



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

SIZDIRMA HENDEĞİNİN HİDROLOJİK PERFORMANSININ
DENEYSEL VE SAYISAL MODELLER İLE
DEĞERLENDİRİLMESİ

Kaan İlker DEMİREZEN

DANIŞMAN

Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

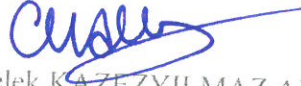
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma, 24.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



Prof. Dr. C. Melek KAZEZYILMAZ ALHAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Nadim COPTY
Boğaziçi Üniversitesi
Çevre Bilimleri Enstitüsü



Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 30063 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca her zaman yanımda duran, hiçbir maddî ve manevî desteği esirgemeyen ve bu zorlu süreçte büyük sabır gösteren annem Sibel DEMİREZEN'e ve babam Hüseyin DEMİREZEN'e sonsuz teşekkürlerimi, saygılarımı ve sevgilerimi sunuyorum. Bu tezi canımdan çok sevdiğim anneme ve babama armağan ediyorum.

Bu zorlu süreçte her zaman yanımda olan ve değerli bilgi birikimini hiçbir zaman esirgemeyen, tez çalışmam boyunca bana yol gösteren ve değerli emeklerini üzerimde ilmek ilmek işleyen saygıdeğer hocam ve değerli bilim insanı Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN'a sonsuz teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca değerli bilgi birikimlerini benden esirgemeyen ve çalışmam konusunda yol gösterici bilgiler sunan hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Sezar GÜLBAZ'a ve Arş. Gör. Dr. Uğur BOYRAZ'a teşekkürü borç bilirim.

Tezime fikirleriyle ışık tutan ve tezimin geliştirilmesine yardımcı olan değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Nadim COPTY'e ve Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamın büyük bir bölümünü oluşturan deney düzeneğinin kurulmasında maddî ve manevî çok büyük emeği geçen dedem Günay ÖZDİL'e, annem Sibel DEMİREZEN'e, babam Hüseyin DEMİREZEN'e, dayılarım İsmail ÖZDİL ve Soner ÖZDİL'e minnetlerimi, saygılarımı ve sevgilerimi sunarım.

Deneyleer boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Kebir Emre SARAÇOĞLU ile Hekmatullah MOHAMMADI'ye, değerli bitirme öğrencilerimiz Bedirhan BEKTAŞ, Hüseyin Yasin YAZICI ve Betül ASLANTAŞ'a ve ismini sayamadığım kadar çok, deneylerimde tek tek emeği geçen, bilime gönül vermiş değerli yüksek lisans ve lisans öğrencilerimize en içten duygularıyla teşekkürlerimi sunuyorum.

Haziran 2019

Kaan İlker DEMİREZEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	5
2.1. DÜŞÜK ETKİLİ KENTLEŞME (DEK) YÖNTEMLERİ	5
2.2. SIZDIRMA HENDEĞİ	9
2.2.1. Sızdırma Hendeğinin Tasarım Kriterleri.....	9
2.2.2. Sızdırma Hendeğinin Ön Hazırlık Koşulları	10
2.2.3. Sızdırma Hendeğinin İnşaat Koşulları	10
2.2.4. Sızdırma Hendeğinin Avantajları	11
2.2.5. Sızdırma Hendeğinin Dezavantajları	11
2.2.6. Sızdırma Hendeğinin Performansı	11
2.3. EPA SWMM PROGRAMI	12
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	15
3.1. KÜÇÜK ÖLÇEKLİ LABORATUVAR DENEYLERİ.....	15
3.2. AÇIK HAVA DENEY DÜZENEĞİ.....	20
3.3. YAĞIŞ-HAVZA-SIZDIRMA HENDEĞİ (YHS) DENEY DÜZENEĞİNİN KURULMASI	24
3.4. YHS DENEY DÜZENEĞİNDEKİ MALZEMELER	27
3.4.1. Sızdırma Hendeğinin Düzenlenmesi	31
3.5. YHS DENEY DÜZENEĞİNDE YAPILAN DENEYLER	35
3.6. SIZDIRMA HENDEĞİNİN HİDROLOJİK MODELİ	43
3.6.1. Haznede Öteleme Yöntemi ve Anahtar Eğrisi	43
4. BULGULAR.....	45
4.1. KÜÇÜK ÖLÇEKLİ LABORATUVAR DENEY DÜZENEĞİ İLE ELDE EDİLEN BULGULAR.....	45

4.2. YHS DENEY DÜZENEĞİ İLE ELDE EDİLEN BULGULAR	47
4.2. YHS DÜZENEĞİ İLE EPA SWMM MODELİNİN KIYASLANMASI	54
4.3. DENEY SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN AŞMA DEBİSİ HİDROGRAFLARININ HAZNEDE ÖTELEME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN HİDROGRAFLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	63
4.4. DENEY SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN AŞMA DEBİSİ HİDROGRAFLARININ HAZNEDE ÖTELEME YÖNTEMİ VE EPA SWMM İLE ELDE EDİLEN HİDROGRAFLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	71
4.5. SIZDIRMA HENDEĞİNDE EĞİMİN AŞMA DEBİSİNE ETKİSİ.....	80
4.6. DENEYSSEL ÇALIŞMA İLE ELDE EDİLEN SIZMA DEBİSİ HİDROGRAFLARININ GELİŞTİRİLEN SIZMA DENKLEMLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI	81
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	88
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Sızdırma hendeğinin yapım aşamasındaki görünümü (http://nebula.wsimg.com/9b4b87151d14511bfb6207b1e032e434?AccessKeyId=E000EB9F21CF68E2E7BF&disposition=0&alloworigin=1).....	6
Şekil 2.2: Geçirimsiz yüzey üzerinde oluşan yüzeysel akışın tutulması için yapılan biyotutma uygulaması (http://www.southwesturbanhydrology.com/wp-content/uploads/2017/01/Camino-del-Bosque-Bio-retention-Basin1.jpg).....	7
Şekil 2.3: Geçirgen asfalt ile klasik asfaltın karşılaştırılması (https://www.vaasphalt.org/wp-content/uploads/2013/05/you-can-clearly-see-where-the-porous-asphalt-pavement-stops.jpg).	7
Şekil 2.4: Yağmur tankı uygulaması (https://orionmagazine.org/cms/assets/uploads/2016/08/Blog_ConcreteProgress_PghRainBarrels.jpg).....	8
Şekil 2.5: Geçirimsiz yüzeyin yanına uygulanmış yağmur hendeği (http://prj.geosyntec.com/npsmanual/image/waterqualityswales.jpg).	8
Şekil 2.6: Sızdırma hendeğinin şematik görünümü.	9
Şekil 2.7: EPA SWMM paket programının arayüzü.....	14
Şekil 3.1: Sahada yeni kurulan sızdırma hendeği deney düzeneğini temsil eden laboratuvar deneyi.	16
Şekil 3.2: Tabanına 3 adet delik açılmış saklama kabı.	16
Şekil 3.3: Yan yüzeylerine 9 adet delik açılmış ve deney esnasında fotoğraflanmış saklama kabı.	17
Şekil 3.4: 9 delik ve 3 delikle yapılan laboratuvar deneylerinin sonucu.	18
Şekil 3.5: Sızdırma hendeği içindeki kumun elek analizi deneyi.	19
Şekil 3.6: Elek analizi deney sonucu.	19
Şekil 3.7: Hidrolik iletkenlik deneyi.	20
Şekil 3.8: Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği (YHS) deney düzeneği.	21
Şekil 3.9: 40 metrekarelik metal sac alan.....	21
Şekil 3.10: Yapay yağış oluşturan yağmur nozulları.	22

Şekil 3.11: Sisteme su iletimi sağlayan pompa ve debi kontrol vanası.	23
Şekil 3.12: Sisteme verilen suyun depolandığı polietilen su tankı.....	23
Şekil 3.13: Yağış-Havza-Biyotutma (YHB) deney düzeneği.	24
Şekil 3.14: Deney düzeneğinin etrafında bitkilerin budanması işlemi.	25
Şekil 3.15: Yağmur deresinin sökülme işlemi (solda), çelik çubuğun sisteme kaynaklanmış şekli (sağda).....	25
Şekil 3.16: Tankın nakliye aracı ile deney alanına getirilmesi.	26
Şekil 3.17: Tankın mobil vinç yardımıyla sisteme entegre edilmesi.	26
Şekil 3.18: Sisteme naylon branda gerilmesi.	27
Şekil 3.19: Polietilen tekstil tankı.	28
Şekil 3.20: Sızdırma hendeğini oluşturan kum ve çakıl malzemeler.	29
Şekil 3.21: Sızdırma hendeğinin doldurulması işlemi.	30
Şekil 3.22: Deney esnasında kullanılan malzemeler.....	31
Şekil 3.23: Aşma ve sızma debisinin ölçüldüğü noktalar.	32
Şekil 3.24: Çapı genişletilmiş ve konumu değiştirilmiş aşma debisinin ölçüldüğü güncel PVC boru.....	33
Şekil 3.25: Sızdırma hendeğinin alt kısmına açılan delikler.....	34
Şekil 3.26: Boruların iç tarafına yapıştırılmış çelik kum filtreleri.....	34
Şekil 3.27: Sızan suyu tek bir noktada toplamaya yarayan oluk.....	35
Şekil 3.28: Sızdırma hendeği içinde düzleştirilmiş kum katmanı.....	36
Şekil 3.29: Kum katman üzerine serilmiş çakıl katmanı.....	37
Şekil 3.30: Havza üzerinde oluşturulan yağış ve sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akış.....	38
Şekil 3.31: Oluklardan toplanan sızma suyu.....	39
Şekil 3.32: Aşma debisinin ve sızma debisinin ölçülmesi.	40
Şekil 3.33: Sızdırma hendeğinin üzerinde biriken su yüksekliğinin ölçülmesi.	41
Şekil 3.34: Aşma yüksekliği 18.5 cm'ye ayarlanmış deney düzeneği.....	42
Şekil 4.1: 1 adet çıkış noktası ile yapılan laboratuvar deneyi.	45

Şekil 4.2: 3 adet çıkış noktası ile yapılan laboratuvar deneyi.	46
Şekil 4.3: 9 adet çıkış noktası ile yapılan laboratuvar deneyi.	46
Şekil 4.4: Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği deney düzeneği.	47
Şekil 4.5: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.....	48
Şekil 4.6: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.....	49
Şekil 4.7: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.....	49
Şekil 4.8: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.....	50
Şekil 4.9: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.....	51
Şekil 4.10: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.	51
Şekil 4.11: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.....	52
Şekil 4.12: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.....	53
Şekil 4.13: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.....	53
Şekil 4.14: YHS sisteminin EPA SWMM modeli.	55
Şekil 4.15: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	56
Şekil 4.16: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.17: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.18: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	59

Şekil 4.19: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	59
Şekil 4.20: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	60
Şekil 4.21: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	61
Şekil 4.22: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	62
Şekil 4.23: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	63
Şekil 4.24: Aşma yüksekliği 3.5 cm ve 18.5 cm olan sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyler ile elde edilen anahtar eğrileri.	64
Şekil 4.25: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	65
Şekil 4.26: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	66
Şekil 4.27: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	66
Şekil 4.28: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	67
Şekil 4.29: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	68
Şekil 4.30: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	68
Şekil 4.31: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	69

Şekil 4.32: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	70
Şekil 4.33: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	71
Şekil 4.34: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	72
Şekil 4.35: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	73
Şekil 4.36: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	74
Şekil 4.37: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	75
Şekil 4.38: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	76
Şekil 4.39: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	77
Şekil 4.40: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	78
Şekil 4.41: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	79
Şekil 4.42: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.	80
Şekil 4.43: İçinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile farklı eğim değerlerinde yapılan deneylerden elde edilen aşma debisi hidrografların karşılaştırılması.	81
Şekil 4.44: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile Green Ampt yönteminden elde edilen sızma hacimlerinin karşılaştırılması.	82

Şekil 4.45: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	83
Şekil 4.46: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	83
Şekil 4.47: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.48: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.49: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	85
Şekil 4.50: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	85
Şekil 4.51: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	86
Şekil 4.52: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	86
Şekil 4.53: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.....	87

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
Φ_3	: Depolama Katmanındaki Boşluk Oranı (L^3/L^3)
Δt	: Zaman Adımı (T)
d_1	: Sızdırma Hendeğinin Yüzeyinde Biriken Su Miktarı (L)
d_3	: Depolama Katmanındaki Su Derinliği (L)
D_3	: Depolama Katmanının Zemin Kalınlığı (L)
D_{3D}	: Depolama Katmanındaki Drenaj Açıklığının Yüksekliği (L)
e_1	: Yüzey Katmanında Oluşan Evapotranspirasyon Hızı (L/T)
e_3	: Depolama Katmanında Oluşan Evapotranspirasyon Hızı (L/T)
f_1	: Yüzey Katmanından Depolama Katmanına Doğru Oluşan Sızma Hızı (L/T)
f_3	: Depolama Katmanından Doğal Zemine Geçen Suyun Sızma Hızı (L/T)
F	: Sızma Debisi (L^3/T)
h	: Çakılın Üzerinde Biriken Su Yüksekliğinin Anlık Ortalaması (L)
I	: Yüzeysel Akış Debisi (L^3/T)
i	: Yağış Şiddeti (L/T)
j	: Üzerinde İşlem Yapılan Noktanın Sembolik Gösterimi (-)
$j+1$: Üzerinde İşlem Yapılan Noktanın Sembolik Gösterimi (-)
q_0	: Çevre Alanlardan Sızdırma Hendeğine Ulaşan Tabaka Akışının Hızı (L/T)
q_1	: Sızdırma Hendeği Üzerinde Oluşan Akış ya da Taşma Hızı (L/T)
q_3	: Depolama Katmanındaki Suyun Drenaj Hızı (L/T)
Q	: Aşma Debisi (L^3/T)
Q_{inf}^{max}	: Sızma Debisinin Maksimum Değeri (L^3/T)
S	: Haznedeki Su Hacmi (L^3)
S_1	: Sızmanın Lineer Olarak Arttığı Birinci Bölgedeki Denklem Ait Eğim
S_2	: Sızmanın Lineer Olarak Arttığı İkinci Bölgedeki Denklem Ait Eğim
S_4	: Sızmanın Lineer Olarak Azaldığı Dördüncü Bölgedeki Denklem Ait Eğim
t	: Zaman (T)
t_{max}	: Sızmanın Maksimum Değere Ulaştığı Süre (T)
t_p	: Yağış Başlangıcından Çakıl Üzerinde Göllenme Başlayıncaya Kadar Geçen Süre (T)
t_r	: Yağış Süresi (T)

Kısaltmalar	Açıklama
EPA	: Environmental Protection Agency
DEK	: Düşük Etkili Kentleşme
dk	: Dakika
l	: Litre
LID	: Low Impact Development
m	: Metre
mm	: Milimetre
s	: Saniye
sa	: Saat
SWMM	: Storm Water Management Modelling
YHB	: Yağış-Havza-Biyotutma
YHS	: Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği
YSYM	: Yağmur Suyu Yönetim Modeli

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SIZDIRMA HENDEĞİNİN HİDROLOJİK PERFORMANSININ DENEYSEL VE SAYISAL MODELLER İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kaan İlker DEMİREZEN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

Günümüzde yaygınlaşan geçirimsiz alanların hızla artması, yağışın yeraltı suyunu beslemesini engellemekte, yağış sonucu oluşan yüzeysel akışı ve nehirlerdeki pik debiyi artırarak taşkınlarla sebebiyet vermektedir. Kentleşmenin getirdiği bu olumsuz etkileri azaltabilmek için son zamanlarda “Düşük Etkili Kentleşme (DEK)” olarak adlandırılan mühendislik uygulamaları geliştirilerek sahada uygulanmaya başlanmıştır. DEK uygulamalarının temel prensibi, geçirimsiz alanların bulunduğu bölgelerde doğal geçirimli yüzeyler oluşturularak yağmur ve kar sularının toprağa sızmasını sağlamak, yüzeysel akışı azaltmak ve aynı zamanda doğal arıtım ortamı oluşturularak yağmur suyunun kalitesini artırmaktır. Bu sayede kentsel bölgelerde doğal ekolojik denge yeniden sağlanacak ve yeşil çevreler kazandırılarak kentleşmenin getirdiği olumsuz etkiler azaltılmış olacaktır. DEK uygulamaları çeşitlerinden bazıları sızdırma hendeği, biyotutma, geçirgen asfalt, yağmur hendeği ve yağmur tanklarıdır. Bu tez projesi kapsamında DEK uygulamalarından biri olan sızdırma hendekleri araştırılmıştır. Sızdırma hendekleri yağış sonucunda oluşan akışın pik debisini düşürmek ve ötelenme süresini artırmak için tasarlanmış, aynı zamanda yeraltı suyunu besleyen ve su kalitesini artıran, içi çakılla dolu dikdörtgen prizma şeklinde bir DEK uygulamasıdır. Bu çalışmada öncelikle İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde mevcut olan “Yağış-Havza-Biyotutma (YHB)” deney düzeneğine bir sızdırma hendeği entegre edilmiş ve sızdırma hendeğinin hidrolojik performansı oluşturulan “Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği (YHS)” deney düzeneğinde yapılan deneylerle incelenmiştir. Daha sonra deney sonuçları kullanılarak sızdırma hendeğinin hidrolojik davranışını açıklayan matematiksel modeller ortaya konmuştur. Sızdırma hendeği üzerinde

oluşan aşma debisinin haznede öteleme yöntemi ile hesaplanabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, sızdırma hendeğinden doğal zemine doğru ulaşan sızmanın hesaplanabilmesi için literatürde kullanılmakta olan Green-Ampt yöntemi test edilmiş, ancak istenilen performans elde edilememiştir. Bunun yerine, sızma için lineer artış ve lineer azalış davranışı sergileyen deney sonuçlarıyla uyumlu olacak şekilde ampirik bir formül geliştirilmiştir. Son olarak DEK'lerin modellenmesinde literatürde sık olarak rastlanan ABD Çevre Koruma Kuruluşu'nun geliştirdiği Yağmur Suyu Yönetim Modeli (YSYM) (EPA SWMM) kullanılarak sızdırma hendeği modellenmiş ve model sonuçları hem deney verileriyle hem de bu tez kapsamında geliştirilen matematiksel model ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak EPA SWMM'nin sızdırma hendeğini yeterli ölçüde temsil edilebildiği görülmüştür.

Haziran 2019, 113 sayfa.

Anahtar kelimeler: Sızdırma Hendeği, Sızma, Düşük Etkili Kentleşme, EPA SWMM, Hidrolojik Model



SUMMARY

M.Sc. THESIS

EVALUATION OF HYDROLOGICAL PERFORMANCE OF INFILTRATION TRENCH VIA EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODELS

Kaan İlker DEMİREZEN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

Nowadays, a rapid increase in impermeable areas results in a decrease in the groundwater recharge and an increase results in floods since the peak flow in rivers and of surface runoff buildup after storm events. In order to reduce the negative effects of urbanization tremendously “Low Impact Development (LID)”, which is an approach of land redevelopment that Works with nature to manage stormwater, has been commonly implemented on site. The fundamental principle of LID applications is to allow for infiltration of rain and snow water into the soil by generating natural permeable areas near to impermeable areas, to reduce the surface runoff and at the same time increase the water quality by forming natural treatment areas. This way, natural ecological balance will be provided in urban areas and the negative effects of urbanization will be reduced by green infrastructure. Among the LID applications are infiltration trench, bioinfiltration, porous asphalt, vegetative swale and rain barrel. Within the scope of this thesis, infiltration trenches are investigated. Infiltration trenches are designed to reduce the peak flow of surface runoff increase its arrival time during a storm-event. The shape of an infiltration is a rectangular prism filled with aggregates and is ablo to feed groundwater and increase the groundwater quality. In this study first, an infiltration trench is integrated into the “Rainfall-Watershed-Bioretention (RWB)” experimental setup which is designed in a former study and is located at Istanbul University-Cerrahpasa in Avcılar Campus in front of Civil Engineering Department. The hydrological performance of infiltration trench is investigated by conducting the experiments with established “Rainfall-Watershed-Infiltration Trench (RWI)” experimental

setup. Afterwards, by using experimental results, mathematical models are developed to explain the hydrological behaviour of infiltration trench. It is shown that the overflow on infiltration trench can be calculated by storage routing method. In addition, to calculate the infiltrated water which reaches to natural soil passing through infiltration trench, Green-Ampt method had been tested; however intended performance is not acquired. As an alternative, an empirical formula is developed based on the experimental results. The empirical equation represents infiltration with a linear increasing curve followed by a maximum and a linear decreasing curve. Finally, infiltration trench is modeled by using Storm Water Management Modelling (SWMM) program developed U.S. Environmental Protection Agency and model results are compared with both experimental data and the mathematical model has been widely used in the literature to model LID implementation. SWMM developed with in the scope of this thesis. As a result, it is observed that SWMM can represent infiltration trench fairly well.

June 2019, 113. pages.

Keywords: Infiltration Trench, Infiltration, Low Impact Development, EPA SWMM, Hydrological Model

1. GİRİŞ

Düşük Etkili Kentleşme (DEK) yöntemi gittikçe artan kentleşmenin negatif etkilerini azaltmak ve su kaynaklarını korumak için oluşturulmuş mühendislik uygulamalarıdır. Bu uygulamalar, yağmur suyunun yeraltı suyuna kazandırılması ve yüzeysel akışın pik debisinin azaltılması prensibine dayanır ve aynı zamanda su kalitesini de artırır. Bu kadar fazla öneme sahip DEK yöntemleri çok uzun geçmişe sahip olmayan uygulamalardır. Bu sebeple eski tarihli literatürde çokça DEK konusuna rastlanmamaktadır; fakat önemi anlaşıldıkça özellikle son yıllarda dikkat çeken ve üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı bir konu haline dönüşmüştür.

DEK yöntemleriyle ilgili literatürde pek çok farklı alanda araştırmalar bulunmaktadır. Örneğin, DEK'lerin suyun miktarı ve kalitesi üzerindeki etkileri hem deneysel hem de sayısal olarak modellenmiştir. İlaveten, DEK'lerin arazideki uygulamaları da çalışılmaktadır. DEK yöntemlerinin arazi üzerindeki konumlanmasına yönelik olarak yapılan bir çalışmada arazi üzerine dağınık ve merkezi olarak DEK yerleştirilmiş ve karşılaştırılarak hangi durumun daha iyi sonuç verdiği ortaya konmuştur. (Freni ve diğ., 2010). Benzer bir çalışma, ormanlık arazide yapılmış ve dağınık yerleştirilmiş DEK'in daha iyi sonuç verdiği görülmüştür (Loperfido ve diğ., 2014). Fry ve Maxwell (2017), DEK'in şehir suyu şebekesi üzerindeki etkisini, yerleşim şekli ve yoğunluğunu göz önüne alarak incelemiştir. Yerleşim şekillerinin yanı sıra hangi DEK yönteminin seçileceği de önemlidir. Jia ve diğ. (2015), farklı tiplerdeki DEK uygulamalarının nasıl entegre çalışacağı ve akış kontrolünde maksimum verimin nasıl elde edilebileceği üzerinde dururken; Johnson ve Sample (2017) Virginia Eyaleti'nin kıyı ovası üzerinde hangi DEK yönteminin daha etkili olduğunu incelemiştir. Perez Pedini ve diğ. (2005) kentsel havza üzerinde hidrolojik model geliştirmiş ve bu modeli genetik algoritmayla birleştirerek DEK'lerin optimum lokasyonlarını belirlemişlerdir.

Karşılaştırmalı incelemenin yanında her bir DEK yönteminin ayrı ayrı performansı bilim insanları tarafından incelenmiştir. Jenkins ve diğ. (2010), dokuz yıl boyunca yağmur bahçelerinde biriken partikül miktarını, Ahmed ve diğ. (2015), beş ayrı yağmur hendeğinin hidrolik geçirimliliğini, Lee ve diğ. (2015), geçirimli kaldırımların hidrolojik süreçlerini, Nimmer ve diğ. (2010), sızdırma çukurlarının altında oluşan yığılma ve kirlilik taşınımını, Horst ve diğ. (2011), çok katmanlı bir sızdırma çukurunun iki yıl boyunca su kalitesi ve

miktarına etkisini incelerken, diğer çalışmalarda ise biyotutma kolonlarının hidrolojik performansı ve matematiksel modeli incelenmiştir (Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan, 2016; Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan, 2017; Gülbaz ve diğ., 2019).

DEK'in sızma üzerindeki etkisinin incelenmesi, yapılan çalışmalar arasında yer almaktadır. Lee ve diğ. (2013), yağmur suyu kontrol yöntemlerinde kullanılan Green-Ampt metodunun değişken nemli zeminlerde geliştirilmesini incelerken, Lee ve diğ. (2010), DEK'lerin genel performansını frekans analizi ile incelemiştir. Öte yandan Braga ve diğ. (2007), DEK'lerde sıcaklığın sızmaya etkisini incelerken, Emerson ve Traver (2008), yaptığı çalışmada DEK'lerin mevsimsel ve uzun dönemde sızma üzerindeki etkilerini incelemiştir.

DEK'ler üzerinde yapılan diğer çalışmalar ise şu şekildedir: Wild ve Davis (2009) yaptığı çalışmada değişken kirlilik konsantrasyonunun etkisini belirlemek için idealize edilmiş DEK'lerin matematiksel modelini geliştirerek kirliliği azaltma performanslarını incelemiştir. Jeong ve diğ. (2013) ise sedimentasyon-filtrasyon havzası adı verilen bir DEK yöntemi kullanarak değişken doygunluktaki akışı ve kirliliği simüle etmek için fiziksel model geliştirmiştir. Kandra ve diğ. (2014) filtre katmanının fiziksel özelliklerini ve akım yönündeki yağış filtrelerinin tıkanma oranlarını incelerken, Siriwardane ve diğ. (2007) tıkanma katmanının alt zemin tabakası ile filtre tabakası arasında olduğunu görmüştür. Öte yandan bu duruma sebep olan partiküllerin boyutunun 6 mikrometreden daha küçük olduğunu saptamıştır. Lawrence ve diğ. (1997) DEK'leri detaylı bir şekilde tanıtip performansları hakkında bilgi verirken Tredway ve Havlick (2017) Colorado'da bulunan bir havzanın DEK yöntemlerini kullanarak geçirimsiz alanların etkilerinin nasıl azaltılabileceği üzerinde çalışmıştır. Bu incelemeyi yaparken EPA SWMM paket programını kullanmıştır. Browne ve diğ. (2008) geçirimli katmanlardaki tipik sızdırma sistemlerinden geçen bütünleşik bir boyutlu akımı test etmiş ve Richard denklemi ile rezervuar denklemini birleştirmiştir. Browne ve diğ. (2012) bu kez iki boyutlu akım üzerinde çalışarak sızdırma sistemlerinde akımın incelenmesini geliştirmişlerdir. Simpson ve Roesner (2018) DEK uygulamalarının tek başına hidrolojinin gelişimine katkı sağlayıp sağlamayacağını, bunun yanında ne kadar DEK uygulamasının gerekli olduğunu ve bunların maliyet analizi üzerinde çalışmıştır. Guo ve Guo (2018) üzerinde vejetasyon olmayan sızdırma uygulamalarının hidrolojik operasyonlarını incelemek için analitik olasılık yaklaşımı uygulamıştır. Goncalves ve diğ. (2018) yağış şiddeti yüksek olan bölgelerde DEK'lerin taşkın ve yüzeysel akışı azaltmadaki etkilerini incelemiştir. Yang ve Chui (2018) DEK'lerin ön

tasarımının hızlı bir şekilde yapılabilmesi için yeni yöntem sunmuştur. Bu yöntemde öncelikle 3 farklı DEK tipi EPA SWMM adlı paket programda modellenmiş ve sonrasında her bir DEK'in birim hazne bazlı performans eğrileri çıkarılmıştır.

Önemli bir DEK tipi olan ve tez kapsamında çalışılmış olan sızdırma hendekleriyle ilgili literatürde yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenmiştir: Farahi ve diğ. (2017), değişken doygunluktaki zeminde akış hareketini belirlemek için Richard denklemini temel alan yeni bir boyutlu akış modeli geliştirmiştir. Önerilen model, haznedeki periyodik göllenme, alt zemin ile hazne arasındaki değişim ve hazne altındaki değişken doygunluktaki zemindeki akım hareketini sayısallaştırmaktadır. Chahar ve diğ. (2012), yaptığı çalışmada sızdırma hendeğinin boşalma kapasitesini ve hendeğin boşalma zamanını analitik olarak hesaplamıştır. Bu çalışma boyunca karşısına çıkan karmaşık hesapları MATLAB aracılığı ile çözümlenmiştir. Creaco ve Franchini (2012), sızdırma hendeği tanımlanmış havza alanı üzerinde oluşan akışı kinematik dalga yöntemiyle modellemiştir ve kinematik dalga denklemlerini birimsizleştirerek kullanıcının ve tasarımcının daha çabuk ve kolay anlayabileceği grafikler oluşturmuştur. Başka bir çalışmada ise Barber ve diğ. (2003), DEK'lere bir yenisini eklemek için "ecology ditch (ekolojik çukur)" adını verdikleri sızdırma hendeğine benzeyen yeni bir sistem tasarlamış ve üzerinde deneyler yapmıştır. Yapılan deneylerde sistemin pik debiyi azalttığı ve ötelenme süresini arttırdığı görülmüştür. Ahmed ve diğ. (2017), yaptıkları çalışmada EPA SWMM'nin ağ tabanlı karar destek modülü olarak çalışan su yönetimi analizi modülünü (Water Management Analysis Module) (WMAM), DEK'lerin tasarım ve planlama parametrelerinin en etkili özelliklerini belirlemek için kullanmıştır. Benzer bir çalışma da Song ve diğ. (2018) tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmada su yönetimi analizi modülü (WMAM) ve yağmur suyu yönetim modeli (SWMM) kullanılarak sızdırma hendeğinin havza sistemine etkisi gözlemlenmiştir. Sızdırma hendeği olan ve olmayan durumlar karşılaştırılmıştır. Heilweil ve diğ. (2014) değişken doygunluktaki akım modelinde hidrolik geçirgenlik, hendek boyutları, başlangıç su yüzeyi koşulu, ıslak/kuru dönemler ve birbirine paralel hendeklerin sayısı gibi parametrelerin sızdırma hendeği aracılığıyla serbest yüzeyli akifere etkisini incelemiştir. Guo ve Gao (2016) yayınladıkları teknik notta sızdırma hendeğinin yüzeysel akışı ne kadar azalttığını hesaplayabilen analitik bir denklem geliştirmişlerdir. Bergman ve diğ. (2011) 1993 yılında Kopenhag'da inşa edilmiş 2 adet sızdırma hendeğini 3 yıl boyunca izlemiş ve performansında muhtemel tıkanmaya bağlı olarak bir düşüş gözlemlemiştir. Bu hendekler üzerinde 2009 yılında yeni bir çalışma başlatılmış ve yeni performansı eski performansına göre değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmada bakımın ve tıkanmanın önemi ortaya konmuştur. Lizárraga-Mendiola ve diğ. (2017) yaptığı çalışmada biyotutmanın ve sızdırma hendeklerinin yarı kurak mikro ölçekli havzada tasarımına değinmişlerdir. Çalışma alanında eğim değişimi, akışın yönü ile maksimum uzunluğu ve zemin kullanımı gibi karakteristiklerin analizi yapılmıştır. Osouli ve diğ. (2017) sediment birikiminin DEK'lerin yüzeysel akışı azaltmadaki performansına etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada yağmur hendeği ve sızdırma hendeği kullanılarak arazi deneyleri ve sayısal testler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda sızdırma hendeğinin performansı her koşulda %100 çıkmıştır. Joksimovic ve Alam (2014) Kanada'nın Ontario eyaletinde en uygun maliyetli DEK tekniklerinin hangisinin olduğunu hidrolojik modelleme ve son zamanlarda gelişmiş DEK maliyet araçlarıyla belirlemiştir. Bunun sonucunda en uygun ve faydalı DEK uygulamasının yeşil çatı ile birleştirilmiş sızdırma hendeği olduğu sonucuna varmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde sızdırma hendeğinin hidrolojik performansı ile ilgili laboratuvar ölçekli deneysel bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tezin amacı literatürdeki bu boşluğu doldurmak üzere katkı yapmak için sızdırma hendeğinin hidrolojik performansını deneysel ve sayısal yöntemlerle değerlendirmektir. Bu sebeple, öncelikle sızdırma hendeğinin hidrolojik performansının belirlenebilmesi için bir açık hava deney düzeneği olan "Yağış-Havza-Biyotutma" sistemine "Sızdırma Hendeği" entegre edilmiştir. Kurulan "Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği (YHS)" deney düzeneği ile farklı yağış şiddetleri, aşma yükseklikleri ve iki farklı çakıl tipi için kontrollü deneyler yapılarak sızdırma hendeğinin hidrolojik performansı incelenmiştir. Deneysel çalışmada ölçülmüş olan sızdırma hendeğinin aşma debisi ve sızma debisini temsil edebilecek matematiksel modeller çalışılmış ve geliştirilmiştir. Aşma debisi için haznede öteleme yöntemi kullanılmış ve sızdırma hendeği için anahtar eğrisi oluşturularak haznede öteleme yöntemi ile aşma debisinin hesaplanabileceği gösterilmiştir. Sızma debisi hesabı için öncelikle Green-Ampt yöntemi test edilmiş ve bu yöntemin sızdırma hendeğinde oluşan sızmayı yeterince iyi temsil edemediği görülmüştür. Daha sonra deney sonuçlarına uygun olarak ampirik bir formül geliştirilmiştir. Son olarak sızdırma hendeği EPA SWMM ile modellenmiş ve hem deneysel sonuçlar hem de geliştirilen matematiksel model ile kıyaslanmıştır. Böylelikle literatürde DEK simülasyonu için çok sık kullanılan EPA SWMM programının sızdırma hendeği için performansı ortaya konmuştur.

2. GENEL KISIMLAR

Tezin bu kısmında Düşük Etkili Kentleşme (DEK) yöntemleri anlatılmıştır. Ayrıca bu tez kapsamında hidrolojik performansı araştırılmış olan sızdırma hendeği detaylı bir şekilde tanıtılmıştır.

2.1. DÜŞÜK ETKİLİ KENTLEŞME (DEK) YÖNTEMLERİ

Düşük Etkili Kentleşme (DEK) yöntemleri asıl olarak günümüzü ve dünyamızın geleceğini korumak için tasarlanmış yağmur suyu yönetimi uygulamalarıdır. Yüzeysel akışın pik debisini azaltarak taşkınları engellemek, yeraltı suyuna daha fazla ve kaliteli su kazandırmak, hızla artan betonlaşma ile azalan geçirimli yüzeyleri artırmak, DEK yöntemlerinin amaçları arasında sayılabilir. DEK yöntemleri hem ekonomik hem de uygulanabilirlik açısından kolay olduğundan, gün geçtikçe uygulanan DEK sayısı artmaktadır.

DEK yöntemleri, sızdırma hendeği, biyotutma, yağmur hendeği, yağmur tankı, geçirgen asfalt gibi mühendislik uygulamalarından oluşmaktadır. Farklı DEK yöntemleri kısaca şu şekilde tarif edilebilir: Sızdırma hendeği dikdörtgen şeklinde kazılmış çukurun içine çakıl doldurularak elde edilir (Şekil 2.1). Tercihe bağlı olarak sızan suyun kontrollü olarak uzaklaştırılabilmesi için çakıl kısım içine delikli drenaj borusu konabilir. Bu yöntemde çakılla dolu olan kısım su depolayan hazne görevi görürken, altındaki doğal kum zemin de çakılla dolu kısımda depolanan suyu yeraltı suyuna aktarma görevini üstlenir. Biyotutma, en alt katmanında çakıl, üzerinde organik zemin ve en üst katmanında bitkilerden oluşan bir DEK yöntemidir (Şekil 2.2). Bu yöntemde su, çakıl katmanına ulaşana kadar bitkilerin ve organik zeminin olduğu katmandan geçerek yüksek oranda kirlilikten, özellikle de ağır metalden arınır (Gülbaz ve diğ., 2015). Bunun yanı sıra etrafındaki geçirimsiz yüzeylerden gelen yüzeysel akışı üzerinde göllenmeyle biriktirerek yüzeysel akışın pik debisinin düşmesine yardımcı olur. Geçirgen asfalt, günümüzde çokça kullanılan klasik asfaltların aksine geçirgen bir yapıya sahiptir (Şekil 2.3). Bu sayede geçirgen asfalt, yağış sonucunda yüzeysel akışın asfalt üzerinde oluşmasına izin vermeden ya da oluşan yüzeysel akışın pik debisini yüksek oranda azaltarak suyu doğrudan altındaki zemine aktarmakta ve yağmur suyunu yeraltı suyuna kazandırmaktadır. Böylece klasik asfaltların aksine su, geçirimsiz bir yüzeyden değil geçirimli bir yüzeyden ilerleyerek yeraltı suyuna ya da yağmur suyu toplama sistemlerine kazandırılmaktadır. Yağmur tankı, evlerin önüne kurulan içi

boş varillerden oluşmaktadır (Şekil 2.4). Bu uygulamadaki amaç yağış esnasında oluklarda biriken suyu kaybetmeden varillerin içinde toplamak, sonrasında biriken yağmur suyunu bahçe sulama işlerinde, araba ya da motosiklet gibi taşıtların yıkanmasında kullanmak ve şehir şebeke suyu kullanımından tasarruf ederek yağmur suyu hasadı yapmaktır. Yağmur hendekleri genellikle trapez şeklinde kazılmış, altında doğal geçirimli zemin bulunan ve en üst katmanında bitki bulduran içi organik malzemeler ve taşlarla dolu DEK yöntemleridir (Şekil 2.5). Yağmur hendeğinin yakınındaki geçirimsiz yüzey üzerinde oluşan akış hendeğe toplanır ve doğal zemine yavaşça sızdırılır. Bu sayede yağmur suyu yeraltı suyuna kalitesi artırılmış bir biçimde kazandırılır. Öte yandan üzerinde yağmur suyunu biriktirip öteleyerek akışın pik debisini azaltmaya yardımcı olur.



Şekil 2.1: Sızdırma hendeğinin yapım aşamasındaki görünümü

(<http://nebula.wsimg.com/9b4b87151d14511bfb6207b1e032e434?AccessKeyId=E000EB9F21CF68E2E7BF&disposition=0&alloworigin=1>).



Şekil 2.2: Geçirimsiz yüzey üzerinde oluşan yüzeysel akışın tutulması için yapılan biyotutma uygulaması
(<http://www.southwesturbanhydrology.com/wp-content/uploads/2017/01/Camino-del-Bosque-Bio-retention-Basin1.jpg>).



Şekil 2.3: Geçirgen asfalt ile klasik asfaltın karşılaştırılması
(<https://www.vaasphalt.org/wp-content/uploads/2013/05/you-can-clearly-see-where-the-porous-asphalt-pavement-stops.jpg>).



Şekil 2.4: Yağmur tankı uygulaması

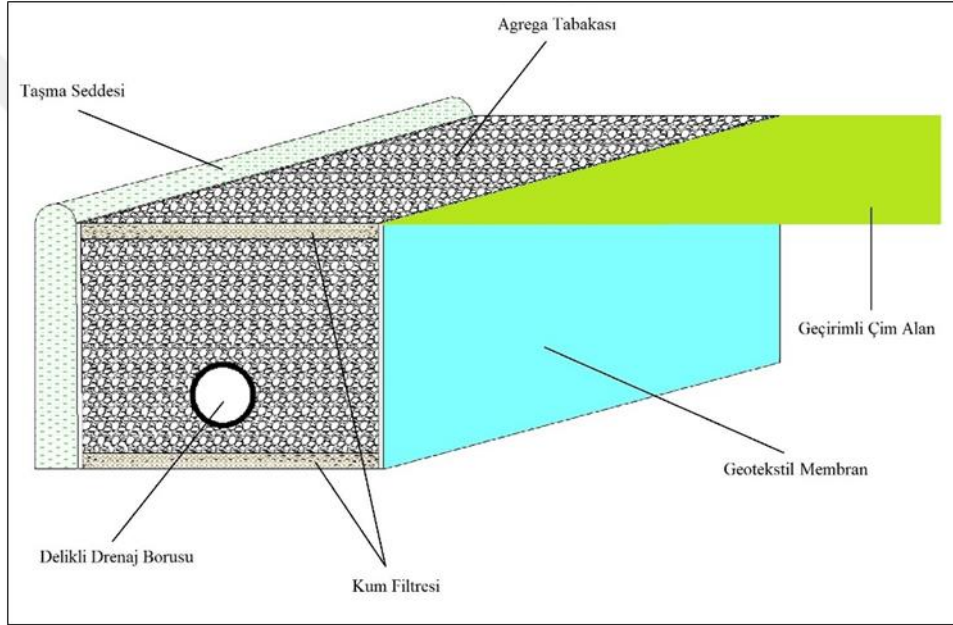
(https://orionmagazine.org/cms/assets/uploads/2016/08/Blog_ConcreteProgress_PghRainBarrels.jpg).



Şekil 2.5: Geçirimsiz yüzeyin yanına uygulanmış yağmur hendeği
(<http://prj.geosyntec.com/npsmanual/image/waterqualityswales.jpg>).

2.2. SIZDIRMA HENDEĞİ

Sızdırma hendeği etrafı geotekstil membran ile çevrilmiş, yüzeyden dikdörtgenler prizması şeklinde kazılmış ve doğal kum zemin üzerine oturan, içi yüksek poroziteye sahip çakılla dolu ince uzun çukur şeklinde bir Düşük Etkili Kentleşme (DEK) yöntemidir. Sızdırma hendeği, geçirimsiz yüzey üzerinde oluşan yüzeysel akışı tutmak, çakıl katman içinde depolamak ve depoladığı suyun altındaki doğal zemine sızmasını sağlamak üzere tasarlanmış bir düzenektir. Temel mantık, yüksek oranda geçirimsiz yüzey bulunduran bir alt havzada sızdırmayı artıracak bölge oluşturmaktır. Sızdırma hendeğinin şematik görünümü Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6: Sızdırma hendeğinin şematik görünümü.

2.2.1. Sızdırma Hendeğinin Tasarım Kriterleri

- Sızdırma hendeğinde çakıl tabakasının porozite değerinin en az 0.4 olması gerekmektedir. Çakılların boyutları genellikle 2.5 cm ile 7.6 cm arasında değişmektedir (Schueler, 1987).
- Sızdırma hendeğinin içindeki çakılların altında kalan tabaka % 20’den az kil, % 40’dan az silt-kil karışımı içermelidir. Altındaki zeminin sızdırma hızı 3.5×10^{-6} m/s’den yüksek olmalıdır (EPA, 1999).
- Sızdırma hendeğinin tabanı mevsimlik oluşabilecek yüksek su tablasından korunmak amacıyla ana kayadan en az 1.2 m yukarıda inşa edilmelidir (Council, 2001).

- Sızdırma hendeği etrafındaki herhangi bir kuyudan en az 30 metre öteye inşa edilmelidir (Council, 2001).
- Sızdırma hendeğinin su toplayacağı alt havza alanı maksimum 2 hektar olmalıdır (Schueler, 1987).
- Sızdırma hendeği, yağış durduktan 48 saat sonra yüzeyde mevcut tüm suyu sızdıracak şekilde inşa edilmelidir (Schueler, 1987).
- Sızdırma hendeğinin aşma debisi tasarım kriteri, 10 yıllık yağışa göre planlanmalıdır (Schueler, 1987).
- Sızdırma hendeği 0.9 metre ile 3.7 metre derinliğinde inşa edilmelidir (EPA, 1999).
- Sızdırma hendeğinin tabanına 15 cm – 30 cm arasında kum filtresi serilmelidir (Council, 2001).

2.2.2. Sızdırma Hendeğinin Ön Hazırlık Koşulları

- Yağış sonucunda oluşan yüzeysel akışın en az %25'inin sızdırma hendeğine gelmeden önce etrafındaki yeşil alanlar tarafından tutulması ve kalan yüzeysel akışın sızdırma hendeğine ulaşması gerekmektedir (State of Hawaii Department of Transportation, 2007).
- Sızdırma hendeğinin ömrünün daha uzun olması için sızdırma hendeğine aşağıdaki uygulamalar yapılmalıdır:
 - Sızdırma hendeğinin etrafına suyu tutacak çim alan yapılmalıdır. (Minimum 6 metre genişliğinde ve üzerinden sadece yüzeysel akışı geçirecek şekilde olmalıdır) (State of Hawaii Department of Transportation, 2007).
 - Sızdırma hendeğinin altında geçirgen kum tabaka olmalıdır (State of Hawaii Department of Transportation, 2007).
 - Sızdırma hendeğine doldurulan agrega yıkanmış olmalıdır (State of Hawaii Department of Transportation, 2007).

2.2.3. Sızdırma Hendeğinin İnşaat Koşulları

- Hendeklerin inşasında, kompaksiyondan kaçınmak amacıyla hafif paletli ekipmanlar kullanılmalıdır (State of Hawaii Department of Transportation, 2007).
- Kazı işlemleri bitince sızdırma hendeği iyi bir şekilde havalandırılmalıdır (State of Hawaii Department of Transportation, 2007).

- Havalandırma işlemi bittikten sonra sızdırma hendeğine geotekstil membran serilmelidir (State of Hawaii Department of Transportation, 2007).
- Geotekstil membran serildikten sonra yüksek derecede poroziteye sahip olan çakıl katmanı serilmelidir. Tercihen çakıl katmanının içine dren borusu da yerleştirilebilir (State of Hawaii Department of Transportation, 2007).

2.2.4. Sızdırma Hendeğinin Avantajları

- Yüzeysel akışın pik debisini düşürür (EPA, 1999).
- Etkin bir biçimde sızdırma esnasında su kirliliğini azaltır (EPA, 1999).
- Çevresinden gelen yüzeysel akışı etrafındaki zemin katmanlarına ileterek, yeraltı suyuna ve etrafındaki derelerin taban akışına katkı sağlar (EPA, 1999).
- Sızdırma hendeği mevcut yüzeye hızlı bir şekilde entegre edilebilir ve hiçbir negatif estetik etki oluşturmaz.

2.2.5. Sızdırma Hendeğinin Dezavantajları

- Bakımı düzenli olarak yapılmazsa işlevini yitirebilir (California Stormwater Quality Association, 2003).
- Sızdırma hendeği bir kere tıkanıldığında düzeltilmesi için içindeki çakılın hepsi değiştirilmelidir (California Stormwater Quality Association, 2003).
- Sızdırma hendeklerinin, yüksek konsantrasyonda kirlilik üreten sanayi tesislerinin ya da ticaret merkezlerinin yanına yapılması uygun değildir (Council, 2001).

2.2.6. Sızdırma Hendeğinin Performansı

- Sızdırma hendekleri, ince daneli sedimanları ve kirlilik maddelerini tutarak ve filtreleyerek uzaklaştırırlar (Ellis ve diğ., 2004).
- Gelen suyun içindeki sedimanları, koliform bakterileri, metalleri ve organik maddeleri %90'a kadar, fosfor ve nitrojeni %60'a kadar arıtabilmektedir (EPA, 1999).
- Biyokimyasal oksijen ihtiyacı arıtımı ise %70 ile %80'e kadar ulaşabilmektedir (EPA, 1999).
- Sızdırma hendeğinin arıtma kapasitesi tabanına organik madde içeren toprak serilerek ve yıkanmış çakıl kullanılarak artırılabilir (California Stormwater Quality Association, 2003).

2.3. EPA SWMM PROGRAMI

EPA SWMM (Environmental Protection Agency Stormwater Management Model), dilimize Çevre Koruma Kuruluşu Yağmur Suyu Yönetim Modeli olarak çevrilmiş olup hidrolik, hidroloji ve su kalitesi modüllerini bulunduran kentsel altyapı sistemleri, drenaj sistemleri, kanalizasyon sistemleri gibi yapıların tasarlanmasında ve bunun yanında taşkın analizlerinin yapılmasında kullanılan bir bilgisayar programıdır (Şekil 2.7). Programda hidrolik modelleme için bağlantı noktaları (junctions), çıkış noktaları (outfalls), dağıtım elemanları (dividers), hazne birimleri (storage units), boru ve kanallar (conduits), pompalar (pumps), orifisler (orifices) ve savaklar (weirs) tanımlanabilmektedir. Hidrolojik modelleme için ise sisteme yağışın tanımlandığı yağış ölçerler (rain gages), alt havzalar (subcatchments), akiferler (aquifers), kar yağışıyla ilgili enstrümanlar (snow packs), birim hidrograflar (unit hydrographs) ve DEK kontrol sistemleri (LID controls) (yeşil çatı, biyotutma, sızdırma hendeği, yağmur bahçesi ve yağmur tankı, geçirimli asfalt ve çatı bağlantısı) tanımlanabilmektedir. Program problemin içeriğine göre bu elemanlardan gerekli olan elemanlara ait fiziksel bilgiler tanımlandıktan sonra oluşturulan havzada kullanıcının seçimine bağlı olarak kinematik dalga, dinamik dalga veya kararlı akım öteleme yöntemlerinden herhangi biri ile hidrolik öteleme yapmaktadır. Bunun yanında havzada geçirimli bir yüzey varsa bu bölgeler için yine kullanıcının seçimine bağlı olarak sızma yöntemlerinden Horton, Modifiye Horton, Green-Ampt, Modifiye Green-Ampt ve Eğri Sayısı yöntemlerinden herhangi biri ile sızma hesaplanmaktadır.

Tez kapsamında YHS sistemini temsil etmek üzere EPA SWMM'de alt havza, yağış ölçer ve DEK yöntemlerinden sızdırma hendeği tanımlanmıştır. Hidrolojik modelde alt havza oluşturulurken havzanın fiziksel özellikleri tanımlanmaktadır. Bunlar, havza üzerinde toplanan çıkış yeri, havzanın alanı, genişliği, eğimi, yüzde geçirimsizliği, havzada kullanılacak sızma metodu ve DEK kontrolleridir. Yağış ölçerde ise havza üzerinde oluşan yağışın zamana göre miktarı tanımlanmaktadır. DEK tanımlanırken ise genellikle DEK sistemlerinde bulunan 4 adet katmana ait fiziksel özellikler tanımlanmaktadır. Bu katmanlar yüzey katmanı, zemin katmanı, hazne katmanı ve drenaj katmanıdır. Yüzey katmanının içinde aşma yüksekliği, bitki yoğunluğu, sürtünme katsayısı ve yüzey eğimi tanımlanmaktadır. Zemin katmanında zemin tabakasının kalınlığı, porozite değeri, hidrolik iletkenlik, iletkenlik eğimi, emme basıncı gibi fiziksel değerler tanımlanmaktadır. Hazne katmanında hazne tabakasının kalınlığı, boşluk

oranı, sızma hızı ve tıkanma faktörü tanımlanmaktadır. Drenaj katmanında ise akımın kuvveti (flow exponent) ve drenaj borusu yüksekliği (offset height) gibi değerler tanımlanmaktadır. Tez kapsamında çalışılmış olan sızdırma hendeğinde ilgili katmanlardan yüzey katmanı, hazne katmanı ve drenaj katmanı bulunmaktadır. Sızdırma hendeğinde drenaj katmanı isteğe bağlı tanımlanabilmekte olup yapılan tezdeki deney düzeneğinde drenaj katmanı kullanılmamış; dolayısıyla modellemede sadece yüzey ve hazne katmanı tanımlanmıştır. Programda bahsi geçen elemanlarla model kurulup çalıştırıldıktan sonra yüzeysel akış hidrografı, sızma hidrografı, aşma hidrografı elde edilir.

EPA SWMM'de sızdırma hendeği çözümlenirken kullanılan denklemler aşağıda detaylandırılmıştır. (2.1) ve (2.2) numaralı denklem sırasıyla sızdırma hendeğinin yüzey katmanı ve hazne katmanındaki su yüksekliklerinin zamanla değişimini vermektedir.

$$\frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad (2.1)$$

$$\Phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_1 - e_3 - f_3 - q_1 \quad (2.2)$$

Burada, d_1 sızdırma hendeğinin yüzeyinde biriken su miktarı (L), t zaman (T), i yağış şiddeti (L/T), q_0 çevre alanlardan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akış hızı (L/T), e_1 yüzey katmanında oluşan evapotranspirasyon hızı (L/T), f_1 yüzey katmanından depolama katmanına doğru oluşan sızma hızı (L/T), q_1 sızdırma hendeği üzerinde oluşan akış ya da taşma hızı (L/T), Φ_3 depolama katmanındaki boşluk oranı (L^3/L^3), d_3 depolama katmanındaki su derinliği (L), e_3 depolama katmanında oluşan evapotranspirasyon hızı (L/T), f_3 depolama katmanından doğal zemine geçen suyun sızma hızıdır (L/T). (2.1) ve (2.2) numaralı denklemdeki f_1 , f_3 ve q_3 değerlerini bulabilmek için denklem (2.3), (2.4), (2.5) ve (2.6) kullanılmaktadır.

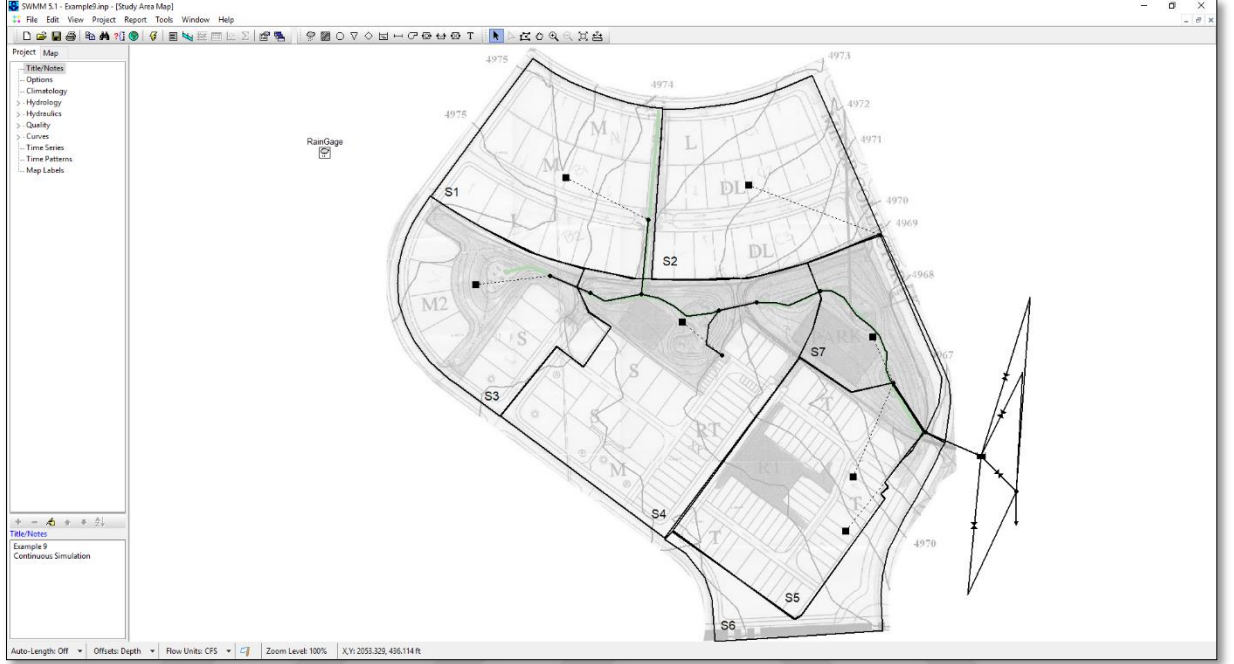
$$f_1 = i + q_0 + d_1/\Delta t \quad (2.3)$$

$$f_3 = \min[f_3, d_3\Phi_3/\Delta t + f_1 - e_3] \quad (2.4)$$

$$q_3 = \min[q_3, (d_3 - D_{3D})\Phi_3/\Delta t + f_1 + f_3 + e_3] \quad (2.5)$$

$$f_1 = \min[f_1, (D_3 - d_3)\Phi_3/\Delta t + f_3 + q_3 + e_3] \quad (2.6)$$

Bu denklemlerde D_3 depolama katmanının zemin kalınlığını (L), D_{3D} depolama katmanındaki drenaj açıklığının yüksekliğini (L), q_3 depolama katmanındaki suyun drenaj(çıkış) hızını (L/T) ifade etmektedir.



Şekil 2.7: EPA SWMM paket programının arayüzü.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. KÜÇÜK ÖLÇEKLİ LABORATUVAR DENEYLERİ

Laboratuvarda sahada yeni kurulmuş olan sızdırma hendeğinin çalışma prensibini anlayabilmek için öncelikle küçük ölçekli deney düzenekleri oluşturulmuştur. Sızdırma hendeği üzerinde oluşan aşma debisinin sağlıklı ölçülebilmesi için YHS düzeneğinde yapılması gereken güncellemelerin kapsamı ve boyutu küçük ölçekli laboratuvar deneyleri ile ortaya konmuştur. Küçük ölçekli deneyler İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneyler laboratuvarda 25 cm x 25 cm x 42 cm boyutlarına sahip şeffaf plastik bir kap içerisinde yapılmıştır. Plastik kap ile yapılan ilk deneyde açık havada kurulmuş olan büyük ölçekli deney düzeneğinin aynısı simüle edilmiştir. Kabın üst kısmına aşma debisini toplayacak bir adet pipet boru ile kabın ön sağ alt köşesine sızmayı toplayacak bir adet pipet boru konmuştur (Şekil 3.1). Bu sayede sızdırma hendeğinin ve sistemin çalışma prensibi test edilmiştir. Yapılan deney sonucunda büyük ölçekli sızdırma hendeği deney düzeneği ile küçük ölçekli laboratuvar deney düzeneğinin benzer çalıştığı görülmüştür. Yapılan ilk küçük ölçekli deneyler sonucunda doğru çalıştığı anlaşılan büyük ölçekli deney düzeneğinde sızma debisinin düşük ölçüldüğü gözlemlenmiştir. Sızma debisinin daha doğru ölçülebilmesi için sızma suyunun toplandığı borunun sayısında ve konumunda güncellemeye gidilmesine karar verilmiştir. Laboratuvarda yapılan ilk güncellemede plastik kabın tabanına 3 adet delik açılmıştır (Şekil 3.2). Böylelikle, sadece plastik kabın çıkışına konan tek bir adet boru ile sızmanın yeterince doğru ölçülemediği görülmüştür. Bu sebeple deney düzeneğinde öncelikle sızma suyunu toplayacak delik sayısının artırılması gerektiği anlaşılmıştır. Daha sonra, kabın tabanında açılan deliklerin büyük ölçekli sızdırma hendeği üzerinde imalatı mümkün olmadığı için farklı yerlerden ve farklı sayılarda delik açılması gerektiği görülmüştür. Buna yönelik olarak saklama kabı üzerinde yapılan ikinci deneyde ise kabın 3 yan yüzeyine 3'er tane delik açılarak sızma suyunu toplayacak kapta toplamda 9 adet delik oluşturularak deney tekrarlanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.1: Sahada yeni kurulan sızdırma hendeği deney düzeneğini temsil eden laboratuvar deneyi.

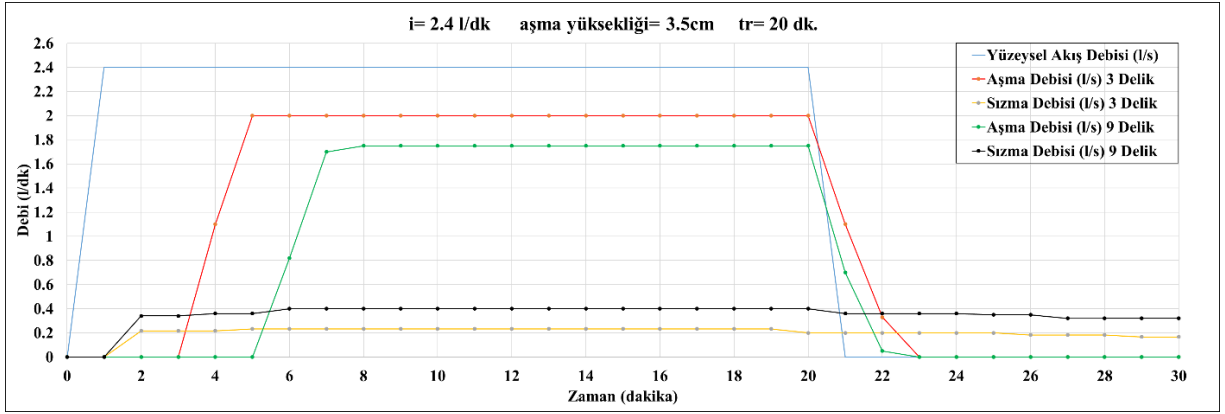


Şekil 3.2: Tabanına 3 adet delik açılmış saklama kabı.



Şekil 3.3: Yan yüzeylerine 9 adet delik açılmış ve deney esnasında fotoğraflanmış saklama kabı.

Yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda büyük ölçekli sızdırma hendeğinde sızma suyunun toplanabilmesi için 9 adet delik açılmasına karar verilmiştir. İlgili küçük ölçekli deneylere ait sonuç grafikleri Şekil 3.4’de verilmiştir. Laboratuvarda yapılan deneylerde, sızdırma hendeği üzerinde oluşan yüzeysel akış Şekil 3.3’de görülen hidrolik tezgâh aracılığı ile sabit debi şeklinde el ile hareket ettirilen su kaynağı (hortum) ile verilmiştir. Sisteme verilen sabit debi, su çakılların üzerine çıkana kadar sisteme verilmeye devam edilmiştir. Su seviyesi çakılların üzerine çıkınca hareketli su kaynağı sabitlenmiş ve deneye devam edilmiştir. Şekil 3.4’de görüldüğü üzere delik sayısı artınca toplanan sızma suyu miktarı da artmış ve böylelikle sızdırma hendeğinin doğal ortamı daha doğru temsil edilmiştir.

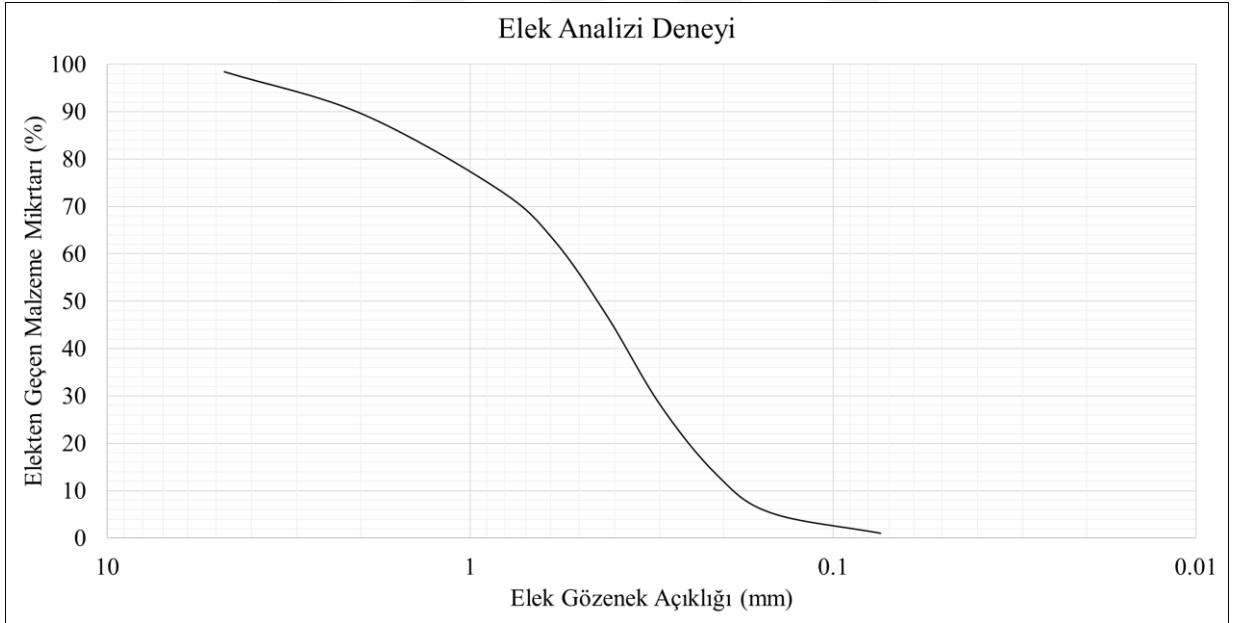


Şekil 3.4: 9 delik ve 3 delikle yapılan laboratuvar deneylerinin sonucu.

Laboratuvarda yapılan diğer bir deney ise sızdırma hendeğinin içinde bulunan kumun cinsinin belirlenmesi için gerçekleştirilen elek analizi deneyidir (Şekil 3.5). Elek analizi deneyi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda bulunan malzemeler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Elek analizine ait sonuç grafiği Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekil 3.6'da verilen sonuç grafiği incelendiğinde 200 numaralı eleğin (0.075 mm açıklığa sahip) altına geçen madde miktarının (kil ve silt) %1 civarında olduğu görülmektedir. Bu değer, sızdırma hendeğinin alt katmanında olması gereken toplam kil ve silt yüzdesinin tasarım kriterleriyle uyduğunu göstermektedir. Sızdırma hendeğinin içinde bulunan kumun ve çakılın hidrolik iletkenlik katsayısının belirlenmesi için Hidrolik Laboratuvarı'nda hidrolik iletkenlik deneyi yapılmıştır (Şekil 3.7). Yapılan deneyler sonucunda kumun ve çakılın fiziksel özellikleri belirlenmiş ve yapılacak büyük ölçekli deneyler için hazır hale getirilmiştir. 1 numaralı çakılın hidrolik iletkenliği $6.3 \times 10^{-2} \text{ m/s}$, kumun hidrolik iletkenliği ise $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 3.5: Sızdırma hendeği içindeki kumun elek analizi deneyi.



Şekil 3.6: Elek analizi deney sonucu.



Şekil 3.7: Hidrolik iletkenlik deneyi.

3.2. AÇIK HAVA DENEY DÜZENEĞİ

Bu tez kapsamında İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı'na ait Yağış-Havza-Biyotutma (YHB) deney düzeneğine sızdırma hendeğini temsil eden polietilen tank entegre edilmiştir. Entegre edilmiş sızdırma hendeği ile oluşturulan yeni deney düzeneği Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği (YHS) olarak adlandırılmıştır. YHS deney düzeneği (Şekil 3.8) geçirimsiz havzayı temsil eden 40 metrekarelik metal sac alanına sahiptir (Şekil 3.9) ve düzeneğin üzerinde yapay yağış oluşturabilen 40 adet yağmur nozulu vardır (Şekil 3.10).



Şekil 3.8: Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği (YHS) deney düzeneği.



Şekil 3.9: 40 metrekareselik metal sac alan.



Şekil 3.10: Yapay yağış oluşturan yağmur nozulları.

YHS sisteminin üzerinde sisteme sabit debi ile su verilmesini sağlayan pompa ve debi kontrol vanası bulunmaktadır (Şekil 3.11). Bu vana sayesinde sistemde düşük şiddetli, orta şiddetli ve yüksek şiddetli yapay yağışlar oluşturulmaktadır. YHS sistemine su, deney düzeneğine entegre edilmiş 5 ton su depolayabilen polietilen su deposundan verilmektedir (Şekil 3.12). Su, depodan sisteme suyu ileten pompaya gelmekte ve ardından pompa aracılığıyla tüm sisteme dağıtılmaktadır.



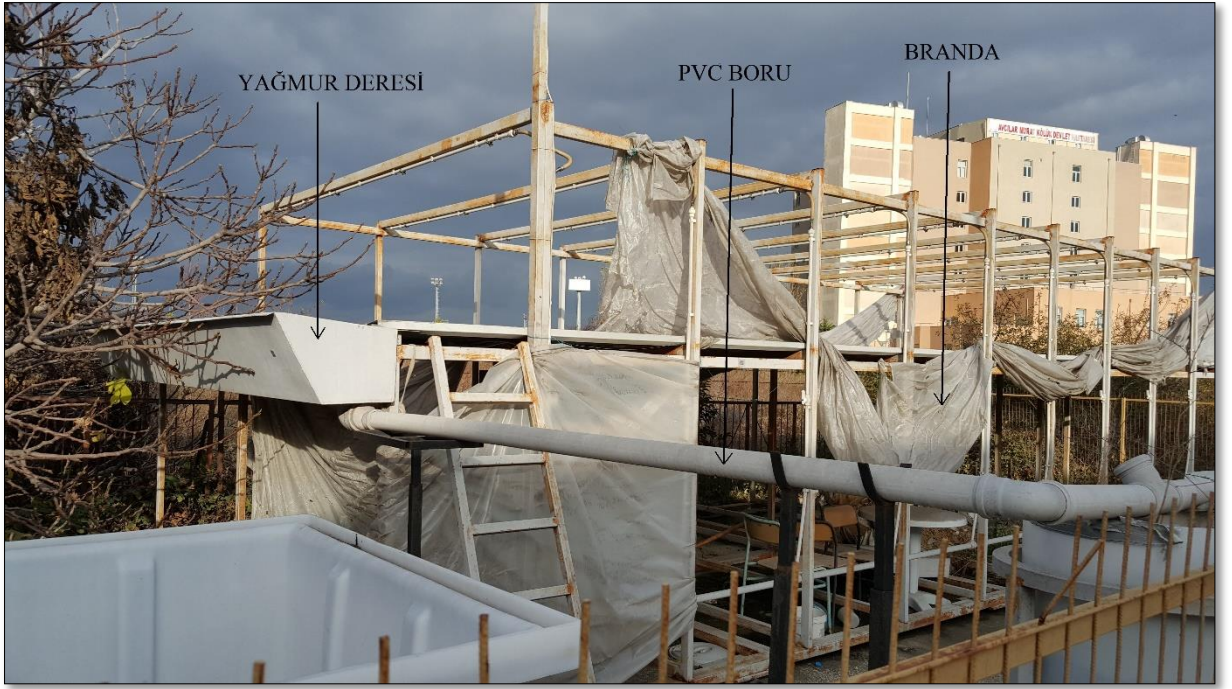
Şekil 3.11: Sisteme su iletimi sağlayan pompa ve debi kontrol vanası.



Şekil 3.12: Sisteme verilen suyun depolandığı polietilen su tankı.

3.3. YAĞIŞ-HAVZA-SIZDIRMA HENDEĞİ (YHS) DENEY DÜZENEGİNİN KURULMASI

Mevcut olan Yağış-Havza-Biyotutma (YHB) deney düzeneğine (Şekil 3.13) sızdırma hendeğini temsil edecek olan dikdörtgen yüzey alanına sahip polietilen tank entegre edilerek Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği (YHS) deney düzeneği kurulmuştur. Önce YHB düzeneğindeki eksiklikler giderilmiş ve çalışmayan, bozulan parçalar yapılarak YHB sistemi yenilenmiştir.



Şekil 3.13: Yağış-Havza-Biyotutma (YHB) deney düzeneği.

YHB deney düzeneğinde bulunan PVC borular ve âtıl haldeki branda kaldırılmıştır. Sistemde deney yapmaya engel olan ağacın dalları belediye ekipleri tarafından budanmıştır. Sistemin etrafındaki otluk alandan gelen bitkilerin dalları ve yaprakları temizlenmiştir (Şekil 3.14). Temizlenen sistemde mevcut olan yağmur deresi kaynakçı ekibi tarafından sökülmüştür. Sökülen yerlerin iki ucuna ve havzanın boşta bulunan arka iki ucuna toplamda 4 adet sanayide kestirilmiş çelik çubuklar bağlanmıştır (Şekil 3.15). Kaynak yapılan çelik çubukların görevi, sistemi korumak üzere serilecek olan şeffaf naylon brandaya destek sağlamaktır.



Şekil 3.14: Deney düzeneğinin etrafında bitkilerin budanması işlemi.



Şekil 3.15: Yağmur deresinin sökülme işlemi (solda), çelik çubuğun sisteme kaynaklanmış şekli (sağda).

Sistemde yapılan düzenlemelerden sonra sisteme sızdırma hendeği entegre edilebilecek hale gelmiştir. Sızdırma hendeğini temsil edecek olan polietilen tekstil tankı, nakliye aracı ile deney alanının önüne getirilmiştir (şekil 3.16). Tankı deney alanına yerleştirmek için mobil vinç kiralanmıştır ve tank mobil vinç yardımı ile deney alanına yukarıdan indirilerek yerine yerleştirilmiştir (şekil 3.17).



şekil 3.16: Tankın nakliye aracı ile deney alanına getirilmesi.



şekil 3.17: Tankın mobil vinç yardımıyla sisteme entegre edilmesi.

Tankın sisteme entegre edilmesinden sonra tankın içine doldurulması gereken kum ve çakıl da deney alanının yanına küçük bir kamyon vasıtasıyla getirilmiştir. Deney düzeneği dışarıda olduğundan olası bir rüzgâr esnasında nozullar yardımıyla sisteme verilen yapay yağış havzaya ulaşmadan sistemden dışarı kaçmaktadır. Bu sebeple, deney alanının özellikle rüzgârdan korunması ve düzeneğin çalışmalara hazır olabilmesi için deney düzeneğindeki nozulların bağlı olduğu düşey çelik çubukların etrafına şeffaf naylon branda çekilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18: Sisteme naylon branda gerilmesi.

Sisteme naylon branda gerildikten sonra sisteme entegre edilen tankın içi kum ve çakıl ile doldurularak sızdırma hendeği deney düzeneğinin oluşturulması tamamlanmış ve sistem deney yapmaya hazır hale getirilmiştir. Önce, sistemin çalışma şeklini anlayabilmek için asıl deneylere başlamadan sistem çalıştırılmıştır. Sistem çalıştırdıktan sonra sistemde su sızdıran yerler belirlenerek gerekli müdahaleler yapılmıştır ve daha sonra deneylere geçilmiştir.

3.4. YHS DENEY DÜZENEĞİNDEKİ MALZEMELER

YHS deney düzeneğinde 3.4 metre iç uzunluğa, 0.9 metre iç genişliğe ve 0.8 m iç yüksekliğe sahip taşıyıcı çelik konstrüksiyon üzerine oturan polietilen tekstil tankı bulunmaktadır (Şekil 3.19). Polietilen tekstil tankı YHS deney düzeneğinde sızdırma hendeği olarak kullanılmıştır.

Tankın polietilen seçilmesinin sebepleri çelikten imal edilecek bir sızdırma hendeğine göre daha ekonomik olması ve dayanımı yüksek bir malzeme olmasıdır.



Şekil 3.19: Polietilen tekstil tankı.

Polietilen tekstil tankının sızdırma hendeğine dönüştürülebilmesi için tabanına hidrolik iletkenliği yüksek bir kum tabaka ve onun üzerine yine hidrolik geçirimsizliği yüksek olan bir çakıl tabakası serilmelidir. Sızdırma hendeğinde kullanılan kum ve çakıl tabakası Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Farklı büyüklükteki çakılların sızdırma hendeğinin hidrolojik performansı üzerindeki etkisi test edilmek istendiğinden 1 numaralı ve 4 numaralı çakıl olarak adlandırılan 2 farklı tip çakıl kullanılarak deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.20: Sızdırma hendeğini oluşturan kum ve çakıl malzemeler.

Şekil 3.20’de görülen kum ve çakıl deney alanına el arabasıyla taşınmıştır. El arabası yardımıyla deney alanına taşınan kum ve çakıl tankın içine kürek yardımıyla atılmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21: Sızdırma hendeğinin doldurulması işlemi.

Kum ve çakıl ile doldurulan tankın üzerinde deneyler yapılmaya başlanmıştır. Deneyler esnasında debilerin ölçümü için derecelendirilmiş su kovaları ve zamanın ölçümü için de dijital kronometre kullanılmıştır. Bunun yanında sızdırma hendeği üzerinde biriken su yüksekliklerini ölçmek için tahta çubuklar kullanılmış ve tahta çubuklar üzerinde suyun oluşturduğu iz cetvel yardımıyla ölçülerek suyun yüksekliği okunmuştur (Şekil 3.22).



Şekil 3.22: Deney esnasında kullanılan malzemeler.

3.4.1. Sızdırma Hendeğinin Düzenlenmesi

YHS sistemine polietilen tekstil tankı entegre edildiğinde tankın üzerinde sadece tankın tahliye edilmesini sağlayacak 3 cm çapında kontrol edilebilir bir vana bulunmaktaydı. Çalışmanın başında altta bulunan bu vanadan sızdırma debisi ölçülmesi planlanmıştır. Sistem boşken tankın iç tarafından vananın önüne çelikten örülmüş bir kum filtresi yapılandırılmıştır. Bunun yanı sıra aşma debisinin kontrollü bir biçimde ölçülebilmesi için tankın üst kısmına 3 cm çapında PVC bir boru montelenmiştir (Şekil 3.23). Bu sayede sızdırma hendeğinin üst tarafından aşma debisi, alt tarafından da sızma debisi ölçüleceği düşünülmüştür. Gerekli delme ve montaj işlemleri yapıldıktan sonra polietilen tekstil tankı 25 cm yüksekliğinde kum ve üzerine 35 cm yüksekliğinde çakıl ile doldurulmuştur. İlk deneyin ardından sistemde bazı problemlerle karşılaşılmıştır. Bunlardan biri aşma debisini ölçmek için kullanılan PVC borunun çok yukarıda yapılmış olmasıdır ve PVC borunun yüksek yağış şiddetinde tam dolu akıma ulaşarak aşma debisini iyi bir şekilde temsil etmediği görülmüştür. İkinci problem ise alt taraftaki 3 cm çapındaki vanadan yeterli miktarda sızma sağlanamamış olmasıdır. Karşılaşılan problemler sonucunda laboratuvarında yapılan küçük ölçekli deneylerden faydalanarak sistemde

güncellemeye gidilmiştir. Sistemde yapılan ilk güncelleme ile aşma debisinin ölçüldüğü boru aşağı alınarak çapı büyütülmüştür. Çapı 3 cm olan PVC boru 7 cm çapa sahip olan PVC boru ile değiştirilmiştir (Şekil 3.24). PVC borunun yeni konumu, alt noktası çakıl tabakasından 3.5 cm yukarıda olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sayede deney esnasında aşma debisinin geliş süresini beklemekle geçen süre kısaltılmıştır. Bunun yanında sistemde yüksek yağış şiddeti sonucu oluşacak akış, borunun çapı büyüdüğünden tam dolu boru akımı oluşturmayacak ve bu sayede aşma debisinin tamamı borudan akarak etkin bir biçimde çıkış noktasında toplanmış olacaktır.



Şekil 3.23: Aşma ve sızma debisinin ölçüldüğü noktalar.



Şekil 3.24: Çapı genişletilmiş ve konumu değiştirilmiş aşma debisinin ölçüldüğü güncel PVC boru.

Yapılan ilk güncellemeden sonra deney düzeneği tekrar test edilmiş ancak yapılan testlerden sonra sistemin sızmaya yeterince müsaade etmediği anlaşılmıştır. Laboratuvarında küçük ölçekte yapılan deneyler ile sızdırma hendeğini temsil eden tankın içinde sızmanın nasıl arttırılabileceği ortaya konmuştur. Yapılan küçük ölçekli deney sonuçlarına göre tankın ön yüzündeki alt kısma ve sağ ile sol yüzündeki alt kısma 3'er adet olmak üzere toplamda 9 adet 7 cm çapında delikler açılmasına karar verilmiştir. İçi kum ve çakılla dolu olan sızdırma hendeği boşaltılarak deliklerin açılmasına hazır hale getirilmiştir. Yapılan delme işlemleri sonucunda sistemde 9 adet 7 cm çapında delik oluşturulmuştur (Şekil 3.25) ve bu deliklere 10 cm uzunluğunda ve 7 cm çapında PVC borular montelenmiştir. Sızma sırasında kumun sürüklenerek boruları tıkamaması için boruların önüne çelikten imal edilmiş kum filtresi yapıştırılmıştır (Şekil 3.26). Borulardan akan suyun tek bir yerde toplanması için boruların altına oluk yapılmıştır (Şekil 3.27). Oluğa 1 adet 7 cm boyutunda delik açılarak ve deliğe 7 cm boyutunda PVC boru monte edilerek sistem tek yerden sızma debisi ölçmeye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.25: Sızdırma hendeğinin alt kısmına açılan delikler.



Şekil 3.26: Boruların iç tarafına yapıştırılmış çelik kum filtreleri.



Şekil 3.27: Sızan suyu tek bir noktada toplamaya yarayan oluk.

3.5. YHS DENEY DÜZENEĞİNDE YAPILAN DENEYLER

Nihai halini alan sızdırma hendeğinin içi öncelikle 25 cm kum ile doldurulmuş ve kum zemin düzleştirilmiştir (Şekil 3.28). Kum zeminin üzerine dane boyutu ortalama 1.5 cm olan 1 numaralı çakıl 35 cm yüksekliğinde serilmiştir (Şekil 3.29). 63.5 cm’de alt kotu bulunan aşma debisinin ölçüleceği boru ile çakıl katmanının en üst noktası arasında 3.5 cm’lik bir mesafe bırakılmıştır. Bırakılan bu mesafe literatürde aşma yüksekliği (berm height) olarak tanımlanmaktadır. Yapılacak deneylerin ilk kısmını oluşturacak aşma yüksekliği değeri 3.5 cm olarak belirlenmiştir. 3.5 cm aşma yüksekliği ile 3 farklı deney yapılmıştır. Bu 3 farklı deney 41.6 mm/sa, 55.5 mm/sa, 66.6 mm/sa değerindeki yağış şiddetlerinden oluşmaktadır. 3 deneyin ilki 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile gerçekleştirilmiştir. Deneye başlamadan önce debi kontrol vanası 41.6 mm/sa yağış şiddetine gelecek şekilde ayarlanmıştır. İlgili yapay yağış ile sistem 60 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Yağış sırasında havzayı temsil eden çelik sac üzerinde oluşan yüzeysel akış sızdırma hendeğine ulaşmıştır (Şekil 3.30). İlgili akışın bir kısmı, çakıl katmandan kum katmana doğru sızarak alttaki borularda ulaşmış ve sistemden çıkmıştır (Şekil 3.31). Sızan su 1 dakika boyunca ölçekli kaplarda biriktirilmiş ve böylece sızma debisi ölçülmüştür. Yüzeysel akışın diğer kısmı sızdırma hendeğini doldurarak çakıl katmanının üzerinde birikmeye başlamıştır. Çakıl katmanının üzerinde su hızlı bir şekilde aşma debisinin

ölçüleceği boruya gelene kadar birikmiştir. Boruya ulaşan su, borudan dışarı akmaya başlamıştır (şekil 3.32). Borudan akan su bir dakika boyunca ölçekli kaplarda biriktirilerek aşma debisi ölçölmüştür. İlk su çıkışından sonra sistemde çakıl katmanının üzerinde su, azalan hızla yükselmeye devam etmiştir. Sistem dengeye ulaştığında yüzeydeki su seviyesi sabitlenmiştir. Suyun yükselişi deney esnasında sızdırma hendeğinin ön ve arka ucunda dakikada bir ölçölerek kaydedilmiştir (şekil 3.33).



şekil 3.28: Sızdırma hendeği içinde düzleştirilmiş kum katmanı.



Şekil 3.29: Kum katman üzerine serilmiş çakıl katmanı.



Şekil 3.30: Havza üzerinde oluşturulan yağış ve sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akış.



Şekil 3.31: Oluklardan toplanan sızma suyu.



Şekil 3.32: Aşma debisinin ve sızma debisinin ölçülmesi.



Şekil 3.33: Sızdırma hendeğinin üzerinde biriken su yüksekliğinin ölçülmesi.

Detayları anlatılan deney 3.5 cm aşma yüksekliği ile 55.5 mm/sa ve 66.6 mm/sa yağış şiddeti için tekrarlanmıştır. 3.5 cm aşma yüksekliği için deneyler tamamlandıktan sonra aşma yüksekliği 1 numaralı çakıl için 18.5 cm olacak şekilde, çakıl tabakasından 15 cm'lik yüksekliğe karşılık gelen çakıl sızdırma hendeğinden boşaltılmıştır. Bu sayede 18.5 cm'lik aşma yüksekliği oluşturulmuştur (Şekil 3.34).



Şekil 3.34: Aşma yüksekliği 18.5 cm'ye ayarlanmış deney düzeneği.

18.5 cm'lik aşma yüksekliği oluşturulan sistemde 41.6 mm/sa, 55.5 mm/sa ve 66.6 mm/sa yağış şiddeti için deneyler daha önce anlatıldığı şekilde tekrar edilmiştir. İkinci set deneylerin de tamamlanmasından sonra üçüncü set deneylere geçilmiştir. Üçüncü sette ise 4 numaralı çakıl kullanılarak aşma yüksekliği 3.5 cm'ye ayarlanmıştır. İlk iki sette kullanılan yağış şiddeti değerleri kullanılarak üçüncü set de tamamlanmıştır. Yapılan deneyler esnasında ölçülen aşma

yüksekliği, yağış süresi, yağış şiddeti, yüzeysel akış debisi, aşma debisi, sızma debisi ve sızdırma hendeğinin üzerinde biriken suyun yüksekliğinden oluşan değerler deney kağıdına not edilerek bilgisayarda Microsoft Excel programına aktarılmıştır. Bu sayede deneylerden elde edilen veriler düzenli bir şekilde kaydedilerek grafikleri çizdirilmiştir. İlgili deneyler araştırmacı da dahil olmak kaydıyla lisans ve yüksek lisans öğrencilerinden oluşan 6 kişilik bir ekiple yapılmıştır. Deneyde 1 kişi dakikada bir sızma debisini, 2 kişi dakikada bir aşma debisini, 2 kişi sızdırma hendeğinin üzerinde biriken suyun yüksekliğini ölçerken 1 kişi de ölçülen değerleri not etmiştir. Aşma ve sızma debisi, üzerinde dereceler olan plastik kovalar yardımıyla ölçülürken su yükseklikleri ince tahta çubuklar yardımıyla ölçülmüştür. Yüzeysel akış debisinin hidrografını belirlemek için öncelikle deney alanındaki yüzeysel akışın pik debisi ölçülmüş, daha sonra pik debi değeri EPA SWMM'e tanımlanan yağış sonucunda elde edilen yüzeysel akış hidrografının pik debisi ile karşılaştırılmıştır. Deneyde ölçülen pik debi değeri ve EPA SWMM'den elde edilen pik debi değeri aynı çıktığı için yüzeysel akış hidrografi olarak EPA SWMM'den elde edilen yüzeysel akış hidrografi kullanılmıştır.

3.6. SIZDIRMA HENDEĞİNİN HİDROLOJİK MODELİ

Sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akış, sızdırma hendeğinde aşma yüksekliğine kadar biriktikten sonra sistemden tekrar akmaya devam eder. Sızdırma hendeği üzerinde oluşan bu akıma aşma debisi (overflow) adı verilmektedir. Bu çalışmada YHS deney düzeneğinde ölçülen aşma debisi değerlerinden yararlanılarak sızdırma hendeğine ait aşma debisini hesaplayabilecek yöntemler araştırılmıştır. Buna istinaden deney sonuçlarını temsil edebilecek birtakım farklı teoriler denenmiştir. Bunlardan ilk iki tanesi açık kanallardaki akımı temsil eden Chezy ve Manning denklemleridir. Bu denklemler sızdırma hendeği için kullanıldığında, hendek üzerindeki akımı temsil etmediği görülmüştür. Hendek üzerindeki akımı temsil edecek başka bir yöntem araştırılmıştır. Daha sonra haznede öteleme teorisi, sızdırma hendeği üzerinde oluşan akımın hesaplanması için kullanılmıştır.

3.6.1. Haznede Öteleme Yöntemi ve Anahtar Eğrisi

Haznede öteleme yöntemi, akımın giriş yaptığı sistemi kapalı bir hazne olarak varsayar ve sistemden çıkış debisinin sadece zamana bağlı olarak değişimini hesaplar. Bunun için, zamana bağlı değişimi içeren süreklilik denklemini ve haznede depolanan akışkan miktarı ile hazneden çıkan debi arasındaki ilişkiyi veren denklemi çözer. Haznedeki su hacmi ile çıkış debisi

arasındaki ilişki her sistem için farklı bir anahtar eğrisi ile temsil edilir. Süreklilik denklemi ise şu şekildedir:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q - F \quad (3.1)$$

(3.1) numaralı denklemde S haznedeki su hacmi (L^3), t zaman (T), I yüzeysel akış debisi (L^3/T), Q aşma debisi (L^3/T), F sızma debisi (L^3/T) olarak tanımlanmaktadır.

Denklem 3.1 zaman adımı üzerinden kesikli hale getirilerek aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1} = (I_j + I_{j+1}) - (F_j + F_{j+1}) + \left(\frac{2S_j}{\Delta t} + Q_j\right) \quad (3.2)$$

(3.2) numaralı denklemde Δt zaman adımı (T), j üzerinde işlem yapılan noktanın sembolik olarak gösterimi (-), $j+1$ üzerinde işlem yapılan noktanın sembolik olarak gösterimidir (-).

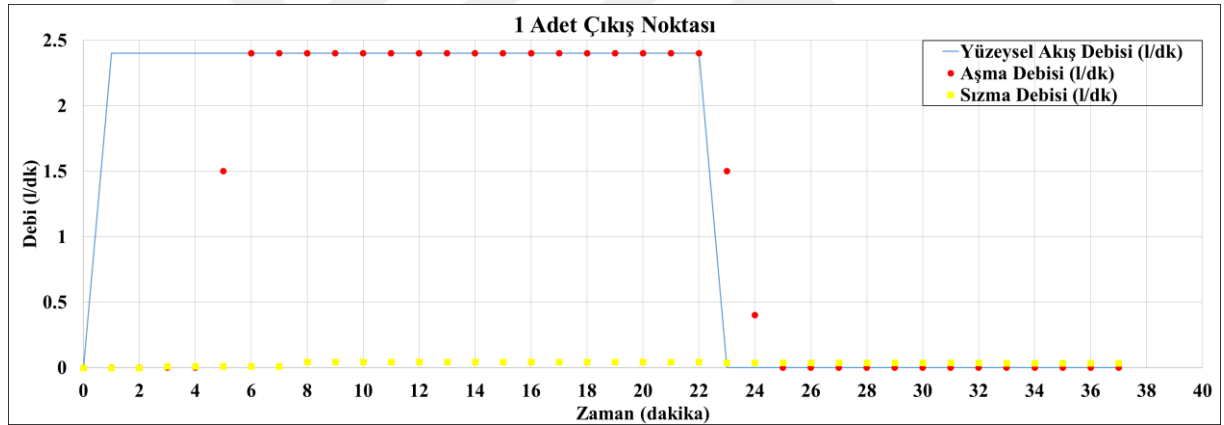
(3.2) numaralı denklemin sol tarafı bilinmeyen, sağ tarafı ise bilinen ifadelerden oluşmaktadır. Bu denklemin sayısal çözümünün yapılabilmesi için debi ile haznedeki su miktarının ilişkisini veren “ $S=f(Q)$ ” fonksiyonuyla ifade edilen anahtar eğrisine ihtiyaç vardır. Sızdırma hendeğine ait anahtar eğrisi ilk yapılan deneyler ile elde edildikten sonra (3.2) numaralı denklem sayısal olarak çözülebilir ve haznede öteleme yöntemi daha sonra yapılan deneyler için uygulanabilir. Diğer bir deyişle, sızdırma hendeğine ulaşan farklı giriş debisine (I) karşılık oluşacak aşma debisi (Q) hesaplanır.

Bu tez kapsamında haznede öteleme yönteminin sızdırma hendeğinin hidrolojik davranışını temsil edebilme yeteneği değerlendirilmiştir. Bu yöntemi değerlendirebilmek için önce YHS deney düzeneğinde farklı yağış şiddeti ve aşma yükseklikleriyle deneyler yapılmış ve bu deneyler sonucunda aşma debisiyle zamanın ilişkisini veren hidrograflar elde edilmiştir. Sonrasında, ilgili aşma yüksekliğinde yapılan deneylerin en yüksek şiddetli yağışı dikkate alınarak sızdırma hendeğinin hazne-debi ilişkisini veren anahtar eğrisi çıkarılmış; haznede öteleme yönteminde kullanılmış ve sonucunda bir aşma debisi hidrografi elde edilmiştir. Haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi hidrografi ile deneyden elde edilen hidrograflar karşılaştırarak bu yöntemin sızdırma hendeğine uygulanabilirliği test edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda haznede öteleme yönteminin sızdırma hendeğinde doğru bir şekilde çalıştığı görülmüş ve ilgili yöntemin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

4. BULGULAR

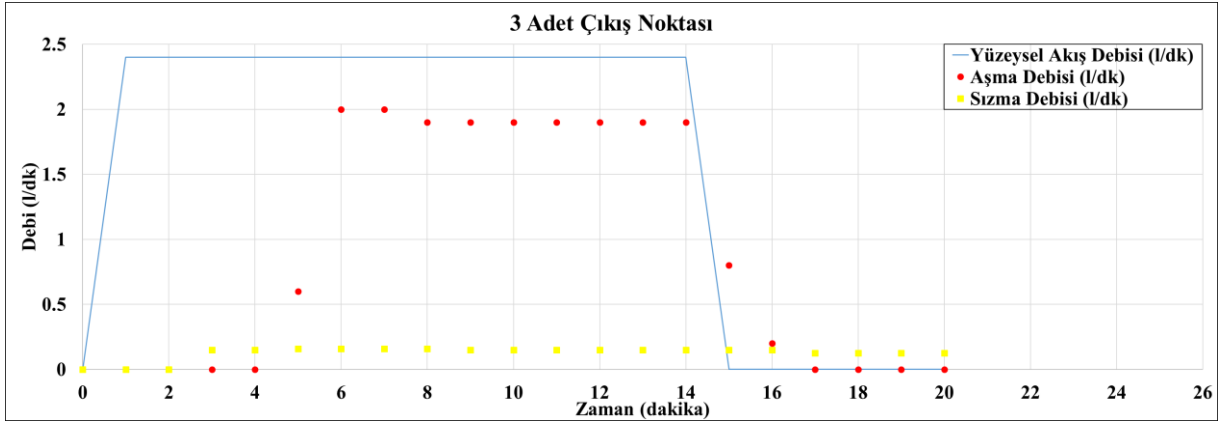
4.1. KÜÇÜK ÖLÇEKLİ LABORATUVAR DENEY DÜZENEGİ İLE ELDE EDİLEN BULGULAR

Çalışmanın ilk etabını oluşturan deneyler İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Burada yapılan deneyler, büyük ölçekli sızdırma hendeğinde yapılması gereken deneylerin yapılma sistematığına ilişkin ön bilgi edinmek amacıyla yapılmıştır. Büyük ölçekli sızdırma hendeği, YHB deney düzeneğine entegre edildiğinde sızmanın ölçülebilmesi için sadece ön sağ alt yüzünde 1 adet çıkış noktası bulunmaktaydı. Sızma ölçümü için 1 adet çıkış noktasının yeterliliği 25 cm x 25 cm x 42 cm boyutlarında plastik kap ile laboratuvarında denenmiştir. Yapılan deney sonucuna ait grafik Şekil 4.1'de verilmiştir.



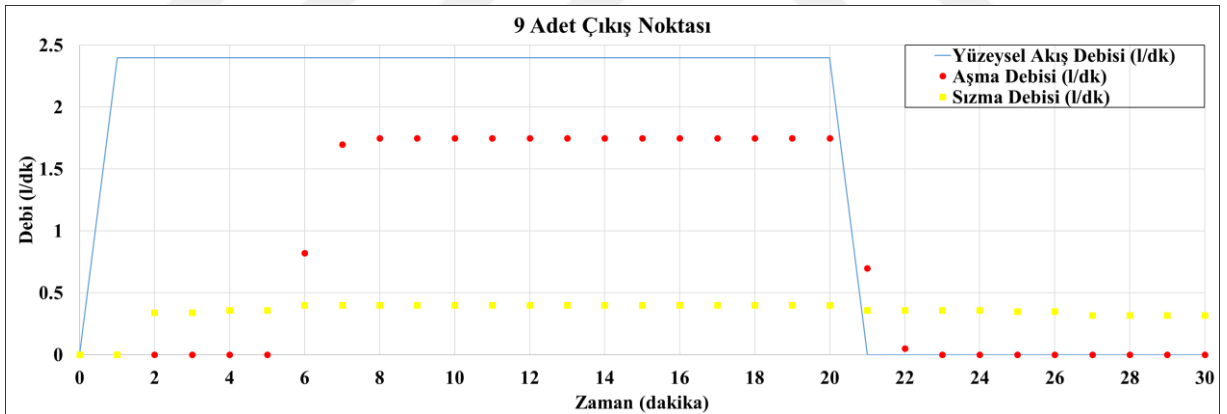
Şekil 4.1: 1 adet çıkış noktası ile yapılan laboratuvar deneyi.

Şekil 4.1 incelendiğinde sızma suyunun 1 adet çıkış noktasından yeterince toplanamadığı ve bu miktarın sızdırma hendeğinin ana prensibini oluşturan sızdırma kısmını temsil etmediği görülmüştür. Bu sonuca göre plastik kabın ön yüzüne iki adet daha delik açılarak sızmanın ölçülebilmesi için toplamda 3 adet delik oluşturulmuştur. Yapılan deneye ait sonuç grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2: 3 adet çıkış noktası ile yapılan laboratuvar deneyi.

Şekil 4.2 incelendiğinde sızma için 3 adet çıkış noktasına sahip deney düzeneğinin 1 adet çıkış noktasına sahip deney düzeneğine göre sızmayı büyük ölçüde artırdığı görülmektedir. Bu deneyin sonucuna bakarak daha fazla deliğin sızmayı ne oranda etkileyeceğini araştırmak için plastik kabın sağ ve sol yüzlerinin altına 3'er tane daha delik açılarak toplamda sızmanın ölçülebileceği 9 adet delik elde edilmiştir. 9 adet delikle yapılan deney sonuçlarına ait grafik Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3: 9 adet çıkış noktası ile yapılan laboratuvar deneyi.

Şekil 4.3'deki grafik incelendiğinde, sızma için 3 adet çıkış noktasına sahip olan deney düzeneğine göre, 9 adet çıkış noktasına sahip deney düzeneğinde, sızma debisi sonuçlarının arttığı ve aşma debisi değerlerinin düştüğü görülmüştür. Yapılan bu deneyler sonucunda büyük ölçekli deney düzeneğine sızma için 9 adet delik açılmasına karar verilmiş ve büyük ölçekli deney düzeneğinde deneyler sızmanın ölçüleceği 9 adet delik açılarak yapılmıştır.

4.2. YHS DENEY DÜZENEGİ İLE ELDE EDİLEN BULGULAR

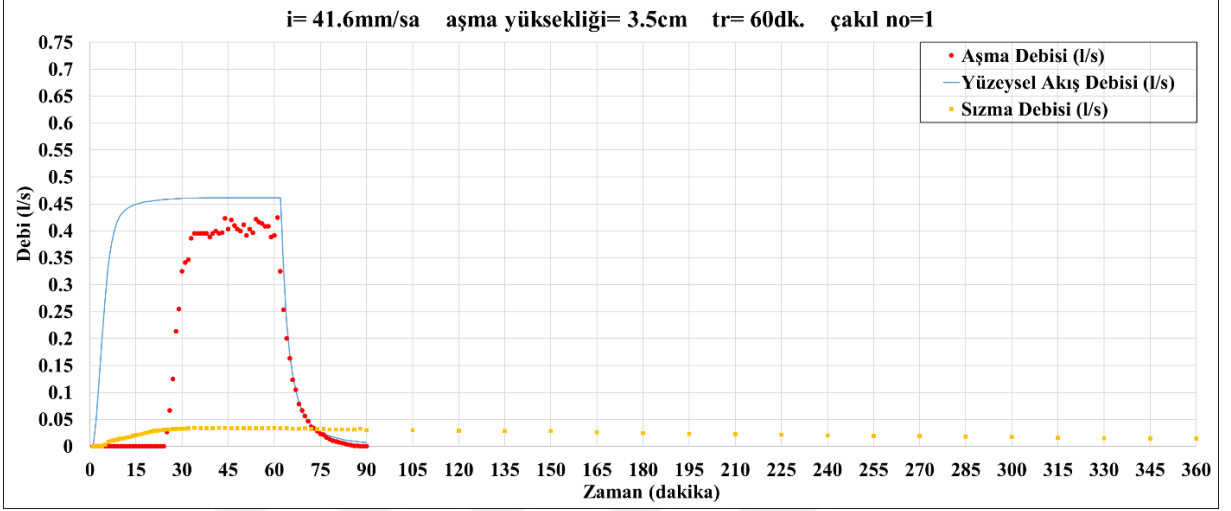
Çalışmanın önemli bölümünü oluşturan deneyler İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölüm Binası'nın arka cephesinde yer alan İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı'na ait Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği (YHS) deney düzeneğinde yapılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği deney düzeneği.

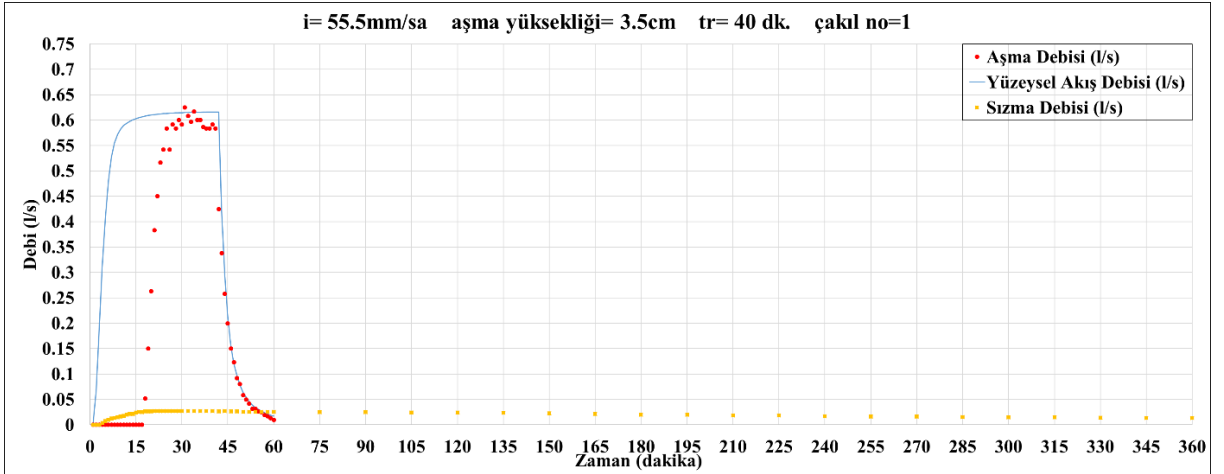
YHS deney düzeneğinde 2 farklı aşma yüksekliği (3.5 cm ve 18.5 cm) ve 3 farklı yağış şiddeti için (41.6 mm/sa, 55.5 mm/sa, 66.6 mm/sa) 1 numaralı çakılın kullanıldığı toplamda 6 adet deney yapılmıştır. Bunun yanında 4 numaralı çakıl için 1 adet aşma yüksekliğinde (3.5 cm) 3 farklı yağış şiddeti için (41.6 mm/sa, 55.5 mm/sa, 66.6 mm/sa) toplamda 3 adet deney yapılmıştır. Yapılan deneylerde aşma debisi, sızma debisi ve sızdırma hendeğinin üzerinde biriken suyun yüksekliği zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler Microsoft Excel'de kaydedilerek yüzeysel akış debisi-zaman, aşma debisi-zaman ve sızma debisi-zaman ilişkilerini gösteren hidrograflar elde edilmiştir. Elde edilen hidrograflar Şekil 4.5 – Şekil 4.13 arasında verilmiştir. Hidrograflarda mavi sürekli çizgi ile gösterilmiş olan yüzeysel akış debisi EPA SWMM programından elde edilmiştir. Elde edilen yüzeysel akış debisinin maksimum değeri deney esnasında ölçülen yüzeysel akışın maksimum debisi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda EPA SWMM programından elde edilen yüzeysel akış debisi ile

ölçülen yüzeysel akış debisinin aynı olduğu görülmüştür ve EPA SWMM'nin yüzeysel akış debisinin tam olarak temsil edebildiği anlaşılmıştır. Buna istinaden, yapılan sonraki deneylerde yüzeysel akış debisi ölçülmemiş ve EPA SWMM ile hesaplanmıştır.



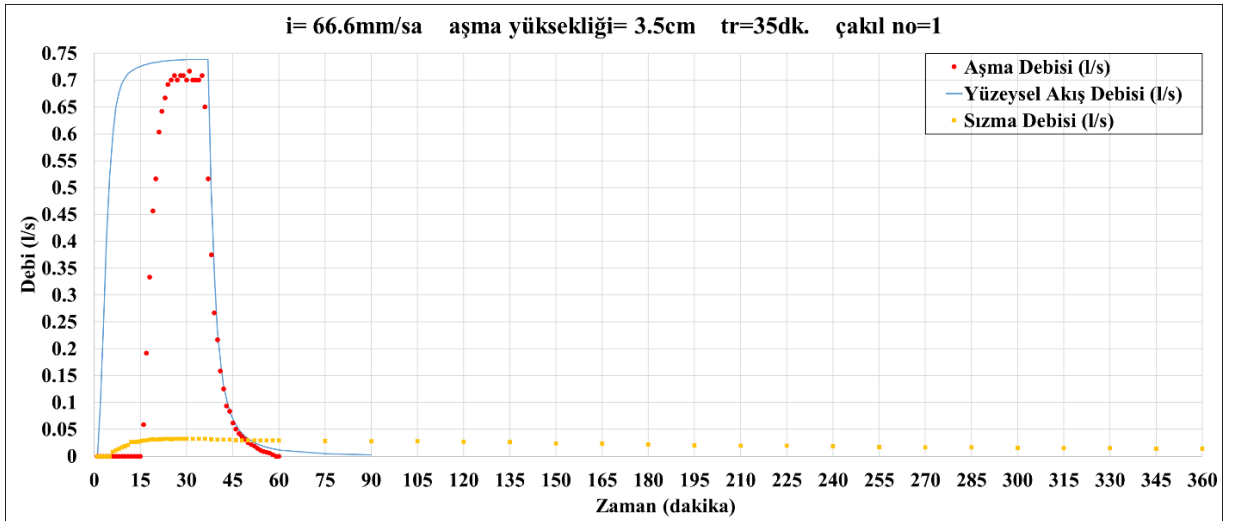
Şekil 4.5: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.

41.6 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.4 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 25. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 35. dakikada ulaştığı görülmektedir. Sızma debisinin pik değerinin 0.04 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Havzadan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akışın pik debisinin ise 0.46 l/s civarında olduğu görülmektedir. Sızdırma hendeğinin ilgili yağış şiddeti ve aşma yüksekliği değerinde akışın pik debisini % 10 ile 15 azalttığı görülmektedir. Ayrıca aşmanın pik debiye ulaşma süresini yaklaşık 25 dakika ötelemiştir.



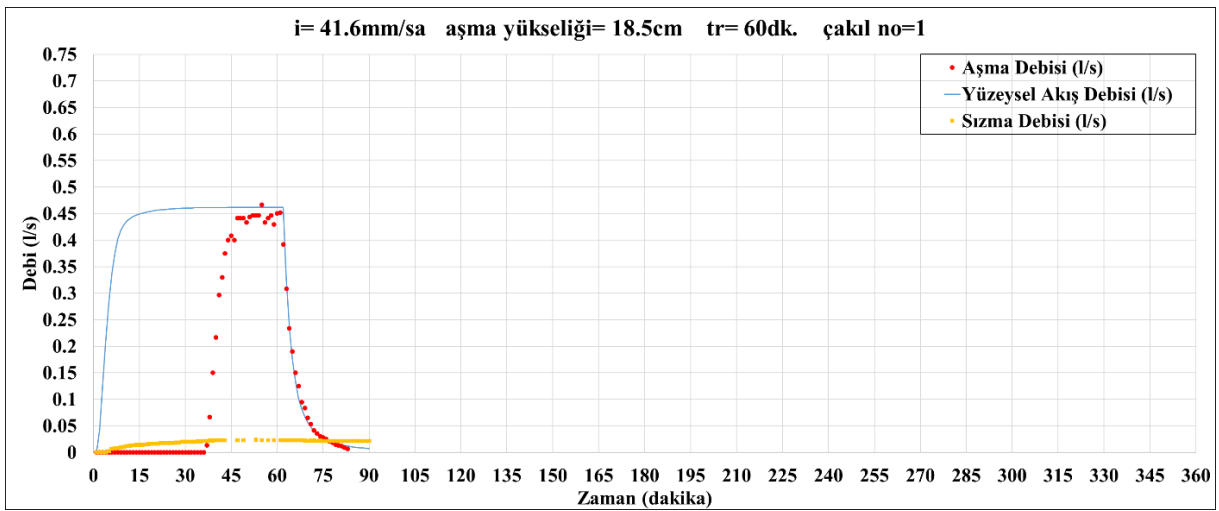
Şekil 4.6: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.

55.5 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.58 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 18. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 25. dakikada ulaştığı görülmektedir. Sızma debisinin pik değerinin 0.03 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan yaklaşık 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Havzadan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akışın pik debisinin ise 0.63 l/s civarında olduğu görülmektedir. Sızdırma hendeğinin ilgili yağış şiddeti ve aşma yüksekliği değerinde akışın pik debisini % 8 ile 10 azalttığı görülmektedir. Ayrıca aşmanın pik debiye ulaşma süresini yaklaşık 15 dakika ötelemiştir.



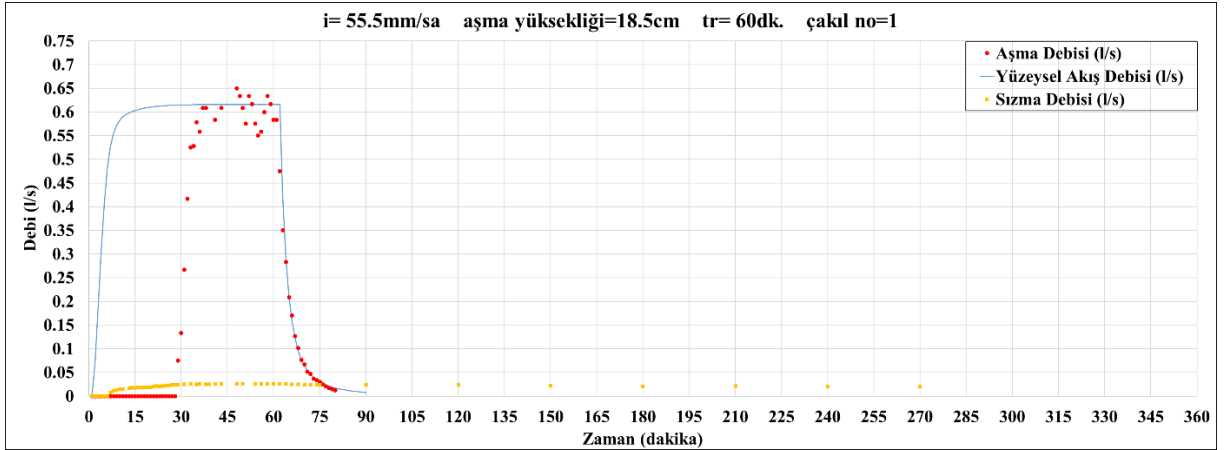
Şekil 4.7: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.

66.6 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.7 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 16. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 25. dakikada ulaştığı görülmektedir. Sızma debisinin pik değerinin 0.03 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan yaklaşık 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Havzadan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akışın pik debisinin ise 0.73 l/s civarında olduğu görülmektedir. Sızdırma hendeğinin ilgili yağış şiddeti ve aşma yüksekliği değerinde akışın pik debisini % 4 ile 5 azalttığı görülmektedir. Ayrıca aşmanın pik debiye ulaşma süresini yaklaşık 15 dakika ötelemiştir.



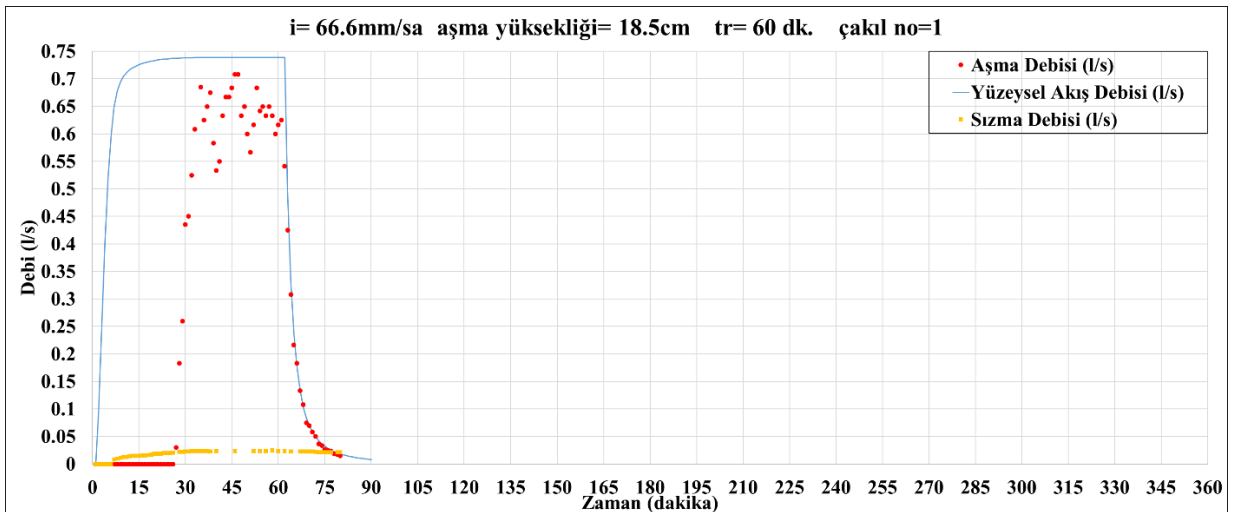
Şekil 4.8: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyde ait hidrograflar.

41.6 mm/sa ve 18.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.44 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 37. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 47. dakikada ulaştığı görülmektedir. Sızma debisinin pik değerinin 0.025 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Havzadan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akışın pik debisinin ise 0.46 l/s civarında olduğu görülmektedir. Sızdırma hendeğinin ilgili yağış şiddeti ve aşma yüksekliği değerinde akışın pik debisini % 4 ile 5 azalttığı görülmektedir. Ayrıca aşmanın pik debiye ulaşma süresini yaklaşık 35 dakika ötelemiştir.



Şekil 4.9: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.

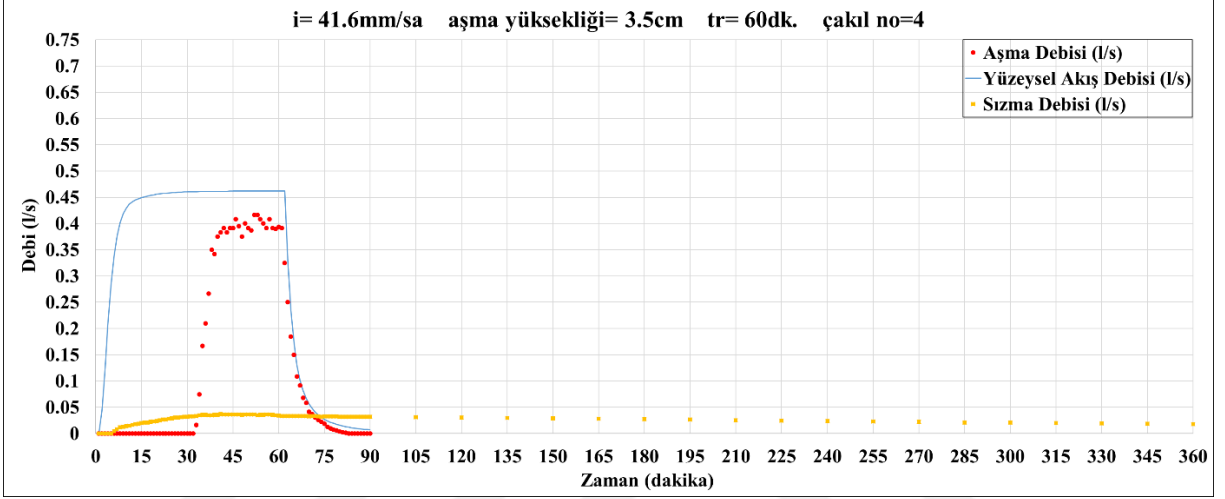
55.5 mm/sa ve 18.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.6 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 29. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 36. dakikada ulaştığı görülmektedir. Sızma debisinin pik değerinin 0.025 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan yaklaşık 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Havzadan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akışın pik debisinin ise 0.63 l/s civarında olduğu görülmektedir. Sızdırma hendeğinin ilgili yağış şiddeti ve aşma yüksekliği değerinde akışın pik debisini % 4 ile 5 azalttığı görülmektedir. Ayrıca aşmanın pik debiye ulaşma süresini yaklaşık 25 dakika ötelemiştir.



Şekil 4.10: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.

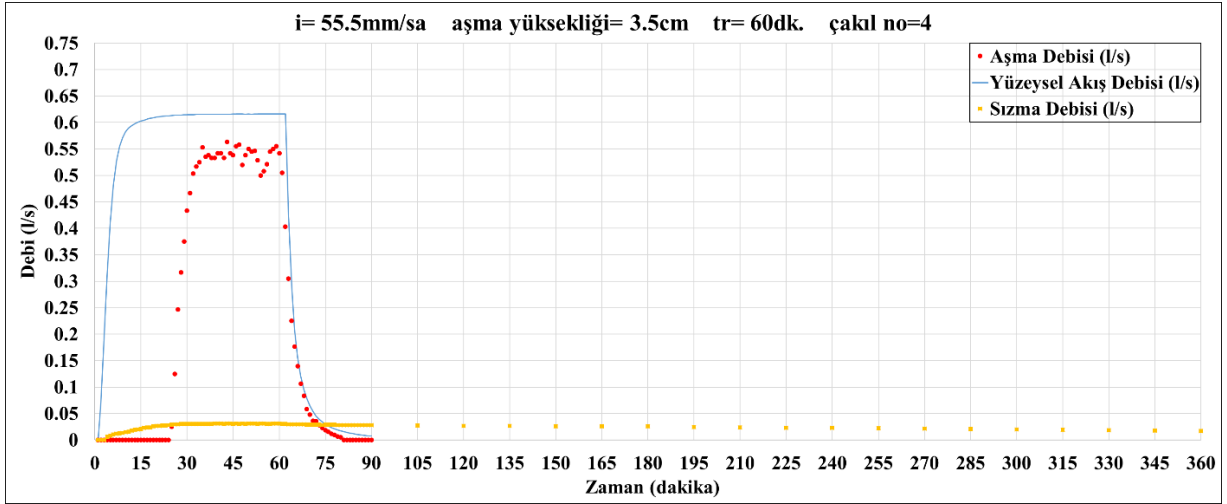
66.6 mm/sa ve 18.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.64 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 27. dakikada yükselmeye

başladığı ve pik değerine 35. dakikada ulaştığı görülmektedir. Sızma debisinin pik değerinin 0.025 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan yaklaşık 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Havzadan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akışın pik debisinin ise 0.73 l/s civarında olduğu görülmektedir. Sızdırma hendeğinin ilgili yağış şiddeti ve aşma yüksekliği değerinde akışın pik debisini % 10 ile 15 azalttığı görülmektedir. Ayrıca aşmanın pik debiye ulaşma süresini yaklaşık 25 dakika ötelemiştir.



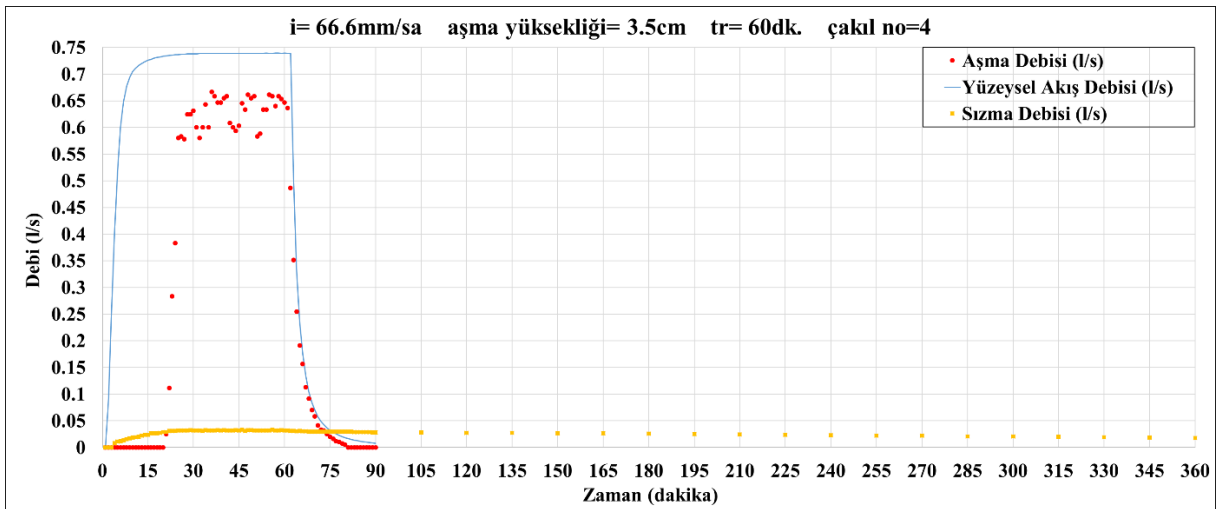
Şekil 4.11: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.

41.6 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde ve 4 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.4 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 33. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 42. dakikada ulaştığı görülmektedir. Sızma debisinin pik değerinin 0.04 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Havzadan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akışın pik debisinin ise 0.46 l/s civarında olduğu görülmektedir. Sızdırma hendeğinin ilgili yağış şiddeti ve aşma yüksekliği değerinde akışın pik debisini % 10 ile 15 azalttığı görülmektedir. Ayrıca aşmanın pik debiye ulaşma süresini yaklaşık 30 dakika ötelemiştir.



Şekil 4.12: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.

55.5 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde ve 4 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.54 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 25. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 35. dakikada ulaştığı görülmektedir. Sızma debisinin pik değerinin 0.03 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan yaklaşık 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Havzadan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akışın pik debisinin ise 0.63 l/s civarında olduğu görülmektedir. Sızdırma hendeğinin ilgili yağış şiddeti ve aşma yüksekliği değerinde akışın pik debisini % 10 ile 15 azalttığı görülmektedir. Ayrıca aşmanın pik debiye ulaşma süresini yaklaşık 25 dakika ötelemiştir.



Şekil 4.13: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneye ait hidrograflar.

66.6 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde ve 4 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.65 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 21. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 28. dakikada ulaştığı görülmektedir. Sızma debisinin pik değerinin 0.03 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan yaklaşık 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Havzadan sızdırma hendeğine ulaşan yüzeysel akışın pik debisinin ise 0.73 l/s civarında olduğu görülmektedir. Sızdırma hendeğinin ilgili yağış şiddeti ve aşma yüksekliği değerinde akışın pik debisini % 10 ile 12 azalttığı görülmektedir. Ayrıca aşmanın pik debiye ulaşma süresini yaklaşık 20 dakika ötelemiştir.

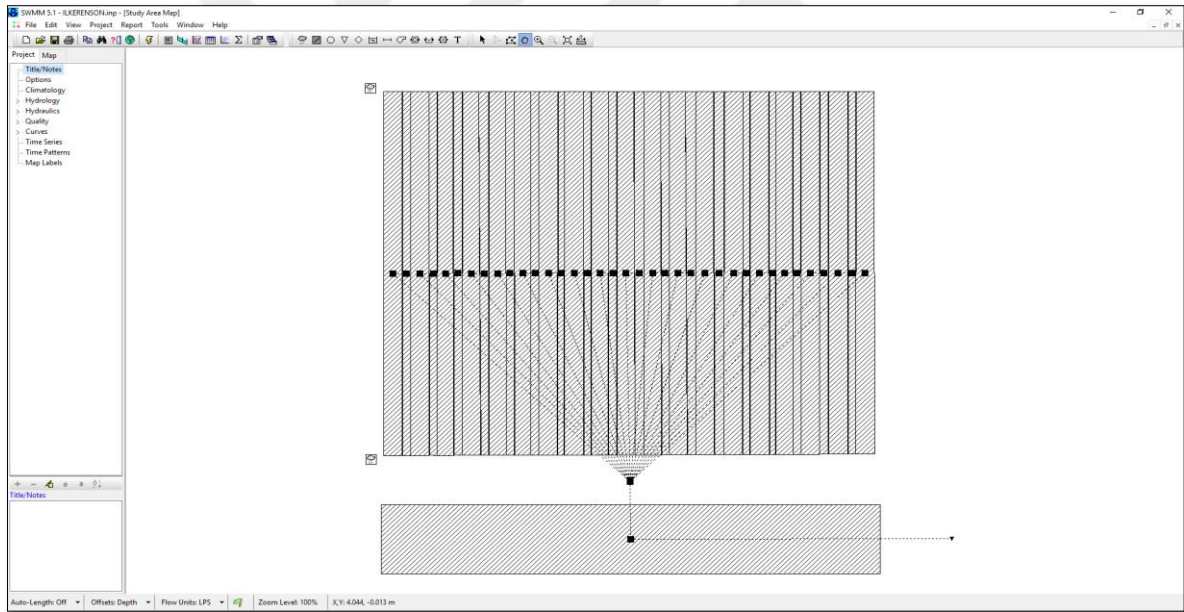
Yapılan açık hava deneyleri sonucunda aşağıda sıralanmış bulgular elde edilmiştir:

- Aynı aşma yüksekliği değerinde yağış şiddetinin artışı sızma debisini çok fazla etkilememiştir.
- Aynı aşma yüksekliği değerinde düşük şiddetli yağıştan yüksek şiddetli yağışa gidildikçe aşma debisinin yükselmeye başlama süresi ve aşma debisinin pik debiye ulaşma süresi kısalmıştır.
- Farklı aşma yüksekliği ve aynı yağış şiddetinde etkilenen tek husus, aşma debisinin yükselmeye başlama süresi olmuştur. Aşma yüksekliği büyük olan durumda aynı şiddetli yağış için aşma debisi daha geç gelmiştir. Aşma debisinin pik değerinde bir değişim olmamıştır.
- Farklı çakıl cinsi ve aynı aşma yüksekliği ile aynı yağış değerinde büyük çakılda aşma debisinin daha geç geldiği, pik değerine daha geç ulaştığı görülmüştür. Bunun yanında farklı çakıl cinsinde sızma debisinin başlama süresinin ve pik debiye ulaşma süresinin değişmediği görülmüştür.

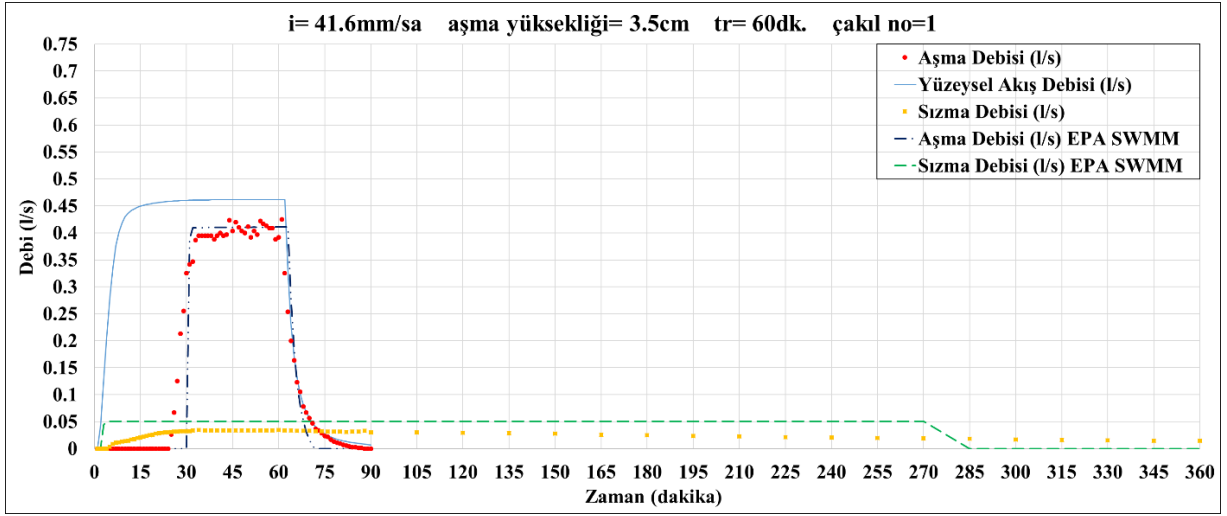
4.2. YHS DÜZENEĞİ İLE EPA SWMM MODELİNİN KIYASLANMASI

YHS deney düzeneği EPA SWMM programında modellenerek yapılan deneylerin sonuçları EPA SWMM model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. EPA SWMM modeli ile deneylerde kullanılan yağış şiddeti ve aşma yükseklikleri altında simülasyonlar yapılmıştır. EPA SWMM ile modelleme yapmak için 37 adet alt havza, 1 adet tamamı sızdırma hendeğini temsil eden alt havza ve 1 adet çıkış noktası tanımlanmıştır (Şekil 4.14). 37 adet alt havzaya, havzanın alanı, genişliği, eğimi, yüzde geçirimsizlik değeri, Manning sürtünme katsayısı değerleri tanımlanmıştır. Sızdırma hendeğini temsil eden alt havzaya havzanın alanı, genişliği, eğimi,

yüzde geçirimsizlik değeri tanımlanmıştır. Bunun yanında bu alt havzanın bir sızdırma hendeğini temsil edebilmesi için “Hydrology” sekmesi altında bulunan “LID Controls” bölümünden sızdırma hendeği tanımlanmıştır. Sızdırma hendeğine yüzey (surface) katmanı başlığı altında aşma yüksekliği, yüzey pürüzlülük katsayısı ve yüzey eğimi değerleri tanımlanmıştır. Sızdırma hendeğine hazne (storage) başlığı altında ise çakıl katmanın yüksekliği, boşluk oranı, sızma hızı değerleri tanımlanmıştır. Sızdırma hendeğinde drenaj (drain) başlığı altında ise sadece akım katsayısı (flow coefficient) değeri, sistemde drenaj olmadığı için, 0 olarak tanımlanmıştır. Gerekli sızdırma hendeği tanımlamaları yapıldıktan sonra, son olarak da modelin çalışabilmesi için sisteme yağış serisi tanımlanmıştır. Yapılan modelden elde edilen analizler sonucunda yüzeysel akış debisi-zaman, aşma debisi-zaman ve sızma debisi-zaman ilişkisini veren hidrograflar elde edilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen hidrograflar ile deneylerden elde edilen hidrograflar Şekil 4.15-Şekil 4.23 arasında verilmiştir.

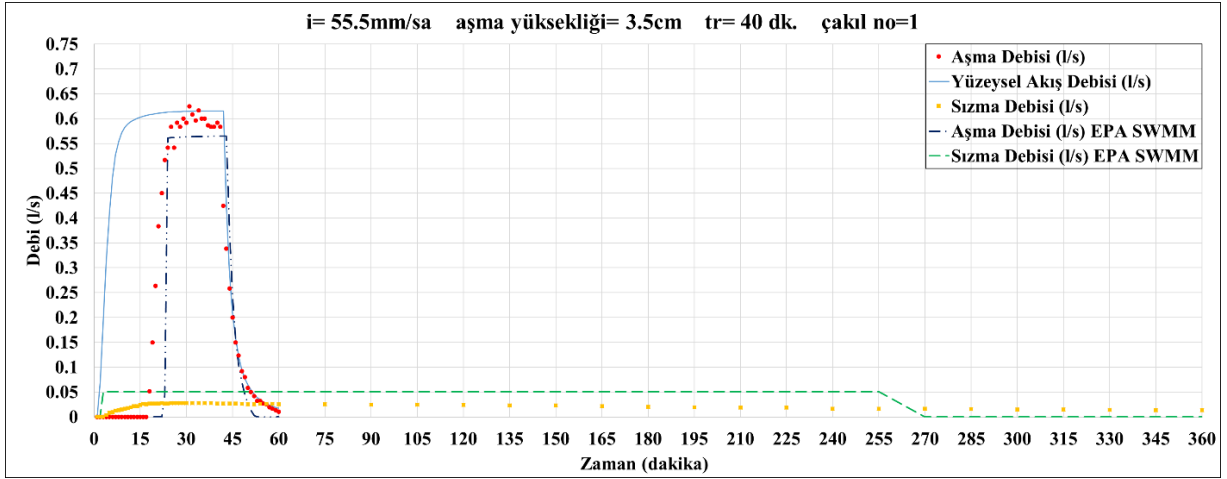


Şekil 4.14: YHS sisteminin EPA SWMM modeli.



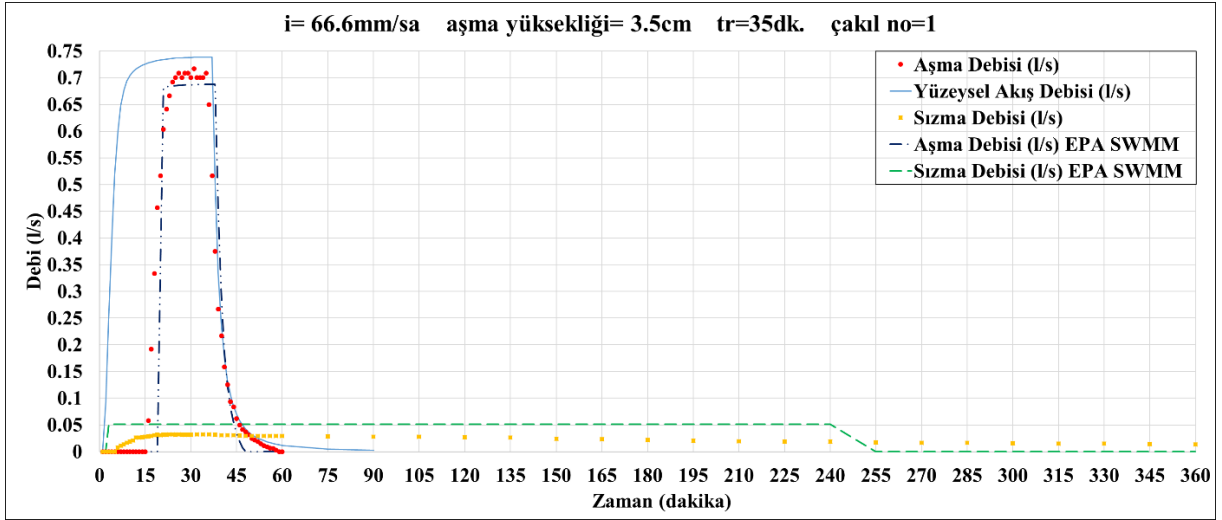
Şekil 4.15: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

41.6 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.4 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 25. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 35. dakikada ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarına bakıldığında ise aşma debisinin biraz daha geç yükselmeye başladığı, aşma debisi pik değerinin deneysel değerlerle çok yakın olduğu ve akışın maksimum değerine ulaşma süresinin neredeyse deney sonuçlarıyla aynı olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen sızma debisinin pik değerinin 0.04 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarında ise sızma debisinin pik değerinin 0.05 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan hemen sonra ulaştığı görülmektedir. 60 dakika süren deneyde sızma debisinin deneysel sonuçlarının zaman içinde giderek azaldığı fakat 6 saat sonra bile sıfırlanmadığı görülmüştür. Diğer yandan, EPA SWMM sonuçlarında ise 60 dakika yağış süresinden sonra sızma debisi değerinin maksimum değerinde 4 buçuk saat devam ettiği ve bu süre sonunda ani bir şekilde azalıp sıfırlandığı görülmektedir.



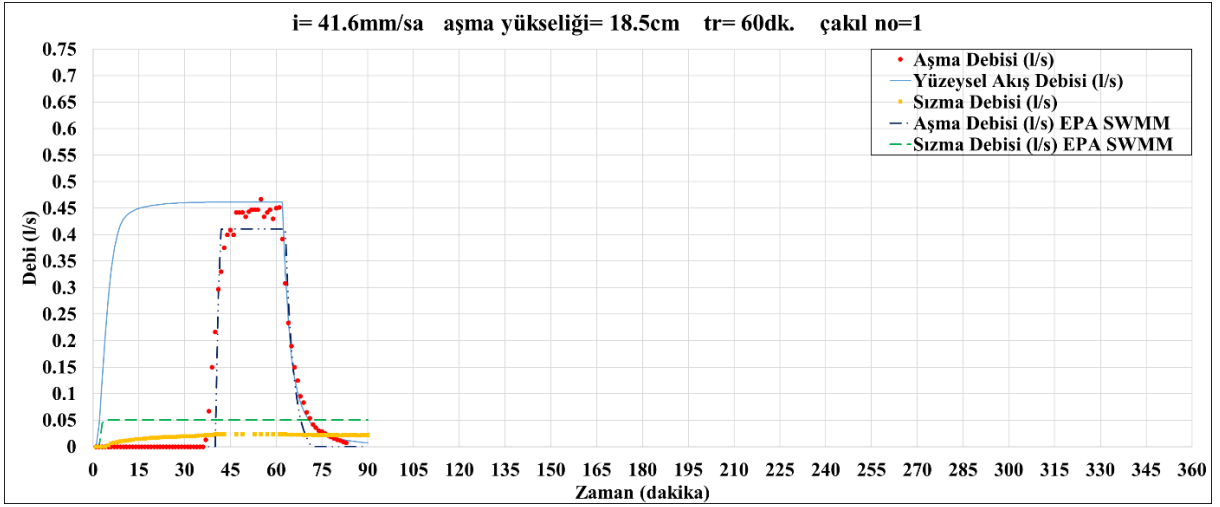
Şekil 4.16: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

55.5 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.58 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 18. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 25. dakikada ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarına bakıldığında ise aşma debisinin biraz daha geç yükselmeye başladığı, aşma debisi pik değerinin deneysel değerlerle yakın olduğu ve akışın maksimum değerine ulaşma süresinin neredeyse deney sonuçlarıyla aynı olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen sızma debisinin pik değerinin 0.03 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarında ise sızma debisinin pik değerinin 0.05 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan hemen sonra ulaştığı görülmektedir. 60 dakika süren deneyde sızma debisinin deneysel sonuçlarının zaman içinde giderek azaldığı fakat 6 saat sonra bile sıfırlanmadığı görülmüştür. Diğer yandan, EPA SWMM sonuçlarında ise 60 dakika yağış süresinden sonra sızma debisi değerinin maksimum değerinde 4 buçuk saat devam ettiği ve bu süre sonunda ani bir şekilde azalıp sıfırlandığı görülmektedir.



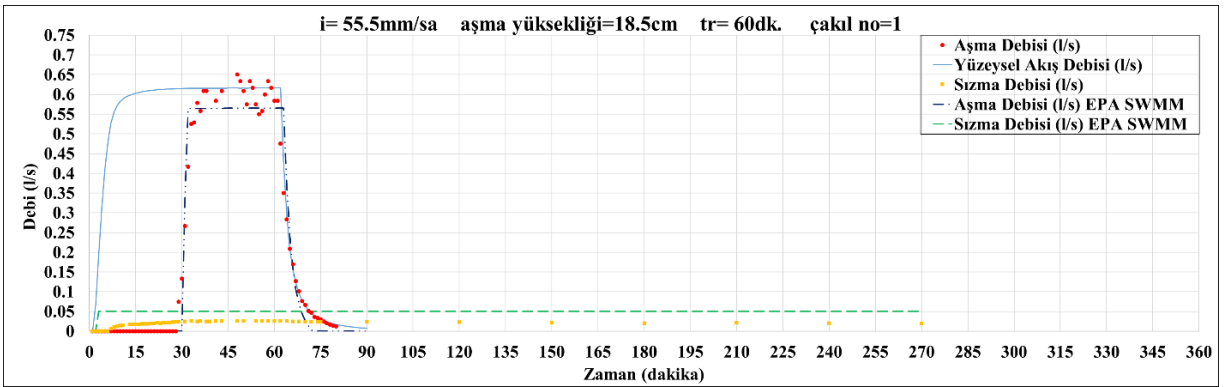
Şekil 4.17: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

66.6 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.7 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 16. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 25. dakikada ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarına bakıldığında ise aşma debisinin biraz daha geç yükselmeye başladığı, aşma debisi pik değerinin deneysel değerlerle çok yakın olduğu ve akışın maksimum değerine ulaşma süresinin neredeyse deney sonuçlarıyla aynı olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen sızma debisinin pik değerinin 0.03 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarında ise sızma debisinin pik değerinin 0.05 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan hemen sonra ulaştığı görülmektedir. 60 dakika süren deneyde sızma debisinin deneysel sonuçlarının zaman içinde giderek azaldığı fakat 6 saat sonra bile sıfırlanmadığı görülmüştür. Diğer yandan, EPA SWMM sonuçlarında ise 60 dakika yağış süresinden sonra sızma debisi değerinin maksimum değerinde 4 buçuk saat devam ettiği ve bu süre sonunda ani bir şekilde azalıp sıfırlandığı görülmektedir.



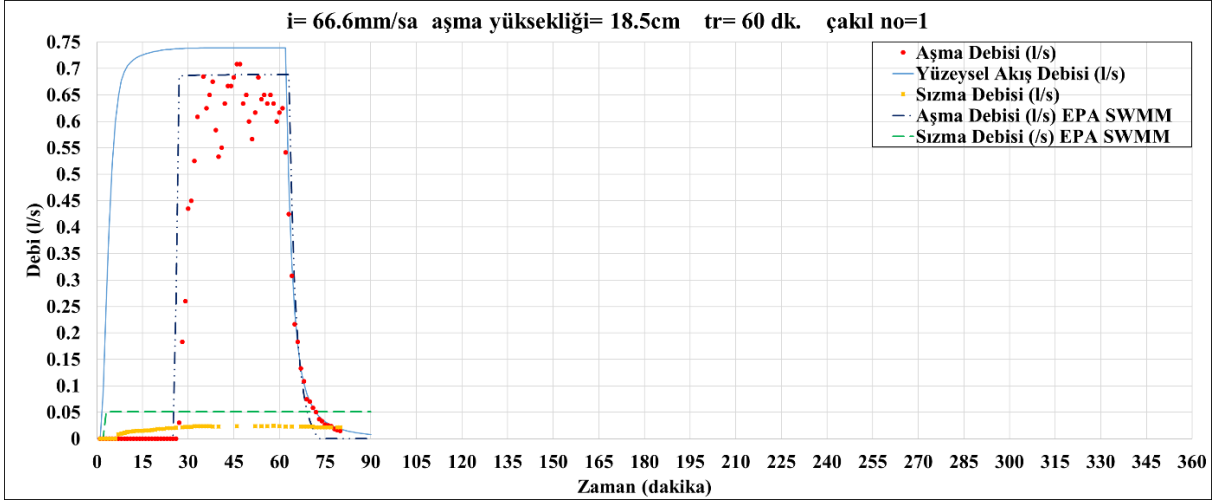
Şekil 4.18: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

41.6 mm/sa ve 18.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.44 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 37. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 47. dakikada ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarına bakıldığında ise aşma debisinin yükselmeye başladığı zamanın deneysel verilerle neredeyse aynı olduğu, aşma debisi pik değerinin deneysel değerlerden biraz daha düşük olduğu ve akışın maksimum değerine ulaşma süresinin neredeyse deney sonuçlarıyla aynı olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen sızma debisinin pik değerinin 0.025 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Diğer yandan, EPA SWMM sonuçlarında ise sızma debisinin pik değerinin 0.05 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan hemen sonra ulaştığı görülmektedir.



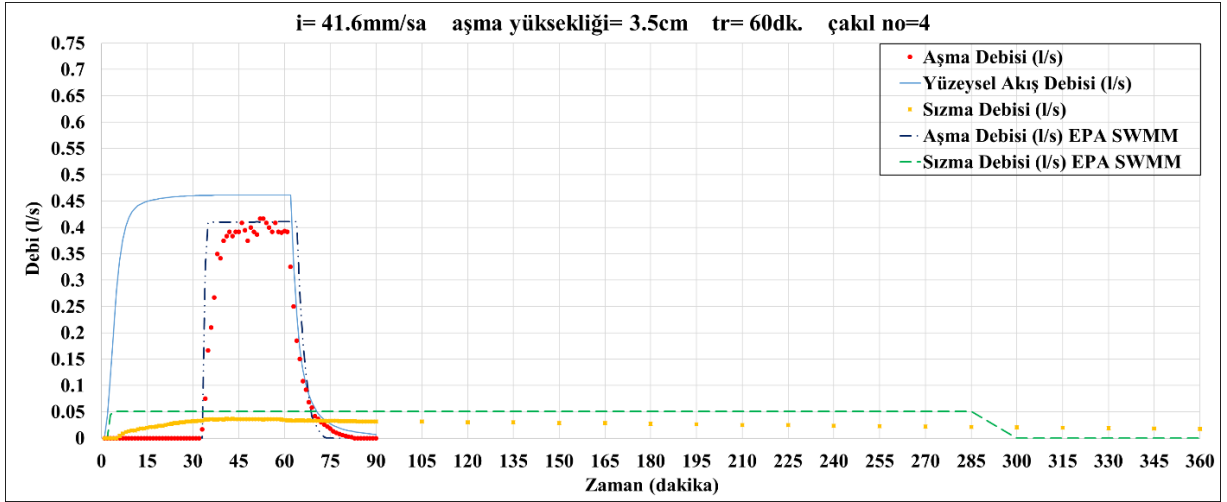
Şekil 4.19: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

55.5 mm/sa ve 18.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.6 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 29. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 36. dakikada ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarına bakıldığında ise aşma debisinin yükselmeye başlama zamanının deneysel verilerle yakın olduğu, aşma debisi pik değerinin deneysel değerlerden biraz daha düşük olduğu ve akışın maksimum değerine ulaşma süresinin neredeyse deney sonuçlarıyla aynı olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen sızma debisinin pik değerinin 0.025 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Diğer yandan, EPA SWMM sonuçlarında ise sızma debisinin pik değerinin 0.05 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan hemen sonra ulaştığı görülmektedir.



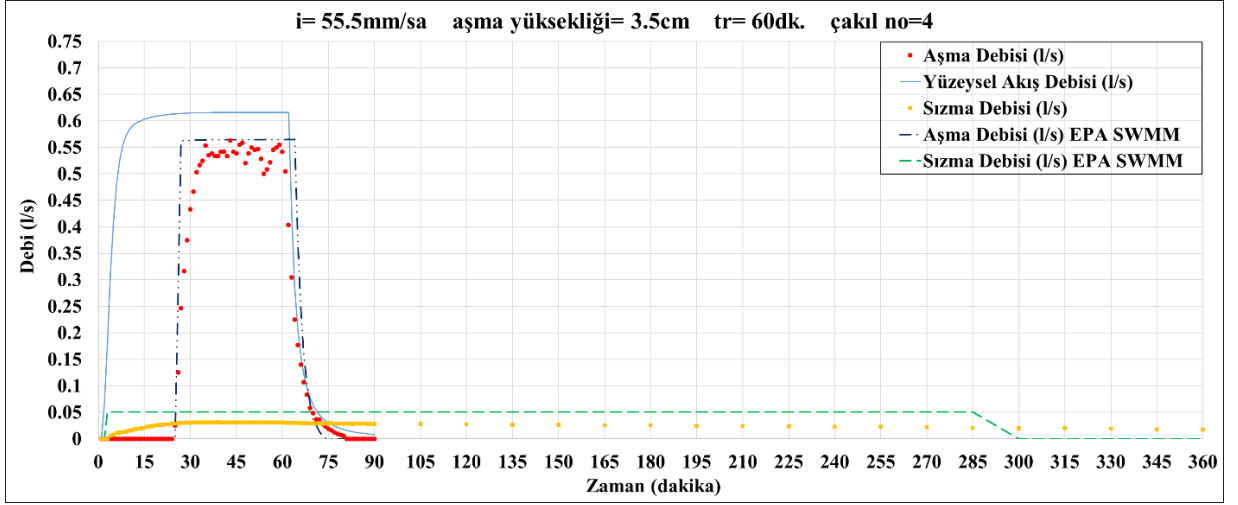
Şekil 4.20: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

66.6 mm/sa ve 18.5 cm aşma yüksekliğinde ve 1 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.64 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 27. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 35. dakikada ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarına bakıldığında ise aşma debisinin yükselmeye başladığı zamanının deneysel değerlerle neredeyse aynı olduğu, aşma debisi pik değerinin deneysel değerlerden biraz daha yüksek olduğu ve akışın maksimum değerine ulaşma süresinin deney sonuçlarıyla yakın olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen sızma debisinin pik değerinin 0.025 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. Diğer yandan, EPA SWMM sonuçlarında ise sızma debisinin pik değerinin 0.05 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan hemen sonra ulaştığı görülmektedir.



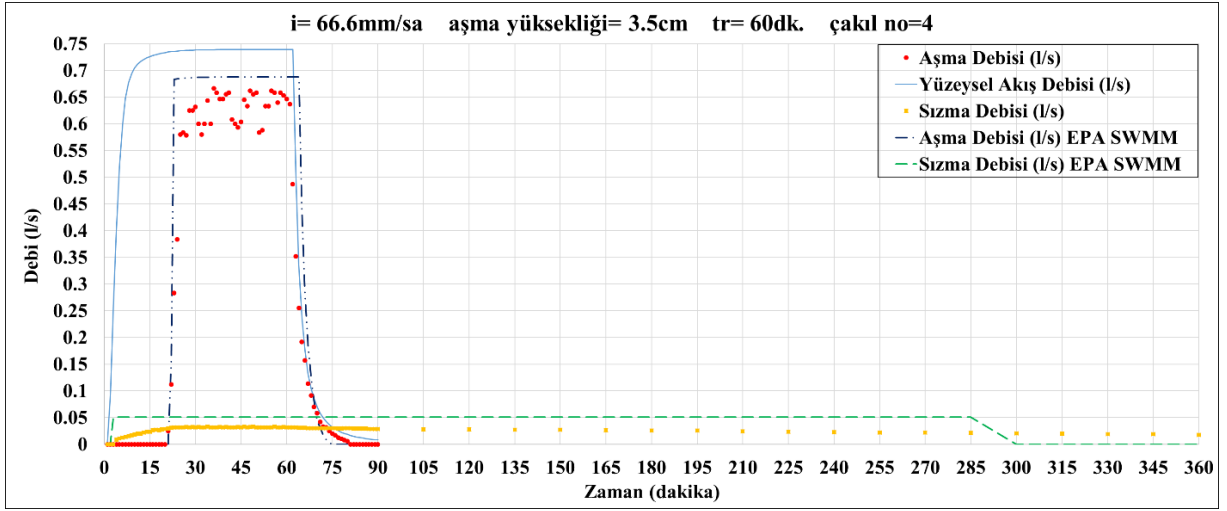
Şekil 4.21: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

41.6 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde 4 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.4 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 33. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 42. dakikada ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarına bakıldığında ise aşma debisinin deneydeki aşma debisiyle aynı anda yükselmeye başladığı, aşma debisi pik değerinin deneysel değerlerle çok yakın olduğu ve akışın maksimum değerine ulaşma süresinin deney sonuçlarından daha önce meydana geldiği görülmektedir. Deneylerden elde edilen sızma debisinin pik değerinin 0.04 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarında ise sızma debisinin pik değerinin 0.05 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan hemen sonra ulaştığı görülmektedir. 60 dakika süren deneyde sızma debisinin deneysel sonuçlarının zaman içinde giderek azaldığı fakat 6 saat sonra bile sıfırlanmadığı görülmüştür. Diğer yandan, EPA SWMM sonuçlarında ise 60 dakika yağış süresinden sonra sızma debisi değerinin maksimum değerinde 4 buçuk saat devam ettiği ve bu süre sonunda ani bir şekilde azalıp sıfırlandığı görülmektedir.



Şekil 4.22: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

55.5 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde 4 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.55 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 25. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 35. dakikada ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarına bakıldığında ise aşma debisinin deneydeki aşma debisiyle aynı anda yükselmeye başladığı, aşma debisi pik değerinin deneysel değerlerle çok yakın olduğu ve akışın maksimum değerine ulaşma süresinin deney sonuçlarından daha önce meydana geldiği görülmektedir. Deneylerden elde edilen sızma debisinin pik değerinin 0.04 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarında ise sızma debisinin pik değerinin 0.05 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan hemen sonra ulaştığı görülmektedir. 60 dakika süren deneyde sızma debisinin deneysel sonuçlarının zaman içinde giderek azaldığı fakat 6 saat sonra bile sıfırlanmadığı görülmüştür. Diğer yandan, EPA SWMM sonuçlarında ise 60 dakika yağış süresinden sonra sızma debisi değerinin maksimum değerinde 4 buçuk saat devam ettiği ve bu süre sonunda ani bir şekilde azalıp sıfırlandığı görülmektedir.



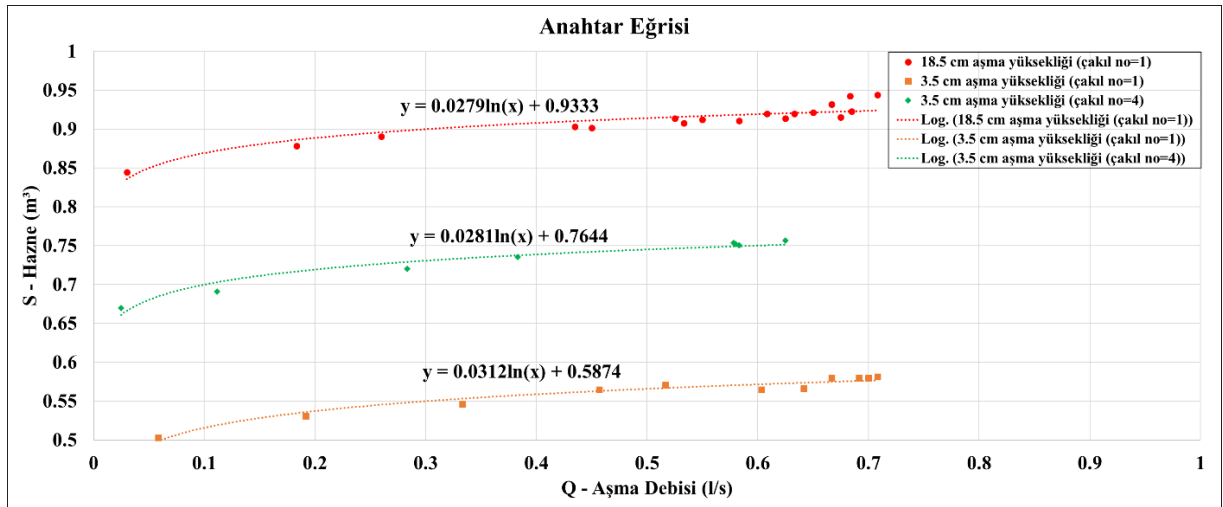
Şekil 4.23: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney sonuçları ile modelden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

66.6 mm/sa ve 3.5 cm aşma yüksekliğinde 4 numaralı çakıl ile yapılan deneyde aşma debisinin pik değerinin 0.63 l/s civarında olduğu, aşma debisinin 21. dakikada yükselmeye başladığı ve pik değerine 28. dakikada ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarına bakıldığında ise aşma debisinin deneydeki aşma debisiyle aynı anda yükselmeye başladığı, aşma debisi pik değerinin deneysel değerlerle çok yakın olduğu ve akışın maksimum değerine ulaşma süresinin deney sonuçlarıyla neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen sızma debisinin pik değerinin 0.04 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan 30 dakika sonra ulaştığı görülmektedir. EPA SWMM sonuçlarında ise sızma debisinin pik değerinin 0.05 l/s civarında olduğu ve bu değere yağış başladıktan hemen sonra ulaştığı görülmektedir. 60 dakika süren deneyde sızma debisinin deneysel sonuçlarının zaman içinde giderek azaldığı fakat 6 saat sonra bile sıfırlanmadığı görülmüştür. Diğer yandan, EPA SWMM sonuçlarında ise 60 dakika yağış süresinden sonra sızma debisi değerinin maksimum değerinde 4 buçuk saat devam ettiği ve bu süre sonunda ani bir şekilde azalıp sıfırlandığı görülmektedir.

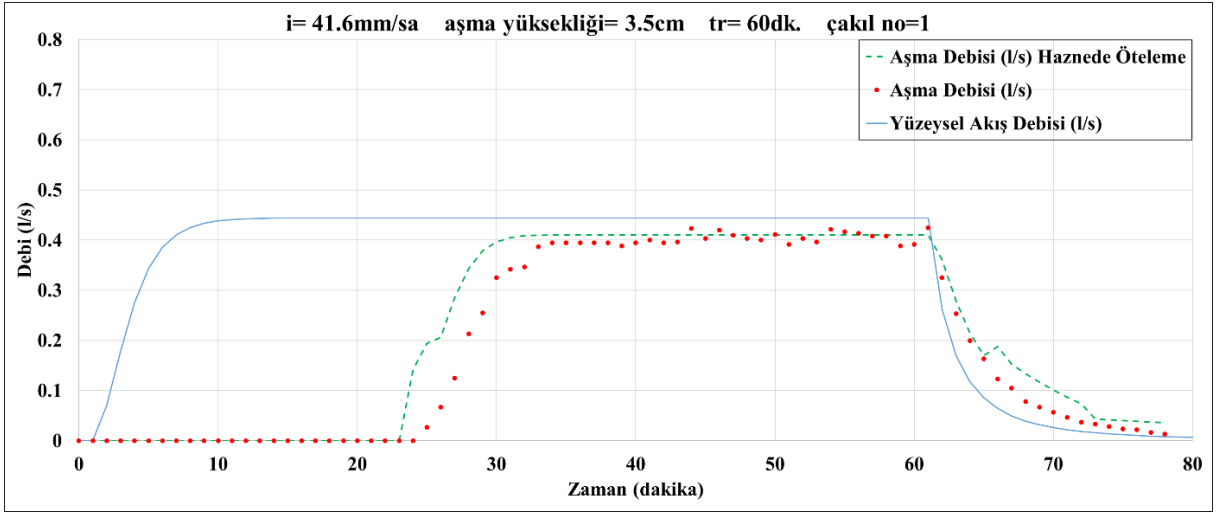
4.3. DENEY SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN AŞMA DEBİSİ HİDROGRAFLARININ HAZNEDE ÖTELEME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN HİDROGRAFLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI

YHS deney düzeneği üzerinde yapılan 9 adet deneye ait aşma debisi sonuçları, haznede öteleme yöntemi kullanılarak elde edilen matematiksel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaları yapabilmek için önce haznede biriken su miktarı ile debi arasındaki ilişkiyi

veren 3.5 cm (1 ve 4 numaralı çakıl için) ve 18.5 cm (1 numaralı çakıl için) cm'ye ait anahtar eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler elde edilirken ilgili aşma yüksekliği değerlerinde en şiddetli yağış olan 66.6 mm/sa'lık yağış şiddetinde yapılan ölçümler kullanılmıştır. 3.5 cm (1 ve 4 numaralı çakıl için) ve 18.5 cm (1 numaralı çakıl için) aşma yüksekliğine karşılık gelen anahtar eğrileri Şekil 4.24'de verilmiştir. Anahtar eğrileri incelendiğinde karakteristiklerinin birbirine çok benzediği görülmektedir. Bunun yanında aynı aşma debisine ulaşıldığında 3.5 cm aşma yüksekliğine sahip 4 numaralı çakılla dolu sızdırma hendeğinin, 1 numaralı çakılla dolu sızdırma hendeğine göre daha fazla su depoladığı görülmektedir. Bunun sebebi 4 numaralı çakılın porozite değerinin ($n=0.5$ (deneyle ölçülmüş değer)) 1 numaralı çakılın porozite değerinden ($n=0.45$ (deneyle ölçülmüş değer)) büyük olmasıdır. Yapılan deneyler sonucunda en fazla su depolayan sızdırma hendeği kombinasyonunun ise 18.5 cm aşma yüksekliğine sahip 1 numaralı çakılla dolu sızdırma hendeği olduğu görülmektedir. Anahtar eğrisi incelendiğinde 1 numaralı çakılla yapılan deneylerde, aşma debisinin gözlemlendiği ilk anda, 3.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan hendekte 0.5 m^3 su biriktiği, 18.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan hendekte ise 0.85 m^3 su biriktiği görülmektedir. Sonuç olarak 1 numaralı çakılda aşma yüksekliği 15 cm artırıldığında %60-70 arasında daha fazla su depolandığı görülmektedir. Aynı aşma yüksekliğinde çakıl cinsinin su depolamaya etkisi incelendiğinde ve benzer hesaplar yapıldığında ise 4 numaralı çakılda 1 numaralı çakıla göre %30-35 daha fazla su depolandığı görülmektedir. Anahtar eğrileri kullanılarak, haznede öteleme metodundan elde edilen aşma debileri ile deneyden elde edilen aşma debilerinin karşılaştırılmalarına ait hidrograflar Şekil 4.25 - Şekil 4.33 arasında verilmiştir.

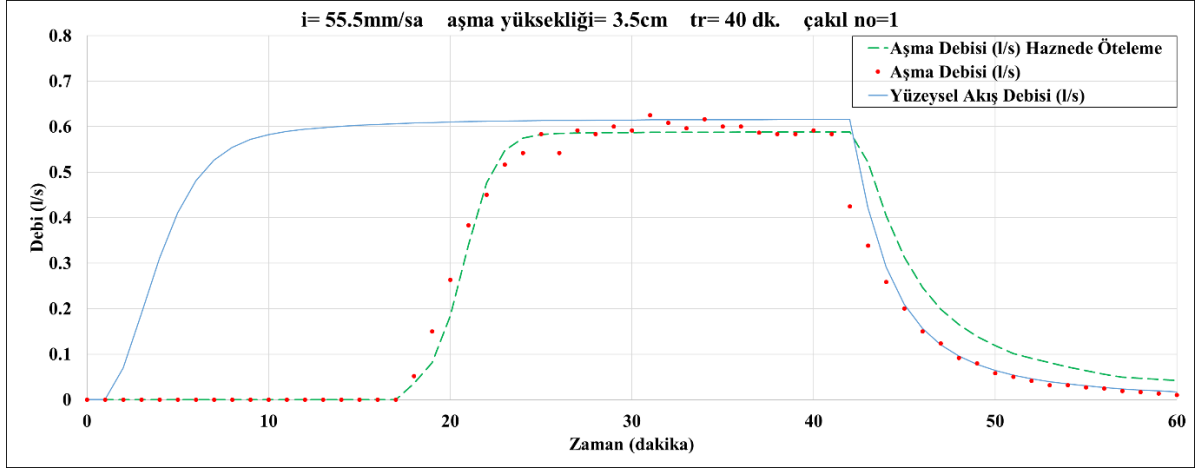


Şekil 4.24: Aşma yüksekliği 3.5 cm ve 18.5 cm olan sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyler ile elde edilen anahtar eğrileri.



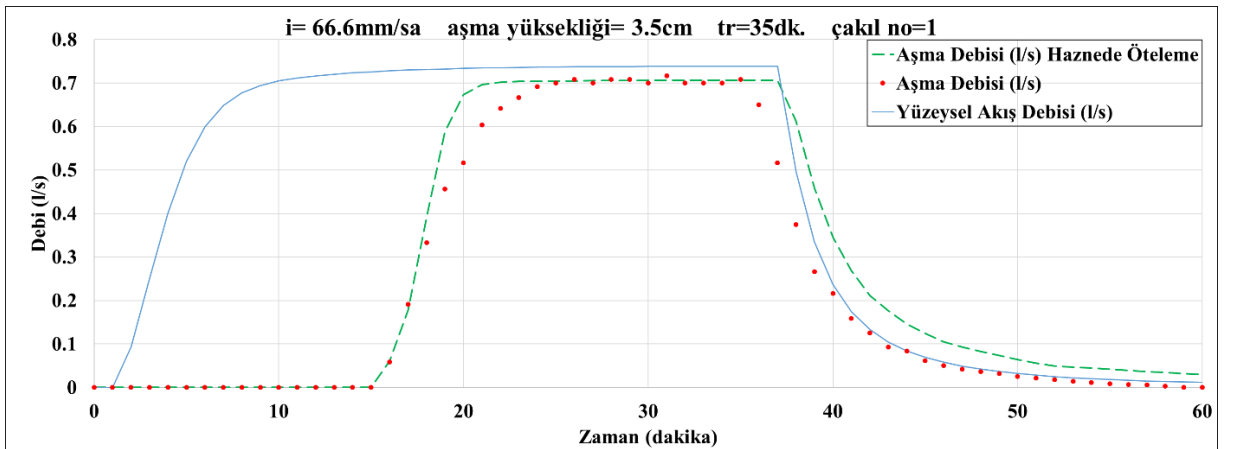
Şekil 4.25: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

41.6 mm/sa yağış şiddetine ve 3.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan, içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi ölçümleri ve haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Haznede öteleme yönteminde aşma debisinin yükselmesi deneysel verilere göre yaklaşık 5 dakika daha önce başlamaktadır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin başlangıç süresi deneysel verilerle çok yakın çıkmıştır. Haznede öteleme yönteminden elde edilen pik debi sonuçları ile deneysel verilerden okunan pik debi değerleri neredeyse aynı çıkmıştır. Yağış kesildikten sonra aşma debisinin azalmaya başlama süresi deneyden elde edilen veriler ve haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçlarla aynı çıkmıştır. Aşma debisinin iniş eğrisi kısmında, haznede öteleme yöntemi ile deneysel verilerin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Genel anlamda, deneysel olarak elde edilen hidrograf eğrisinin karakteristiği ile sayısal olarak elde edilen hidrograf eğrisinin karakteristiği çok büyük oranda benzerlik göstermektedir.



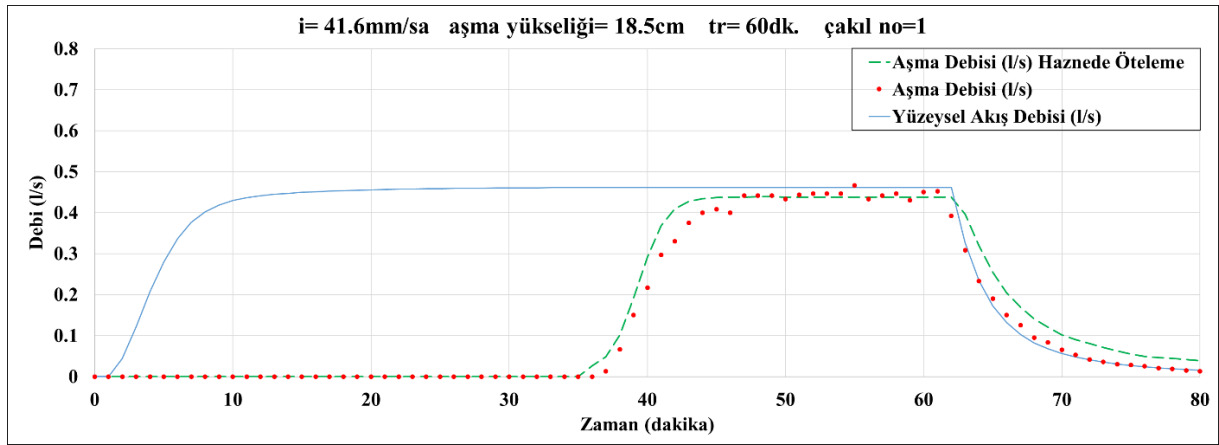
Şekil 4.26: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

55.5 mm/sa yağış şiddetine ve 3.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan, içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi ölçümleri ve haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Haznede öteleme yönteminde aşma debisinin yükselmesi deneysel verilerle aynıdır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin başlangıç süresi deneysel verilerle çok yakın çıkmıştır. Haznede öteleme yönteminden elde edilen pik debi sonuçları ile deneysel verilerden okunan pik debi değerleri neredeyse aynı çıkmıştır. Yağış kesildikten sonra aşma debisinin azalmaya başlama süresi deneyden elde edilen veriler ve haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçlarla neredeyse aynı çıkmıştır. Aşma debisinin iniş eğrisi kısmında, haznede öteleme yöntemi ile deneysel verilerin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.



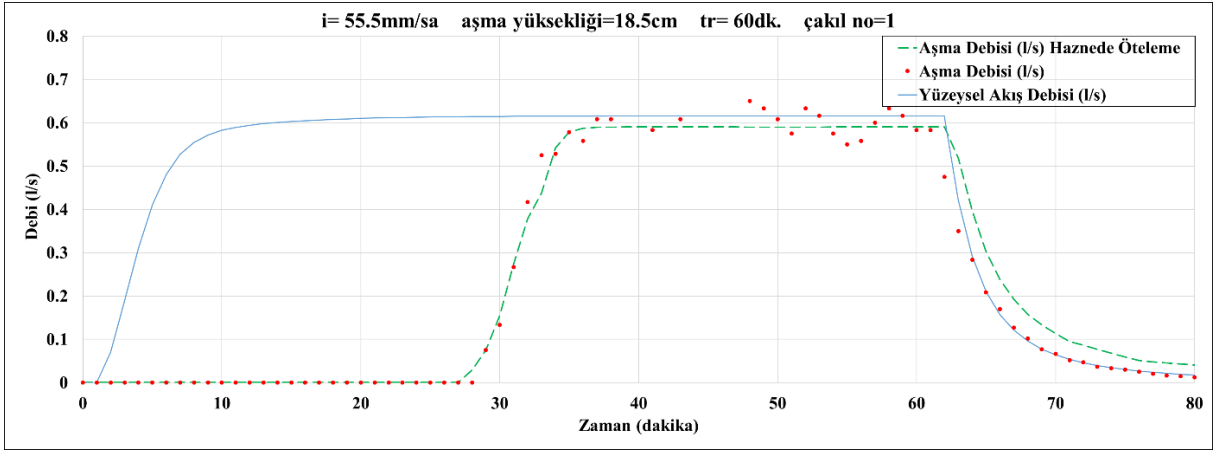
Şekil 4.27: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

66.6 mm/sa yağış şiddetine ve 3.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan, içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi ölçümleri ve haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Haznede öteleme yönteminde aşma debisinin yükselmesi deneysel verilerle aynıdır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin başlangıç süresi deneysel verilerden yaklaşık 5 dakika önce başlamıştır. Haznede öteleme yönteminden elde edilen pik debi sonuçları ile deneysel verilerden okunan pik debi değerleri neredeyse aynı çıkmıştır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin azalmaya başlaması, deneysel verilere göre daha sonra olmuştur. Aşma debisinin iniş eğrisi kısmında, haznede öteleme yöntemi ile deneysel verilerin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.



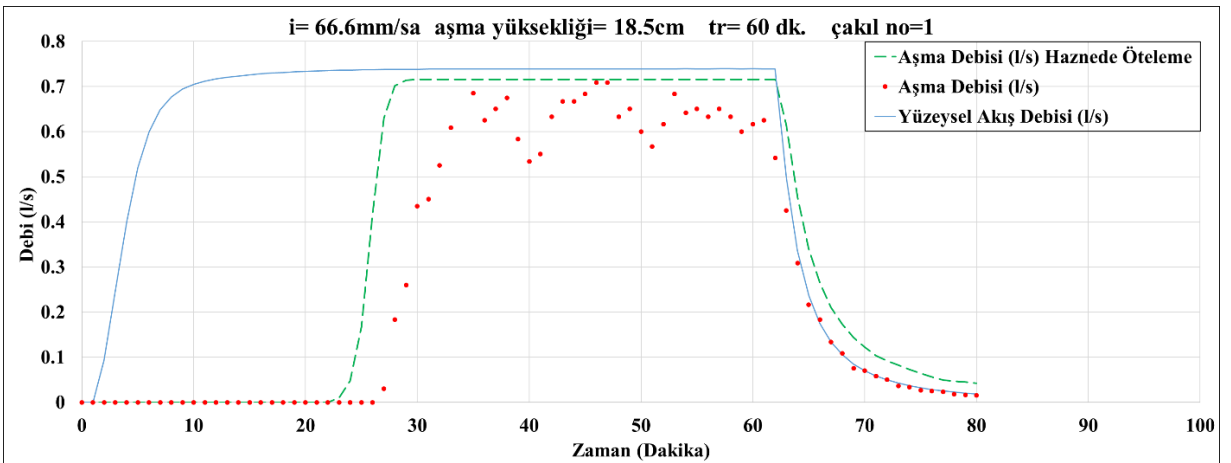
Şekil 4.28: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

41.6 mm/sa yağış şiddetine ve 18.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan, içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi ölçümleri ve haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Haznede öteleme yönteminde aşma debisinin yükselmesi deneysel verilerle neredeyse aynıdır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin başlangıç süresi deneysel verilere göre daha önce başlamıştır. Haznede öteleme yönteminden elde edilen pik debi sonuçları ile deneysel verilerden okunan pik debi değerleri neredeyse aynı çıkmıştır. Yağış kesildikten sonra aşma debisinin azalmaya başlama süresi deneyden elde edilen veriler ve haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçlarla aynı çıkmıştır. Aşma debisinin iniş eğrisi kısmında, haznede öteleme yöntemi ile deneysel verilerin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.



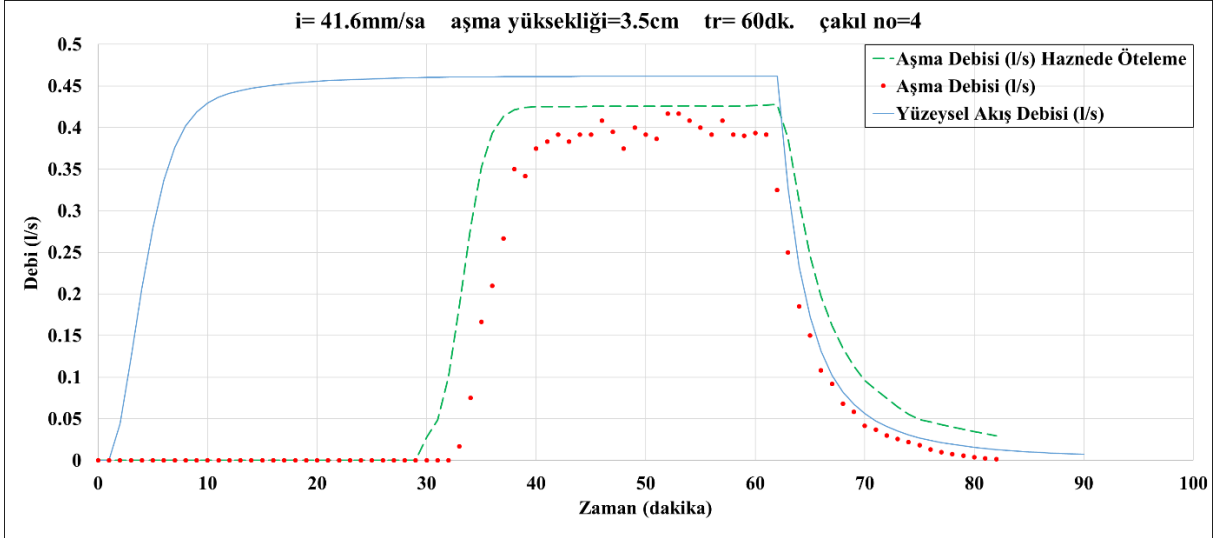
Şekil 4.29: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

55.5 mm/sa yağış şiddetine ve 18.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan, içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi ölçümleri ve haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Haznede öteleme yönteminde aşma debisinin yükselmesi deneysel verilerle neredeyse aynıdır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin başlangıç süresi deneysel verilerle aynıdır. Haznede öteleme yönteminden elde edilen pik debi sonuçları ile deneysel verilerden okunan pik debi değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Yağış kesildikten sonra aşma debisinin azalmaya başlama süresi deneyden elde edilen veriler ve haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçlarla neredeyse aynı çıkmıştır. Aşma debisinin iniş eğrisi kısmında, haznede öteleme yöntemi ile deneysel verilerin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 4.30: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

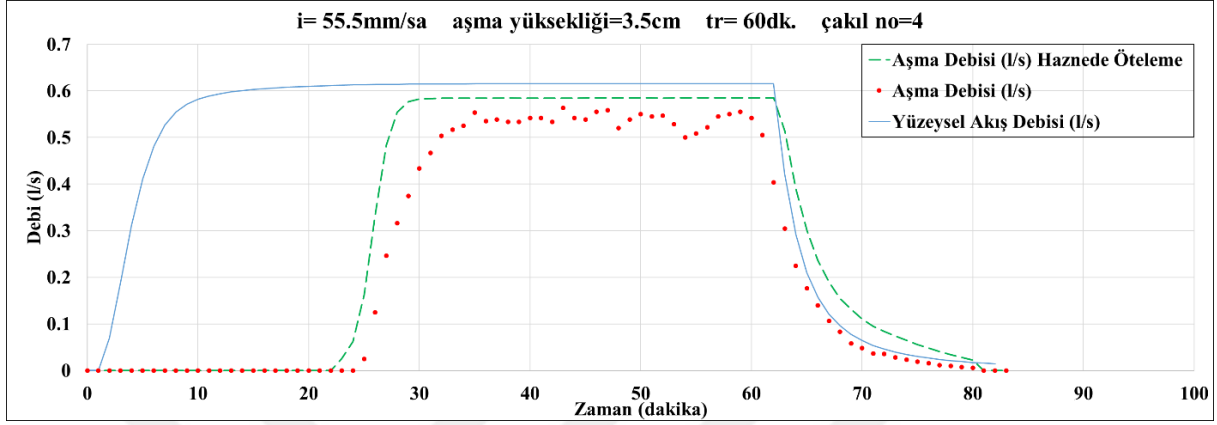
66.6 mm/sa yağış şiddetine ve 18.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan, içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi ölçümleri ve haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Haznede öteleme yönteminde aşma debisinin yükselmesi deneysel verilerden daha önce başlamıştır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin başlangıç süresi deneysel verilerden yaklaşık 10 dakika önce başlamıştır. Haznede öteleme yönteminden elde edilen pik debi sonuçları, deneysel verilerden okunan pik debi değerlerinden yüksek çıkmıştır. Yağış kesildikten sonra aşma debisinin azalmaya başlama süresi deneyden elde edilen veriler ve haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçlarla neredeyse aynı çıkmıştır. Aşma debisinin iniş eğrisi kısmında, haznede öteleme yöntemi ile deneysel verilerin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 4.31: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

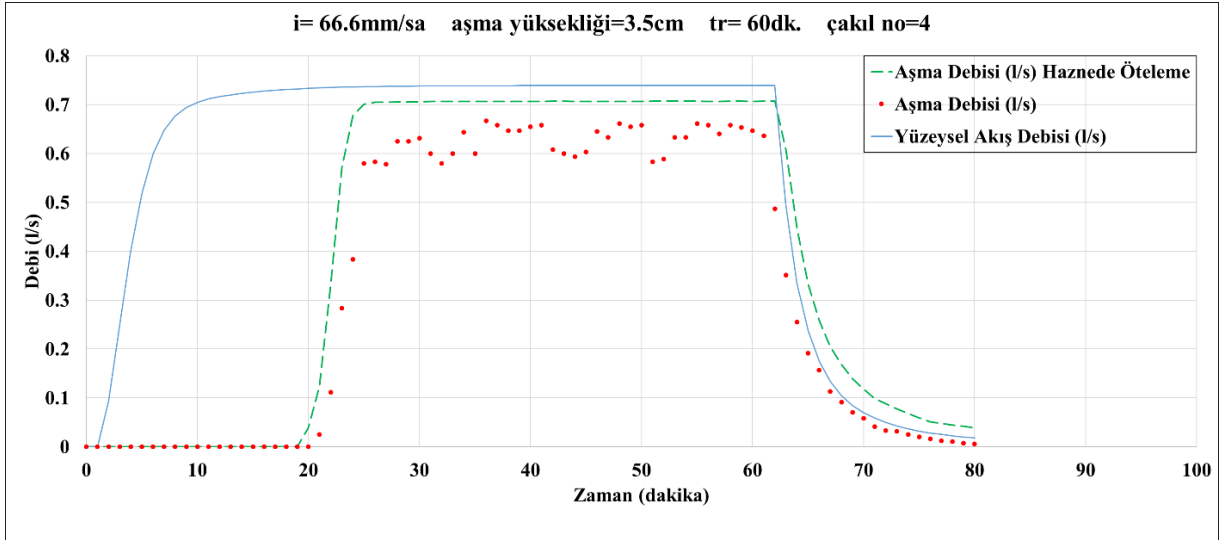
41.6 mm/sa yağış şiddetine ve 3.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan, içinde 4 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi ölçümleri ve haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Haznede öteleme yönteminde aşma debisinin yükselmesi deneysel verilere göre 4 dakika daha önce başlamaktadır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin başlangıç süresi deneye göre 5 dakika erkendir. Haznede öteleme yönteminden elde edilen pik debi sonuçları deneysel verilere göre biraz yüksek çıkmıştır. Yağış kesildikten sonra aşma debisinin azalmaya başlama süresi deneyden elde edilen veriler ve haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçlarla aynı çıkmıştır. Aşma debisinin iniş eğrisi kısmında, haznede öteleme yöntemi ile deneysel verilerin sonuçları

birbirine yakın çıkmıştır. Genel anlamda, deneysel olarak elde edilen hidrograf eğrisinin karakteristiği ile sayısal olarak elde edilen hidrograf eğrisinin karakteristiği çok büyük oranda benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.32: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

55.5 mm/sa yağış şiddetine ve 3.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan, içinde 4 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi ölçümleri ve haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Haznede öteleme yönteminde aşma debisinin yükselmesi deneysel verilere göre 3 dakika daha önce başlamaktadır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin başlangıç süresi deneye göre 5 dakika erkendir. Haznede öteleme yönteminden elde edilen pik debi sonuçları deneysel verilere göre biraz yüksek çıkmıştır. Yağış kesildikten sonra aşma debisinin azalmaya başlama süresi deneyden elde edilen veriler ve haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçlarla neredeyse aynı çıkmıştır. Aşma debisinin iniş eğrisi kısmında, haznede öteleme yöntemi ile deneysel verilerin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Genel anlamda, deneysel olarak elde edilen hidrograf eğrisinin karakteristiği ile sayısal olarak elde edilen hidrograf eğrisinin karakteristiği çok büyük oranda benzerlik göstermektedir.

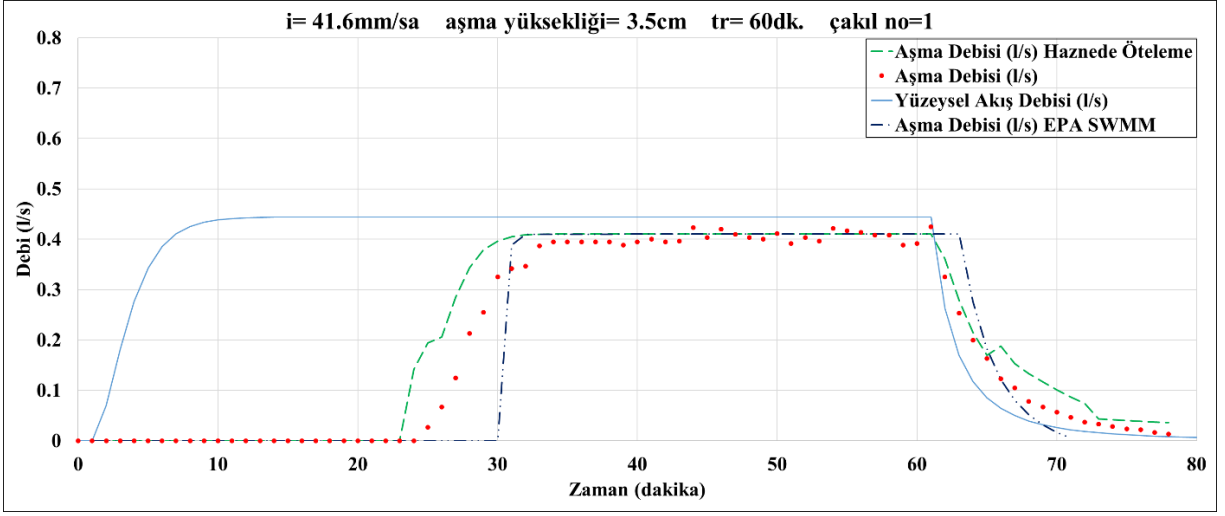


Şekil 4.33: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ve haznede öteleme yöntemi ile elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

66.6 mm/sa yağış şiddetine ve 3.5 cm aşma yüksekliğine sahip olan, içinde 4 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi ölçümleri ve haznede öteleme yöntemiyle elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Haznede öteleme yönteminde aşma debisinin yükselmesi deneysel verilerle neredeyse aynı anda başlamaktadır. Haznede öteleme yönteminde pik debinin başlangıç süresi deneyle aynıdır. Haznede öteleme yönteminden elde edilen pik debi sonuçları deneysel verilere göre biraz yüksek çıkmıştır. Yağış kesildikten sonra aşma debisinin azalmaya başlama süresi deneyden elde edilen veriler ve haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçlarla neredeyse aynı çıkmıştır. Aşma debisinin iniş eğrisi kısmında, haznede öteleme yöntemi ile deneysel verilerin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Genel anlamda, deneysel olarak elde edilen hidrograf eğrisinin karakteristiği ile sayısal olarak elde edilen hidrograf eğrisinin karakteristiği çok büyük oranda benzerlik göstermektedir.

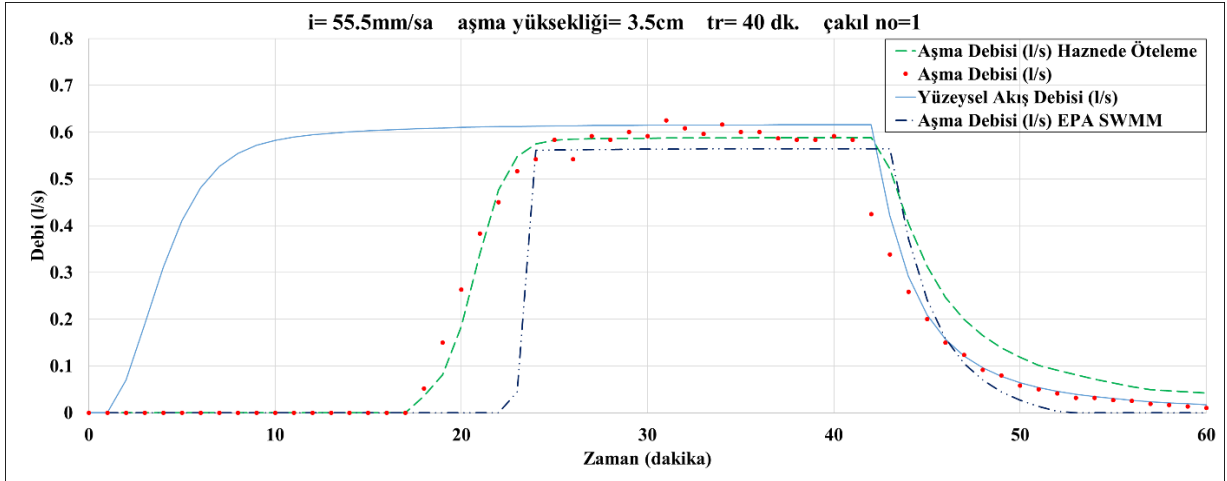
4.4. DENEY SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN AŞMA DEBİSİ HİDROGRAFLARININ HAZNEDE ÖTELEME YÖNTEMİ VE EPA SWMM İLE ELDE EDİLEN HİDROGRAFLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu kısımda deneyden elde edilen aşma debileri ile haznede öteleme yöntemi ile elde edilen aşma debileri ve EPA SWMM’de yapılan model ile elde edilmiş aşma debilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırmalara ait aşma debisi hidrografları Şekil 4.34-Şekil 4.42 arasında verilmiştir.



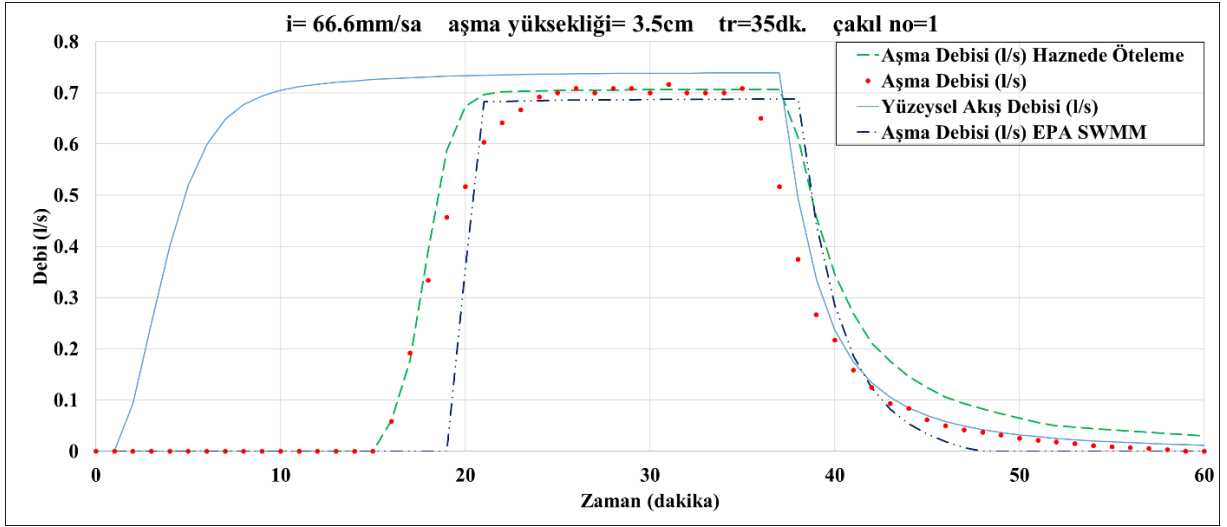
Şekil 4.34: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznedede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

41.6 mm/sa yağış şiddeti ve 3.5 cm aşma yüksekliği ile yapılan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi verileri ile haznedede öteleme yöntemiyle ve EPA SWMM modeli ile elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Aşma debisinin yükselmeye başlaması, aşma debisinin pik değerinin inişe geçmesi ve aşma debisi eğrisinin yükselme ve düşüş kısımlarının karakteristiği haznedede öteleme yöntemi ile daha iyi sonuç verirken aşma debisinin pik değerleri EPA SWMM ve haznedede öteleme yönteminde aynı hesaplanmıştır. EPA SWMM ve haznedede öteleme yönteminin istatistiksel değerlendirilmesi yapıldığında, haznedede öteleme yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9536, EPA SWMM'den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9068 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre haznedede öteleme yönteminin EPA SWMM'e göre deneysel verileri daha iyi temsil ettiği görülmüştür.



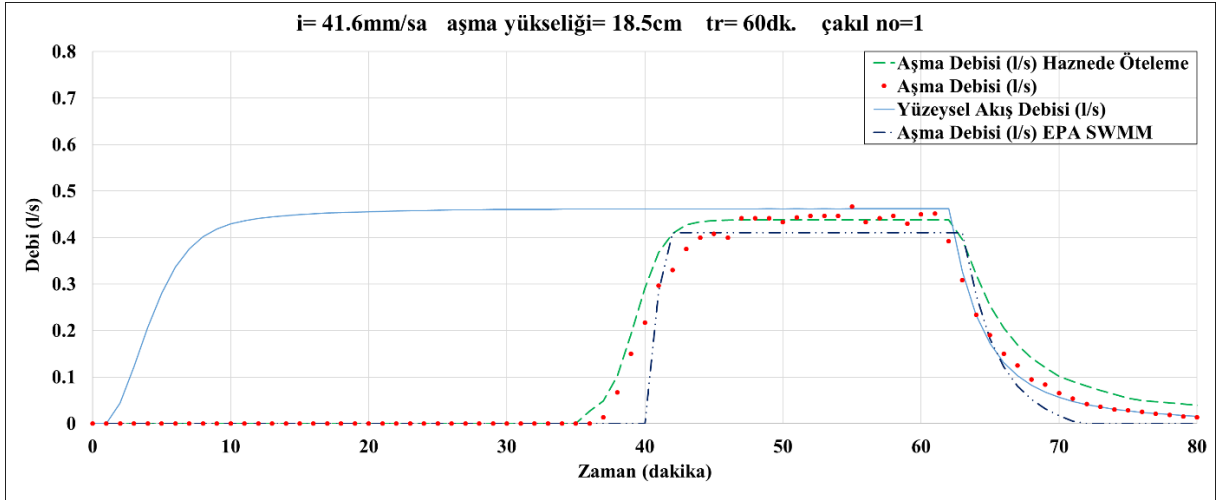
Şekil 4.35: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznedede öteleme yönteminden ve EPA SWMM’den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

55.5 mm/sa yağış şiddeti ve 3.5 cm aşma yüksekliği ile yapılan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi verileri ile haznedede öteleme yöntemiyle ve EPA SWMM modeli ile elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Aşma debisinin yükselmeye başlaması, aşma debisinin pik değerinin inişe geçmesi ve aşma debisi eğrisinin yükselme ve düşüş kısımlarının karakteristiği ve aşma debisinin pik değeri haznedede öteleme yönteminde daha iyi sonuç vermiştir. EPA SWMM ve haznedede öteleme yönteminin istatistiksel değerlendirilmesi yapıldığında, haznedede öteleme yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9659, EPA SWMM’den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.8309 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre haznedede öteleme yönteminin EPA SWMM’e göre deneysel verileri daha iyi temsil ettiği görülmüştür.



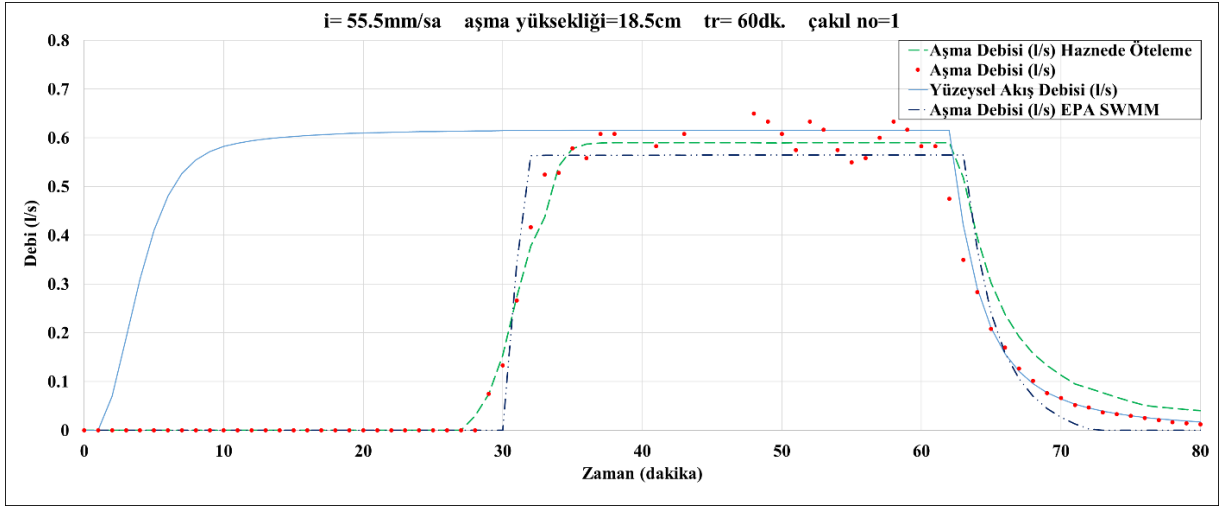
Şekil 4.36: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendesinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

66.6 mm/sa yağış şiddeti ve 3.5 cm aşma yüksekliği ile yapılan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi verileri ile haznede öteleme yöntemiyle ve EPA SWMM modeli ile elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Aşma debisinin yükselmeye başlaması, aşma debisinin pik değerinin inişe geçmesi ve aşma debisi eğrisinin yükselme ve düşüş kısımlarının karakteristiği ve aşma debisinin pik değeri haznede öteleme yönteminde daha iyi sonuç vermiştir. EPA SWMM ve haznede öteleme yönteminin istatistiksel değerlendirilmesi yapıldığında, haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9686, EPA SWMM'den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9017 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre haznede öteleme yönteminin EPA SWMM'e göre deneysel verileri daha iyi temsil ettiği görülmüştür.



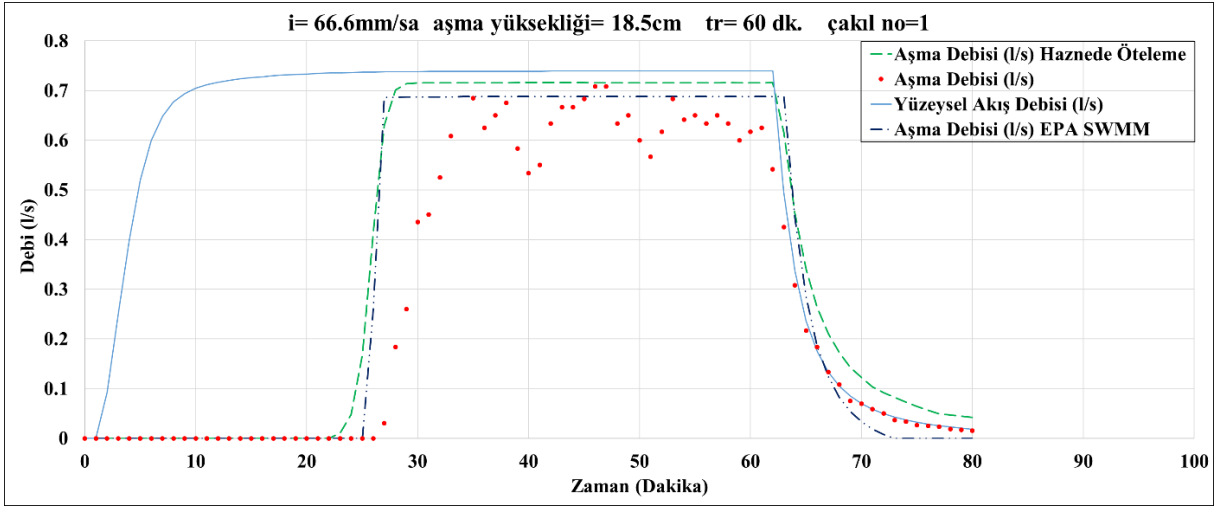
Şekil 4.37: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

41.6 mm/sa yağış şiddeti ve 18.5 cm aşma yüksekliği ile yapılan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi verileri ile haznede öteleme yöntemiyle ve EPA SWMM modeli ile elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Aşma debisinin yükselmeye başlaması, aşma debisinin pik değerinin inişe geçmesi ve aşma debisi eğrisinin yükselme ve düşüş kısımlarının karakteristiği ve aşma debisinin pik değeri haznede öteleme yönteminde daha iyi sonuç vermiştir. EPA SWMM ve haznede öteleme yönteminin istatistiksel değerlendirilmesi yapıldığında, haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9820, EPA SWMM'den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9583 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre haznede öteleme yönteminin EPA SWMM'e göre deneysel verileri daha iyi temsil ettiği görülmüştür.



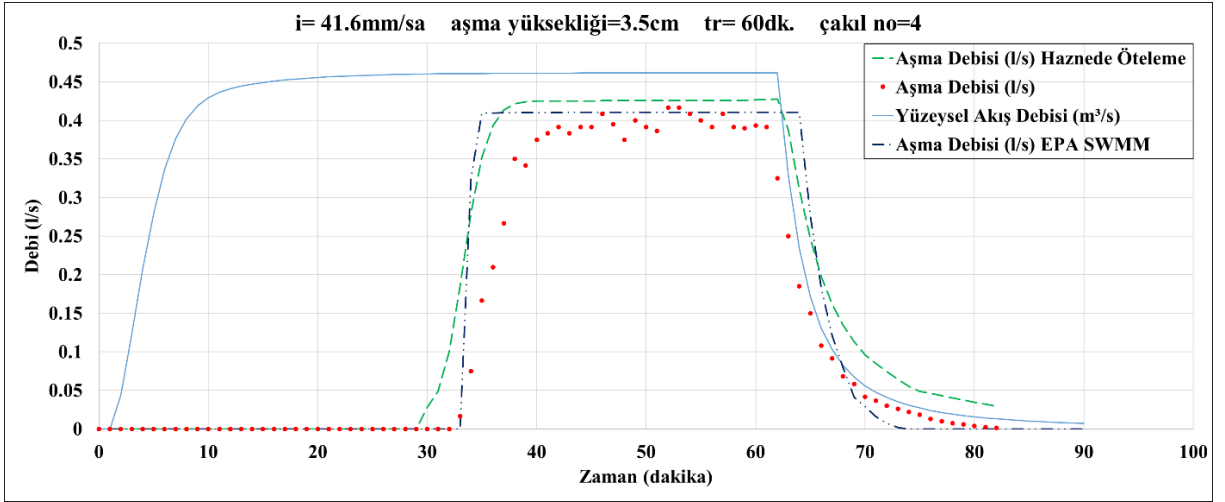
Şekil 4.38: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

55.5 mm/sa yağış şiddeti ve 18.5 cm aşma yüksekliği ile yapılan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi verileri ile haznede öteleme yöntemiyle ve EPA SWMM modeli ile elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Aşma debisinin yükselmeye başlaması, aşma debisinin pik değerinin inişe geçmesi ve aşma debisi eğrisinin yükselme ve düşüş kısımlarının karakteristiği ve aşma debisinin pik değeri haznede öteleme yönteminde daha iyi sonuç vermiştir. EPA SWMM ve haznede öteleme yönteminin istatistiksel değerlendirilmesi yapıldığında, haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9814, EPA SWMM'den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9716 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre haznede öteleme yönteminin EPA SWMM'e göre deneysel verileri daha iyi temsil ettiği görülmüştür.



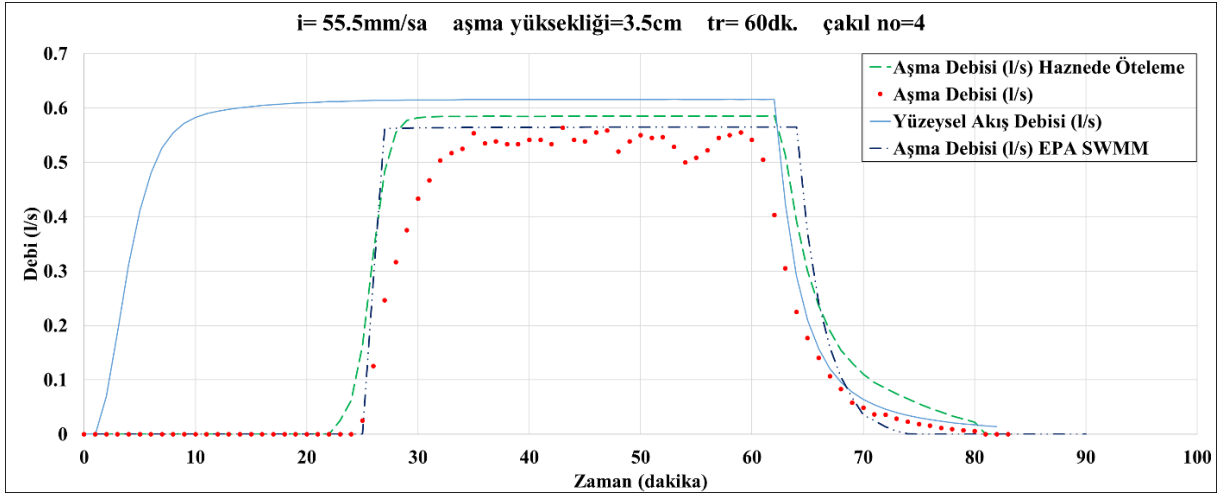
Şekil 4.39: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

66.6 mm/sa yağış şiddeti ve 18.5 cm aşma yüksekliği ile yapılan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi verileri ile haznede öteleme yöntemiyle ve EPA SWMM modeli ile elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Aşma debisinin yükselmeye başlaması ve aşma debisinin pik değeri deney sonuçlarıyla örtüşmemektedir. Aşma debisinin pik değerinin inişe geçmesi EPA SWMM ve haznede öteleme metoduyla uyum sağlamaktadır. Aşma debisi eğrisinin düşüş kısmının karakteristiği haznede öteleme yönteminde daha iyi sonuç vermiştir. EPA SWMM ve haznede öteleme yönteminin istatistiksel değerlendirilmesi yapıldığında, haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.8804, EPA SWMM'den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.8766 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre haznede öteleme yönteminin EPA SWMM'e göre deneysel verileri daha iyi temsil ettiği görülmüştür.



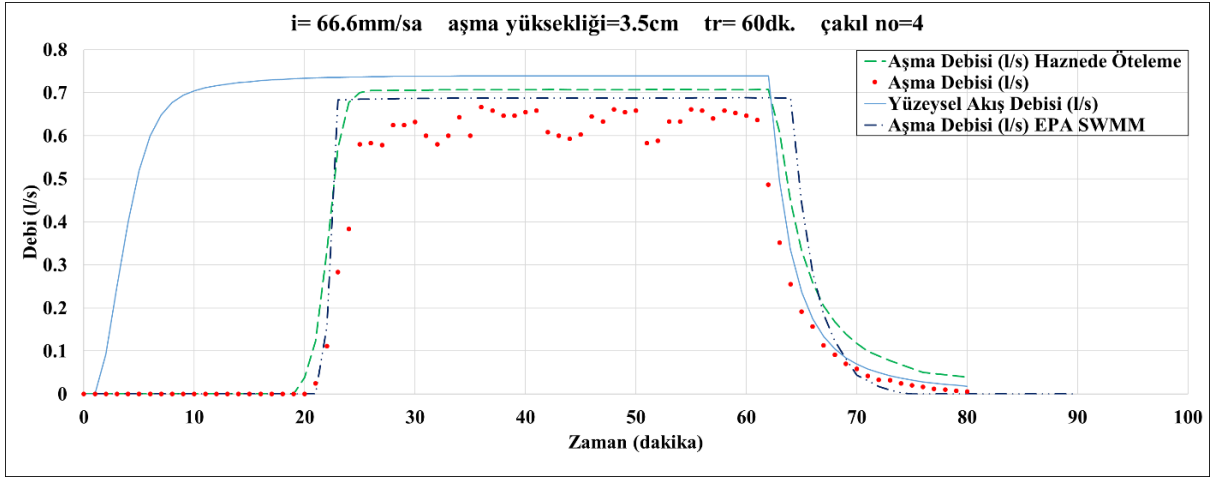
Şekil 4.40: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

41.6 mm/sa yağış şiddeti ve 3.5 cm aşma yüksekliği ile yapılan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi verileri ile haznede öteleme yöntemiyle ve EPA SWMM modeli ile elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Aşma debisinin pik değerinin inişe geçmesi ve aşma debisi eğrisinin yükselme ve düşüş kısımlarının karakteristiği haznede öteleme yöntemi ile daha iyi sonuç verirken aşma debisinin pik değerleri ve aşma debisinin başlangıç süresi EPA SWMM'de daha iyi sonuç vermiştir. EPA SWMM ve haznede öteleme yönteminin istatistiksel değerlendirilmesi yapıldığında, haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9401, EPA SWMM'den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9189 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre haznede öteleme yönteminin EPA SWMM'e göre deneysel verileri daha iyi temsil ettiği görülmüştür.



Şekil 4.41: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendesinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

55.5 mm/sa yağış şiddeti ve 3.5 cm aşma yüksekliği ile yapılan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi verileri ile haznede öteleme yöntemiyle ve EPA SWMM modeli ile elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Aşma debisinin pik değerinin inişe geçmesi ve aşma debisi eğrisinin yükselme ve düşüş kısımlarının karakteristiği haznede öteleme yöntemi ile daha iyi sonuç verirken aşma debisinin pik değerleri ve aşma debisinin başlangıç süresi EPA SWMM'de daha iyi sonuç vermiştir. EPA SWMM ve haznede öteleme yönteminin istatistiksel değerlendirilmesi yapıldığında, haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9562, EPA SWMM'den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9311 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre haznede öteleme yönteminin EPA SWMM'e göre deneysel verileri daha iyi temsil ettiği görülmüştür.

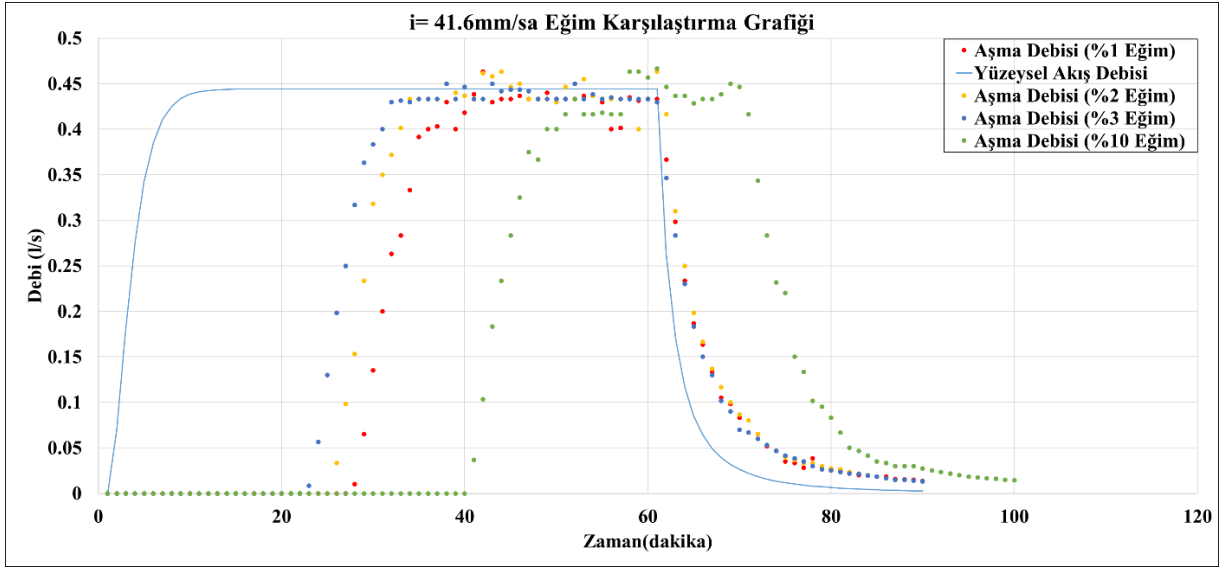


Şekil 4.42: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile haznede öteleme yönteminden ve EPA SWMM'den elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

66.6 mm/sa yağış şiddeti ve 3.5 cm aşma yüksekliği ile yapılan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunan deneyden elde edilen aşma debisi verileri ile haznede öteleme yöntemiyle ve EPA SWMM modeli ile elde edilen aşma debisi değerleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır: Aşma debisinin pik değerinin inişe geçmesi ve aşma debisi eğrisinin yükselme ve düşüş kısımlarının karakteristiği haznede öteleme yöntemi ile daha iyi sonuç verirken aşma debisinin pik değerleri ve aşma debisinin başlangıç süresi EPA SWMM'de daha iyi sonuç vermiştir. EPA SWMM ve haznede öteleme yönteminin istatistiksel değerlendirilmesi yapıldığında, haznede öteleme yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9654, EPA SWMM'den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında R^2 değerinin 0.9355 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre haznede öteleme yönteminin EPA SWMM'e göre deneysel verileri daha iyi temsil ettiği görülmüştür.

4.5. SIZDIRMA HENDEĞİNDE EĞİMİN AŞMA DEBİSİNE ETKİSİ

Bu kısımda sızdırma hendeğinde sızma kapatılarak yüzey eğiminin yüzeysel akışa etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda 41.6 mm/sa yağış şiddetinde 60 dakikalık yağış süresi boyunca, 1 numaralı çakıl dolu sızdırma hendeğinin en uç noktasından çıkış noktasına olacak şekilde, yüzeyine çakıllar yardımıyla %1, %2, %3 ve %10 eğimler verilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan deney sonucuna ait aşma debisi hidrografları Şekil 4.43'de verilmiştir.

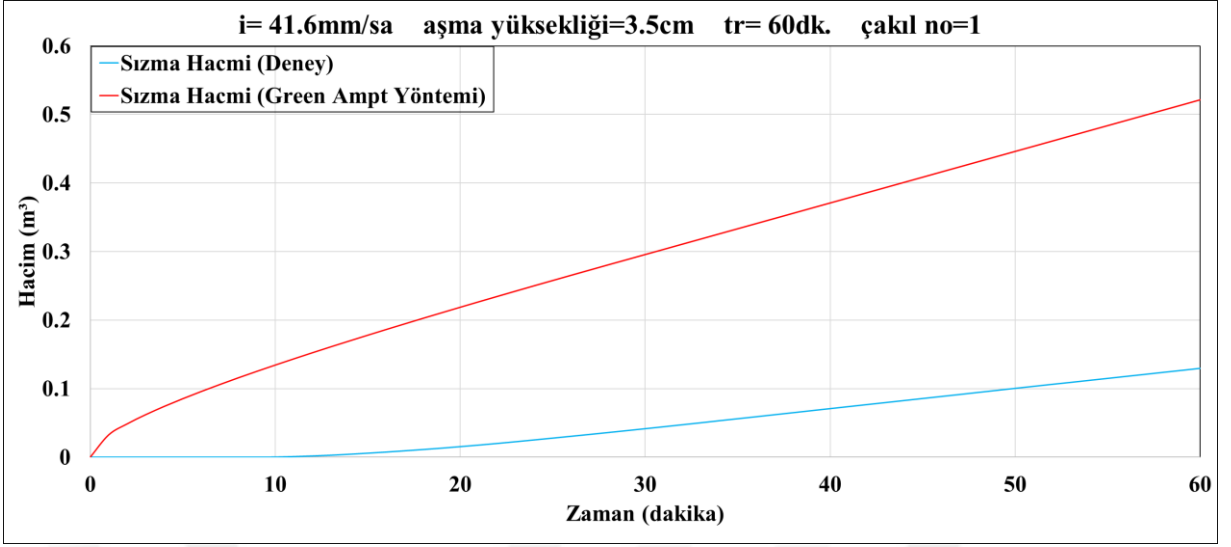


Şekil 4.43: İçinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile farklı eğim değerlerinde yapılan deneylerden elde edilen aşma debisi hidrograflarının karşılaştırılması.

Şekil 4.43 incelendiğinde yüzey eğimi arttıkça aşma debisinin başlangıç süresinin arttığı (Yüzey eğimi, sızdırma hendeğinin içindeki çakıllar boşaltılarak verilmekte, dolayısıyla depolama hacmi ve aşma debisinin geliş süresi artmaktadır) fakat; aşma debilerinin pik değerlerinin aynı olduğu gözlemlenmiştir. Yüzeyel akışta hız-hidrolik eğim ilişkisini veren Manning veya Chezy denklemlerindeki eğim parametresinin değişmesine rağmen, pik aşma debisi değerinin değişmemesi bu denklemlerin sızdırma hendeğinde oluşan aşma debisini temsil edemediğini göstermiştir.

4.6. DENEYSEL ÇALIŞMA İLE ELDE EDİLEN SIZMA DEBİSİ HİDROGRAFLARININ GELİŞTİRİLEN SIZMA DENKLEMLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

Deneyler sırasında aşma debisiyle eş zamanlı olarak sızma debisi de bir zaman serisi şeklinde ölçülmüştür. YHS sisteminde sızma debisi 9 adet deneyde ölçülmüştür. Yapılan deneylerin ikisinde Q_{inf} , yağış süresi boyunca ölçülürken, dördünde $t > t_r$ ' ye kadar ölçülmüştür. Yapılan ölçümler ile öncelikle sızma debisinin Green Ampt metodu ile temsil edilip edilemediği irdelenmiştir. Green Ampt yöntemi ile yapılan hesaplamalar sonucunda hesaplanan sızma miktarı, ölçülen sızma miktarının oldukça üzerinde bulunmuştur. Dolayısıyla sızdırma hendeğinde oluşan sızma miktarının Green Ampt yöntemiyle tam olarak temsil edilemediği görülmüştür (Şekil 4.43).



Şekil 4.44: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunan sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deney ile Green Ampt yönteminden elde edilen sızma hacimlerinin karşılaştırılması.

Sızma, mevcut sızma yöntemi ile temsil edilemeyince ölçülen değerlerin davranışını temsil edebilmek üzere ampirik bir sızma debisi (Q_{inf}) denklemi geliştirilmiştir:

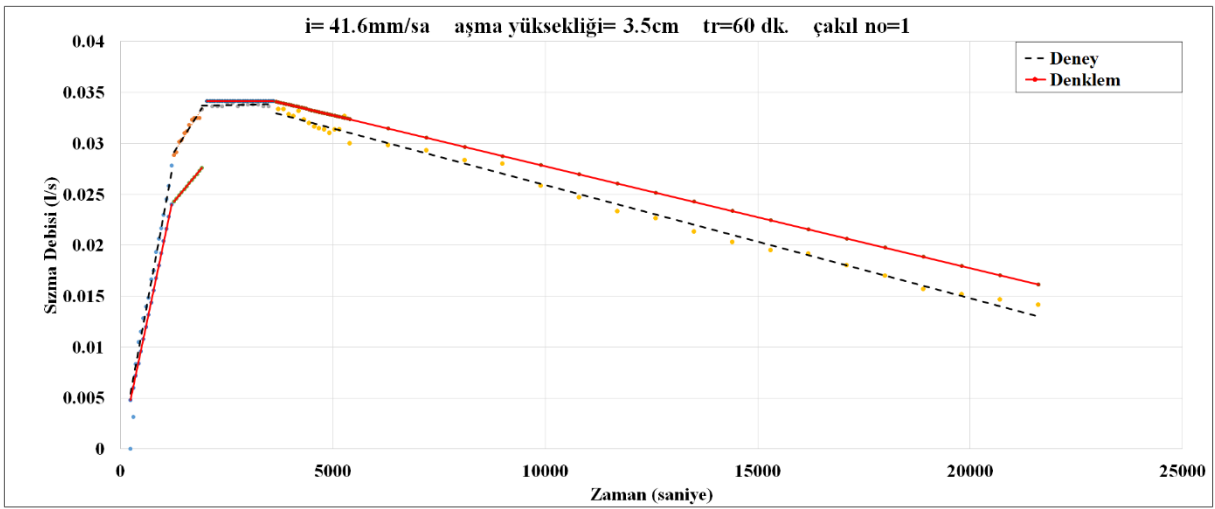
$$Q_{inf} = \begin{cases} S_1 t & 0 \leq t \leq t_p \\ S_2 t + \alpha & t_p \leq t \leq t_{max} \\ Q_{inf}^{max} & t_{max} \leq t \leq t_r \\ S_4 t + \beta & t > t_r \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\alpha = S_1 t_p - S_2 t_p \quad (4.2)$$

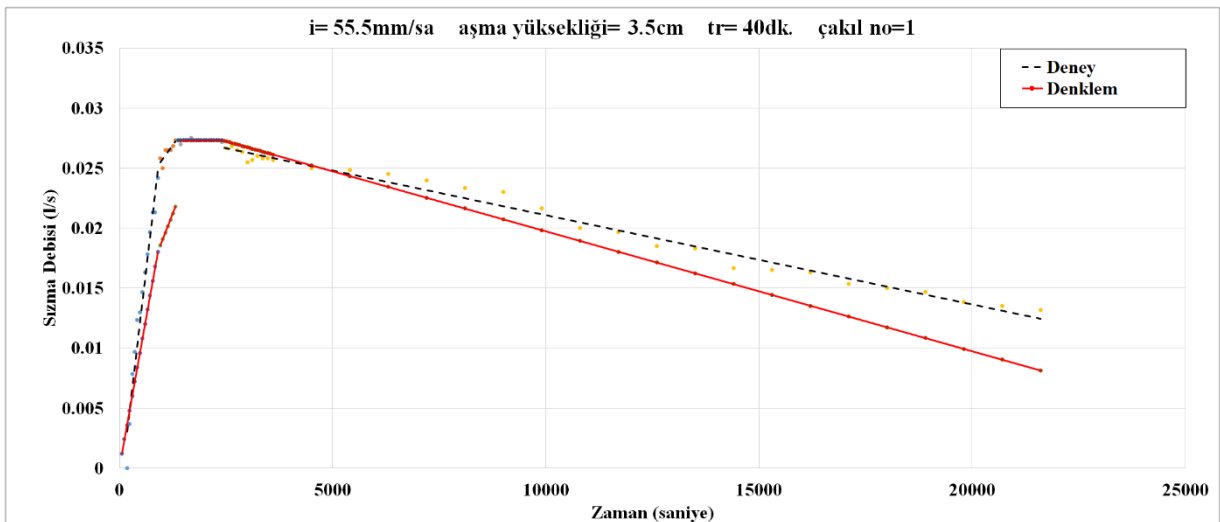
$$\beta = Q_{inf}^{max} + S_4 t_r \quad (4.3)$$

Yapılan çalışmalar sonucunda sızdırma hendeğindeki sızma davranışının, yağış başladığı andan itibaren t_p anına ve t_p anından t_{max} anına kadar geçen sürede farklı eğimlerde lineer olarak arttığı; t_{max} anında maksimum bir değerde sabitlendiği, t_r anından itibaren devam eden bir süreçte ise lineer olarak azaldığı kabul edilmiştir. Burada t_p yağış başlangıcından çakıl üzerinde göllenme başlayana kadar geçen süre (T), t_{max} sızmanın maksimum değere ulaştığı süre (T), t_r yağış süresi (T), S_1 sızmanın lineer olarak arttığı birinci bölgedeki denkleme ait eğim, S_2 sızmanın lineer olarak arttığı ikinci bölgedeki denkleme ait eğim, S_4 sızmanın lineer olarak azaldığı dördüncü bölgedeki denkleme ait eğim, Q_{inf}^{max} sızma debisinin maksimum değeridir (L^3/T).

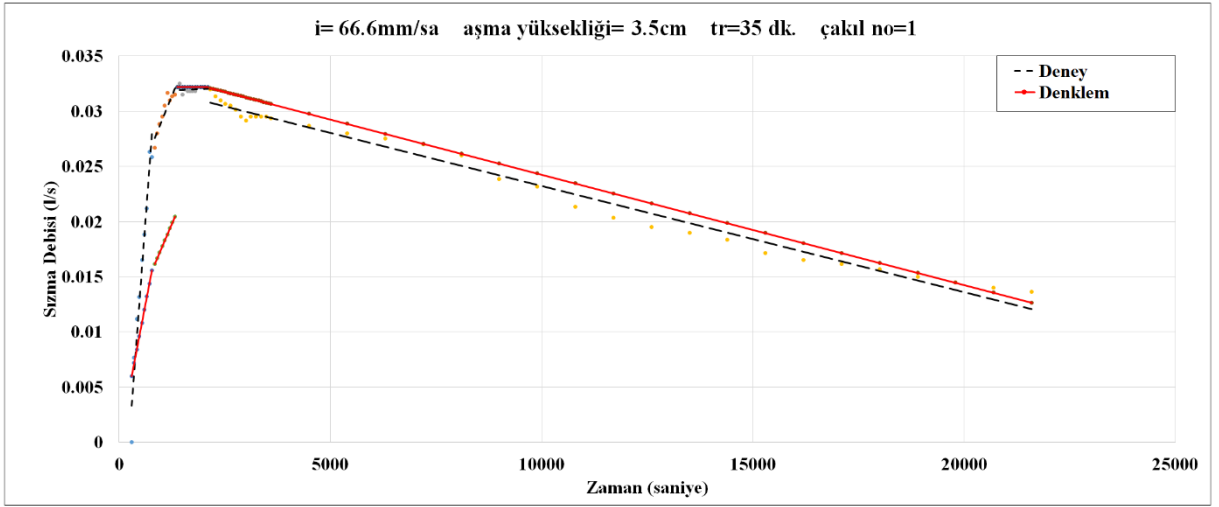
Deneyden elde edilen veriler üzerinden doğrusal çizgiler geçirildiğinde birinci bölgenin eğim değeri yaklaşık 2×10^{-5} , ikinci bölgenin eğim değeri yağış şiddetliyse 9×10^{-6} yağış hafif şiddetliyse 5×10^{-6} ve son olarak dördüncü bölgenin eğim değeri 1×10^{-6} olarak hesaplanmıştır. Deneyden ölçülen sızma debisi değerleri ile ampirik denklem sonucunda elde edilen sızma debisi değerleri aynı grafik üzerinde gösterilerek kıyaslanmıştır. Kıyaslamaların yapıldığı sızma debisi hidrografları Şekil 4.45-Şekil 4.53 arasında verilmiştir. Grafiklerde siyah kesikli çizgi deneylerden elde edilen verileri gösterirken, kırmızı sürekli çizgi ise üretilen ampirik denklemi göstermektedir.



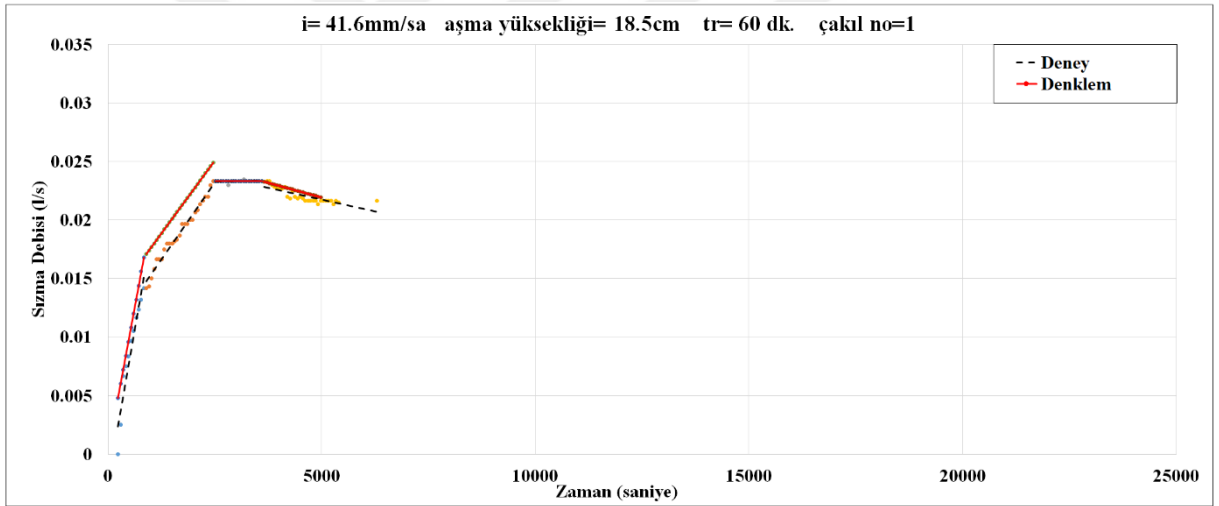
Şekil 4.45: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.



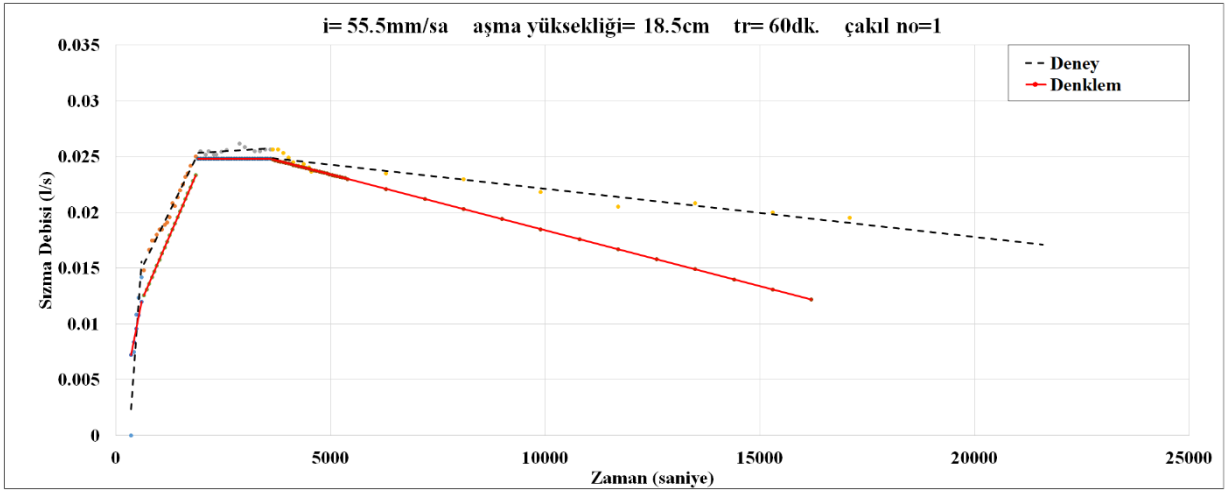
Şekil 4.46: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.



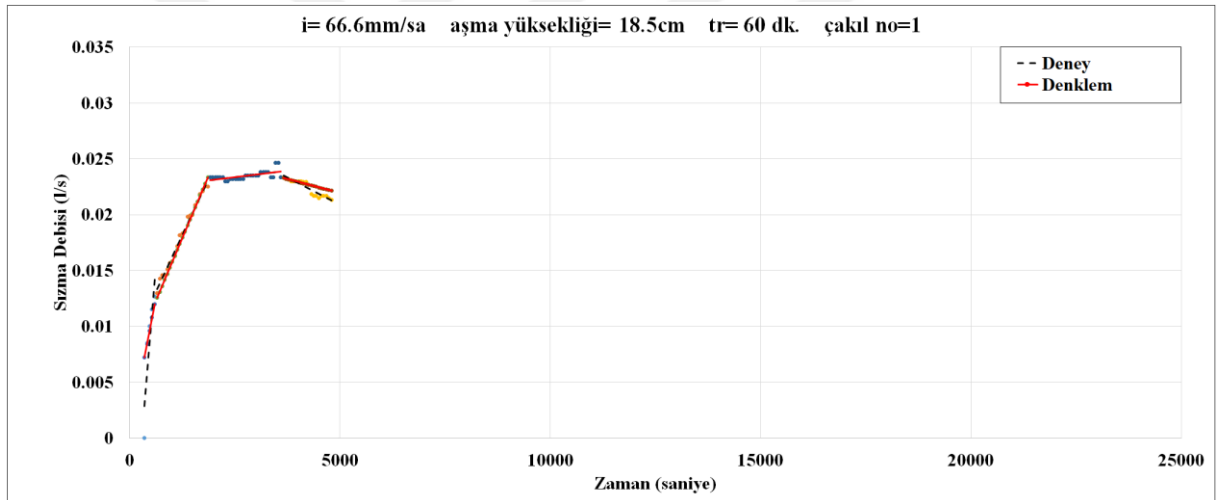
Şekil 4.47: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.



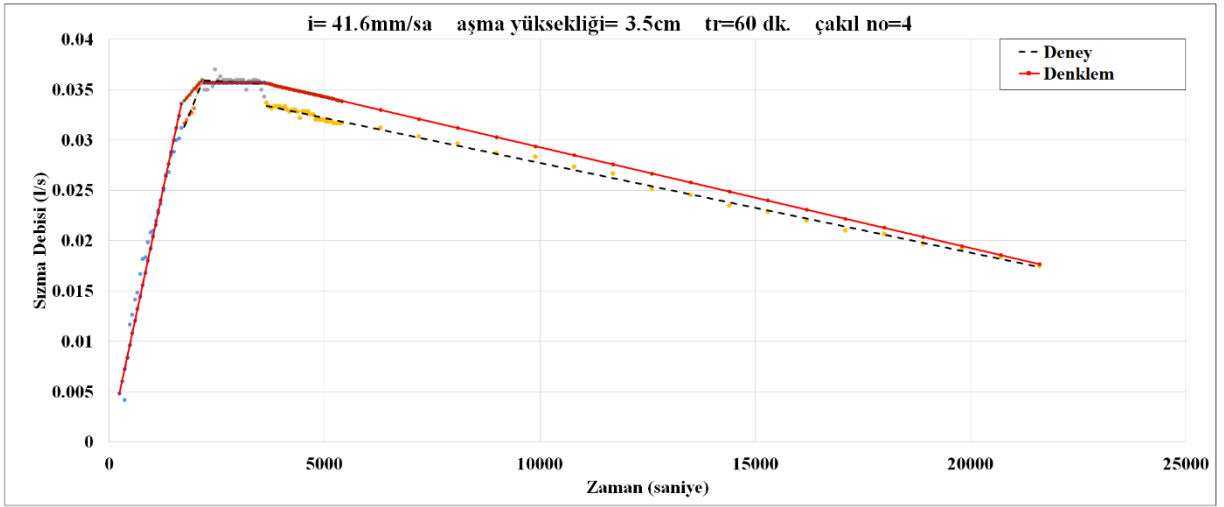
Şekil 4.48: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.



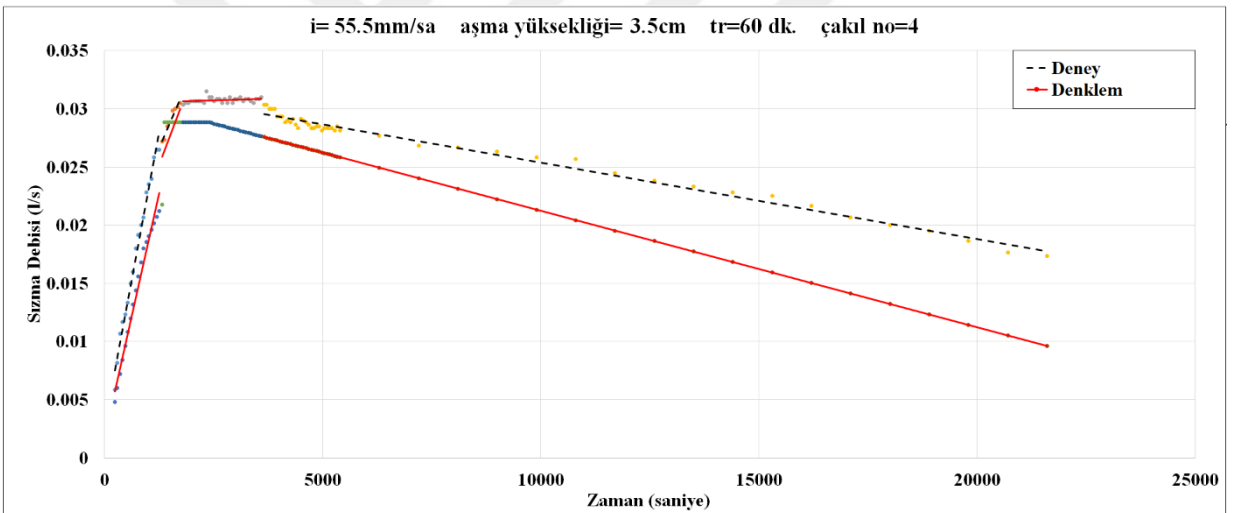
Şekil 4.49: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.



Şekil 4.50: Aşma yüksekliği 18.5 cm olan ve içinde 1 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.



Şekil 4.51: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 41.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.



Şekil 4.52: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 55.5 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.



Şekil 4.53: Aşma yüksekliği 3.5 cm olan ve içinde 4 numaralı çakıl bulunduran sızdırma hendeğinde 66.6 mm/sa yağış şiddeti ile yapılan deneyden elde edilen sızma debisi ile sızma debisi için üretilen denklemden elde edilen hidrografların karşılaştırılması.

Grafikler incelendiğinde sızmanın lineer artışının, lineer azalışına göre çok daha hızlı olduğu görülmüştür. Ölçülen ve hesaplanan sızma debilerinin karşılaştırılması sonucunda değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla tez kapsamında geliştirilen sızma debisi ampirik denkleminin sızdırma hendeğinde oluşan sızmayı temsil edebileceği ortaya konmuştur.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında sızdırma hendeğinin hidrolojik performansı deneysel ve sayısal yöntemlerle değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar oluşturulan büyük ölçekli Yağış-Havza-Sızdırma Hendeği (YHS) deney düzeneğinde yapılmıştır. Daha sonra YHS, EPA SWMM programı ile modellenmiştir. Ayrıca, aşma debisi hesapları için haznede öteleme yöntemi kullanılmış; sızma debisi hesapları için ise ampirik bir denklem geliştirilmiştir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Yapılan deneysel çalışmalar ile sızdırma hendeğinin kapalı bir havuz gibi davrandığı ve suyu tuttuğu görülmüştür. Sızdırma hendeğinin çıkışında oluşan akımın Manning veya Chezy gibi hız-hidrolik eğim ilişkisini veren ampirik formüllerle hesaplanamayacağı ortaya konulmuştur. Bunun yerine deneyler sırasında eş zamanlı ölçülen çakıl üzerinde biriken su seviyesi ile aşma debisi verileri kullanılarak sızdırma hendeğine ait anahtar eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra, bu anahtar eğrileriyle birlikte haznede öteleme yöntemi ile aşma debisi hesabı yapılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.
- Sızma için yapılan sayısal modellemelerde sızdırma hendeğinin içinde oluşan sızma miktarının Green-Ampt yöntemi ile tam olarak hesaplanamayacağı ortaya konulmuştur. Bunun yerine sızma, lineer artış, maksimum sabit ve lineer azalış kısımlarından oluşan bir ampirik denklem ile temsil edilmiştir.
- Farklı yağışlar altında yapılan deneyler ile sızdırma hendeğinin hidrolojik kapasitesinin değiştiği görülmüştür. Yağış şiddeti arttıkça sızdırma hendeği üzerinde oluşan aşma debisinin pik değere ulaşma süresinin kısaldığı ve sızdırma hendeğinin su depolama performansının düştüğü gözlemlenmiştir.
- Farklı aşma yüksekliği kullanılarak yapılan deney sonuçlarından aşma yüksekliğinin haznede tutulan su miktarını büyük oranda etkilediği görülmüştür. Aşma yüksekliği 1 numaralı çakılda 3.5 cm'den 18.5 cm'ye çıkarıldığında sızdırma hendeğinde yaklaşık % 60-70 daha fazla su depolandığı görülmüştür.
- Farklı çakıl büyüklüğü kullanılarak yapılan deney sonuçlarından, çakıl büyüklüğünün haznede tutulan su miktarını etkilediği görülmüştür. 4 numaralı çakılla yapılan deneyde 1 numaralı çakılla yapılan deneye göre sızdırma hendeğinde %30-35 daha fazla su depolandığı görülmüştür.

- Farklı yağış şiddeti için yapılmış olan deney sonuçlarına göre yağış şiddeti arttıkça sızdırma hendeğinin yüzeysel akışın pik debisini daha düşük oranda azalttığı görülmüştür. Ayrıca, yağış şiddeti arttıkça sızdırma hendeğinin pik debiyi geciktirme süresi de düşüş göstermiştir.
- Farklı aşma yüksekliği için yapılmış olan deney sonuçlarına göre, aşma yüksekliği arttıkça sızdırma hendeğinin yüzeysel akışı daha fazla depolayarak pik debinin ulaşma süresini geciktirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, farklı aşma yüksekliğinin pik aşma debisi üzerinde bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.
- EPA SWMM programından elde edilen aşma debisi değerleri ile deneyden elde edilen aşma debisi değerleri birbirine çok yakın çıkmaktadır. Modelden elde edilen aşma debisi hidrograflarının karakteristikleri ve deney sonuçları ile benzerdir. Deney esnasında aşma debisinin pik değerindeki dalgalanma, deney düzeneğinin dışarıda olmasından ve deney esnasındaki rüzgâr gibi ani değişime neden olabilecek dış etmenlerden kaynaklanmaktadır.
- EPA SWMM programından elde edilen sızma debisi değerleri ile deneyden elde edilen sızma debisi değerleri birbirine yakın çıkmaktadır fakat hidrografların karakteristikleri birbirinden farklı çıkmıştır. Bunun sebebinin EPA SWMM programı içinde sızmayı çözümlleyen denklemlerin yeterli olmadığından kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu sebeple, sızmayı daha doğru hesaplayacak ampirik bir denklem geliştirilmiştir.
- Haznede öteleme yöntemi ile hesaplanan aşma debisi hidrograf eğrileri ile deneyler ile ölçülen aşma debisi hidrograf eğrilerinin çok büyük oranda benzer karakteristiğe sahip olduğu görülmüştür ve dolayısıyla haznede öteleme yönteminin sızdırma hendeğinin hidrolojik modellemesini yapabilme yeteneği ortaya konulmuştur.
- Haznede öteleme yöntemi ile EPA SWMM modeli deney sonuçlarıyla kıyaslandığında haznede öteleme yöntemi ile hesaplanan aşma debisi değerlerinin EPA SWMM modeli ile hesaplanan aşma debisi değerlerine göre deney sonuçlarına daha yakın çıktığı gösterilmiştir.
- EPA SWMM modeli ile elde edilen sonuçlara göre EPA SWMM programının genel olarak sızdırma hendeğini temsil edebildiği ortaya konmuştur. Ancak, EPA SWMM programının iyileştirilebilecek noktaları olduğu da gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, F., Gulliver, J.S., Nieber J.L., 2015, Field infiltration measurements in grassed roadside drainage ditches: Spatial and temporal variability, *Journal of Hydrology*, 530, 604-611.
- Ahmed, K., Chung, E.S., Song, J.Y., Shahid, S., 2017, Effective design and planning specification of low impact development practices using Water Management Analysis Module (WMAM): Case of Malaysia, *Water*, 9(3), 173.
- Bayazıt, M., 2013, Hidroloji, *Birsen Yayın Dağıtım Ltd. Şti*, 978-975-511-364-9
- Barber, M. E., King, S.G., Yonge, D.R., Hathhorn, W.E., 2003, Ecology ditch: A best management practice for storm water runoff mitigation, *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(3), 111-122.
- Bergman, M., Hedegaard, M.R., Petersen M.F., Binning, P., Mark, O., Mikkelsen, P.S., 2011. Evaluation of two stormwater infiltration trenches in central Copenhagen after 15 years of operation, *Water Science and Technology*, 63(10), 2279-2286.
- Braga, A., Horst, M., Traver, R.G., 2007, Temperature effects on the infiltration rate through an infiltration basin BMP, *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(6), 593-601.
- Browne, D., Deletic, A., Mudd, G.M., Fletcher, T.D., 2008, A new saturated/unsaturated model for stormwater infiltration systems, *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(25), 4838-4849.
- Browne, D., Deletic, A., Mudd, G.M., Fletcher, T.D., 2013, A two-dimensional model of hydraulic performance of stormwater infiltration systems, *Hydrological Processes*, 27(19), 2785-2799.
- California Stormwater Quality Association, 2003, California Stormwater BMP Handbook-New Development and Redevelopment, *California Stormwater Quality Association, Menlo Park, CA*.
- Chahar, B. R., Graillot, D., Gaur, S., 2011, Storm-water management through infiltration trenches, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(3), 274-281.
- Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P., 2005, Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale, *Journal of Hydrology*, 306(1-4), 191-214.
- Council, M., 2001, Minnesota Urban Small Sites BMP Manual, *Metropolitan Council Environmental Services*.
- Creaco, E. and Franchini, M., 2012, A dimensionless procedure for the design of infiltration trenches, *Journal-American Water Works Association*, 104(9), 501-509.

- Ellis, J.B., Deutsch, J.-C., Mouchel, J.-M, Scholes, L., Revitt, M.D., 2004, Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff, *Science of the Total Environment*, 334, 251-260.
- Emerson, C. H. and Traver, R. G., 2008, Multiyear and seasonal variation of infiltration from storm-water best management practices, *Journal of irrigation and drainage Engineering*, 134(5), 598-605.
- Environmental Protection Agency, United States, 1999, *Stormwater Technology Factsheet: Infiltration Trench*, EPA 832-F-99-109.
- Environmental Protection Agency, United States, 2016, *Storm Water Management Model Reference Manual Volume 1 – Hydrology (Revised)*, Report EPA/600/R-15/162A.
- Environmental Protection Agency, United States, 2016, *Storm Water Management Model Reference Manual Volume 2 – Hydraulics*, Report EPA/600/R-17/111.
- Environmental Protection Agency, United States, 2016, *Storm Water Management Model Reference Manual Volume 3 – Water Quality*, Report EPA/600R-16/093.
- Farahi, G., Khodashenas, R.S., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., 2017, New model for simulating hydraulic performance of an infiltration trench with finite-volume one-dimensional Richards' equation, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8), 04017025.
- Freni, G., Mannina, G., Viviani, G., 2010, Urban storm-water quality management: centralized versus source control, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 268-278.
- Fry, T. J. and Maxwell, R. M., 2017, Evaluation of distributed BMP s in an urban watershed—High resolution modeling for stormwater management., *Hydrological Processes*, 31(15), 2700-2712.
- Goncalves, M.L.R., Zischg, J., Rau, S., Sitzmann, M., Rauch, W., Kleidorfer, M., 2018, Modeling the effects of introducing low impact development in a tropical city: A case study from Joinville, Brazil, *Sustainability*, 10(3), 728.
- Guo, Y. and Gao, T., 2016, Analytical equations for estimating the total runoff reduction efficiency of infiltration trenches, *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 2(3), 06016001.
- Guo, R. and Guo, Y., 2018, Analytical Equations for Use in the Planning of Infiltration Facilities, *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 4(2), 06018001.
- Gülbaz, S. and Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2014, Investigating effects of low impact development on surface runoff and TSS with a calibrated hydrodynamic model, *La Houille Blanche*, (3), 77-84.
- Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., Coptay, N.K., 2015, Evaluation of heavy metal removal capacity of bioretention systems, *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(11), 376.

- Gülbaz, S. and Kazezyılmaz-Alhan, C. M., 2016, Experimental Investigation on Hydrological performance of LID with Rainfall Watershed Bioretention System, *Journal of Hydrological Engineering*, 22(1), D4016003.
- Gülbaz, S. and Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2017, Hydrological model of LID with rainfall-watershed-bioretention system, *Water resources management*, 31(6), 1931-1946.
- Gülbaz, S. and Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2017, An evaluation of hydrological modeling performance of EPA SWMM for bioretention, *Water Science and Technology*, 76(11), 3035-3043.
- Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., Temür, R., 2019, Development of an empirical formula for estimation of bioretention outflow rate, *Water SA*, 45(2), 209-215.
- Heilweil, V. M., Benoit, J., Healy, R.W., 2015, Variably saturated groundwater modelling for optimizing managed aquifer recharge using trench infiltration, *Hydrological Processes*, 29(13), 3010-3019.
- Horst, M., Welker, A.L., Traver R.G., 2010, Multiyear performance of a pervious concrete infiltration basin BMP, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(6), 352-358.
- Jenkins, J. K. G., Wadzuk, B.M., Welker, A.L., 2010, Fines accumulation and distribution in a storm-water rain garden nine years postconstruction, *Journal of irrigation and Drainage Engineering*, 136(12), 862-869.
- Jia, H., Wang, X., Ti, C., Zhai, Y., Field, R., Tafuri, A.N., Cai, H., Yu, S.L., 2015, Field monitoring of a LID-BMP treatment train system in China, *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6), 373.
- Johnson, R. D. and Sample, D.J., 2017, A semi-distributed model for locating stormwater best management practices in coastal environments, *Environmental Modelling & Software*, 91, 70-86.
- Joksimovic, D. and Alam, Z., 2014, Cost efficiency of low impact development (LID) stormwater management practices, *Procedia Engineering*, 89, 734-741.
- Kandra, H. S., McCarthy, D., Fletcher, T.D., Deletic, A., 2014, Assessment of clogging phenomena in granular filter media used for stormwater treatment, *Journal of Hydrology*, 512, 518-527.
- Lawrence, A. I., Marsalek, J., Ellis, J.B., Urbonas, B., 1996, Stormwater detention & BMPs, *Journal of Hydraulic Research* 34(6), 799-813.
- Lee, J. G., Heaney, J.P., Pack, C.A., 2010, Frequency methodology for evaluating urban and highway storm-water quality control infiltration BMPs, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 237-247.

- Lee, J. G., Borst, M., Brown, R.A., Rossman, L., Simon, M.A., 2014, Modeling the hydrologic processes of a permeable pavement system, *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(5), 04014070.
- Lee, R. S., Traver, R.G., Walker, A.L., 2013, Continuous modeling of bioinfiltration storm-water control measures using green and Ampt, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(12), 1004-1010.
- Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G.A., Lucho-Constantino, C.A., Bigurra-Alzati, C.A., Beltrán-Hernández, R.I., Ortiz-Hernández, J.E., López-León, L.D., 2017, Hydrological design of two low-impact development techniques in a semi-arid climate zone of Central Mexico, *Water*, 9(8), 561.
- Loperfido, J. V., Noe, G.B., Jarnagin, S.T., Hogan, D.M., 2014, Effects of distributed and centralized stormwater best management practices and land cover on urban stream hydrology at the catchment scale, *Journal of Hydrology*, 519, 2584-2595.
- Nimmer, M., Thompson, A., Misra, D., 2010, Modeling water table mounding and contaminant transport beneath storm-water infiltration basins, *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(12), 963-973.
- Osouli, A., Bloorchian, A.A., Nassiri, S., Marlow, S., 2017, Effect of Sediment Accumulation on Best Management Practice (BMP) Stormwater Runoff Volume Reduction Performance for Roadways, *Water*, 9(12), 980.
- Perez-Pedini, C., Limbrunner, J.F., Vogel, R.M., 2005, Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), 441-448.
- Schueler, T.R., 1987, Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs, *Water Resources Publications*.
- Simpson, M. G. and Roesner, L. A., 2018, Hydrologic Modeling and Capital Cost Analysis of Low-Impact Development, *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 4(2), 05018003.
- Siriwardene, N. R., Deletic, A., Fletcher, T.D., 2007, Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study, *Water Research*, 41(7), 1433-1440.
- Song, J. Y., Chung, E.S., Kim, S., 2018, Decision Support System for the Design and Planning of Low-Impact Development Practices: The Case of Seoul, *Water*, 10(2), 146.
- State of Hawaii Department of Transportation, Highway Division, 2007, *Storm Water Permanent BMP Manual*.
- Tredway, J. C. and Havlick, D. G., 2017, Assessing the Potential of Low-Impact Development Techniques on Runoff and Streamflow in the Templeton Gap Watershed, Colorado, *The Professional Geographer*, 69(3), 372-382.

- Usul, N., 2017, Mühendislik Hidrolojisi, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.*, 978-9944-344-57-9.
- Wild, T. B. and Davis, A. P., 2009, Simulation of the performance of a storm-water BMP, *Journal of Environmental Engineering*, 135(12), 1257-1267.
- Yang, Y. and Chui, T. F. M., 2018, Rapid assessment of hydrologic performance of low impact development practices under design storms, *Journal of the American Water Resources Association*, 54(3), 613-630.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Kaan İlker DEMİREZEN
Doğum Yeri	BAKIRKÖY
Doğum Tarihi	15.04.1993
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0536 982 36 56
E-Posta Adresi	kaanilkerdemirezen@gmail.com
Web Adresi	http://aves.istanbul.edu.tr/ilkerdemirezen/



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	01.07.2016

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler	
Demirezen K.İ., Kazezyılmaz-Alhan C.M., Erdem S., “Yağmur Suyu Yönetimi Uygulaması: Polimer Hibrid Kaplama Malzemeli Çatılar”, Uluslararası Kentsel Su ve Atıksu Yönetimi Sempozyumu (UKSAY)-2018, DENİZLİ, TÜRKİYE, 25-27 Ekim 2018, pp.944-951	
Demirezen K.İ., Kazezyılmaz-Alhan C.M., “Experimental Investigation of Hydrological Performance of Infiltration Trench”, 4th. International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, KIEV, UKRAINE, 24-28 April 2019, pp.1-1	