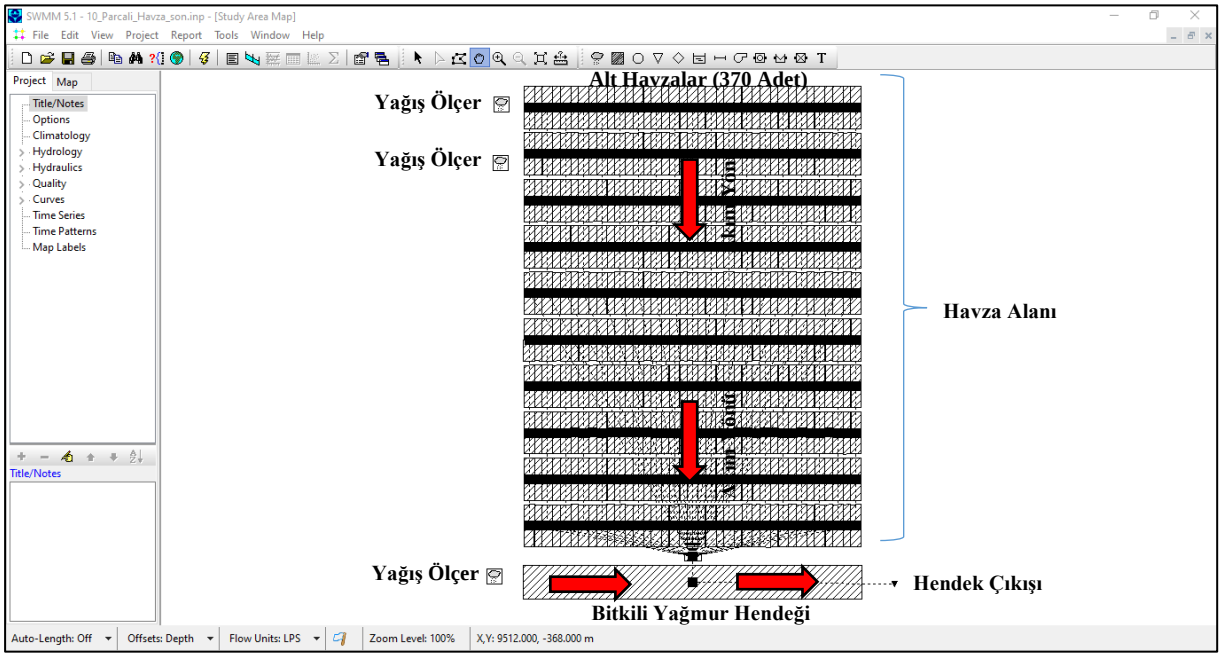
Şekil 3.35: R-A yağış senaryosu için oluşturulan EPA SWMM modeli.



Şekil 3.36: R-B ve R-C yağış senaryoları için oluşturulan EPA SWMM modeli.



Şekil 3.37: R-D yağış senaryosu için oluşturulan EPA SWMM modeli.



Şekil 3.38: R-D yağış senaryosu için oluşturulan nihai EPA SWMM modeli.

Bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik davranışını ortaya koyan modelleme çalışması kapsamında hem havza alanı hem de bitkili yağmur hendeğinin modellenmesinde EPA SWMM programının etkinliği test edilmiştir. R-D yağış senaryosu için oluşturulan ve Şekil 3.37 ile Şekil 3.38'de sunulan iki farklı model alanı vardır. Bu iki model alanı arasındaki farklılık yüzeysel akışın alt havzalar üzerinden yağmur hendeğine iletilme şekilleridir.

Şekil 3.37'deki model kullanılarak yapılan kalibrasyon çalışmalarında, R-A, R-B ve R-C havza alanları için kullanılan tasarım parametreleri R-D havza alanı için de kullanılmasına rağmen havza alanı çıkışındaki ölçüm ile model sonuçları arasında farklılıklar olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, R-A, R-B ve R-C havza model alanlarında ise havza çıkışında ölçüm ile model sonuçları arasındaki uyum oldukça yüksektir. Elde edilen bulgular detaylı incelendiğinde, R-D yağış senaryosu için oluşturulan model alanındaki alt havza sayısının çıkış hidrografı üzerinde etkin olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, çıkış hidrografının doğru temsil edilebilmesi için farklı sayıda alt havzalar ve çıkış noktaları test edilmiştir. Bu seçenekler arasında alt havzaların 5'erli sıralar halinde gruplandırılarak alt havza üzerinde oluşan yüzey akışın doğrudan yağmur hendeğine iletildiği durum için en iyi sonucun elde edildiği görülmüştür. Buna uygun olarak R-D yağış senaryosu için Şekil 3.38'de sunulan model alanı kullanılmıştır.

3.3. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİ HİDROLOJİSİ İÇİN MATEMATİKSEL MODEL GELİŞTİRİLMESİ

Tezin bu aşamasında, geleneksel yağmur suyu yönetim stratejilerine alternatif olarak ortaya çıkan ve bütünleşik olarak kullanılabilen bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik davranışını tanımlayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Günümüzde matematiksel modelleme yaklaşımları kullanılarak DEK türlerinin hidrolojik davranışlarının belirlenmesi önem kazanmaktadır. Matematiksel modellerde bir dizi etkin parametre kullanılarak bitkili yağmur hendeğinin davranışı ortaya konabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen matematiksel model iki ana unsurdan meydana gelmektedir. Bunlardan ilki hendek yüzeyinde meydana gelen hendek yüzey akışının hesaplandığı "Hendek Yüzeysel Akış Modeli", diğeri ise yağmur hendeğinde dikey yönde süzülüp tabanından çıkan akışın hesaplandığı "Hendek Drenaj Akış Modeli"dir. Matematiksel modelin doğruluğu ve etkinliği, deneysel çalışmalardan elde edilen ölçümler yardımıyla sağlanmıştır. Modelin doğruluğunu ortaya koyabilmek için ölçüm sonuçları ile matematiksel model sonuçları arasındaki uyumu gösteren belirtme katsayısı (R^2) değerleri hesaplanmıştır. Tezin bu aşamasında yapılan modelleme çalışmaları için MATLAB programlama dili kullanılmıştır.

3.3.1. Hendek Yüzeysel Akış Modeli

Havza üzerinde oluşan yüzeysel akış hesabında, debi ve su derinliğinin zamana göre değişimini veren Hidrolojik Yöntemler ve debi ile su derinliğinin zamana ve konuma göre değişimini veren Hidrolik Yöntemler kullanılmaktadır (Bayazıt ve Önöz, 2007). Hidrolik Yöntemler süreklilik ve momentum denklemleri olan kısmi diferansiyel denklem takımından oluşmaktadır ve sayısal ya da analitik yöntemlerle çözülebilirler (Chow ve diğ. (1988)). Hidrolik Yöntemlerde kullanılan denklemler St. Venant Denklemleri olarak bilinmektedir. St. Venant denklemleri, açık kanallarda kararsız akımların davranışını ortaya koyan denklemlerdir. Bu denklemler yardımıyla herhangi bir kesit için debi ve su derinliği değerleri hesaplanabilmektedir. Momentum denkleminde yerel ve konvektif ivme terimleri ihmal edildiğinde difüzyon dalga denklemi, ivme terimleriyle birlikte basınç kuvvetini temsil eden terim de ihmal edildiğinde kinematik dalga denklemi elde edilmektedir.

Bir akarsuda, zamanla değişen bir boyutlu akımın Süreklilik ve Momentum Denklemleri sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \tag{3.7}$$

$$\frac{1}{A}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A}\frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + g\left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f\right) = 0 \tag{3.8}$$

Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'de yer alan; *Q*, debiyi (L^3/T), *A*, kesit alanını (L^2) , *q*, birim debiyi (L^2/T), *t*, zamanı (T), *x*, mesafeyi (L), *g*, yerçekimi ivmesini (L/T^2), S_0, taban eğimini (L/L) ve S_f (L/L) ise enerji çizgisi eğimini temsil etmektedir. Denklem (3.8)'deki birinci terim yerel ivmeyi, ikinci terim konvektif ivmeyi, üçüncü terim basınç kuvvetini, dördüncü terim yerçekimi kuvvetini ve son terim ise sürtünme kuvvetini temsil etmektedir. Momentum Denkleminde, yerel ivme, konvektif ivme ve basınç kuvvetini temsil eden terimler ihmal edildiğinde elde edilen model kinematik dalga modeli olarak tanımlanmaktadır. Kinematik dalga modeli için yukarıda belirtilen terimlerin ihmal edilmesinden sonra Momentum denklemi $S_0 = S_f$ eşitliğine indirgenmiş olur. Akım hızının hesaplanmasında ise Manning veya Chezy Denklemlerinden yararlanılır. Manning ve Chezy Denklemleri sırasıyla Denklem (3.9) ile Denklem (3.10)'de sunulmuştur.

$$V = \frac{1}{n}R^{2/3}\sqrt{S_0} \tag{3.9}$$

$$V = C\sqrt{RS_0} \tag{3.10}$$

Manning ve Chezy Denklemlerinde yer alan *V*, akım hızını (L/T), *R*, hidrolik yarıçapı (L), *n*, Manning katsayısını ve *C* ise Chezy katsayısını ($L^{1/2}/T$) ifade etmektedir.

Yürütülen deneyler esnasında, hendek yüzeyinde meydana gelen akımı modelleyebilmek için kinematik dalga denklemi temel alınmıştır. Kinematik dalga denkleminde yer alan yağış şiddeti *i*, havza alanı üzerinde oluşan yüzeysel akışın birim hendek yüzey alanına düşen miktarına (q_{havza}) ve sızma hızı (*f*), hendek tabanından çıkan drenaj hızına (q_{drenaj}) eşitlenerek temsil edilmiştir. Geliştirilen matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{\partial y}{\partial t} + \dfrac{\partial q_{hendek}}{\partial x} = i - f \\ \\ q_{hendek} = \alpha\, y^{m} \end{array}\right\} \quad \frac{\partial y}{\partial t} + \alpha \frac{\partial (y^{m})}{\partial x} = q_{havza} - q_{drenaj} \tag{3.11}$$

$$q_{havza} = \frac{Q_{havza}}{A_{hendek}} \tag{3.12}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{S_o}}{n} \quad \text{ve} \quad m = 5/3 \tag{3.13}$$

Denklem (3.11), Denklem (3.12) ile Denklem (3.13)'de yer alan *y*, su derinliğini (L), q_{hendek}, hendek yüzeyinde oluşan birim debiyi (L^2/T), *t* zamanı (T), x, uzunluğu (L), Q_{havza} havza yüzey akışını (L3/T), q_{havza}, havza üzerinde oluşan yüzey akışının hendek birim alanı üzerine ulaşan miktarını (L/T), q_{drenaj}, drenaj hızını (L^3/L^2T), S_0, kanalın boyuna eğimini (L/L) , n, Manning Katsayısını, α ve m ise sabitleri temsil etmektedir.

Hendek Yüzeysel Akış Modelinde, yağmur hendeği üzerinde meydana gelen yüzeysel akış değerleri hesaplanmaktadır. Yağmurlama alanı çıkışında ölçülen havza yüzey akışı verileri modele girdi olarak sunulmuştur. Bunun için, yağmurlama alanı çıkışındaki ölçüm değerleri hendek alanına bölünmüştür. Böylelikle yağmurlama alanı üzerinde oluşan havza yüzeysel akışı, hendek birim alanı üzerine düşen yağış şiddetine dönüştürülmüş olmaktadır. Hendek yüzeysel akış modelinin çözümü, kapalı sonlu farklar yöntemiyle yapılmıştır. Hendek yüzeysel akış modelinde yer alan denklemlerin kapalı sonlu farklar yöntemiyle elde edilen çözüm formları aşağıdaki denklemlerde sırasıyla sunulmuştur.

$$\frac{q_{i+1}^{j+1} - q_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{y_{i+1}^{j+1} - y_{i+1}^{j}}{\Delta t} = (q_{havza} - q_{drenaj})_{i+1}^{j}$$

$$q_{i+1}^{j+1} = \alpha (y_{i+1}^{j+1})^m \tag{3.14}$$

$$q_i^{j+1} = \alpha (y_i^{j+1})^m$$

$$f\ (y_{i+1}^{j+1}) = \frac{\Delta t}{\Delta x}\alpha (y_{i+1}^{j+1})^m + y_{i+1}^{j+1} - \left[\frac{\Delta t}{\Delta x}\alpha (y_i^{j+1})^m + y_{i+1}^{j} + \Delta t (q_{havza} - q_{drenaj})_{i+1}^{j+1}\right] \tag{3.15}$$

Denklem (3.15), bilinmeyen derinlik y_{i+1}^{j+1} için Newton-Raphson iterasyon yöntemi kullanılarak aşağıda sunulan adımlarla çözülmektedir.

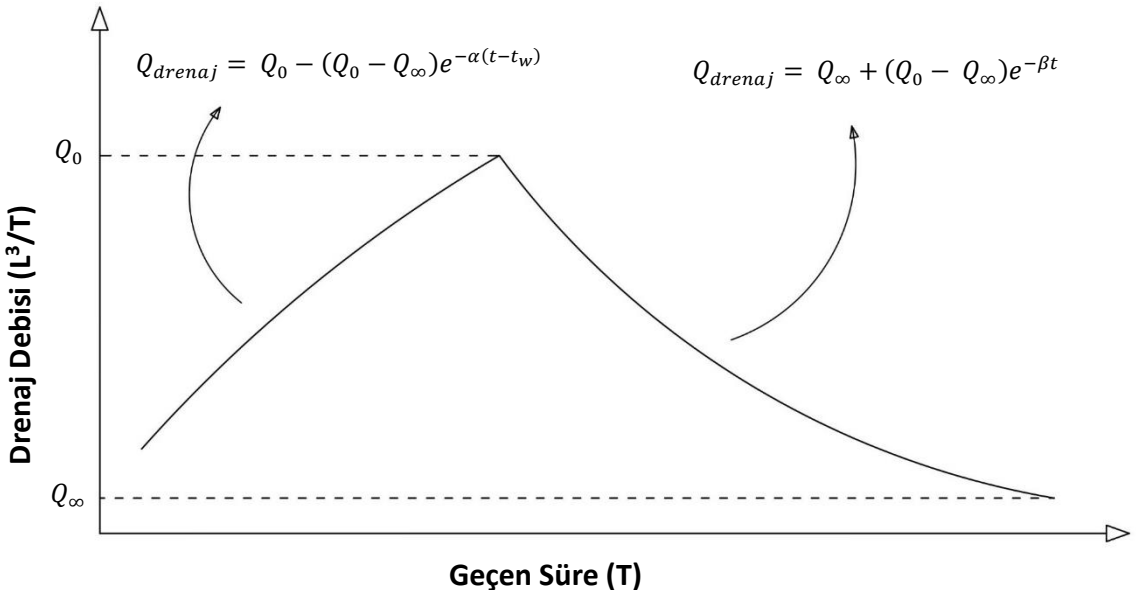
$$(y_{i+1}^{j+1})_{k+1} = (y_{i+1}^{j+1})_k - \frac{f(y_{i+1}^{j+1})_k}{f'(y_{i+1}^{j+1})_k} \qquad \left|f(y_{i+1}^{j+1})_{k+1}\right| \leq \varepsilon \tag{3.16}$$

$$f'(y_{i+1}^{j+1}) = 1 + \alpha m \frac{\Delta t}{\Delta x} (y_{i+1}^{j+1})^{m-1} \tag{3.17}$$

3.3.2. Hendek Drenaj Akış Modeli

Hendek Drenaj Akış Modeli, hendek yüzeyinden hendek tabanına kadar süzülerek hendek tabanında yer alan drenaj çıkış noktasına ulaştığı drenaj debisini hesaplamak üzere geliştirilmiştir. Matematiksel modelin geliştirilebilmesi için deneylerden elde edilen drenaj ölçümlerinin karakteristiği irdelenmiştir. Bu davranışın günümüzde yaygın olarak kullanılan Horton, Green-Ampt, Philip, Kostiakov vb. sızma modelleriyle uyumu gözden geçirilmiştir. Ancak hendek drenaj akışı davranışının bu modellerle tam bir uyum içerisinde olmadığı görülmüştür. Yağmur hendeğinin drenaj akışı matematiksel bir denkleme oturtulurken drenaj davranışının iki parçalı olarak ele alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Buna istinaden drenajın başlamasından pik drenaj debisinin gözlemlenmesine kadarki kısım Yükselme Eğrisi ve pik drenaj debisinden minimum drenaj debisine ulaşıncaya kadarki kısım Çekilme Eğrisi olarak iki farklı matematiksel denklem ile temsil edilmiştir. Hendek Drenaj Akış Modeline ilişkin şematik grafik Şekil 3.39'da sunulmuştur.

0



Şekil 3.39: Hendek drenaj akış modeli.

Hendek Drenaj Akış Modelinde yer alan Yükselme ve Çekilme Eğrilerini temsil eden matematiksel ifadeler Denklem (3.18) ile Denklem (3.19)'de verilmiştir.

$$Q_{drenaj} = Q_0 - (Q_0 - Q_\infty)e^{-\alpha(t-t_w)} \quad (3.18)$$

$$Q_{drenaj} = Q_\infty + (Q_0 - Q_\infty)e^{-\beta t} \quad (3.19)$$

Denklem (3.18) ile Denklem (3.19)'de yer alan;

- Q_{drenaj}, drenaj debisi (L^3/T),
- $Q_{0,}$ maksimum drenaj debisi (L^3/T),
- Q_∞, minimum drenaj debisi (L^3/T),
- α, yükselme eğrisi katsayısı $(1/T)$,
- t, süre (T),
- t_w, hendek drenaj akış başlangıç zamanı (T),
- β, çekilme eğrisi katsayısı $(1/T)$'dir.

Drenaj modelinde yer alan drenaj debisi (Q_{drenaj}), zamanın ve yukarıda belirtilen katsayıların bir fonksiyonudur. Yani hem zamanla hem de belirtilen katsayı değerlerine göre farklı değerler almaktadır. Geliştirilen matematiksel modelin temelini kavrayabilmek için, modelde yer alan her bir parametrenin çok iyi yorumlanması gerekmektedir. $\alpha, t_w \; ve \; \beta$ katsayıları hendek karakteristiklerini yansıtan değerlerdir. Matematiksel modelde yer alan α katsayısı, hendeğin drenaj kapasitesindeki artışı temsil eden bir katsayı iken Çekilme Eğrisinde yer alan β katsayısı ise hendeğin drenaj kapasitesindeki düşüşü temsil etmektedir. α ve β katsayıları hendeğin hem toprak katmanı hem de yüzey katmanı özelliklerini bütünleşik olarak temsil etmektedir. Yükselme ve Çekilme Eğrilerinde yer alan üssel ifade ise sırasıyla drenaj debisindeki artmanın ve azalmanın profilini belirlemektedir. Yükselme eğrisi için zamansal katsayı değeri t_w ise drenaj debisinin görülmeye başladığı zamanı temsil etmektedir.

$\alpha, t_w \; ve \; \beta$ katsayılarının drenaj karakteristiğini temsil edecek şekilde optimum değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için MATLAB Programı kullanılarak optimizasyon analizi

gerçekleştirilmiştir. Bu aşamaya ilişkin detaylı bilgi “Bitkili Yağmur Hendeği Hidrolojisi İçin Geliştirilen Matematiksel Modele Ait Bulgular” başlığı altında sunulacaktır.

4. BULGULAR

4.1. DENEYSEL ÇALIŞMALARA AİT BULGULAR

4.1.1. Mekanik Analizler

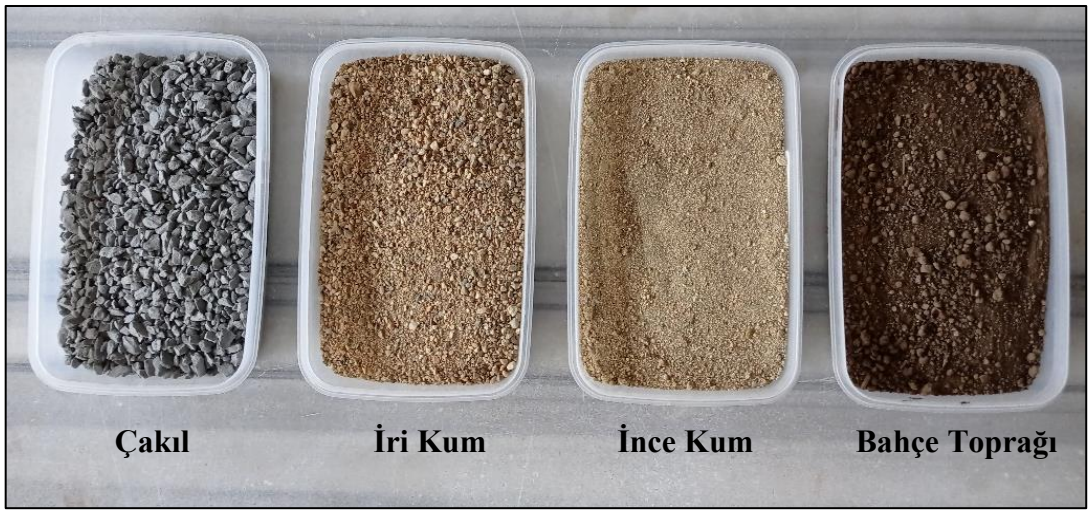
4.1.1.1. Elek Analizi

Genel olarak tipik bir bitkili yağmur hendeği; kum, çakıl, bitkisel toprak ve iklim koşullarına uygun bitki türlerinden meydana gelmektedir. Kum ve çakıl katmanları hendek içerisinde sızan suyun filtrelenmesi görevini görürken, bitkisel toprak ise bitki türlerinin yetişebilmesi için uygun ortamı sağlamaktadır. Test edilecek olan hendek konfigürasyonlarında kum, çakıl ve bitkisel toprak katmanları mevcuttur. İhtiyaç duyulan bu malzemelerden 40 litrelik çuvallar halinde olmak üzere toplamda 200 çuval gübreli Kırklareli toprağı ile 3 m^3 kum ve 1 m^3 çakıl deney alanına yakın bölgede depolanmıştır (Şekil 4.1).

Deneylerde kullanılacak malzemelerin tane çapı dağılımlarını belirlemek üzere elek analizi deneyleri yürütülmüştür. Elek analizinde kullanılan malzemelere ilişkin görüntü Şekil 4.2'de yer almaktadır. Elek analizi deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için her bir malzemeden gerekli miktarlarda alınan numuneler 24 saat boyunca 105 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur. Ardından etüvden çıkartılan numuneler tekrar tartılmıştır. Etüvde kurutulmuş her bir malzeme, seri eleklerden geçirilerek elek üstünde kalan miktarlar belirlenmiştir. ASTM D6913-04 (2009)'a uygun olarak yapılan elek analizi deneylerine ilişkin görseller Şekil 4.3'te, bahçe toprağı, ince kum, iri kum ve çakıl malzemeleri için elde edilen elek analizi sonuçları ise sırasıyla Tablo 4.1, Tablo 4.2, Tablo 4.3 ile Tablo 4.4'te sunulmuştur. Bu malzemeler için elde edilen tane dağılımı eğrileri ise Şekil 4.4'te yer alan grafikte verilmiştir.



Şekil 4.1: Deneylerde kullanılan kum, çakıl ve bitkisel toprak malzemeleri.



Şekil 4.2: Elek analizinde kullanılan kum, çakıl ve bitkisel toprak malzemeleri.



Şekil 4.3: Elek analizi deneyleri.

Tablo 4.1: Bahçe toprağı için elde edilen elek analizi sonuçları.

Elek Çapı (mm)	Elek Ağırlığı		Elek Üstünde Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
	Boş Ağırlık (gr)	Dolu Ağırlık (gr)			
4.75	456	518	62	938	93.8
2	411.5	562	150.5	787.5	78.75
1.18	391	519.5	128.5	659	65.9
0.6	345	494	149	510	51
0.425	333	399.5	66.5	443.5	44.35
0.3	325	401.5	76.5	367	36.7
0.212	308	381.5	73.5	293.5	29.35
0.15	304.5	382.5	78	215.5	21.55
0.08	415	533	118	97.5	9.75
0.063	350.5	420.5	70	27.5	2.75
PAN	351.5	381.5	30	30	

Tablo 4.2: İnce kum için elde edilen elek analizi sonuçları.

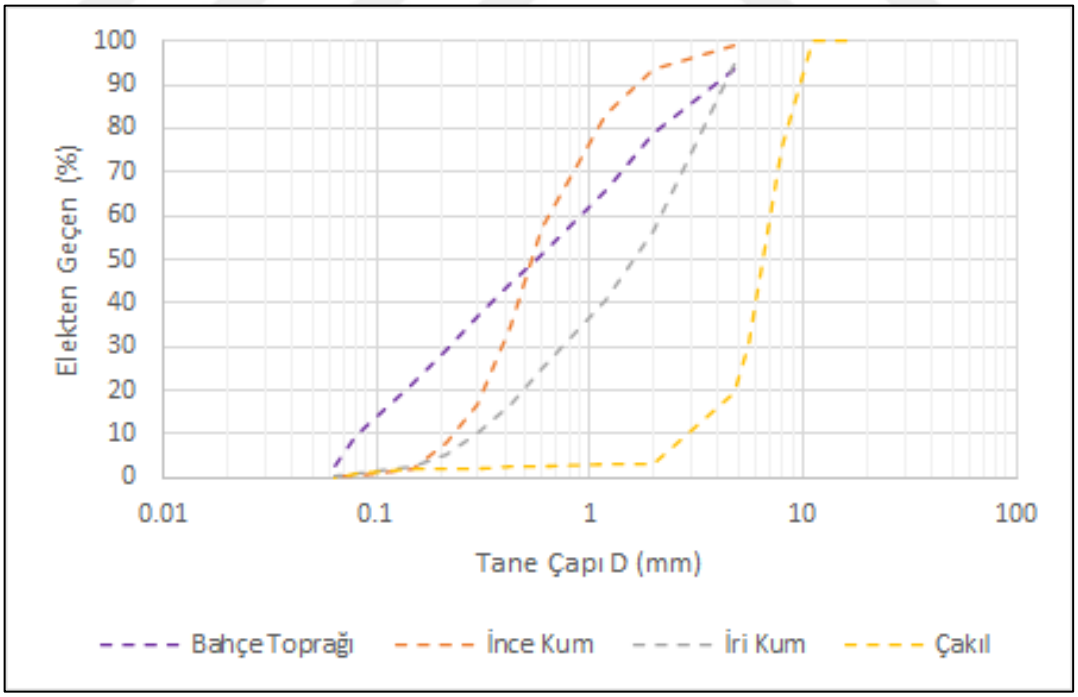
Elek Çapı (mm)	Elek Ağırlığı		Elek Üstünde Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
	Boş Ağırlık (gr)	Dolu Ağırlık (gr)			
4.75	455.5	465.5	10	990	99
2	411	467.5	56.5	933.5	93.35
1.18	390	492	102	831.5	83.15
0.6	346	607	261	570.5	57.05
0.425	336	561	225	345.5	34.55
0.3	324.5	500	175.5	170	17
0.212	306	398	92	78	7.8
0.15	305.5	361	55.5	22.5	2.25
0.08	414	431.5	17.5	5	0.5
0.063	350.5	353.5	3	2	0.2
PAN	351	354	3		

Tablo 4.3: İri kum için elde edilen elek analizi sonuçları.

Elek Çapı (mm)	Elek Ağırlığı		Elek Üstünde Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
	Boş Ağırlık (gr)	Dolu Ağırlık (gr)			
4.75	456.5	512	55.5	944.5	94.45
2	411.5	792.5	381	563.5	56.35
1.18	390.5	548	157.5	406	40.6
0.6	344.5	499.5	155	251	25.1
0.425	332.5	414.5	82	169	16.9
0.3	325.5	392.5	67	102	10.2
0.212	308.5	355.5	47	55	5.5
0.15	305	335	30	25	2.5
0.08	415	432.5	17.5	7.5	0.75
0.063	351	354.5	3.5	4	0.4
PAN	351.5	356	4.5		

Tablo 4.4: Çakıl için elde edilen elek analizi sonuçları.

Elek Çapı (mm)	Elek Ağırlığı		Elek Üstünde Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
	Boş Ağırlık (gr)	Dolu Ağırlık (gr)			
16	517.7	517.7	0	3025	100
11.2	518.4	518.4	0	3025	100
8	436.3	1179	742.7	2282.3	75.45
5.6	402	1767.5	1365.5	916.8	30.31
4.75	454.7	781	326.3	590.5	19.52
2	410.4	898	487.6	102.9	3.40
1.18	389.3	404	14.7	88.2	2.92
0.6	345.1	355	9.9	78.3	2.59
0.425	334.7	341	6.3	72	2.38
0.3	323.4	328	4.6	67.4	2.23
0.212	305	308.5	3.5	63.9	2.11
0.15	304.4	312	7.6	56.3	1.86
0.08	413.1	440.5	27.4	28.9	0.96
0.063	349.7	376	26.3	2.6	0.086
PAN	350.4	353	2.6		

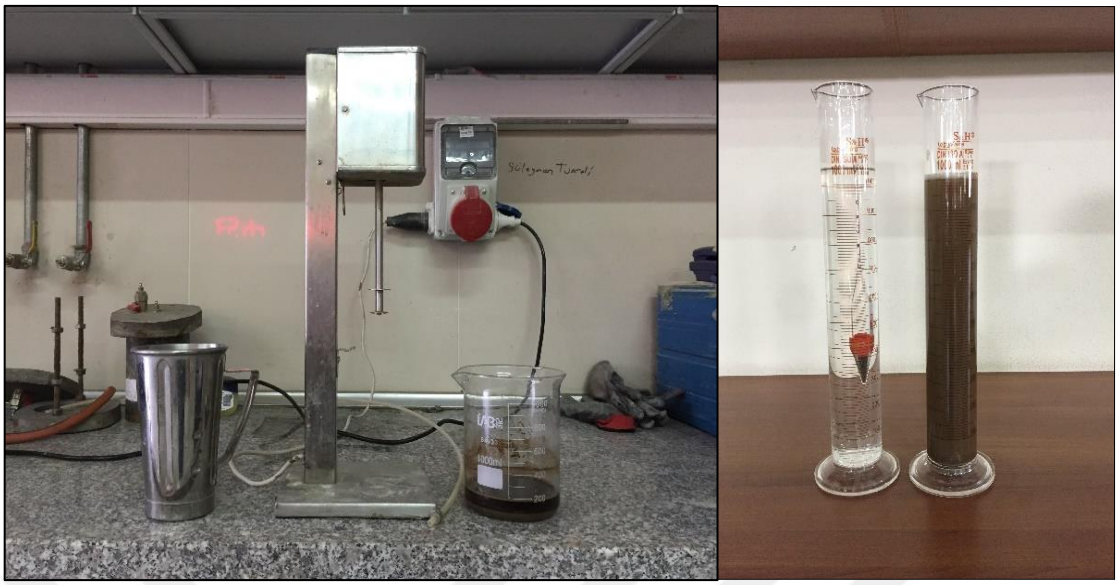


Şekil 4.4: Bahçe toprağı, ince kum, iri kum ve çakıl malzemeleri için elde edilen tane çapı dağılımı eğrileri.

Elek analizi deney sonuçları değerlendirildiğinde, bitkisel toprağın %21 çakıl, %71 kum, %8 kil-silt malzemesi ihtiva ettiği görülmektedir. Bitkisel toprağa ilaveten, %50 bitkisel toprak, %50 ince kum karışımı %10.7 çakıl, %85.90 kum ile %3.40 kilt-silt'ten meydana gelmekteyken, %40 bitkisel toprak, %60 iri kum karışımı ise %43.20 çakıl, %53.20 kum ile %3.60 kil-silt'ten oluşmaktadır. Kaba ve ince kumun sırasıyla %43.65 çakıl, %56.35 kum ve %6.65 çakıl, %93.35 kumdan oluştuğu görülmüştür. Çakıl malzemesinin elek analizi sonucu değerlendirildiğinde, bu malzemenin %96.60'ının çakıl, %3.40'ının ise kumdan meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

4.1.1.2. Hidrometre Deneyi

Elek analizinde 200 No'lu elekten geçen malzeme ince taneli malzeme olarak tanımlanmaktadır. Bahçe toprağındaki ince malzeme yani kil ve silt içeriğini belirlemek için hidrometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için 200 No'lu elekten geçen malzemeden 50 gr numune alınmıştır. Alınan numune geniş ağızlı bir kaba konulup üzerine Sodyum Hegza Meta Fosfat çözeltisi eklendikten sonra birkaç dakika karıştırılıp kabın ağzı sıkıca kapatılmıştır. Ardından numune 24 saat boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 24 saatin sonunda 1000 ml'lik mezüre aktarılan numune bir l olacak şekilde üstüne su eklenmiştir. Mezürün ağzı bir tıpa yardımıyla sıkıca kapatılarak süspansiyon homojen hale gelecek şekilde karıştırılmıştır. Bu işlemin ardından 0.5., 1., 2., 4., 8., 15., 30., 60., 120., 480. dakikalarda ve 24 saat sonunda hidrometre okumaları yapılmıştır. Hidrometre deneyi sonucunda 200 No'lu elekten geçen malzemenin büyük bir bölümünün silt olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılmış olan hidrometre deneyine ilişkin görseller Şekil 4.5'te, deney okumaları ise Tablo 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.5: Hidrometre deneyi.

Tablo 4.5: Hidrometre deney sonuç tablosu.

Geçen Süre	Gerçek Hidrometre Okuması R_{h1}	Doğru Okuma $R_h=R_{h1}+C_m$	Düzeltilmiş Okuma $R_h'=R_h+C_t-C_a$	Etkili Derinlik $H_e=16,3-0,1625xR_h$ (cm)	Çap D (mm)	Deney Numunesi İçin Yüzdeler (%)	Ana Numune İçin Yüzdeler (%)	Dakika
15"	42	43	39.15	9.313	0.078	78.3	7.670967742	0.25
30"	37	38	34.15	10.125	0.058	68.3	6.691278375	0.5
1'	31	32	28.15	11.100	0.043	56.3	5.515651135	1
2'	25	26	22.15	12.075	0.032	44.3	4.340023895	2
4'	20.5	21.5	17.65	12.806	0.023	35.3	3.458303465	4
8'	17	18	14.15	13.375	0.017	28.3	2.772520908	8
15'	15.5	16.5	12.65	13.619	0.012	25.3	2.478614098	15
30'	14.30	15.3	11.45	13.814	0.009	22.9	2.24348865	30
1 sa	13.5	14.5	10.65	13.944	0.006	21.3	2.086738351	60
2 sa	12.5	13.5	9.65	14.106	0.004	19.3	1.890800478	120
4 sa	12	13	9.15	14.188	0.003	18.3	1.792831541	240
8 sa	11.5	12.5	8.65	14.269	0.002	17.3	1.694862605	480
24 sa	11	12	8.15	14.350	0.001	16.3	1.596893668	1440

T(°C)	24
Numune Ağırlığı (gr)	50
C_m (Menisküs Düzeltmesi)	1
C_t (Sıcaklık Düzeltmesi)	1.15
C_a (Çözücü Madde Düzeltmesi)	5

4.1.1.3. Hidrolik İletkenlik Deneyi

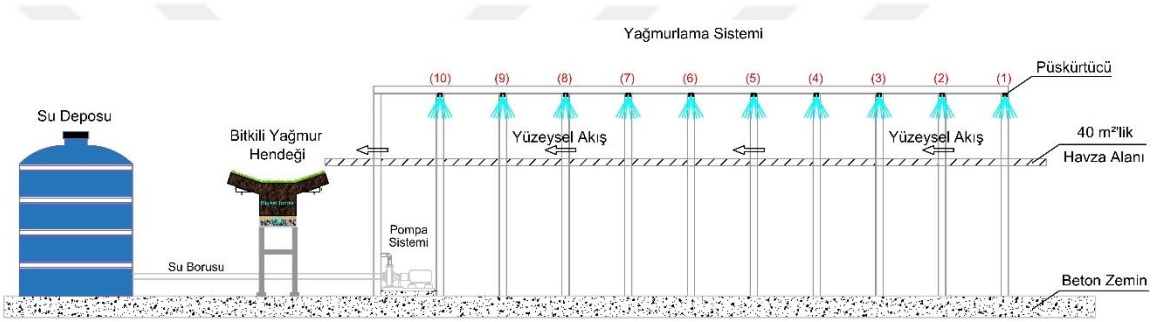
Yağmur hendeklerinin sızma davranışını etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi, hendeği oluşturan malzemelerin hidrolik iletkenlik özellikleridir. Bu nedenle, yağmur hendeklerinin tasarımında kullanılan bitkisel toprak, ince kum, iri kum ve çakıl malzemelerinden numuneler alınarak sabit seviyeli permeabilite testi ile hidrolik iletkenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ilişkin görüntüler Şekil 4.6'da yer almaktadır. ASTM D2434-19'a göre ölçülen hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri bitkisel toprak, ince kum, iri kum ve çakıl için sırasıyla 11.16 cm/sa, 43.2 cm/sa, 118.8 cm/sa, 8794.8 cm/sa'dir.



Şekil 4.6: Hidrolik iletkenlik deneyi.

4.1.2. YHY ile Yapılan Hidrolojik Deneylere Ait Bulgular

Hendeklerin farklı yağışlar altındaki hidrolojik davranışını belirlemek amacıyla 2 farklı yağış şiddeti, 2 farklı yağış süresi ve 4 farklı alansal yağış senaryosu seçilmiştir. Deney sisteminin olanak sağlayabildiği yağış şiddetleri aralığında kalacak şekilde deneyler 20 mm/sa ve 30 mm/sa yağış şiddeti altında yapılmıştır. Yağış süreleri ise 15 ve 25 dk olarak belirlenmiştir. Farklı alansal yağış senaryoları için, YHY deney sisteminde mevcut olan 40 adet püskürtücü farklı kombinasyonlarda çalıştırılmıştır. Bu kombinasyonları tarifleyebilmek üzere Şekil 4.7'de yer alan deney sistemine ilişkin kesit görüntüsünde püskürtücülerin sabitlendiği kirişler 1'den 10'a kadar kırmızıyla numaralandırılmıştır.



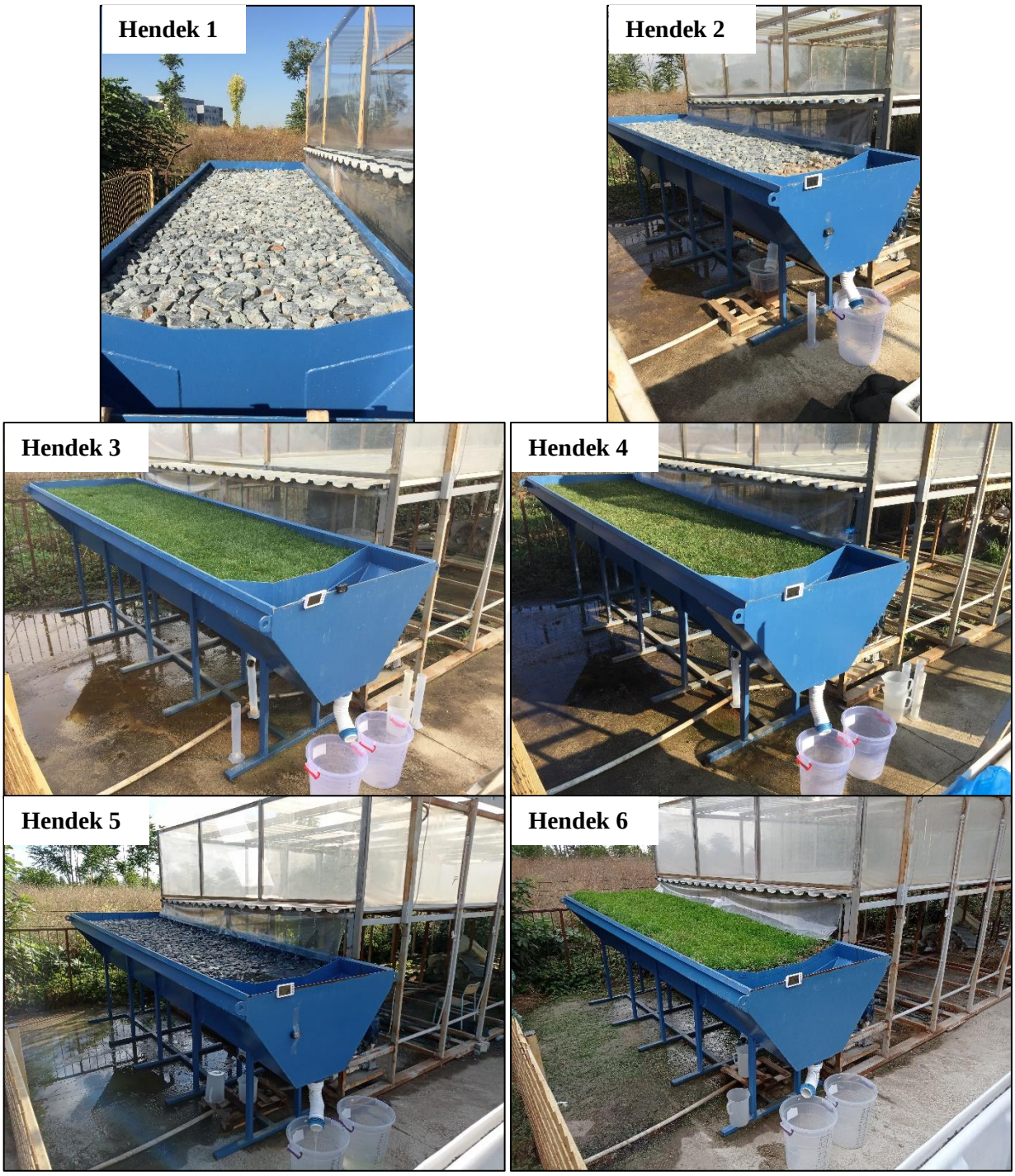
Şekil 4.7: Deney sistemi kesit çizimi.

Numaralandırılmış kirişler üzerindeki püskürtücülerin açık ya da kapalı olması durumuna göre farklı alansal yağış senaryoları üretilmiştir. Bu senaryolar aşağıda tanımlanmıştır:

- R-A: Tüm püskürtücülerin açık olduğu durum,
- R-B: 1'den 5'e kadar numaralandırılmış kirişler üzerindeki püskürtücülerin açık olduğu durum,
- R-C: 6'dan 10'a kadar numaralandırılmış kirişler üzerindeki püskürtücülerin açık olduğu durum,
- R-D: 1, 3, 5, 7 ve 9 numaralı kirişler üzerindeki püskürtücülerin açık olduğu durum.

Böylelikle farklı yağış şiddeti, yağış süresi ve alansal yağış için oluşturulan deney koşulları altında farklı tip hendeklerin hidrolojik davranışı ortaya konulmuştur.

Yapılan deneylerde havza ve hendek çıkışlarında yüzeysel akış ölçümleri yapılmıştır. İlaveten, hendek tabanındaki drenaj akışı çıkışında da drenaj ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hem havza hem de hendek çıkışındaki yüzeysel akış ölçümleri 60 dakika boyunca ve 1'er dakika aralıklarla gerçekleştirilirken, drenaj akışı ölçümleri ise 6 saat boyunca 15'er dakikalık aralıklarla yapılmıştır. 6 farklı hendek konfigürasyonu için oluşturulan deney sistemi görselleri Şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.8: Altı farklı hendek konfigürasyonu.

Yürütülen deneylere ilişkin sonuçların hassas bir şekilde karşılaştırılabilmesi için tüm deneylerde benzer koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu bağlamda, deneyler öncesinde her bir hendeği oluşturan toprak katmanının doygun olması sağlanmıştır. Bunun için deneylere başlamadan önce toprak nemi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler toprak nem ölçer cihazı kullanılarak birkaç noktada gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlere ait görüntüler aşağıdaki şekilde yer almaktadır.

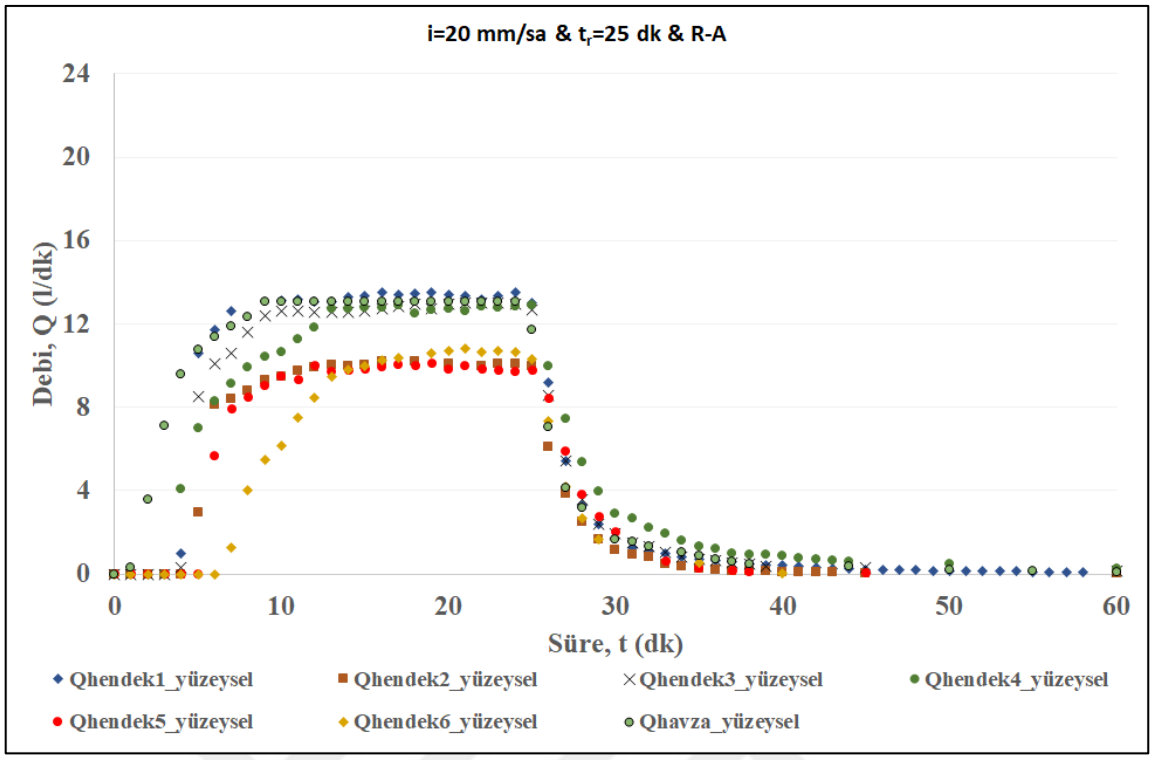


Şekil 4.9: Toprak nemi ölçümleri.

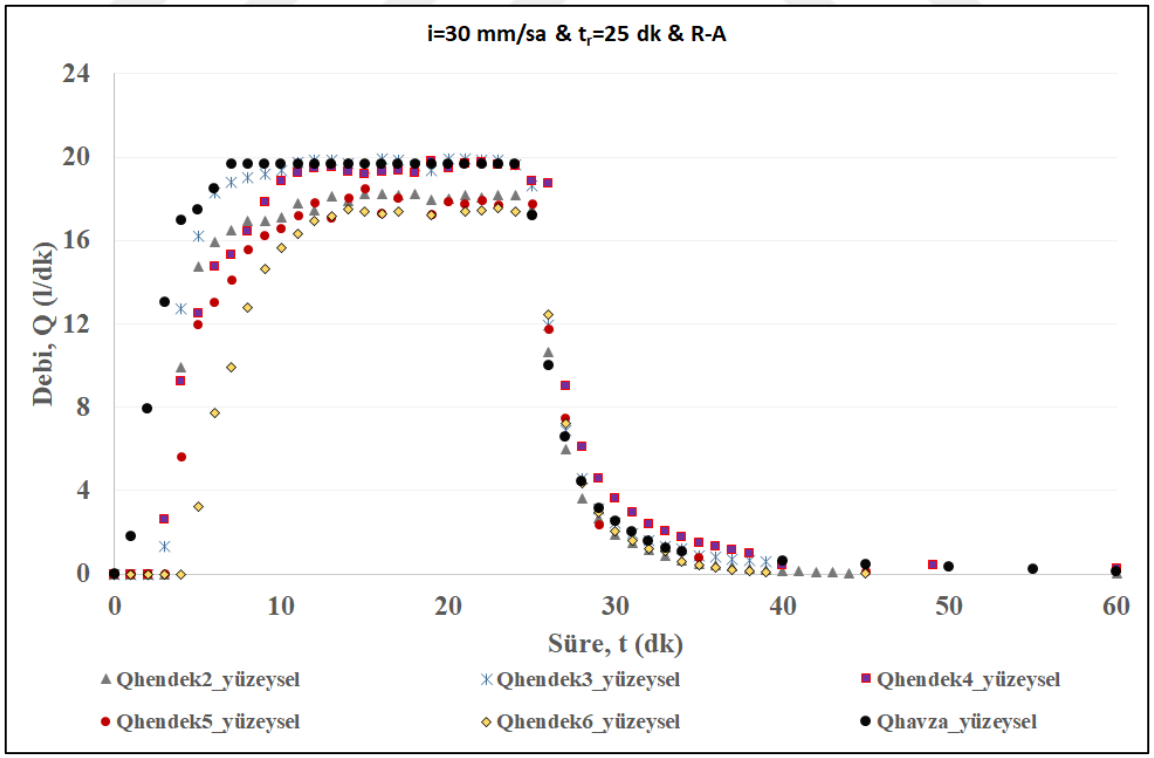
Toprak nem ölçümü için kullanılan cihaz 5 farklı nem aralığında ölçüm yapabilmektedir. Bu aralıklar Kuru, Kuru +, Normal, Nemli ve Nemli +'dır. Tüm deneylere başlamadan önce toprak neminin Nemli + olması sağlanmıştır.

Yapılan deneylerle farklı yağış şiddeti, yağış süresi ve alansal yağış senaryoları kullanılarak yağışın yağmur hendeklerinin performansına etkisi incelenmiştir. İlaveten farklı toprak katmanları ve yüzey malzemeleri ile farklı hendek tipleri oluşturulmuştur. Farklı toprak katmanı ile hidrolik iletkenliğin, farklı yüzey malzemesi ile yüzey pürüzlülüğü ve çim boyunun etkileri araştırılmıştır.

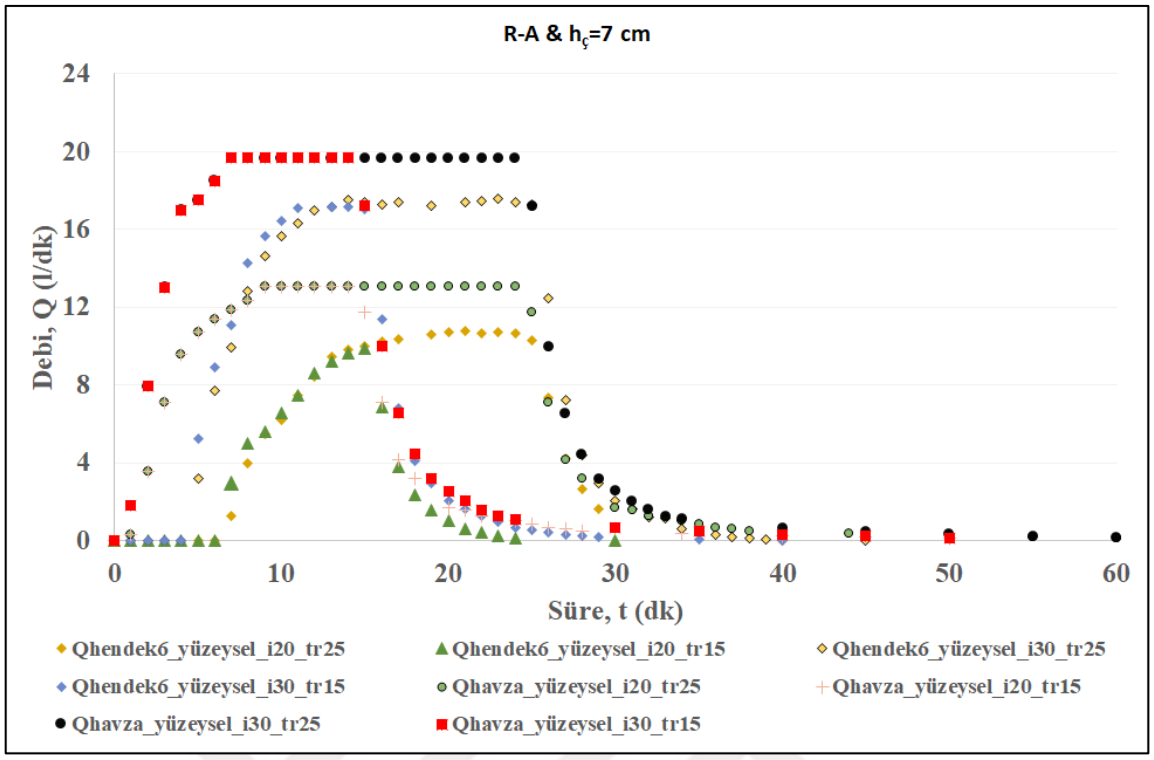
Havza ve hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akışa ilişkin hidrograflar Şekil 4.10-Şekil 4.16'da yer alırken, hendek drenaj çıkışında ölçülen drenaj akışına ait hidrograflar ise Şekil 4.17-Şekil 4.23'te sunulmuştur.



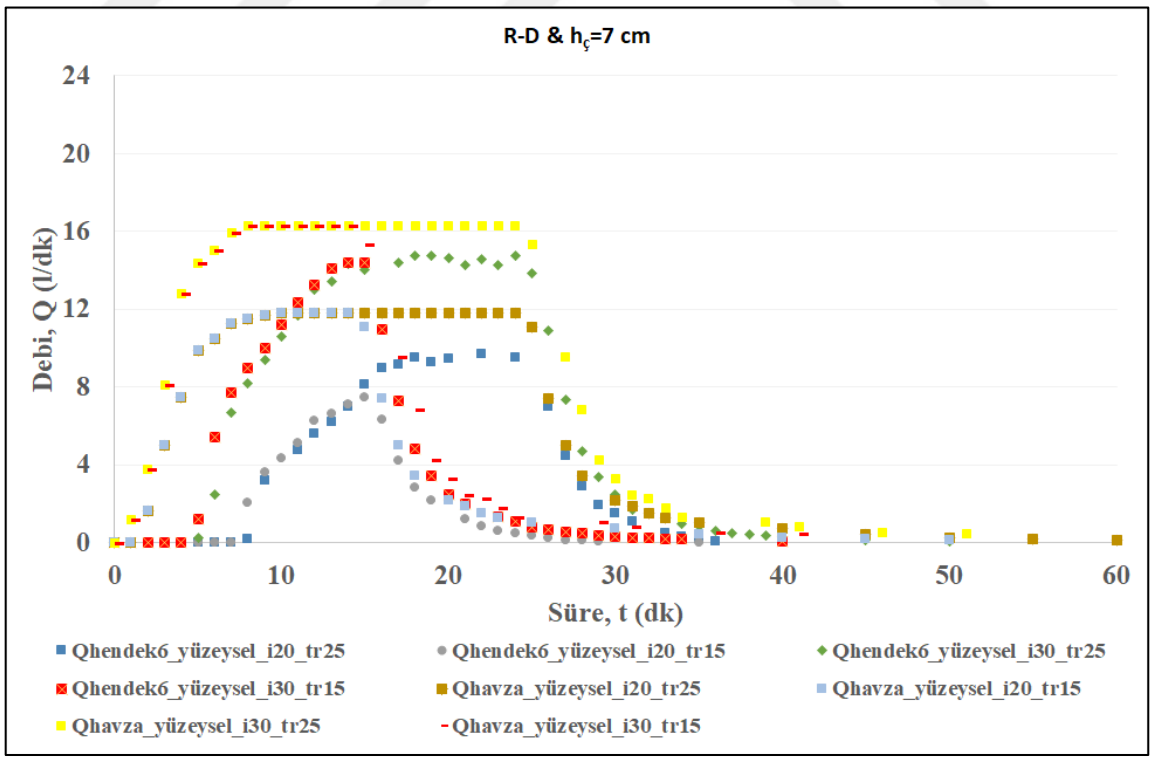
Şekil 4.10: 6 Farklı hendek konfigürasyonunun aynı yağış şiddeti, süresi ve yağış senaryosu altındaki yüzeysel akış davranışlarının kıyaslanması (i=20 mm/sa & tr=25 dk & R-A).



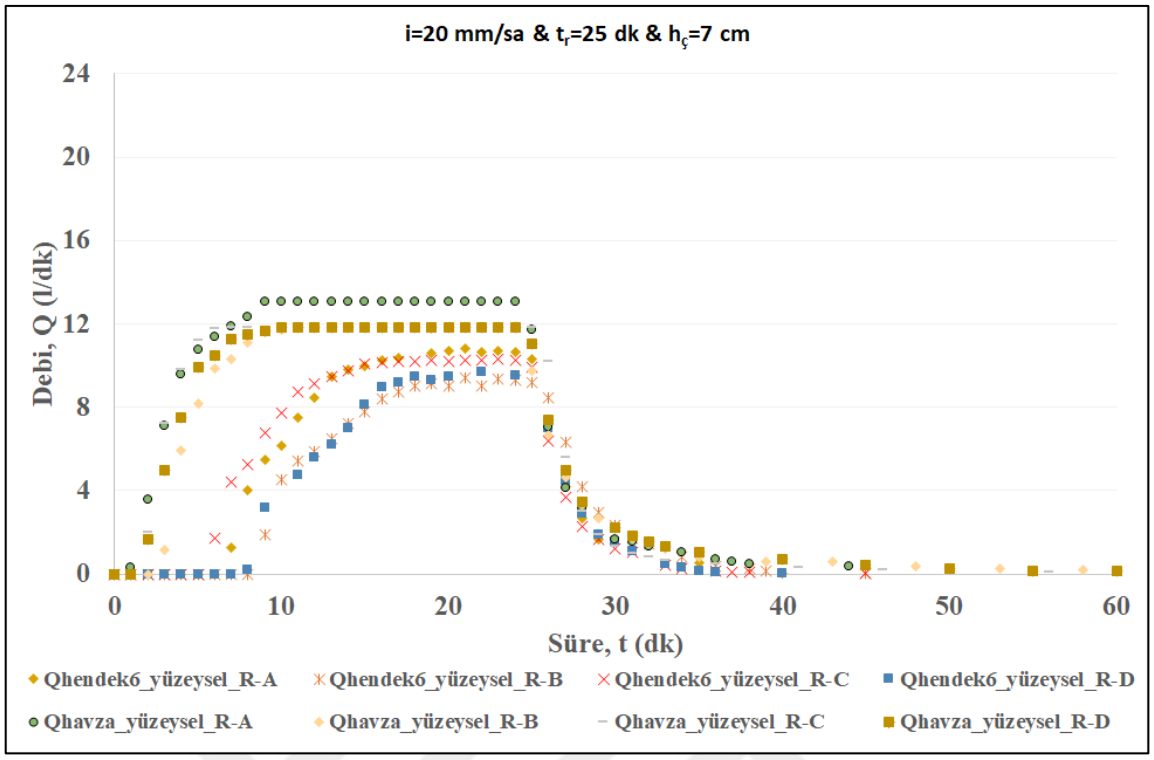
Şekil 4.11: 5 Farklı hendek konfigürasyonunun aynı yağış şiddeti, süresi ve yağış senaryosu altındaki yüzeysel akış davranışlarının kıyaslanması (i=30 mm/sa & t_r=25 dk & R-A).



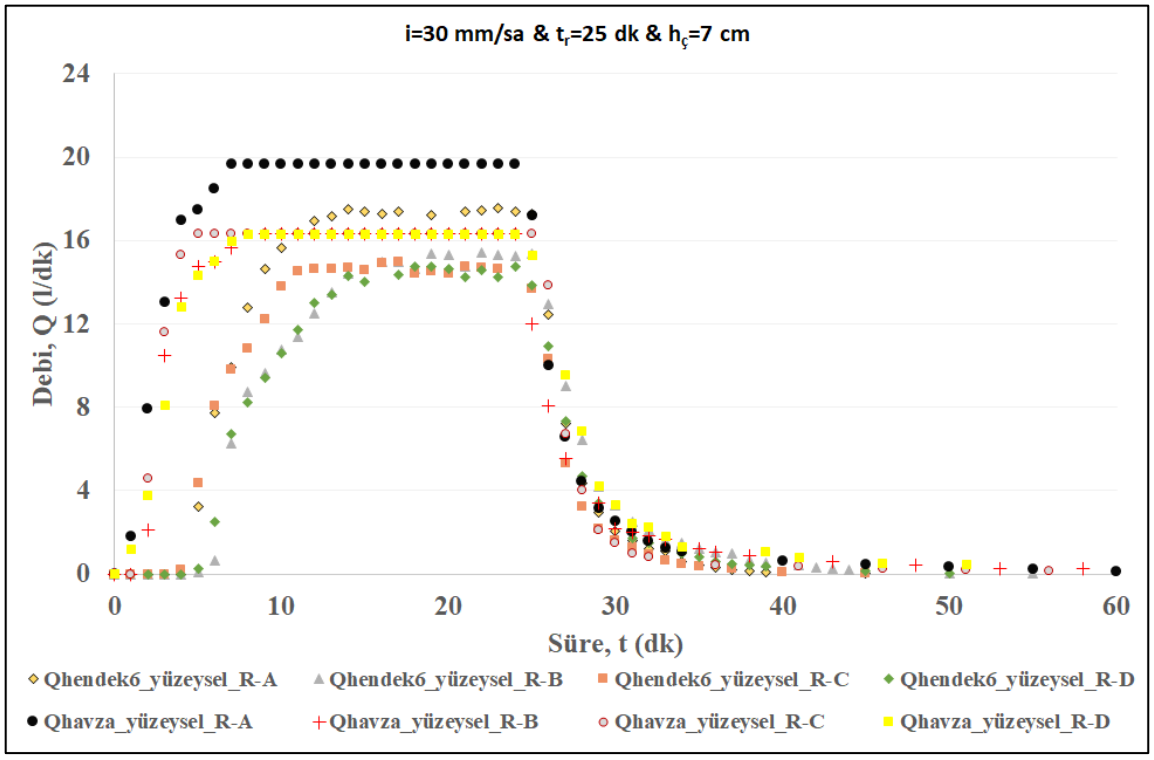
Şekil 4.12: Hendek 6'nın aynı yağış senaryosu ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (R-A & hç=7 cm).



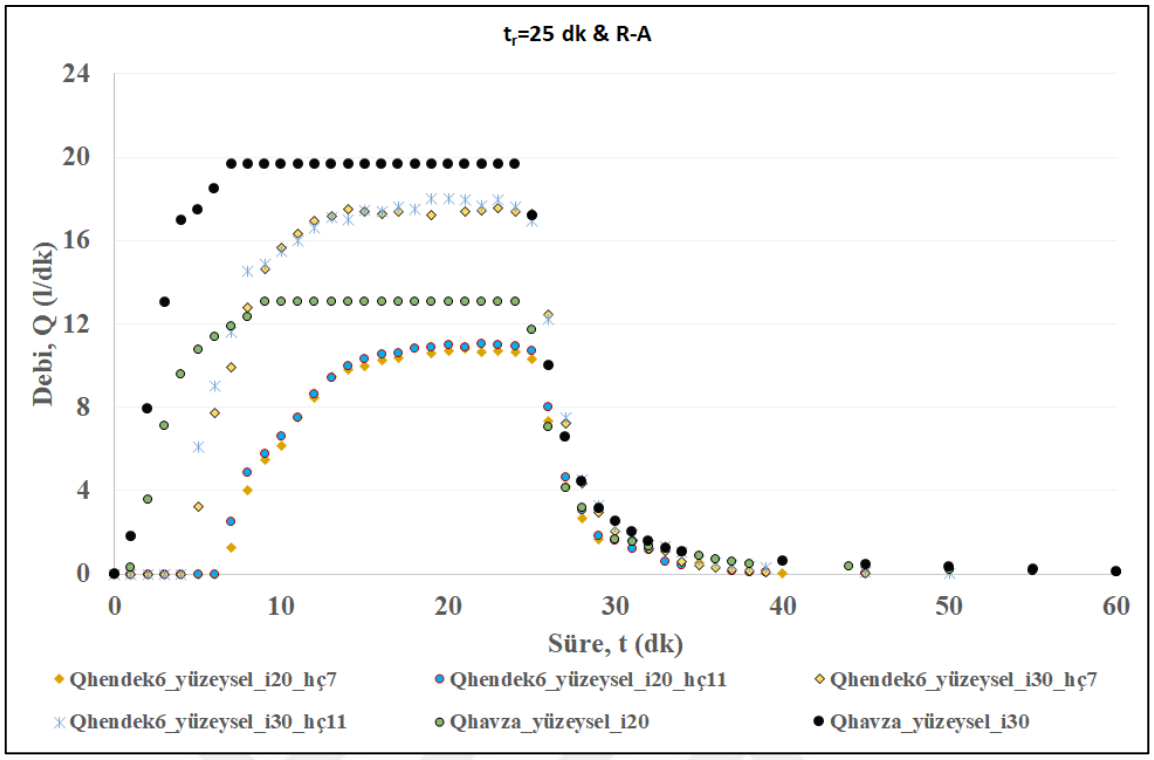
Şekil 4.13: Hendek 6'nın aynı yağış senaryosu ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (R-D & hç=7 cm).



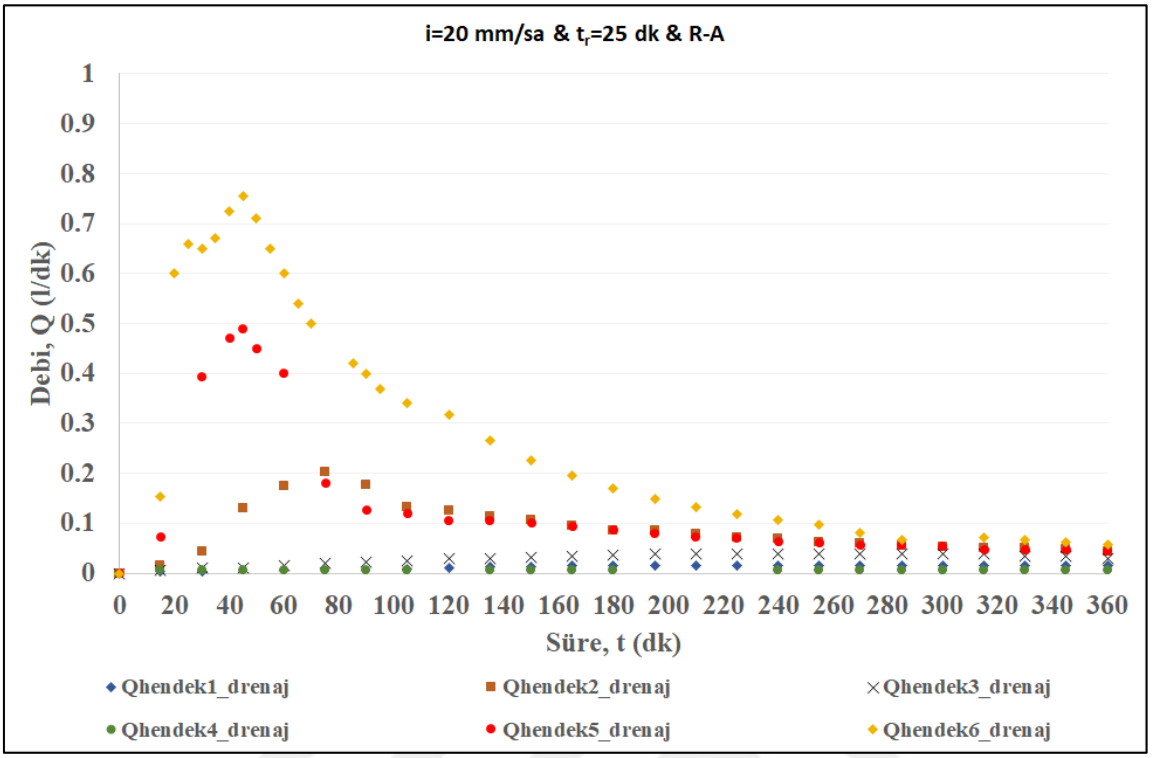
Şekil 4.14: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (i=20 mm/sa & tr=25 dk & hç=7 cm).



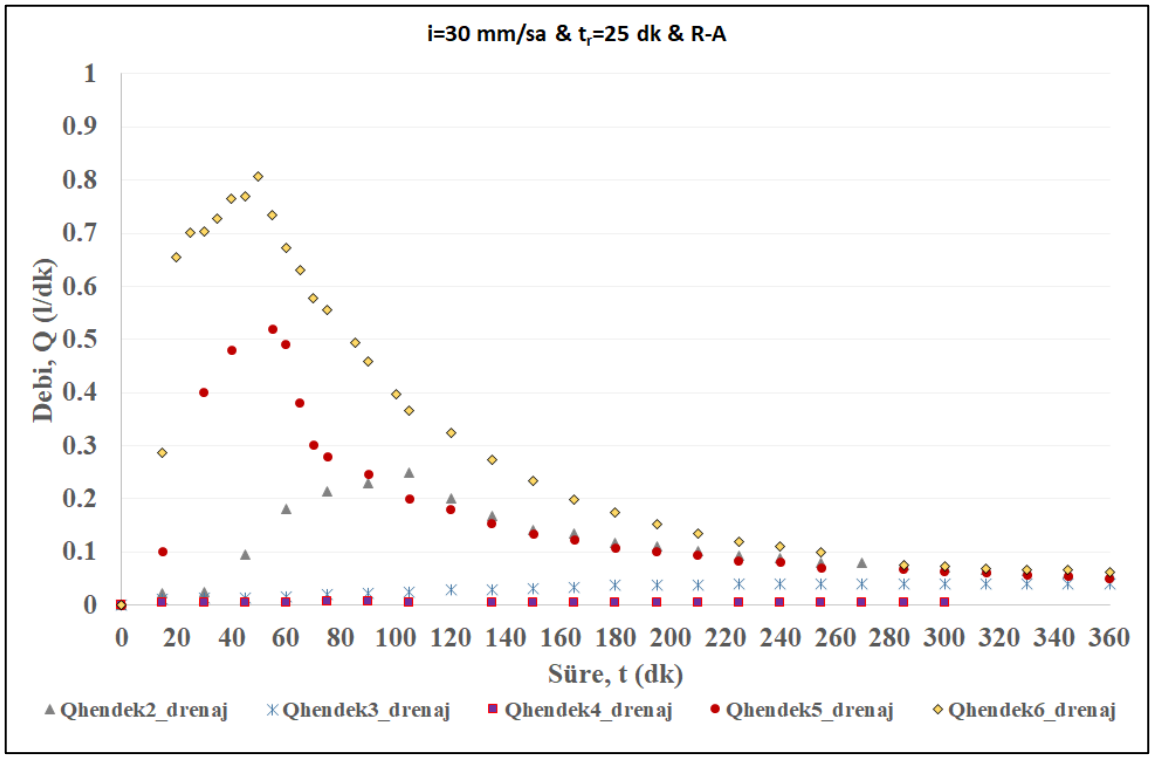
Şekil 4.15: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (i=30 mm/sa & tr=25 dk & hç=7 cm).



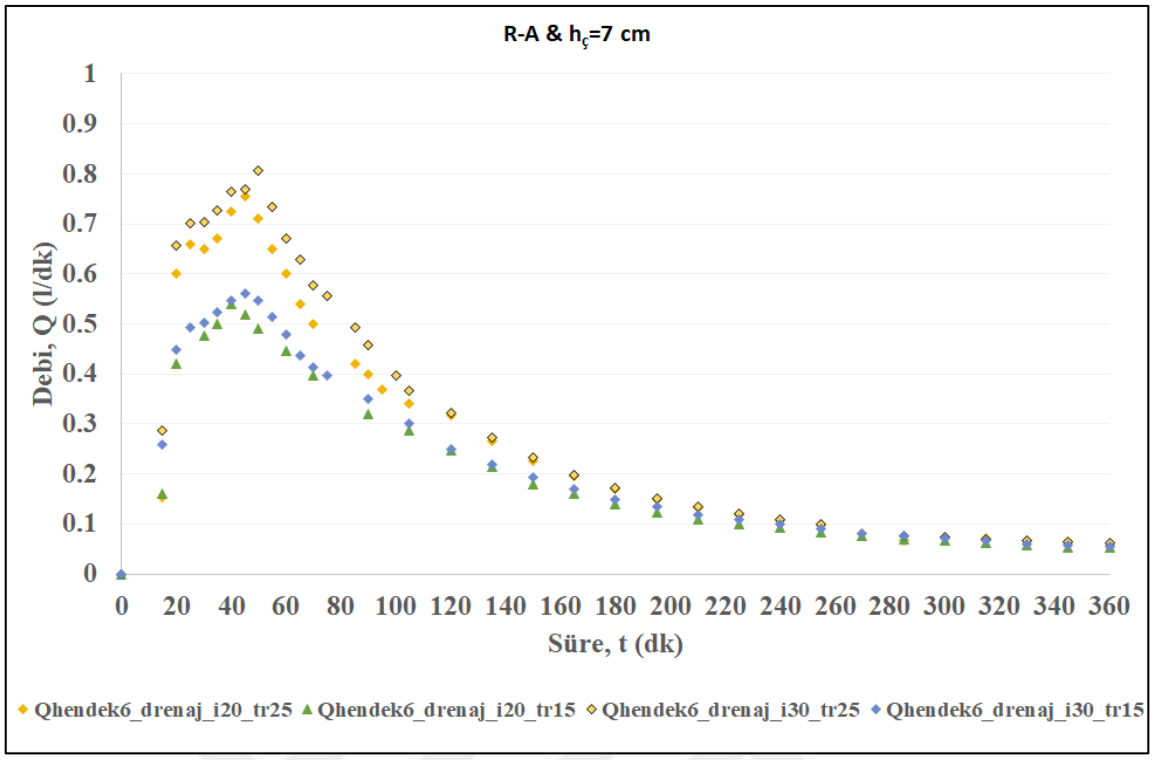
Şekil 4.16: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (tr=25 dk & R-A).



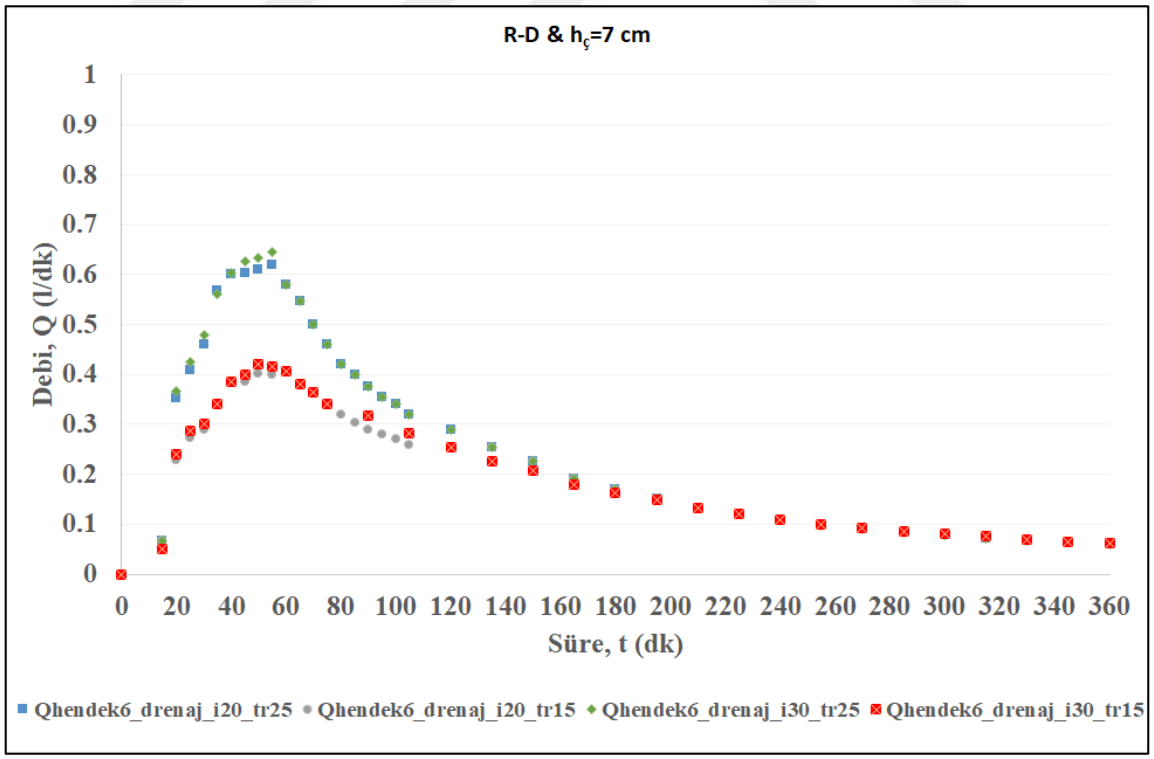
Şekil 4.17: 6 Farklı hendek konfigürasyonunun aynı yağış şiddeti, süresi ve yağış senaryosu altındaki drenaj akış davranışlarının kıyaslanması (i=20 mm/sa & tr=25 dk & R-A).



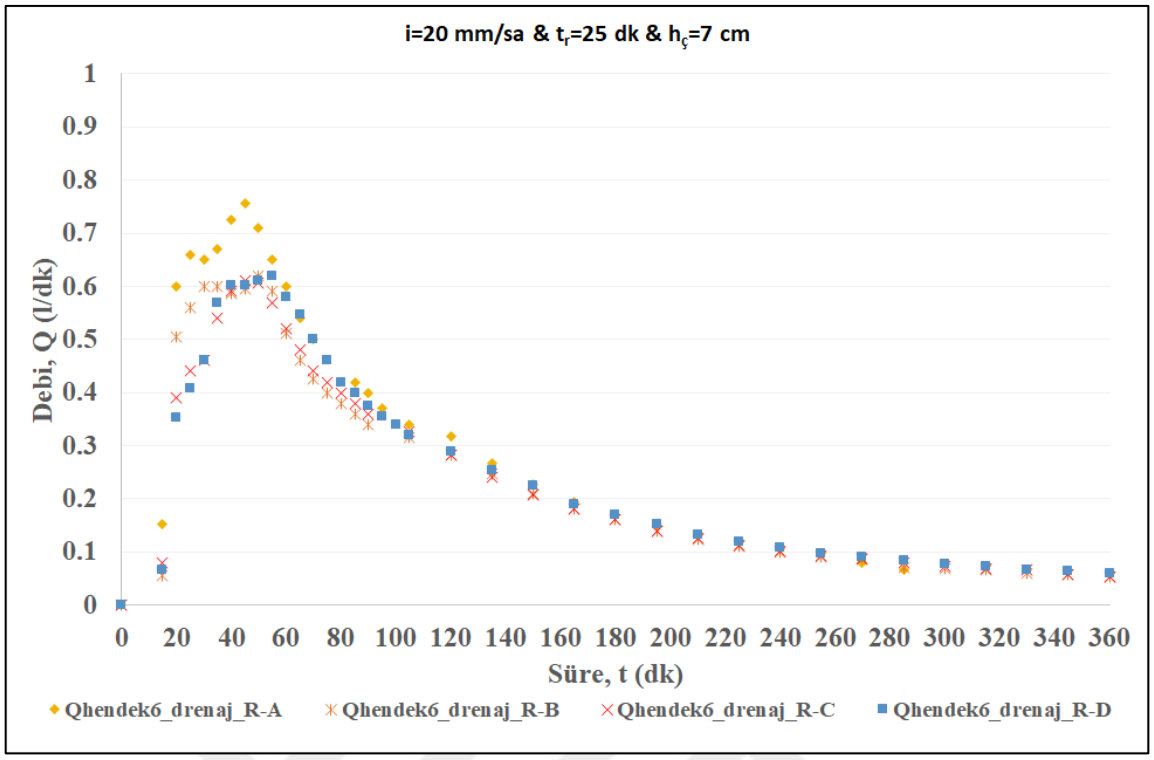
Şekil 4.18: 5 Farklı hendek konfigürasyonunun aynı yağış şiddeti, süresi ve yağış senaryosu altındaki drenaj akış davranışlarının kıyaslanması (i=30 mm/sa & tr=25 dk & R-A).



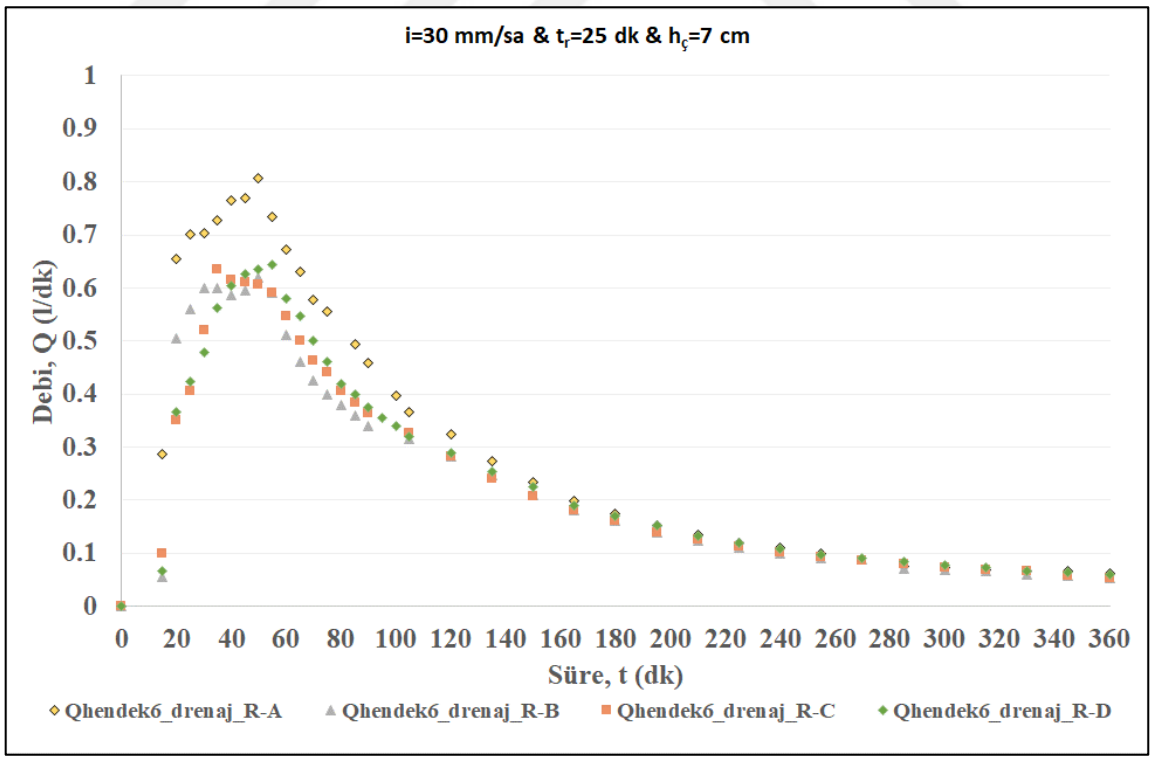
Şekil 4.19: Hendek 6'nın aynı yağış senaryosu ve çim boyu koşulları altındaki drenaj akış davranışının kıyaslanması (R-A & hç=7 cm).



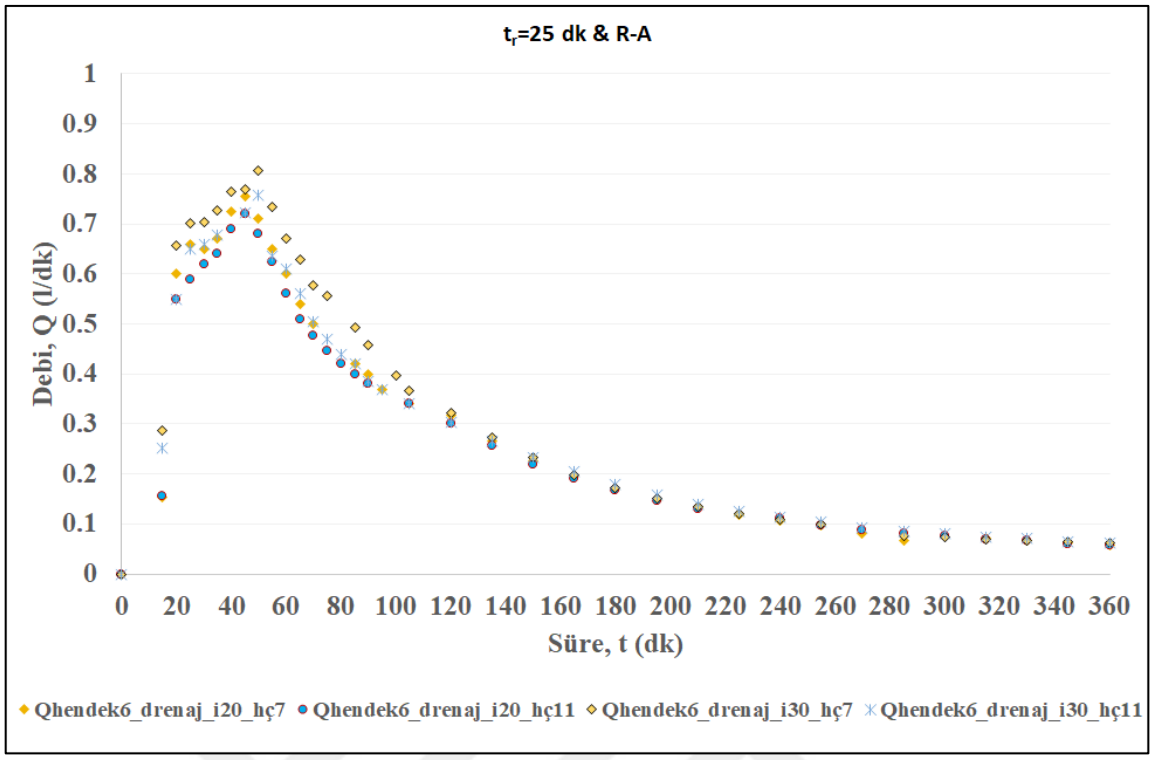
Şekil 4.20: Hendek 6'nın aynı yağış senaryosu ve çim boyu koşulları altındaki drenaj akış davranışının kıyaslanması (R-D & hç=7 cm).



Şekil 4.21: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki drenaj akış davranışının kıyaslanması (i=20 mm/sa & tr=25 dk & hç=7 cm).



Şekil 4.22: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki drenaj akış davranışının kıyaslanması (i=30 mm/sa & tr=25 dk & hç=7 cm).



Şekil 4.23: Hendek 6'nın aynı yağış şiddeti, süresi ve çim boyu koşulları altındaki yüzeysel akış davranışının kıyaslanması (tr=25 dk & R-A).

Şekil 4.10-Şekil 4.16'da yer alan grafikler havza alanı çıkışı ile hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerlerinin zamanla değişimini göstermektedir. Şekil 4.10-Şekil 4.23'te sunulan grafiklerde, havza alanı çıkışındaki yüzeysel akış ölçümleri $Q_{havza_yüzeysel_ölçüm}$, hendek çıkışındaki yüzeysel akış ölçümleri ile drenaj akış ölçümleri ise sırasıyla $Q_{hendek_yüzeysel_ölçüm,}$ $Q_{hendek_drenaj_ölçüm}$ olarak belirtilmiştir. Burada yer alan havza, hendek, yüzeysel, drenaj, ölçüm, i, t_r, $h_ç$, R-A, R-B, R-C ve R-D alt indisleri sırasıyla havza alanı, hendek numarası, yüzeysel akış, drenaj akışı, ölçüm değerleri, yağış şiddeti, yağış süresi, çim boyu ve farklı alansal yağış senaryolarını ifade etmektedir. Grafik başlıklarında sunulan parametreler o grafikte yer alan deney setleri için kullanılmış olan ortak parametre değerleridir.

Şekil 4.10-Şekil 4.23'te yer alan grafiklerde, hendeklerin hidrolojik performansında farklı parametrelerin meydana getirdiği etkiler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 4.10'da, 6 farklı hendek konfigürasyonunun davranışı, aynı yağış şiddeti, yağış süresi ve alansal yağış koşulları altında kıyaslanmıştır. Havza çıkışında ölçülen maksimum yüzeysel akış değeri 13.08 l/dk iken, Hendek 1, Hendek 2, Hendek 3, Hendek 4, Hendek 5 ve Hendek 6'nın çıkışlarında ölçülen hendek yüzeysel akış değerleri sırasıyla 13.08 l/dk, 10.20 l/dk, 13.04 l/dk, 12.91 l/dk, 10.14 l/dk, and 10.80 l/dk'dır. Hendek 1, Hendek 3 ve Hendek 4 için pik yüzeysel akış değerlerinde oldukça küçük düşüşler ölçülürken, Hendek 2, Hendek 5 ve Hendek 6'nın pik yüzeysel akış debilerindeki düşüş performanslarının oldukça etkin olduğu görülmüştür. Pik hendek yüzeysel akış değerindeki en büyük düşüş %22.5 oranıyla Hendek 5 için ölçülmüştür. Bununla birlikte, Hendek 4 ve Hendek 6'nın hendek yüzeysel akışını belirgin bir şekilde geciktirdiği açıktır. Test edilen hendek konfigürasyonları içerisinde hem pik debide meydana gelen düşüş hem de hendek yüzeysel akışını geciktirme açısından en iyi performansın Hendek 6 için sağlandığı söylenebilir. Aynı deneysel koşullar altında, 6 farklı hendek konfigürasyonunun drenaj performanslarını yansıtan grafikler Şekil 4.17'de sunulmuştur. Hendek 1, Hendek 2, Hendek 3, Hendek 4, Hendek 5 ve Hendek 6 için ölçülen pik drenaj debisi değerleri sırasıyla 0.016 l/dk, 0.203 l/dk, 0.039 l/dk, 0.007 l/dk, 0.49 l/dk, and 0.756 l/dk'dır. Bu değerlerden de görüldüğü gibi, en yüksek drenaj debisi değeri Hendek 6'da ölçülmüştür. Bu sonuç, en iyi drenaj performansının Hendek 6'da yani bitkili yağmur hendeğinde görüldüğünü ortaya koymaktadır. Şekil 4.11'de 5 farklı hendek konfigürasyonunun hidrolojik performansları kıyaslanmaktadır. 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ve R-A alansal yağış senaryosu altında yürütülen deneyler için havza çıkışında ölçülen pik havza yüzeysel akış değeri 19.68 l/dk'dır. Bu karşılaştırmada Hendek 2, Hendek 3, Hendek 4, Hendek 5 ve Hendek 6

konfigürasyonlarının çıkışlarında ölçülen pik hendek yüzeysel akış değerleri ise sırasıyla 18.24 l/dk, 19.95 l/dk, 19.80 l/dk, 18.49 l/dk ve 17.58 l/dk'dır. Aynı hendek konfigürasyonlarının belirtilen deney koşulları altındaki drenaj performansları ise Şekil 4.18'de yer almaktadır. Hendekleri meydana getiren ana toprak tabakalarının drenaj performanslarını belirgin bir şekilde etkilediği görülmektedir. Ana toprak tabakalarının hidrolik iletkenlik değerleri arttıkça hendeklerin drenaj performansları da artmaktadır. Bu koşullarda en düşük drenaj performansı Hendek 2 için gözlemlenirken, en iyi performansı ise Hendek 6 sergilemiştir. Farklı yağış süresi ve alansal yağış senaryolarının Hendek 6'nın yüzeyinde oluşan akışa etkileri Şekil 4.12'de sunulan grafik incelenerek yorumlanabilmektedir. Hendek 6'nın yüzeysel akış performansı farklı yağış süreleri için belirgin farklılıklar göstermezken, düşük yağış şiddetleri altında pik hendek yüzeysel akış debisinde yüksek düşüşlere neden olduğu görülmektedir (Bkz. Tablo 4.7). Aynı deneysel koşullar için ölçülen drenaj debilerinin sunulduğu Şekil 4.19 grafiği incelendiğinde, yağış şiddeti ve süresi arttıkça bitkili yağmur hendeğinin drenaj performansının arttığı sonucuna varılmaktadır. R-D yağış senaryosu için farklı yağış şiddeti ve sürelerinin etkileri yürütülen deneylerle gözlemlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.13 ile Şekil 4.20'de sunulmuştur. Yağış şiddeti ile yağış süresi arttıkça bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik performansının da düştüğü görülmektedir. Şekil 4.14'te Hendek 6'nın farklı alansal yağış senaryoları altındaki performansı karşılaştırılmaktadır. Havza çıkışında R-A senaryosu için ölçülen pik havza yüzeysel akış değeri 13.08 l/dk iken diğer yağış senaryoları için ölçülen pik debi değeri 11.82 l/dk'dır. Bununla birlikte R-A, R-B, R-C ve R-D yağış senaryoları için Hendek 6 çıkışında ölçülen pik yüzeysel akış değerleri sırasıyla 10.80 l/dk, 9.69 l/dk, 10.32 l/dk and 9.45 l/dk olarak ölçülmüştür. Pik hendek yüzeysel akış değerlerindeki düşüş, belirtilen yağış senaryoları için %17.4, %18, %12.7 ve %20.1 olarak hesaplanırken, gecikme süreleri ise sırasıyla 19, 18, 15 ve 18 dk'dır. Gözlemler ışığında Hendek 6'nın R-D yağış senaryosu altında daha iyi bir performans sergilediği söylenebilir. Şekil 4.21'de sunulan drenaj akış grafikleri değerlendirildiğinde, farklı alansal yağış senaryolarının drenaj performansı üzerindeki etkileri belirlenebilmektedir. En yüksek drenaj debisi değeri R-A yağış senaryosu için 0.756 l/dk olarak ölçülürken, R-B, R-C ve R-D yağış senaryoları için ölçülen pik drenaj debisi değerleri 0.62 l/dk, 0.61 l/dk, and 0.62 l/dk'dır. R-A yağış senaryosu hariç diğer yağış senaryoları için ölçülen pik drenaj debisi değerleri birbirlerine oldukça yakın ölçülmüştür. Şekil 4.15 ile Şekil 4.22'de farklı alansal yağış senaryolarının etkileri 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ve 7 cm'lik çim boyu için test edilmiştir. Havza çıkışında ölçülen pik debi değerleri R-A yağış senaryosu için diğer yağış senaryolarına göre daha yüksek gözlemlenmiştir. Bu etki hendek yüzeysel akış

performansına da benzer şekilde tesir etmektedir. Bununla birlikte drenaj akış performansları kıyaslandığında, en yüksek pik drenaj debisinin R-A yağış senaryosunda ölçüldüğü görülürken, diğer yağış senaryolarında ölçülen pik drenaj debilerinin de hendek yüzeysel akış davranışında olduğu gibi birbirlerine yakın davranışlar sergilediği söylenebilir. Şekil 4.16'da 25 dk yağış süresi ve R-A alansal yağış senaryosu ile 20 mm/sa ve 30 mm/sa yağış şiddetleri altında farklı çim boylarının etkileri gözlemlenmiştir. Bu amaçla 7 ve 11 cm çim boyları test edilmiştir. 20 mm/sa yağış şiddeti için 7 ve 11 cm'lik çim boylarında ölçülen pik hendek yüzeysel akış değerleri 10.80 l/dk ve 11 l/dk iken 30 mm/sa yağış şiddetinde ölçülen pik hendek yüzeysel akış değerlerinin 17.58 l/dk, 18.04 l/dk olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle, test edilmiş farklı çim boyları altında hendek yüzeysel akış performansında belirgin farklılıklar gözlemlenmemiştir. Farklı çim boylarının drenaj performansına etkileri Şekil 4.23'teki grafikte yer almaktadır. 7 ve 11 cm çim boyları için 20 mm/sa yağış şiddeti altında ölçülen pik drenaj debisi değerleri 0.756 l/dk ve 0.72 l/dk iken, 30 mm/sa yağış şiddeti altında ölçülen değerler 0.806 l/dk ve 0.757 l/dk'dır. Hendek yüzeysel akış değerlerinde olduğu gibi, pik drenaj debisi değerlerinde de test edilmiş farklı çim boyları altında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Yağmur hendeklerinin hidrolojik performansını kontrollü laboratuvar deneyleriyle ortaya koymak amacıyla toplamda 23 adet saha ölçekli deney yürütülmüştür. Bu deneylerde kullanılan hendek konfigürasyonlarına ilişkin bilgiler Tablo 4.6'da sunulmuştur. Bununla birlikte tüm hendek konfigürasyonları için deneyler esnasında ölçülen pik debi, pik debilerdeki düşüş oranları ile hendek konfigürasyonlarının neden olduğu pik debi gecikme süreleri de Tablo 4.7'de sunulmuştur. Tablo 4.7'de sunulan sonuçlar analiz edildiğinde, bitkili yağmur hendeğinin (Hendek 6) pik debiyi düşürme oranlarının %8.1 ile %36.5 arasında değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte, bitkili yağmur hendeklerinin bir görevi de gelen yüzeysel akışın hendek tarafından depolanmasıdır. Hendek depolama hacim değerleri, havza çıkışında ölçülen toplam akış değerlerinden, hendek ve drenaj akış çıkışlarında ölçülen toplam akış değerlerinin çıkartılmasıyla hesaplanmaktadır. Her bir hendek konfigürasyonu için hesaplanan hendek depolama hacim değerleri Tablo 4.8'de sunulmuştur.

Tablo 4.6: Deney setleri.

Hendek No.	Yağış Şiddeti (mm/sa)	Yağış Süresi (dk)	Yağış Senaryosu	Çim Boyu (cm)	Hendek Yüzeyi
Hendek 1	20	25	R-A	-	İri Agrega
Hendek 2	20	25	R-A	-	İri Agrega
Hendek 2	30	25	R-A	-	İri Agrega
Hendek 3	20	25	R-A	7	Rulo Çim (Tip-1)
Hendek 3	30	25	R-A	7	Rulo Çim (Tip-1)
Hendek 4	20	25	R-A	7	Rulo Çim (Tip-2)
Hendek 4	30	25	R-A	7	Rulo Çim (Tip-2)
Hendek 5	20	25	R-A	-	İri Agrega
Hendek 5	30	25	R-A	-	İri Agrega
Hendek 6	20	25	R-A	7	Ekilen Çim
Hendek 6	20	15	R-A	7	Ekilen Çim
Hendek 6	20	25	R-A	11	Ekilen Çim
Hendek 6	20	25	R-B	7	Ekilen Çim
Hendek 6	20	25	R-C	7	Ekilen Çim
Hendek 6	20	25	R-D	7	Ekilen Çim
Hendek 6	20	15	R-D	7	Ekilen Çim
Hendek 6	30	25	R-A	7	Ekilen Çim
Hendek 6	30	15	R-A	7	Ekilen Çim
Hendek 6	30	25	R-A	11	Ekilen Çim
Hendek 6	30	25	R-B	7	Ekilen Çim
Hendek 6	30	25	R-C	7	Ekilen Çim
Hendek 6	30	25	R-D	7	Ekilen Çim
Hendek 6	30	15	R-D	7	Ekilen Çim

Tablo 4.7: Hendek konfigürasyonlarının pik debileri düşürme oranları.

Hendek No.	Yağış Şiddeti (mm/sa)	Yağış Süresi (dk)	Yağış Senaryosu	Çim Boyu (cm)	Havza Çıkışında Ölçülen Pik Debi (l/dk)	Hendek Çıkışında Ölçülen Pik Debi (l/dk)	Pik Debide Düşüş Oranı (%)	Gecikme Zamanı (dk)
Hendek 1	20	25	R-A	-	13.08	13.08	0	10
Hendek 2	20	25	R-A	-	13.08	10.20	22	13
Hendek 2	30	25	R-A	-	19.68	18.24	7.3	11
Hendek 3	20	25	R-A	7	13.08	13.04	0.3	10
Hendek 3	30	25	R-A	7	19.68	19.68	0	7
Hendek 4	20	25	R-A	7	13.08	12.91	1.3	13
Hendek 4	30	25	R-A	7	19.68	19.68	0	10
Hendek 5	20	25	R-A	-	13.08	10.14	22.5	12
Hendek 5	30	25	R-A	-	19.68	18.49	6	12
Hendek 6	20	25	R-A	7	13.08	10.80	17.4	19
Hendek 6	20	25	R-D	7	11.82	9.69	18	18
Hendek 6	20	15	R-A	7	13.08	9.86	24.6	15
Hendek 6	20	25	R-C	7	11.82	10.32	12.7	15
Hendek 6	20	25	R-B	7	11.82	9.45	20.1	18
Hendek 6	20	15	R-D	7	11.82	7.50	36.5	15
Hendek 6	20	25	R-A	11	13.08	11.04	15.6	15
Hendek 6	30	25	R-A	7	19.68	17.58	10.7	13
Hendek 6	30	25	R-D	7	16.32	14.78	9.4	14
Hendek 6	30	15	R-A	7	19.68	17.16	12.8	11
Hendek 6	30	25	R-C	7	16.32	15	8.1	11
Hendek 6	30	25	R-B	7	16.32	15.41	5.6	15
Hendek 6	30	15	R-D	7	16.32	14.40	11.8	15
Hendek 6	30	25	R-A	11	19.68	18.04	8.3	14

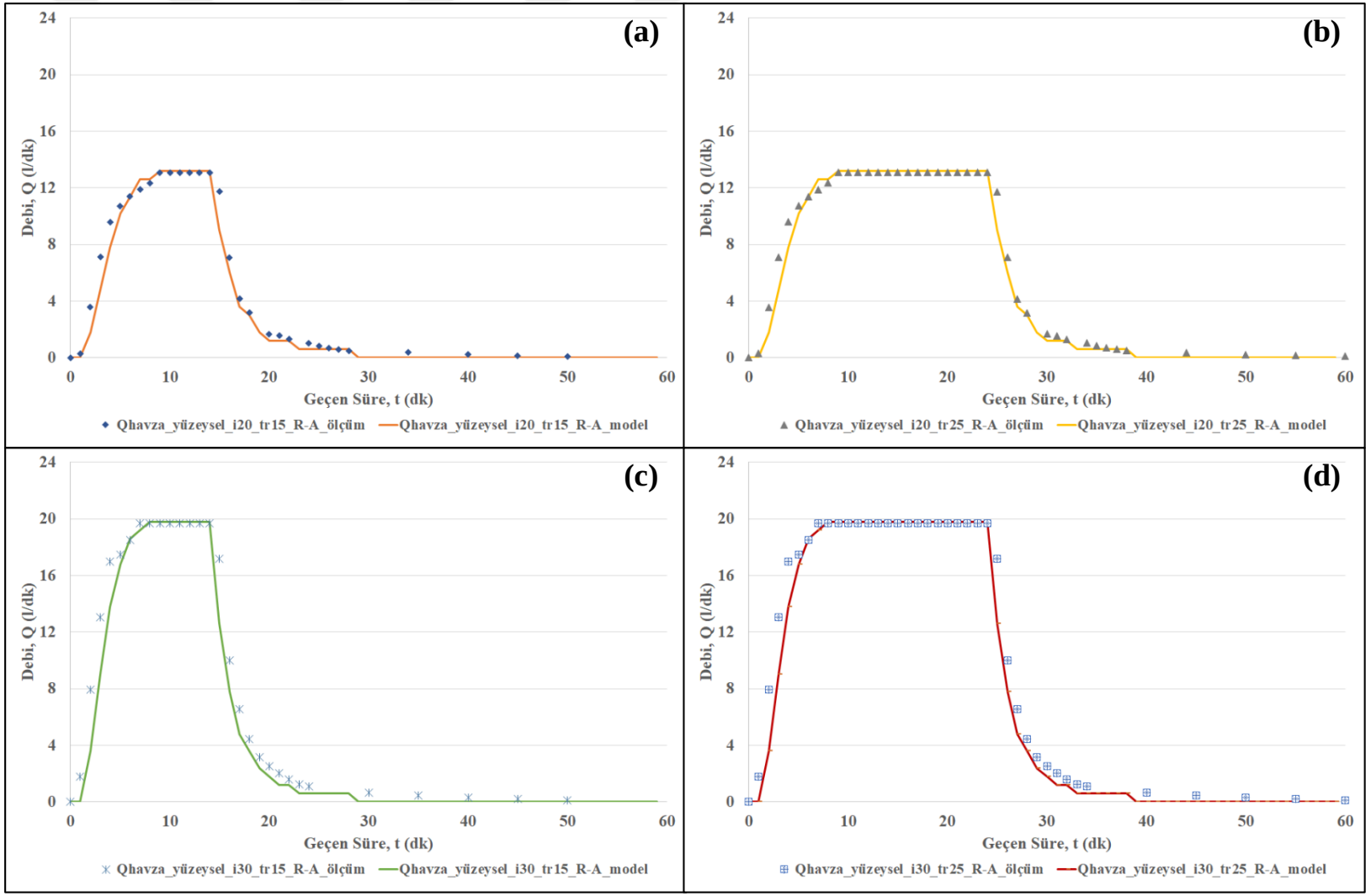
Tablo 4.8: Havza, hendek ve drenaj çıkışlarında ölçülen toplam akış hacimleri ile hendeklerin depolama hacim değerleri.

Hendek No.	Yağış Şiddeti (mm/sa)	Yağış Süresi (dk)	Yağış Senaryosu	Çim Boyu (cm)	Havza Çıkışında Ölçülen Toplam Hacim (l)	Hendek Çıkışında Ölçülen Toplam Hacim (l)	Drenaj Çıkışında Ölçülen Toplam Hacim (l)	Hendek Depolama Hacmi (l)
Hendek 1	20	25	R-A	-	320.06	307.29	4.36	8.41
Hendek 2	20	25	R-A	-	320.06	217.43	31.67	70.96
Hendek 2	30	25	R-A	-	491.71	410.22	40.40	41.09
Hendek 3	20	25	R-A	7	320.06	292.50	10.64	16.92
Hendek 3	30	25	R-A	7	491.71	458.61	11.08	22.02
Hendek 4	20	25	R-A	7	320.06	302.29	2.26	15.51
Hendek 4	30	25	R-A	7	491.71	464.26	1.60	25.85
Hendek 5	20	25	R-A	-	320.06	216.56	44.36	59.14
Hendek 5	30	25	R-A	-	491.71	398.26	55.80	37.65
Hendek 6	20	25	R-A	7	320.06	190.84	85.98	43.24
Hendek 6	20	25	R-D	7	295.35	153.04	78.24	64.07
Hendek 6	20	15	R-A	7	189.26	82.32	68.04	38.90
Hendek 6	20	25	R-C	7	296.90	193.58	75.08	28.24
Hendek 6	20	25	R-B	7	280.75	161.43	75.90	43.42
Hendek 6	20	15	R-D	7	177.17	64.19	64.35	48.63
Hendek 6	20	25	R-A	11	320.06	197.69	83.21	39.16
Hendek 6	30	25	R-A	7	491.71	358.12	93.84	39.75
Hendek 6	30	25	R-D	7	420.90	287.52	78.83	54.55
Hendek 6	30	15	R-A	7	294.91	191.94	73.26	29.71
Hendek 6	30	25	R-C	7	411.86	305.31	76.45	30.10
Hendek 6	30	25	R-B	7	403.85	304.81	75.90	23.14
Hendek 6	30	15	R-D	7	257.70	152.78	64.71	40.21
Hendek 6	30	25	R-A	11	491.71	371.70	88.18	31.83

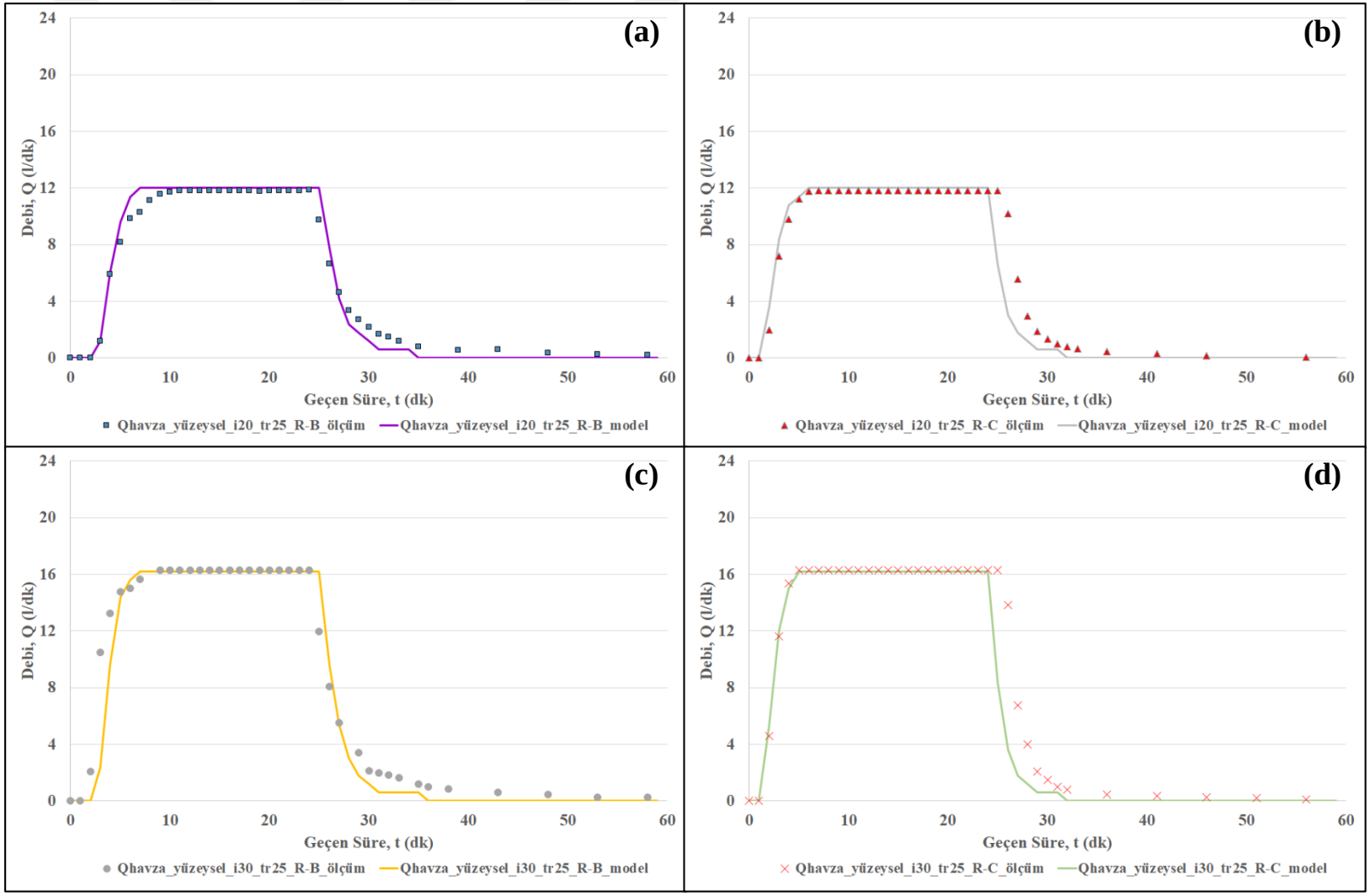
4.2. EPA SWMM ile BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİNİN MODELLENMESİNE AİT BULGULAR

Bitkili yağmur hendeğinin EPA SWMM programıyla modellenmesinde 20 ve 30 mm/sa yağış şiddetleri, 15 ve 25 dk yağış süreleri ile 4 farklı alansal yağış senaryosundan yararlanılmıştır. Havza alanı için toplamda 12 simülasyon gerçekleştirilirken, hendek için 14 simülasyon yürütülmüştür. Havza alanı çıkışındaki ölçüm ve model yüzeysel akış kıyaslamaları Şekil 4.24-Şekil 4.26'da sunulmuştur. Bununla birlikte, hendek çıkışındaki ölçüm ve model yüzeysel akış sonuçları ise Şekil 4.27-Şekil 31'de yer almaktadır. Ölçüm ve model sonuçları kıyaslanırken, farklı parametrelerin modellemedeki etkinliklerinin ortaya konması açısından grafikler 4'lü gruplar halinde verilmiştir.

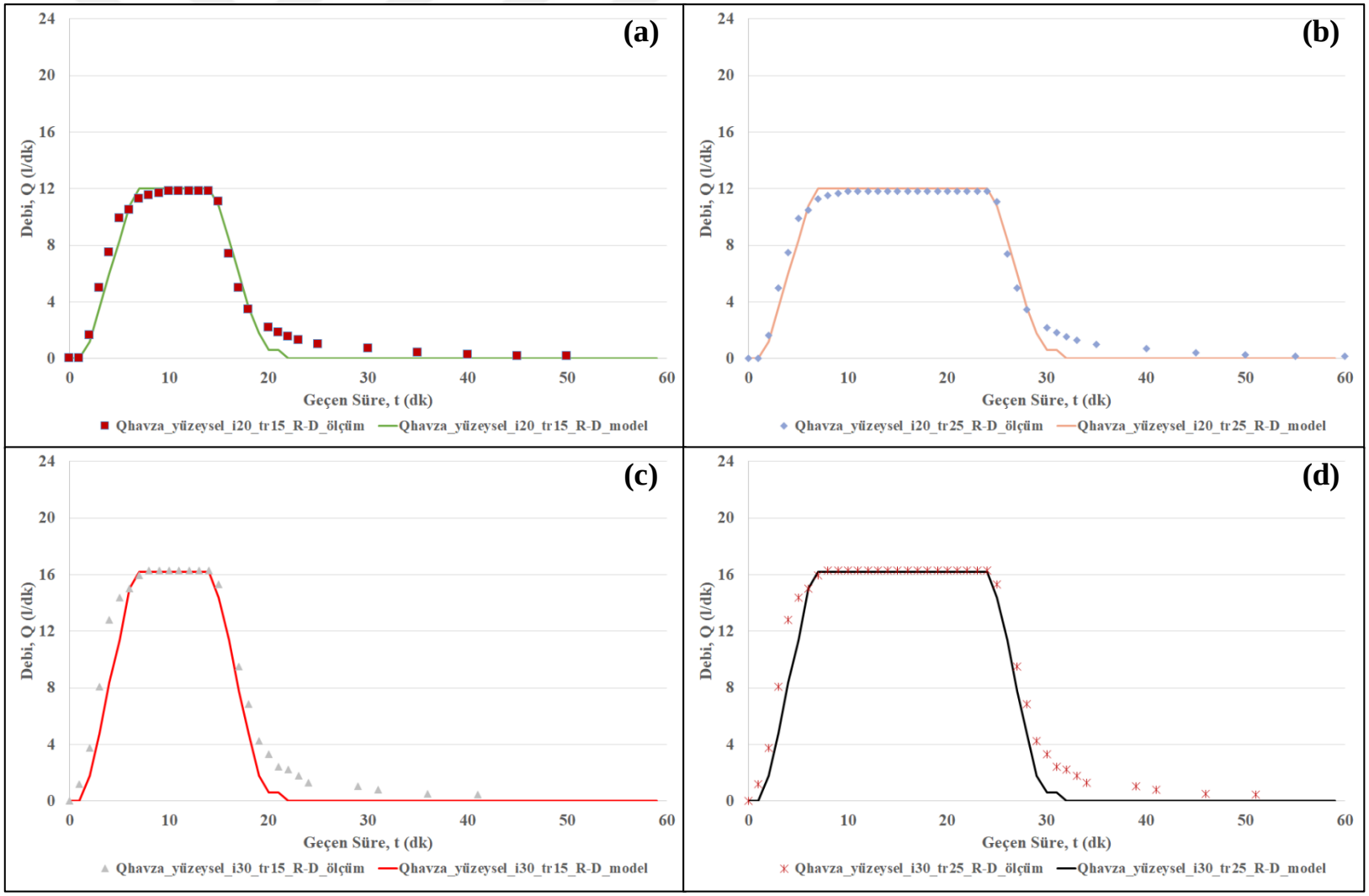
Şekil 4.24-Şekil 4.31'de sunulan grafiklerde $Q_{havza_yüzeysel_ölçüm}$, $Q_{havza_yüzeysel_model}$, $Q_{hendek_yüzeysel_ölçüm}$ ve $Q_{hendek_yüzeysel_model}$ etiketlemelerinden yararlanılmıştır. Bu etiketlemelerde havza, hendek, yüzeysel, ölçüm ve model alt indisleri sırasıyla havza alanı, yağmur hendeği, yüzeysel akış, ölçüm sonuçları ve model sonuçlarını temsil etmektedir. Bununla birlikte grafiklerde kullanılan i, t_r, $h_ç$, R-A, R-B, R-C ve R-D alt indisleri ise sırasıyla yağış şiddeti, yağış süresi, çim boyu ve farklı alansal yağış senaryolarını ifade etmektedir.



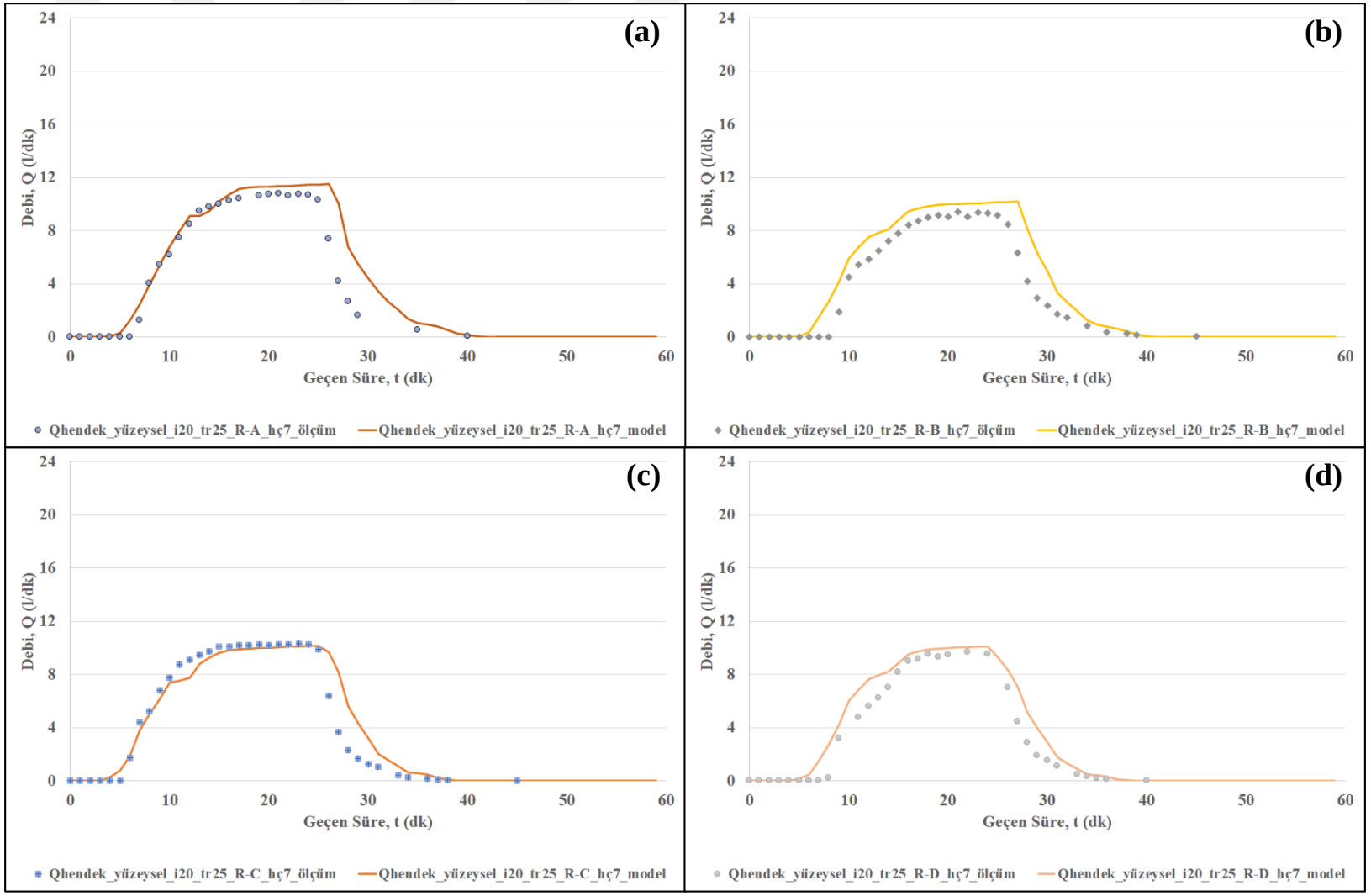
Şekil 4.24: R-A yağış senaryosu altında havza çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, t_r=15 dk (b) i=20 mm/sa, t_r=25 dk (c) i=30 mm/sa, t_r=15 dk (d) i=30 mm/sa, t_r=25 dk.



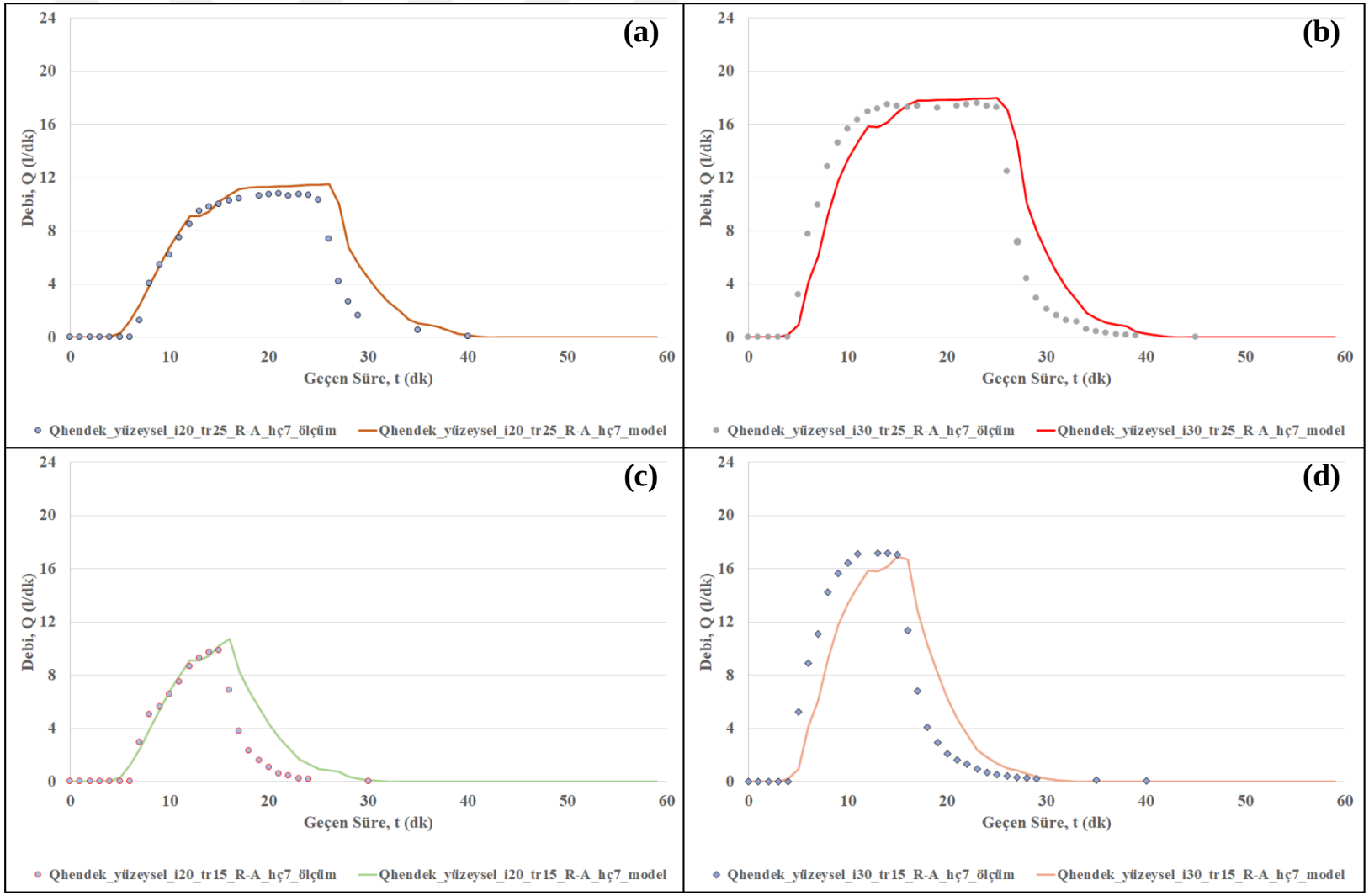
Şekil 4.25: 25 dk'lık yağış süresi altında havza çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, R-B (b) i=20 mm/sa, R-C (c) i=30 mm/sa, R-B (d) i=30 mm/sa, R-C.



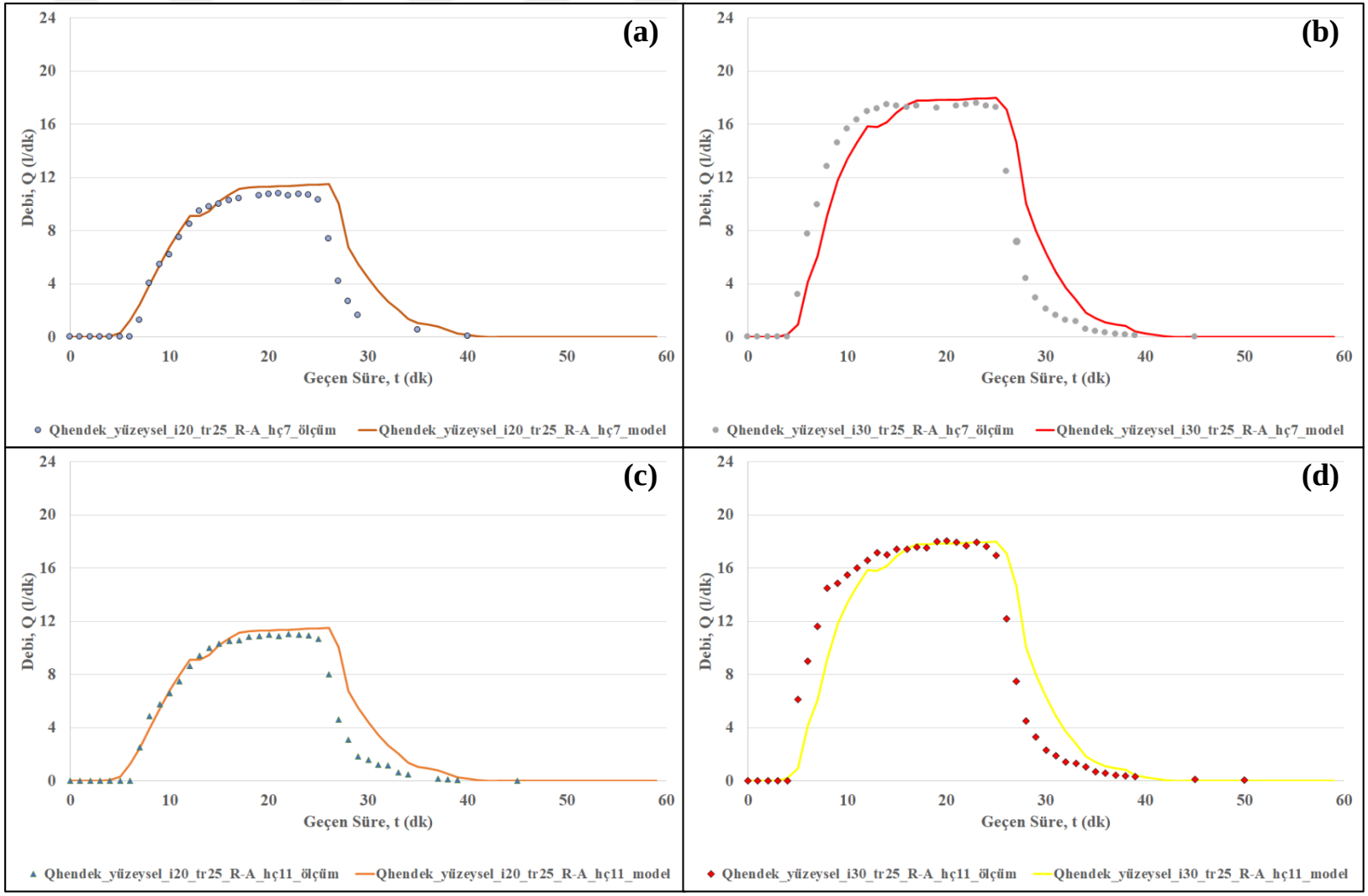
Şekil 4.26: R-D yağış senaryosu altında havza çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr=15 dk (b) i=20 mm/sa, tr=25 dk (c) i=30 mm/sa, tr=15 dk (d) i=30 mm/sa, tr=25 dk.



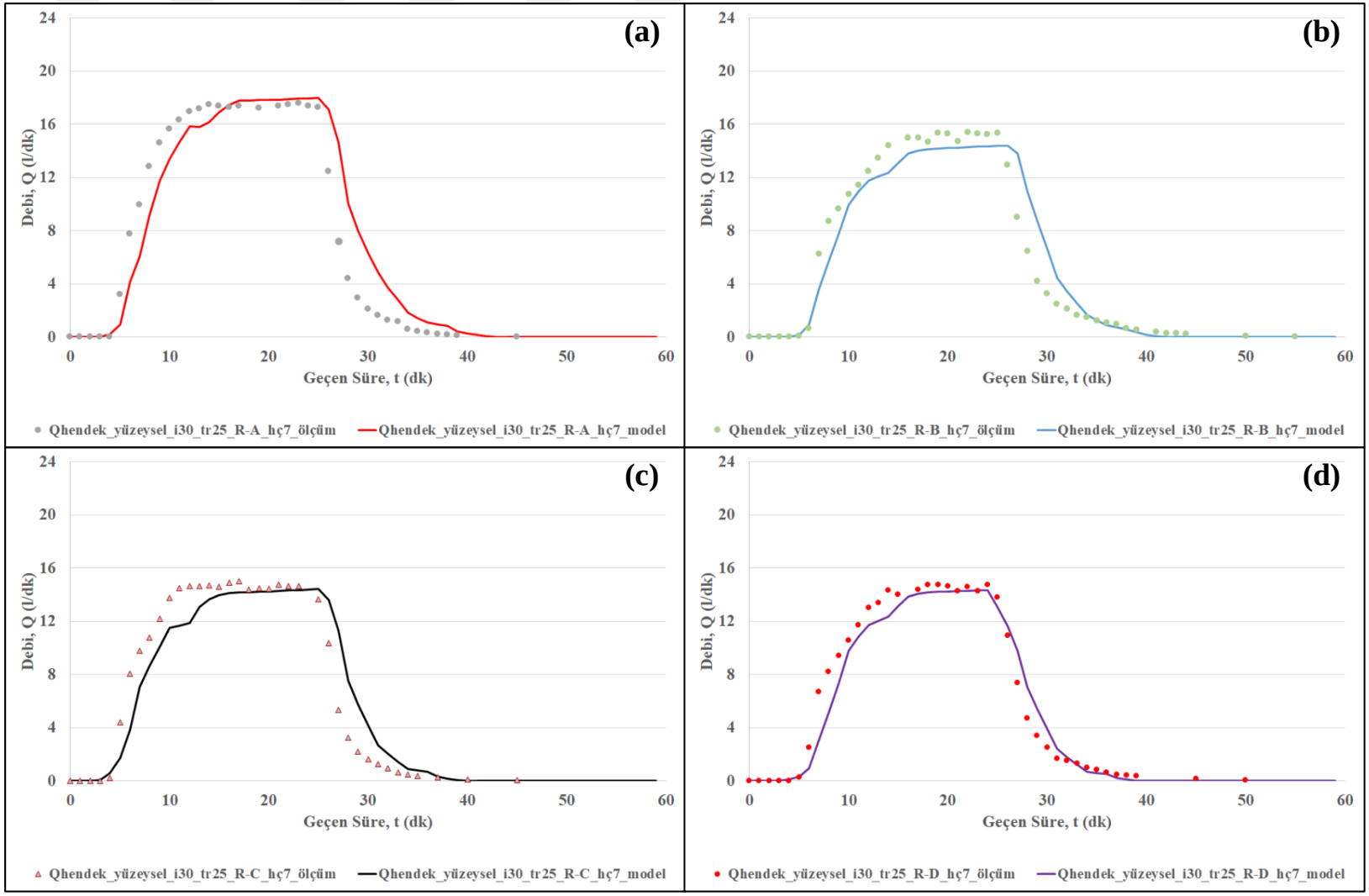
Şekil 4.27: 20 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D.



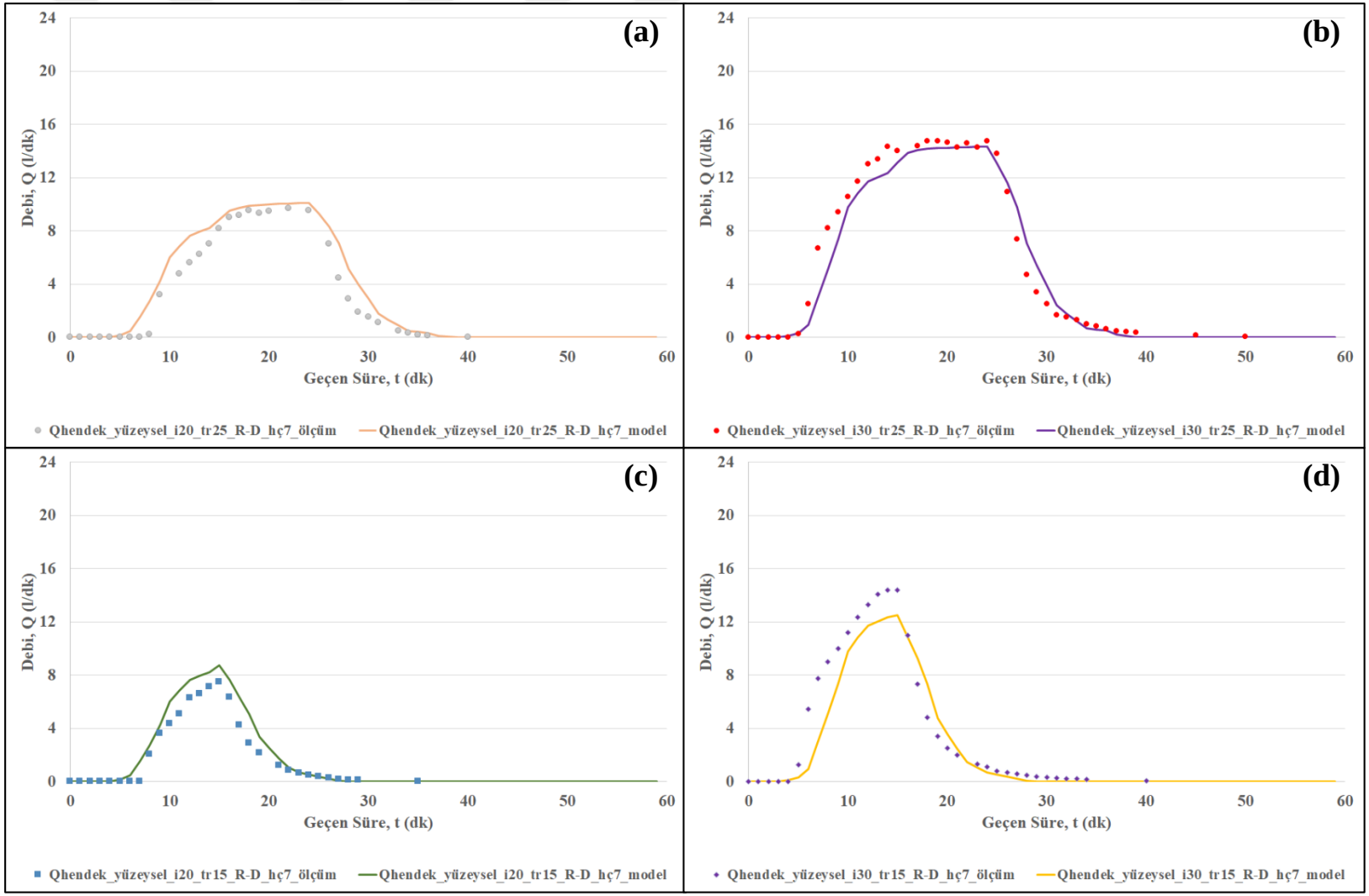
Şekil 4.28: R-A yağış senaryosu ve 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr= 15 dk.



Şekil 4.29: 25 dk yağış süresi ve R-A yağış senaryosu altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, hç=7 cm (b) i=30 mm/sa, hç=7 cm (c) i=20 mm/sa, hç=11 cm (d) i=30 mm/sa, hç=11 cm.



Şekil 4.30: 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D.



Şekil 4.31: R-D yağış senaryosu ve $h_ç$=7 cm çim koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile EPA SWMM model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, t_r= 25 dk (b) i=30 mm/sa, t_r= 25 dk (c) i=20 mm/sa, t_r= 15 dk (d) i=30 mm/sa, t_r= 15 dk.

Şekil 4.24-Şekil 4.26'da havza alanı çıkışına ait yüzeysel akış için EPA SWMM model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının kıyaslaması görülmektedir. Bu grafikler görsel olarak incelendiğinde ölçüm ile model sonuçlarının birbirleriyle oldukça uyumlu oldukları söylenebilir. Model sonuçlarının performansı, yükselme, çekilme eğrileri ile pik debiler için ayrı ayrı değerlendirilebilir. EPA SWMM modelinin yükselme eğrisinin davranışını ve pik debi değerini, çekilme eğrisi davranışına göre çok daha iyi bir şekilde modellediği, sunulan grafiklerden görülebilmektedir. İlaveten, model 4 farklı alansal yağış senaryosu için de oldukça iyi sonuçlar sunmuştur. Böylelikle EPA SWMM'in havza alanı üzerinde oluşan yüzeysel akışı etkin ve doğru bir şekilde modellediği söylenebilir. Şekil 4.27- Şekil 4.31'de sunulan grafiklerde ise hendek çıkışına ait yüzeysel akış için ölçülen değerler ile model sonuçlarının kıyaslamaları görülmektedir. Şekil 4.27'de 20 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ve R-A, R-B, R-C ve R-D alansal yağış senaryoları altında yürütülen deneylerden elde edilen sonuçlar ile model sonuçlarının karşılaştırmaları yer almaktadır. Şekil 4.27'deki grafikler incelendiğinde, EPA SWMM'in farklı alansal yağış senaryoları için modelleme yeteneği ortaya konmuştur. Modelin R-A, R-C ve R-D için ortaya koyduğu sonuçların R-B alansal yağış senaryosu için ortaya koyduğu sonuçlardan bir miktar daha iyi olduğu söylenebilir. R-B için hendek yüzeysel akış ölçüm değeri 9.45 l/dk iken EPA SWMM modelinin hesapladığı pik debi değeri 10.19 l/dk'dır. Şekil 4.28'de farklı yağış şiddeti ve süreleri için EPA SWMM'in modelleme yeteneği ortaya konmuştur. Yağış şiddeti ve sürelerinin etkisi 20 ve 30 mm/sa yağış şiddetleri ile 15 ve 25 dk yağış süreleri altında değerlendirilmiştir. Model, düşük yağış şiddetinde ölçüm sonuçlarıyla daha uyumlu bir davranış ortaya koymaktadır. Bunula birlikte yağış süresi arttıkça ölçüm ile model sonuçları arasındaki uyumunda arttığı görülmektedir. Şekil 4.29'da EPA SWMM programının performansı farklı yağış şiddeti ile farklı çim boyları koşullarında değerlendirilmiştir. Her iki çim boyu için düşük yağış şiddeti altında modelin ölçüm sonuçlarıyla daha uyumlu bir davranış sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, 30 mm/sa yağış şiddeti altında ölçüm ve model sonuçları değerlendirildiğinde, pik debi değerleri model tarafından iyi bir şekilde hesaplanırken, yükselme ve çekilme eğrisi davranışında benzer performans ortaya konamamıştır. 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ve 7 cm çim boyu ile R-A, R-B, R-C, R-D alansal yağış senaryoları altında yürütülen deneylerden elde edilen sonuçlarla aynı koşullardaki model sonuç kıyaslamaları Şekil 4.30'da yer almaktadır. Bu kıyaslamada farklı alansal yağış senaryolarının EPA SWMM modelleme yeteneği üzerindeki etkileri gözlemlenmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, modelin R-B yağış senaryosuna göre diğer yağış senaryoları için pik debileri daha iyi bir şekilde hesapladığı görülmektedir. R-

B yağış senaryosu için ölçülen pik debi değeri 15.41 l/dk iken modelin hesapladığı pik debi değeri 14.41 l/dk'dır. Yani model bu yağış senaryosu için pik debi değerini ölçüm değerinden daha düşük hesaplamıştır. EPA SWMM programının, R-D yağış senaryosu ve 7 cm çim boyu koşulları altında yağış şiddeti ile süresinde meydana gelen değişimin hendek yüzeysel akış davranışını modelleme yeteneğini Şekil 4.31'de sunulan sonuçlar değerlendirilerek ulaşılabilir. Bu sonuçlar ışığında, yağış süresi azaldıkça model ile ölçüm sonuçları arasındaki uyumun azaldığı görülmektedir. Ancak 20 mm/sa yağış şiddeti altında model pik debi değerini ölçüm değerine göre daha yüksek hesaplamıştır. Bununla birlikte 30 mm/sa yağış şiddeti altında ise tam tersi bir davranış gözlemlenmiştir. 25 dk yağış süresi için ise ölçüm ile model sonuçlarının oldukça uyumlu oldukları söylenebilir.

Ölçüm ve model sonuçlarının sağlıklı bir şekilde kıyaslanabilmesi için istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizde ölçüm ve model sonuçları kullanılarak her bir karşılaştırma için belirtme katsayısı (R^2), Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE/Root Mean Square Error) ile Nash Sutcliffe Verim İndeksi (NSE/Nash Sutcliffe Efficiency Coefficient) değerleri hesaplanmıştır. Bu katsayı değerlerinin hesaplanmasında kullanılan formülasyonlar Denklem (4.1)-Denklem (4.3)'de verilmiştir.

$$R^2 = \frac{(\sum(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y}))^2}{\sum(x_i-\bar{x})^2(y_i-\bar{y})^2} \tag{4.1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}{n}} \tag{4.2}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{4.3}$$

Denklem (4.1)-Denklem (4.3)'de yer alan;

x_i : Ölçüm verisi değerlerini,

$\overline{x}$: Ölçüm verilerinin ortalamasını,

y_i : Model verisi değerlerini,

$\overline{y}$: Model verilerinin ortalamasını,

n: Veri adedini belirtmektedir.

Tablo 4.9'da havza çıkışı için ölçüm ve EPA SWMM model sonuçlarının istatistiksel analiz değerleri sunulurken, Tablo 4.10'da ise hendek çıkışındaki ölçüm sonuçları ile EPA SWMM model sonuçlarına ilişkin istatistiksel analiz sonuçları yer almaktadır.

Tablo 4.9: Havza çıkışında elde edilen ölçüm ve model yüzeysel akış sonuçlarının istatistiksel analizi.

Yağış Şiddeti (mm/sa)	Yağış Süresi (dk)	Yağış Senaryosu	R^2	RMSE	NSE
20	15	R-A	0.980	0.856	0.975
20	25	R-A	0.985	0.755	0.981
20	25	R-B	0.987	0.742	0.978
20	25	R-C	0.911	1.669	0.892
20	15	R-D	0.982	0.828	0.971
20	25	R-D	0.987	0.729	0.978
30	15	R-A	0.974	1.661	0.960
30	25	R-A	0.979	1.458	0.969
30	25	R-B	0.953	1.722	0.940
30	25	R-C	0.914	2.326	0.893
30	15	R-D	0.974	1.704	0.934
30	25	R-D	0.981	1.464	0.952

Tablo 4.10: Hendek çıkışında elde edilen ölçüm ve model yüzeysel akış sonuçlarının istatistiksel analizi.

Hendek No.	Yağış Şiddeti (mm/sa)	Yağış Süresi (dk)	Yağış Senaryosu	Çim Boyu (cm)	R^2 Değeri	RMSE	NSE
Hendek 6	20	25	R-A	7	0.901	1.726	0.849
Hendek 6	20	15	R-A	7	0.810	1.964	0.694
Hendek 6	20	25	R-A	11	0.919	1.540	0.887
Hendek 6	20	25	R-B	7	0.939	1.524	0.840
Hendek 6	20	25	R-C	7	0.922	1.270	0.916
Hendek 6	20	25	R-D	7	0.961	1.175	0.905
Hendek 6	20	15	R-D	7	0.974	0.977	0.854
Hendek 6	30	25	R-A	7	0.894	2.512	0.890
Hendek 6	30	15	R-A	7	0.786	3.073	0.785
Hendek 6	30	25	R-A	11	0.881	2.645	0.880
Hendek 6	30	25	R-B	7	0.932	1.645	0.932
Hendek 6	30	25	R-C	7	0.900	2.028	0.899
Hendek 6	30	25	R-D	7	0.963	1.213	0.960
Hendek 6	30	15	R-D	7	0.914	1.676	0.893

Tablo 4.9 ile Tablo 4.10'da karşılaştırılan deney setlerine ilişkin özet bilgiler ile her bir deney seti ve model sonucu için hesaplanan istatistiksel değerler yer almaktadır.

Şekil 4.24-Şekil 4.26'da sunulan havza çıkışındaki ölçüm ile model sonuçlarının karşılaştırmaları değerlendirildiğinde, model sonuçlarının hem pik debilere ulaşma süreleri hem de pik debi değerlerini oldukça tutarlı bir şekilde sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.24-Şekil 4.26'daki hidrografların yükselme eğrilerindeki davranışın çekilme eğrilerine oranla EPA SWMM programı tarafından daha iyi bir şekilde modellendiği açıktır. Havza çıkışında ölçüm ve model sonuçları kıyaslandığında en düşük ve en yüksek hesaplanan R^2, RMSE ve NSE değerleri sırasıyla 0.911 ile 0.987, 0.729 ile 2.326, 0.892 ile 0.978'dır (Bkz. Tablo 4.9). İstatistiksel analiz açısından hesaplanan bu istatistiksel değerler, ölçüm ile model sonuçları arasındaki yüksek uyumu ortaya koymaktadır.

EPA SWMM programının bitkili yağmur hendeğinin yüzeysel akış performansını modelleme yeteneği ortaya koyan sonuçlar Şekil 4.27-Şekil 4.31'de sunulmuştur. Bu şekillerde yer alan grafiklerin görsel analiziyle, EPA SWMM programının yağmur hendeği üzerinde oluşan yüzeysel akış davranışını da iyi bir şekilde modelleyebildiği görülmektedir. Ancak, hendek yüzeysel akışı için ölçüm ile model sonuçları, havza yüzeysel akışı kadar tam bir uyum içerisinde değildir. Dolayısıyla, EPA SWMM programının bitkili yağmur hendeği modülünün iyileştirilmesine ihtiyaç vardır. Ayrıca, hendek çıkışındaki yüzeysel akış ölçüm ve EPA

SWMM model sonuçlarının istatistiksel analizleri de bu yorumu desteklemektedir. Tablo 4.10'daki hendek çıkışındaki ölçüm ve model sonuçları arasındaki uyumu ortaya koyan belirtme katsayı değerleri R^2 minimum 0.786 iken maksimum 0.974'tür. Hesaplanan R^2 değerinin 1 değerine yakın olması ölçüm ile model sonuçları arasındaki uyumun iyi olduğunu ama aynı zamanda iyileştirmeye açık olduğunu göstermektedir. Yağış süresi arttıkça EPA SWMM programının model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki uyum artmaktadır. İlaveten modelin hendek yüzeysel akış için yükselme eğrisi davranışını, çekilme eğrisi davranışına göre daha iyi modellediği açıktır. 20 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği için tüm alansal yağış senaryolarında model sonucu elde edilen pik debiler ölçüm değerlerinden daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Ancak hesaplanan pik debiler ile ölçüm pik debi değerleri arasındaki fark oldukça düşüktür. Yine aynı koşullarda, yükselme eğrisi profili, çekilme eğrisi profiline göre daha iyi modellenmiştir. EPA SWMM programında çim boyu parametresi bir girdi olarak yer almamaktadır. Genel olarak, EPA SWMM programının modellenmesine olanak sağladığı diğer DEK türleri ve ilgili DEK'i temsil etmek için göz önünde bulunan parametrelerin sayısı, bitkili yağmur hendeğinin temsili için kullanılan parametre sayısına göre oldukça fazladır. Bu duruma rağmen EPA SWMM'in, bitkili yağmur hendeği için hendek yüzeysel akış davranışını oldukça iyi modellediği görülmektedir. Böylelikle, EPA SWMM programının bitkili yağmur hendeği davranışının modellenmesinde tercih edilebilecek bir program olduğu ama aynı zamanda iyileştirmeye açık olduğu ortaya konmuştur.

4.3. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİ HİDROLOJİSİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELE AİT BULGULAR

Geliştirilen matematiksel modelin doğruluk ve yeterliliği deneylerden elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak değerlendirilmiştir. Modelin yeterliliği, model sonucunda elde edilen sonuçların ölçüm sonuçlarıyla tutarlı olmasıyla ortaya konmaktadır. Model ve ölçüm sonuçlarının birbiriyle uyumlu olabilmesi için geliştirilen modelin kalibrasyonu yapılmıştır. Bu amaçla, model içerisinde yer alan bazı parametrelere farklı değerler verilerek model test edilmiş ve ölçüm ile model sonuçları arasındaki uyum gözlemlenmiştir. Hem "Hendek Yüzeysel Akış Modeli" hem de "Hendek Drenaj Akış Modeli"nde yer alan bazı parametreler kalibrasyon parametresi olarak seçilmiştir. Hendek Yüzeysel Akış Modelinde kalibrasyon parametresi olarak Manning Katsayısı seçilmiştir. Manning Katsayısı, hendek yüzey pürüzlülüğünü temsil eden bir parametredir. Literatür gözden geçirildiğinde, çim yüzeyler için Manning Katsayısı değerinin 0.15 ile 0.41 arasında değiştiği görülmüştür (McCuen ve diğ. (1996)). Manuel olarak yapılan kalibrasyon çalışmaları sonucunda, yağmur hendeği üzerinde oluşan yüzey akışının davranışını ortaya koyan en uygun Manning Katsayısı değeri 0.40 olarak belirlenmiştir.

Bitkili yağmur hendeğinin hidrolojisi için geliştirilen matematiksel modelde yer alan drenaj Hendek Akış Modelinin uygun bir şekilde çalışabilmesi için modele girdi olarak sunulan parametrelerin uygun bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle drenaj akış modelinde yer alan α, t_w ve β katsayıları kalibrasyon parametreleri olarak belirlenmiş ve optimum değerleri MATLAB Programında "lsqcurvefit" fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyon, doğrusal olmayan eğri uydurma problemlerinin çözümünde tercih edilmektedir. Bu fonksiyon kullanılarak, ölçülen drenaj debisi değerleri ile drenaj akış modeli kullanılarak hesaplanan drenaj debisi değerleri arasındaki hata farkını minimize edecek şekilde seçilen kalibrasyon parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Tablo 4.10'da yürütülen deneylerde ölçülen pik ve minimum drenaj akış değerleri sunulmuştur. Matematiksel modelde minimum drenaj akış değeri olarak deneyler sonunda ölçülen minimum drenaj akış değerlerinin ortalaması alınmış ve modele tek bir değer olarak girilmiştir. Modelde kullanılan pik drenaj akış debisi için ise deney setleri 4 farklı gruba ayrılmıştır. I, II, III ve IV olarak tanımlanan grup numaraları da Tablo 4.11'de yer almaktadır.

Tablo 4.11: Deneyler esnasında ölçülen minimum ve pik drenaj debisi değerleri ile grup numaraları.

Hendek No.	Yağış Şiddeti (mm/sa)	Yağış Süresi (dk)	Yağış Senaryosu	Q_0 (1/dk)	Q_∞ (1/dk)	Grup No
Hendek 6	20	25	R-A	0.756	0.068	IV
Hendek 6	20	15	R-A	0.540	0.047	II
Hendek 6	20	25	R-A	0.720	0.073	IV
Hendek 6	20	25	R-B	0.620	0.069	III
Hendek 6	20	25	R-C	0.610	0.051	III
Hendek 6	20	25	R-D	0.620	0.070	III
Hendek 6	20	15	R-D	0.403	0.080	I
Hendek 6	30	25	R-A	0.806	0.066	IV
Hendek 6	30	15	R-A	0.560	0.048	II
Hendek 6	30	25	R-A	0.757	0.080	IV
Hendek 6	30	25	R-B	0.620	0.070	III
Hendek 6	30	25	R-C	0.636	0.060	III
Hendek 6	30	25	R-D	0.645	0.076	III
Hendek 6	30	15	R-D	0.420	0.078	I

Yükselme eğrisi için katsayı değeri α, çekilme eğrisi için katsayı değeri β ile yükselme eğrisi için zamansal katsayı değeri t_w için her bir deney setinden elde edilen drenaj akış değerleri kullanılarak optimizasyon sonucunda elde edilen değerler Tablo 4.12'de sunulmuştur. Bu katsayılara ilişkin geliştirilen modelde girdi olarak sunulan değerler, optimizasyon aşamasında elde edilen değerlerin ortalamasıdır.

Tablo 4.12: Optimizasyon ile hesaplanan katsayı değerleri.

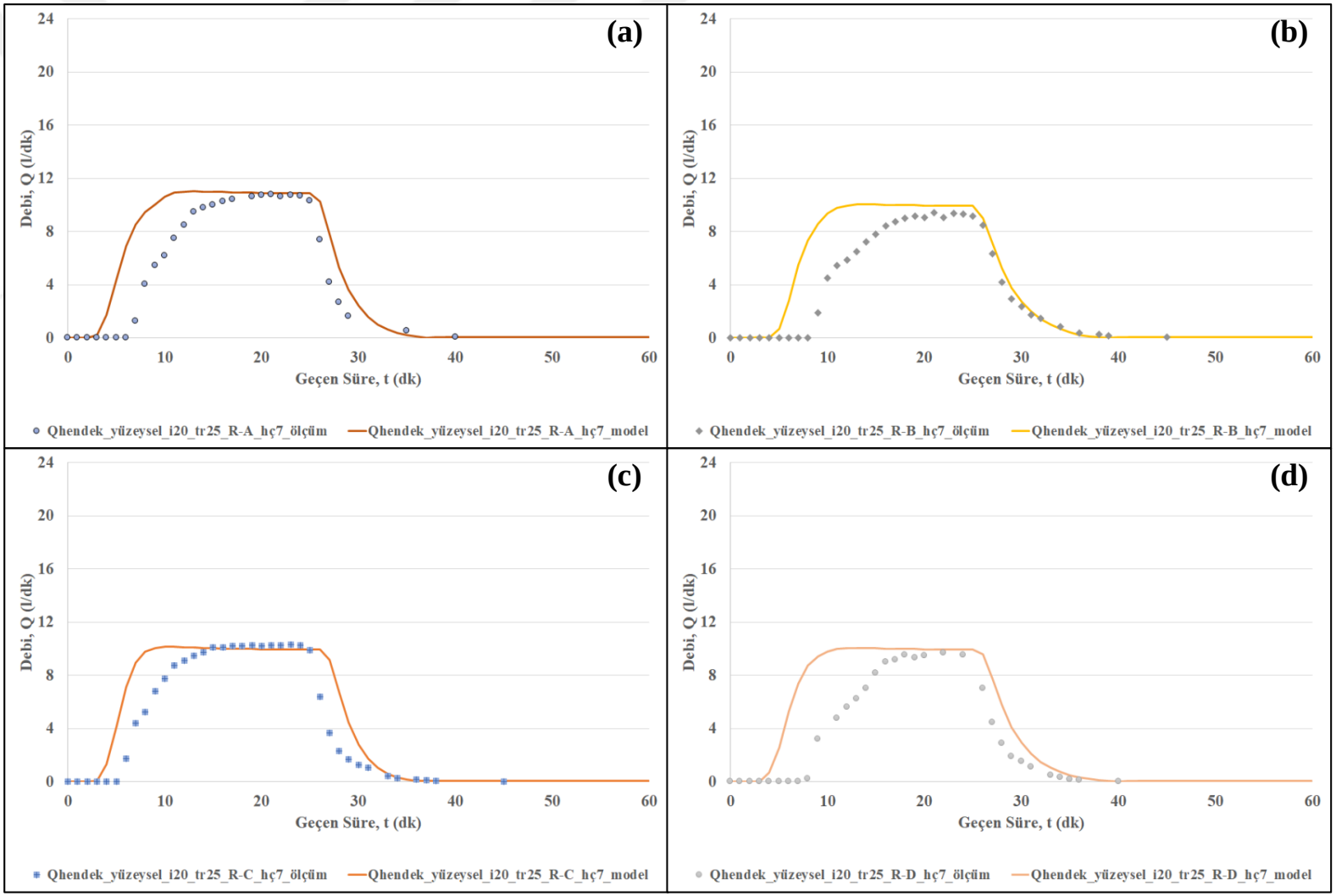
Hendek No.	Yağış Şiddeti (mm/sa)	Yağış Süresi (dk)	Yağış Senaryosu	α (1/dk)	β (1/dk)	t_w (dk)
Hendek 6	20	25	R-A	0.1747	0.0153	14.0233
Hendek 6	20	15	R-A	0.1869	0.012	13.5085
Hendek 6	20	25	R-A	0.1601	0.0158	13.9093
Hendek 6	20	25	R-B	0.2907	0.0159	15.0719
Hendek 6	20	25	R-C	0.1136	0.0124	14.1171
Hendek 6	20	25	R-D	0.1052	0.0142	14.8140
Hendek 6	20	15	R-D	0.0927	0.012	15.0809
Hendek 6	30	25	R-A	0.1616	0.0157	12.5318
Hendek 6	30	15	R-A	0.1464	0.0121	11.1271
Hendek 6	30	25	R-A	0.1382	0.018	12.6501
Hendek 6	30	25	R-B	0.2906	0.016	15.0751
Hendek 6	30	25	R-C	0.1093	0.012	14.3351
Hendek 6	30	25	R-D	0.0999	0.0165	14.7966
Hendek 6	30	15	R-D	0.0913	0.012	15.2747

Yürütülen kalibrasyon çalışmaları neticesinde matematiksel modelde kullanılan nihai parametre değerleri Tablo 4.13'te sunulmuştur.

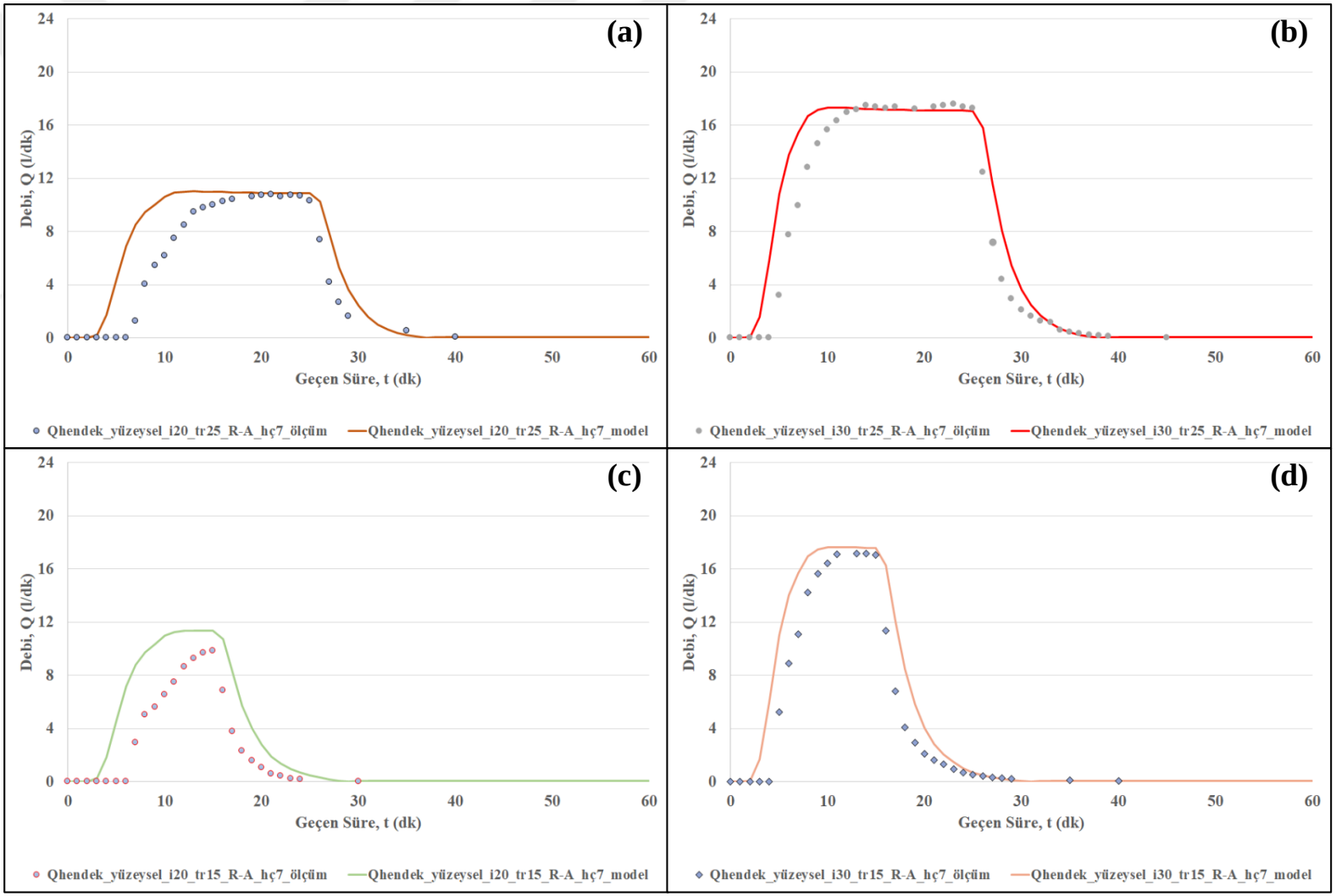
Tablo 4.13: Yağmur hendeğinin matematiksel modelinde kullanılan parametre değerleri.

Parametreler	Kullanılan Parametre Değerleri
Manning Katsayısı, n	0.4
Q_0**(l/dk)**	0.41, 0.55, 0.63, 0.76
Q_∞**(l/dk)**	0.067
α **(1/dk)**	0.15
β **(1/dk)**	0.014
t_w **(dk)**	14

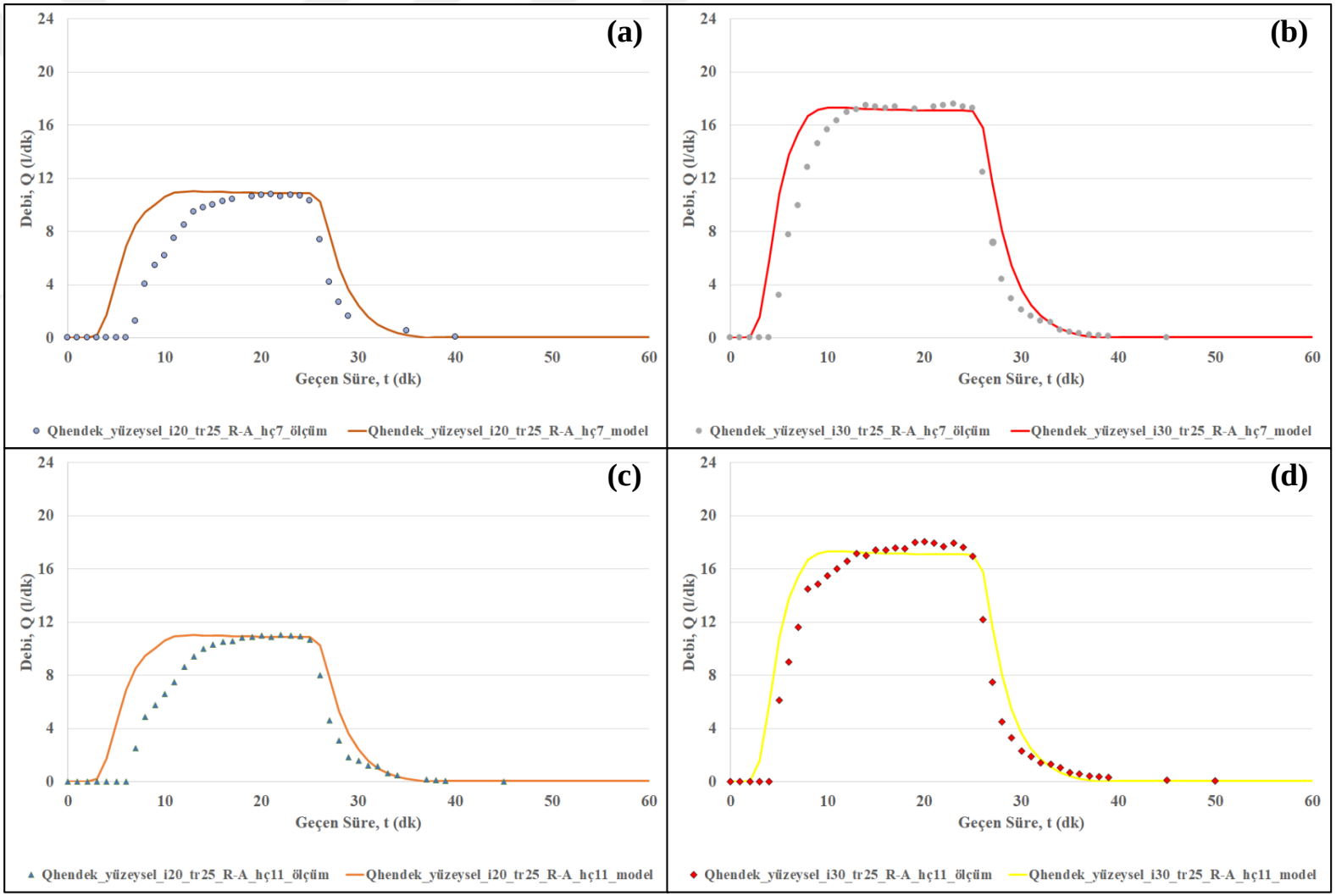
Yağmur hendeği hidrolojisini temsil eden matematiksel model için MATLAB Programlama Dilinde bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritma iki temel algoritmanın bir bütünüdür. Çünkü hendeğin hidrolojik davranışını temsil eden yüzeysel akış ve drenaj akış denklemleri bütüncüldür. Bu nedenle geliştirilen algoritma, yağmur hendeğinin yüzeyinde oluşan yüzeysel akışın modellendiği "Hendek Yüzeysel Akış Modeli" modülü ile hendek içerisinde sızarak hendek tabanından drene olan akışın modellendiği "Hendek Drenaj Akış Modeli" modülünden meydana gelmektedir. Oluşturulan algoritma ile yağmur hendeğinin hem yüzeysel akış hem de drenaj akış davranışları simüle edilmiştir. Elde edilen matematiksel model sonuçları, yürütülen deneylerden elde edilen ölçüm sonuçlarıyla kıyaslanarak modelin etkinliği ortaya konmuştur. Modelleme çalışmasında, deneylerde kullanılmış olan yağış şiddeti, yağış süresi, yağış senaryoları ve çim boyu değerleri kullanılmıştır. Böylelikle hidrolojik davranış üzerinde etkin olduğu düşünülen farklı parametreler, model ile değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, 20 ve 30 mm/sa yağış şiddeti, 15 ve 25 dk yağış süreleri, R-A, R-B, R-C, R-D alansal yağış senaryoları ile 2 farklı çim boyu dikkate alınmıştır. Farklı alansal yağış senaryoları için yağmurlama çıkışında ölçülen Havza Yüzeysel Akış değerleri modele girdi olarak sunulmuştur. Havza yüzeysel akış değerleri kullanılarak hendek birim alanı üzerinde oluşan yüzeysel akış değerleri hesaplanmıştır. Yağmurlama çıkışındaki Havza Yüzeysel Akışı, Hendek Yüzeysel Akış Modeli ile Hendek Drenaj Akış Modeli entegre olarak çalıştırıldığından dolayı deney süreleri de göz önünde tutularak 6 saat için model çalıştırılmıştır. Hendek yüzeysel akış ve Hendek drenaj akışı için modelden elde edilen hidrografların deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaları Şekil 4.32-Şekil 4.41'de sunulmuştur.



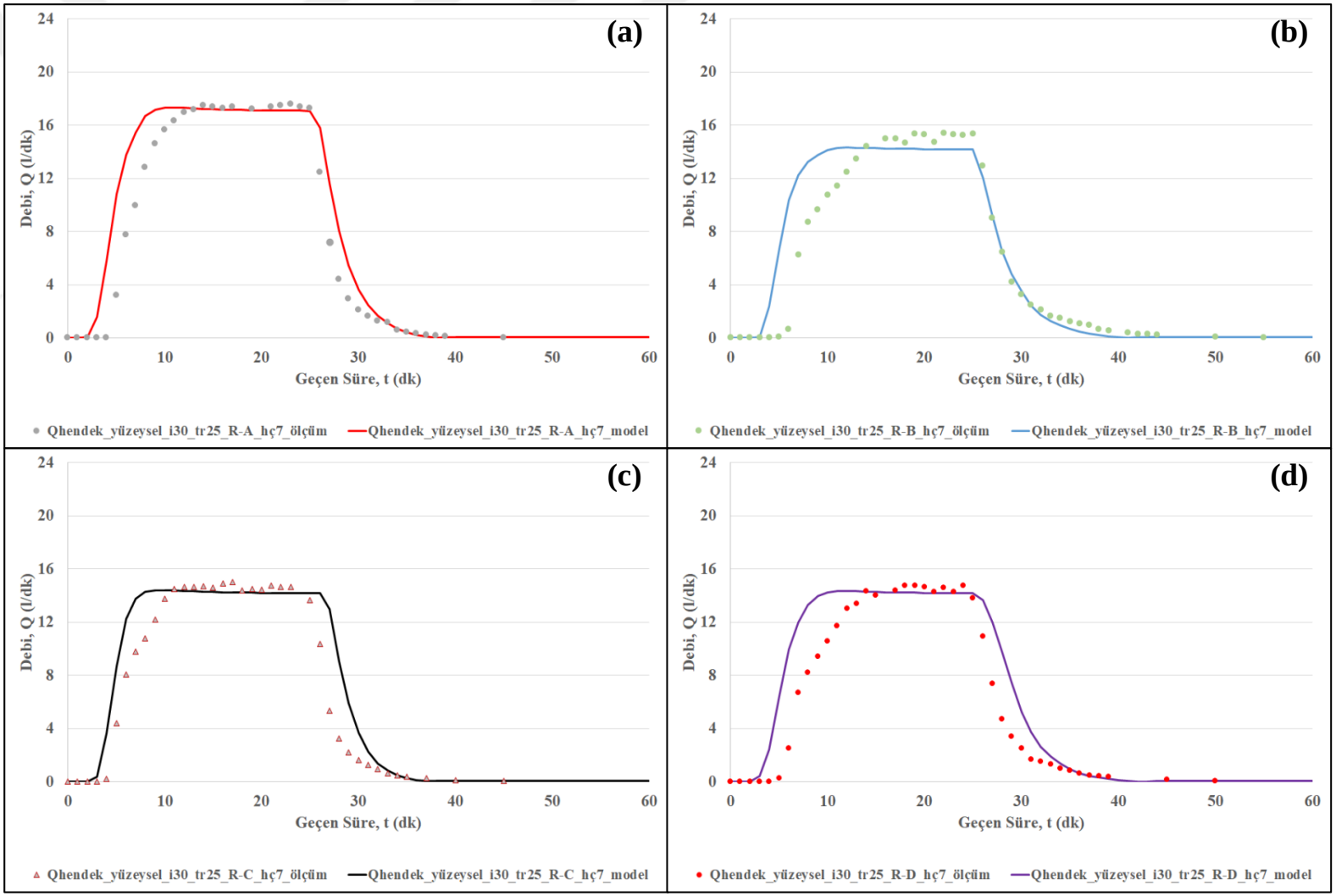
Şekil 4.32: 20 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D.



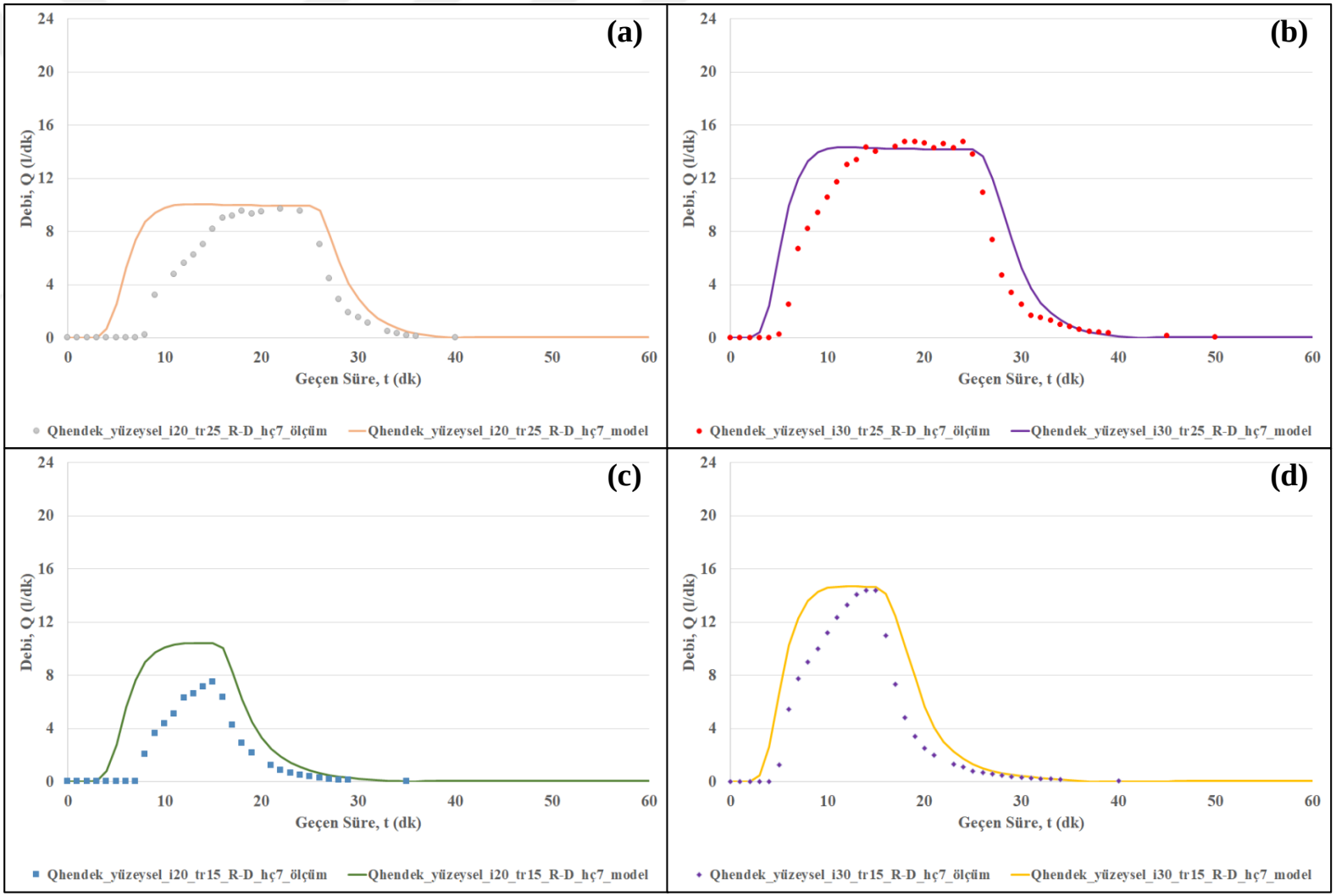
Şekil 4.33: R-A yağış senaryosu ve 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr= 15 dk.



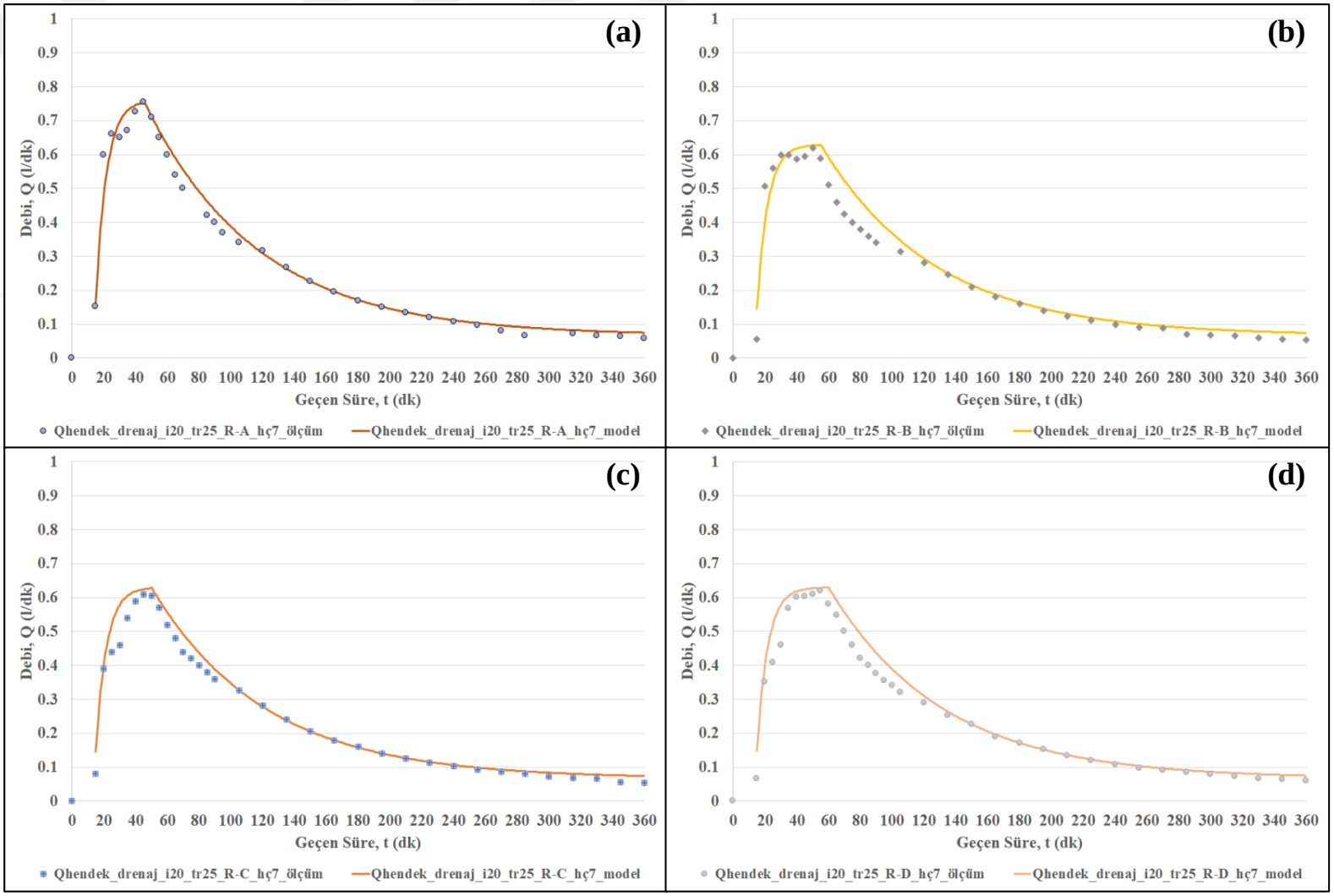
Şekil 4.34: 25 dk yağış süresi ve R-A yağış senaryosu altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, hç=7 cm (b) i=30 mm/sa, hç=7 cm (c) i=20 mm/sa, hç=11 cm (d) i=30 mm/sa, hç=11 cm.



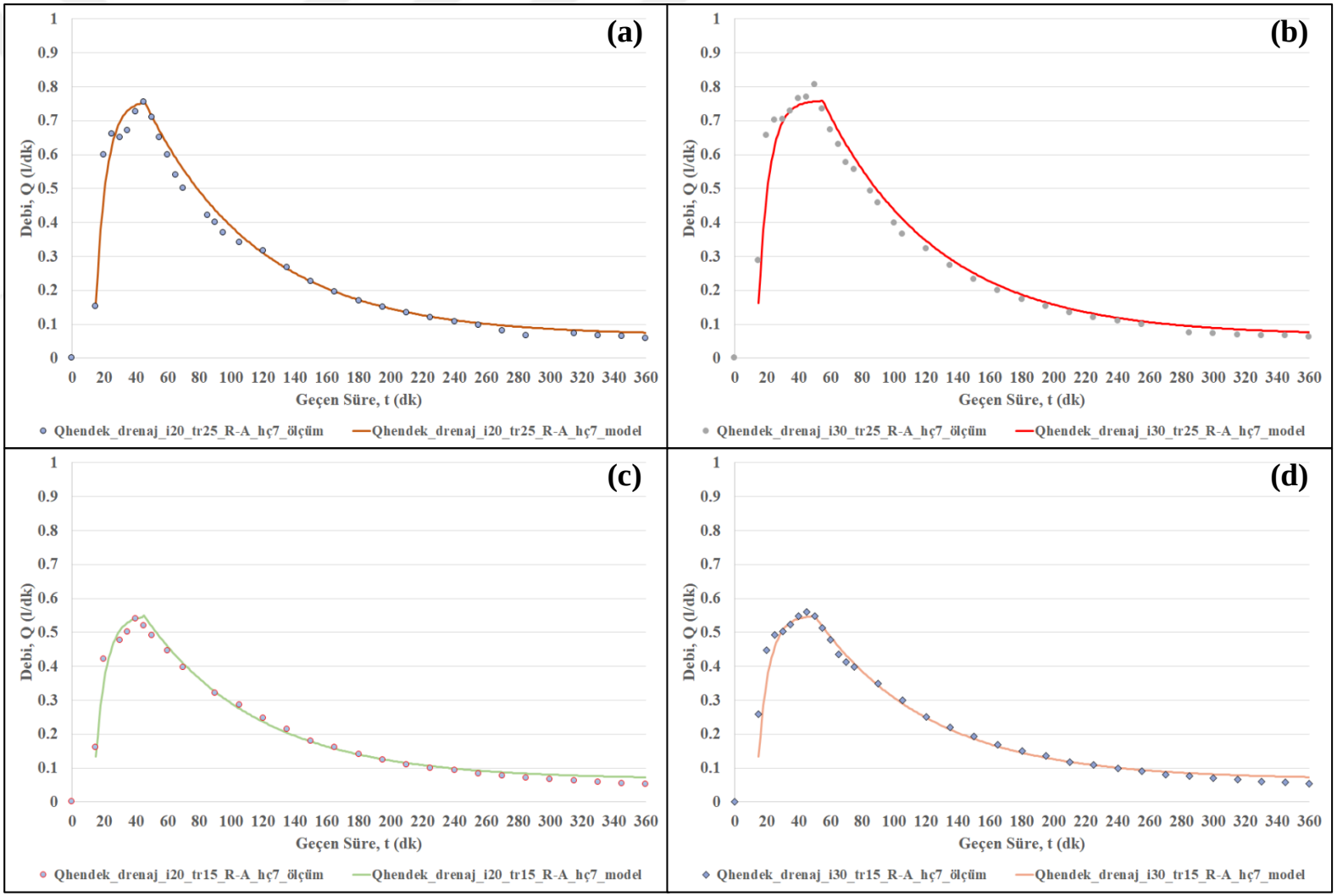
Şekil 4.35: 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D.



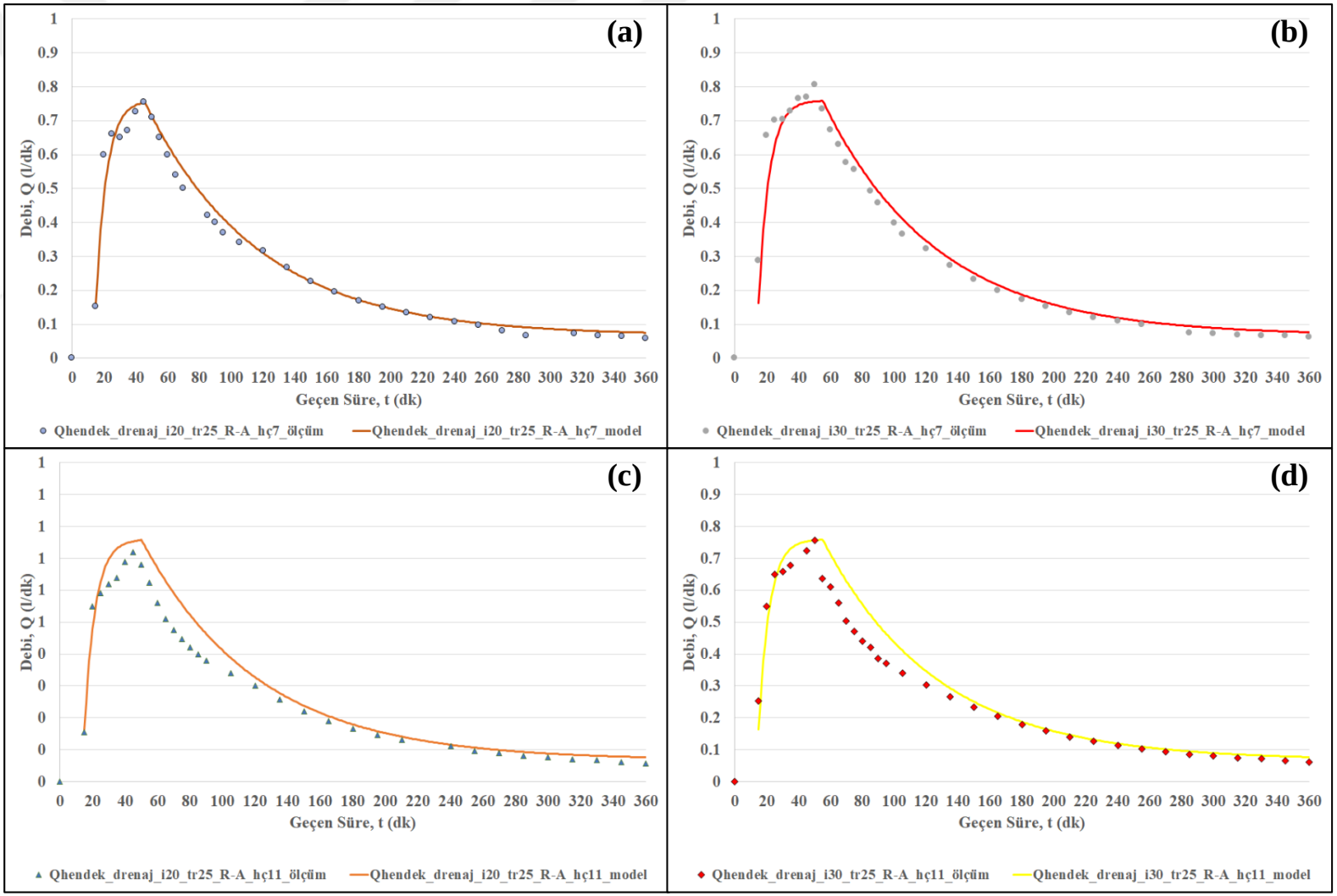
Şekil 4.36: R-D yağış senaryosu ve hç=7 cm çim koşulları altında hendek çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr= 15.



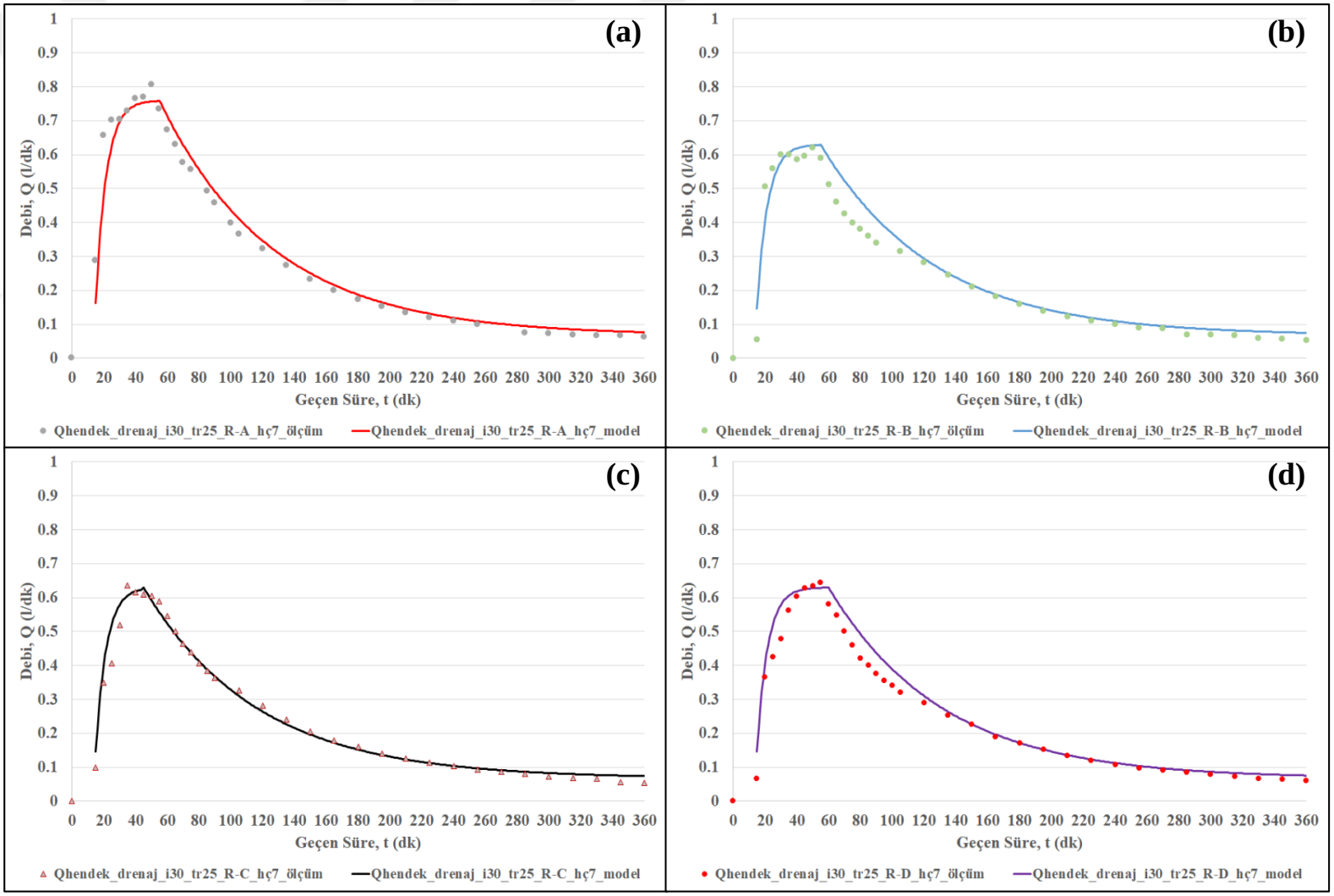
Şekil 4.37: 20 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek drenaj akış çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D.



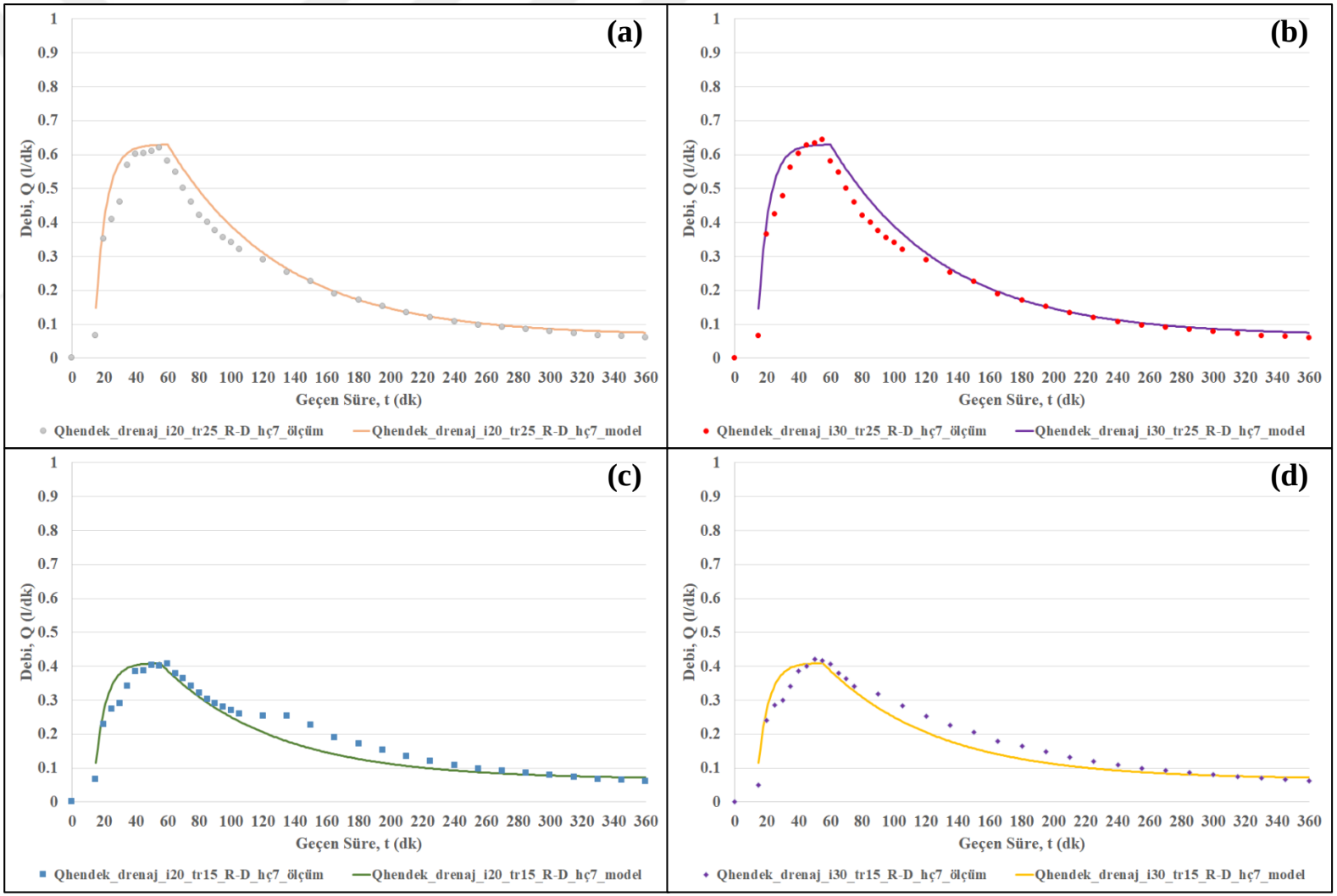
Şekil 4.38: R-A yağış senaryosu ve 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek drenaj akış çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr=15dk.



Şekil 4.39: 25 dk yağış süresi ve R-A yağış senaryosu altında hendek drenaj akış çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, hç=7 cm (b) i=30 mm/sa, hç=7 cm (c) i=20 mm/sa, hç=11 cm (d) i=30 mm/sa, hç=11 cm.



Şekil 4.40: 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim yüksekliği koşulları altında hendek drenaj çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) R-A (b) R-B (c) R-C (d) R-D.



Şekil 4.41: R-D yağış senaryosu ve hç=7 cm çim koşulları altında hendek drenaj akış çıkışında ölçülen değerler ile matematiksel model sonuçlarının kıyaslanması (a) i=20 mm/sa, tr= 25 dk (b) i=30 mm/sa, tr= 25 dk (c) i=20 mm/sa, tr= 15 dk (d) i=30 mm/sa, tr= 15.

Şekil 4.32-Şekil 4.41'deki grafiklerde yer alan $Q_{hendek_\text{yüzeysel}_\text{ölçüm}}$, $Q_{hendek_\text{yüzeysel}_model}$, $Q_{hendek_\text{drenaj}_\text{ölçüm}}$, $Q_{hendek_\text{drenaj}_model}$ etiketlemesi, hendek yüzeysel akış ile hendek drenaj akışı için ölçüm ve model sonuçlarını ifade etmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.32-Şekil 4.41'deki grafiklerde kullanılan i, t_r, R-A, R-B, R-C, R-D ve $h_ç$ alt indisleri sırasıyla yağış şiddeti (mm/sa), yağış süresi (dk), 4 farklı alansal yağış senaryosu ile çim boyunu (cm) temsil etmektedir. Deney ve model sonuçlarının farklı parametreler ile karşılaştırılabilmeleri için deney ve model sonuçları 4'lü gruplar halinde sunulmuştur. Böylelikle etkin parametrelerdeki değişimlerin ölçüm ve model sonuçlarına yansımaları kolaylıkla gözlemlenebilmektedir.

Şekil 4.21'de, 20 mm/sa yağış şiddeti, 25 dakika yağış süresi ve 7 cm çim boyu koşullarındaki farklı alansal yağış senaryoları için ölçüm ve matematiksel model hendek yüzeysel akış sonuçları görülmektedir. Sonuçlar pik debiler açısından değerlendirildiğinde, ölçüm ile model arasındaki en yakın sonuçların sırasıyla R-A, R-C, R-D ve R-B yağış senaryoları için elde edildiği görülmektedir. R-B yağış senaryosunda ise ölçüm pik debi değeri 9.45 l/dk iken modelin hesapladığı pik debi değeri 10.04 l/dk'dır. Aynı grafiklerde modelin, çekilme eğrisini, yükselme eğrisine göre çok daha iyi modellediği sonucuna varılmaktadır. Aynı deney koşulları altında ölçüm ve model hendek drenaj akışı kıyaslandığında (Bkz. Şekil 4.37) model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasında oldukça yüksek bir uyum olduğu görülmektedir. Hatta Hendek Drenaj Akış Modelinin, Hendek Yüzeysel Akış Modelinden daha etkin çalıştığı görülmektedir. Şekil 4.33'te farklı yağış şiddeti ve yağış süreleri altında hendek yüzeysel akış ölçüm ve model sonuçlarının kıyaslamasına yer verilmiştir. Yağış şiddeti ve yağış süresinin artmasıyla ölçüm ve model sonuçları arasındaki uyum da artmaktadır. Bu kıyaslamada, en düşük uyumun 20 mm/sa yağış şiddeti ve 15 dk yağış süresi için yürütülen deney ile model sonuçlarında olduğu görülmektedir. Yağış şiddeti ile yağış süresi arttıkça pik debi, yükselme ve çekilme eğrisi davranışı model tarafından oldukça iyi bir şekilde belirlenmiştir. Farklı yağış şiddeti ve yağış süresi için hendek drenaj akışı ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.38'de görülmektedir. Matematiksel modelin drenaj pik debi değerleri ile yükselme ve çekilme eğrisi davranışlarını oldukça iyi bir şekilde belirlediği görülmektedir. Şekil 4.34'te 20 ve 30 mm/sa yağış şiddetleri, 25 dk yağış süresi ve R-A alansal yağış senaryosu ile farklı çim boyu koşulları altında yürütülen deneylerden elde edilen ölçüm ve model hendek yüzeysel akış değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Yağış şiddeti arttıkça matematiksel modelin hendek yüzeysel akış davranışını temsil etme yeteneği de artmaktadır. Özellikle modelin pik debiye ulaşma süreleri, pik debi değerleri ile çekilme eğrisi profilinin ölçüm sonuçlarıyla oldukça uyumlu

oldukları görülmektedir. Benzer deney koşulları altında modelin hendek drenaj akışı davranışını belirlemede de oldukça etkin olduğu ancak çekilme eğrisi profillerinde ölçüm sonuçlarıyla az da olsa farklılık sergilediği sonucuna varılmıştır. Farklı alansal yağış senaryolarının, 30 mm/sa yağış şiddeti, 25 dk yağış süresi ile 7 cm çim boyu koşullarındaki etkilerinin gözlemlendiği deney sonuçları ile model sonuçları Şekil 4.35'te sunulmuştur. Önceki ölçüm ve model sonucu kıyaslamalarından da görüldüğü gibi yağış şiddeti ve süresi arttıkça modelin hendek yüzeysel akış davranışını oldukça iyi bir şekilde ortaya koyduğu bu sonuçlardan da görülmektedir. R-A, R-C ve R-D alansal yağış senaryolarında pik debi değerleri R-B yağış senaryosuna göre çok daha iyi bir şekilde modellenmiştir. R-B yağış senaryosunda ise ölçüm yüzeysel akış pik debi değeri 15.41 l/dk iken bu değer modelde 14.32 l/dk olarak hesaplanmıştır. Bu durum benzer şekilde hendek drenaj akışı davranışında da görülmektedir. Şekil 4.40 incelendiğinde, R-A, R-C ve R-D yağış senaryolarında hendek drenaj akışı ölçüm ve model sonuçları arasındaki uyum, R-B yağış senaryosuna göre çok daha iyidir. R-B yağış senaryosundaki farklılık, hendek drenaj akışı çekilme eğrisinde kendisini göstermektedir. 2 farklı yağış şiddeti ile yağış sürelerinin aynı çim boyu ve R-D yağış senaryosu altında ölçüm ve model yüzeysel akış davranışları Şekil 4.36'da gösterilmiştir. 30 mm/sa yağış şiddeti için yağış süresi düştükçe ölçüm ile model sonuçları arasındaki uyum da azalmaktadır. Ancak 20 mm/sa yağış şiddetinde, yağış süresi düştükçe ölçüm ile model sonuçları arasındaki uyum azalmaktadır. 30 mm/sa yağış şiddetinde, 15 ve 25 dk yağış süreleri altında pik debiler arasındaki fark %3 ile %1.9 iken 20 mm/sa yağış şiddeti ile 15 ve 25 dk yağış sürelerinde bu fark % 28 ile %3.7'ye çıkmaktadır. Yağış süresi ile yağış şiddeti arttıkça modelin pik debi ve çekilme eğrisini temsil etme yeteneği artmakta ve ölçüm sonuçlarıyla oldukça uyumlu bir profil sergilemektedir. Aynı deneyler için hendek drenaj akışı değerlendirildiğinde, yağış süresi düştükçe ölçüm ve model sonuçları arasındaki uyumun da düştüğü görülmektedir.

Ölçüm ve geliştirilen matematiksel model sonuçları arasındaki uyumu istatistiksel olarak da ortaya koymak amacıyla her bir deney ve model setleri kıyaslanarak belirtme katsayı (R^2), Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE/Root Mean Square Error) ile Nash Sutcliffe Verim İndeksi (NSE/Nash Sutcliffe Efficiency Coefficient) değerleri hesaplanmıştır. Bu katsayılar hesaplanırken kullanılan formülasyonlar Denklem (4.4)-Denklem (4.6)'de verilmiştir.

$$R^2 = \frac{(\sum(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y}))^2}{\sum(x_i-\bar{x})^2(y_i-\bar{y})^2} \tag{4.4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}{n}} \quad (4.5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (4.6)$$

Denklem (4.4)-Denklem (4.6)'de yer alan;

x_i : Ölçüm verisi değerlerini,

$\bar{x}$: Ölçüm verilerinin ortalamasını,

y_i : Model verisi değerlerini,

$\bar{y}$: Model verilerinin ortalamasını,

n: Veri adedini belirtmektedir.

Ölçüm ve matematiksel model sonuçları arasındaki uyumu gösteren istatistiksel katsayı değerleri yüzeysel akış ve drenaj akışı için sırasıyla Tablo 4.14 ile Tablo 4.15'te verilmiştir.

Tablo 4.14: Hendek yüzeysel akışı için elde edilen ölçüm ve matematiksel model sonuçlarının istatistiksel analizi.

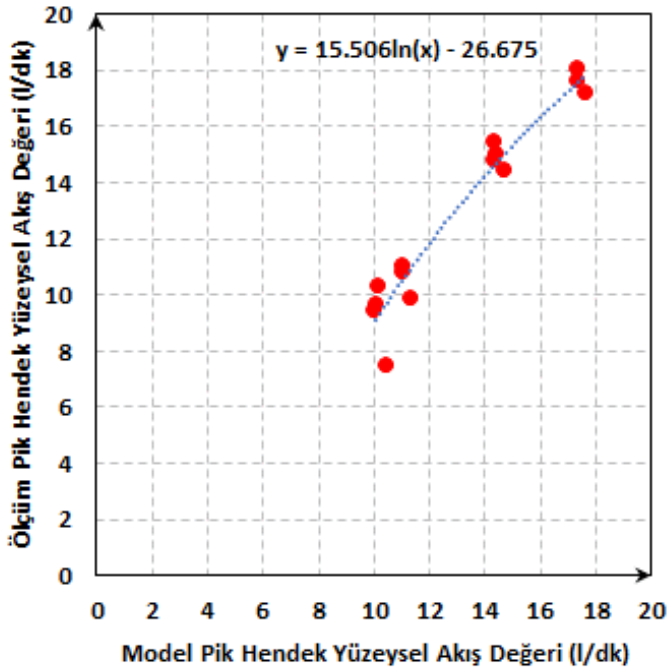
Hendek No.	Yağış Şiddeti (mm/sa)	Yağış Süresi (dk)	Yağış Senaryosu	Çim Boyu (cm)	R^2	RMSE	NSE
Hendek 6	20	25	R-A	7	0.781	2.846	0.591
Hendek 6	20	15	R-A	7	0.823	3.195	0.190
Hendek 6	20	25	R-A	11	0.843	2.313	0.745
Hendek 6	20	25	R-B	7	0.790	2.479	0.576
Hendek 6	20	25	R-C	7	0.831	2.192	0.751
Hendek 6	20	25	R-D	7	0.712	3.075	0.347
Hendek 6	20	15	R-D	7	0.771	3.397	-0.764
Hendek 6	30	25	R-A	7	0.923	2.478	0.893
Hendek 6	30	15	R-A	7	0.925	2.647	0.84
Hendek 6	30	25	R-A	11	0.947	1.977	0.933
Hendek 6	30	25	R-B	7	0.872	2.376	0.857
Hendek 6	30	25	R-C	7	0.896	2.353	0.865
Hendek 6	30	25	R-D	7	0.877	2.633	0.813
Hendek 6	30	15	R-D	7	0.908	2.626	0.736

Tablo 4.15: Hendek drenaj akışı için elde edilen ölçüm ve matematiksel model sonuçlarının istatistiksel analizi.

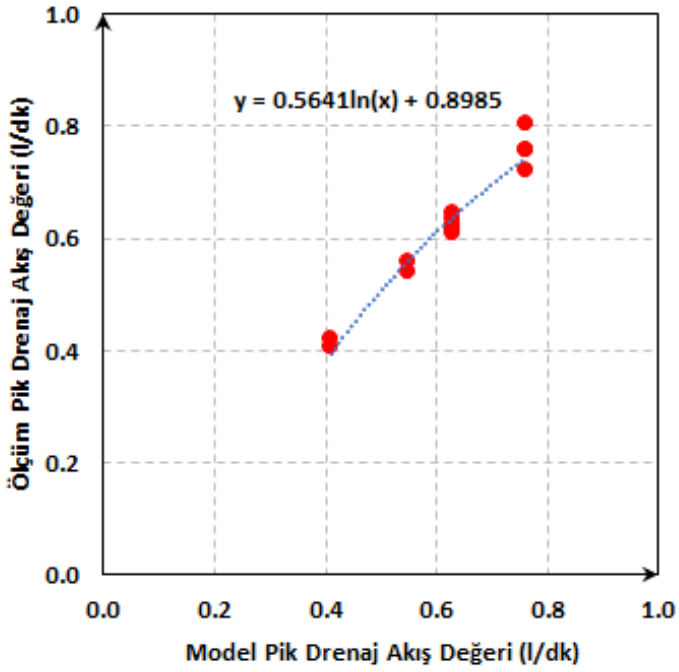
Hendek No.	Yağış Şiddeti (mm/sa)	Yağış Süresi (dk)	Yağış Senaryosu	Çim Boyu (cm)	R^2	RMSE	NSE
Hendek 6	20	25	R-A	7	0.985	0.033	0.982
Hendek 6	20	15	R-A	7	0.988	0.020	0.987
Hendek 6	20	25	R-A	11	0.981	0.060	0.931
Hendek 6	20	25	R-B	7	0.963	0.048	0.947
Hendek 6	20	25	R-C	7	0.988	0.036	0.966
Hendek 6	20	25	R-D	7	0.983	0.044	0.950
Hendek 6	20	15	R-D	7	0.930	0.034	0.920
Hendek 6	30	25	R-A	7	0.970	0.046	0.970
Hendek 6	30	15	R-A	7	0.975	0.030	0.974
Hendek 6	30	25	R-A	11	0.964	0.063	0.924
Hendek 6	30	25	R-B	7	0.963	0.048	0.947
Hendek 6	30	25	R-C	7	0.982	0.028	0.981
Hendek 6	30	25	R-D	7	0.982	0.041	0.957
Hendek 6	30	15	R-D	7	0.940	0.033	0.935

Tablo 4.14'te hendek yüzeysel akışı için ölçüm ve matematiksel model sonuçları ile hesaplanan belirtme katsayısı, Kök Ortalama Kare Hatası ile Nash Sutcliffe Verim İndeksi değerleri yer almaktadır. Bu değerler incelendiğinde en düşük R^2, RMSE ile NSE değerleri sırasıyla 0.712, 1.977 ve -0.764 iken en yüksek değeler ise 0.947, 3.397 ile 0.933'tür. Hendek drenaj akışı için benzer kıyaslamanın yapıldığı Tablo 4.15'te ise yine hesaplanan katsayı değerleri görülmektedir. Bu sonuçlar hem Hendek Yüzeysel Akış hem de Hendek Drenaj Akış Modelinin ölçüm sonuçlarıyla oldukça yüksek bir uyum sergilediklerini ortaya koymaktadır.

Pik hendek drenaj akış değerleri ile yağış şiddeti, yağış süresi ve yağışın havza üzerine düştüğü alan değeri arasındaki ilişkiyi veren denklem çok değişkenli regresyon yöntemiyle bulunmuş ve Denklem 4.7'de sunulmuştur. Böylelikle hendek yüzeysel akış hesabı için geliştirilen modelin pik debi girdisi bu denklem ile sağlanmış olacaktır. Şekil 4.42'de ölçüm pik hendek yüzeysel akış değerleri ile matematiksel model pik hendek yüzeysel akış saçılım grafiği sunulmuştur. Benzer şekilde hendek drenaj akışı için elde edilen saçılım grafiği de Şekil 4.43'de yer almaktadır. Denklem 4.7'de yer alan i, yağış şiddetini (mm/sa), tr, yağış süresini (dk), A, yağışın düştüğü havza alanını (m^2) ve Q_{pik_drenaj}, pik drenaj debisini temsil etmektedir.



Şekil 4.42: Ölçüm ve model pik hendek yüzeysel akış değerlerinin saçılım grafiği.



Şekil 4.43: Ölçüm ve model pik drenaj akış değerlerinin saçılım grafiği.

$$Q_{pik_drenaj} = 0.0165 * i^{0.0964} * \mathrm{tr}^{0.7306} * \mathrm{A}^{0.3213} \quad (4.7)$$

5. TARTIŞMA

5.1. YHY ile YAPILAN HİDROLOJİK DENEYLERE AİT TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, yağmur hendeklerinin hidrolojik davranışı farklı yağış senaryoları altında test edilmiştir. Bu amaçla, farklı yüzey malzemeleri ve farklı toprak yapısından meydana gelen 6 farklı hendek konfigürasyonu tasarlanmıştır. Yağış şiddeti ve sürelerinin hendeklerin karakteristik davranışlarına etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla farklı yağış şiddeti ve süreleri belirlenmiştir. Dikkate alınan yağış şiddetleri 20 mm/sa ile 30 mm/sa iken, yağış süreleri ise 15 ve 25 dk olarak seçilmiştir. Farklı yağış şiddeti ve sürelerinin hendek yüzeysel akış davranışı ile hendek drenaj akış davranışında belirgin farklılıklara neden olduğu görülmüştür. Yağış sürelerindeki değişimin özellikle hendek yüzeysel akış hidrograflarının pik debi davranışlarını değiştirdiği gözlemlenmiştir. Şöyle ki; yağış süresi arttıkça pik debinin yaklaşık olarak sabit görüldüğü süre de artmaktadır. Bu durumun temelinde yatan ana unsur geçiş süresidir. Bu durum aynı zamanda hendeklerin drenaj performanslarını da etkilemektedir. Yağış şiddeti değerleri arttıkça, ölçülen drenaj debisi değerleri de artmaktadır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, yağış şiddeti ve süreleri arttıkça hendeklerin hidrolojik performanslarında düşüşlerin meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Farklı havza alanı etkilerinin ortaya konduğu R-A, R-B, R-C ve R-D alansal yağış senaryoları için hendek davranışları gözlemlenmiştir. R-A yağış senaryosunda 40 m^2 havza alanına yağış düşerken diğer senaryolarda yağışın düştüğü havza alanı 20 m^2 olup havza üzerindeki dağılımı farklılık göstermektedir. Diğer bir deyişle bu yağış senaryolarında, havza üzerine düşen yağışın havza çıkışına ulaşma süreleri farklılık göstermektedir. R-A yağış senaryosu için havza çıkışında ölçülen pik debi değeri diğer yağış senaryolarından daha yüksektir. Havza çıkışına iletilen yüzeysel akış değerleri arttıkça, hendeklerin drenaj çıkışında ölçülen drenaj debisi değerlerinde de artış olduğu gözlemlenmiştir.

Tasarlanan hendek konfigürasyonlarının yüzeyleri iri agrega, farklı tipte rulo çim ve ekili çimden meydana gelmektedir. Farklı hendek yüzeyleri, sahip oldukları farklı yüzey pürüzlülük özelliklerinden dolayı hendek yüzeysel akış davranışını etkilemektedir. Bu durum geçiş sürelerine de yansımaktadır. Çim yüzeylerden oluşan hendek konfigürasyonlarındaki geçiş sürelerinin iri agregalardan meydana gelen hendek konfigürasyonlarındaki geçiş sürelerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Hidrolik iletkenlik özelliklerinin etkilerini gözlemlemek amacıyla hendek tasarımlarında farklı iletkenlik özelliklerine sahip toprak ve toprak-kum karışımları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan 6 farklı hendek konfigürasyonu, bitkisel toprak ve belirli oranlarda bitkisel toprak-kum karışımı gibi farklı toprak tabakalarından meydana gelmektedir. Hendeklerdeki farklı toprak tabakaları farklı hidrolik iletkenlik özelliğine sahip olup bu durum hendek yüzeysel akış ve hendek drenaj akış davranışlarını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Hendekleri teşkil eden toprak tabakalarının hidrolik iletkenlik değerleri arttıkça, hendek çıkışında ölçülen pik hendek yüzeysel akış değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Bununla birlikte hidrolik iletkenlik özelliklerindeki değişimler hendeklerin drenaj akış davranışlarına da yansımıştır. En düşük hidrolik iletkenlik değerine sahip toprak tabakası olan Hendek 1'de olup pik hendek yüzeysel akış debisinde pik havza yüzeysel akış debisine göre hiç düşüş ölçülmezken, en yüksek hidrolik iletkenlik değerine sahip toprak tabakası olan Hendek 6'da ise belirgin düzeyde pik debi düşüşleri gözlemlenmiştir. Hendek 1 ile Hendek 6'nın drenaj performansları kıyaslandığında, drenaj performanslarındaki farklılığın toprak tabakalarındaki kil-silt içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Rulo çim uygulamalarının hendek yüzeyinde kullanıldığı Hendek 3 ile Hendek 4'ün hidrolojik davranış açısından Hendek 1'e benzer davranış sergilediği görülmüştür. Hendek 3 ile Hendek 4'te kullanılan toprak tabakası, Hendek 1'de kullanılan toprak tabakasına oranla daha yüksek hidrolik iletkenlik özelliğine sahiptir. Ancak hidrolojik davranıştaki benzerliğin altında yatan neden, rulo çimlerin yetiştirildiği toprakların hidrolik iletkenlik değerlerinin düşük olmasıdır. Şöyle ki; deneylerde kullanılan rulo çimlerin altında birkaç cm yüksekliğinde bir toprak katmanı bulunmaktadır. Bu katman, drenajı düşürdüğünden dolayı Hendek 3 ve Hendek 4, Hendek 1 ile benzer davranış sergilemiştir. Bu duruma ilişkin görsel aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 5.1: Rulo çimin yetiştirildiği toprak tabakası ile hendek ana toprak tabakası arasındaki görsel fark.

Yürütülen deneysel çalışmada çim boyundaki değişimin etkileri de araştırılmıştır. Bu bağlamda 2 farklı çim boyunun etkileri gözlemlenmiştir. Deneysel çıktılar, aynı yağış şiddeti, yağış süresi ve alansal yağış senaryosu için çim boyundaki değişimin hidrolojik performansta belirgin bir değişikliğe neden olmadığını göstermiştir. Bu sonuç, hendek yüzeyinde oluşan akım derinliğinin çim boyundan daha küçük olmasına bağlanmıştır. Diğer bir deyişle, hendek yüzeyinde batık akım koşullarının sağlanamaması, çim boyundaki değişimi etkisiz kılmıştır. Deneyler esnasında hendek yüzeyinde oluşan akım derinliğinin küçük olması ve seçilen çim yüksekliklerinden daha büyük olacak şekilde sağlanamaması, çim boyundaki değişimin etkilerinin detaylı olarak araştırılamamasına neden olmuştur. Bununla birlikte, bitkili yağmur hendeklerinin yüzeyinde oluşan akım derinliğinin çim boyundan daha küçük olması istenmektedir. Çim boyunun akım derinliğinden daha küçük olması, yağmur hendeklerinin su kalitesi performanslarını arttırmaktadır (Kirby ve diğ. (2005)).

5.2. EPA SWMM ile YHY DENEY DÜZENEĞİNİN MODELLENMESİ AİT TARTIŞMA

EPA SWMM programı, biyotutma, yağmur bahçesi, yeşil çatı, sızdırma hendeği, geçirgen kaldırım, yağmur tankı ve bitkili yağmur hendeği gibi DEK türlerinin modellemesinde kullanılan az sayıdaki programlardan birisidir. Büyük ölçekli laboratuvar deneylerinden elde edilen hendek yüzeysel akış değerleri kullanılarak EPA SWMM programının bitkili yağmur hendeğinin performansını belirlemedeki etkinliği test edilmiştir. Modelleme çalışmasında hem havza alanı hem de bitkili yağmur hendeği modellenmiştir. Havza alanının modellenmesinde, farklı alansal yağış senaryolarını temsil edebilmek için alt havza sayısının artırılması ile, havza alanı çıkışında ölçülen yüzeysel akış değerleri ile model sonuçları arasındaki uyumun azalmasına neden olduğu görülmüştür. Bu husus programın bir dezavantajı olarak tartışılabilir. Havza alanının modellenmesinde farklı alansal yağış senaryolarının de pik debiye ulaşma sürelerinde değişikliğe neden olduğu sonucuna varılmıştır.

EPA SWMM programında bitkili yağmur hendeği gibi DEK türleri modellenirken Kontrol Editöründen yararlanılmaktadır. Bu Kontrol Editörü farklı DEK türleri için Yüzey, Toprak, Depolama gibi değişik sayıda katman ve tasarım parametresi içermektedir. Tüm DEK türleri için Kontrol Editörleri incelendiğinde en az sayıda katman ve tasarım parametresini içeren DEK türlerinin yağmur tankı ile bitkili yağmur hendeği olduğu görülmüştür. Bitkili yağmur hendeği için yüzey katmanı olarak tek bir katman bulunmakta ve aşma yüksekliği, bitkisel hacim oranı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey eğimi ile şev eğimi tasarım parametreleri yer almaktadır. Diğer DEK türleriyle kıyaslandığında bu tasarım parametresi sayısının oldukça az olduğu söylenebilir. Ayrıca, EPA SWMM mevcut durumda hendek içinde sızarak hendek tabanından çıkan drenaj akışını modelleyememektedir. Bu durum, EPA SWMM programının bir diğer dezavantajını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik davranışının ortaya konmasında dikkate alınan tasarım parametresi sayısının artması, EPA SWMM programının modelleme kabiliyetini arttıracağı düşünülmektedir. Genel itibariyle hem havza alanı hem de bitkili yağmur hendeğinin performansının EPA SWMM programıyla modellenmesinde ölçüm ile model sonuçlarının birbirleriyle oldukça uyumlu oldukları söylenebilir. Bu durum istatistiksel olarak da ortaya konmuştur. Model ile ölçüm sonuçları arasındaki uyumu ortaya koyan belirtme katsayı değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, yağış süresi düştükçe EPA SWMM programının bitkili yağmur hendeğinin davranışını ortaya koymadaki kabiliyetinin azaldığı görülmüştür. Hem havza alanı hem de hendeğin

modellenmesinde Manning pürüzlülük katsayısı değerinin yüzeysel akış davranışında belirgin etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Kalibrasyon aşamasında, açık kanal yapılarında bitkili yüzeyler için tanımlanan referans Manning katsayı değerleri kullanılmıştır. Manning katsayısındaki değişimin hendek yüzeysel akış davranışını belirgin bir şekilde değiştirdiği görülmüştür. Bununla birlikte model kalibrasyonunda başlangıç toprak nemi koşulları da önemli bir yer tutmaktadır. Modelleme aşamasında bu parametrenin de etkinliği test edilmiştir.

5.3. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİ HİDROLOJİSİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELE AİT TARTIŞMA

Bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik davranışını ortaya koymak amacıyla matematiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model birbirleriyle entegre olarak çalışan "Hendek Yüzeysel Akış Modeli" ile "Hendek Drenaj Akış Modeli"nden meydana gelmektedir. Geliştirilen modelde birçok parametre kullanılmıştır. Farklı yağış senaryolarının etkileri hendek yüzeysel akış modelinde değerlendirildiğinde, model ile ölçüm sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Ancak R-B yağış senaryosu için pik hendek yüzeysel akış değeri ile ölçüm sonucu arasındaki uyum diğer yağış senaryolarına göre farklılık içermektedir. Bu durum hidrografların çekilme eğrisi davranışına da yansımıştır. R-B yağış senaryosu için çekilme eğrisi davranışı diğer yağış senaryolarına göre daha iyi modellenmiştir. Yağış süresi de modelde bir girdi olarak yer almaktadır. Yağış süresindeki değişimin modelin hendek yüzeysel akış hesaplama performansına etkisi dikkate alındığında, yağış şiddeti ve yağış süresi düştükçe model ile ölçüm sonuçlarının uyumunun azaldığı görülmüştür. Ancak 30 mm/sa yağış şiddeti ile 15 dk yağış süresi koşullarında model ile ölçüm sonuçları oldukça uyumludur. Bu durum yağış şiddetinin daha etkin bir parametre olduğunu göstermektedir. EPA SWMM programı kullanılarak yürütülen modelleme çalışmasında olduğu gibi matematiksel modelde de çim boyu etkisi dikkate alınamamıştır. Bu husus geliştirilen matematiksel modelin bir dezavantajıdır. Bununla birlikte Hendek Yüzeysel Akış modelinin hidrograf çıktıları incelendiğinde, hidrografların yükselme eğrisi davranışının model tarafından tam olarak hesaplanamadığı görülmüştür. Bunun altında yatan nedenin matematiksel modelin hendek yüzey altı depolama kapasitesini dikkate almamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hendek yüzeysel akış modelinin kalibrasyonunda Manning Katsayısı değerinin model sonuçlarında oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Hendek yüzeysel akış sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, ölçüm ile model sonuçlarının oldukça tutarlı oldukları görülmektedir. Matematiksel modelin, hendeğin drenaj akış davranışını oldukça iyi bir şekilde modellediği görülmektedir. Bu durum, Hendek Drenaj Akış Modelinde yer alan parametrelerin uygun bir şekilde geliştirildiği ve drenaj davranışını temsil ettiğini göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik performans ve davranışını açıklayabilmek üzere deneysel, sayısal ve matematiksel yöntemler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar Yağış-Havza-Yağmur Hendeği (YHY) deney düzeneği ile sayısal çalışmalar EPA SWMM modeliyle ve matematiksel çalışmalar ise deneysel ölçümlerden faydalanarak matematiksel denklemler geliştirilmesi ile yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar 3 ana başlıkta özetlenmiştir.

6.1. YHY ile YAPILAN HİDROLOJİK DENEYLERE AİT SONUÇ ve ÖNERİLER

Bitkili yağmur hendeklerinin hidrolojik performanslarını gözlemlemek amacıyla büyük ölçekli hendek modülü tasarlanmış ve açık alanda yer alan Yağış-Havza-Biyotutma (YHB) deney sistemine entegre edilerek kurulumu gerçekleştirilmiştir. Yağmurlama sistemi, havza alanı ve hendek modülünden meydana gelen bu deney düzeneği yardımıyla yağmur hendeğinin hidrolojik davranışı üzerinde etkin olduğu düşünülen birçok parametre kontrollü laboratuvar deneyleriyle test edilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

1. Yağmur hendeklerinin sergiledikleri hidrolojik davranış göz önünde tutulduğunda, ekonomik ve çevre dostu olan bu yapıların bir yağmur suyu yönetim stratejisi olarak tercih edilebileceği görülmüştür.

2. Yağış şiddeti ve süresi arttıkça, yağmur hendeklerinin performanslarının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu yapıların düşük yağış şiddetlerine sahip yağış olaylarında daha etkin oldukları sonucuna varılmıştır.

3. Hidrolik iletkenliğin etkilerini ortaya koymak amacıyla farklı hendek konfigürasyonlarından yararlanılmıştır. Bu hendek konfigürasyonlarının toprak tabakaları farklı hidrolik iletkenlik özelliklerine sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Hendeği oluşturan toprak tabakasının hidrolik iletkenlik değeri arttıkça, hendeklerin havza yüzey akışı pik debisini düşürme kabiliyetlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum aynı zamanda hendek drenaj debilerinde de artışa neden olmuştur.

4. Günümüzde rulo çim uygulamaları özellikle peyzaj alanlarında yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Uygulama kolaylıkları dikkate alınarak tercih edilen rulo çimlerin hendek hidrolojik davranışına etkilerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Hendek yüzeyinde çeşitli tipte rulo çimin kullanıldığı durumda, hendeğin hidrolojik performansının düştüğü görülmüştür. Bu durumun, rulo çimlerin yetiştirildiği toprağın kil ve silt içeriğinin yüksek olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Rulo çim uygulamalarının tercih edileceği durumlarda, rulo çimlerin yetiştirildiği toprağın kil ve silt oranının, hendeğin toprak tabakasındaki kil ve silt oranına yakın olması tercih edilmelidir. Böylelikle hendek performansındaki düşüşlerin önüne geçilebileceği öngörülmüştür.

5. Yüzey pürüzlülüğünün etkilerini ortaya koymak amacıyla hendek yüzeyleri iri agrega, rulo çim ve ekilen çim ile kaplanmıştır. Bu farklı uygulamaların hem hendek yüzey akışı pik debisine ulaşma hem de hem de hendek drenaj akışı davranışı açısından farklılık oluşturduğu gözlemlenmiştir. Hendek yüzeylerinin çim ile kaplı olduğu konfigürasyonlarda, hendek yüzey akışı pik debisine ulaşma sürelerinin arttığı görülmüştür.

Bu çalışma, hendeklerin hidrolojik davranışında etkin olduğu düşünülen birçok parametreyi kontrollü laboratuvar deneyleriyle test etme olanağı sağlamıştır. Etkin bir bitkili kuru yağmur hendeği uygulamasında toprak tabakasının geçirgenlik özelliğinin büyük öneme sahip olduğu görülmüştür. Yağmur hendeği yüzeyinde bitki yetiştirilmesine olanak sağlayacak yüksek geçirgenliğe sahip toprakların kullanılması drenaj performansının arttırılması açısından önemlidir. Bununla birlikte bitkilendirilmiş yüzeylerin Manning Katsayısında artışa neden olarak akımı geciktirme ve pik debiye ulaşma sürelerini belirgin bir şekilde değiştirdiği görülmüştür. Bu nedenle hendek yüzey akımını geciktirme ve pik debiye ulaşma sürelerini arttıracağından bitkilendirilmiş yüzey uygulamaları tavsiye edilmektedir. Ancak bu tip uygulamaların tasarım aşamasında etkin bir şekilde modellenmeleri de gerekmektedir. Bu tez kapsamında yine literatürde bitkili yağmur hendeklerinin modelleme çalışmalarına ilişkin yer alan boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

6.2. EPA SWMM ile YHY DENEY DÜZENEĞİNİN MODELLENMESİNE AİT SONUÇ ve ÖNERİLER

EPA SWMM programı, DEK türlerinin modellenmesinde kullanılabilecek az sayıdaki programlardan birisidir. Bu çalışma kapsamında, EPA SWMM programının bitkili yağmur hendeğini modelleme kabiliyeti test edilmiştir. EPA SWMM programı kullanılarak YHY deney sisteminin modeli oluşturulmuştur. Deneylerden elde edilen ölçüm sonuçlarıyla modelleme çalışmasının sonuçları analiz edildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. EPA SWMM programı, biyotutma, yağmur bahçesi, yeşil çatı, sızdırma hendeği, geçirgen kaldırım, yağmur tankı ve bitkili yağmur hendeğinin modellenmesine olanak sağlayan oldukça az sayıdaki programlardan birisidir. EPA SWMM programı DEK uygulamalarının modellenmesinde farklı katmanları dikkate almakta ve birçok tasarım parametresinin programa girdi olarak sunulmasına olanak sağlamaktadır. Tüm DEK tipleri için programın barındırdığı katman ve tasarım parametre sayısı göz önünde bulundurulduğunda tek katmanla tanımlanan ve en az sayıda tasarım parametresi içeren DEK türünün bitkili yağmur hendeği olduğu görülmektedir. Bu duruma rağmen, EPA SWMM programının bitkili yağmur hendeğinin modellenmesinde tercih edilebilecek bir program olduğu sonucuna varılmıştır.

2. EPA SWMM programında, bitkili yağmur hendeği sadece yüzey katmanı ile tanımlanmakta ve program çıktı olarak sadece hendek yüzey akışını vermektedir. Bitkili yağmur hendeklerinin çalışma prensipleri göz önünde bulundurulduğunda, bu uygulamaların yüzey dışında toprak, depolama ve drenaj katmanlarını ve bu katmanlara ait parametreleri de içermesi gerekmektedir. Bu katmanların ve ilgili parametrelerin programa dahil edilmesiyle hendek drenaj akışı gibi bitkili yağmur hendeklerinin hidrolojik davranışında önemli rol oynayan diğer çıktılar da elde edilebilecek ve hendek çok daha etkin bir şekilde modellenebilecektir.

6.3. BİTKİLİ YAĞMUR HENDEĞİ HİDROLOJİSİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELE AİT SONUÇ ve ÖNERİLER

Bitkili yağmur hendeğinin hidrolojik davranışının matematiksel model yardımıyla ortaya konması bu tür uygulamaların tasarımı açısından büyük önem kazanmıştır. Bu çalışma kapsamında, entegre olarak geliştirilmiş Hendek Yüzeysel Akış Modeli ile Hendek Drenaj Akış Modeli sayesinde bitkili yağmur hendeğinin hem hendek yüzey akışı hem de hendek drenaj akışı hesaplama yöntemi ortaya konmuştur. Geliştirilen modellere ait denklemler, MATLAB programlama dili kullanılarak çözümlenmiş ve geliştirilen modelin bitkili yağmur hendeğinin davranışını ortaya koymadaki yeteneği deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

1. Bitkili yağmur hendeklerinin hidrolojik davranışını ortaya koymak amacıyla geliştirilen matematiksel model literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmuştur.

2. Geliştirilen matematiksel modelin, bitkili yağmur hendeğinin hem hendek yüzey akışı hem de hendek drenaj akışı davranışını etkin bir şekilde hesaplayabildiği sonucuna varılmıştır. Hendek yüzeysel akış davranışında pik debi, gecikme süresi ve çekilme eğrisi profilleri, yükselme eğrisi profillerine göre çok daha iyi bir şekilde modellenmiştir. Matematiksel model, hendek drenaj akış davranışı açısından değerlendirildiğinde ölçüm ve model sonuçları arasındaki uyumu gösteren belirtme katsayısı değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

3. Matematiksel modelin yağış şiddeti ve süresi arttıkça yağmur hendeği davranışını modellemedeki etkinliğinin de arttığı görülmüştür. Bununla birlikte yağış şiddeti ve süresi düştükçe model yeterliliği azalmaktadır.

4. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen matematiksel modelin bitkili yağmur hendeklerinin tasarım aşamasında tercih edilebilecek bir model olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

Abida, H. and Sabourin, J.F., 2006, Grass swale-perforated pipe systems for stormwater management, Journal of irrigation and drainage engineering, 132(1(55)).

Abida, H., Sabourin, J.F. and Ellouze, M., 2007, ANSWAPPS: Model for the analysis of grass swale-perforated pipe systems, Journal of irrigation and drainage engineering, 211–221.

Ackerman, D. and Stein, E.D., 2008, Evaluating the effectiveness of best management practices using dynamic modeling, Journal of environmental engineering, Vol. 134, 628–639.

Afet yönetimi kapsamında 2019 yılına bakış ve doğa kaynaklı olay istatistikleri, 2020, Türkiye Cumhuriyeti İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

American Society for Testing and Materials. 2009. Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), ASTM D2434-19. ASTM International, West Conshohocken.

American Society for Testing and Materials. 2009. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM D6913-04(2009)e1. ASTM International, West Conshohocken.

Bäckström, M., 2002, Sediment transport in grassed swales during simulated runoff events, Water science and technology, Vol. 45, No 7, pp 41–49.

Barrett, M.E., 2005, Performance comparison of structural stormwater best management practices, Water environment research, Wiley, 77(1), 78–86.

Barrett, M.E., 2008, Comparison of BMP performance using the international BMP database. Journal of irrigation and drainage engineering, Vol. 134, No. 5.

Bayazıt, M., Önöz, B., 2007, Taşkın ve Kuraklık Hidrolojisi, Nobel Akademik Yayıncılık, İstanbul.

Bedan, E.S., Clausen, J.C., 2009, Stormwater runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds, 1. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), 45(4), 998–1008.

Bettess, R., 1996, Infiltration drainage – manual of good practice Report 156, CIRIA, London.

Bouchard, N.R., Osmond, D.L., Winston, R.J., Hunt, W.F., 2013, The capacity of roadside vegetated filter strips and swales to sequester carbon, Ecological engineering, 54, 227–232.

Burton, G.A. and Pitt, R.E., Stormwater effects handbook, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.

Calkins, M., 2012, The sustainable sites, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. ISBN: 978-0-470-64355-6 (hardback); 978-1-118-10003-5 (ebk.); 978-1-118-10004-2 (ebk.); 978-1-118-10608-2 (ebk.); 978-1-118-10609-9 (ebk.); 978-1-118-10611-2 (ebk.).

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988, Applied hydrology, McGraw-Hill Inc., United State of America, ISBN: 0-07-010810-2.

Ciou, S.K., Kuo, J.T., Hsieh, P.H. and Yu, G.H., 2012, Optimization model for BMP placement in a reservoir watershed, Journal of irrigation and drainage engineering, 648, 736–747.

City of Eugene Stormwater Management Program, 2002, Stormwater best management practices manual for quality and flow control City of Eugene SMP, Oregon.

Davis, A.P., Stagge, J.H., Jamil, E. and Kim, H., 2012, Hydraulic performance of grass swales for managing highway runoff, Water research, Elsevier Ltd., 46(20), 6775–6786.

Deletic, A., 2005, Sediment transport in urban runoff over grassed areas, Journal of hydrology, 301(1–4), 108–122.

Deletic, A., 2001, Modelling of water and sediment transport over grassed areas, Journal of hydrology, 248, 168–182.

Deletic, A., Fletcher, T.D., 2006, Performance of grass filters used for stormwater treatment - A field and modelling study, Journal of hydrology, 317(3–4), 261–275.

Fiala, M., Hwang, H.M., 2019, Development of a static model to identify best management practices for trace metals from non-exhaust traffic emissions, Environmental processes, 6(2), 377–389.

Gao, J., Pan, J., Tang, R., Guo, S. and Liu, Y., 2019, LID facility layout and hydrologic impact simulation in an expressway service area, Polish journal of environmental studies, HARD Publishing Company, 28(6), 4153–4162.

Gao, J., Wang, R., Huang, J. and Liu, M., 2015, Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: Case study in an industrial area, Ecological modelling, Elsevier, 318, 177–183.

Gavrić, S., Larm, T., Österlund, H., Marsalek, J., Wahlsten, A., Viklander, M., 2019, Measurement and conceptual modelling of retention of metals (Cu, Pb, Zn) in soils of three grass swales, Journal of hydrology, 574, 1053–1061.

Gavrić, S., Leonhardt, G., Marsalek, J., Viklander, M., 2019, Processes improving urban stormwater quality in grass swales and filter strips: A review of research findings, Science of the total environment, Elsevier B.V., 431–447.

Gavrić, S., Leonhardt, G., Österlund, H., Marsalek, J., Viklander, M., 2021, Metal enrichment of soils in three urban drainage grass swales used for seasonal snow storage, Science of the total environment, 760.

Gold Coast City Council, 2005, Gold coast planning scheme policies, Policy 11: Land development guidelines, Section 13 Water sensitive urban design (WSUD) guidelines.

Gülbaz, S. and Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2016, Experimental investigation on hydrologic performance of LID with rainfall-watershed-bioretention system, Journal of hydrologic engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE).

Horstmeyer, N., Huber, M., Drewes, J.E., Helmreich, B., 2016, Evaluation of site-specific factors influencing heavy metal contents in the topsoil of vegetated infiltration swales, Science of the total environment, 560–561, 19–28.

Hwang, C.C., Weng, C.H., 2015, Effects of rainfall patterns on highway runoff pollution and its control, Water and environment journal, 29(2), 214–220.

Hwang, H.M., Fiala, M.J., Park, D., Wade, T.L., 2016, Review of pollutants in urban road dust and stormwater runoff: part 1. Heavy metals released from vehicles, International journal of urban sciences, Routledge, 334–360.

Imteaz, M.A., Ahsan, A., Rahman, A. and Mekanik, F., 2013, Modelling stormwater treatment systems using MUSIC: Accuracy, resources conservation and recycling, 71, 15–21.

Jy Wu, B.S., Allan, C.J., Saunders, W.L. and Evett, J.B., 1998, Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff, Journal of environmental engineering, Vol. 124.

Kavehei, E., Jenkins, G.A., Adame, M.F., Lemckert, C., 2018, Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure, Renewable and sustainable energy reviews, Elsevier Ltd., 1179–1191.

Kazezyılmaz-Alhan, C.M., Medina, M.A., Rao, P., 2005, On numerical modeling of overland flow, Applied mathematics and computation, 166, 724-740.

Kirby, J.T., Durrans, S.R., Pitt, R., Johnson, P.D., 2005, Hydraulic resistance in grass swales designed for small flow conveyance, Journal of hydraulic engineering, Vol. 131, No. 1, 65-68.

Koch, B.J., Febria, C.M., Gevrey, M., Wainger, L.A., Palmer, M.A., 2014, Nitrogen removal by stormwater management structures: A data synthesis, Journal of the american water resources association, 50(6), 1594–1607.

Leopold, L.B., 1968, Hydrology for Urban Land Planning—A Guidebook on the hydrologic effects of urban land use: U.S. Geological Survey, Circular, 554, 18.

Leroy, M.C., Legras, M., Marcotte, S., Moncond'huy, V., Machour, N., Le Derf, F., Portet-Koltalo, F., 2015, Assessment of PAH dissipation processes in large-scale outdoor mesocosms simulating vegetated road-side swales, Science of the total environment, 520, 146–153.

Leroy, M.C., Marcotte, S., Legras, M., Moncond'huy, V., Le Derf, F., Portet-Koltalo, F., 2017, Influence of the vegetative cover on the fate of trace metals in retention systems simulating roadside infiltration swales, Science of the total environment, 580, 482–490.

Leroy, M., Portet-Koltalo, F., Legras, M., Le derf, F., Moncond'huy, V., Polaert, I., Marcotte, S., 2016, Performance of vegetated swales for improving road runoff quality in a moderate traffic urban area, Science of the total environment, 566–567, 113–121.

Li, J., Che, W., 2011, Non-piont source pollution and stormwater management practices of parking lot, 2011 International conference on remote sensing, environment and transportation engineering, RSETE 2011-Proceedings, 499–502.

Li, Y., Huang, J.J., Hu, M., Yang, H. and Tanaka, K., 2020, Design of low impact development in the urban context considering hydrological performance and life-cycle cost, Journal of flood risk management, Blackwell Publishing Inc., 13(3).

Liu, Y., Bralts, V.F. and Engel, B.A., 2015, Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model, Science of the total environment, Elsevier, 511, 298–308.

McCuen, R.H., Johnson, P.A., Ragan, R.M., 1996, Highway Hydrology, Federal Highway Administration, Washington DC.

Mei, C., Liu, J., Wang, H., Yang, Z., Ding, X. and Shao, W., 2018, Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed, Science of the total environment, Elsevier B.V., 639, 1394–1407.

Minnesota Pollution Control Agency (MPCA), 2000, Protecting water quality İn urban areas: Best management practices for dealing with stormwater runoff from urban, suburban and developing areas of minnesota, Minneapolis, St. Paul, USA.

Monrabal-Martinez, C., Aberle, J., Muthanna, T.M. and Orts-Zamorano, M., 2018, Hydrological benefits of filtering swales for metal removal, Water Research, Elsevier Ltd., 145, 509–517.

Moores, J.P., Pattinson, P.E., Hyde, C.R., 2013, Variations in highway stormwater runoff quality and stormwater treatment performance in relation to the age of porous friction courses, Water environment research, 85(9), 772–781.

Perales-Momparler, S., Hernández-Crespo, C., Vallés-Morán, F., Martín, M., Andrés-Doménech, I., Andreu Álvarez, J., Jefferies, C., 2014, SuDS efficiency during the start-up period under mediterranean climatic conditions, Clean - soil air water, 42(2), 178–186.

Rezaei, A.R., Ismail, Z., Niksokhan, M.H., Dayarian, M.A., Ramli, A.H. and Yusoff, S., 2021, Optimal implementation of low impact development for urban stormwater quantity and quality control using multi-objective optimization, Environmental monitoring and assessment, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 193(4).

Richman, T., Lichten, K.H., Worth, J. and Ferguson, B.K., 1998, Vegetated swales landscape architect technical İnformation series (LATIS), American society of landscape architects, Washington DC.

Robinson, J., 2020, Mesocosm studies to resolve the fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in grass swales as components of Sustainable Drainage System (SuDS) treatment trains, Ph.D., University of Portsmouth.

Rommel, S.H., Ebert, V., Huber, M., Drewes, J.E., Helmreich, B, 2019, Spatial distribution of zinc in the topsoil of four vegetated infiltration swales treating zinc roof runoff. Science of the total environment, 672, 806–814.

Rossman, L.A., 2015, Storm water management model user's manual version 5.1, Division national risk management research laboratory, Cincinnati, Ohio, US Environmental Protection Agency, EPA- 600/R-14/413b.

Rossman, L.A., Huber, W.C., 2016, Storm water management model reference manual volume III – Water quality, division national risk management research laboratory, Cincinnati, Ohio, US Environmental Protection Agency, EPA/600/R-16/093.

Rujner, H., Leonhardt, G., Marsalek, J., Perttu, A.M. and Viklander, M., 2018, The effects of initial soil moisture conditions on swale flow hydrographs, Hydrological processes, John Wiley and Sons Ltd., 32(5), 644–654.

Rujner, H., Leonhardt, G., Marsalek, J., Perttu, A.M. and Viklander, M., 2018, High-resolution modelling of the grass swale response to runoff inflows with Mike SHE, Journal of hydrology, 562, 411–422.

Rushton, B.T., 2001, Low-Impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads, Journal of water resources planning and management, Vol. 127.

Stagge, J.H., Davis, A.P., Jamil, E., Kim, H., 2012, Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff, Water research, 46(20), 6731–6742.

Tang, J., Wang, W., Feng, J., Yang, L., Ruan, T., Xu, Y., 2021, Urban green infrastructure features influence the type and chemical composition of soil dissolved organic matter, Science of the total environment, 764.

Trenouth, W.R., Gharabaghi, B., 2015, Soil amendments for heavy metals removal from stormwater runoff discharging to environmentally sensitive areas, Journal of hydrology, 529, 1478–1487.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015, World urbanization prospects: The 2014 revision, (ST/ESA/SER.A/366).

Valenca, R., Le, H., Zu, Y., Dittrich, T.M., Tsang, D.C. W., Datta, R., Sarkar, D., Mohanty, S.K., 2021, Nitrate removal uncertainty in stormwater control measures: Is the design or climate a culprit?, Water research, Elsevier Ltd.

Vermont Agency of Natural Resources, 2002, The Vermont stormwater management manual volume I - Stormwater treatment standards.

Watkins, D.C., 1995, Infiltration drainage – literature review project report 21, CIRIA, London.

Wilson, S., Bray, R., Cooper, P., 2004, Sustainable drainage systems hydraulic, structural and water quality advice, CIRIA, London, ISBN: 0-86017-609-6.

Wong, T.H.F., Fletcher, T.D., Duncan, H.P. and Jenkins, G.A., 2006, Modelling urban stormwater treatment-A unified approach, Ecological engineering, 27(1), 58–70.

Wu, J.S., Allan, C.J., Saunders, W.L., Evett, J.B., 1998, Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff, ASCE Journal of environmental engineering, Vol. 124, 7.

Yu, J., Yu, H., Xu, L. 2013, Performance evaluation of various stormwater best management practices, Environmental science and pollution research, 20(9), 6160–6171.

Yuan, D., He, J., Li, C., Guo, X., Xiong, Y., Yan, C., 2019, Insights into the pollutant-removal performance and DOM characteristics of stormwater runoff during grassy-swales treatment, Environmental technology (United Kingdom), 40(4), 441–450.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

2602160046-Kebir Emre SARACOGLU

ORİJİNALLİK RAPORU

%5	%4	%1	%2
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%1
2	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
3	tez.sdu.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
4	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	<%1
5	www.ctre.iastate.edu İnternet Kaynağı	<%1
6	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	<%1
7	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
8	www.mdpi.com İnternet Kaynağı	<%1
9	eprints.zu.edu.ua İnternet Kaynağı	<%1

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Kebir Emre SARAÇOĞLU
(İmza)

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Kebir Emre SARAÇOĞLU
(İmza)