



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAĞMUR HENDEĞİNİN TASARIMI İÇİN YENİ KRİTERLER

Uğur ÜNAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ

Haziran, 2018

İSTANBUL

Bu çalışma, 5.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı , İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

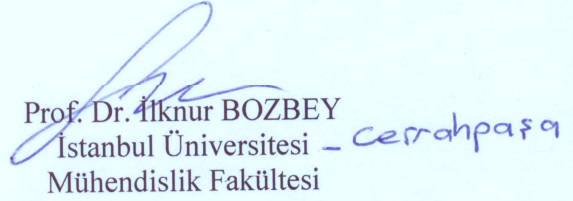
Tez Jürisi



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



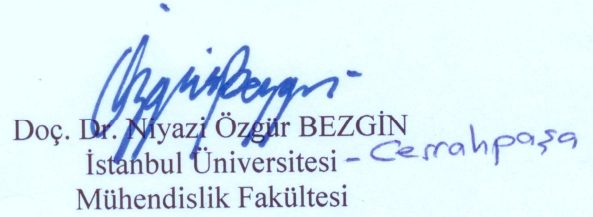
Prof. Dr. Hafzullah AKSOY
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi



Prof. Dr. İknur BOZBEY
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Gebrial BEKDAŞ
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Niyazi Özgür BEZGİN
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’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Tez konumun seçilmesinden teslim edilmesine kadar olan uzun, yorucu ama bir o kadar da keyifli olan bu süreçte bilgi birikimi, tecrübesi ve manevi desteğiyle her zaman yanımda olan kıymetli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmama fikir, görüş ve önerileri ile katkıda bulunan Prof. Dr. Zekai ŞEN ve Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN hocalarıma, İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı ailesine, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan baş tacım aileme teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2018

Uğur ÜNAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	xi
SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xvi
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. KONUNUN ÖNEMİ	1
1.2. TEZİN AMACI.....	9
2. GENEL KISIMLAR.....	10
2.1. YAĞMUR HENDEKLERİNİN TÜRLERİ.....	10
2.1.1. Islak Yağmur Hendekleri	10
2.1.1.1. <i>Islak Yağmur Hendeklerinin Avantajları ve Dezavantajları</i>	14
2.1.2. Kuru Yağmur Hendekleri	15
2.1.2.1. <i>Kuru Yağmur Hendeklerinin Avantajları ve Dezavantajları</i>	18
2.2. YAĞMUR HENDEKLERİNİN YAPISAL ELEMANLARI.....	19
2.2.1. Rırap, İnce Çakıl Diyafram ve Forebay	19
2.2.2. Kontrol Barajları.....	21
2.2.3. Savak, Orifis ve Delikli Drenaj Borusu.....	22
2.3. YAĞMUR HENDEKLERİNİN TASARIM KRİTERLERİ	23
2.4. YAĞMUR SUYU TOPLAMA, DEPOLAMA VE DEŞARJ SİSTEMLERİ HAKKINDA YÖNETMELİK	28
2.5. YAĞMUR HENDEKLERİNİN PERFORMANSI.....	33
2.5.1. Kirletici Maddeleri Uzaklaştırma	33
2.5.2. Taşkın Kontrolü.....	34
2.5.3. Bitki Örtüsü ve Bitkilendirme	35
2.5.4. İşletme ve Bakım.....	37
2.6. YAĞMUR HENDEKLERİNİN TASARIM ADIMLARI.....	39
2.7. YAĞMUR HENDEKLERİNİN MALİYETİ	40

2.7.1. İnşaat Maliyeti	40
2.7.2. Bakım Maliyeti	41
2.8. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN YAĞMUR HENDEKLERİ.....	41
2.9. YAĞMUR HENDEKLERİNİN KULLANIM YERLERİ	46
2.10. DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE YAĞMUR HENDEĞİ UYGULAMALARI.....	50
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	54
3.1. YAĞMUR HENDEKLERİNİN KAPASİTE HESAPLARI	54
3.1.1. Literatür Araştırmasına Göre Kapasite Hesapları	54
3.1.1.1. Rasyonel Metot	54
3.1.1.2. Manning Denklemi.....	59
3.1.1.3. Minimum Hidrolik Kalış Süresinin Hesabı.....	60
3.1.1.4. Serbest Akım Koşulları için Savak Denklemi	60
3.1.1.5. Batmış Durumdaki Çıkış Akımları için Orifis Denklemi	61
3.1.1.6. Filtre, Geçiş ve Drenaj Tabakalarına ait Hesaplamalar	62
3.1.2. Yağmur Suyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Yönetmeliğine Göre Kapasite Hesabı	63
3.1.2.1. Yağmur Suyu Debinin Hesaplanması	63
3.2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ	66
3.3. YAĞMUR HENDEKLERİ İÇİN TAŞIMA VE ARITMA KAPASİTELERİNİN OPTİMİZASYONU	69
3.4. YAĞMUR HENDEKLERİ İÇİN YENİ KRİTERLERİN BELİRLENMESİ.....	71
4. BULGULAR.....	72
4.1. İSTANBUL GÖZTEPE BÖLGESİ İÇİN ÖRNEK BİR YAĞMUR HENDEĞİ HESABI.....	72
4.1.1. Literatür Araştırmasına Göre Yapılan Kapasite Hesapları.....	73
4.1.1.1. Pik Debinin Hesaplanması	73
4.1.1.2. Yağmur Hendeği Kapasitesinin Hesaplanması	75
4.1.1.3. Minimum Hidrolik Kalış Süresinin Hesaplanması	76
4.1.1.4. Hız Kontrolü	77
4.1.1.5. Hız x Derinlik Kontrolü	78
4.1.1.6. Savak Uzunluğunun Hesaplanması ve Boyutlandırılması.....	78
4.1.1.7. Orifis Alanının Hesaplanması ve Boyutlandırılması.....	79
4.1.1.8. Filtre Tabakasına ait Sızma Hızının Hesaplanması	79
4.1.1.9. Delikli Drenaj Borusuna ait Delik Kapasitesinin Hesaplanması.....	79
4.1.1.10. Delikli Drenaj Borusuna ait Kapasite Hesabı.....	80

4.1.2. Yağmur Suyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Yönetmeliğine Göre Yapılan Kapasite Hesabı.....	80
4.1.2.1. Pik Debinin Hesaplanması	80
4.2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİNİN SONUÇLARI	82
4.3. OPTİMUM ŞEV EĞİMİ.....	89
4.4. OPTİMUM HİDROLİK YARIÇAP	90
4.5. UYGULAMA ÖNERİLERİ	93
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	94
5.1. MEVCUT LİTERATÜR VE KATKILARIMIZ	94
5.2. YAĞMUR SUYU TOPLAMA, DEPOLAMA VE DEŞARJ SİSTEMLERİ YÖNETMELİĞİNE EKLENMESİ İÇİN ÖNERİLERİMİZ.....	97
KAYNAKLAR.....	100
EKLER	106
EK 1. İstanbul ili Göztepe meteoroloji istasyonu yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrileri (MGM).....	106
EK 2. 500 hektardan küçük havza alanları için varsayılan ortalama akarsu hızları (QUDM, 2007).	107
EK 3. Enkesit tipine göre yağmur hendeği parametrelerinin hesabı.	107
EK 4. Giriş süresinin hesabında kullanılan abak (ÇŞB, 2017).....	108
EK 5. Gecikme katsayısına ait değerler (ÇŞB, 2017).	108
EK 6. Bölge inceleme kontrol listesi (WSUD, 2010)	109
EK 7. Yağmur hendeği tasarım özet sayfası (WSUD, 2006).	110
EK 8. Yağmur hendeği bakım kontrol listesi (WSUD, 2006).....	111
EK 9. Yağmur hendeği tasarım değerlendirme kontrol listesi (WSUD, 2006).....	112
EK 10. Yağmur hendeği inşaat kontrol listesi (WSUD, 2006).	113
ÖZGEÇMİŞ	114

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1.1: a) Şehirleşme öncesi b) Şehirleşme sonrası hidrolojik döngü (EPA, 2008'den uyarlanmıştır).	3
Şekil 1.2: Şehirleşme öncesi ve sonrası hidrograftaki değişim (EPA, 2000).....	3
Şekil 1.3: Orta refüje uygulanmış trapez enkesitli yağmur hendeği.	5
Şekil 1.4: Yol kenarına uygulanmış üçgen enkesitli yağmur hendeği (WSUD, 2011'den uyarlanmıştır).	6
Şekil 1.5: a) Islak yağmur hendeği b) Kuru yağmur hendeği (Woods Ballard ve diğ., 2015).....	7
Şekil 1.6: Yeşil altyapı uygulamaları (Graham ve diğ., 2012'den uyarlanmıştır).	8
Şekil 2.1: Islak yağmur hendeği plan görünüşü (CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).	13
Şekil 2.2: Trapez enkesitli ıslak yağmur hendeği (A-A kesiti; CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).	13
Şekil 2.3: Islak yağmur hendeğine ait boykesit (B-B kesiti; CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).	13
Şekil 2.4: Kuru yağmur hendeği plan görünüşü (CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).....	16
Şekil 2.5: Trapez enkesitli kuru yağmur hendeği (A-A kesiti; MDE ve CWP, 2000'den uyarlanmıştır).	16
Şekil 2.6: Kuru yağmur hendeğine ait boykesit (B-B kesiti; MDE ve CWP, 2000'den uyarlanmıştır).	17
Şekil 2.7: Drenaj modüllü trapez enkesitli kuru yağmur hendeği (Lai ve diğ., 2009'dan uyarlanmıştır).	17
Şekil 2.8: Parabol enkesitli kuru yağmur hendeği (CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).....	18
Şekil 2.9: Üçgen enkesitli kuru yağmur hendeği (UDFCD, 2010'dan uyarlanmıştır).....	18
Şekil 2.10: Riprap ve forebay yapılarına ait plan (VANR, 2002'den uyarlanmıştır).	20
Şekil 2.11: Riprap ve forebay yapılarına ait boykesit (A-A kesiti; VANR, 2002'den uyarlanmıştır).	20

Şekil 2.12: Riprap, forebay ve kontrol barajı yapılarının görünümü (Perrin ve diğ., 2009).....	20
Şekil 2.13: Kontrol barajları serisi.....	22
Şekil 2.14: Savak ve delikli drenaj borusu.....	23
Şekil 2.15: Kaynakta kontrol ve mansapta depolama sistemlerinin sınıflandırılması (ÇŞB, 2017'den uyarlanmıştır).....	29
Şekil 2.16: Kuru geciktirme havuzu (ÇŞB, 2017'den uyarlanmıştır).....	30
Şekil 2.17: Islak bekletme havuzu (ÇŞB, 2017'den uyarlanmıştır).....	30
Şekil 2.18: Yağmur suyu kanallarıyla beraber kullanılan hendek enkesiti (ÇŞB, 2017'den uyarlanmıştır).....	32
Şekil 2.19: Otoparklar için tasarlanan hendek enkesiti (ÇŞB, 2017'den uyarlanmıştır).....	32
Şekil 2.20: Su kalitesinin karşılaştırılması a) geleneksel sistemler b) yağmur hendeği (SNIFFER, 2004'ten uyarlanmıştır).....	42
Şekil 2.21: Yağışın yüzey tipine bağlı olarak hidrolojik elemanlar üzerine etkisi (Ripl, 1995'ten uyarlanmıştır).....	43
Şekil 2.22: Bir nehir havzası için a) şehirleşme öncesi b) şehirleşme sonrası taşkın yatağının durumu (Schueler, 1987'den uyarlanmıştır).....	44
Şekil 2.23: Isı ada etkisi (Khalid, 2014'ten uyarlanmıştır).....	46
Şekil 2.24: Yerleşim yerine inşa edilmiş kuru yağmur hendeğinin planı ve enkesiti (WSUD, 2006'dan uyarlanmıştır).....	47
Şekil 2.25: Konut çevresine inşa edilmiş kuru yağmur hendeği.....	48
Şekil 2.26: a) Konut bahçesine inşa edilmiş kuru yağmur hendeği planı b) Dolu savak enkesiti (MWC, 2013'ten uyarlanmıştır).....	48
Şekil 2.27: Yol kenarına inşa edilmiş kuru yağmur hendeği (WSUD, 2006'dan uyarlanmıştır).....	49
Şekil 2.28: Orta refüje inşa edilmiş kuru yağmur hendeği (WSUD, 2006'dan uyarlanmıştır).....	49
Şekil 2.29: Yurtdışında uygulanmış yağmur hendeği örnekleri (Woods Ballard ve diğ., 2015).....	50
Şekil 2.30: Ülkemizden yağmur hendeği örnekleri a) Belentepe permakültür çiftliği, Bursa b) Marmariç permakültür çiftliği, İzmir c) Bostancık köyü, Muğla d) Tahtacıörencik köyü, Ankara (Bostancık, 2009; Bakır ve diğ., 2011; TADYA, 2012; BPC, 2015).....	51

Şekil 2.31: Yağmur hendeği ve gıda ormanı.....	52
Şekil 2.32: Marmariç köyü durum planı (Bakır ve diğ., 2011'den uyarlanmıştır).	53
Şekil 3.1: Tabaka ve kanal akımlarına ait plan (QUDM, 2007'den uyarlanmıştır).	55
Şekil 3.2: Orifis tipleri ve Cd katsayıları (Dağdelen, 2012).	62
Şekil 3.3: Sürdürülebilirliğin ilkeleri (EC, 2015'ten uyarlanmıştır).	66
Şekil 3.4: Örnek radar grafiği.....	69
Şekil 3.5: Optimum şev eğiminin bulunması.	70
Şekil 4.1: Yağmur hendeği çalışma alanı (Google Earth).....	72
Şekil 4.2: Trapez enkesitli yağmur hendeği.	76
Şekil 4.3: Islak yağmur hendeğine ait radar grafiği.	85
Şekil 4.4: Kuru yağmur hendeğine ait radar grafiği.....	86
Şekil 4.5: Geleneksel sistemlere ait radar grafiği.....	87
Şekil 4.6: Tüm sisteme ait radar grafiği.....	88

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1.1: Suyun sektörel dağılımı (TCKB, 2014).	2
Tablo 2.1: Islak yağmur hendeklerinde kullanılabilecek sulak alan bitkileri.	12
Tablo 2.2: Boyuna eğim ile kontrol barajları arasındaki mesafe (MPCA, 2000).	21
Tablo 2.3: Tasarım kriterleri.	27
Tablo 2.4: Yağmur hendeği türüne göre kirleticilerin uzaklaştırılma oranları (%).	34
Tablo 2.5: Yağmur hendekleri için bazı bitki türleri (GCCC, 2007).	36
Tablo 2.6: Tipik bir yağmur hendeğinin bakım faaliyetleri ve sıklığı (Woods Ballard ve diğ., 2015).	38
Tablo 2.7: Yağmur hendeklerinin inşaat maliyeti (SEWRPC, 1991).	40
Tablo 2.8: Yağmur hendeklerinin bakım maliyeti (WSUD, 2004; WSUD, 2010).	41
Tablo 3.1: Horton pürüzlülük katsayısı (QUDM, 2007).	57
Tablo 3.2: Bölgelere göre geçirimsizlik oranları (QUDM, 2007).	57
Tablo 3.3: 10 yıllık tekrarlama sıklığına sahip yüzeysel akış katsayısı (QUDM, 2007).	58
Tablo 3.4: Geçirimsizlik oranı sıfır olan yüzeysel akış katsayısı (QUDM, 2007).	58
Tablo 3.5: Tekrarlama sıklığına bağlı frekans faktörü (QUDM, 2007).	58
Tablo 3.6: Bitki örtüsüyle kaplı yağmur hendekleri için Manning pürüzlülük katsayısı (QUDM, 2007).	59
Tablo 3.7: Taşla kaplı yağmur hendekleri için Manning pürüzlülük katsayısı (QUDM, 2007).	60
Tablo 3.8: Savak kret genişliği ve savak yüküne bağlı olarak değişen geniş kretli savak katsayısı (CONNDOT, 2000).	61
Tablo 3.9: Yüzeysel akış katsayısı (ÇŞB, 2017).	65
Tablo 3.10: Örnek hesap tablosu.	71
Tablo 4.1: Hesaplanan derinlik–debi ilişkisi.	78
Tablo 4.2: Literatür araştırması.	83

Tablo 4.3: Hendek su derinliği ve taban genişliğine bağlı optimum şev eğimi.91

Tablo 4.4: Hendek su derinliği ve taban genişliğine bağlı optimum hidrolik yarıçap.92



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Havza Alanı
A_d	: Delikli Drenaj Borusundaki Delik Alanı
A_o	: Orifisin Toplam Alanı
A_w	: Islak Alan
b	: Arazi Eğimi, Yağış Şiddeti ve Gecikme Katsayısına Bağlı Katsayı
B	: Tıkanma Faktörü
C	: Yüzeysel Akış Katsayısı
C_d	: Debi Katsayısı
C_r	: Gecikme Katsayısı
C_w	: Savak Katsayısı
C_y	: Y Yıllık Yüzeysel Akış Katsayısı
C_{10}	: 10 Yıllık Yüzeysel Akış Katsayısı
C_{100}	: 100 Yıllık Yüzeysel Akış Katsayısı
D	: Filtre Tabakasının Kalınlığı
f_i	: Geçirimsizlik Oranı
F_y	: Frekans Faktörü
G	: Yerçekimi İvmesi
h_d	: Delikli Borunun Merkezi Üzerindeki Su Derinliği
h_{max}	: Hendekteki Maksimum Su Derinliği
h_o	: Orifisin Merkezi Üzerindeki Su Derinliği
h_s	: Savağın Kreti Üzerindeki Su Derinliği
I	: Yağış Şiddeti
I_y	: Y Yıllık T Saatlik Yağış Şiddeti
i	: Yağış Şiddeti
K_{doy}	: Doymuş Hidrolik İletkenlik
L_H	: Hendek Uzunluğu
L_k	: Kanal Akımı Uzunluğu
L_S	: Savak Uzunluğu
L_t	: Tabaka Akımı Uzunluğu

L_T	: Toplam Akım Yolu Uzunluğu
L_y	: Yüzeysel Akış Uzunluğu
n	: Manning Pürüzlülük Katsayısı
n^*	: Horton Pürüzlülük Katsayısı
P_w	: Islak Çevre
$PM_{2,5}$: 2,5 mm Çapından Küçük Partikül Madde
PM_{10}	: 10 mm Çapından Küçük Partikül Madde
Q_{max}	: Maksimum Sızma Hızı
Q_{orifis}	: Orifisten Geçen Debi
Q_{pik}	: Pik Debi
Q_{savak}	: Savaktan Geçen Debi
Q_y	: Y Yıllık Pik Debi
Q_{10}	: 10 Yıllık Pik Debi
Q_{100}	: 100 Yıllık Pik Debi
r	: Yağmur Verimi
R_h	: Hidrolik Yarıçap
S	: Boyuna Eğim
S_0	: Arazi Eğimi
$t_{akış}$: Kanal Akımının Akış Süresi
t_C	: Toplam Geçiş Süresi
$t_{giriş}$: Giriş Akımının Geçiş Süresi
$t_{kalış}$: Kalış Süresi
t_{kanal}	: Kanal Akımının Geçiş Süresi
t_{tabaka}	: Tabaka Akımının Geçiş Süresi
V	: Akım Hızı
V_{ort}	: Ortalama Hız
W_{taban}	: Hendek Taban Genişliği

Kısaltmalar	Açıklama
ASİ	: Altyapı Sürdürülebilirlik İndeksi
CO	: Karbonmonoksit
CO₂	: Karbondioksit
Ç	: Çevresel
DEK	: Düşük Etkili Kentleşme
E	: Ekonomik
EİYU	: En İyi Yönetim Uygulaması
HSİ	: Havza Sürdürülebilirlik İndeksi
ML	: Düşük Plastisiteli Silt
NO₂	: Azotdioksit
NO₃	: Nitrat
O₃	: Ozon
PM	: Partikül Madde
PVC	: Poli Vinil Klorür
S	: Sosyal
SC	: Killi Kum
SDKT	: Suya Duyarlı Kent Tasarımı
SKDS	: Sürdürülebilir Kentsel Drenaj Sistemleri
SM	: Siltli Kum
SO₂	: Kükürtdioksit
TN	: Toplam Azot
TP	: Toplam Fosfor
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TSS	: Toplam Askıda Katı Madde
YAS	: Yeraltı Su Seviyesi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAĞMUR HENDEĞİNİN TASARIMI İÇİN YENİ KRİTERLER

Uğur ÜNAL

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Dilek Eren AKYÜZ

Endüstri devrimiyle birlikte nüfus ve şehirleşme oranının arttığı, su havzalarının ve ormanlık alanların yerleşime açılarak tahrip edildiği ve asfalt, beton, çatı gibi geçirimsiz sert yüzeylerin oranının arttığı görülmektedir. Tüm bunlar hidrolojik çevrimi olumsuz etkileyerek kentsel bölgelerde yüzeysel akış miktarının ve hızının artmasına, yağmur suyunun yeterince sızamamasına, su kalitesinin azalmasına, sel ve taşkın olaylarının artmasına ve yeraltı su kaynaklarının beslenememesinden dolayı yeraltı su seviyesinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca artan nüfusla birlikte kullanılabilir temiz suya olan ihtiyaç artmakta, aşırı ve bilinçsiz su kullanımı ile kişi başına düşen su miktarı da azalmaktadır. Bu sebeplerden dolayı su kaynaklarımızın hem doğru planlanması hem de pratik, ekonomik ve çevre dostu uygulamalarla devamlılığının sağlanması gerekmektedir. Su kaynaklarımızı korumak ve onlardan daha fazla yararlanmak için yağmur suyu yönetim sistemleri uygulamalarında sürdürülebilir sistemlere ağırlık verilmelidir. Sürdürülebilirlik; doğal kaynaklarımızı tam olarak tüketmeden gelecek nesillere aktarabilmek için doğal kaynakların devamlılığına katkı sağlamak anlamına gelirken aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının da kullanımını gerektirmektedir.

Sürdürülebilir sistemler ise özellikle geçirimsiz yüzeylerin fazla olduğu yoğun kentsel alanlarda yağmur suyundan daha fazla yararlanmak için geçirimsizliğin arttırılması amacıyla yönelik olarak inşa edilirler. Yağmur hendekleri şehirlerin ve tarım alanlarının sürdürülebilirliğine yardım eder. Yağmur hendekleri tarımda sulama suyuna olan ihtiyacı azaltır, yeraltı su kaynaklarını besleyerek yeraltı su seviyesini arttırır, taşkın pik debisini azaltarak taşkın zamanını geciktirir

böylece taşkın olaylarının sıklığını ve şiddetini azaltır ve yüzeysel akış hızını yavaşlatarak sel olaylarının etkisini hafifletir. Bu hendekler ayrıca bioçeşitliliğin artmasına ve korunmasına katkı sağlar, yüzeysel akış hızının yavaşlamasıyla bulunduğu bölge toprakları için erozyon oluşma riskini azaltır, hendeğe ulaşan yağmur suyunu arıtarak su kalitesini artırır, üzerindeki bitki örtüsü sayesinde kentsel ısı ada etkisinin azalmasına yardımcı olur ve özellikle kentsel bölgelerde hava kalitesinin artmasına katkıda bulunur. Üstelik yağmur hendekleri geleneksel yağmur suyu yönetim sistemlerine göre daha ekonomik olan uygulamalardır. Bu faydalarından dolayı yağmur hendeklerinin özellikle ülkemizdeki kullanımlarının hem kentsel hem de kırsal alanlarda yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında öncelikle detaylı bir literatür araştırması yapılarak yağmur hendeklerinin tipleri, avantaj ve dezavantajları, kullanım yerleri, tasarım kriterleri, performansları, dünyadaki ve ülkemizdeki uygulamaları, kapasite ve maliyet hesapları özetlenmiştir. Ayrıca kullanımını daha pratik hale getirebilmek için İstanbul İli Kadıköy İlçesi Göztepe Mahallesi'ne ait bir bölgede örnek bir yağmur hendeği kapasite hesabı; hem uluslararası literatüre hem de 23 Haziran 2017 tarihinde yayımlanan Yağmur Suyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Yönetmeliği'ne göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçların karşılaştırmasına dayanarak ilgili yönetmeliğe yapılabilecek eklenti önerilerimiz özetlenmiştir. Ayrıca, yağmur hendeklerinin ve geleneksel sistemlerin sürdürülebilirliğe olan katkıları değerlendirmek için sürdürülebilirlik değerlendirmesi yapılmış ve bu sistemlerin ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirliğe olan katkıları altyapı sürdürülebilirlik indeksi ve radar grafikleri yardımıyla kıyaslanmıştır. Bu tez çalışmasında yağmur hendeklerinin taşıma ve arıtma kapasitelerinin kesiştiği noktadaki değerler; optimum şev eğimi ve optimum hidrolik yarıçap olarak tanımlanmış ve hesap yöntemleri detaylı şekilde anlatılmıştır. Bu yeni kriterler literatüre katkı sağlarken yağmur hendeklerinin tasarımını da daha pratik hale getirmiştir. Bu sebeple özellikle ülkemizde yağmur hendeklerinin yaygın şekilde kullanımına katkı sağlaması beklenmektedir. Sürdürülebilirlik açısından yağmur hendeklerinin yaygın olarak kullanılması iklim değişikliği, taşkın ve su kalitesinin bozulması gibi çevresel sorunları değişken oranlarda desteklemektedir.

Haziran 2018, 133 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yağmur hendeği, sürdürülebilirlik değerlendirmesi, altyapı sürdürülebilirlik indeksi, optimum şev eğimi, optimum hidrolik yarıçap.

SUMMARY

M.Sc. THESIS

NEW CRITERIA FOR SWALE DESIGN

Uğur ÜNAL

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Dilek Eren AKYÜZ

Along with the industrial revolution, the population and urbanization ratio has increased, water basins and forest areas have been replaced by settlement, and the impervious hard surfaces such as asphalt, concrete and roof are increased. They affect on hydrological cycle, as a result of them especially in urban areas, decrease water quality, increase flood events frequency and its peak and decrease groundwater level due to inadequate recharge of the groundwater resources. In addition to this, the demand for fresh water increase by excessive and improperly water usage and the amount of water per capita are decrease due to growing population. Therefore it is necessary to ensure both the efficient planning of our water resources and the continuity with economic environmental friendly practical applications. Sustainable systems should be emphasized in their implementation of rainwater management systems in order to sustain and protect our water resources for a better use. Sustainability means to ensure the continuation of present natural resources to future generations without consuming it fully. So certainly, sustainability requires a usage of renewable energy resources.

Sustainable systems, especially in dense urban areas where there are many impervious surfaces, built with aim increasing permeability in order to gain more from the rainwater. Swales help sustainability in cities and in agricultural areas. Swales reduce the need for irrigation water in the agriculture sector, increase groundwater level by recharging groundwater resources, reduce flood peak discharge and reduce frequency by delay the time of peak discharge and severity of

flood events. In addition, the swales increase and protect biodiversity, reduce the risk of water erosion in a region by reducing a velocity of runoff, increase water quality by purifying rainwater which is reaching to the swale, helps to reduce the effect of urban heat island with vegetation and contributes to increasing air quality especially in urban areas. In fact, swales are more economical than traditional rainwater management systems. Due to all these benefits, it needs to be spread in both urban and rural areas for ensuring the sustainability.

In this thesis, firstly a very detailed literature search about swales has been done which summarized the types, advantages and disadvantages, places where they may use, design criteria, their performances, capacity and cost calculations and their applications in the world and our country. In addition, to ensure the applicability of these systems in our country a practical example of swale capacity calculation in the district of Göztepe, province of Istanbul, Kadıköy was made according to both the international literature and The Regulation of Rainwater Collection, Storage and Discharge Systems, published on 23 June 2017. Based on the comparison of these results, its have been summarized our suggestions for the plug in that can be made to the relevant regulation. In addition, sustainability assessment was done to assess the sustainability contributions of swales and traditional systems to economic, social and environmental issues and the contributions of these systems to sustainability was compared by radar charts and infrastructure sustainability index. In this thesis, the intersection of conveyance and treatment capacities of swales are described as optimum side slope and optimum hydraulic radius and the calculation methods are explained in detail. These new criteria are introduced and contributed to the literature and are made swale design more practical. Due to these advantages of swales, widely usage of swales is expected especially in our country because of to support sustainability and to help to solve of environmental problems such as climate change, flood and water quality deterioration.

June 2018, 133 pages.

Keywords: Swale, sustainability assessment, infrastructure sustainability index, optimum side slope, optimum hydraulic radius.

1. GİRİŞ

1.1. KONUNUN ÖNEMİ

İnsanoğlunun yaşamını devam ettirilebilmesi dünya üzerindeki doğal kaynakların zaman içindeki sürekliliğine bağlıdır. Fakat bu doğal kaynakların devamlılığı; şehirleşme, iklim değişikliği, ormansızlaşma, bilinçsiz ve aşırı kullanım gibi nedenlerle zarar görmekte ve dolayısıyla devamlılığı tehlikeye atılmaktadır. Doğal kaynakların devamlılığının sağlanabilmesi için yeni yaklaşımlar, teknolojiler geliştirmek gerekir. Tam da bu noktada sürdürülebilirlik kavramı ortaya çıkmaktadır. Sürdürülebilirlik, kısıtlı kaynakların yeni yöntem ve teknolojilerle korunarak devamlılığının sağlanmasını böylece hem günümüz insanının hem de gelecek kuşakların bu kısıtlı kaynaklardan yararlanabilmesini ifade eder (UN, 1987). Aynı zamanda sürdürülebilirlik, yenilenebilir bir kullanım gerektirmektedir ki bu da yeşil altyapı uygulamaları ile sağlanabilir.

Yaşam için en önemli doğal kaynak sudur. Su insan vücudunun yanı sıra diğer canlıların biyolojik aktivitelerinde, sanayide, sulamada, içme ve kullanma suyu ihtiyacında, enerji üretiminde ve daha pek çok alanda kullanılan stratejik bir öneme de sahip olan doğal bir kaynaktır (Muluk ve diğ., 2013). Böyle yaygın bir kullanım alanına sahip olan doğal kaynağımız suyun, çağın teknolojik gereksinimlerini de göz önüne alınarak korunması ve gelecek nesillere aktarılması gerekir. Bu sebeple su kaynaklarının doğru planlanması, pratik, akılcı, optimum ve sürdürülebilir şekilde kullanılması su kaynaklarının devamlılığı açısından önem taşımaktadır (Karel Bayrakçı ve diğ., 2016). Dünyada ve ülkemizde suyun sektörel dağılımı Tablo 1.1’de verilmektedir. Tablo 1.1’e göre 2023 yılında 2012 yılına göre daha fazla suya ihtiyacımız olacaktır. Son yıllarda meydana gelen nüfus artışı ve bunun sonucunda ortaya çıkan aşırı ve bilinçsiz su kullanımı, su kaynaklarımızın devamlılığını tehlikeye atmakta dolayısıyla ciddi bir su sıkıntısı ile karşılaşma ihtimalimizi arttırmaktadır. Bu sebeple su kaynaklarımızı şimdiden koruma altına almak ve bu kaynakların yenilenebilir yöntemlerle devamlılığının sağlanması gerekmektedir.

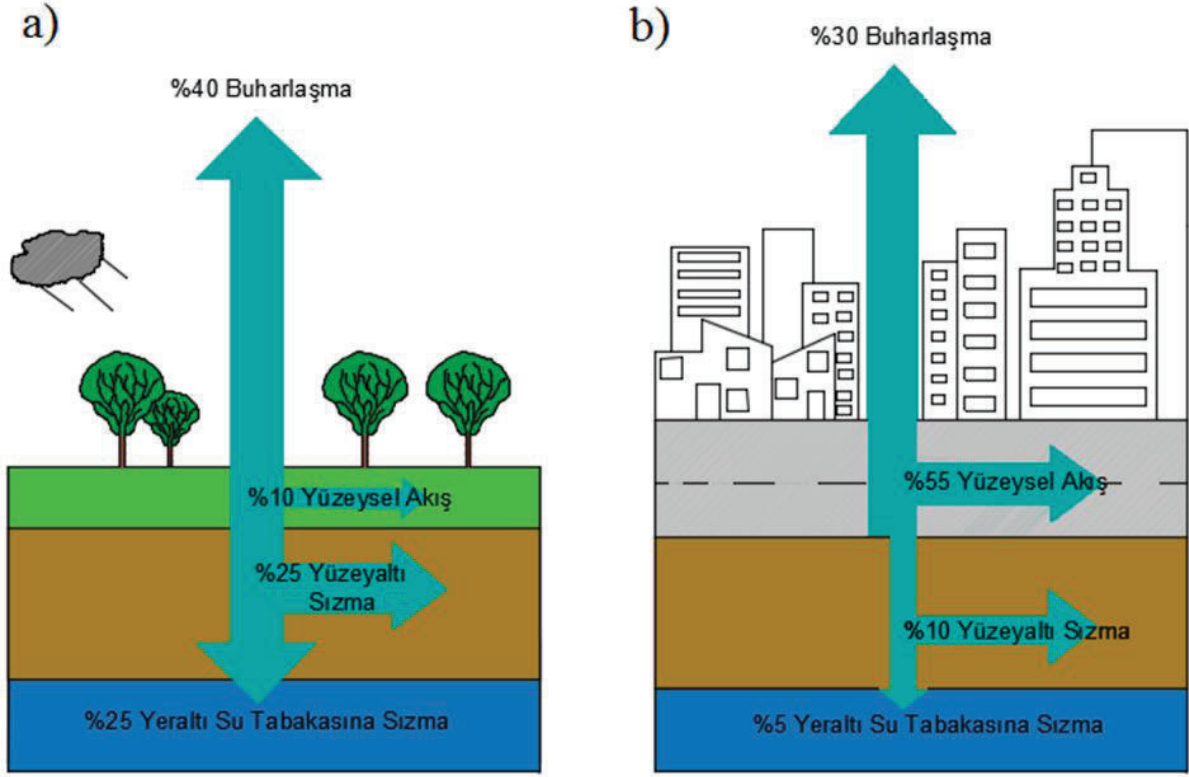
Tablo 1.1: Suyun sektörel dağılımı (TCKB, 2014).

Sektör Adı	Dünya 2006 Yılı (%)	Türkiye 2012 Yılı Başı (Milyar, m ³ /yıl)	Türkiye 2012 Yılı (%)	Türkiye 2023 Yılı (Milyar, m ³ /yıl)	Türkiye 2023 Yılı (%)
Sulama	69	32	73	72	64
İçme Suyu	12	7	16	18	16
Sanayi	19	5	11	22	20
Toplam	100	44	100	112	100

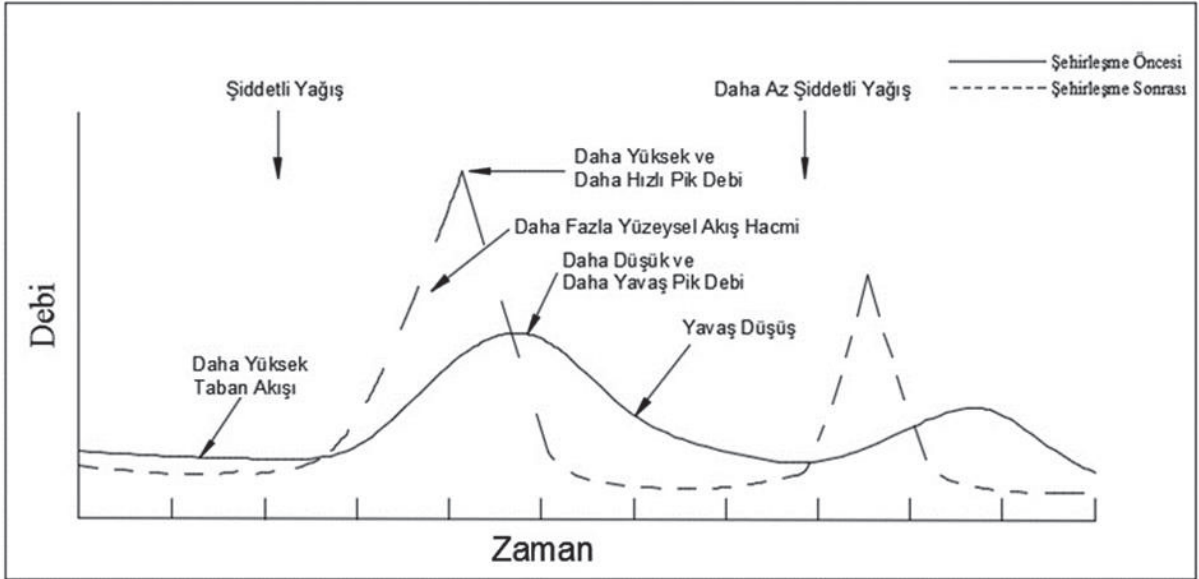
Ülkelerin kişi başına düşen kullanılabilir su miktarları incelendiğinde; 10000 m³'ten fazla kullanılabilir suya sahip ülkelerin su zengini, 2000 m³'ten az kullanılabilir suya sahip ülkelerin su azlığı çeken ve 1000 m³'ten az kullanılabilir suya sahip ülkelerin ise su fakiri ülkeler olduğu görülmektedir (DSİ, 2014). Ülkemizde ise kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı 2010 yılı itibariyle 1519 m³ civarındadır yani ülkemiz su azlığı çeken bir ülke konumundadır (DSİ, 2014). TÜİK tarafından yapılan araştırmalara göre 2030 yılında nüfusumuzun 100 milyon olacağı göz önüne alındığında kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı daha da azalacak ve 1120 m³ olacaktır (DSİ, 2014). Bu da ülkemizdeki su kaynaklarının yönetimine hayati derecede önem verilmesi gerektiğini göstermektedir. İklim değişikliğinin etkisi de düşünüldüğünde durumumuz daha da kritik hale gelebilir. Bu yüzden bir an önce altyapısal ve yönetsel düzenlemeler yapılmalı, gerekli önlemler alınmalıdır.

Nüfus miktarındaki artışa paralel olarak şehirleşme oranı artmakta bu da havza alanındaki geçirimsizlik yüzdesini arttırarak yağışın daha fazla yüzeysel akışa geçmesine neden olmaktadır. Bu durumda yağış yeraltına yeterince sızmamakta ve yeraltı su seviyesi azalmaktadır. Şekil 1.1'de şehirleşme öncesi ve sonrası hidrolojik çevrimin elemanlarında (buharlaşma, yüzeysel akış ve sızma miktarlarında) meydana gelen değişim verilmektedir. Şehirleşme öncesi durumda yüzeysel akış miktarı %10 iken şehirleşme sonrası bu oran %55'e çıkmakta sızma ve buharlaşma miktarı ise önemli ölçüde azalmaktadır (EPA, 2008). Yüzeysel akış miktarındaki bu artış ve sızma miktarındaki azalma özellikle kentsel bölgelerde su kalitesinde azalmaya, yeraltı su kaynaklarının yeterince beslenememesine, sel ve taşkın olaylarının sıklığında ve şiddetinde artışa neden olmaktadır. Şehirleşme öncesi ve sonrası hidrograf ve pik debideki değişim ise Şekil 1.2'de görülmektedir. Şehirleşmiş alanlarda pik debi, yüzeysel akış hacmi ve yüzeysel akış hızı geçirimsiz sert yüzeylerden dolayı şehirleşme öncesi duruma göre daha fazladır. Bu durum şehirleşmiş bölgelerin daha fazla taşkın olayına

maruz kalmasına ve yüzeysel akış hızından dolayı da sel olaylarının artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 1.1: a) Şehirleşme öncesi b) Şehirleşme sonrası hidrolojik döngü (EPA, 2008'den uyarlanmıştır).



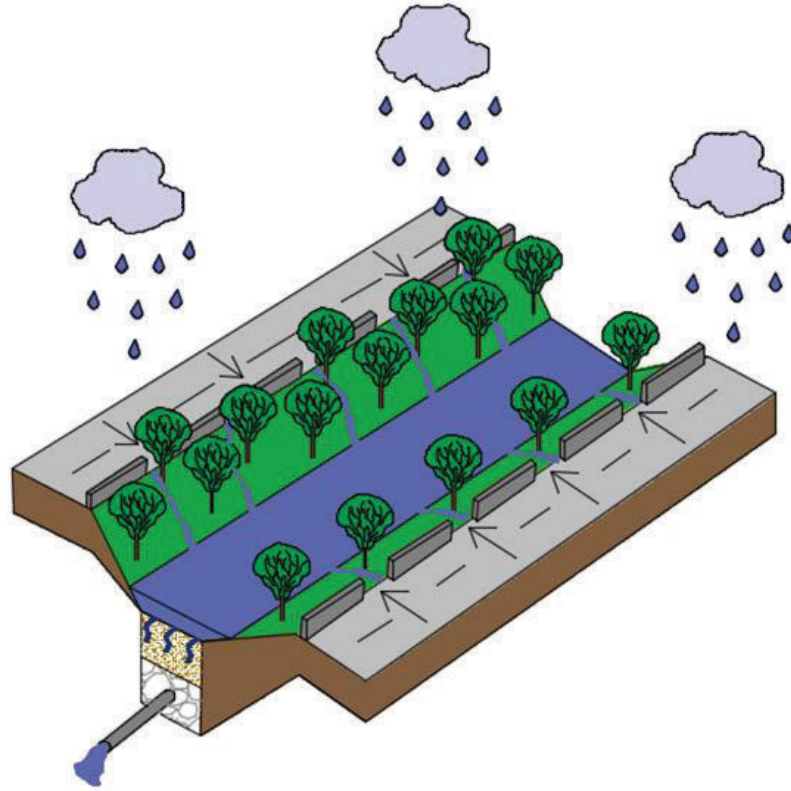
Şekil 1.2: Şehirleşme öncesi ve sonrası hidrograftaki değişim (EPA, 2000).

Bu sorunların üstesinden gelebilmek için su kaynakları sürdürülebilir yönetim anlayışını içeren uygulamalar ile birlikte yönetilmelidir. Sürdürülebilir yönetim uygulamalarından biri olan yağmur hendekleri, yağmur suyundan daha fazla yararlanma amacıyla inşa edilen üstü genellikle bitki örtüsü ile kaplanmış eş yükselti eğrilerine paralel olarak kazılan ıslak ve kuru olmak üzere iki türde inşa edilen açık ve sığ kanallardır (Revitt ve diğ., 2017). Bu hendeklerin sürdürülebilirliğe pek çok katkısı bulunmaktadır. Ayrıca geleneksel yağmur suyu yönetim sistemlerine göre daha ekonomik ve uygulaması daha kolay olan bir yöntemdir (WSUD, 2006; BMP Minnesota, 2001a; BMP Minnesota, 2001b; WSUD, 2010). Bu yüzden yurtdışında olduğu gibi ülkemizde de yaygın şekilde kullanılması tavsiye edilmektedir (CWP, 1998). Yağmur hendeklerinin sürdürülebilirliğe sağladığı diğer katkılar aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir (ARC, 1992; BMP Minnesota, 2001a; BMP Minnesota, 2001b; CASQA, 2003; WSUD, 2006; WSUD, 2010; NWRM, 2013; Lashford ve diğ., 2014). Yağmur hendeklerinin orta refüje uygulanmış trapez enkesitli genel görünüşü Şekil 1.3'te ve yol kenarına inşa edilmiş üçgen enkesitli genel görünüşü ise Şekil 1.4'te verilmektedir.

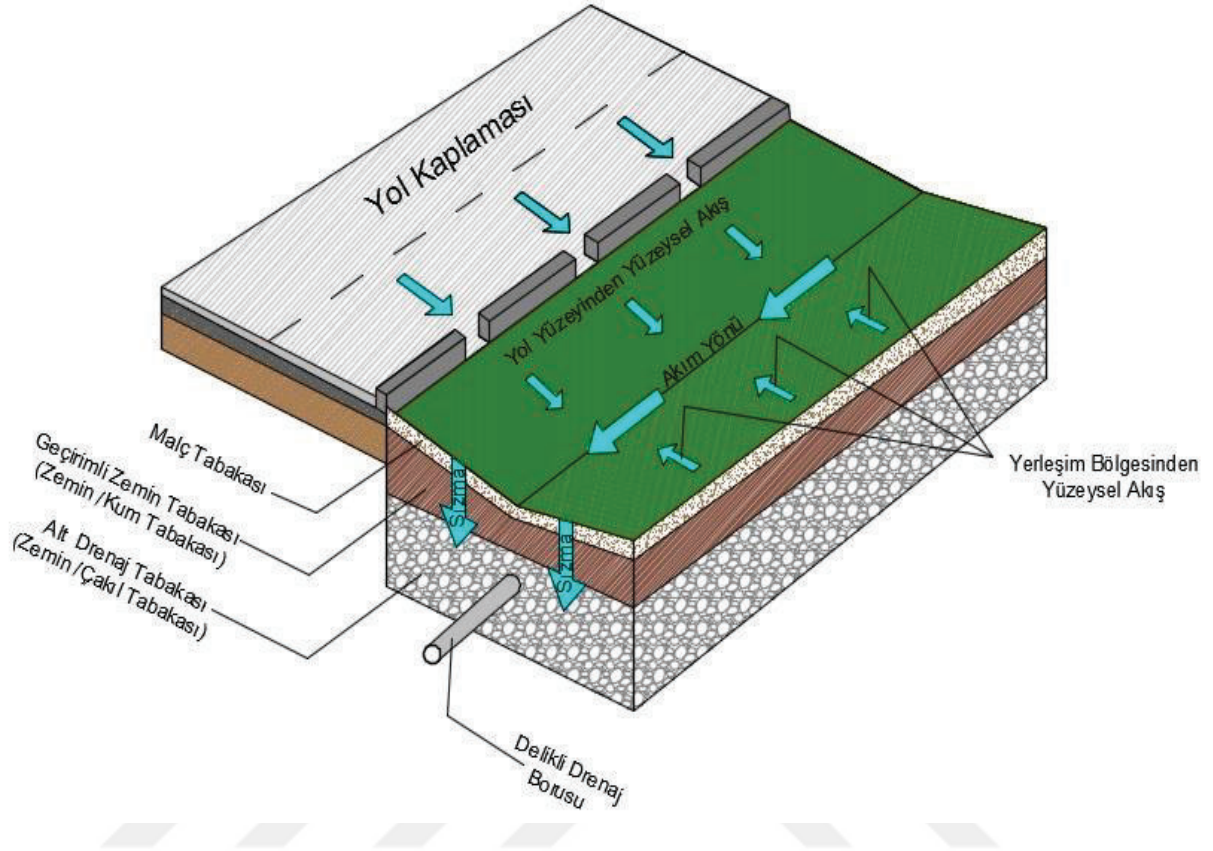
- Yüzeysel akışı iletme,
- Yüzeysel akışı hendek içinde depolayıp yeraltına sızdırarak yeraltı su kaynaklarını besleme ve yeraltı su seviyesini arttırma,
- Yüzeysel akış miktarını azaltma,
- Yüzeysel akış hızını yavaşlatma,
- Bulunduğu bölgede erozyon oluşma riskini azaltma,
- Yağmur suyunda bulunan kirletici maddeleri ve ağır metalleri tutarak su kalitesini arttırma,
- Özellikle kurak dönemlerde sulama suyuna duyulan ihtiyacı azaltma ve böylece sürdürülebilir tarıma imkân sağlama,
- Yağmur suyunun yeniden kullanımına destek olma,
- Taşkın pik debisinin azaltılması, pik debinin oluşma zamanının geciktirilmesi ve yüzeysel akış hızının yavaşlatılmasıyla ile sel ve taşkın olaylarının sıklığını ve şiddetini azaltma,
- Yol kenarlarına ve orta refüje inşa edildiklerinde lastikle yol yüzeyi arasındaki kayma gerilmesini azaltarak sürücüler için güvenli bir sürüş ortamı sağlama,
- Bioçeşitliliği arttırma ve koruma,

- Hendek yüzeyine yerleştirilen malç, kurumuş yapraklar, ağaç dalları, ot, saman, hayvan gübresi, meyve kabukları ve gazete parçaları ile doğal gübre oluşumunu destekleme,
- Enerji tasarrufu sağlama,
- Kentsel bölgelerde oluşan ısı ada etkisinin azaltılmasına yardımcı olma,
- Kentsel bölgelerin estetik değerini artırma,
- İklimsel değişikliklere uyum sağlama ve iklim değişikliğinin etkilerini azaltma,
- Atmosferik CO₂ miktarının azaltılmasına yardımcı olma,
- Bitki yüzeyinden terleme yoluyla buharlaşma miktarını (evapotranspirasyon) artırma,
- Hava kirliliğini azaltma,
- İnşa edilmelerinin kolay olması.

Yağmur hendeklerinin kentsel ve kırsal bölgelerdeki sürdürülebilir yaşama pek çok katkısı bulunmaktadır. Bu katkıların sürdürülebilirlikle olan ilişkisi Bölüm 2.8’de daha detaylı şekilde açıklanmaktadır.



Şekil 1.3: Orta refüje uygulanmış trapez enkesitli yağmur hendeği.



Şekil 1.4: Yol kenarına uygulanmış üçgen enkesitli yağmur hendeği (WSUD, 2011’den uyarlanmıştır).

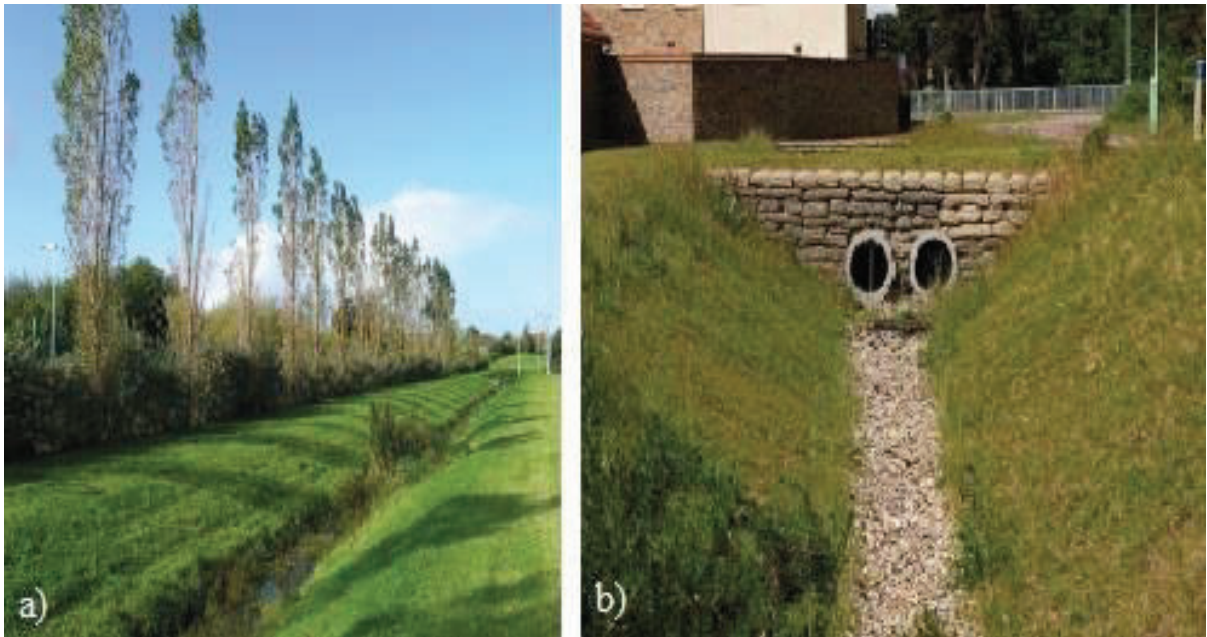
Yağmur hendeklerinin ıslak (Şekil 1.5a) ve kuru (Şekil 1.5b) olmak üzere iki türü mevcuttur. Bölüm 2.1.1 ve Bölüm 2.1.2’de ıslak ve kuru yağmur hendeklerinin türleri ve özellikleri detaylı şekilde anlatılmaktadır.

Yağmur hendeği türünün doğru seçilmemesi veya tasarımının uygun şekilde yapılmaması durumunda aşağıda maddeler halinde sıralanmış olan dezavantajlar oluşmaktadır (EPA, 1999a; BMP Minnesota, 2001a; BMP Minnesota, 2001b). Bu dezavantajların yağmur hendekleri ile ilgili bilincin artırılması ve bundan sonra yapılacak olan teknik çalışmalarla ortadan kaldırılabileceği düşünülmektedir.

- Yüksek hızdaki akımların oluşması halinde bitki örtüsü aşınabileceğinden yağmur hendekleri büyük taşkınlara karşı savunmasızdır,
- Çok düz veya çok dik topografyalı ya da yeraltı sularının yüzeye çok yakın olduğu yerlerde kuru yağmur hendeklerinin uygulanması pratik değildir,
- Yüzeysel akışta bulunan bakteri oranını azaltamazlar,

- Islak yağmur hendeklerindeki durgun su; güvenlik, koku, sivrisinek oluşumu ve bataklık gibi problemlere sebep olabilir. Bu yüzden bu tür yağmur hendekleri daha çok yerleşim bölgelerinin dışında kullanılmalıdır,
- Tek başına uygulanan yağmur hendekleri küçük bir alanın iyileştirilmesinde etkili olmaktadır,
- Kaldırım kenarı-oluk, beton kanallar, borulu altyapı şebeke sistemleri gibi geleneksel yağmur suyu yönetim sistemlerine nazaran daha fazla bakım gerektirirler.

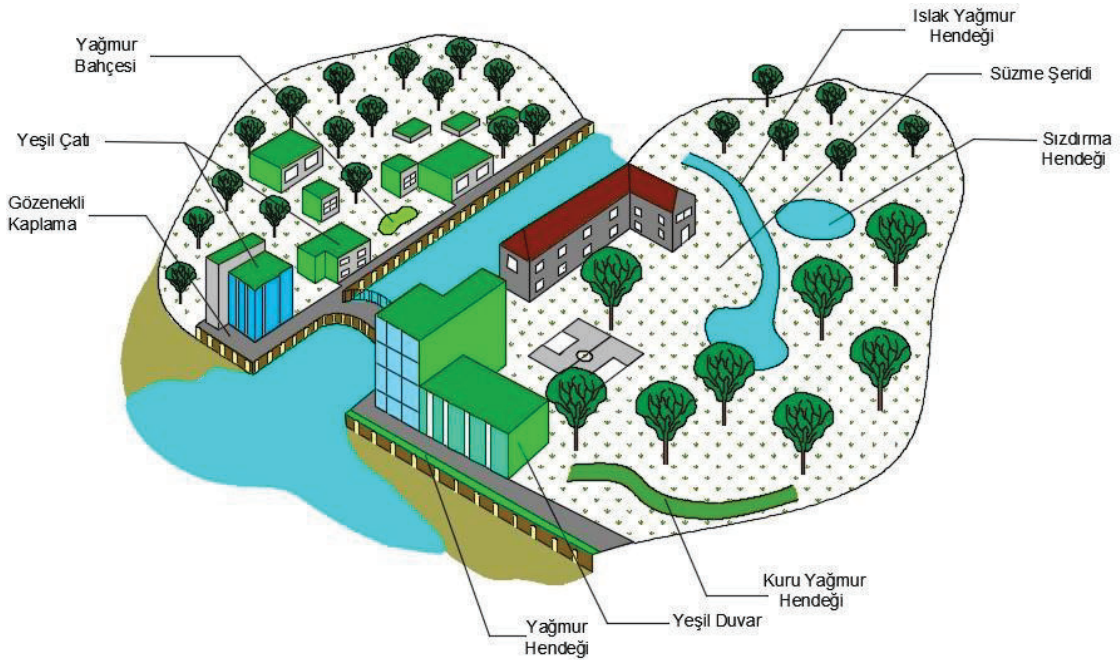
Yağmur hendeklerinin tasarımı ve uygulaması kolay olduğundan bu hendekler pek çok yere inşa edilebilir. Özellikle yerleşim yerleri, parklar, otoparklar, yol kenarları, orta refüj, okul ve alışveriş merkezlerinin bahçeleri, endüstriyel ve ticari alanlar gibi geçirimsiz bölgelerde yağmur hendekleri iyi bir performans göstermektedir. Ayrıca bu hendekler; su kalitesinin azalması, sel ve taşkın olaylarının artması, yeraltı suyunun yeterince beslenememesi ve hava kirliliğinin artması gibi şehirleşmenin sebep olduğu olumsuz etkileri başarı ile bertaraf edebilmektedir. Aynı zamanda yağmur hendekleri kentsel bölgelerin daha estetik bir görünüm kazanmasını sağlamakta ve üzerindeki bitki örtüsü yardımıyla geçirimsiz yüzeylerden dolayı artan pik sıcaklıkların azalmasına yardımcı olarak kentsel ısı ada etkisini azaltmaktadır. Bu yüzden yağmur hendekleri şehirlerin sürdürülebilir kalkınmasında önemli bir yere sahiptir.



Şekil 1.5: a) Islak yağmur hendeği b) Kuru yağmur hendeği (Woods Ballard ve diğ., 2015).

Yağmur hendekleri şehirleşmiş bölgelerin dışında tarımsal bölgelerde de uygulanmaktadır. Sürdürülebilir tarım uygulamalarından biri olan yağmur hendeği ile yağan yağış hendek içinde tutularak tarımda sulamaya olan ihtiyacın azaltılması mümkündür. Bu yüzden permakültürde en sık görülen örnek uygulamalardan biri eş yükselti eğrilerine paralel olarak inşa edilen yağmur hendekleridir. Yağmur hendekleri sayesinde yağmur suyu hendek içinde depolanıp yeraltına sızarak yeraltı su seviyesi arttırılmakta böylece kurak mevsimlerde sulama suyuna duyulan ihtiyaç azalmaktadır. Yağmur hendekleri aynı zamanda yağmur suyunda bulunan ağır metalleri ve besi maddelerini tutarak yağmur suyunun arıtılmasını sağlamaktadır. Böylece bu suyun yeraltına arıtılmış şekilde sızmasını sağlayarak yeraltı su kaynaklarının kirlenmesini önlemektedir.

Yağmur hendekleri çoğu zaman tümsek (berm) denilen bir yapıyla birlikte kullanılarak büyük taşkın olaylarında pik debinin oluşma zamanını geciktirir ve taşkın debisini azaltır. Doğru bir şekilde tasarlanmış bir yağmur hendeği yüzeysel akışı toplar ve aşırı yağışlarla gelen kapasite fazlası suyu taşkın yatağı oluşturmadan daha aşağıda bulunan yağmur hendeğine iletir. Böylece yüzeysel akışın erozyona sebep olacak bir hıza ulaşması engellenir. Bu hendekler aynı zamanda yüzeyinde bulunan bitki örtüsü, su ve verimli toprak katmanı ile bioçeşitliliğin artmasına ve korunmasına katkı sağlar.



Şekil 1.6: Yeşil altyapı uygulamaları (Graham ve diğ., 2012'den uyarlanmıştır).

Yağmur hendekleri kentsel alanlara ve tarıma sağladığı bu faydalarından dolayı önemlidir ve diğer yeşil altyapı uygulamaları (Şekil 1.6) ile birlikte kullanıldığında daha etkili sonuçlar vermektedir. Yağmur hendeklerinin ülkemizdeki kullanımlarının yaygınlaştırılması ülkemizin sürdürülebilirliği açısından önem arz etmektedir. Bu sebeple yağmur hendekleri ve diğer yeşil alt yapı uygulamaları ile ilgili gerekli altyapısal çalışmalar bir an önce yapılmalıdır.

1.2. TEZİN AMACI

Bu tez çalışmasında öncelikle hem uluslararası literatürde belirtilen yöntemler hem de ülkemizde 23 Haziran 2017 tarih ve 30105 sayı ile Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren “Yağmur Suyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Hakkında Yönetmelik”te belirtilen hesap yöntemleri kullanılarak örnek bir yağmur hendeği hesabı yapılmaktadır. Böylece iki kaynak karşılaştırılarak yeni yönetmeliğin üstün veya eksik yönleri yağmur hendekleri yönünden tartışılmaktadır.

Daha sonra yağmur hendekleri ile geleneksel sistemler sürdürülebilirlik açısından kıyaslanarak bu sistemlerin kentsel ve kırsal bölgelere sağladığı katkılar değerlendirilmektedir. Değerlendirme için detaylı bir literatür araştırması yapılmış ve her bir katkı için en düşüğü 0 en yükseği 5 olmak üzere bir puan belirlenmiştir Oluşturulan bu puan sistemine göre yağmur hendekleri ve geleneksel sistemlerin çevresel, sosyal ve ekonomik olarak sürdürülebilirliğe etki oranları belirlenmiş ve altyapı sürdürülebilirlik indeksi (ASİ) tanımlanarak bu sistemler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaya ait sonuçlar radar grafikleri halinde sunularak oluşturulan maddelerin birbirleri ile görsel olarak kıyaslanması sağlanmıştır.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde yağmur hendeklerinin tasarımında dikkate alınması gereken kriterler incelenerek yağmur hendeklerinin taşıma ve arıtma kapasitesini optimum yapan şev eğiminin değeri üçgen ve trapez enkesitler için araştırılmaktadır. Bu araştırmanın bir sonucu olarak taşıma ve arıtma kapasitesi açısından optimum şev eğimi ve optimum hidrolik yarıçap değeri belirlenmiştir. Elde edilen optimum şev eğimi ile optimum hidrolik yarıçap değeri yeni kriterler olarak literatüre kazandırılmıştır.

Bu tez çalışmasının yağmur hendekleri ile ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalara kaynak oluşturması, bu husustaki bilinci arttırması ve Türkçe olarak hazırlanan ilk yağmur hendeği el kitabı olması hedeflenmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

Yağmur hendeklerinin mevcut literatürde belirtilen türleri, yapısal elamanları, tasarım kriterleri, performansları, maliyet hesapları, kullanım yerleri, sürdürülebilirliğe katkıları ve dünyadaki ve ülkemizdeki uygulamaları detaylı şekilde bu bölümde incelenmektedir. Ayrıca 23 Haziran 2017 tarihinde yayımlanan “yağmur suyu toplama, depolama ve deşarj sistemleri hakkında yönetmelik” de bu bölümde yer almaktadır.

2.1. YAĞMUR HENDEKLERİNİN TÜRLERİ

İç yüzeylerinin ıslak (wet) veya kuru (dry) olması durumuna göre yağmur hendekleri iki farklı türde inşa edilmektedir.

2.1.1. Islak Yağmur Hendekleri

Islak yağmur hendekleri yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu, altında geçirimsiz veya sıkışmış doğal zemin tabakası bulunan, suya doymuş zeminlerde inşa edilmektedir (Claytor ve Schueler, 1996; CWP, 1998; BMP Minnesota, 2001a). Zemin suya doymuş olduğundan ve yağın yağış yeraltına sızmadığından bu tür yağmur hendeklerinin iç yüzeylerinde kalıcı bir su kütlesi bulunur (CWP, 1998). Hendek içinde bulunan bu kalıcı su kütlesi zamanla güvenlik, koku, bataklık ve sivrisinek üremesi gibi problemlere sebep olur (EPA, 1999a). Bu yüzden ıslak yağmur hendeklerinin yerleşim bölgelerinin dışında bioçeşitliliği ve su kalitesini artırma amacıyla kullanılması tavsiye edilmektedir (BMP Boston, 2013). Islak yağmur hendekleri, hendek içinde bulunan durgun sudan dolayı daha çok sulak alan olarak işlev görmektedir (Claytor ve Schueler, 1996; BMP Minnesota, 2001a; Tang ve diğ., 2016).

Islak yağmur hendeklerinin kuru yağmur hendeklerinden farkı tabanında filtre, geçiş ve alt drenaj tabakalarının yer almaması ve delikli drenaj borusuna sahip olmamasıdır (CWP, 1998). Islak yağmur hendekleri genellikle trapez enkesitli olmakla beraber parabolik veya üçgen enkesitli olarak da inşa edilebilmektedir. Hendek enkesit seçiminde önemli olan arıtılacak ve taşınacak su miktarını arttırmaktır. Trapez ve parabolik enkesitli yağmur hendekleri üçgen enkesitli yağmur hendeklerine göre bitki örtüsüyle daha fazla temas eden yüzeye sahip olduklarından arıtma kapasiteleri daha fazladır. Çünkü yağmur hendeklerinde bitki örtüsü ile temasın artması yağmur suyunda bulunan kirleticilerin daha fazla tutulması anlamına

gelmektedir. Ayrıca trapez ve parabolik enkesitli yağmur hendeklerinin taşıma kapasiteleri üçgen enkesitlere göre daha fazladır. Bu sebeplerden dolayı trapez ve parabolik enkesitler daha çok tercih edilmektedir (BMP Minnesota, 2001a). Bu iki enkesit arasında ise uygulama kolaylığı açısından fark bulunmaktadır. Trapez enkesitlerin şev eğimleri parabolik enkesitlere göre daha kolay inşa edilmektedir. Bu yüzden yağmur hendekleri uygulamada genellikle trapez enkesitli olarak kullanılmaktadır.

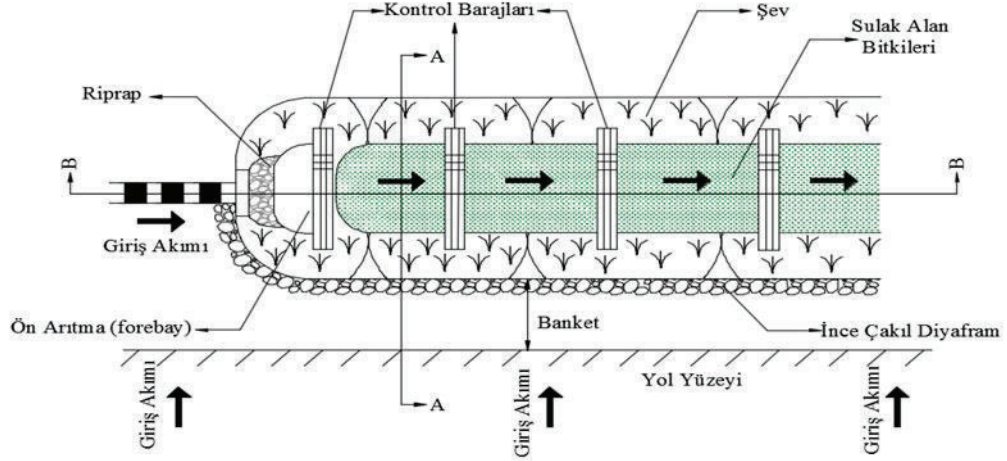
Trapez enkesitli ıslak bir yağmur hendeğinin planı Şekil 2.1'de, enkesiti Şekil 2.2'de ve boykesiti Şekil 2.3'te verilmektedir. Şekil 2.2'de görülen faydalı su seviyesi; yağmur suyunun arıtılması için ayrılmış olan su seviyesini, 2 yıllık taşkın su seviyesi; hendek tabanında oyulma meydana getirmeden 2 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışı güvenle taşımak için ayrılan su seviyesini, 10 yıllık taşkın su seviyesi ise; yağmur hendeğine 10 yıllık tekerrür aralığına sahip yağış gelmesi durumunda hendeğin bu yağışı taşıyabilmesi için ayrılmış olan maksimum su seviyesini göstermektedir. Hendek üst kotu ile 10 yıllık taşkın su seviyesi arasında bırakılan hava payı ise rüzgar, deprem gibi dış etkilerden dolayı suyun hendek dışına taşmasını önlemek için ayrılmış olan güvenlik payıdır.

Islak yağmur hendekleri sahip olduğu yoğun bitki örtüsü ile yağmur suyunda bulunan kirletici maddelerin ve ağır metallerin uzaklaştırılmasını sağlar (BMP Minnesota, 2001a). Aynı zamanda hendek içinde oluşturulan ortamla bioçeşitliliğin artmasına ve korunmasına katkıda bulunur (BMP Minnesota, 2001a). Islak yağmur hendeklerinin yüzeyi bitki örtüsü veya taş ile kaplanabilir. Hendek yüzeyinin bitki örtüsü ile kaplanması halinde; kullanılacak olan bitki örtüsü yoğun olmalı ve yüksekliği hendek içinde bulunan su derinliğinde fazla olmalıdır (BMP Minnesota, 2001a). Ayrıca bu bitkiler su akımlarına karşı dayanıklı olmalı ve su içinde uzun süre çürümeden kalabilmelidir (BMP Minnesota, 2001a). Bu bitkiler hendek inşa edildikten sonra ekilebileceği gibi doğal ortamda yetişen sulak alan bitkileri de olabilir. Islak yağmur hendeklerinde kullanılacak bazı sulak alan bitkileri Tablo 2.1'de verilmektedir.

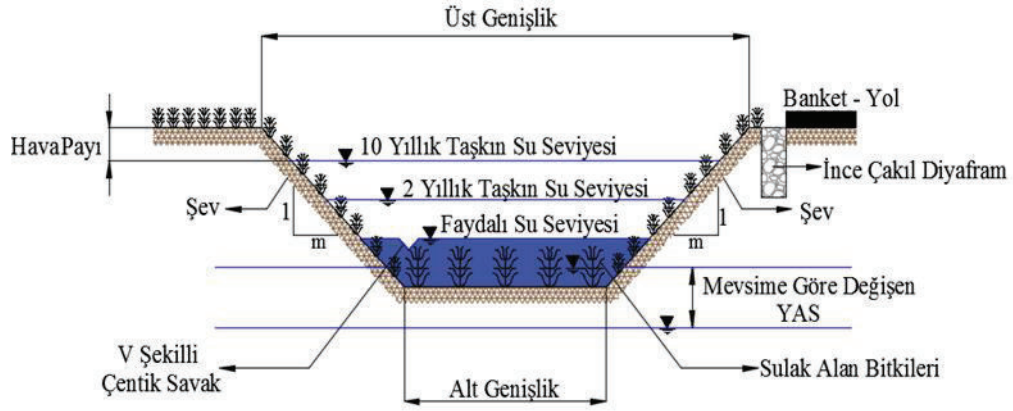
Islak yağmur hendeğinin içinde bulunan kalıcı su kütlesi durgun halde bir günden fazla hendek içinde kalmamalıdır. Çünkü bu durgun su kütlesi sivrisineklerin üremesi için ortam oluşmasına, pis bir kokuya, bataklık ve güvenlik problemlerine sebep olmaktadır. Bu yüzden bu tür hendeklerin içerisindeki suyun kalış süresi maksimum 24 saat olmalıdır (BMP Minnesota, 2001a). Sivrisinek üremesi ve yumurtadan çıkması genellikle 48 saat sürdüğünden bu maksimum kalış süresi sivrisinek problemini ve diğer olumsuzlukları engelleyecektir.

Tablo 2.1: Islak yağmur hendeklerinde kullanılabilir sulak alan bitkileri.

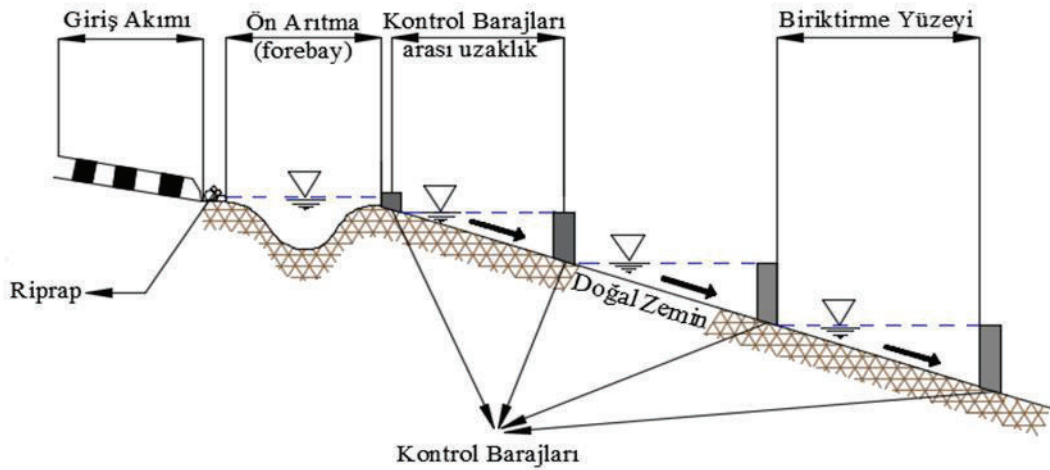
Botanik İsmi	Yaygın İsmi	Şekil	Kaynak
Lemna Minor	Su Mercimeği		(Dağlı, 2006; Ak ve diğ., 2013).
Eichhornia Crassipes	Su Sümbülü		(Dağlı, 2006; Ak ve diğ., 2013).
Typha Latifolia	Su Kamışı		(Dağlı, 2006; Ak ve diğ., 2013).
Nerium Oleander	Zakkum		(Ak ve diğ., 2013).
Phragmites Australis	Saz		(Dağlı, 2006; Ak ve diğ., 2013).
Bulrush	Hasır Sazı		(Ak ve diğ., 2013).
Cyperus Alternatifolius	Japon Şemsiyesi		(Dağlı, 2006; Ak ve diğ., 2013).



Şekil 2.1: Islak yağmur hendeği plan görünüşü (CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).



Şekil 2.2: Trapez enkesitli ıslak yağmur hendeği (A-A kesiti; CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).



Şekil 2.3: Islak yağmur hendeğine ait boykesit (B-B kesiti; CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).

2.1.1.1. Islak Yağmur Hendeklerinin Avantajları ve Dezavantajları

Nispeten geçirimli, mevsimlik olarak suya doymuş zeminlerde ve yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu durumlarda inşa edilen ıslak yağmur hendeklerinin avantajları aşağıda maddeler halinde toparlanarak bir araya getirilmiştir (BMP Minnesota, 2001a).

- Hendek içinde yağmur suyunun taşınmasını sağlar,
- Yüzeysel akış miktarını ve hızını azaltır,
- Pik debinin oluşma zamanını geciktirir ve pik debiyi azaltır,
- Yüzeysel akış hızını azalttığı için bulunduğu bölgede erozyon oluşma riskini azaltır,
- Tasarımı ve uygulaması kolaydır
- Yağmur suyunda bulunan sediment ve diğer kirletici maddeleri yakalayıp uzaklaştırarak su kalitesinin artırılmasını sağlar,
- Geleneksel kaldırım kenarı-oluk sistemlerine göre daha ekonomiktir,
- Bölgede bulunan canlılar için görsel olarak çekici ve faydalı bir yaşam alanı oluşturarak biyolojik çeşitliliği artırır,
- İlave yağmur suyu yönetim uygulamaları (forebay, süzme şeritleri) ile yağmur suyunu daha fazla işlemden geçirerek etkili bir ön arıtma sağlar,
- Doğrusal bir sulak alan olarak işlev görür,
- Doğal peyzajı destekler.

Islak yağmur hendeklerinin dezavantajları ise aşağıda listelenmektedir (EPA,1999a; BMP Minnesota, 2001a; BMP Boston, 2013).

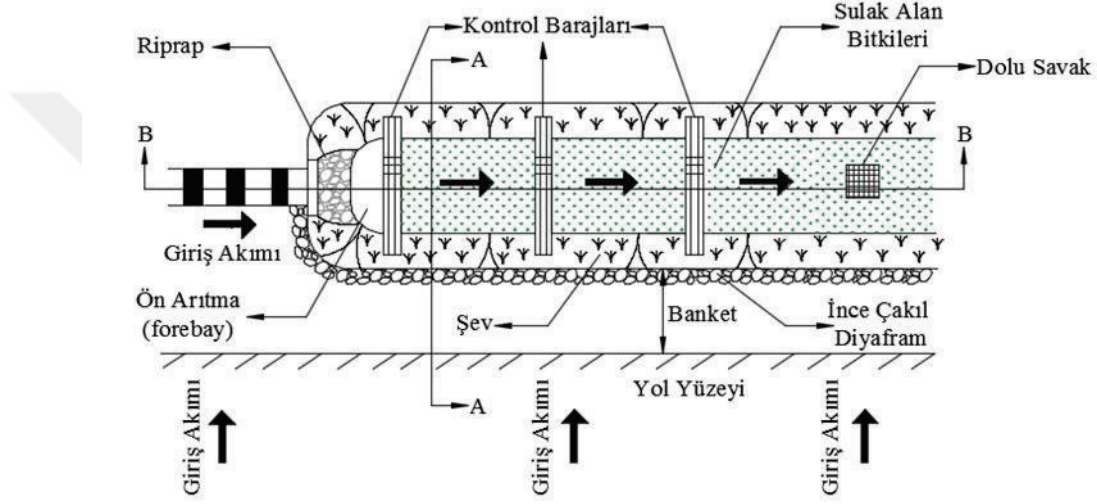
- Bu tür yağmur hendeklerinin içerisinde her zaman bir miktar su bulunacağı için yerleşim bölgelerinde (güvenlik, sivrisinek üremesi, koku vb. sebeplerden dolayı) uygulanması sakıncalıdır,
- Yağmur suyunu yeraltına yeterince sızdıramadığı için yeraltı su kaynaklarını tam olarak besleyemez,
- Şiddetli taşkın olayları sırasında hendek tabanı yüksek hızdaki akımlardan dolayı aşınmaktadır. Hendek tabanının aşınması ise hendeğin arıtma kapasitesini azaltmaktadır.
- Hendek içindeki kalıcı su kütesinden dolayı bitki örtüsünün biçilmesi ve bakımı zordur.

2.1.2. Kuru Yağmur Hendekleri

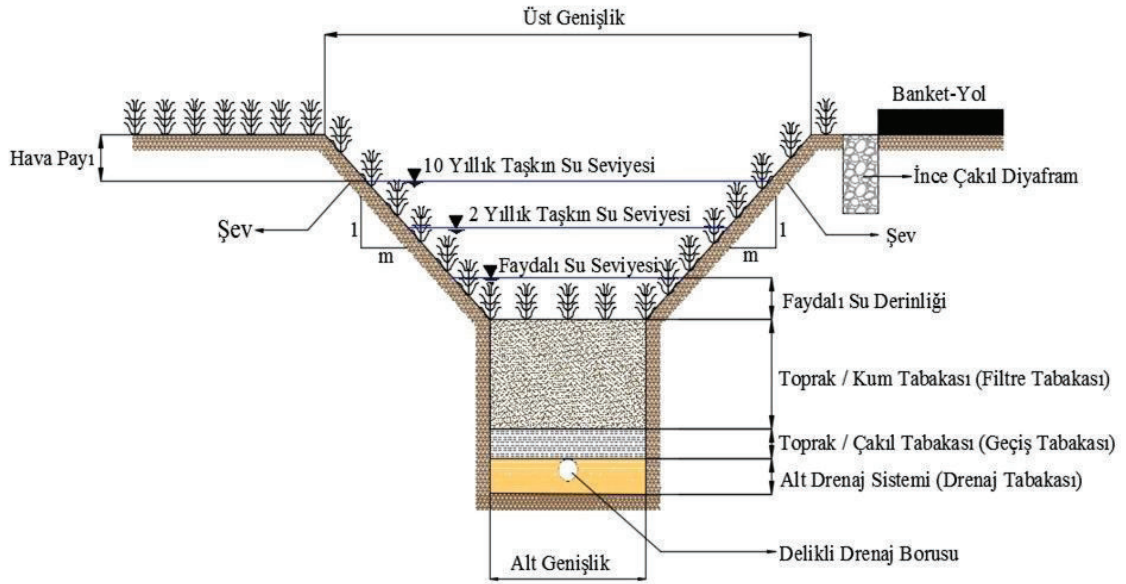
Kuru yağmur hendekleri yağmur suyunu taşımakla birlikte yağış sonrası hendeğe oluşan su birikintisini sızdırmak ve bu suyu arıtmak için kullanılan bitki örtüsü, taş, malç vb. malzeme ile kaplanmış açık ve sığ kanallardır (BMP Minnesota, 2001b). Kuru yağmur hendekleri yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olmadığı, altında geçirimli bir zemin tabakası bulunan, suya doygun olmayan zeminlere inşa edilmektedir. Topografya eğiminin çok az olduğu (%1 veya %2'in altında) bölgelere uygulanan kuru yağmur hendeklerinde geçirimsizliği arttırmak ve hendek yüzeyindeki göllenmeyi engellemek amacıyla hendek tabanında filtre, geçiş ve drenaj tabakalarını kapsayan bir sistem oluşturulabilir (WSUD, 2006). Bu sistem yerine aynı işlevi yerine getirecek drenaj modülü de kullanılabilir. Topografya eğiminin yeterli olduğu bölgelerde ise böyle bir sistem isteğe bağlı olarak inşa edilmektedir. Kuru yağmur hendeklerinin yüzeyinin ıslak kalmasını önlemek için hendek tabanı yeraltı su seviyesinden en az 0,9 m (3 ft) yukarıda olmalıdır (BMP Minnesota, 2001b).

Kuru yağmur hendekleri yağmur suyunu hendek içinde biriktirerek bu suyu altında bulunan geçirimli zemin tabakası ve alt drenaj sistemiyle ya da drenaj modülü ile kolayca yeraltına sızdırabilir. Böylece hendek içinde kalıcı bir su kütlesi oluşmaz. Bu yağmur hendeklerinin içinde kalıcı su kütlesi oluşmadığı için güvenlik, koku, bataklık, sivrisinek üremesi için ortam oluşturma gibi problemlere de neden olmaz. Bu sebeple yerleşim bölgelerinde yeşil altyapının bir parçası olarak rahatlıkla kullanılabilirler (Claytor ve Schueler, 1996; EPA, 1999b; BMP Boston, 2013). Kuru yağmur hendeğinin içinde su birikmediği için yağıştan kısa süre sonra bile hendek içindeki bitki örtüsü kolaylıkla biçilebilir (BMP Minnesota, 2001b). Kuru yağmur hendekleri ıslak yağmur hendeklerinde olduğu gibi trapez, parabolik ve üçgen enkesitli olarak inşa edilebilmektedir. Trapez ve parabolik enkesitli yağmur hendeklerinin arıtma ve taşıma kapasitesi, üçgen enkesitli yağmur hendeklerine göre daha fazladır (BMP Minnesota, 2001b). Bu sebeple bu enkesitler uygulamada daha çok tavsiye edilmektedir. Trapez enkesitli kuru yağmur hendeğine ait plan, enkesit ve boykesit sırasıyla Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da verilmektedir. Şekil 2.5'te görülen enkesit hendek tabanında zemin tabakalarının oluşturulmasıyla elde edilmiştir. Bu sistem yerine Şekil 2.7'de görüldüğü gibi hendek tabanına drenaj modülü de uygulanabilmektedir (Lai ve diğ., 2009). Yağmur hendekleri trapez enkesit dışında parabolik ve üçgen enkesitli olarak da inşa edilebilmektedir. Parabolik ve üçgen geometriye sahip kuru yağmur hendeklerinin enkesitleri Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da verilmektedir.

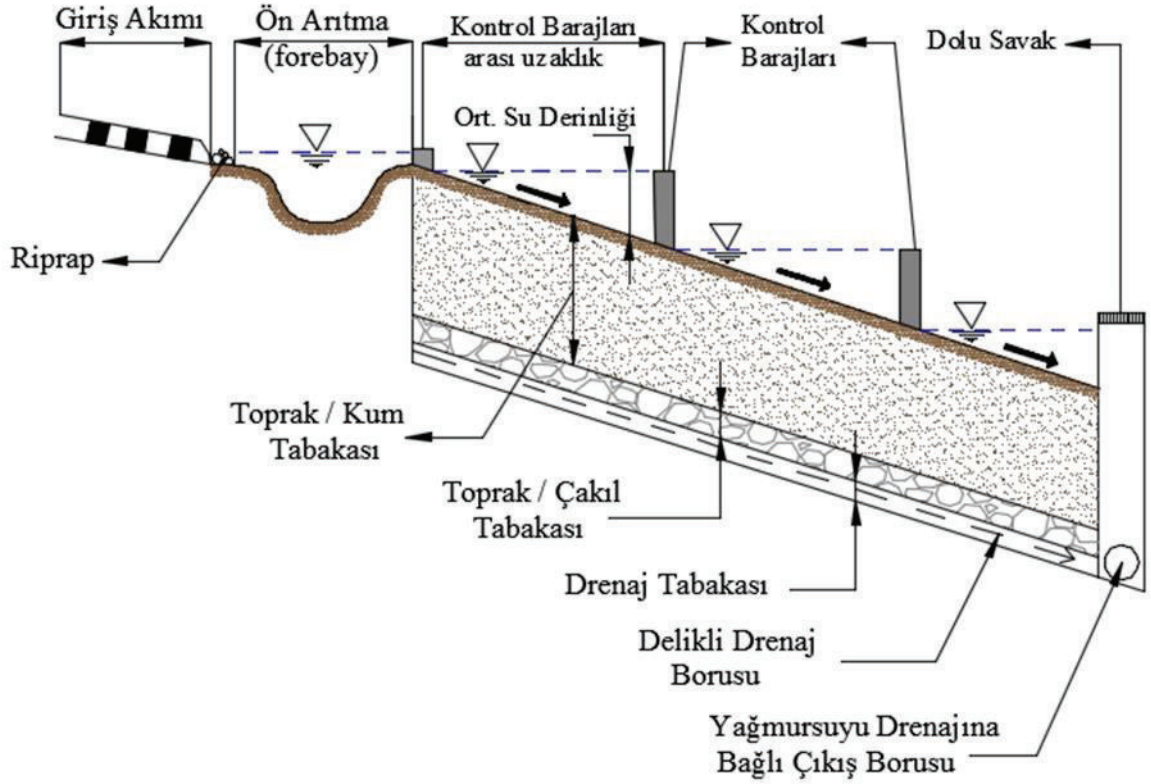
Hem kuru hem de ıslak yağmur hendekleri yağmur suyu drenaj sisteminin bir parçası olabileceği gibi kaldırım kenarı-oluk, yağış-kanalizasyon sistemlerinin yerine de kullanılabilir (BMP Minnesota, 2001a). Bu sistemlerin geleneksel yağmur suyu drenaj sistemlerinden farkı yağmur suyunda bulunan kirletici maddelerin uzaklaştırılmasında önemli avantajlara sahip olmalarıdır. Kirletici maddeleri uzaklaştırma oranları geleneksel yağmur suyu drenaj sistemlerine kıyasla son derece fazladır (BMP Minnesota, 2001a).



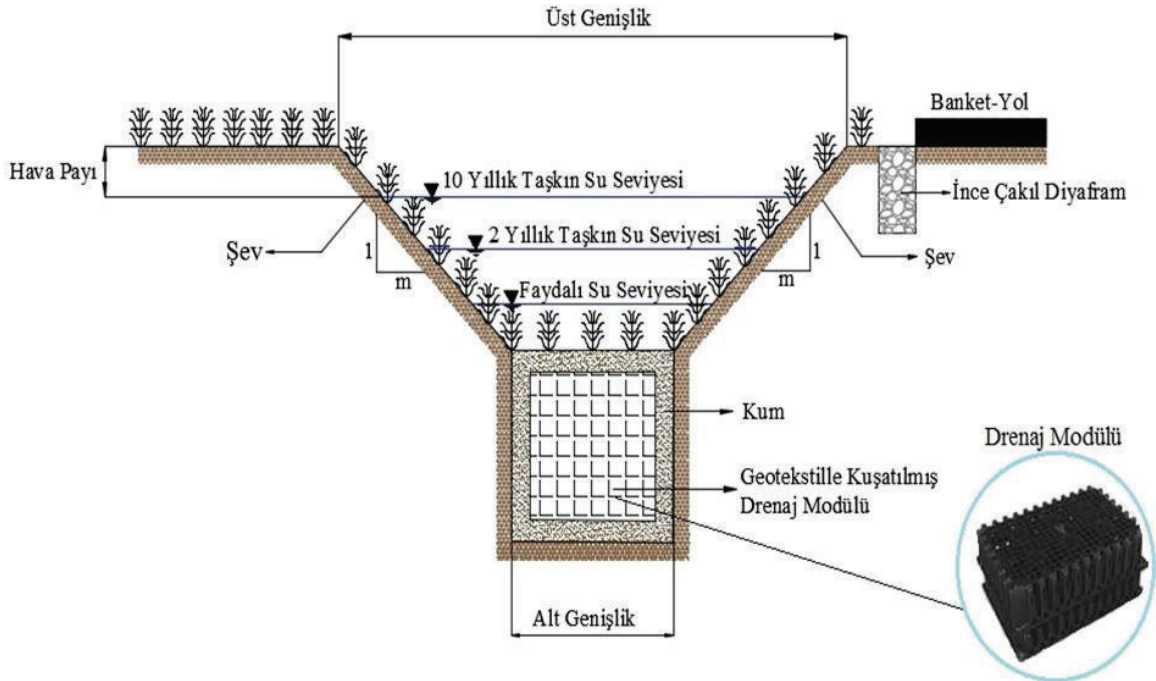
Şekil 2.4: Kuru yağmur hendeği plan görünüşü (CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).



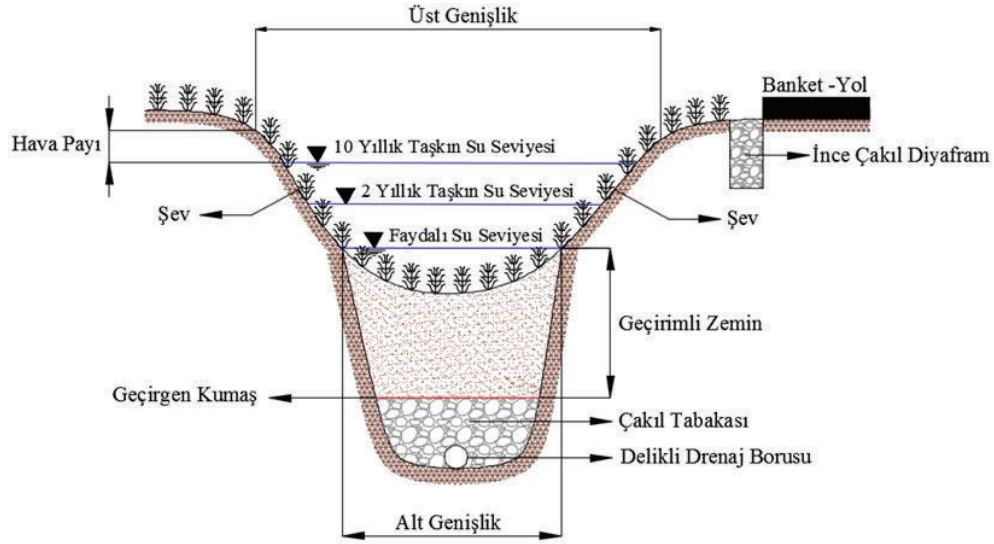
Şekil 2.5: Trapez enkesitli kuru yağmur hendeği (A-A kesiti; MDE ve CWP, 2000'den uyarlanmıştır).



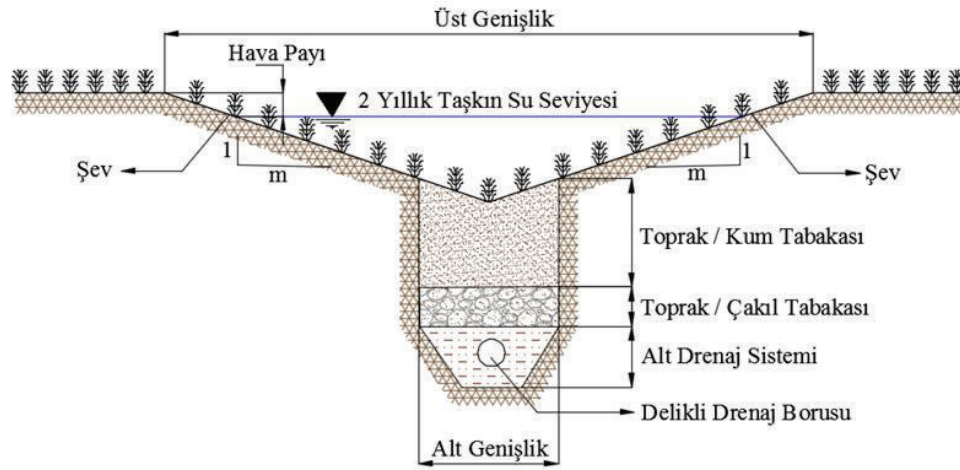
Şekil 2.6: Kuru yağmur hendeğine ait boykesit (B-B kesiti; MDE ve CWP, 2000'den uyarlanmıştır).



Şekil 2.7: Drenaj modüllü trapez enkesitli kuru yağmur hendeği (Lai ve diğ., 2009'dan uyarlanmıştır).



Şekil 2.8: Parabol enkesitli kuru yağmur hendeği (CWP, 1999'dan uyarlanmıştır).



Şekil 2.9: Üçgen enkesitli kuru yağmur hendeği (UDFCD, 2010'dan uyarlanmıştır).

2.1.2.1. Kuru Yağmur Hendeklerinin Avantajları ve Dezavantajları

Düşük, orta yoğunluklu yerleşim yerleri ve kurumsal alanlar için iyi bir seçenek olan ve geçirimsiz alanları bölmek için park ve otoparklarda da kullanılabilen kuru yağmur hendeklerinin avantajları aşağıda listelenmiştir (BMP Minnesota, 2001b).

- Yerleşim bölgelerinde, kentsel alanlarda rahatlıkla kullanılabilir,
- Hendek içinde yağmur suyunun taşınmasını sağlar,
- Yüzeysel akış hızını ve miktarını azaltır,
- Altında bulunan geçirimli zemin tabakası ve alt drenaj sistemi ile ıslak yağmur hendeklerine göre daha fazla yağmur suyunun yeraltına sızmasını sağlar,

- Yağmur suyunun yüzeysel akış miktarını ve hızını azalttığı için bulunduğu bölgede erozyon oluşma riskini azaltır,
- Sediment ve diğer kirletici maddeleri uzaklaştırarak su kalitesinin artmasını sağlar,
- Geleneksel yağmur suyu yönetim sistemlerine göre daha ekonomiktir,
- Hendek içinin kuru olması sebebiyle bitki örtüsünün biçilmesi ve diğer bakım faaliyetleri ıslak yağmur hendeklerine göre daha kolay yapılmaktadır.

Kuru yağmur hendeklerinin dezavantajları ise aşağıda özetlenmektedir (BMP Minnesota, 2001b).

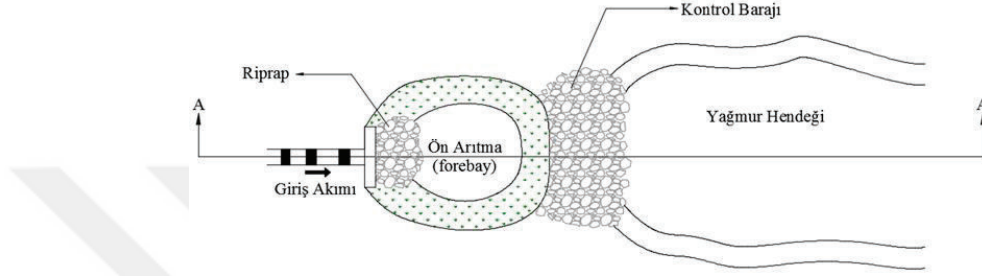
- Çok düz, çok dik veya bitki örtüsünün seyrek olduğu bölgelere uygulanan kuru yağmur hendeklerinin arıtma performansı düşüktür,
- Yol kenarına ve otoparklara inşa edilen yağmur hendekleri arabaların hareketleri veya park etmeleri sırasında zarar görebilir,
- Yağmur hendeklerini birbirine bağlayan menfezlerde ve filtre tabakasında tıkanmalar olabilir. Bunu önlemek için menfez çap genişliği minimum 0,45 m (18 inç) olarak seçilmeli ve filtre tabakasının bakım faaliyetleri tıkanmayı önlemek için düzenli olarak yapılmalıdır.

2.2. YAĞMUR HENDEKLERİNİN YAPISAL ELEMANLARI

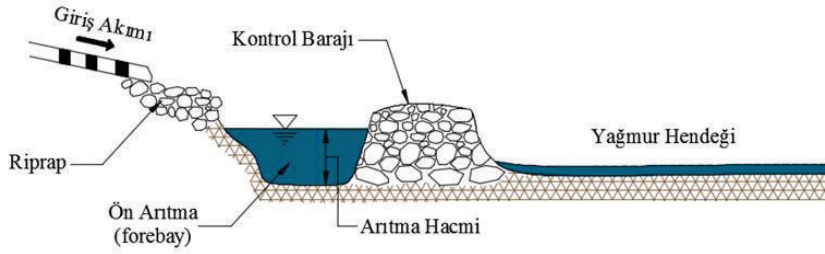
2.2.1. Riprap, İnce Çakıl Diyafram ve Forebay

Yağmur hendeklerinde giriş akımlarının önüne çakıl parçalarından oluşan, yağmur suyunun hızını azaltıcı bir yapı olarak riprap ve ince çakıl diyafram yerleştirilmektedir. Bu yapılar sayesinde hendek içine giren yağmur suyunun akış hızı yavaşlatılarak hendek tabanının ve hendek içinde biriktirilen sedimentin oyulması önlenir. Riprap yapısı ile kontrol barajı arasına ön arıtma işlevini gerçekleştirmek amacıyla forebay yapısı inşa edilir (BMP Boston, 2013). Forebay yapısı yağmur suyu ile taşınan iri taneli sedimentin uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (BMP Boston, 2013). Forebay yapısından kontrol barajını aşarak yağmur hendeğine giren yağmur suyunun burada daha detaylı şekilde arıtılma işlevi gerçekleştirilir. Forebay yapısında iri taneli sedimentin ön arıtma işlevi gerçekleştiğinden yağmur hendeğinde ince taneli sedimentin uzaklaştırılması işlevi sağlanmaktadır. Forebay yapısı genellikle 0,6 m (2 ft) ile 1,8 m (6 ft) arası derinliklerde inşa edilmektedir (Thomas ve diğ., 2008). Bu yapı hendekteki su hacminin

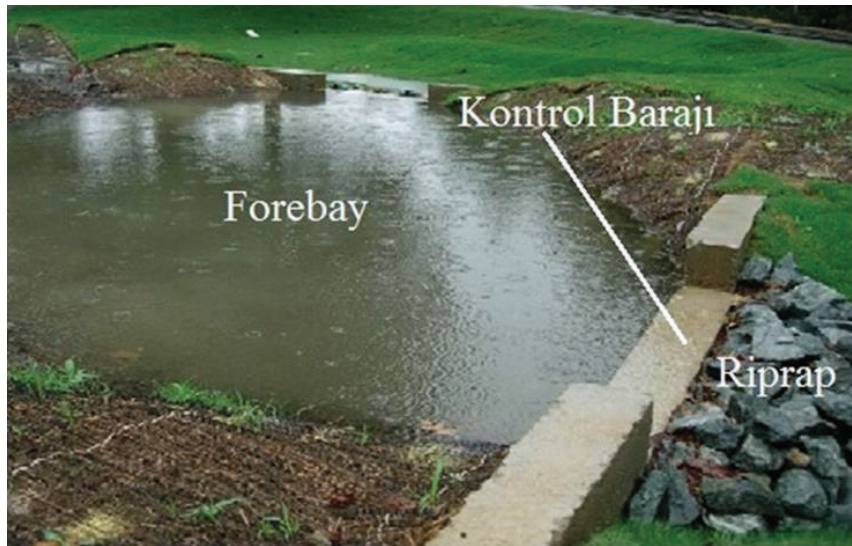
%25'ini arıtacak kadar bir hacme sahip olmalıdır. (BMP Minnesota, 2001b). Riprap ve forebay yapılarının planı ile boykesiti sırasıyla Şekil 2.10 ve Şekil 2.11 'de verilmektedir. Ayrıca uygulamada bazen kontrol barajlarının devamına da riprap yerleştirilebilir bunun sebebi kontrol barajından aşan suyun enerjisinin kırılması ve o bölgede oyulmaya sebep olmamasıdır. Örnek bir uygulama Şekil 2.12'de verilmektedir.



Şekil 2.10: Riprap ve forebay yapılarına ait plan (VANR, 2002'den uyarlanmıştır).



Şekil 2.11: Riprap ve forebay yapılarına ait boykesit (A-A kesiti; VANR, 2002'den uyarlanmıştır).



Şekil 2.12: Riprap, forebay ve kontrol barajı yapılarının görünümü (Perrin ve diğ., 2009).

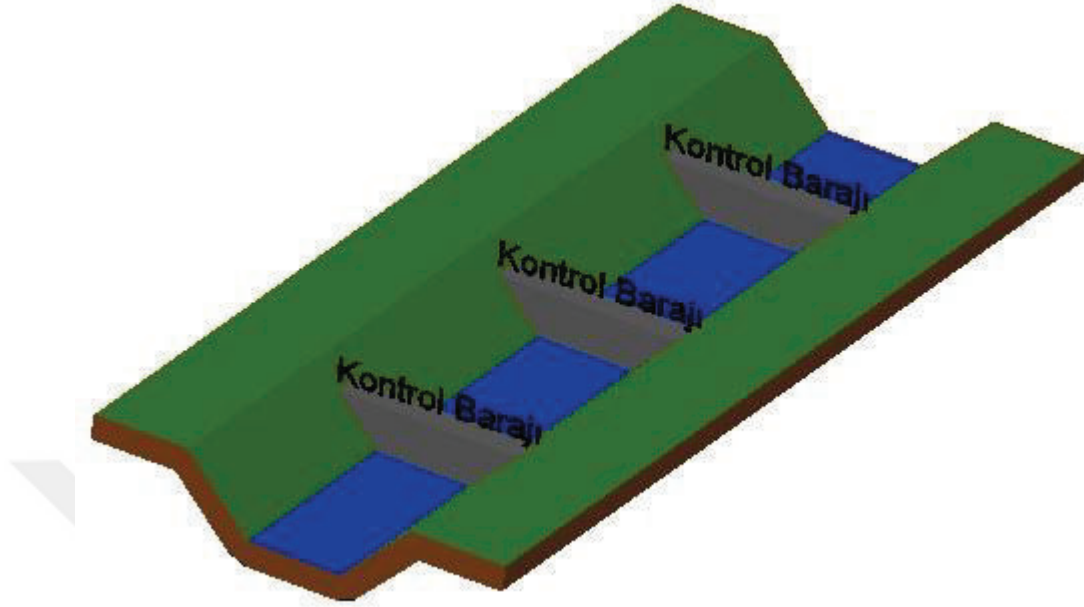
2.2.2. Kontrol Barajları

Kontrol barajları yağmur hendeklerinde kullanılan bir başka yapısal elemandır. Kontrol barajları da riprap ve ince çakıl diyaframda olduğu gibi yağmur suyunun akış hızını yavaşlatır (CASQA, 2003) ve hendek tabanının oyulmasını önler. Bu elemanların bir başka görevi ise hendeğin arıtma kapasitesinin artırılmasına yardımcı olmaktır. Kontrol barajları hendek içinde küçük bölmeler, hücreler oluşturur ve yağmur suyunun akış hızını yavaşlatarak bu hücrelerde birikmesini sağlar. Biriken bu su kontrol barajı gövdesinde bulunan sızma delikliği veya baraj üzerine inşa edilen savak yardımıyla diğer tarafa yavaş yavaş aktarılır. Hücreler arasında biriken yağmur suyu hendek içindeki bitki örtüsü ve hendek tabanında bulunan zemin tabakaları yardımıyla arıtılır. Ayrıca bu barajlar yağmur suyunun hendek içindeki kalış süresini arttırarak daha fazla yağmur suyunun yeraltına sızmasına da yardımcı olmaktadır.

Kontrol barajları yağmur hendeği boyuna eğiminin etkisini azaltmak için kullanılır ve toprak, beton, taş veya ahşap malzemeden inşa edilebilir (BMP Boston, 2013). Topraktan inşa edilmiş kontrol barajları oyulma riskinden dolayı uygulamada çok fazla tavsiye edilmemektedir. Boyuna eğimin %4'ün üzerinde olduğu veya yüzeysel akış hızının 1,5 m/s'yi aştığı bölgelerde eğimin etkisini azaltmak ve akış hızını yavaşlatmak için bu barajlar kesinlikle kullanılmalıdır (CASQA, 2003; WSUD, 2006). Kontrol barajları su tutma kapasiteleri dikkate alınarak 0,1 m (4 inç) ile 0,3 m (12 inç) arasındaki yüksekliklerde inşa edilmelidir (TDEC, 2014). Bu barajların sayısı ve hendek içindeki yerleşimi hendeğin boyuna eğimine, uzunluğuna ve arzu edilen depolama kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Hendek eğimi ve uzunluğunun uygun olduğu yerlerde birden fazla kontrol barajı kullanmak hendeğin arıtma ve sızdırma verimliliğini arttıracaktır (CASQA, 2003). Birden fazla kontrol barajının oluşturduğu kontrol barajı serisine ait genel görünüm Şekil 2.13'te, hendek boyuna eğimi ile kontrol barajları arasındaki mesafe ise Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2: Boyuna eğim ile kontrol barajları arasındaki mesafe (MPCA, 2000).

Yağmur Hendeğinin Boyuna Eğimi (%)	Kontrol Barajları Arasındaki Mesafe (m)
1	60 m (200 ft)
2	30 m (100 ft)
4	15 m (50 ft)
6	10 m (33 ft)
8	8 m (25 ft)
10	6 m (20 ft)

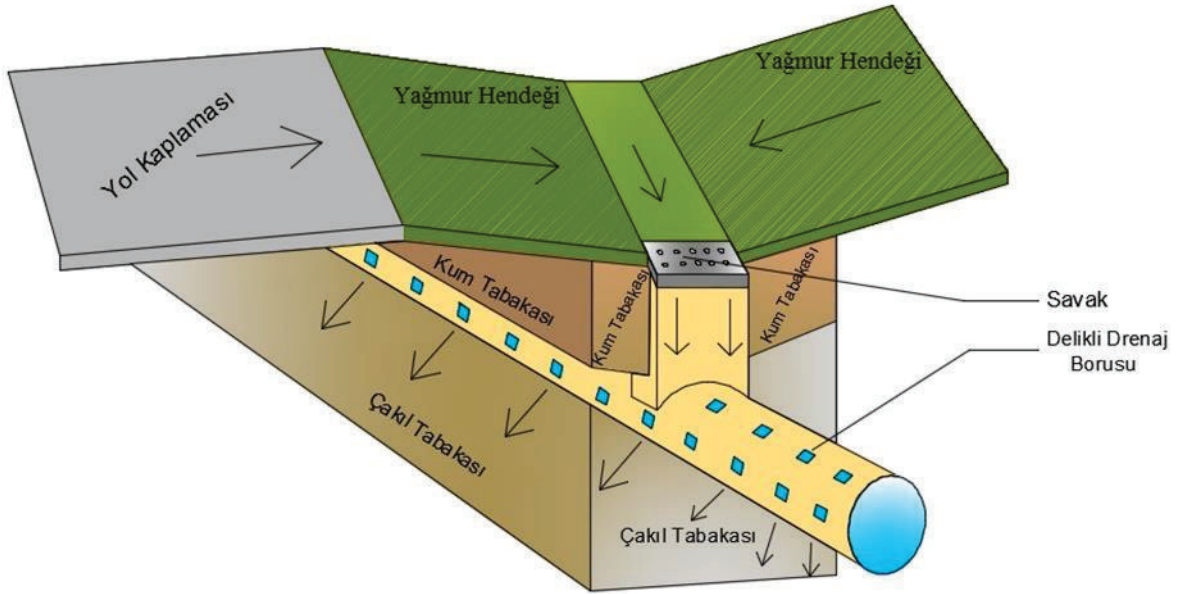


Şekil 2.13: Kontrol barajları serisi.

2.2.3. Savak, Orifis ve Delikli Drenaj Borusu

Yağmur hendeklerinin depolama kapasiteleri aşırı ve şiddetli yağışlar sonucu yetersiz kalabilmektedir. Bu durumda hendek içindeki fazla suyun boşaltılması amacıyla genellikle hendeklerin uç kısımlarına üçgen, dikdörtgen veya trapez enkesitli savaklar inşa edilmektedir. Savaklar hendek içinde biriken su seviyesinin üzerinde ise dolu savak, tamamen suya gömülmüş halde bulunuyorsa orifis adını almaktadır.

Yağmur hendeklerinde bulunan bir başka çıkış yapısı ise delikli drenaj borusudur. Bu boru hendek tabanındaki drenaj tabakasının içinde yer almaktadır. Delikli drenaj borusu hendek tabanında bulunan filtre tabakası (kum tabakası) ve geçiş tabakasından süzülen suyu delikler aracılığıyla toplamak için kullanılmaktadır. Topladığı bu suyu ana yağmur suyu drenaj sistemlerine aktarmaktadır. Delikli drenaj borusunun etrafı çakıl tabakası ile kuşatılmış vaziyettedir. Böylece delikli drenaj borusu su ile birlikte taşınan sedimenti dışarıda bırakarak sadece içine suyu alabilmektedir. Savak, orifis ve delikli drenaj borularına ait kapasite hesapları Bölüm 3.1’de detaylı olarak anlatılmaktadır. Savak ve delikli drenaj borusuna ait plan Şekil 2.14’te verilmektedir.



Şekil 2.14: Savak ve delikli drenaj borusu.

2.3. YAĞMUR HENDEKLERİNİN TASARIM KRİTERLERİ

Yağmur hendeklerinin boyutlandırılmasında kullanılan kriterler; yağmur hendeğinin enkesit tipi, boyuna eğimi, şev eğimi, alt ve üst genişlikleri, uzunluğu, derinliği ve hendek içindeki akımın maksimum hızıdır (ARC, 1992). Yağmur hendeklerinden daha iyi bir performans alabilmek için aşağıda detaylı şekilde açıklanan tasarım kriterlerine dikkat edilmesi gerekmektedir.

Yağmur hendeğinin enkesit tipi; yağmur hendekleri kullanım amaçlarına göre; üçgen, parabolik veya trapez enkesitlerde inşa edilebilmektedir. Üçgen enkesitli yağmur hendekleri daha çok küçük alanlı bölgelerde 2 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışı taşımak için inşa edilir. Trapez ve parabolik enkesitli yağmur hendekleri ise 10 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışı taşımak için inşa edilir ve 2 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışı hendekte oyulma meydana getirmeyecek şekilde güvenle taşımak için kullanılır (BMP Minnesota, 2001a; BMP Minnesota, 2001b). Yağmur hendekleri genellikle 2 ve 10 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışları taşımak için kullanılırsalar da 50 ve 100 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışları da gerektiğinde güvenli şekilde aktarma özelliğine sahip olmalıdır. Enkesit tipini seçerken hendekten geçen su miktarını ve hendeğin arıtma performansını etkilemektedir. Enkesit tipinin seçiminde önemli olan bir diğer

faktör ise arıtılması istenilen su miktarıdır. Trapez ve parabolik enkesitli yağmur hendekleri daha çok bitki örtüsüyle temas eden yüzeye sahip olduklarından arıtma kapasiteleri üçgen enkesitlere göre daha fazladır. Bu yüzden daha çok tercih edilmektedirler (BMP Minnesota, 2001a; BMP Minnesota, 2001b).

Yağmur hendeğinin boyuna eğimi; hendek boyunca oluşan yükseklik farkının, hendek uzunluğuna bölünmesiyle bulunur. Hendeğin boyuna eğimi hendeğin üzerinden geçen suyun hızı üzerinde ve dolayısıyla debi miktarında etkilidir. Ayrıca bu değer hendek tabanının oyulmasını ve arıtma performansını da etkilemektedir. Çok fazla boyuna eğime sahip yağmur hendeklerinde yağmur suyu hendek içinde yeterli süre kalamadığından ve hendeğin tabanının oyulmasına sebep olduğundan uygulanması pratik değildir. Bu yüzden yağmur hendeklerinden daha fazla performans alabilmek için bu hendeklerin boyuna eğiminin çok dik olmaması gerekmektedir. %1-%4 arasındaki boyuna eğime sahip yağmur hendeklerinde performansın daha iyi olduğu yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür. %4'ün üzerindeki eğimlerde yüzeysel akış hızını yavaşlatmak için kontrol barajlarının uygulanması gerekmektedir (WSUD, 2006). %1'den daha az eğime sahip yağmur hendeklerinde ise suyun eğim boyunca taşınması yavaşladığından hendek yüzeyinde göllenmeler meydana gelmektedir. Bu yüzden bu tür eğimleri uygulamak pratik değildir. Eğer bu şekilde bir yağmur hendeği inşa edilecekse hendek tabanının altına sızmayı arttırmak için filtre, geçiş ve altdrenaj tabakaları yerleştirilmelidir.

Yağmur hendeğinin şev eğimi; hendeğin yamaç kısımlarının eğimidir. Yağmur hendeklerinin şev eğimi hendeğin arıtma ve taşıma kapasitesi üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Şev eğiminin çok fazla olması hendeğin taşıma kapasitesini arttırırken arıtma performansını düşürmektedir. Şev eğiminin çok az olması ise hendeğin arıtma performansını arttırmakta fakat taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Bu iki kriterin aynı anda optimum seviyede tutulması için hendeğin şev eğiminin belli değerler arasında olması gerekmektedir. Yağmur hendekleri için en fazla şev eğimi zemin şartları da düşünüldüğünde 1:2 (düşey: yatay) olmalıdır (Claytor ve Schueler, 1996). Yol kenarlarına yapılmış yağmur hendeklerinde şev eğimi 1:9'a kadar düşürülebilirken, trafiğe maruz kalmayan park, bahçe, yerleşim yerleri ve diğer yerlerde 1:10'a kadar azaltılabilmektedir (WSUD, 2006).

Yağmur hendeğinin alt ve üst genişliği; hendeğin alt genişliği arıtma performansı, taşıma kapasitesi ve bakımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yağmur hendeklerinde alt genişlik minimum 0,6 m (2 ft), maksimum 2,45 m (8 ft) olarak seçilmelidir (Claytor ve Schueler, 1996).

Hendek içinde kontrol barajı, tümsek gibi hendeği bölen yapılar varsa alt genişlik 4,87 m (16 ft)'ye kadar arttırılabilir (Claytor ve Schueler, 1996). Yağmur hendeklerinin üst genişliği ise hendeğin taban genişliğine, şev eğimine, içinde bulunan su derinliğine, bölgenin arazi şartlarına ve istimlak durumuna bağlı olarak değişmektedir.

Yağmur hendeğinin uzunluğu; yağmur hendeğindeki yağmur suyunun yeterince arttırılabilmesi için hendek içinde minimum 9 dakika kalması gerekmektedir (ARC, 1992; BMP Boston, 2013). Bu süre dikkate alınarak yağmur hendeğinin uzunluğu hesaplanır. Hendek uzunluğu minimum 30 m (100 ft) olmalı ve bu uzunluktan az hesaplanan yağmur hendekleri minimum 30 m dikkate alınarak boyutlandırılmalıdır (ARC, 1992; CASQA, 2003).

Yağmur hendeğinin altında bulunan zemin yatağı; kuru yağmur hendeklerinde hendek tabanının altında filtre tabakası olarak orta derecede geçirgen; killi kum (SC), siltli kum (SM) ve düşük plastisiteli silt (ML) tabakası bulunmalıdır (Claytor ve Schueler, 1996). Bu tabaka minimum 300 mm ile maksimum 600–1000 mm arasında değişen bir değere sahip olmalıdır (WSUD, 2006). Filtre tabakasının altına kum/iri kum tabakasından oluşan ve filtre tabakasının delikli drenaj borusunda yıkanmasını önleyen geçiş tabakası yerleştirilir. Bu tabaka minimum 100 mm kalınlığa sahip olmalıdır (WSUD, 2006). Geçiş tabakasının altında iri kum veya ince çakıldan oluşan ve delikli drenaj borusuna sahip alt drenaj tabakası vardır. Bu tabaka minimum 200 mm kalınlığa sahip olmalıdır (WSUD, 2006). Delikli drenaj borusunun çapı ise minimum 100 mm olarak seçilmelidir (Woods Ballard ve diğ., 2015). Birden fazla delikli drenaj borusu kullanılması durumunda borular arasındaki mesafe maksimum 1,5 m olmalıdır (WSUD, 2006). Kuru yağmur hendekleri, tabanında oluşturulan bu zemin tabaklarından dolayı yağışı kolayca yeraltına sızdırılabilmektedir. Böylece bu yağmur hendeklerinin iç yüzeyleri her zaman kuru kalmaktadır. Oysa ıslak yağmur hendeklerinin tabanlarının altında nispeten geçirimli, bozulmamış bir zemin tabakası olduğundan sızma daha az olmakta ve bu yağmur hendeklerinin tabanı genellikle ıslak kalmaktadır (Claytor ve Schueler, 1996).

Yağmur hendeğinin derinliği ve kapasitesi; üçgen en kesitli yağmur hendeklerinin toplam derinlikleri 2 yıllık taşkın su seviyesi ve hava payının toplamından oluşurken trapez ve parabolik enkesitli yağmur hendeklerinin toplam derinlikleri 10 yıllık taşkın su seviyesi ve hava payının toplamından oluşmaktadır. Yağmur hendeklerinde hava payı bırakılmasının nedeni; rüzgar ve deprem gibi dış etkilerden dolayı hendek içindeki suyun taşarak güvenlik problemlerine sebep olmasını engellemektir. Yağmur hendeklerinde minimum 150 mm'lik (6

inç) hava payı bırakılmalıdır (BMP Minnesota, 2001a; BMP Minnesota, 2001b; Claytor ve Schueler, 1996). Hendek içindeki suyun arıtılması için ayrılan faydalı su derinliği ise ortalama olarak 0,30 m (12 inç) maksimum 0,45 m (18 inç) olmalıdır (Claytor ve Schueler, 1996).

Hendek içi kaplama; yağmur hendeklerinin iç yüzeyleri buharlaşma miktarını azaltan, suyun akış hızını yavaşlatarak sızma miktarını arttıran ve güneş ışınlarından toprağın aşırı ısınmasını önleyen; kurumuş yapraklar, ağaç dalları, talaş, malç, gübre, taş, kağıt parçaları, pamuklu bez parçaları ve bitki örtüsü gibi malzemeler ile kaplanabilir. Kaplama malzemesinin seçimi yağmur hendeğinin yapım amacına bağlıdır. Yağmur suyunu taşıma amacıyla inşa edilen yağmur hendeklerinde kaplama malzemesi olarak taş kullanılırken arıtma performansının daha yüksek olması istenen yağmur hendeklerinde yoğun bitki örtüsü ana kaplama malzemesi olarak daha çok tercih edilmektedir.

Hidrolik yarıçap; yağmur hendeği enkesitinde su ile dolu olan ıslak alanın (A_w), su ile temas eden ıslak çevreye (P_w) oranı olarak tanımlanmakta olup R_h ile ifade edilmektedir. Yağmur hendeklerinde su ile temas eden ıslak çevrenin artması hendeğin arıtma performansını arttırken hidrolik yarıçap değerini azalmakta dolayısıyla hendeğin taşıyacağı debi miktarını düşürmektedir. Aynı kesit alanına sahip bir kesitin daha fazla debi taşınması için ise hidrolik yarıçapın büyük olması yani ıslak çevrenin minimum olması gerekmektedir. Bu iki durumun optimumunun elde edilmesi yağmur hendeğinin optimum şekilde tasarlanmasına yardımcı olacaktır.

Bitki örtüsü yüksekliği; yağmur hendeklerinin arıtma performansında en etkili olan kriter bitki örtüsüdür. Hendek içinde bulunan bitki örtüsünün su akımlarına karşı dayanıklı olması ve su içinde çürümeyen bitkilerden oluşması istenir (BMP Minnesota, 2001a). Arıtma performansının artması açısından bitki örtüsü yüksekliğinin su derinliğinden fazla olması gerekmektedir (ARC, 1992). Çünkü su derinliğinden daha az yüksekliği sahip olan bitkiler hendek içindeki suyun akım hızından dolayı düzleşir ve yeterince arıtma gerçekleştiremez.

Maksimum hız; yağmur hendeği tabanının ve hendekte biriktirilen sedimentin oyulmasını önlemek için hendek içindeki akım hızının belli bir seviyede tutulması gerekmektedir. Akım hızının azaltılması için; belli aralıklarla kontrol barajları inşa edilebileceği gibi, giriş akımlarının önüne riprap yapısı ve şev kenarlarına ince çakıl diyafram (yol kaplamasından gelen akımlar için) yerleştirilebilir. Yağmur hendeğinin 2 ve 10 yıllık taşkın debisine göre

tasarlanması halinde hendek içindeki akım hızının 0,5 m/s'den, 50 ve 100 yıllık taşkın debisine göre tasarlanması halinde ise akım hızının 2,0 m/s'den küçük olması gerekmektedir (WSUD, 2006). Ayrıca yağmur hendekleri derinlik x hız kontrollerini de sağlamalıdır. Düşük riskli bölgelerde derinlik x hız 0,6 m²/s'den, yüksek riskli bölgelerde ise 0,4 m²/s'den daha az olmalıdır (WSUD, 2006). Tablo 2.3'te tüm tasarım kriterlerinin değerleri özetlenmektedir.

Tablo 2.3: Tasarım kriterleri.

Kriter	Birim	Etki Aralığı
Tercih Edilen Enkesit Tipi	—	Trapez
Katkıda Bulunan Havza Alanı	ha	2 - 4
Boyuna Eğim	—	%1 - %4
Maksimum Şev Eğimi (Düşey: Yatay)	—	1:2
Minimum Şev Eğimi (Düşey: Yatay)	—	1:10
Yol Kenarlarında Minimum Şev Eğimi (Düşey: Yatay)	—	1:9
Hendek Taban Genişliği	m	0,6 – 2,45
Kontrol Barajı Varken Maksimum Taban Genişliği	m	4,87
Hendek Tabanın YAS'tan İtibaren Yüksekliği	m	≥ 0,9
Hendek Uzunluğu	m	≥ 30
Ortalama Faydalı Derinlik	m	0,30
Maksimum Faydalı Derinlik	m	0,45
2 ve 10 Yıllık Taşkın Debisi için Akım Hızı	m/s	0,5
50 ve 100 Yıllık Taşkın Debisi için Akım Hızı	m/s	2,0
Düşük Riskli Bölgeler için Derinlik x Hız	m ² /s	0,6
Yüksek Riskli Bölgeler için Derinlik x Hız	m ² /s	0,4
Kontrol Barajlarının Yüksekliği	m	0,1 – 0,3
Kontrol Barajlarının Uygulanacağı Boyuna Eğim	—	> %4
Forebay Yüksekliği	m	0,6 – 1,8
Forebay Hacminin Arıtılacak Su Hacmine Oranı	—	%25
Hava Payı	mm	≥ 150
Bitki Yüksekliği	mm	100 - 150
Hendek Tabanında Kullanılabilecek Zemin Grupları	—	SC, SM, ML
Filtre (Geçirimli) Tabakası Kalınlığı	mm	300 - 1000
Geçiş Tabakası Kalınlığı	mm	≥ 100
Geçiş Tabakası Ortalama Malzeme Çapı	mm	0,7 – 1,0
Drenaj Tabakası Kalınlığı	mm	≥ 200
Drenaj Tabakası Ortalama Malzeme Çapı	mm	1,0 – 5,0
Delikli Drenaj Borusunun Çapı	mm	≥ 100
Delikli Drenaj Boruları Arasındaki Mesafe	m	≤ 1,5
Minimum Hidrolik Kalış Süresi	dk	≥ 9
Maksimum Tahliye Süresi	sa	≤ 24

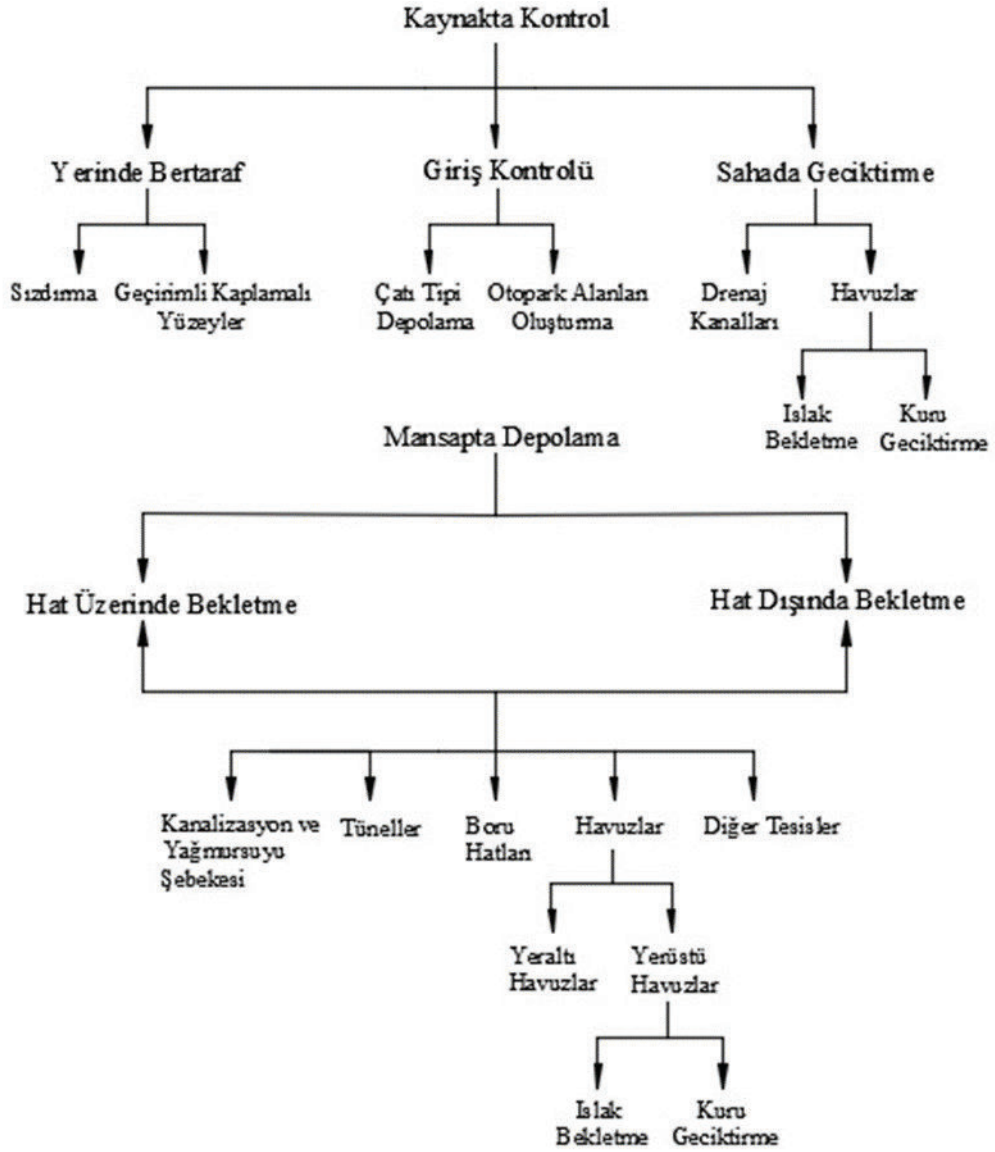
2.4. YAĞMUR SUYU TOPLAMA, DEPOLAMA VE DEŞARJ SİSTEMLERİ HAKKINDA YÖNETMELİK

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 23 Haziran 2017 tarih ve 30105 sayılı ile Resmi Gazete’de yayımlanan “Yağmur suyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Hakkında Yönetmelik” yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmeliğin amacı yönetmelikte Madde 1 ile, kapsamı ise Madde 2 ile verilmektedir (ÇŞB, 2017).

Bu yönetmelik daha çok geleneksel yağmur suyu yönetim sistemlerinin (borulu altyapı sistemleri, beton kanallar gibi) planlama, tasarım, hesap yöntemleri ve projelendirmesine yönelik olarak hazırlanmış olsa da şehirleşme oranı yüksek olan bölgelerde yüzeysel akış miktarını ve hızını azaltmak amacıyla yağmur suyu depolama ve geciktirme yapıları ile az da olsa sürdürülebilir sistemlere (yönetmelikte EK 1 Bölüm 1.4) yer vermektedir. Bu sistemler ile mevcut yağmur suyu sistemlerinin ömrü uzatılabilmektedir. Yönetmeliğe göre yüzeysel akış miktarı ve hızındaki artışın sebepleri;

- Yol, otopark, yerleşim alanı gibi bölgelerde geçirimsizlik oranının düşük olması ile yağmur suyunun yeraltına yeterince sızamaması ve bunun sonucunda toplam yüzeysel akış hacminin artması,
- Kaldırım kenarı-oluk sistemleri, yapay (beton) kanallar ve yağmur suyu toplama sistemlerinin hidrolik verimliliklerindeki farklılıkların akış hızını ve pik debiyi arttırması olarak sayılabilir.

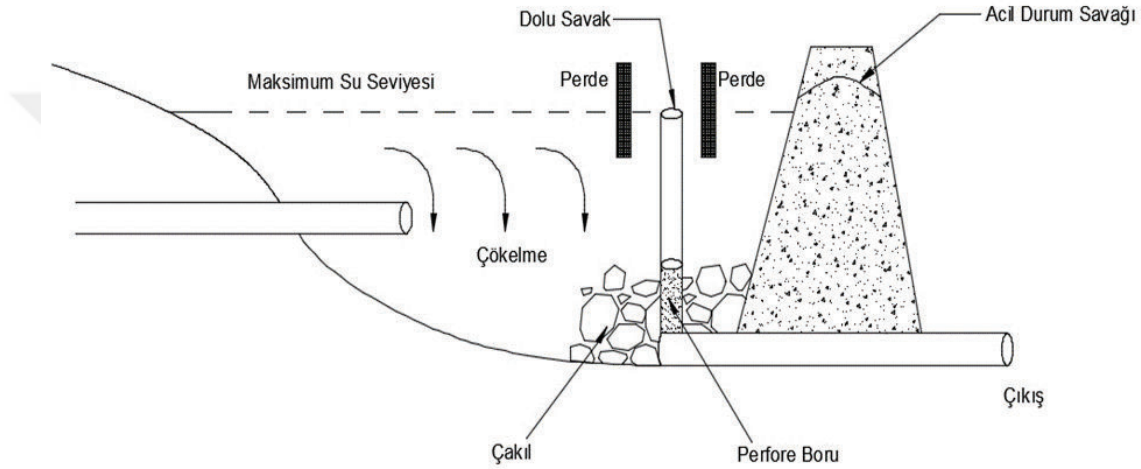
Yönetmelikte geçen depolama sistemleri, kaynakta kontrol ve mansapta depolama olarak ikiye ayrılmaktadır. Kaynakta kontrol sistemleri daha çok depolama hacmi küçük olan yapıları içermektedir. Ayrıca bu sistemler mansap bölgesindeki kanalların ekonomik şekilde boyutlandırılmasına yardımcı olur. Kaynakta kontrol sistemleri; yerinde bertaraf, giriş kontrolü ve sahada geciktirme yapılarından oluşur. Mansapta depolama sistemleri ise hat üzerinde ve hat dışında bekletme yapılarından oluşmaktadır. Kaynakta kontrol ve mansapta depolama sistemleri Şekil 2.15’te daha detaylı şekilde özetlenmektedir.



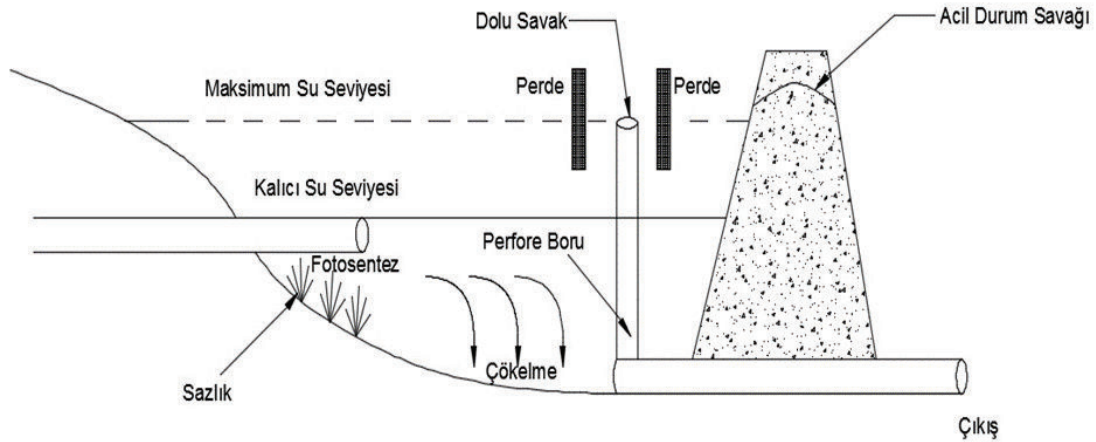
Şekil 2.15: Kaynakta kontrol ve mansapta depolama sistemlerinin sınıflandırılması (ÇŞB, 2017'den uyarlanmıştır).

Yönetmelikteki geciktirme yapıları; kuru geciktirme ve ıslak bekletme havuzlarını kapsamaktadır. Kuru geciktirme havuzları yağış sonrası tamamen boşalırken, ıslak bekletme havuzlarında bir miktar su kalmaktadır. Bu özellikleri ile Şekil 2.15'te görülen ıslak ve kuru havuzlar, yağmur hendeklerinin bulunduğu bölgedeki yüzeysel akışı geciktirme özelliği düşünülerek kuru ve ıslak yağmur hendeği şeklinde de değerlendirilebilir. Kuru geciktirme ve ıslak bekletme havuzlarına su şev kenarından girmekte ve havuz içerisinde bulunan perfore (delikli) boru vasıtasıyla yavaş yavaş boşaltılabilmektedir. Perfore borudaki tıkanmayı önlemek amacıyla boru etrafına iri parçacıklara sahip filtre malzemesi eklenmelidir. Havuzda oluşacak fazla suyun havuz dışına taşmasını engellemek ve suyu belli bir seviyede tutmak için ise havuz

içine dolu savak yerleştirilir. Dolu savak kademeli şekilde tasarlanıp su istenilen seviyede tutulabilmektedir. Dolu savak üzerine ızgara yerleştirilmesi ile savakta geri tepmenin olması ve savak içine haşere girmesi engellenmektedir. Kuru geciktirme havuzları ile ıslak bekletme havuzlarına ait tahliye yapıları amaca uygun olarak değiştirilebilir. Kuru geciktirme ve ıslak bekletme havuzları sırasıyla Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de verilmektedir.



Şekil 2.16: Kuru geciktirme havuzu (ÇŞB, 2017’den uyarlanmıştır).



Şekil 2.17: Islak bekletme havuzu (ÇŞB, 2017’den uyarlanmıştır).

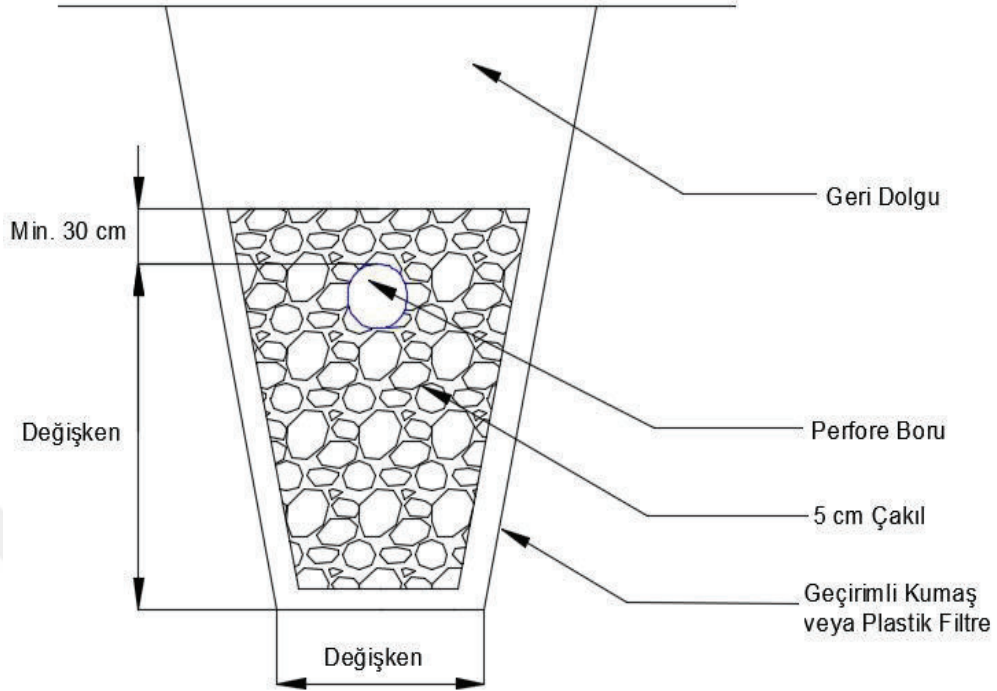
Yönetmelikte yağmur suyunun daha fazla sızdırılması için kullanılan yapılar ise aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- Yağmur hendekleri ve filtre şeritleri,
- Gözenekli kaplamalar,
- Sızdırma hendekleri,
- Sızdırma hazneleri,
- Yeraltı suyu yenileme kuyuları,
- Yeraltında depolama.

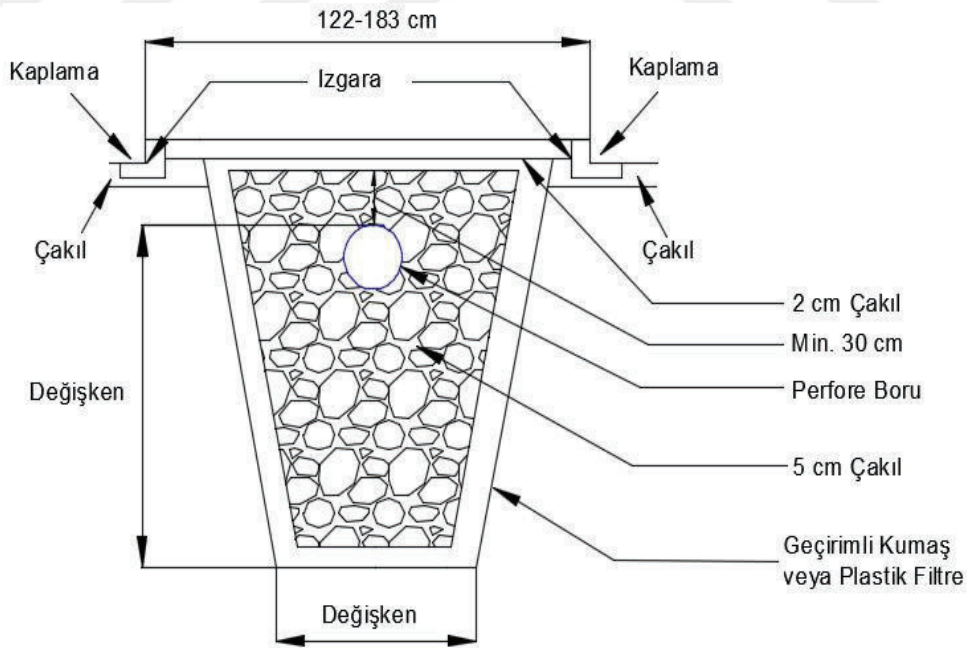
Yönetmelikte yağmur hendekleri genellikle trapez enkesitli, hafif şev eğimine sahip sığ göletler şeklinde tanımlanmaktadır. Filtre şeritleri ise yağmur suyunun hendeğe girmeden önce geçtiği arazi şeridi şeklinde ifade edilmektedir. Yağmur hendeği ve filtre şeritleri uygulamaları ile yağmur suyunun hem yeraltına sızdırılması, hem de askıda katı madde ve diğer kirleticilerin uzaklaştırılması sağlanır. Bu sistemle geçirimsiz alanlarda oluşan yüzeysel akışın hızı azaltılmaktadır. Bu uygulama daha çok cadde, otopark, çatı gibi geçirimsiz yüzeylerden gelen akışı kontrol etmek için kullanılmaktadır. Otoparklarda aynı zamanda yüzeysel akışı kontrol etme amaçlı gözenekli kaplamalar da kullanılabilir. Yağmur hendeklerinin yönetmeliğe göre en büyük avantajı dar alana sahip bölgelere inşa edilebilmesi ve yön değiştirmesinin kolay olmasıdır. Bu sebeple yağmur hendeklerinin diğer sızdırma yapılarına göre çok daha fazla uygulaması yapılabilir. Yağmur suyu kanalları ile birlikte kullanılan ve otoparklarda uygulanan tipik hendekler Şekil 2.18 ve Şekil 2.19’da verilmektedir.

Sızdırma hazneleri ise yönetmelikte yüzeysel akışın yeraltına sızdırıldığı ve bu şekilde geçiş süresinin uzatıldığı geciktirme sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Bu hazneler de yağmur hendeklerinde olduğu gibi çoğunlukla otoparklarda, kavşaklarda ve kentsel alanlarda kullanılmaktadır. Sızdırma hazneleri genellikle geniş alanlı bölgelere inşa edilmekte ve yağmur suyunda bulunan kirletici maddelerin çökmesi sonucu tıkanabilmektedir. Sızdırma haznelerinde biriken su zamanla güvenlik problemine, koku ve haşere üremesine sebep olabilir.

Sızdırma kuyuları ise daha çok drenaj imkânının zor olduğu yerlerde uygulanmaktadır. Bu kuyular sızdırma hendekleri ile birlikte kullanılarak yüzeyde su birikmesini önler ve bu suyu yeraltına sızdırmak için kullanılır.



Şekil 2.18: Yağmur suyu kanallarıyla beraber kullanılan hendek enkesiti (ÇŞB, 2017'den uyarlanmıştır).



Şekil 2.19: Otoparklar için tasarlanan hendek enkesiti (ÇŞB, 2017'den uyarlanmıştır).

Bu tez çalışması kapsamında yağmur hendekleri daha detaylı şekilde incelenmiştir. Bu sebeple; yağmur hendeklerinin türleri, faydaları, kullanım yerleri ve hesap yöntemleri hakkında daha fazla bilgi edinmek için sırasıyla Bölüm 2.1, Bölüm 2.8, Bölüm 2.9 ve Bölüm 3.1'e bakılabilir.

2.5. YAĞMUR HENDEKLERİNİN PERFORMANSI

Yağmur hendeklerinin performansı; hendeğin yağmur suyunda bulunan kirletici maddeleri uzaklaştırma verimliliğine, yeraltı suyunu besleme miktarına ve taşkın kontrolüne bağlı olarak değişmektedir. Sürdürülebilirlik açısından yağmur hendeklerinden maksimum seviyede performans beklenmektedir. Genel olarak; yağmur hendeğinin şekli, hendeğin boyuna eğimi ve şev eğimi, bitki örtüsünün yoğunluğu ve yüksekliği, hendeğin uzunluğu, hendek altında bulunan zeminin geçirimsizlik durumu, hendek içinde depolanan su derinliği, kontrol barajlarının sayısı ve yüksekliği, hendek içindeki suyun kalış süresi ve hendeğin maruz kaldığı taşkınların özellikleri yağmur hendeğinin performansını etkilemektedir (ARC, 1992; CASQA, 2003).

Genellikle düşük boyuna eğime sahip, trapez veya parabolik enkesitli, kontrol barajlarının sayıca fazla olduğu, yoğun ve yüksek bitki örtüsüne sahip, altında geçirgen bir zemin tabakası bulunan, akım hızları düşük, hendek uzunluğu fazla ve taşkın olaylarının az yaşandığı bölgelere inşa edilen yağmur hendekleri yüksek performanslıdır (ARC, 1992).

Dik boyuna eğime sahip, üçgen enkesitli, kontrol barajlarının hiç olmadığı ya da sayıca az olduğu, su derinliğinden daha düşük boylu ve seyrek bitki örtüsünün bulunduğu, altında sıkıştırılmış veya donmuş zemin tabakası bulunan, yüksek hızlı akımlara sahip ve çok sık taşkın olaylarının yaşandığı bölgelere inşa edilen yağmur hendekleri ise düşük performanslıdır (ARC, 1992).

2.5.1. Kirletici Maddeleri Uzaklaştırma

Yağmur hendekleri yağmur suyunda bulunan askıda katı madde, ağır metal ve hidrokarbon gibi kirleticileri yüzeyinde bulunan bitki örtüsü ve zemine sızma yoluyla yağmur suyundan uzaklaştırılmaktadır (Claytor ve Schueler, 1996). Yağmur hendeklerinin yağmur suyunda bulunan kirleticileri uzaklaştırma verimliliği; yağmur hendeğinin eğimine, bitki örtüsünün yoğunluğuna ve yüksekliğine ve altındaki zeminin geçirimsizlik durumuna bağlı olarak değişmektedir (ARC, 1992).

Hendek eğiminin çok yüksek olduğu bölgelerde yağmur suyu hendek içinde yeterli süre kalamadığından hendeğin kirletici maddeleri uzaklaştırma performansı azalır (ARC, 1992). Topografya eğiminin fazla olduğu bölgelerde bu sorunu çözmek, yağmur hendeğinin boyuna

eğiminin hendeğe olan etkisini azaltmak için kontrol barajları inşa edilmelidir (WSUD, 2006). Bu barajlar hendek içinde engeller oluşturarak yağmur suyunun hızını azaltırlar böylece hendeğin arıtma ve sızdırma performansının artmasına katkıda bulunurlar.

Hendeğin altında bulunan zemin tabakasının geçirimsizlik düzeyi hendeğin kirletici maddeleri uzaklaştırma performansı üzerinde etkili olan bir başka faktördür. Geçirimsizlik düzeyi yüksek olan zeminlerde yağmur suyu zemin içinde süzülürken kirletici maddelerden ayrışmaktadır bu durum hendeğin performansını arttırmaktadır. Tam tersi donmuş veya sıkıştırılmış yani geçirimsizlik oranı düşük olan zeminlerde sızma kapasitesinin düşük olmasından dolayı performans azalmaktadır (ARC, 1992).

Ayrıca hendeğin uzunluğu ve hendek içindeki su derinliği de kirletici maddeleri uzaklaştırma verimliliğinde önemli olan diğer faktörlerdendir. Hendek uzunluğunun artması yağmur suyunun hendek içinde daha fazla dolaşması anlamına geldiğinden bitki örtüsüyle teması arttırmaktadır. Dolayısıyla kirletici maddeleri uzaklaştırma verimliliğinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu etkileri gösterebilmek için literatürdeki farklı çalışmalardan derlenen hendek türüne göre kirletici maddelerin uzaklaştırılma oranları Tablo 2.4'te verilmektedir.

Tablo 2.4: Yağmur hendeği türüne göre kirleticilerin uzaklaştırılma oranları (%).

Çalışma	TSS ¹	TP ²	TN ³	NO ₃ ⁴	Metaller	Yağmur Hendeğinin Türü
CALTRANS, 2004	76	-	67	65	82-89	Kuru yağmur hendeği
Wang ve diğ., 1981	80	-	-	-	70-80	Kuru yağmur hendeği
Dorman ve diğ., 1989	98	18	-	45	37-81	Kuru yağmur hendeği
Harper, 1988	87	83	84	80	88-90	Kuru yağmur hendeği
Kercher ve diğ., 1983	99	99	99	99	99	Kuru yağmur hendeği
Harper, 1988	81	17	40	52	37-69	Islak yağmur hendeği
Koon, 1995	67	39	-	9	(-35)-6	Islak yağmur hendeği

2.5.2. Taşkın Kontrolü

Yağmur hendekleri, yağmur suyunun hendek içindeki hızını yavaşlatarak yeraltına sızan su miktarını arttırmaktadır, böylece yüzeysel akış hacminin azalmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca hendek yüzeyinde bulunan bitki örtüsü, kontrol barajları, riprap ve ince çakıl diyafram

¹TSS: Toplam askıda katı madde.

²TP: Toplam fosfor.

³TN: Toplam azot.

⁴NO₃: Nitrat.

ile yüzeysel akış hızı daha da yavaşlatılmaktadır (BMP Minnesota, 2001a; BMP Minnesota, 2001b). Yüzeysel akış miktarının ve hızının azalması özellikle kentsel bölgelerde sel ve taşkın olaylarının sıklığının ve şiddetinin azalmasına katkı sağlar. Bu da yağmur hendeklerinin bulunduğu bölgenin taşkın kontrolünün sağlanmasında önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir.









2.5.3. Bitki Örtüsü ve Bitkilendirme

Yağmur hendeği içinde bulunan bitki örtüsünün yoğunluğu ve yüksekliği hendeğin kirletici maddeleri uzaklaştırma performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çünkü bitki örtüsü yaprakları ve kökleri ile kirletici maddelerin tutulmasını sağlar. Böylece bu maddelerin yağmur suyundan uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Yağmur hendeğinin kirletici maddeleri uzaklaştırma performansını arttırmak için seçilen bitki örtüsü o bölgeye ait topraklarda yetişebilmeli ve yeterli yoğunluğa sahip olmalıdır. Ayrıca bitki örtüsünün kirletici maddeleri tam anlamıyla uzaklaştırabilmesi için yüksekliği hendek içindeki su derinliğinden fazla olmalıdır. Bu sayede yüzeysel akışta bulunan kirletici maddeleri daha verimli şekilde uzaklaştırabilecektir.




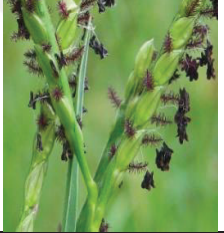
Yağmur hendeğinin iç yüzeyi için seçilen bitki türlerinin aşırı yağış veya aşırı kuraklığa dayanıklı, su baskınlarına karşı koyabilecek, uzun süre su içinde kalmaya elverişli, kökleri kuvvetli ve iklim şartlarına adaptasyon aralığının geniş olması gerekmektedir (Müftüoğlu ve Perçin, 2015). Hendeğin şev bölgeleri için seçilen bitki türleri ise yarı kurak iklim koşullarına uyumlu olmalıdır. Yağmur hendeklerinde tampon bölge olarak da bilinen ve daha çok yanal akımların hendeğe girmeden önce ön arıtımının yapıldığı bölge olan filtre (süzme) şeridindeki bitki türlerinin ise kurak şartlara uyumlu olması gerekmektedir (Müftüoğlu ve Perçin, 2015). Ayrıca özellikle yol kenarlarına inşa edilen yağmur hendekleri için seçilen bitki türlerinin kış aylarında yollara yapılacak tuzlama faaliyetlerinden dolayı tuza dayanıklı olması tercih edilmektedir.

Yağmur hendeğinin bakımının iyi yapılmamış olması durumunda hendeğin bazı bölümlerinde bitki örtüsü yok olmuş veya seyrekleşmiş olabilmektedir. Bu bölümler hendeğin arıtma performansını azaltmaktadır. Çoraklaşmış bu bölümlerin yeniden bitkilendirilerek yağmur hendeğinin bakımı yapılmalı ve böylece hendeğin arıtma performansı artırılmalıdır. Yağmur hendeğine ekilecek/dikilecek bazı bitkilerin listesi Tablo 2.5'te verilmektedir.

Tablo 2.5: Yağmur hendekleri için bazı bitki türleri (GCCC, 2007).

Botanik İsmi	Yaygın İsmi	Yükseklik (mm)	Şekil
Carex Appressa	Uzun Sazlık	1000	
Carex Fascicularis	Püsküllü Sazlık	1000	
Carex Polyantha	Dere Sazlığı	900	
Cymbopogon Refractus	Limonotu	300	
Cynodon Dactylon	Köpek Dişi Ayrığı	50 - 150	
Dieanolla Brevipendunculata	Zambakgiller	500	
Dietes Bicolor	Süsengiller	1000	
Imperata Cylindrica	Kındıra	500	

Tablo 2.5 (Devam): Yağmur hendekleri için bazı bitki türleri (GCCC, 2007).

Botanik İsmi	Yaygın İsmi	Yükseklik (mm)	Şekil
Juncus Kraussii	Deniz Sazlığı	600 - 2300	
Juncus Usitatus	Sazlık	500	
Lepidosperma Laterale	Kılıç Sazlığı	500 - 1000	
Paspalum Distinchum	Su Ayırıkotu	500	

2.5.4. İşletme ve Bakım

Yağmur hendeklerinin ömrünü uzatmak ve performanslarını arttırmak için bakımlarının periyodik olarak yapılması gerekmektedir. Doğru bir şekilde tasarlanan ve düzenli bakımı yapılan yağmur hendekleri çok uzun süre kullanılabilir. Bir yağmur hendeğinin bakımı; bitki örtüsünün biçilmesini, hendek içindeki çöp ve döküntü malzemelerinin temizlenmesini, gerekli olduğunda hendekteki bitkilerin sulanmasını, hendek şeklinin ve eğiminin belli aralıklarla kontrol edilmesini, tohum ekilmesini ve hendek yüzeyinin bitkilendirilmesini kapsamaktadır (CASQA, 2003). Yağmur hendeği bakımının rahat bir şekilde yapılabilmesi için hendek eğimi çok dik olmamalıdır. Dik eğimli yağmur hendeklerinde biçme faaliyeti için yeterli alan bulunmadığından bu tür yağmur hendeklerini uygulamak pratik değildir. Bu sebeple trapez enkesitli yağmur hendekleri bakım faaliyetleri açısından üçgen enkesitlere nazaran daha çok tavsiye edilebilir. Tablo 2.6'da yağmur hendeklerinin bakım faaliyetleri ve bu faaliyetlerin uygulanma sıklığı verilmektedir.

Tablo 2.6: Tipik bir yağmur hendeğinin bakım faaliyetleri ve sıklığı (Woods Ballard ve diğ., 2015).

Yağmur Hendeği İşletme ve Bakım Planı		
Bakım Planı	Yapılması Gereken Faaliyet	Bakım Sıklığı
Düzenli Bakım	Çöp ve döküntü malzemelerini temizleme	Aylık veya ihtiyaç duyuldukça
	Çim yüksekliğini belirtilen tasarım aralığında tutmak için çim biçme	Aylık veya ihtiyaç duyuldukça
	Kurak mevsimlerde yağmur hendeğini sulama	İhtiyaç duyuldukça
	Bitki örtüsünü koruma ve zararlı bitkileri, yabancı otları uzaklaştırma	Başlangıçta aylık daha sonra ihtiyaç duyuldukça
	Tıkanma olayı için giriş, çıkış ve dolu savakları kontrol etme ve gerekirse temizleme	Aylık
	Yağmur hendeğinin eğimlerini, toprak nemini, bitki sağlığını, toprak stabilitesini, toprak sıkışmasını, toprak erozyonunu, göllenmeyi ve sedimentasyonu kontrol etme	Yılda en az iki kez
	Akım hızından dolayı aşınmış bölgeleri yeniden bitkilendirme	İhtiyaç duyuldukça
	Göllenme, sıkışma, silt birikimi ve suyun 48 saatten fazla hendek içinde kaldığı bölgelerde sızma yüzeylerini kontrol etme	Aylık veya ihtiyaç duyuldukça
	Kuru yağmur hendeğinin zemin yatağındaki erozyon problemlerini iyileştirme	Yıllık
	Bitki örtüsünü kontrol etme	İlk altı ay için aylık, iki yıl için üç ayda bir, daha sonra altı ayda bir
Ara Sıra Bakım	Silt birikimi için su giriş noktalarını ve ortam yüzeyini kontrol etme ve uygun silt uzaklaştırma sıklığını belirleme	Altı ayda bir
	Bitki örtüsü büyümesinin zayıf olduğu yerleri tekrar tohumlama veya gerekirse koşullara daha uygun olacak şekilde bitki tiplerini değiştirme	İhtiyaç duyuldukça veya yağmur hendeği arıtma alanının %10'nun üzerinde çorak araziye maruz kaldığı zaman
İyileştirici Faaliyetler	Yeniden tohumlama veya yeniden çim ekimi ile erozyon ya da diğer hasarlı alanları onarma	İhtiyaç duyuldukça
	Pürüzlü yüzeyleri tekrar düzleştirme ve tasarım seviyelerini eski duruma getirme	İhtiyaç duyuldukça
	Sızma performansını artırma, silt birikimini azaltma ve zemin yüzeyinin sıkışmasını önlemek için üst toprak katmanını kazma ve sürme	İhtiyaç duyuldukça
	Yağmur hendeğinde biriken sedimenti temizleme	İhtiyaç duyuldukça
	Standart uygulamaları kullanarak yağları veya benzin kalıntılarını uzaklaştırma	İhtiyaç duyuldukça

2.6. YAĞMUR HENDEKLERİNİN TASARIM ADIMLARI

Yağmur hendeklerinin doğru bir şekilde planlanıp uygulanabilmesi için aşağıdaki tasarım adımlarına dikkat edilmelidir (WSUD, 2006). Tasarım adımlarının doğru şekilde uygulanması ile yağmur hendeklerinden alınacak verim arttırılabilir.

- 1) Bölgenin topografik özelliklerini de göz önüne alarak yağmur hendeğinin şekli, üst ve alt genişliği, uzunluğu, akım derinliği, eğimi, Manning katsayısı gibi tasarım kriterleri literatürdeki sınır değerler gözetilerek belirlenmeli,
- 2) Yağmur hendeğine ait giriş sistemleri tasarlanmalı,
- 3) Hem literatüre hem de 30105 sayılı yönetmeliğe göre pik debi belirlenmeli,
- 4) Hendekten geçecek tasarım hızı belirlenerek hendeğin kapasitesi hesaplanmalı,
- 5) Hendeğin boyuna eğimi %4'ün üzerinde ise kontrol barajları yapılmalı,
- 6) Boyuna eğimin %1 ile %2'nin altında olduğu veya isteğe bağlı durumlarda aşağıdaki biotutma bileşenleri tasarlanmalı,
 - a) Filtre tabakasının doymuş hidrolik iletkenliği belirlenmeli,
 - b) Filtre, geçiş ve drenaj tabakalarındaki zeminlerin özellikleri belirlenmeli,
 - c) Alt drenaj sistemi tasarlanmalı ve bu sistemin kapasitesi kontrol edilmeli,
- 7) Yapılan hesaplarda aşağıdaki kontrollere dikkat edilmeli,
 - a) Oyulma kontrolleri
 - Küçük taşkın olayları için hız $< 0,5$ m/s
 - Büyük taşkın olayları için hız $< 2,0$ m/s
 - b) Güvenlik kontrolleri
 - Düşük riskli bölgeler için; Derinlik x Hız $< 0,6$ m²/s
 - Yüksek riskli bölgeler için; Derinlik x Hız $< 0,4$ m²/s
- 8) Yağmur hendeklerindeki fazla suyun güvenli bir şekilde uzaklaştırılması için savak ve orifis gibi çıkış yapıları tasarlanmalı ve boyutlandırılmalı,
- 9) Hendek boyutlarının arıtma ve taşıma kapasitesi açısından yeterli olup olmadığı kontrol edilmeli,
- 10) Yol kenarlarındaki hendeklerin trafikten etkilenmemesi için gerekli önlemler alınmalı,
- 11) Yağmur hendeğine ekilecek bitki türleri belirlenerek bu bitkilerin biçme ve diğer bakım faaliyetlerinin sıklığı planlanmalı,
- 12) Belli periyotlarla yağmur hendeklerinin bakımı yapılmalı.

2.7. YAĞMUR HENDEKLERİNİN MALİYETİ

2.7.1. İnşaat Maliyeti

Yağmur hendeklerinin inşaat maliyeti hendeği temizleme, kök sökme, kazma, toprağı düzleştirme, tohum ekme, malçlama ve hendeği çimle kaplama maliyetlerinin toplamından oluşmaktadır. Bu toplam maliyet ortalama olarak yağmur hendeğinin metre karesi başına 19,20 TL (ft² başına 0,50 \$) olarak kabul edilmektedir. Detaylı maliyetler Tablo 2.7’de verilmektedir (SEWRPC, 1991). Daha güncel bir çalışmaya göre ise yağmur hendeklerinin inşaat maliyeti hendeğin metre karesi başına 35,7 TL (m² başına 10 \$) olarak belirlenmiştir (WSUD, 2004). Bu tez çalışmasında verilen bütün maliyet hesap tablolarında dolar kuru için 15.05.2017’de Merkez Bankası tarafından verilen kur (3,57 TL) baz alınmıştır.

Tablo 2.7: Yağmur hendeklerinin inşaat maliyeti (SEWRPC, 1991).

Unsur	Birim	Boyut	Birim Maliyet (TL)			Toplam Maliyet (TL)		
			Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Organizasyon/Planlama	Yağmur Hendeği ⁵	1	381,99	978,18	1.574,37	381,99	978,18	1.574,37
Bölgeyi Hazırlama								
Temizleme ⁶	Dönüm	0,5	7.854,00	13.566,00	19.278,00	3.927,00	6.783,00	9.639,00
Kök Sökme ⁷	Dönüm	0,25	13.566,00	18.564,00	23.562,00	3.391,50	4.641,00	5.890,50
Genel								
Kazma (Hafriyat) ⁸	m ³	284	9,81	17,29	24,77	2.786,04	4.910,08	7.033,26
Toprağı Düzleştirme ⁹	m ²	1011	0,85	1,49	2,14	863,46	1.511,04	2.158,49
Bölgeyi İyileştirme								
Tohum Ekme / Malç ¹⁰	m ²	1011	1,71	4,27	6,83	1.726,79	4.317,27	6.907,66
Çimle Kaplama ¹¹	m ²	1011	5,12	10,25	15,37	5.180,77	10.361,54	15.542,10
Ara Toplam						18.258	33.502,11	48.745,38
Hata Payı	Yağmur Hendeği ⁵	1	%25	%25	%25	4.564	8.376	12.186
Yaklaşık Toplam						22.900	41.900	61.000

Yağmur hendeklerinin inşaat maliyetleri diğer yağmur suyu yönetim uygulamalarına göre daha düşük olmasına rağmen tasarım maliyetleri daha yüksektir. Bunun en önemli sebebi tasarımı

⁵Yağmur Hendeği: 0,3 m taban genişliği, 3,0 m üst genişlik, 1:3 şev eğimi ve 305 m uzunluk.

⁶Temizlenen Alan: (Üst genişlik + 3,0) x yağmur hendeği uzunluğu.

⁷Kök Sökülen Alan: Üst genişlik x yağmur hendeği uzunluğu.

⁸Kazılan Hacim: (0,67 x Üst genişlik x yağmur hendeği derinliği) x yağmur hendeği uzunluğu (Parabolik Kesit).

⁹Düzleştirilen Alan: [(Üst genişlik + 8 x (hendeğin derinliği)² / 3 x (üst genişlik)] x yağmur hendeği uzunluğu (Parabolik Kesit).

¹⁰Tohum Ekilen Alan: Temizlenen alan x 0,5.

¹¹Çimle Kaplanan Alan: Temizlenen alan x 0,5.

kolay olmasına rağmen yeterli yetişmiş elemanın bulunmamasıdır. Bu tez çalışmasının bu konuda yetiştirilecek kişilere ışık tutacağı düşünülmektedir.

2.7.2. Bakım Maliyeti

Yağmur hendeklerinin bakımı genellikle çim biçme ve bakımı, hendek içinde biriken pislik ve çöplerin uzaklaştırılması, tohum ekme ve gübreleme, sulama ve bitkilendirme, yağmur hendeği eğiminin kontrolü gibi işlemlerden oluşmaktadır. Örnek bir yağmur hendeğinin yaklaşık bakım maliyeti Tablo 2.8’de verilmektedir (SEWRPC, 1991; WSUD, 2004; WSUD, 2010).

Tablo 2.8: Yağmur hendeklerinin bakım maliyeti (WSUD, 2004; WSUD, 2010).

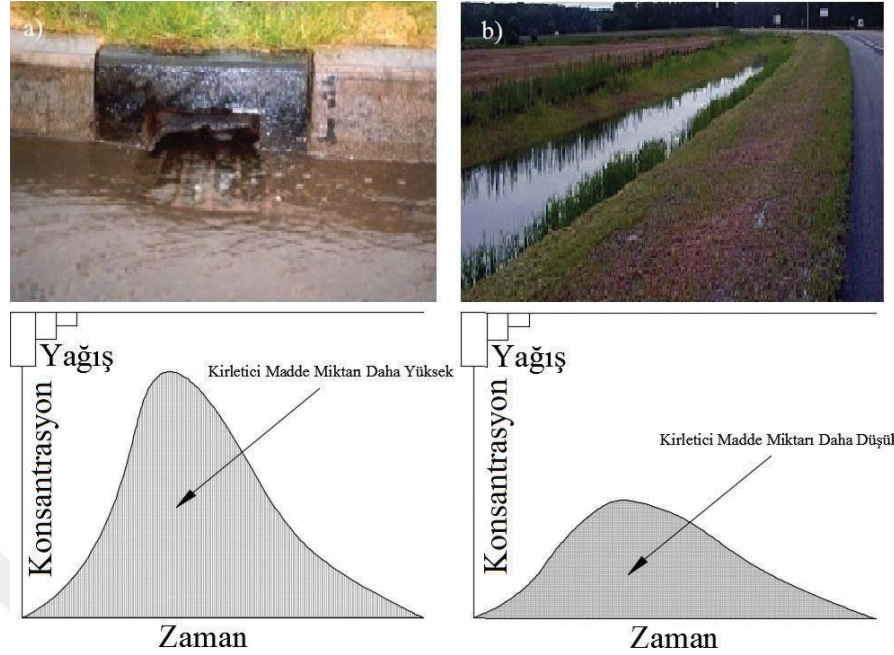
Unsur	Maliyet (TL)	Yağmur Hendeği Boyutu		Yorumlar
		A ¹² (TL)	B ¹³ (TL)	
Bıçme	5,78 / 100 m ²	944,62	1.571,15	(Üst genişlik + 3) x uzunluk x sıklık
Genel çim bakımı	57,84 / 100 m ²	1.060,30	1.783,21	(Üst genişlik + 3) x uzunluk
Çöp/döküntü uzaklaştırma	3,4 / m	607,25	607,25	Hendek uzunluğunun yaklaşık %60’ı
Tohum ekme/gübreleme	2,32 / m ²	38,55	67,47	Yıllık çim bakım alanının yaklaşık %1’i
Kontrol ve genel yönetim	4,82 / m	1.502,97	1.502,97	Yıllık
Toplam	-	4.153,67	5.532,05	-

2.8. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN YAĞMUR HENDEKLERİ

Günümüzde tarım alanlarının yerleşime açılması, altyapı sorunları, işsizlik ve eğitim gibi sebeplerle kırsal bölgelerden kentsel bölgelere göçler yaşanmaktadır. Bunun sonucunda plansız şehirleşmeler ortaya çıkmakta bu da geçirimsiz alanların, sanayileşmenin ve trafik yükünün artmasına neden olmaktadır. Bütün bu değişimin sonucu; su daha fazla kirlenmekte, akışa geçen su miktarı artmakta ve kullanılabilir temiz su miktarı azalmaktadır. Yağmur hendekleri üzerindeki bitki örtüsü ve altındaki geçirimli zemin katmanı ile yağmur suyunda bulunan kirlenici maddeleri uzaklaştırarak yağmur suyunun arıtılmasını sağlayan ekonomik ve uygulaması kolay olan bir yöntemdir (ARC, 1992; BMP Minnesota, 2001b; CASQA, 2003; WSUD, 2006; WSUD, 2010). Bu yöntemle yeraltı su kaynaklarımız beslenir ve yeraltı su kaynaklarımızın kirlenmesinin önüne geçilebilir. Bu başarısına örnek olarak hem debi hem de sudaki kirlenici madde konsantrasyonu yönünden yağmur hendeklerinin geleneksel yağmur suyu drenaj sistemleri ile karşılaştırılması Şekil 2.20’de verilmektedir.

¹²A: 0,5 m derinlik, 0,3 m alt genişlik, 3 m üst genişlik ve yaklaşık 305 m uzunluk.

¹³B: 1 m derinlik, 1 m alt genişlik, 7 m üst genişlik ve yaklaşık 305 m uzunluk.



Şekil 2.20: Su kalitesinin karşılaştırılması a) geleneksel sistemler b) yağmur hendeği (SNIFFER, 2004'ten uyarlanmıştır).

Ülkemizde yıllık yağış miktarı 501 milyar m³ iken yıllık yeraltına sızma miktarı 41 milyar m³'tür (%8,2). Bu yağışın yıllık 274 milyar m³ buharlaşmakta, 186 milyar m³ ise yüzeysel akışa dönüşmektedir (DSİ, 2014). Yıllık yağış miktarı ile yeraltı suyuna sızma miktarı incelendiğinde yağışın çok az bir kısmının yeraltına sızdığı, şehirleşmenin de etkisi ile yağışın büyük bir kısmının buharlaştığı ya da yüzeysel akışa geçtiği için yeraltına sızmadığı görülmektedir. Yüzeysel tipine göre yağışın hidrolojik elemanlar üzerindeki dağılımı Şekil 2.21'de verilmiştir. Şekil 2.21'den de anlaşılacağı gibi kırsal, ormanlık, çayır, kum/çakıl yüzeylerinin bulunduğu alanlar kentsel alanlara göre daha fazla sızma kapasitesine sahiptir. Yoğun kentsel alanlarda ise sızma kapasitesi sifıra yakındır. Yağmur hendekleri kentlerdeki bu soruna çözüm olabilecek ve sızma kapasitesini arttırabilecek bir drenaj sistemidir.

Yağmur hendekleri; üzerindeki kaplama malzemeleri yardımıyla (malç, talaş, kurumuş yapraklar vb.) hendek içindeki suyun buharlaşmasını önler ve yağışın hendek içinde depolanmasını sağlayarak yeraltına sızmasını kolaylaştırır (BMP Minnesota, 2001a; BMP Minnesota, 2001b). Böylece yağın yağış daha fazla yeraltına sızabilir. Yeraltı su seviyesinin artırılması ile tarımda sulama suyuna duyulan ihtiyaç azalır ve kurak dönemlerde bile ürün alınabilir. Bu özelliğiyle yağmur hendekleri sürdürülebilir bir tarım uygulaması olarak kullanılmaktadır.

Yüzey Tipi	Kırsal Alan	Ormanlık Alan	Kum, Çakıl Zemin	Çayır, Çimen Alan	Kentsel Alan	Islak Yağmur Hendeği	Kuru Yağmur Hendeği	Sembol
Şekil								
Yağışın Dağılımı								

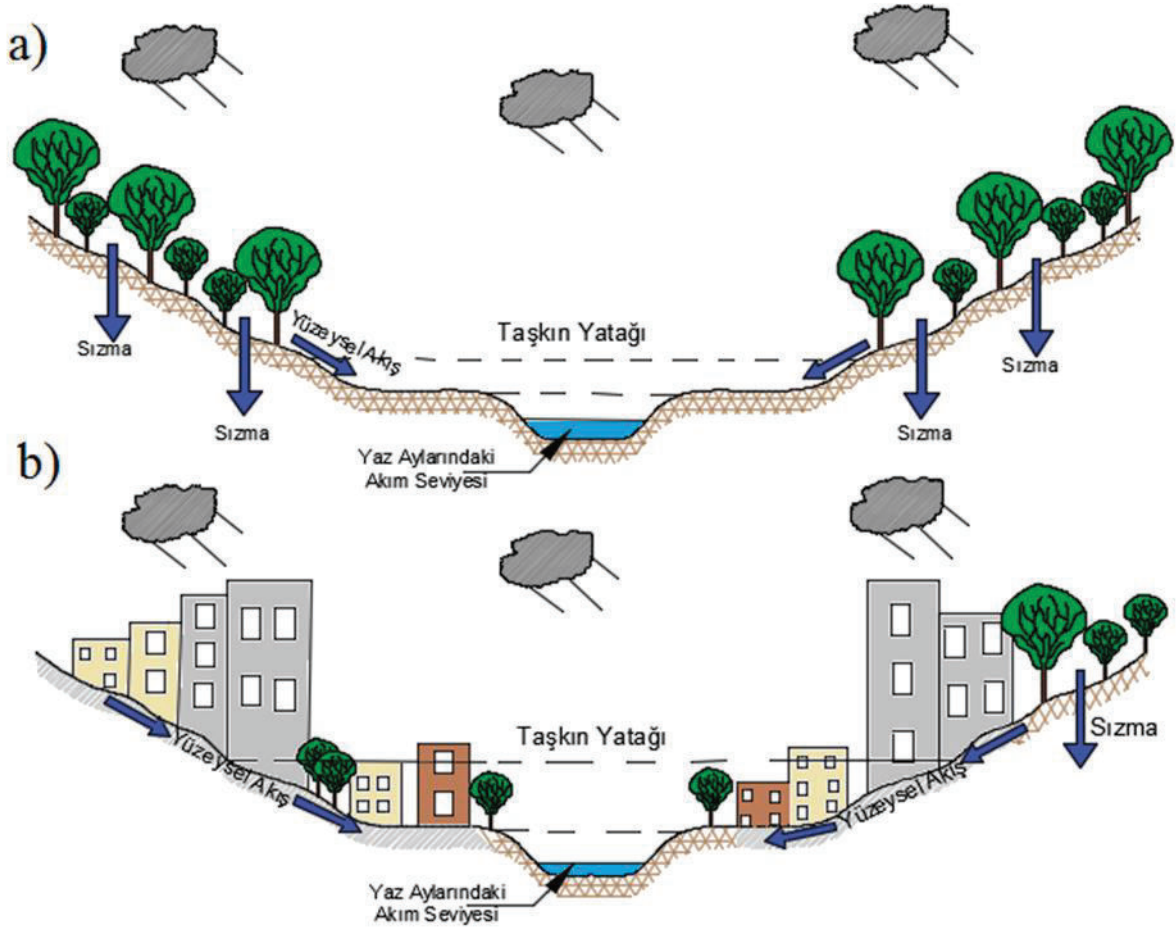
Şekil 2.21: Yağışın yüzey tipine bağlı olarak hidrolojik elemanlar üzerine etkisi (Ripl, 1995'ten uyarlanmıştır).

Günümüzde şehirleşmenin artmasıyla yüzeysel akış miktarı artmaktadır. Bu ise yağmur suyunu taşıyan boruların çaplarının arttırılmasını gerektirmektedir. Bu durum yağmur suyu drenaj sistemlerinin işçilik, inşaat, bakım ve işletme maliyetlerini arttırmaktadır (Demir, 2012). Yağmur hendekleri yüzeysel akış miktarını azaltarak bu maliyetlerin önemli ölçüde azalmasına katkı sağlamaktadır.

Şehirleşmenin etkisiyle yağmur suyundan oluşan yüzeysel akışın su kalitesi azalmaktadır. Bunun sonucunda daha fazla miktarda yağmur suyu arıtma tesislerine gitmekte dolayısıyla daha fazla arıtma maliyeti ortaya çıkmaktadır. Yağmur hendekleri yağmur suyunu arıtarak daha az yağmur suyunun arıtma tesislerine gitmesini sağlar. Böylece arıtma maliyetinin azalmasına yardımcı olur (Demir, 2012).

Şehirleşme oranının artması, buna karşılık ormanlık ve yeşil alanların azalması soluduğumuz havanın daha fazla kirlenmesine neden olmaktadır. Yağmur hendekleri kentsel bölgelerde yeşil alanlar oluşturarak daha çok bu bölgelerin atmosferinde bulunan NO₂, CO, SO₂, O₃ ve partikül madde (PM_{2,5} ve PM₁₀) gibi kirletici maddelerin emisyonunu sağlar (TMMOB, 2014). Böylece daha kaliteli temiz bir havaya sahip olmamıza yardımcı olur.

Yağış; şehirleşme sonrası artan geçirimsiz alanlar, ormansızlaşma ve diğer sebeplerle yeraltına sızamamaktadır. Yeraltına yeterince sızamayan yağmur suları şehirleşme oranı yüksek olan bölgelerde daha sık aralıklarla ve daha yüksek pik debi ile taşkın olaylarına neden olmaktadır (EPA, 1999b). Şehirleşme öncesi ve sonrası taşkın yatağının durumu Şekil 2.22'de verilmiştir. Yağmur hendekleri geçirimsiz yüzeylerde biriken yağmur sularını toplayarak yeraltına sızdırmakta ve böylece taşkın olayları daha az yaşanmakta, taşkınların riski ve verebilecekleri olası zararlar azaltılmaktadır.



Şekil 2.22: Bir nehir havzası için a) şehirleşme öncesi b) şehirleşme sonrası taşkın yatağının durumu (Schueler, 1987'den uyarlanmıştır).

Toprağın su, rüzgar, çığ ve yerçekimi gibi kuvvetlerce aşınıp farklı yerlere taşınması olayına erozyon denir. Orman ve su işleri bakanlığının 2015 yılı verilerine göre her yıl ülkemizde 168 milyon ton verimli toprağımız yok olmaktadır. Bu yok oluşun sebepleri incelendiğinde %90'nın su, %1'inin rüzgar kaynaklı erozyon olduğu görülmektedir (TEMA, 2014). Tarım alanlarında ise suyun sebep olduğu erozyon %75 civarındadır (TEMA, 2014). Erozyon ile toprak kayıpları artar ve tarım alanları verimsizleşir, su kalitesi düşer, taşınan sedimentten dolayı barajların ömrü kısalır, yüzeysel akış miktarı artar ve toprağın sızma kapasitesi azalır (Özdemir, 1995). Bu ve meydana gelebilecek diğer sorunlara çözüm üretmek ve verimli topraklarımızın erozyon sebebiyle kaybolmasını önlemek için birtakım yöntemler geliştirmemiz gerekmektedir. Yağmur hendekleri bu konuda da yardımcı olmaktadır. Kontur çizgilerine paralel olarak alt alta kazılan yağmur hendekleri, hendek içine inşa edilen kontrol barajları, giriş akımlarının önüne yerleştirilen ince çakıl diyafram ve riprap ile yağmur suyunun yüzeysel akış hızı yavaşlatılır ve böylece yağmur suyunun erozyon oluşturacak seviyelere ulaşması engellenebilir. Bu özelliğiyle

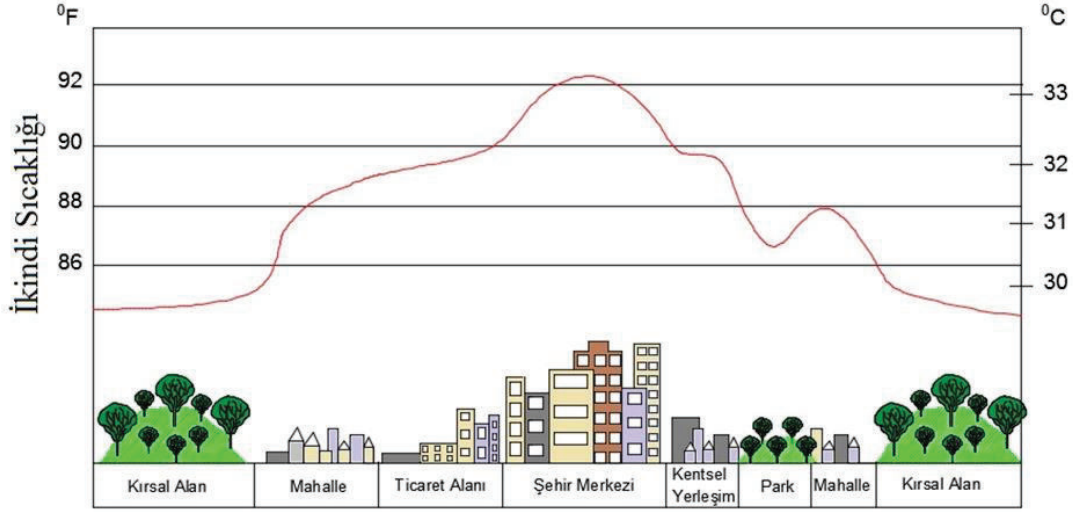
yağmur hendekleri buldukları bölgedeki topraklar için erozyon meydana gelme riskini ve şiddetini azaltan bir uygulamadır (NWRM, 2013).

Yağmur hendekleri iç yüzeylerinde bulunan kaplama malzemeleri (bitki örtüsü, taş, malç vb.) ve yüzeysel akış sonucu taşınan sediment birikiminden oluşan verimli toprak katmanları ile ekosistem için büyük bir öneme sahip olan bioçeşitliliğin artmasına ve korunmasına katkıda bulunur (BMP Minnesota, 2001a; BMP Minnesota, 2001b; WSUD, 2010; NWRM, 2013). Ekosistemdeki bioçeşitliliğin artması tarımsal ürün çeşitliliğinin artması veya mevcut ürünlerin ıslah edilmesi anlamına gelirken ekosistemdeki bioçeşitliliğin korunması besin zinciri ve enerji akışının korunması anlamına gelmektedir. Bu sebeplerden dolayı bioçeşitliliğin artması ve korunması açısından yağmur hendekleri tarım uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Yağmur hendekleri bu faydasının yanında ayrıca inşa edildikleri bölgelere estetik bir değer katarak buldukları bölgenin kalkınmasına da yardımcı olurlar (EPA, 1999b; WSUD, 2010; NWRM, 2013).

Yağmur hendekleri bahçeler, parklar, otoparklar, yol kenarları vb. yerlerde inşa edilebilir. Yol kenarları boyunca uzanan yağmur hendeklerinin peyzaj tasarımı, yol ve caddelerin dolayısıyla bölgenin estetik değerinin artmasına yardımcı olur. Yağmur hendekleri tasarlanırken etrafındaki diğer peyzaj özellikleriyle uyum sağlamasına dikkat edilmelidir. Kapsamlı bir bölge analizi yapılarak yağmur hendeklerinin yol düzeni, bakım ihtiyaçları, inşa işleri gibi peyzaj tasarımıyla ilgili olan bilgiler toplanmalıdır. Peyzaj tasarımında yağmur hendeklerinin tasarımı için iki önemli unsur vardır. Bunlardan ilki uygun bitki örtüsü yardımıyla yüzeysel akışın arıtılmasını sağlamak ikinci ise bu sistemlerin doğal veya yapay çevreyle bütünleşmesini sağlamaktır.

Yerleşim yerleri, otoparklar, sanayi ve ticaret alanları gibi geçirimsiz yüzeylerin kentsel bölgelerde artmasıyla bu bölgeler etrafındaki kırsal alanlara göre daha yüksek sıcaklıklara sahip olmaktadır (Kuşçu Şimşek ve Şengezer, 2012). Yüksek binaların (gökdelenler) hava dolaşımını (rüzgar) engellemesi ile bu sıcaklıklar daha da artmakta ve doğal iklim ortamı bozulmaktadır (Kuşçu Şimşek ve Şengezer, 2012). Tüm bunlar kentsel bölgelerde ısı ada etkisinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yağmur hendekleri üzerindeki bitki örtüsü sayesinde kentsel bölgelerde yeşil alanlar oluşturarak pik sıcaklıkların dolayısıyla ısı ada etkisinin azalmasına mikro ölçekte yardımcı olmaktadır. Pik sıcaklıkların azalması ile serinleme için kullanılan enerji ihtiyacı ve maliyeti de azalmaktadır (Yiğit Avdan ve diğ., 2015). Kentsel ve kırsal

bölgelerdeki ısı ada etkisinin sıcaklık değişimi üzerine etkisi Şekil 2.23'te verilmektedir. Şekil 2.23'te de görüldüğü gibi kentsel bölgelerde yeşil alanlar oluşturmak suretiyle yeşil altyapı elemanlarını arttırmak, sıcaklıkların doğal iklim koşullarında devam etmesi açısından önemlidir.



Şekil 2.23: Isı ada etkisi (Khalid, 2014'ten uyarlanmıştır).

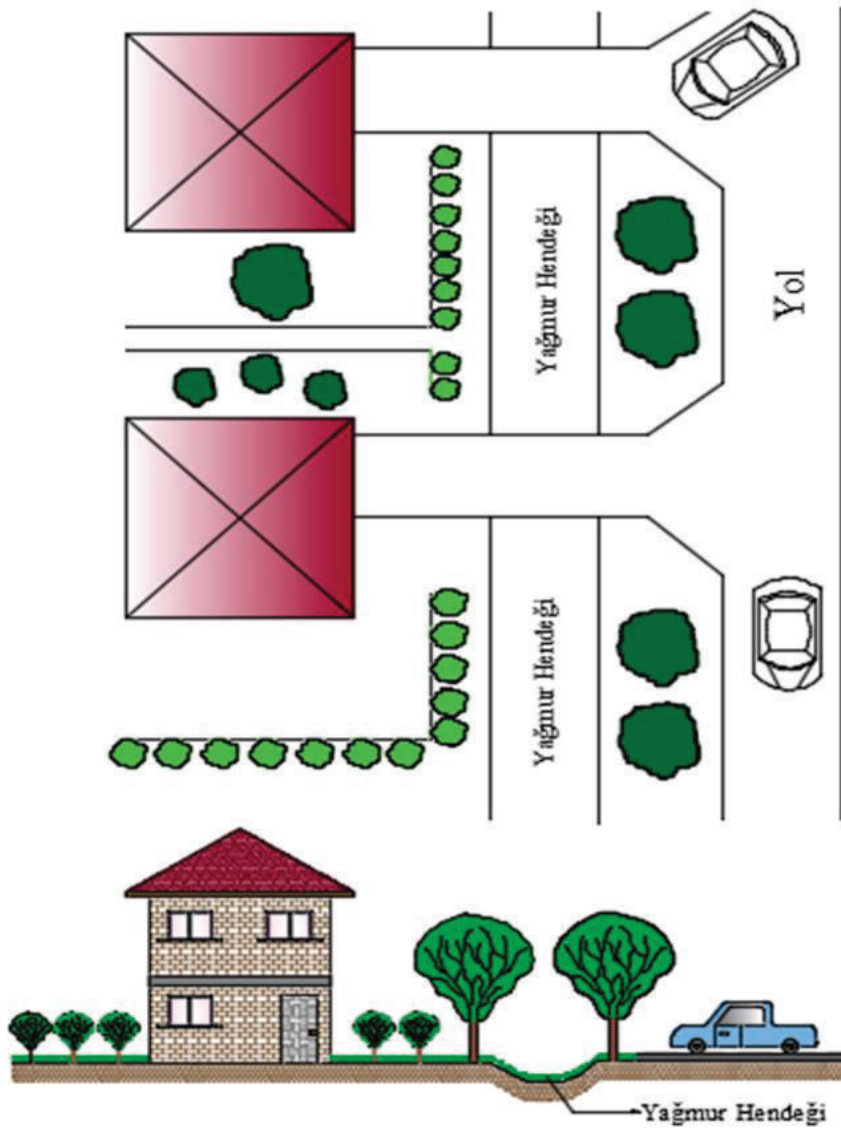
2.9. YAĞMUR HENDEKLERİNİN KULLANIM YERLERİ

Yağmur hendeklerinin kullanım yerleri inşa edilecekleri bölgedeki zeminin geçirimsizlik durumuna, suya olan doygunluğuna, yeraltı su seviyesinin yüzeye olan yakınlığına ve bölgenin topoğrafyasına bağlı olarak değişmektedir.

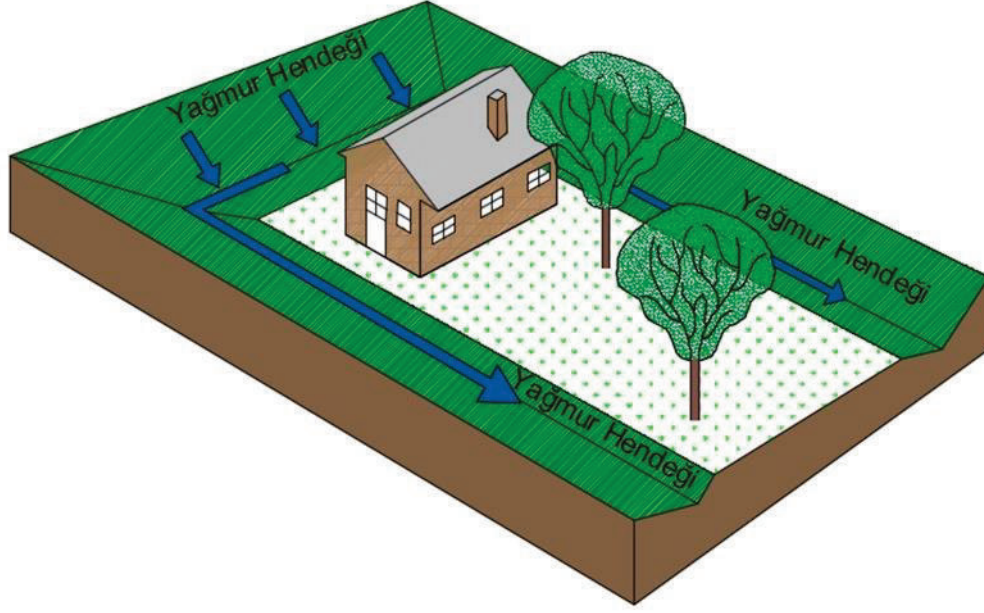
Islak yağmur hendekleri daha çok düşük eğimli ve altında geçirimsiz sert zemin tabakası bulunan bölgelere inşa edilir. Bu yağmur hendekleri içerisinde her daim durgun bir su kütlesi bulundukları için daha çok yerleşim yerlerinin dışına kırsal alanlara inşa edilmektedir. Islak yağmur hendeklerinin amacı su kalitesini arttırmak ve bölgede bulunan yaban hayatı için yaşam alanı oluşturmaktır.

Kuru yağmur hendekleri ise topografyanın çok düz olmadığı, yeraltı su seviyesinin yüzeye uzak olduğu bölgelere inşa edilir (BMP Minnesota, 2001b). Bu yağmur hendeklerinin içinde durgun bir su kütlesi bulunmaz. Bu sebeple ıslak yağmur hendeklerine kıyasla pek çok yere inşa edilebilir. Kuru yağmur hendekleri çoğunlukla kentleşmiş alanlarda geçirimsiz sert yüzeylerden dolayı meydana gelen fazla yüzeysel akışı toplayarak bu akışı yeraltına sızdırmak için kullanılır.

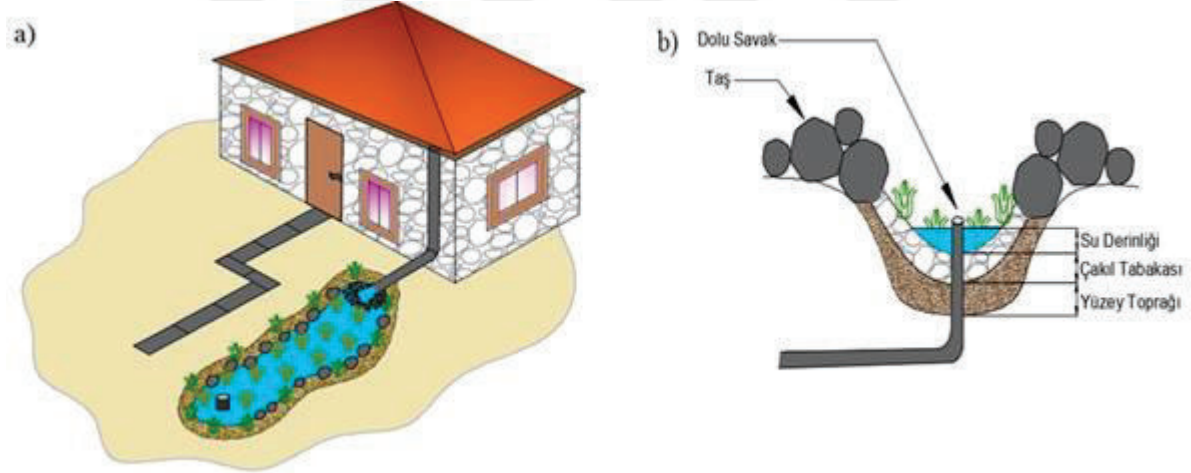
Kuru yağmur hendeklerinin genel olarak kullanım yerleri; i) tarımsal bölgeler ii) kırsal bölgeler ve iii) yerleşim bölgeleri olarak sınıflandırılabilir. Yerleşim bölgeleri de kendi içinde; yol kenarları, orta refüj, otoparklar, parklar, okul, konut ve alışveriş merkezlerinin bahçeleri, sanayi ve ticaret alanları olarak değerlendirilebilir. (WSUD, 2010; BMP Boston, 2013). Yerleşim bölgesine uygulanmış menfez geçişleri olan tipik bir yağmur hendeği Şekil 2.24'te, konut çevresine ve konut bahçesine inşa edilmiş kuru yağmur hendekleri sırasıyla Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'da, yol kenarına ve orta refüje uygulanmış kuru yağmur hendekleri ise sırasıyla Şekil 2.27 ve Şekil 2.28'de verilmektedir.



Şekil 2.24: Yerleşim yerine inşa edilmiş kuru yağmur hendeğinin planı ve enkesiti (WSUD, 2006'dan uyarlanmıştır).

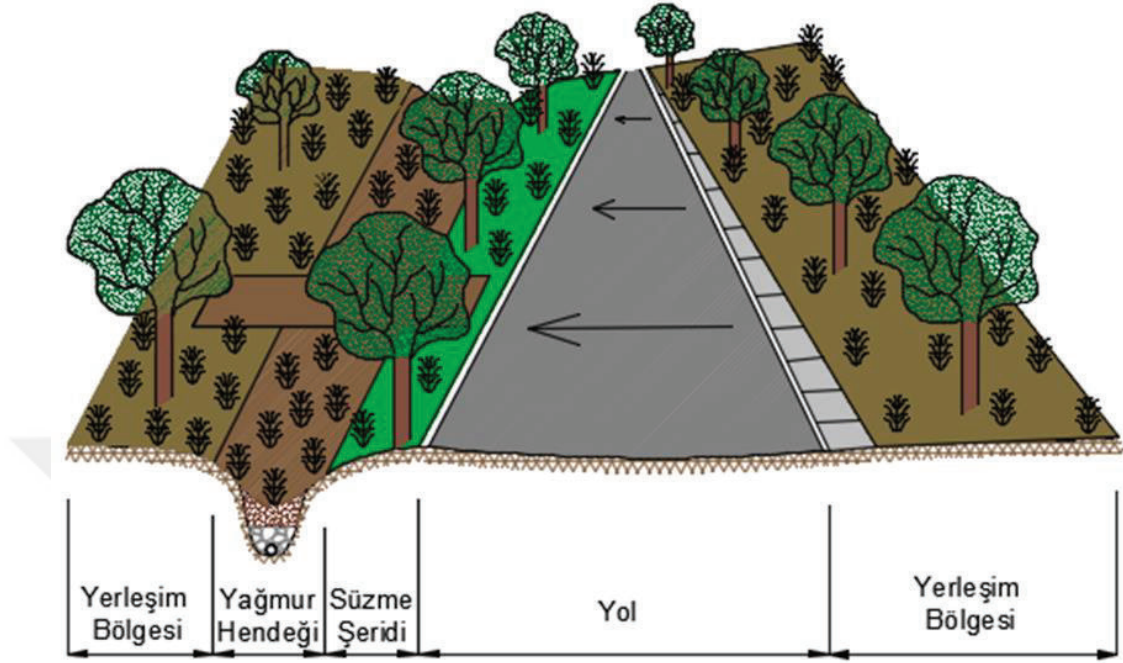


Şekil 2.25: Konut çevresine inşa edilmiş kuru yağmur hendeği.

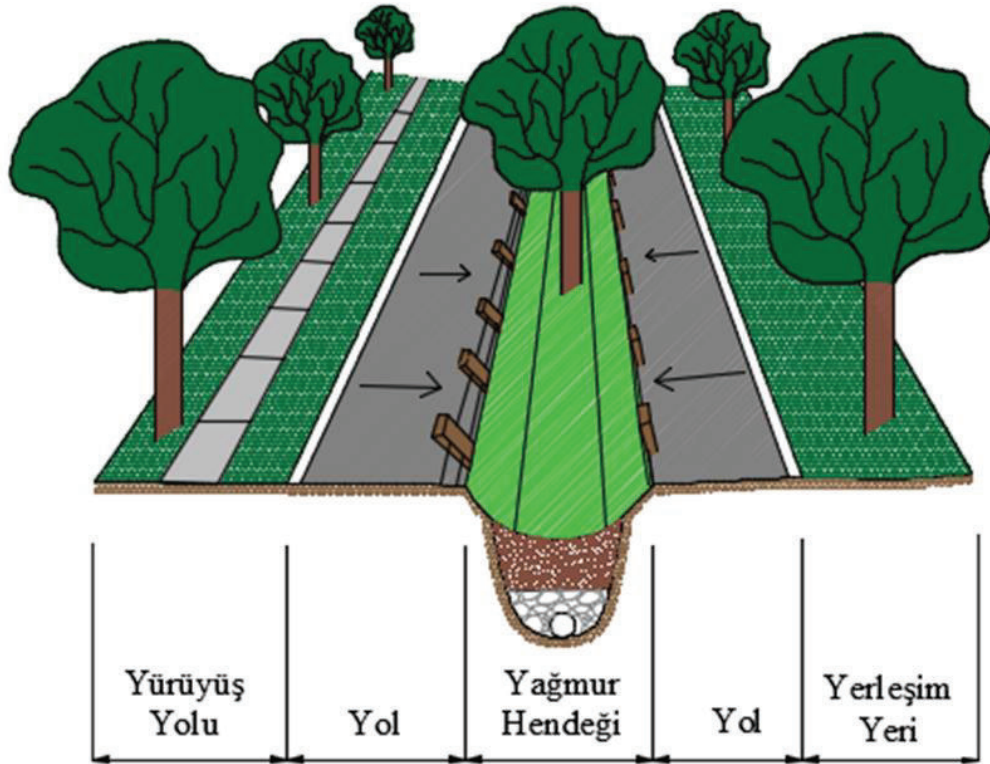


Şekil 2.26: a) Konut bahçesine inşa edilmiş kuru yağmur hendeği planı b) Dolu savak enkesiti (MWC, 2013'ten uyarlanmıştır).

Şekil 2.26'da konut bahçesine inşa edilen yağmur hendeği ile çatılara ulaşan yağmur suyunun hasat edilmesi amaçlanmıştır. Böylece çatılardan elde edilen yağmur suyunun hendek içinde arıtılarak yeraltı suyuna karışması ve yeraltı su seviyesinin artırılması sağlanır. Yağışın meydana geldiği zamana ait bu sistemin planı Şekil 2.26a'da ve hendekte taşkın meydana gelmesini engelleyen, hendeğin uç kısmına yakın yerleştirilen (planda sadece yuvarlak boru enkesiti şeklinde gözükken bölge) dolu savak enkesiti Şekil 2.26b'de verilmektedir. Yağışın meydana geldiği zaman ıslak olan bu hendek daha sonra kuru kalmaktadır.



Şekil 2.27: Yol kenarına inşa edilmiş kuru yağmur hendeği (WSUD, 2006'dan uyarlanmıştır).



Şekil 2.28: Orta refüje inşa edilmiş kuru yağmur hendeği (WSUD, 2006'dan uyarlanmıştır).

2.10. DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE YAĞMUR HENDEĞİ UYGULAMALARI

Yağmur hendekleri ilk olarak permakültür kavramıyla birlikte yağmur suyundan daha fazla yararlanma amacıyla ortaya çıkmıştır. Permakültür kavramı ise 1974'te Tazmanya ve Avustralya'da Bill Mollison ve öğrencisi David Holmgren tarafından başlatılmış bir olgudur (Mollison, 1988). Permakültür; uygulanacak yeni yöntem ve tekniklerle doğaya dayalı çözümler üretmek yani doğayı taklit etmek, onunla birlikte hareket etmek anlamına gelir. Permakültürün temelinde çevreyi mümkün olduğunca en az şekilde olumsuz etkileme ve sürdürülebilir bir hayat oluşturma yatar. Bunun için de tüm canlıları destekleyecek verimli ve sağlıklı ortamlar oluşturmayı amaçlar. Bunu yaparken doğada bulunan malzemelerden ve hayvanların kendisinden yararlanır. Ayrıca permakültürde hem tarımsal hem de hayvansal üretimde maksimum verimlilik aranır. Bu kavram daha sonra Avusturalya'nın Brisbane şehri yakınlarındaki Zaytuna permakültür çiftliğinde gelişimine devam etmiştir. Bugün ise yağmur hendekleri İngiltere'de sürdürülebilir kentsel drenaj sistemleri (SKDS), Avustralya'da suya duyarlı kent tasarımı (SDKT), Amerika'da ise düşük etkili kentleşme (DEK) ve en iyi yönetim uygulamaları (EİYU) isimleri altında yeşil altyapının bir parçası olarak uygulanmaktadır (Müftüoğlu ve Perçin, 2015). Yurtdışında yerleşim bölgelerine uygulanmış yağmur hendeklerine ait görseller Şekil 2.29'da verilmektedir.



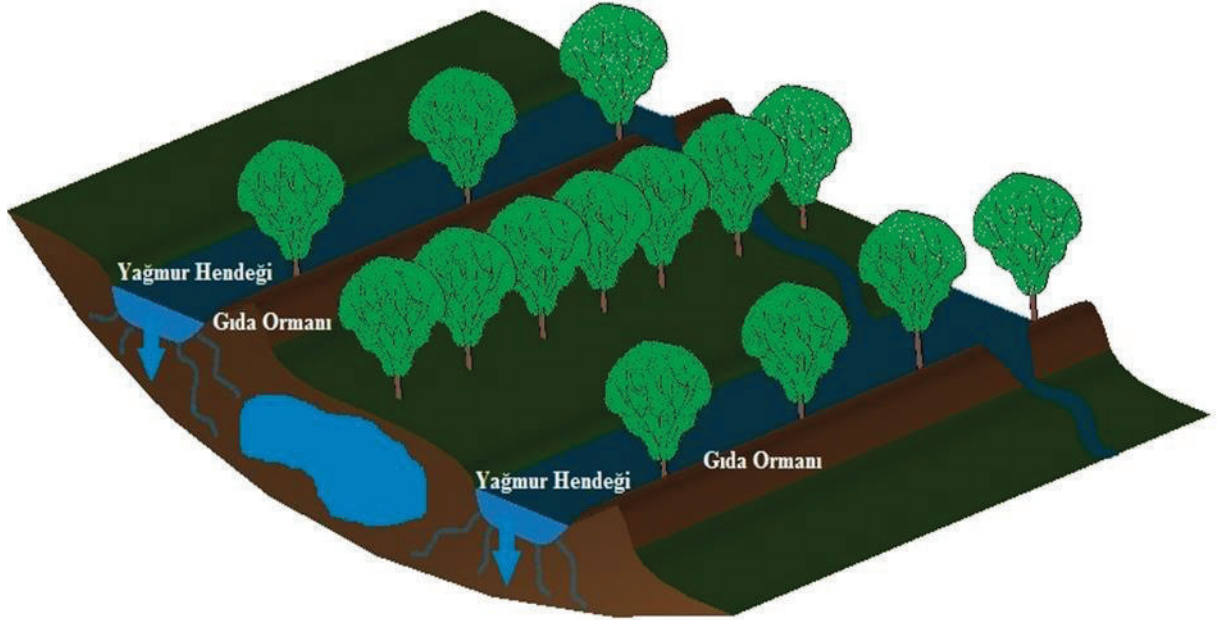
Şekil 2.29: Yurtdışında uygulanmış yağmur hendeği örnekleri (Woods Ballard ve diğ., 2015).

Farklı şekillerde isimlendirilseler de bu sistemlerin hepsi aynı amaca hizmet etmektedir. Uygulamaların temelinde artan geçirimsiz yüzeylerin olumsuz etkisini azaltmak ve yağmur suyundan daha fazla yararlanmak bulunmaktadır. Bu sistemler kentsel bölgelerde yağışın yeraltına sızarak yeraltı sularının beslenmesini, su kalitesinin artırılmasını, kentsel bölgelerde yaban hayatı için ortam oluşturmayı ve bioçeşitliliği arttırmayı hedeflemektedir (Müftüoğlu ve Perçin, 2015). Dünyadaki yaygın kullanıma karşın ülkemizde yağmur hendeklerinin kullanımı kısıtlıdır. Ülkemizde bu hendekler daha çok permakültür çiftliklerinde ve tarımsal alanlarda sulama suyu ihtiyacını azaltıcı bir yöntem olarak uygulanmaktadır. Kentsel bölgelerdeki kullanımı ise yok denecek kadar azdır. Bu hendeklerin ülkemizdeki kısıtlı uygulama alanları; Marmariç, Belentepe ve Kızıltepe permakültür çiftlikleri ile Bostancık ve Tahtacıörencik köyleridir. Yağmur hendekleri bu bölgelerde sürdürülebilir bir yaşam alanı oluşturmak amacıyla inşa edilmektedir (Bakır ve diğ., 2011). Ülkemizde uygulanan yağmur hendeklerine ait görseller Şekil 2.30'da verilmektedir.



Şekil 2.30: Ülkemizden yağmur hendeği örnekleri a) Belentepe permakültür çiftliği, Bursa b) Marmariç permakültür çiftliği, İzmir c) Bostancık köyü, Muğla d) Tahtacıörencik köyü, Ankara (Bostancık, 2009; Bakır ve diğ., 2011; TADYA, 2012; BPC, 2015).

Marmariç Ekolojik Yaşam Derneği tarafından İzmir'in Bayındır İlçesi Dernekli Köyü Marmariç bölgesinde yağmur hendeklerinin çeşitli uygulamaları yapılmaktadır (Bakır ve diğ., 2011). Bunun için öncelikle arazide eş yükselti eğrilerine paralel olarak yağmur hendekleri kazılmakta ve buradan çıkan hafriyat toprağıyla hendeğin arazi eğimi yönündeki alt kısmına tümsekler inşa edilmektedir. Bu tümsekler hem hendek içindeki yağmur suyunun dışarı taşmasını önler hem de gıda ormanlarının oluşmasına yardımcı olur. Yağmur hendeği ve gıda ormanlarının bir örneği Şekil 2.31'de verilmektedir. Ayrıca şiddetli yağış zamanlarında yağmur hendeklerine gelen fazla su, yağmur hendeğinin yapısını bozmaması ve taşkına sebep olmaması için savaklar yardımıyla hendekler arasında aktarılmaktadır. Aktarılan bu su en son gölete ulaşarak gölette biriktirilmektedir. Burada depolanan su; balık, ördek veya sulak alan bitkileri için yaşam alanı oluşturarak bioçeşitliliği artırır ve gerektiğinde kullanılmak üzere içme ve sulama suyu ihtiyacını karşılar. Bu özelliğiyle gölet kurak dönemlerde sulama suyuna olan ihtiyacı da azaltmaktadır. Marmariç'te yapılan yağmur hendekleri ve göleti gösteren Marmariç Köyü durum planı Şekil 2.32'de verilmiştir. Şekil 2.32 Google Earth üzerine planın işlenmesi ile elde edilmiştir.



Şekil 2.31: Yağmur hendeği ve gıda ormanı.

Marmariç'te yağmur suyunu hasat etmek için toplam 900 m uzunluğunda yağmur hendeği ve 4,5 m yüksekliğe, 75 m uzunluğa ve 900 bin litre su tutma kapasitesine sahip bir gölet inşa edilmiştir (Bakır ve diğ., 2011). Bu projeye birlikte; yeraltı su kaynaklarını besleme, sulama

suyu ihtiyacını azaltma, sulama için ayrılan enerjiden tasarruf etme, yağış rejimini düzenleme, erozyon ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini önleme, ürün çeşitliliği ve bioçeşitliliği artırma, gübre ve zirai ilaç kullanımının azaltılması amaçlanmıştır (Bakır ve diğ., 2011). Projenin sürdürülebilir hayata önemli katkılarının olacağı düşünülmektedir (Bakır ve diğ., 2011).



Şekil 2.32: Marmariç köyü durum planı (Bakır ve diğ., 2011'den uyarlanmıştır).

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle yağmur hendeklerinin kapasite hesapları anlatılmıştır. Bu hesaplar hem uluslararası literatüre hem de resmi gazetede yayımlanan 30105 sayılı yağmur suyu toplama, depolama ve deşarj sistemleri hakkında yönetmeliğe göre yapılmıştır. Daha sonra yağmur hendeklerinin sürdürülebilirliğe sağladığı katkıların değerlendirilmesi için radar grafikleri oluşturulmuştur. Ayrıca yağmur hendeklerinde arıtma ve taşıma kapasitesi optimizasyonu açıklanarak hendeklerin tasarımı için optimum şev eğimi ve optimum hidrolik yarıçap gibi yeni kriterlerden ve bu kriterlerin bulunuşundan bahsedilmiştir.

3.1. YAĞMUR HENDEKLERİNİN KAPASİTE HESAPLARI

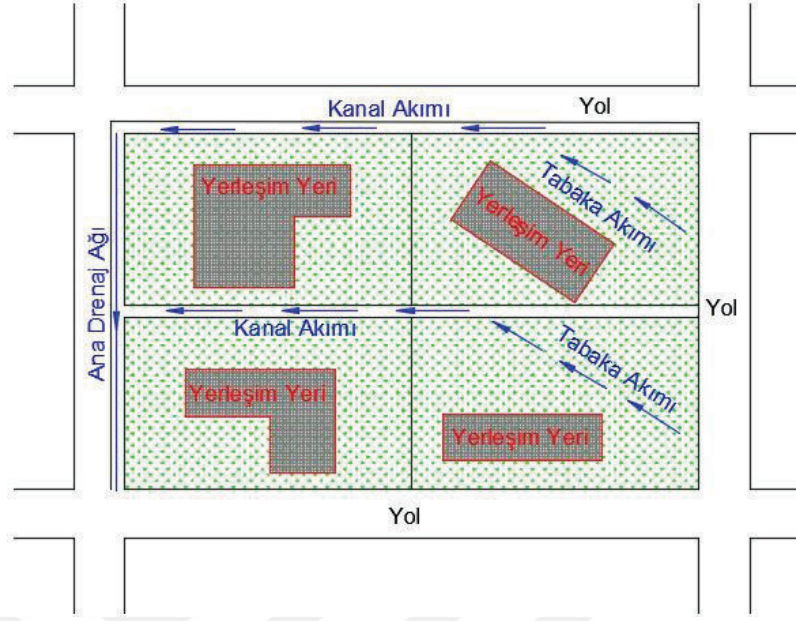
Yağmur hendeklerinin taşıma kapasitelerinin hesaplanmasında; Rasyonel metot, Manning denklemi, serbest akım koşulları için savak denklemi ve batmış durumdaki akımlar için orifis denklemi kullanılmaktadır. Hendek tabanında bulunan filtre tabakasına ait sızma hızının hesaplanması için ise Darcy denklemi uygulanmaktadır. Hesap adımlarını oluşturan bu metot ve denklemler aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

3.1.1. Literatür Araştırmasına Göre Kapasite Hesapları

3.1.1.1. Rasyonel Metot

Küçük alanlarda akış debisini doğrulukla veren ve Denklem (3.1) ile hesaplanan Rasyonel metot pik debilerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Yağmur hendekleri de genellikle 2 ile 4 hektarlık küçük alanlı bölgelerde inşa edildiklerinden Rasyonel metot hendeklerin pik debilerinin hesaplanmasında iyi sonuçlar vermektedir (Yao, 2013).

Rasyonel metodun hesaplanmasında gerekli olan yağışın geçiş süresi (t_c), tabaka ve kanal akımına ait geçiş sürelerinin ($t_{tabaka} + t_{kanal}$) toplamından oluşmaktadır (QUDM, 2007). Tabaka akımının uzunluğu kentsel alanlarda 20 ile 50 m arasında değişmekle birlikte maksimum 50 m olarak alınması tavsiye edilmektedir. Kırsal alanlarda ise bu uzunluk 200 metreye kadar çıkabilmektedir (Argue, 1986). Tabaka ve kanal akımlarına ait plan Şekil 3.1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.1: Tabaka ve kanal akımlarına ait plan (QUDM, 2007'den uyarlanmıştır).

Akım yolu uzunluğunun 50 metreden fazla olması durumunda toplam geçiş süresi tabaka ve kanal akımlarının geçiş sürelerinin toplamı ($t_{tabaka} + t_{kanal}$) olacak şekilde ifade edilir. Böyle bir durumda tabaka akımının uzunluğu maksimum 50 m olarak alınır ve geri kalan uzunluk kanal akımı uzunluğu olarak kabul edilir. Tabaka akımına ait geçiş süresi Denklem (3.2), kanal akımına ait geçiş süresi ise Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem (3.2)'deki yağış şiddeti EK 1'den, Denklem (3.3)'teki ortalama hız ise EK 2'den okunabilir. Akım yolu uzunluğunun 50 metreden az olması durumunda ise kanal akımının geçiş süresi (t_{kanal}) sıfır kabul edilerek toplam geçiş süresi (t_c) sadece tabaka akımının geçiş süresine (t_{tabaka}) eşit olarak alınır. Bu durumda akım yolu uzunluğunun tamamı tabaka akımına ait uzunluk olarak kabul edilir.

Denklem (3.2)'deki Horton katsayısı (n^*) Tablo 3.1'den okunur. Bu denklemde bulunan yağış şiddeti (I) ve tabaka süresi (t_{tabaka}) arasında; yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrilerine göre bu iki değer birbirleriyle eşleşinceye kadar iterasyon yapılır. İterasyon sonucunda bulunan değer tabaka akımının geçiş süresine (t_{tabaka}) eşittir. 50 metreden fazla akım yolu uzunluğuna sahip bölgelerde aynı zamanda kanal akımının geçiş süresi de hesaplanır ve bu iki değer toplamından geçiş süresi elde edilir. Daha sonra toplam geçiş süresine (t_c) bağlı olarak yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrilerinden y yıllık yağış şiddeti (I_y) okunur. Denklem (3.1)'deki C_y terimi, 10 ve 100 yıllık tekraralama sıklığına sahip yüzeysel akış değerlerini göstermektedir. Bu

değerler Tablo 3.2'deki geçirimsizlik oranına bağlı olarak Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'te verilmiştir. Farklı değerlere ait C_y değerleri Denklem (3.4) ile hesaplanabilmektedir.

$$Q_y = (C_y * I_y * A)/360 \quad (3.1)$$

Burada; Q_y : hendekte oluşan y yıllık pik debiyi (m^3/s), C_y : y yıllık yüzeysel akış katsayısını, I_y : y yıllık yağış şiddetini (mm/sa) ve A : havza alanı (ha) ifade etmektedir.

$$t_{tabaka} = 6,94 * \frac{(L_t * n^*)^{0,6}}{I^{0,4} * S^{0,3}} \quad (3.2)$$

Burada; t_{tabaka} : tabaka akımının geçiş süresini (dk), L_t : tabaka akımının uzunluğunu (m), n^* : Horton pürüzlülük katsayısını, I : yağış şiddetini (mm/sa), S : boyuna eğimi ifade etmektedir.

$$t_{kanal} = L_k / (60 * V_{ort}) \quad (3.3)$$

Burada; t_{kanal} : kanal akımının geçiş süresini (dk), L_k : kanal akımının uzunluğunu (m), V_{ort} : ortalama hızı ifade etmektedir.

Y yıllık yüzeysel akış katsayısı (C_y) ve y yıllık pik debinin (Q_y) hesaplanması için gerekli olan adımlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- i. Boyuna eğim (S), toplam akım yolu uzunluğu (L_T) ve havza alanı (A) projeye göre hesaplanarak uygunluk kriterlerine göre değerlendirilir,
- ii. Denklem (3.2)'de kullanılan Horton pürüzlülük katsayısı (n^*) Tablo 3.1'den okunarak belirlenir,
- iii. Denklem (3.2)'de tüm bilinenler yerine konularak yağış şiddeti ile süre arasında yağış şiddeti-süre tekerrür eğrilerine göre iterasyon yapılarak tabaka akımının geçiş süresi bulunur. Eğer hendek boyu uzunluğu 50 metreden fazla ise Denklem (3.3) ile kanal akımına ait geçiş süresi de hesaplanır,
- iv. Tabaka akımının geçiş süresi ile kanal akımının geçiş süresi toplanarak toplam geçiş süresi (t_c) elde edilir ve bu süreye göre yağış şiddeti-süre tekerrür eğrilerinden 10 ve 100 yıllık yağış şiddeti değerleri belirlenir,

- v. Yağmur hendeğinin yapılacağı bölgenin şartlarına bağlı olarak geçirimsizlik oranı (f_i) Tablo 3.2'den okunur,
- vi. 10 yıllık tekrarlama sıklığına sahip 1 saatlik yağış şiddeti ($^1I_{10}$) ve geçirimsizlik oranına (f_i) bağlı olarak Tablo 3.3 veya Tablo 3.4'ten 10 yıllık tekrarlama sıklığına sahip yüzeysel akış katsayısının (C_{10}) değeri belirlenir.
- vii. Farklı tekrarlama sıklığına sahip yüzeysel akış katsayılarının (C_2, C_{50}, C_{100} gibi) bulunabilmesi için Tablo 3.5'te verilen frekans faktörleri Denklem (3.4)'te yerine konularak gerekli çarpımlar yapılır.
- viii. Elde edilen y yıllık yüzeysel akış katsayısı (C_y), yağış şiddeti (I_y) ve havza alanı (A) Denklem (3.1)'de yerine konularak y yıllık pik debi hesaplanır.

Tablo 3.1: Horton pürüzlülük katsayısı (QUDM, 2007).

Yüzey Tipi	Horton Pürüzlülük Katsayısı (n^*)
Beton veya Asfalt	0,010-0,013
Sade Kum	0,010-0,016
Çakıllı Yüzey	0,012-0,030
Killi Kumlu Zemin (Aşınmış)	0,012-0,033
Seyrek Bitki Örtüsü	0,053-0,130
Kısa Çimler, Otlak	0,100-0,200
Çimler	0,170-0,480

Tablo 3.2: Bölgelere göre geçirimsizlik oranları (QUDM, 2007).

Kategori	Geçirimsizlik Oranı (f_i)
İş Merkezleri	1,00
Ticari, Yerel İşletmeler, Komşu Tesisler, Hizmet Sektörü, Genel Sanayi, Ev Endüstrisi	0,90
Yollar, Otoparklar gibi Önemli Kaplama Alanları	0,90
Kentsel Yerleşim - Yüksek Yoğunluklu ¹⁴	0,70-0,90
Kentsel Yerleşim - Düşük Yoğunluklu (Yollar dahil)	0,45-0,85
Kentsel Yerleşim - Düşük Yoğunluklu (Yollar hariç)	0,40-0,75
Kırsal Yerleşim	0,10-0,20
Açık alanlar, Parklar vb.	0,00

Yukarıda vii. adımda belirtildiği gibi 10 yıllık tekrarlama sıklığına sahip yüzeysel akış katsayısı değeri belirlendikten sonra bu değer Tablo 3.5'te verilen frekans faktörüyle çarpılarak farklı tekrarlama sıklığına sahip yüzeysel akış katsayısı değerleri hesaplanabilir. Denklem (3.4) ile

¹⁴ Bitişik nizam evler için f_i : 0,70 bir hektarda 20'den fazla konut olan bölgeler için f_i : 0,85 çok katlı evler için f_i : 0,90.

hesaplanan C_y değeri kentsel bölgeler için 1'den büyük çıkarsa bu değer 1'e eşit olarak kabul edilmelidir (QUDM, 2007).

$$C_y = F_y * C_{10} \quad (3.4)$$

Burada; C_y : y yıllık tekrarlama sıklığına sahip yüzeysel akış katsayısını, F_y : y yıllık tekrarlama sıklığına sahip frekans faktörünü, C_{10} : 10 yıllık tekrarlama sıklığına sahip yüzeysel akış katsayısını ifade etmektedir.

Tablo 3.3: 10 yıllık tekrarlama sıklığına sahip yüzeysel akış katsayısı (QUDM, 2007).

Yağış Şiddeti (mm/sa) (I_{10}) ¹⁵	Geçirimsizlik Oranı (f_i) ¹⁶						
	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	0,90	1,00
39-44		0,44	0,55	0,67	0,78	0,84	0,90
45-49		0,49	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90
50-54	Tablo 3.4'e Bakınız.	0,55	0,64	0,72	0,81	0,86	0,90
55-59		0,60	0,68	0,75	0,83	0,86	0,90
60-64		0,65	0,72	0,78	0,84	0,87	0,90
65-69		0,71	0,76	0,80	0,85	0,88	0,90
70-90		0,74	0,78	0,82	0,86	0,88	0,90

Tablo 3.4: Geçirimsizlik oranı sıfır olan yüzeysel akış katsayısı (QUDM, 2007).

Arazi Kullanımı	Yoğun Çalılık Arazi	Orta Yoğunluklu Çalı, Yoğun Çim Örtüsü, Yüksek Yoğunluklu Çayır			Zayıf Çalılık Arazi, Zayıf Çim Örtüsü, Düşük Yoğunluklu Çayır				
		Yüksek	Orta	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük		
Yağış Şiddeti (mm/sa) I_{10}	Zemin Geçirimsizliği			Zemin Geçirimsizliği			Zemin Geçirimsizliği		
39-44	0,08	0,24	0,32	0,16	0,32	0,40	0,24	0,40	0,48
45-49	0,10	0,29	0,39	0,20	0,39	0,49	0,29	0,49	0,59
50-54	0,12	0,35	0,46	0,23	0,46	0,58	0,35	0,58	0,69
55-59	0,13	0,40	0,53	0,27	0,53	0,66	0,40	0,66	0,70
60-64	0,15	0,44	0,59	0,30	0,59	0,70	0,44	0,70	0,70
65-69	0,17	0,50	0,66	0,33	0,66	0,70	0,50	0,70	0,70
70-90	0,18	0,53	0,70	0,35	0,70	0,70	0,53	0,70	0,70

Tablo 3.5: Tekrarlama sıklığına bağlı frekans faktörü (QUDM, 2007).

Ortalama Tekrarlama Sıklığı	Frekans Faktörü (F_y)
1	0,80
2	0,85
5	0,95
10	1,00
20	1,05
50	1,15
100	1,20

¹⁵ I_{10} : 10 yıllık tekrarlama sıklığına sahip 1 saatlik yağış şiddeti (mm/sa).

¹⁶ f_i : Bölgenin yüzey tipine bağlı olarak değişen geçirimsizlik oranı.

Tablo 3.7: Taşla kaplı yağmur hendekleri için Manning pürüzlülük katsayısı (QUDM, 2007).

$(d_{50})^{17}/(d_{90})^{18}$	$d_{50}/d_{90} = 0,5$				$d_{50}/d_{90} = 0,8$			
d_{50} (mm)	200	300	400	500	200	300	400	500
$(R_h)^{19}$ (m)	Manning pürüzlülük katsayısı (n)				Manning pürüzlülük katsayısı (n)			
0,2	0,10	0,14	0,17	0,21	0,06	0,08	0,09	0,11
0,3	0,08	0,11	0,14	0,16	0,05	0,06	0,08	0,09
0,4	0,07	0,09	0,12	0,14	0,04	0,05	0,07	0,08
0,5	0,06	0,08	0,10	0,12	0,04	0,05	0,06	0,07
0,6	0,06	0,08	0,09	0,11	0,04	0,05	0,05	0,06
0,8	0,05	0,07	0,08	0,09	0,04	0,04	0,05	0,06
1,0	0,04	0,06	0,07	0,08	0,03	0,04	0,05	0,05

3.1.1.3. Minimum Hidrolik Kalış Süresinin Hesabı

Yağmur hendeklerinin arıtma kapasitesi yağmur suyunun hendek içindeki kalış süresine bağlı olarak değişmektedir. Yağmur hendeklerinin iyi bir arıtma performansı gösterebilmesi için kalış süresi minimum 9 dk olmalıdır (ARC,1992). Bu süreden az hidrolik kalış süresine sahip hendeklerde, yağmur suyu bitki örtüsüyle yeterli süre temas edemediğinden hendeğin arıtma performansı azalır. Yağmur hendeklerinde hidrolik kalış süresi Denklem (3.6) kullanılarak hesaplanabilir. Ayrıca Denklem (3.6) yağmur hendeğinin minimum uzunluğunu hesaplarken de kullanılmaktadır.

$$t_{kalış} = L_H / (60 * V) \quad (3.6)$$

Burada; $t_{kalış}$: kalış süresini (dk), L_H : hendek uzunluğunu (m), V : akım hızını (m/s) ifade etmektedir.

3.1.1.4. Serbest Akım Koşulları için Savak Denklemi

Yağmur hendeğinde meydana gelebilecek fazla suyun hendeğe zarar vermeden uzaklaştırılabilmesi için yağmur hendeklerinin genellikle uç kısımlarına dikdörtgen, üçgen veya trapez enkesitli savaklar inşa edilmektedir. Savaktan geçen debi geniş kretli savak denklemi yani Denklem (3.7) kullanılarak hesaplanabilir (WSUD, 2006). Bu denklemdeki savak katsayısı (C_W) Tablo 3.8'de verilmektedir.

$$Q_{Savak} = B * C_W * L_S * h_S^{3/2} \quad (3.7)$$

¹⁷ d_{50} : Kayaların %50'sinden daha küçük ortalama kaya boyutu (m).

¹⁸ d_{90} : Kayaların %90'ından daha küçük ortalama kaya boyutu (m).

¹⁹ R_h : Kayalar için hidrolik yarıçap (m).

Burada; Q_{Savak} : savaktan geçen debiyi (m^3/s), B : tıkanma faktörünü (0,5 olarak kabul edilir), C_W : savak katsayısını, L_S : savak uzunluğunu (m), h_S : savağın kreti üzerindeki su derinliğini (m) ifade etmektedir.

Tablo 3.8: Savak kret genişliği ve savak yüküne bağlı olarak değişen geniş kretli savak katsayısı (CONNDOT, 2000).

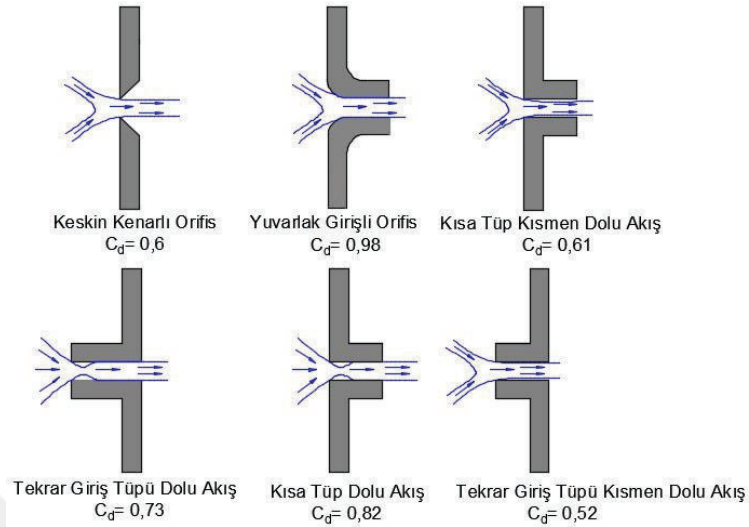
Savak Yükü (m)	Savak Kret Genişliği (m)														
	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,25	1,50	2,00	3,00	4,00
0,10	1,59	1,56	1,50	1,47	1,45	1,43	1,42	1,41	1,40	1,39	1,37	1,35	1,36	1,40	1,45
0,15	1,65	1,60	1,51	1,48	1,45	1,44	1,44	1,44	1,45	1,45	1,44	1,43	1,44	1,45	1,47
0,20	1,73	1,66	1,54	1,49	1,46	1,44	1,44	1,45	1,47	1,48	1,48	1,49	1,49	1,49	1,48
0,30	1,83	1,77	1,64	1,56	1,50	1,47	1,46	1,46	1,46	1,47	1,47	1,48	1,48	1,48	1,46
0,40	1,83	1,80	1,74	1,65	1,57	1,52	1,49	1,47	1,46	1,46	1,47	1,47	1,47	1,48	1,47
0,50	1,83	1,82	1,81	1,74	1,67	1,60	1,55	1,51	1,48	1,48	1,47	1,46	1,46	1,46	1,45
0,60	1,83	1,83	1,82	1,73	1,65	1,58	1,54	1,46	1,31	1,34	1,48	1,46	1,46	1,46	1,45
0,70	1,83	1,83	1,83	1,78	1,72	1,65	1,60	1,53	1,44	1,45	1,49	1,47	1,47	1,46	1,45
0,80	1,83	1,83	1,83	1,82	1,79	1,72	1,66	1,60	1,57	1,55	1,50	1,47	1,47	1,46	1,45
0,90	1,83	1,83	1,83	1,83	1,81	1,76	1,71	1,66	1,61	1,58	1,50	1,47	1,47	1,46	1,45
1,00	1,83	1,83	1,83	1,83	1,82	1,81	1,76	1,70	1,64	1,60	1,51	1,48	1,47	1,46	1,45
1,10	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,80	1,75	1,66	1,62	1,52	1,49	1,47	1,46	1,45
1,20	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,79	1,70	1,65	1,53	1,49	1,48	1,46	1,45
1,30	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,82	1,77	1,71	1,56	1,51	1,49	1,46	1,45
1,40	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,77	1,60	1,52	1,50	1,46	1,45
1,50	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,79	1,66	1,55	1,51	1,46	1,45
1,60	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,81	1,74	1,58	1,53	1,46	1,45

3.1.1.5. Batmış Durumdaki Çıkış Akımları için Orifis Denklemi

Yağmur hendeği içindeki savaklar suya gömülmüş halde ise orifis denkleminin kullanılması gerekmektedir. Orifis debisi Denklem (3.8)'de verilmektedir. Orifis denklemindeki C_d katsayı Şekil 3.2'den orifisin tipine göre belirlenmektedir.

$$Q_{Orifis} = B * C_d * A_o * \sqrt{(2 * g * h_o)} \quad (3.8)$$

Burada Q_{Orifis} : orifisten geçen debiyi (m^3/s), B : tıkanma faktörünü (0,5 olarak kabul edilmektedir), C_d : debi katsayısını, A_o : orifisin toplam alanını (m^2), g : yerçekimi ivmesini (m/s^2), h_o : orifisin merkezi üzerindeki su derinliğini (m) ifade etmektedir.



Şekil 3.2: Orifis tipleri ve C_d katsayıları (Dağdelen, 2012).

3.1.1.6. Filtre, Geçiş ve Drenaj Tabakalarına ait Hesaplamalar

Filtre tabakası, sızma ve süzme yoluyla yağmur suyunda bulunan kirletici maddelerin arıtılmasını sağlar. Filtre tabakası toprak/kum karışımından oluşabilir. Bu tabaka minimum 300 mm ile maksimum 600-1000 mm arasında kalınlığa sahip olmalıdır. Eğer yağmur hendeğine ağaç gibi uzun köklü bitkiler ekilmişse bu tabakanın kalınlığı minimum 800 mm olmalıdır (WSUD, 2006). Filtre tabakası için doymuş hidrolik iletkenlik 50-200 mm/sa arasında değişmektedir. Filtre tabakasına ait sızma hızı Darcy denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Darcy denkleminin uyarlanmış hali Denklem (3.9)'da verilmektedir.

$$Q_{max} = K_{doy} * L_H * W_{taban} * \left(\frac{h_{max} + d}{d} \right) \quad (3.9)$$

Burada; Q_{max} : maksimum sızma hızını (m^3/s), K_{doy} : doymuş hidrolik iletkenliği (m/s), L_H : hendek uzunluğunu (m), W_{taban} : hendeğin taban genişliğini (m), h_{max} : hendepteki maksimum su derinliğini (m), d : filtre tabakasının kalınlığını (m) ifade etmektedir.

Geçiş tabakası, filtre ile drenaj tabakaları arasına yerleştirilen ve filtre tabakasının delikli drenaj borusunda yıkanmasını önlemek için uygulanan ilave bir tabakadır. Bu tabaka 100 mm kalınlığa sahip olmalı ve kum veya iri kum tabaka malzemesi olarak seçilmelidir (WSUD, 2006). Bu malzemelerin ortalama çapları 0,7-1,0 mm arasında olmalıdır (WSUD, 2006).

Drenaj tabakası, delikli drenaj borusu ile birlikte alt drenaj sistemini oluşturur. Drenaj tabakası delikli drenaj borusunu kuşatma özelliğine sahiptir. Drenaj borusunda tabaka malzemesi olarak

iri kum veya ince çakıl kullanılabilir. Bu malzemelerin ortalama çapları 1,0-5,0 mm civarındadır (WSUD, 2006). Bu tabaka minimum 200 mm kalınlığa sahip olmalıdır (WSUD, 2006). Drenaj borusunun kapasitesi Manning denklemi kullanılarak, drenaj borusundaki deliklerin kapasitesi ise orifis denkleminin uyarlanmış hali kullanılarak hesaplanmaktadır. Manning ve uyarlanmış orifis denklemleri sırasıyla Denklem (3.5)'te ve Denklem (3.10)'da verilmektedir.

$$Q_{delik} = B * C_d * A_d * \sqrt{(2 * g * h_d)} \quad (3.10)$$

Burada; Q_{delik} : delik kapasitesini (m^3/s), B : tıkanma faktörünü (0,5), C_d : debi katsayısını, A_d : delik alanını (m^2), g : yerçekimi ivmesini (m/s^2), h_d : delikli drenaj borusunun merkezi üzerindeki yüksekliği (m) ifade etmektedir.

3.1.2. Yağmur Suyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Yönetmeliğine Göre Kapasite Hesabı

3.1.2.1. Yağmur Suyu Debisinin Hesaplanması

Yağmur suyu debisini hesaplamak için yönetmelik Rasyonel metodun kullanılmasını önermektedir. Bu metotta yağış ile yüzeysel akış arasında lineer bir ilişki olduğu ve yağışın havzada üniform dağıldığı varsayılır. Ayrıca bu metotta yüzeysel akış katsayısı tüm havza alanında sabit ve zamanla değişmediği kabul edilir. Bu metot havza alanının 1-1,5 km^2 olduğu bölgelerde iyi sonuçlar verse de 5 km^2 'ye kadar olan bölgelerde de kullanılabilir. Rasyonel metodun uygulanabilmesi için yağışın süresi en az geçiş süresi kadar olmalıdır. Havza alanı büyük olan bölgelerde yağış süresinin geçiş süresinden daha az olması ve yağışın havza üzerinde üniform dağılmamasından dolayı bu yöntem çok geniş havza alanlarında kullanılmaz. Havza alanı 5000 hektardan büyük olan bölgelerde boyutsuz hidrograf veya sentetik birim hidrograf metotları kullanılabilir. 30105 sayılı resmi gazetede yayımlanan yönetmeliğe göre Rasyonel metot Denklem (3.11)'de verilmektedir.

$$Q_{pik} = C * r * A \quad (3.11)$$

Burada; Q_{pik} : pik debiyi (L/s), C : yüzeysel akış katsayısını, r : yağmur verimini (L/s-ha), A : havza alanını (ha) ifade etmektedir.

Denklem (3.11)'de görülen yüzeysel akış katsayısı (C) Tablo 3.9'dan seçilir. Yüzeysel akış katsayısı yağışın devam etmesiyle birlikte azalır iken yukarıda açıklanan varsayımlardan dolayı değişmediği ve tüm havza alanında arazi tipine bağlı olarak belirlenen sabit bir değer olduğu kabul edilir. Denklem (3.12) verilen yağmur verimi ise yağış şiddetine bağlı olarak değişen bir değerdir. Yağış şiddeti ise bölgeye ait yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrilerinin mevcut olduğu durumda bu eğriler vasıtasıyla, mevcut olmadığı durumda ise ampirik formüller yardımıyla hesaplanabilir. Yağış şiddetinin hesaplanabilmesi için havzaya ait toplam geçiş süresinin bilinmesi gerekir. Toplam geçiş süresi, giriş süresi ve akış sürelerinin toplamı şeklinde ifade edilmektedir.

$$r = 166,7 * i \quad (3.12)$$

Burada; r : yağmur verimini (L/s-ha), i : yağış şiddetini (mm/dk) ifade etmektedir.

Giriş süresi ($t_{giriş}$), yağmur suyunun giriş yapısına ulaşıncaya kadar arazide geçirdiği süre olarak tanımlanır. Giriş süresi yüzeysel toplanma süresi olarak da ifade edilir ve zemin üzerinde laminer bir yüzeysel akış meydana getirir. Giriş süresi literatürde bulunan tabaka akımının geçiş süresi ile aynı anlamdadır. Giriş süresinin hesabı için Denklem (3.13) veya EK 4'te verilen abak kullanılabilir. Denklem (3.13)'te görülen b katsayısı EK 5'teki gecikme katsayısına (C_r) bağlı olarak Denklem (3.14) ile hesaplanabilir. Bu tez çalışmasında giriş süresinin hesabı için uygulama kolaylığı açısından EK 4'teki abak kullanılmıştır. Bu abak yüzeysel akış uzunluğu, toprak örtüsü ve arazi eğimine bağlı olarak dk cinsinden giriş süresini (yüzeysel akış süresi) vermektedir.

$$t_{giriş} = \frac{(525 * b * (L_y)^{1/3})}{(C * i)^{2/3}} \quad (3.13)$$

Burada; $t_{giriş}$: giriş akımının geçiş süresini (dk), L_y : yüzeysel akış uzunluğunu (m), C : yüzeysel akış katsayısını, i : yağış şiddetini (mm/sa), b : arazi eğimi, yağış şiddeti ve gecikme katsayısına bağlı katsayıyı ifade etmektedir.

$$b = \frac{(0,0000275 * i + C_r)}{(S_0)^{1/3}} \quad (3.14)$$

Burada; b : arazi eğimi, yağış şiddeti ve gecikme katsayısına bağlı katsayıyı, i : yağış şiddetini (mm/sa), C_r : gecikme katsayısını, S_0 : arazi eğimini ifade etmektedir.

Akış süresi ($t_{akış}$), yağmur suyunun kanalın en uzak noktasından toplanma noktasına gelene kadar kanal içinde geçirdiği süre olarak tanımlanır. Bu süre literatürdeki kanal akımının geçiş süresi ile aynı anlamdadır. Akış süresi Denklem (3.15) kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (3.15)'te görülen kanaldaki akım hızı yağmur suyunda bulunan askıda katı maddelerin çökmesini engellemek için yönetmeliğin 1.3.3.1 bölümünde minimum 0,5 m/s, maksimum 5,0 m/s olarak belirlenmiştir.

$$t_{akış} = L_k / (60 * V) \quad (3.15)$$

Burada; $t_{akış}$: kanal akımının akış süresini (dk), L_k : kanal akımı uzunluğunu (m), V : kanaldaki akım hızını (m/s) ifade etmektedir.

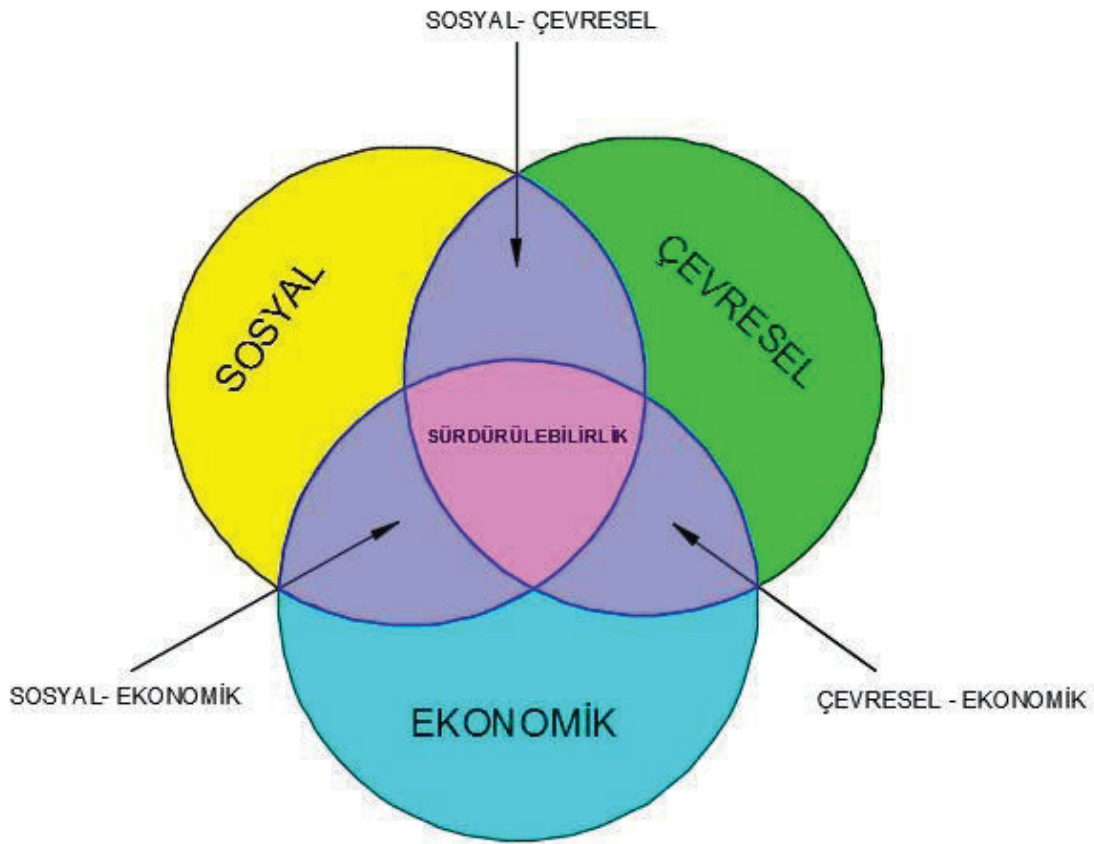
Giriş süresi ve akış süresi hesaplandıktan sonra bu değerler toplanarak toplam geçiş süresi hesaplanır. Bu değere göre yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrilerinden yağış şiddeti okunur. Yağış şiddetine bağlı olarak Denklem (3.12) ile yağmur verimi hesaplanır. Tablo 3.9 aracılığıyla yüzeysel akış katsayısı belirlenir. Havza alanı da belirlenerek Denklem (3.11)'de tüm bilinler yerine konulur ve pik hesaplanır.

Tablo 3.9: Yüzeysel akış katsayısı (ÇŞB, 2017).

Arazi Tipi	Yüzeysel Akış Katsayısı (C)
Ticari Alanlar	
Şehir Merkezleri	0,70-0,95
Tali Merkezler	0,50-0,70
İkamet Alanları	
Tek Katlı Konut Alanları	0,30-0,50
Çok Katlı Ayrık Nizam Konut Alanları	0,40-0,60
Çok Katlı Bitişik Nizam Konut Alanları	0,60-0,75
Mücvir Alanlar	0,25-0,40
Çok Katlı Apartman Alanları	0,50-0,70
Endüstriyel Alanlar	
Hafif Sanayi Alanları	0,50-0,80
Ağır Sanayi Alanları	0,60-0,90
Parklar	0,20-0,35
Oyun Alanları	0,20-0,40
Gelişmemiş Alanlar	0,10-0,30

3.2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ

Kentleşmenin ve nüfus artışının sebep olduğu olumsuzlukları azaltmak ve daha sağlıklı bir dünyada yaşayabilmek için bu bölgelerde sürdürülebilir çalışmalara ağırlık verilmelidir. Bu ise çevresel, sosyal ve ekonomik unsurların bir arada ele alınması ile mümkün olmaktadır (Harris, 2000). Sürdürülebilirliğe ait bu unsurlar Şekil 3.3'te verilmektedir. Yağmur hendekleri de sürdürülebilirliğin farklı boyutlarını içinde barındıran ve sürdürülebilir kent hayatına önemli katkıları bulunan, doğaya dayalı çözümler üreten yeşil altyapı uygulamalarındandır (Saygın ve Ulusoy, 2011).



Şekil 3.3: Sürdürülebilirliğin ilkeleri (EC, 2015'ten uyarlanmıştır).

Çevresel sürdürülebilirlik; sahip olduğumuz doğal kaynakları korumamızı ve bu kaynakları en verimli şekilde kullanmamızı gerektirir (Kaypak, 2011). Bir sisteme çevresel olarak sürdürülebilir sistem diyebilmemiz için o sistemin mevcut kaynakların dengesini ve devamlılığını koruması ve yenilenebilir kaynakların aşırı kullanımını önlemesi gerekir (Harris, 2000). Bu kapsamda çevresel sürdürülebilirliğin temel amacı doğal hayatın, yeşil alanların ve bioçeşitliliğin korunmasına katkı sağlamaktır. Bu da çevre dostu sürdürülebilir yöntemlerle

mümkün olmaktadır. Bu kriterlerin dışında çevresel sürdürülebilirlik aynı zamanda çevreyle ilgili tüm yönetmeliklere/şartnamelere uyulmasını, atık yönetimi ile çevreyi kirletmemeyi, iklim değişikliğine sebep olan sera gazı kullanımını azaltmayı, yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımını arttırmayı, yenilenemeyen kaynakların ise dengeli bir şekilde kullanılmasını amaçlamaktadır. Yağmur hendekleri; su kalitesi ve bioçeşitliliği artırma, sel ve taşkın olayları ile iklim değişikliğini azaltma, erozyonu önleme ve doğal gübre oluşumunu destekleme gibi sürdürülebilirliğe sağladığı pek çok katkıdan dolayı çevresel sürdürülebilirlik anlayışına uymaktadır (CASQA, 2003; WSUD, 2006; WSUD, 2010; BMP Boston, 2013). Bu sebeple kullanımları yaygınlaştırılmalıdır.

Sürdürülebilirlik için önemli olan bir başka faktör ise sosyal olmaktır. Sosyal sürdürülebilirlik yaşam standardının yüksek olduğu daha refah bir yerde yaşama çabası olarak tanımlanabilir. Bu ise kentsel bölgelerin daha planlı ve kullanışlı olması ile mümkündür (Köken, 2017). Yağmur hendekleri kentsel bölgelerde doğal ve estetik mekânlar oluşturarak bu bölgeleri insanlar için daha cazip hale getirir ve insanlar için sosyal alanlar oluşturarak bu bölgelerin işlevselliğini artırır. Yağmur hendeklerinin kentsel bölgelerde dinlenme alanları oluşturması, bölgeye estetik değer katması, yol yüzeyindeki yağmur suyunu toplayarak sürüş güvenliğini sağlaması ve böylece trafik kazalarının oluşmasını engellemesi bu hendeklerin sosyal sürdürülebilirliğe katkı sağladığını göstermektedir.

Sürdürülebilirliğin diğer bir ölçütü ise ekonomik olmaktır. Ekonomiklik uygulanacak yöntemler ile enerji, inşaa, bakım ve işletme maliyeti gibi durumlardan tasarruf etme anlamına gelir. Ekonomik sürdürülebilirlik modelinde üretim-tüketim dengesi sağlanırken çevresel etkilerin de dikkate alınması gerekir (Köken, 2017). Bu nedenle sistem, hem çevresel hem de ekonomik boyutları ile ele alınmalıdır. Yağmur hendekleri geleneksel yağmur suyu yönetim sistemlerine göre %33 daha ekonomik uygulamalar (Demir, 2012) olmasının yanında aynı zamanda çevreye zarar vermeyen aksine doğa dostu olan yeşil altyapı uygulamalarıdır. Yağmur hendekleri özellikle tarımsal bölgelerde sulama suyu ihtiyacını azalttığı için bu bölgelerin sulama maliyetini düşürür. Ayrıca bu hendekler kentsel bölgelerde yüzeysel akış miktarını azaltarak yağmur suyu drenaj şebekelerinde kullanılan boru çaplarının azalmasını sağlar (Demir, 2012). Bu da ürün, inşaat ve işçilik maliyetini azaltmaktadır. Bu hendekler aynı zamanda kentsel bölgelerdeki yeşil alanlar arasında bağlantı kurarak bu bölgelerde yeşil bir ağ oluşmasını sağlar. Oluşturulan bu yeşil ağ kentsel ısı ada etkisini hafifleterek serinleme için ayrılan enerji

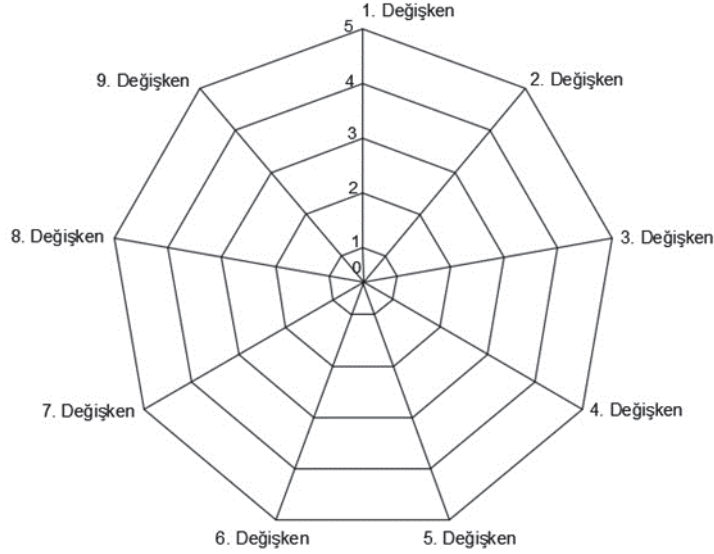
maliyetinin azalmasına da yardımcı olur (Yiğit Avdan ve diğ., 2015). Yağmur hendeklerinin ekonomik sürdürülebilirliğe diğer bir katkısı ise, yağmur suyunu üzerindeki bitki örtüsü ile arıtarak atık su arıtma tesisine gidecek olan yağmur suyu miktarını azaltması ve dolayısıyla arıtma maliyetini düşürmesidir (Demir, 2012). Yağmur hendekleri anlatılan bu özellikleri ile kentsel ve kırsal alanlarda ekonomik sürdürülebilirliğin gelişmesine hem direkt hem de dolaylı yoldan olmak üzere önemli derecede katkı sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında yağmur hendeklerinin geleneksel sistemlere kıyasla sürdürülebilirliğini değerlendirmek için radar grafiklerinden ve altyapı sürdürülebilirlik indeksinden (ASİ) yararlanıldı. Bu indeks Chaves ve Alipaz (2007) tarafından ileri sürülen havza sürdürülebilirlik indeksi (HSİ) göz önüne alınarak oluşturuldu ve sürdürülebilirliğin 0 ile 1 arasında değişen çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerinin ortalaması olacak şekilde Denklem (3.16) ile tanımlandı.

$$ASİ = (\Ç + S + E)/3 \quad (3.16)$$

Burada; ASİ: altyapı sürdürülebilirlik indeksini, Ç: çevresel sürdürülebilirliği, S: sosyal sürdürülebilirliği, E: ekonomik sürdürülebilirliği ifade etmektedir. Yağmur hendekleri ve geleneksel sistemleri sayısal olarak karşılaştırmak için kullanılan altyapı sürdürülebilirlik indeksi ilk defa bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

Radar grafikleri çoklu kantitatif değişkenleri karşılaştırmanın bir şeklidir ve hangi değişkenlerin benzer veya farklı değerlere sahip olduklarını göstermek için kullanılır. Radar grafiklerini oluşturmak için her değişkene merkezden başlayan bir eksen verilir. Tüm eksenler aynı ölçekte ve birbirine eşit uzaklıkta olacak şekilde radyal olarak düzenlenir. Daha sonra bir eksenden diğer eksene kılavuz çizgileri oluşturulur. Elde edilen radar grafiğinde değişkene ait değer işaretlenerek bir sonraki değişkene ait değerle birleştirilir ve bu sayede bir çokgen oluşturulur. Elde edilen bu çokgen radar grafiği olarak adlandırılmaktadır. 9 değişkene ve 0 ile 5 arası değişen ölçeğe sahip örnek bir radar grafiği Şekil 3.4'te görüldüğü gibidir. Radar grafiklerinin büyüklüğü değişken sayısına ve kullanılan ölçeğe bağlı olarak artırılabilir veya azaltılabilir.



Şekil 3.4: Örnek radar grafiği.

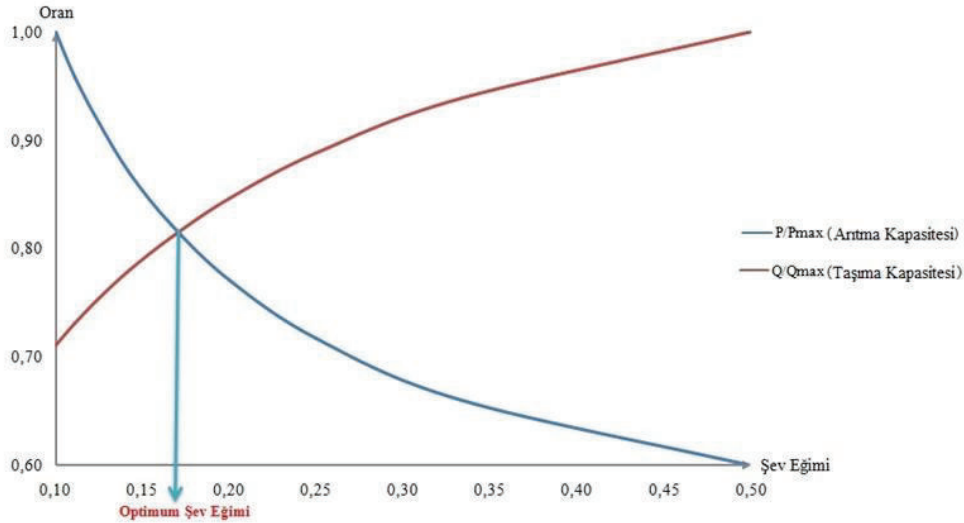
3.3. YAĞMUR HENDEKLERİ İÇİN TAŞIMA VE ARITMA KAPASİTELERİNİN OPTİMİZASYONU

Yağmur hendeklerinin arıtma ve taşıma kapasitesi hendek enkesit alanı sabit iken birbiriyle ters orantılı olarak değişmektedir. Taşıma ve arıtma kapasitesi arasındaki bu ters orantı hendeğin şev eğimi ve taban genişliğinden etkilenmektedir. Üçgen ve trapez enkesitlerde hendek şev eğiminin azalması bitki örtüsüyle temas eden yüzey miktarını arttırdığı için hendeğin arıtma performansı artmaktadır. Buna karşın hendek su derinliği azaldığı için taşıma kapasitesi azalmaktadır. Trapez enkesitlerde şev eğiminin yanı sıra taban genişliğinin artması da hendeğin arıtma performansını arttırmaktadır. Bu bölümde üçgen ve trapez enkesitli yağmur hendekleri için arıtma ve taşıma kapasitesinin optimum olduğu şev eğiminin değeri farklı su seviyeleri ve taban genişlikleri için araştırılmaktadır.

Hesaplamalarda hendek şev eğimi 1:2 ile 1:10 arasında değişmekte, arıtma için ayrılan su seviyesi ise 0,45 metreye kadar çıkmaktadır. Trapez enkesitlerde taban genişliği kontrol barajlarının olmaması durumunda 2,5 m'ye kadar, kontrol barajlarının olması durumunda ise 4,5 m'ye kadar artmaktadır. Bu kısıtlamalar yapılan literatür araştırmaları sonucunda belirlenmiştir (Claytor ve Schueler, 1996; WSUD, 2006).

Optimum şev eğiminin bulunması için öncelikle hendeğe ait taşıma kapasitesi, Manning ve süreklilik denklemleri yardımıyla bulunur. Hendeğin arıtma kapasitesi ise hendeğin suyla temas

eden ıslak çevresi (P_w) olarak tanımlanabilir. Çünkü arıtma kapasitesi hendeğin bitki örtüsüyle temas eden yüzey miktarına bağlı olup çevre ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu sebeple hendeğe ait ıslak çevre, arıtma kapasitesi olarak değerlendirilebilir. Hendeğin arıtma ve taşıma kapasitesi birim olarak birbirinden farklı olduğu için bu değerler kendi maksimum değerlerine bölünerek birimsizleştirilir ve hem arıtma hem de taşıma kapasitesi için 0 ile 1 arasında değişen değerler elde edilir. Bu değerlerin grafikleri çizdirilerek kesiştikleri nokta bulunur. Bulunan bu değer o andaki başlangıç su derinliği ve taban genişliği için optimum şev değeri olarak tanımlanabilir. Hesaba ait örnek bir grafik ile hesap tablosu Şekil 3.5 ve Tablo 3.10'da verilmektedir. Bu işlem hendek içindeki başlangıç su derinliği 0,05 ile 0,45 m arasında değişen, taban genişliği 4,5 metreye kadar çıkan trapez ve üçgen enkesitlerin her biri için uygulanmıştır. Her bir su seviyesi ve taban genişliğine karşılık gelen optimum şev değeri üçgen ve trapez enkesitler için belirlenmiş ve 9×10^7 'luk optimum şev tablosu oluşturulmuştur. Bu tabloya göre trapez ve üçgen enkesitler için genel bir optimum şev değeri belirlenmiştir.



Şekil 3.5: Optimum şev eğiminin bulunması.

Araştırılan bir diğer parametre ise optimum hidrolik yarıçapa ait değer aralığı oldu. Hidrolik yarıçapa ait bu değer aralığı üçgen ve trapez enkesitlerin optimum şev değerine göre belirlendi. Hidrolik yarıçap için de optimum şev değerinde olduğu gibi 0,05 ile 0,45 arasında değişen başlangıç su derinliği ve 4,5 m'ye kadar artan taban genişliği için hesaplamalar yapıldı. Bu hesaplamalar sonucunda optimum hidrolik yarıçap değerlerini gösteren 9×10^7 'luk sonuç matrisi oluşturuldu. Bu matrise göre üçgen ve trapez enkesitlerin optimum hidrolik yarıçap değer aralıkları bulundu. Hidrolik yarıçapa ait örnek bir hesap Tablo 3.10'da görülmektedir.

Tablo 3.10: Örnek hesap tablosu.

Hendek içindeki Başlangıç Su derinliği = 0,2 m															
Taban Uzunluğu (m)	Derinlik (m)	Manning Katsayısı (n)	m (Dikey)	k (Yatay)	Boyuna Eğim (S)	Debi (Q)	Q _{Qmax}	l/n	R ^{2/3}	S ^{1/2}	Alan (A) (m ²)	Çevre (P) (m)	Hidrolik Yarıçap (m)	P/P _{max}	Şev Eğimi (S ^o)
4	0,2	0,03	1	2	0,03	1,618	1,00	33,333333	0,32	0,1732051	0,88	4,89	0,18	0,68	0,50
4	0,192273	0,03	1	3	0,03	1,551	0,96	33,333333	0,31	0,1732051	0,88	5,22	0,17	0,73	0,33
4	0,185566	0,03	1	4	0,03	1,492	0,92	33,333333	0,29	0,1732051	0,88	5,53	0,16	0,77	0,25
4	0,179655	0,03	1	5	0,03	1,440	0,89	33,333333	0,28	0,1732051	0,88	5,83	0,15	0,81	0,20
4	0,174385	0,03	1	6	0,03	1,394	0,86	33,333333	0,27	0,1732051	0,88	6,12	0,14	0,85	0,17
4	0,169639	0,03	1	7	0,03	1,354	0,84	33,333333	0,27	0,1732051	0,88	6,40	0,14	0,89	0,14
4	0,165331	0,03	1	8	0,03	1,317	0,81	33,333333	0,26	0,1732051	0,88	6,67	0,13	0,93	0,13
4	0,161393	0,03	1	9	0,03	1,284	0,79	33,333333	0,25	0,1732051	0,88	6,92	0,13	0,97	0,11
4	0,157771	0,03	1	10	0,03	1,255	0,78	33,333333	0,25	0,1732051	0,88	7,17	0,12	1,00	0,10
3	0,2	0,03	1	2	0,03	1,226	1,00	33,333333	0,31	0,1732051	0,68	3,89	0,17	0,65	0,50
3	0,190411	0,03	1	3	0,03	1,165	0,95	33,333333	0,30	0,1732051	0,68	4,20	0,16	0,70	0,33
3	0,182338	0,03	1	4	0,03	1,113	0,91	33,333333	0,28	0,1732051	0,68	4,50	0,15	0,75	0,25
3	0,175395	0,03	1	5	0,03	1,069	0,87	33,333333	0,27	0,1732051	0,68	4,79	0,14	0,79	0,20
3	0,169325	0,03	1	6	0,03	1,030	0,84	33,333333	0,26	0,1732051	0,68	5,06	0,13	0,84	0,17
3	0,163949	0,03	1	7	0,03	0,996	0,81	33,333333	0,25	0,1732051	0,68	5,32	0,13	0,88	0,14
3	0,159136	0,03	1	8	0,03	0,967	0,79	33,333333	0,25	0,1732051	0,68	5,57	0,12	0,92	0,13
3	0,154788	0,03	1	9	0,03	0,940	0,77	33,333333	0,24	0,1732051	0,68	5,80	0,12	0,96	0,11
3	0,150832	0,03	1	10	0,03	0,916	0,75	33,333333	0,23	0,1732051	0,68	6,03	0,11	1,00	0,10
2	0,2	0,03	1	2	0,03	0,837	1,00	33,333333	0,30	0,1732051	0,48	2,89	0,17	0,60	0,50
2	0,18735	0,03	1	3	0,03	0,785	0,94	33,333333	0,28	0,1732051	0,48	3,18	0,15	0,66	0,33
2	0,1772	0,03	1	4	0,03	0,742	0,89	33,333333	0,27	0,1732051	0,48	3,46	0,14	0,72	0,25
2	0,168782	0,03	1	5	0,03	0,707	0,85	33,333333	0,26	0,1732051	0,48	3,72	0,13	0,77	0,20
2	0,161628	0,03	1	6	0,03	0,678	0,81	33,333333	0,24	0,1732051	0,48	3,97	0,12	0,82	0,17
2	0,155438	0,03	1	7	0,03	0,653	0,78	33,333333	0,24	0,1732051	0,48	4,20	0,11	0,87	0,14
2	0,15	0,03	1	8	0,03	0,631	0,75	33,333333	0,23	0,1732051	0,48	4,42	0,11	0,91	0,13
2	0,145168	0,03	1	9	0,03	0,612	0,73	33,333333	0,22	0,1732051	0,48	4,63	0,10	0,96	0,11
2	0,140832	0,03	1	10	0,03	0,595	0,71	33,333333	0,21	0,1732051	0,48	4,83	0,10	1,00	0,10
1	0,2	0,03	1	2	0,03	0,452	1,00	33,333333	0,28	0,1732051	0,28	1,89	0,15	0,54	0,50
1	0,181344	0,03	1	3	0,03	0,416	0,92	33,333333	0,26	0,1732051	0,28	2,15	0,13	0,61	0,33
1	0,167618	0,03	1	4	0,03	0,388	0,86	33,333333	0,24	0,1732051	0,28	2,38	0,12	0,68	0,25
1	0,156904	0,03	1	5	0,03	0,366	0,81	33,333333	0,23	0,1732051	0,28	2,60	0,11	0,74	0,20
1	0,148208	0,03	1	6	0,03	0,348	0,77	33,333333	0,22	0,1732051	0,28	2,80	0,10	0,80	0,17
1	0,140944	0,03	1	7	0,03	0,333	0,74	33,333333	0,21	0,1732051	0,28	2,99	0,09	0,85	0,14
1	0,134747	0,03	1	8	0,03	0,320	0,71	33,333333	0,20	0,1732051	0,28	3,17	0,09	0,91	0,13
1	0,12937	0,03	1	9	0,03	0,309	0,68	33,333333	0,19	0,1732051	0,28	3,34	0,08	0,95	0,11
1	0,124643	0,03	1	10	0,03	0,300	0,66	33,333333	0,19	0,1732051	0,28	3,51	0,08	1,00	0,10
0	0,2	0,03	1	2	0,03	0,092	1,00	33,333333	0,20	0,1732051	0,08	0,89	0,09	0,50	0,50
0	0,1633	0,03	1	3	0,03	0,084	0,91	33,333333	0,18	0,1732051	0,08	1,03	0,08	0,57	0,33
0	0,141422	0,03	1	4	0,03	0,077	0,84	33,333333	0,17	0,1732051	0,08	1,17	0,07	0,65	0,25
0	0,126491	0,03	1	5	0,03	0,072	0,78	33,333333	0,16	0,1732051	0,08	1,29	0,06	0,72	0,20
0	0,11547	0,03	1	6	0,03	0,068	0,74	33,333333	0,15	0,1732051	0,08	1,40	0,06	0,78	0,17
0	0,106905	0,03	1	7	0,03	0,065	0,70	33,333333	0,14	0,1732051	0,08	1,51	0,05	0,84	0,14
0	0,1	0,03	1	8	0,03	0,062	0,68	33,333333	0,14	0,1732051	0,08	1,61	0,05	0,90	0,13
0	0,09428	0,03	1	9	0,03	0,060	0,65	33,333333	0,13	0,1732051	0,08	1,71	0,05	0,95	0,11
0	0,089443	0,03	1	10	0,03	0,058	0,63	33,333333	0,13	0,1732051	0,08	1,80	0,04	1,00	0,10

3.4. YAĞMUR HENDEKLERİ İÇİN YENİ KRİTERLERİN BELİRLENMESİ

Yağmur hendeklerinin tasarımında kullanılan kriterler genellikle, hendeğin boyuna eğimi, şev eğimi, alt genişliği, uzunluğu, hendek içindeki suyun akım hızı, hendek su derinliği gibi kriterlerden oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında yağmur hendeklerinin tasarım kriterlerine ek olarak taşıma ve arıtma kapasitesi bakımından optimum şev eğimi ve optimum hidrolik yarıçap değer aralıkları eklenmiştir. Elde edilen optimum kriterlerin yağmur hendeklerinden daha verimli şekilde yararlanmaya ve bu hendeklerin pratik tasarımına yardımcı olacağı düşünülmektedir.

4. BULGULAR

Bu bölümde öncelikle İstanbul İlinin Kadıköy İlçesine ait Göztepe bölgesinde örnek bir yağmur hendeği hesabı hem uluslararası literatürde belirtildiği gibi hem de resmi gazetede yayımlanan yağmur suyu toplanma, depolanma ve deşarj sistemleri hakkında yönetmeliğe uygun olarak yapılmıştır. Daha sonra yağmur hendekleri ve geleneksel sistemlerin sürdürülebilirlik değerlendirmeleri ASİ ve radar grafikleri yardımıyla kıyaslanarak yorumlanmıştır. Ayrıca taşıma ve arıtma kapasitelerinin dengesinden bahsedilerek optimum şev eğimi ve optimum hidrolik yarıçap değerleri belirlenmiştir.

4.1. İSTANBUL GÖZTEPE BÖLGESİ İÇİN ÖRNEK BİR YAĞMUR HENDEĞİ HESABI

Üst yüzeyi bitki örtüsü ile kaplanmış trapez enkesitli yağmur hendeğine ait örnek bir uygulama aşağıda detaylı şekilde açıklanmaktadır. Bu uygulama için İstanbul İli Kadıköy İlçesi Göztepe İstasyonuna ait yağış şiddeti–süre–tekerrür eğrileri dikkate alınmıştır. Seçilen çalışma alanı Şekil 4.1’de görüldüğü gibidir. Bu örneğe ait veriler aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir.



Şekil 4.1: Yağmur hendeği çalışma alanı (Google Earth).

Yağmur hendeğine ve havzaya ait bilgiler:

- Toplam havza alanı: 2500 m² 'dir ve bu alanın dağılımı; yeşil alan: 1289 m², yerleşim bölgesi: 379 m², otopark: 260 m², yol: 190 m², ve yağmur hendeği: 382 m² şeklindedir,
- Arazi kullanımı: Yol ve otoparkların dahil olduğu düşük yoğunluklu kentsel yerleşim,
- Arazinin ve hendeğin boyuna eğimi: %2,
- Toplam akım yolu uzunluğu (L_T): 90 m,
- Yağmur hendeğinin toplam uzunluğu (L_H): 90 m,
- Horton pürüzlülük katsayısı (n^*): 0,20 (Tablo 3.1 'de çimler bölümünde verilen aralıktan seçilmiştir),
- Savak katsayısı (C_W): 1,66 (0,2 m genişlik, 0,2 m savak yüküne göre Tablo 3.8'den seçilmiştir),
- Debi katsayısı (C_d): 0,6 (keskin kenarlı orifis tipi için Şekil 3.1'den seçilmiştir),
- Yağmur hendeğinin hesabı için İstanbul İli Göztepe Meteoroloji İstasyonuna ait yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrileri kullanılmıştır. Bu eğriler EK 1 'de verilmektedir (MGM).

Hendek tabanında bulunan zemin tabakalarına ait bilgiler (WSUD, 2006):

- Kumlu zeminden oluşan filtre tabakasının kalınlığı: 600 mm,
- Kumlu zemine ait doymuş hidrolik iletkenlik: 180 mm/sa,
- Geçiş tabakasının kalınlığı: 100 mm,
- Drenaj tabakasının kalınlığı: 200 mm.

Delikli drenaj borusuna ait bilgiler (WSUD, 2006):

- Boru eğimi: % 0,5,
- Manning katsayısı: 0,02,
- Boru çapı: 100 mm,
- Delik genişliği: 1,5 mm,
- Delik uzunluğu: 7,5 mm,
- Net delik açıklığı: 2100 mm²/m.

4.1.1. Literatür Araştırmasına Göre Yapılan Kapasite Hesapları

4.1.1.1. Pik Debinin Hesaplanması

Pik debi hesapları 10 ve 100 yıllık taşkın debileri dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu iki hesap birbirine çok benzemesine rağmen detaylı olarak aşağıda anlatılmaktadır.

a) 10 yıllık taşkın debisine göre;

Denklem (3.2) ve EK 1’de verilen İstanbul İli Göztepe Meteoroloji İstasyonuna ait yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrileri kullanılarak 10 yıllık taşkın debisine göre geçiş süresinin hesabında toplam akım yolu uzunluğunun en fazla 50 metresi tabaka akımı olarak kabul edilip geri kalan 40 metresinin kanal akımı şeklinde hesaplanması gerekir. Tabaka akımının geçiş süresi Denklem (3.2), kanal akımının geçiş süresi ise Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanır.

$$t_{tabaka} = 6,94 * \frac{(50 * 0,20)^{0,6}}{(73)^{0,4} * (0,02)^{0,3}} = 16,05 dk$$

Yukarıdaki denklemde t_{tabaka} ile EK 1’de verilen İstanbul İli Göztepe Meteoroloji İstasyonunun yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrilerindeki 10 yıllık taşkına ait yağış şiddeti (I_{10}) değeri eşleşinceye kadar iterasyon yapılmalıdır.

$$t_{kanal} = 40/(60 * 0,7) = 0,95 dk$$

Ortalama akım hızı, EK 2’de verilen ortalama akarsu hızına göre 0,7 m/s kabul edilerek kanal akımı geçiş süresi (t_{kanal}) hesaplanmıştır.

$$t_c = t_{tabaka} + t_{kanal} = 17,0 dk$$

Toplam geçiş süresine (t_c) göre 10 yıllık yağış şiddeti (I_{10}), EK 1’de verilen İstanbul İli Göztepe Meteoroloji İstasyonuna ait yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrilerinden **71 mm/sa** olarak okunur.

b) 100 yıllık taşkın debisine göre;

$$t_{tabaka} = 6,94 * \frac{(50 * 0,20)^{0,6}}{(140)^{0,4} * (0,02)^{0,3}} = 12,3 dk$$

Yukarıdaki denklemde t_{tabaka} ile EK 1’de verilen İstanbul İli Göztepe Meteoroloji İstasyonunun yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrilerindeki 100 yıllık taşkına ait yağış şiddeti (I_{100}) değeri eşleşinceye kadar iterasyon yapılmalıdır.

$$t_{kanal} = 40/(60 * 0,7) = 0,95 dk$$

Ortalama akım hızı, EK 2’de verilen ortalama akarsu hızına göre 0,7 m/s kabul edilerek kanal akımı geçiş süresi (t_{kanal}) hesaplanmıştır.

$$t_c = t_{tabaka} + t_{kanal} = 13,2 \text{ dk}$$

Toplam geçiş süresine (t_c) göre 100 yıllık yağış şiddeti (I_{100}), EK 1'de verilen İstanbul İli Göztepe Meteoroloji İstasyonuna ait yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrilerinden **138 mm/sa** olarak okunur.

10 yıllık tekrarlama sıklığına ve 1 saatlik yağış süresine sahip yağış şiddeti ($^1I_{10}$) değeri yine İstanbul İli Göztepe Meteoroloji İstasyonuna ait yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrilerinden belirlenir. Bu değer EK 1'den **31 mm/sa** olarak okunmuştur. Aynı zamanda Tablo 3.2'den bölgenin geçirimsizlik oranı (f_i) düşük yoğunluklu kentsel bölgeler (yollar dahil) için **0,7** olarak seçilebilir. Bu değerlere göre; Tablo 3.3'ten 10 yıllık yüzeysel akış katsayısı (C_{10}) 0,6 ile 0,8 arasındaki 0,7 değerine göre hesaplanarak **0,725** olarak bulunur. 100 yıllık yüzeysel akış katsayısı (C_{100}) ise Tablo 3.5'teki frekans faktörüne göre Denklem (3.4) ile hesaplanır.

$$C_{100} = 1,2 * 0,725 = 0,870$$

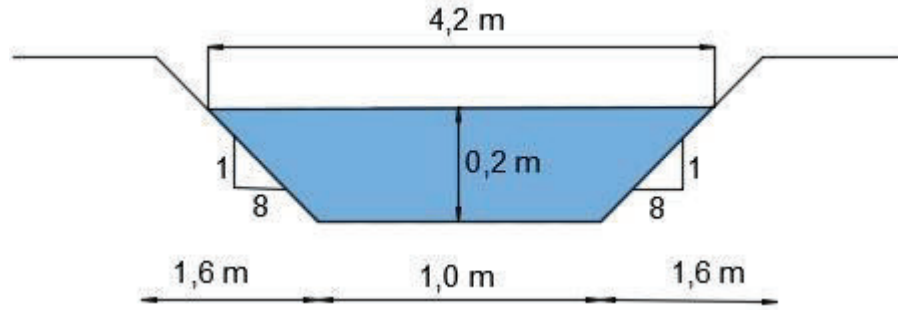
Bulunan C_{100} değeri 1'den küçük olduğundan aynen kullanılır (1'den büyük olması durumunda 1 alınması gerekir). Tüm bu değerler bulunduktan sonra Denklem (3.1) kullanılarak 10 ve 100 yıllık pik debiler hesaplanır.

$$Q_{10} = \frac{0,725 * 71 * 0,25}{360} = 0,036 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{100} = \frac{0,870 * 138 * 0,25}{360} = 0,083 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.1.1.2. Yağmur Hendeği Kapasitesinin Hesaplanması

İnşa edilmesi planlanan yağmur hendeğinin enkesit tipi ve boyutları Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu enkesite ait parametrelerin hesabı, EK 3'teki trapez enkesit formülleri kullanılarak $A_w = 0,52 \text{ m}^2$, $P_w = 4,22 \text{ m}$ ve $R_h = 0,123 \text{ m}$ olarak bulunmuştur. Hidrolik yarıçap (R_h) ve hendek eğimi (S) kullanılarak Tablo 3.6'dan Manning katsayısı (n) yaklaşık olarak 0,072 olarak okunmuştur.



Şekil 4.2: Trapez enkesitli yağmur hendeği.

Daha sonra Denklem (3.5) kullanılarak hendekteki ortalama hız hesaplanır. Bu değer süreklilik denklemine göre hendek en kesit alanı ile çarpılarak hendeğin taşıyacağı kapasite belirlenir.

$$V_{ort} = \frac{1}{0,072} * (0,123)^{2/3} * (0,02)^{1/2} = 0,485 \text{ m/s}$$

$$Q_{Kap} = 0,485 * 0,52 = 0,253 \text{ m}^3/\text{s}$$

Hesaplanan 10 yıllık ($0,036 \text{ m}^3/\text{s}$) ve 100 yıllık ($0,083 \text{ m}^3/\text{s}$) pik debilerden daha büyük taşıma kapasitesi ($0,253 \text{ m}^3/\text{s}$) bulunduğu için yağmur hendeği bu akımı mevcut boyutlarıyla güvenli bir şekilde taşıyabilecektir. Eğer bu değer 10 ve 100 yıllık pik debilerden daha küçük olsa idi, boyutlar artırılarak tüm hesapların tekrarlanması gerekirdi.

4.1.1.3. Minimum Hidrolik Kalış Süresinin Hesaplanması

Yağmur hendeğinde bulunan yağmur suyunun yeterince arıtılabilmesi için minimum 9 dk hendek içinde kalması gerekmektedir. 10 ve 100 yıllık taşkın debileri için minimum hidrolik kalış süresi, süreklilik denklemi ve Denklem (3.6) kullanılarak hesaplanır.

a) 10 yıllık taşkın debisi için;

Bu hesaplamada hendeğe ait hız, 10 yıllık taşkın pik debisi ve hendek enkesit alanı kullanılarak bulunmuştur.

$$v = \frac{Q_{10}}{A} = \frac{0,036}{0,52} = 0,069 \text{ m/s}$$

$$t_{kalış} = 90 / (60 * 0,069)$$

$$t_{kalış} = 22 \text{ dk} > 9 \text{ dk} \text{ olduğundan uygundur.}$$

b) 100 yıllık taşkın debisi için;

Bu hesaplamada hendeğe ait hız, 100 yıllık taşkın pik debisi ve hendek enkesit alanı kullanılarak bulunmuştur.

$$v = \frac{Q_{100}}{A} = \frac{0,083}{0,52} = 0,159 \text{ m/s}$$

$$t_{kalış} = 90 / (60 * 0,159)$$

$$t_{kalış} = 9,5 \text{ dk} > 9 \text{ dk} \text{ olduğundan uygundur.}$$

10 ve 100 yıllık taşkın debisine göre yapılan hesapta kalış süresinin 9 dakikadan daha küçük çıkması durumu için yağmur hendeğinin uzunluğu, hendek içindeki suyun kalış süresi minimum 9 dakika alınarak tekrar hesaplanmalı ve bu hesaba göre yağmur hendeğinin minimum uzunluğu belirlenmelidir. Denklem (3.6) kullanılarak yağmur hendeğinin olması gereken minimum uzunluğu hesaplanabilir.

4.1.1.4. Hız Kontrolü

Değişik derinlikler için Manning denklemi ile bulunan hız değerleri ve hendek enkesit alanının çarpımı ile bulunan debi miktarları Tablo 4.1’de verilmiştir.

10 yıllık taşkın debisine (0,036 m³/s) göre derinlik Tablo 4.1’den iterasyonla 0,078 m olarak belirlenir. Bu değer yardımıyla Tablo 4.1’den Manning katsayısı, hidrolik yarıçap ve eğim değerleri sırası ile 0,081, 0,055 m ve 0,02 olarak bulunur. Bulunan tüm değerler Denklem (3.5)’te yerine konularak 10 yıllık taşkın meydana gelmesi durumunda yağmur hendeğinde oluşacak hız hesaplanır. Bulunan hız değeri 10 yıllık taşkın debisi için 0,5 m/s’den küçük olmalıdır. Benzer işlemler 100 yıllık taşkın (0,083 m³/s) meydana gelmesi durumuna göre tekrarlanarak 100 yıllık taşkın debisi sırasında hendekte oluşacak hız belirlenebilir. Bu değer hendek tabanının oyulmasını önlemek için 2,0 m/s’den küçük olmalıdır.

$$V_{10} = \frac{1}{0,081} * (0,055)^{2/3} * (0,02)^{1/2} = 0,25 \text{ m/s} < 0,5 \text{ m/s} \text{ olduğundan uygun.}$$

$$V_{100} = \frac{1}{0,081} * (0,083)^{2/3} * (0,02)^{1/2} = 0,33 \text{ m/s} < 2,0 \text{ m/s} \text{ olduğundan uygun.}$$

Tablo 4.1: Hesaplanan derinlik–debi ilişkisi.

Derinlik (m)	Manning Katsayısı (n)	Hidrolik Yarıçap (R _h)	Hendek Eğimi (S)	Hendek En Kesit Alanı (m ²)	Debi (m ³ /s)
0,025	0,081	0,021	0,02	0,030	0,004
0,05	0,081	0,039	0,02	0,070	0,014
0,10	0,081	0,069	0,02	0,180	0,053
0,11	0,081	0,075	0,02	0,207	0,064
0,12	0,081	0,080	0,02	0,235	0,076
0,13	0,081	0,086	0,02	0,265	0,090
0,14	0,081	0,091	0,02	0,297	0,105
0,15	0,081	0,097	0,02	0,330	0,121
0,16	0,080	0,102	0,02	0,365	0,141
0,17	0,078	0,107	0,02	0,401	0,164
0,18	0,076	0,113	0,02	0,439	0,191
0,19	0,074	0,118	0,02	0,479	0,220
0,20	0,072	0,123	0,02	0,520	0,253

4.1.1.5. Hız x Derinlik Kontrolü**a) 10 yıllık taşkın debisine sahip düşük riskli bölgeler için;**

$$0,078 * 0,25 = 0,0195 \text{ m}^2/\text{s} < 0,6 \text{ m}^2/\text{s} \text{ olduğundan uygundur.}$$

b) 100 yıllık taşkın debisine sahip yüksek riskli bölgeler için;

$$0,125 * 0,33 = 0,0412 \text{ m}^2/\text{s} < 0,4 \text{ m}^2/\text{s} \text{ olduğundan uygundur.}$$

4.1.1.6. Savak Uzunluğunun Hesaplanması ve Boyutlandırılması

10 ve 100 yıllık taşkın debisini taşıyan yağmur hendekleri için savak uzunluğu Denklem (3.7) kullanılarak hesaplanmaktadır.

a) 10 yıllık taşkın debisi için;

$$0,036 = 0,5 * 1,66 * L_S * (0,2)^{3/2}$$

Buradan 10 yıllık taşkın debisini taşıyan yağmur hendeğinin savak uzunluğu 0,48 m olarak bulunur. Bulunan değer savağın toplam çevre uzunluğu olduğu için savak 0,12 m x 0,12 m olarak boyutlandırılabilir.

b) 100 yıllık taşkın debisi için;

$$0,083 = 0,5 * 1,66 * L_S * (0,2)^{3/2}$$

Buradan 100 yıllık taşkın debisini taşıyan yağmur hendeğinin savak uzunluğu 1,12 m olarak bulunur. Bulunan değer savağın toplam çevre uzunluğu olduğu için savak 0,28 m x 0,28 m olarak boyutlandırılabilir.

4.1.1.7. Orifis Alanının Hesaplanması ve Boyutlandırılması

10 ve 100 yıllık taşkın debisi için suya gömülmüş halde bulunan çıkış akımları Denklem (3.8) kullanarak hesaplanmaktadır.

a) 10 yıllık taşkın debisi için;

$$0,036 = 0,5 * 0,6 * A_o * \sqrt{2 * 9,81 * 0,2}$$

Buradan orifisin toplam alanı 10 yıllık taşkın debisi için (A_o) 0,060 m² olarak bulunur ve orifis 0,24 m x 0,24 m olacak şekilde boyutlandırılabilir.

b) 100 yıllık taşkın debisi için;

$$0,083 = 0,5 * 0,6 * A_o * \sqrt{2 * 9,81 * 0,2}$$

Buradan orifisin toplam alanı 100 yıllık taşkın debisi için (A_o) 0,14 m² olarak bulunur ve orifis 0,37 m x 0,37 m olacak şekilde boyutlandırılabilir.

4.1.1.8. Filtre Tabakasına ait Sızma Hızının Hesaplanması

Filtre tabakasının sızma hızı Denklem (3.9) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu denklemdeki hidrolik iletkenlik değeri kumlu zeminler için 180 mm/sa ($5 * 10^{-5}$ m/s) olarak belirlenmiştir.

$$Q_{max} = 5 * 10^{-5} * 90 * 1 * \left(\frac{0,2 + 0,6}{0,6} \right)$$

$$Q_{max} = 0,006 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.1.1.9. Delikli Drenaj Borusuna ait Delik Kapasitesinin Hesaplanması

Delikli drenaj borusuna ait delik kapasitesi Denklem (3.10) kullanılarak hesaplanmaktadır.

Delikli borunun merkezi üzerindeki su derinliği (h_d): 0,2 m (hendekteki su derinliği) + 0,6 m (filtre tabakası kalınlığı) + 0,1 m (geçiş tabakası) + 0,1 m (drenaj tabakası kalınlığının yarısı) + 0,05 m (delikli borunun merkezi üzerindeki derinlik) = 1,05 m

Bir metredeki delik sayısı: $2100/(1,5 * 7,5) = 186,6$ adet

$$Q_{delik} = 0,5 * [0,6 * (0,0015 * 0,0075) * \sqrt{2 * 9,81 * 1,05}] * 186,6$$

$$Q_{delik} = 0,0029 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1 metredeki delik kapasitesi)}$$

Toplam delik kapasitesi= 1 metredeki delik kapasitesi*toplam hendek uzunluğu

$$\text{Toplam delik kapasitesi} = 0,0029 * 90 = 0,261 \text{ m}^3/\text{s}$$

Toplam delik kapasitesi (0,261 m³/s) sızma hızından (0,006 m³/s) büyük olduğu için bir boruda bulunan delik sayısı ve kapasitesi yeterlidir.

4.1.1.10. Delikli Drenaj Borusuna ait Kapasite Hesabı

Drenaj borusunun kapasite hesabı için öncelikle Denklem (3.5)'te verilen Manning denklemi yardımıyla ortalama hız bulunur. Daha sonra bu hız boru enkesit alanı ile çarpılarak delikli drenaj borusunun kapasitesi hesaplanır. Denklem (3.5)'teki Manning katsayısı PVC borular için 0,02 olarak seçilmiştir. Aynı zamanda hidrolik yarıçap dairesel borular için çapın dörtte biri alınarak ($R_h = D/4$) hesaplanmıştır.

$$V_{ort} = \frac{1}{0,02} * \left(\frac{0,1}{4}\right)^{2/3} * (0,005)^{1/2}; V_{ort} = 0,302 \text{ m/s}$$

$$Q_{Kap} = 0,302 * \left(\frac{\pi * 0,1^2}{4}\right); Q_{kap} = 0,0024 \text{ m}^3/\text{s}$$

$Q_{Kap} = 0,0024 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{max} = 0,006 \text{ m}^3/\text{s}$ olduğundan 3 adet delikli drenaj borusu kullanılmalıdır.

4.1.2. Yağmur Suyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Yönetmeliğine Göre Yapılan Kapasite Hesabı

4.1.2.1. Pik Debinin Hesaplanması

Yüzeysel akışın meydana getirdiği pik debinin hesaplanabilmesi için giriş ve akış sürelerinin toplamından oluşan geçiş süresinin bilinmesi gerekir. Giriş süresi EK 4'te verilmiş olan abak yardımıyla hesaplanabilir. Yönetmelikte giriş ve akış akımlarının uzunlukları hakkında bir ayırım yoktur. Bu yüzden giriş süresinin hesabında yüzeysel akış uzunluğu uluslararası

literatürde belirtildiği şekilde maksimum 50 metre olarak alınmış, geri kalan 40 metresi ise akış süresi olarak değerlendirilmiştir. Bu hesap sonucu giriş süresi ($t_{giriş}$) yaklaşık 17,5 dk olarak belirlenmiştir. Akış süresi ise Denklem (3.15) kullanılarak hesaplanabilir. Akış süresinin hesabında gerekli olan hız, yönetmelikte geçen minimum hız (0,5 m/s) şartından belirlenmiştir.

$$t_{akış} = 40 / (60 * 0,5) = 1,33 \text{ dk}$$

$$t_c = t_{giriş} + t_{akış} = 19 \text{ dk}$$

Bulunan toplam geçiş süresine ($t_c = 19 \text{ dk}$) göre EK 1'de verilen İstanbul İli Göztepe Meteoroloji İstasyonuna ait yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrileri kullanılarak 10 yıllık yağış şiddeti **67 mm/sa**, 100 yıllık yağış şiddeti ise **100 mm/sa** olarak belirlenir. Bu değerler mm/dk cinsinden ifade edilerek Denklem (3.12) ile 10 ve 100 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışlar için yağmur verimi hesaplanır. Daha sonra Denklem (3.11) kullanılarak 10 ve 100 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışlar için pik debi hesaplanır. Denklem (3.11)'deki yüzeysel akış katsayısı Tablo 3.9'dan çok katlı ayırık nizam konut alanları bölümünden 0,5 olarak seçilebilir.

a) 10 yıllık taşkın debisine göre yağmur verimi;

$$r = 166,7 * (67/60) = 186,14 \text{ (L/s - ha)}$$

b) 100 yıllık taşkın debisine göre yağmur verimi;

$$r = 166,7 * (100/60) = 277,83 \text{ (L/s - ha)}$$

a) 10 yıllık taşkın debisine göre pik debi;

$$Q_{10} = 0,5 * 186,14 * 0,25$$

$$Q_{10} = 23,26 \text{ L/s} = 0,02326 \text{ m}^3/\text{s}$$

b) 100 yıllık taşkın debisine göre pik debi;

$$Q_{100} = 0,5 * 277,83 * 0,25$$

$$Q_{100} = 34,72 \text{ L/s} = 0,03472 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİNİN SONUÇLARI

Bu bölümde yağmur hendeklerinin türleri ve geleneksel sistemler sürdürülebilirlik bakımından kentsel ve kırsal bölgelere sağladıkları faydalar açısından değerlendirilerek karşılaştırıldı. Değerlendirme için yağmur hendeklerinin sürdürülebilirliğe sağladığı 31 katkı; çevresel, sosyal ve ekonomik (çevresel 21, sosyal 6, ekonomik 4) alt başlıkları ile gruplandırıldı. Bu 31 katkının çevresel, sosyal ve ekonomik olarak sınıflandırılması sırasıyla Ç, S ve E kısaltmaları ile gösterildi. Daha sonra hendek türüne ve geleneksel sistemlere göre her bir katkı için 0 ile 5 arasında değişen makale, tez ve raporlara dayanan bir puanlama yapıldı. Bu puanlamanın dayandığı literatür araştırması Tablo 4.2'de verilmektedir. Yapılan bu puanlama ile ıslak ve kuru yağmur hendekleri ile geleneksel sistemlere ait çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik oranları belirlendi. Ayrıca Denklem (3.16) ile tanımlanan ASİ değerleri hesaplanarak bu sistemler sürdürülebilirlik açısından karşılaştırıldı. Puanlama sonucunda ıslak ve kuru yağmur hendekleri ile geleneksel sistemlere ait üç ayrı radar grafiği oluşturuldu. Daha sonra bu grafikler birleştirilerek tek bir radar grafiği elde edildi. Bu grafiğe göre ıslak ve kuru yağmur hendekleri ile geleneksel sistemlerin görsel olarak kıyaslanması yapıldı. Islak ve kuru yağmur hendekleri ile geleneksel sistemlere ait radar grafikleri sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te ve tüm sisteme ait radar grafiği ise Şekil 4.6'da verilmektedir.

ASİ'ye göre yapılan karşılaştırmada geleneksel sistemlerin % 19, ıslak yağmur hendeklerinin %43 ve kuru yağmur hendeklerinin ise %60 oranında sürdürülebilirliğe katkı sağladığı görüldü ve bu durum radar grafikleri ile desteklendi. Ayrıca ıslak ve kuru yağmur hendeklerinin de kendi içinde sürdürülebilirliğe farklı şekillerde ve oranlarda katkıları olduğu ve bu katkıların yağmur hendeği türünün seçiminde önemli olduğu tespit edildi. Islak yağmur hendeklerinin daha çok su kalitesi, bioçeşitlik ve ekolojik hayata katkı sağlama noktalarında ön plana çıktığı; kuru yağmur hendeklerinin ise YAS ve sızma miktarını arttırma, sel ve taşkın olaylarını azaltma, yerleşim bölgelerine uygulanabilme, bakım kolaylığı ve bölgeye estetik değer katma değişkenlerinde ıslak yağmur hendeklerine göre daha baskın olduğu görüldü. Bu durum ıslak yağmur hendeklerinin çevresel sürdürülebilirliğe (ıslak yağmur hendeği %56, kuru yağmur hendeği %46) biraz daha fazla katkı sağladığını, kuru yağmur hendeklerinin ise sosyal ve ekonomik yönlerden daha üstün olduğunu gösterdi. Sonuç itibariyle yağmur hendeklerinin geleneksel sistemlere göre her bakımdan daha üstün olduğu belirlendi.

Tablo 4.2: Literatür araştırması.

Özellik	Puan	A ²⁰	Puan	B ²¹	Puan	C ²²
Ç1: Su Kalitesini Arttırma	4	(Tang ve diğ., 2016; WSCC, 2013) ²³	3	(EA, 2012; NWRM, 2013; WSCC, 2013)	0	(Demir, 2012) ²⁴
Ç2: Bioçeşitliliği Arttırma	4	(EA, 2012; WSCC, 2013) ²³	3	(EA, 2012; NWRM, 2013)	0	*
Ç3: Ekolojik Hayata Katkı Sağlama	5	(EA, 2012; WSCC, 2013) ²³	3	(NWRM, 2013)	0	(TCKB, 2014) ²⁴
Ç4: Kirletici Kaynaklarını Azaltma	0	*	0	(NWRM, 2013)	0	*
Ç5: İklim Değişikliğini Azaltma	3	(ASWM, 2015) ²³	2	(NWRM, 2013; WSCC, 2013)	0	*
Ç6: Doğal Gübre Oluşturma	1	(Bakır ve diğ., 2011) ²⁴	3	(Bakır ve diğ., 2011) ²⁴	0	*
Ç7: Sel ve Taşkınların Etkisini Azaltma	3	(CASQA, 2003) ²⁴	4	(NWRM, 2013; Xie ve diğ., 2017) ²⁴	2	(Sert, 2013) ²⁴
Ç8: Hava Kalitesini Arttırma	3	*	2	(CNT, 2010 ²⁴ ; NWRM, 2013)	0	(Sert, 2013) ²⁴
Ç9: CO ₂ Miktarını Azaltma	2	(Mitsch ve diğ., 2013) ²³	1	(NWRM, 2013)	0	(Sert, 2013) ²⁴
Ç10: Yüzeysel Akış Miktarını Azaltma	3	(DCC, 2005 ²³ ; Tang ve diğ., 2016; WSCC, 2013) ²³	3	(DCC, 2005; NWRM, 2013; Lashford ve diğ., 2014)	0	*
Ç11: Yağış Rejimini Düzenleme	2	*	1	(NWRM, 2013)	0	*
Ç12: Evapotranspirasyonu Arttırma	3	*	2	(NWRM, 2013)	0	(Ekşi, 2016) ²⁴
Ç13: Kentsel Isı-Ada Etkisini Azaltma	3	(Wang ve Zhu, 2011) ²³	2	(CNT, 2010 ²⁴ ; NWRM, 2013)	0	*
Ç14: Kirletici Yollarını Kesme	3	(Tang ve diğ., 2016)	3	(NWRM, 2013)	0	*
Ç15: Yüzeysel Akışı Depolama	3	(BMP Minnesota, 2001a) ²⁴	2	(NWRM, 2013)	0	*

²⁰A: Islak Yağmur Hendeği.²¹B: Kuru Yağmur Hendeği.²²C: Geleneksel Sistemler.²³Islak yağmur hendekleri sulak alanlara benzer özellik gösterdiği için puanlama sulak alan özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır.²⁴Puanlama ilgili makale/rapor/tez dikkate alınarak yazarlar tarafından yapılmıştır.

*Puanlama yazarların görüş ve deneyimleri doğrultusunda yapılmıştır.

Tablo 4.2 (Devam): Literatür araştırması.

Özellik	Puan	A ²⁰	Puan	B ²¹	Puan	C ²²
Ç16: Sulak Alan Oluşturma	3	(Tang ve diğ., 2016)	0	*	0	*
Ç17: Karasal Alan Oluşturma	1	*	3	(NWRM, 2013; WSCC, 2013)	1	*
Ç18: Doğal Biokütle Üretimi	2	(NWRM, 2013)	1	(NWRM, 2013)	0	*
Ç19: Yüzeysel Akışı Yavaşlatma	5	(EA, 2012) ²³	5	(DCC, 2005; EA, 2012; NWRM, 2013)	0	*
Ç20: YAS ve Sızmayı Artırma	2	(WSCC, 2013) ²³	3	(NWRM, 2013; WSCC, 2013; CLCA, 2011)	0	(Demir, 2012) ²⁴
Ç21: Erozyonu Önleme	4	(CASQA, 2003; Bakır ve diğ., 2011) ²⁴	3	(NWRM, 2013; CLCA, 2011)	0	(Müftüoğlu ve Perçin, 2015) ²⁴
Çevresel Etki Oranı	%56		%46		%3	
S1: Bölgeye Estetik Değer Katma	2	(EA, 2012; WSCC, 2013) ²³	3	(CNT, 2010 ²⁴ ; EA, 2012; CLCA, 2011)	0	*
S2: Sürüş Güvenliği Sağlama	3	(BMP Boston, 2013) ²⁴	4	(BMP Boston, 2013) ²⁴	2	*
S3: Yerleşim Yerlerine Uygulanabilirlik	1	(BMP Minnesota, 2001a) ²⁴	5	(DCC, 2005; NWRM, 2013)	5	*
S4: Bakım Kolaylığı	1	(EA, 2012) ²³	4	(NWRM, 2013; CLCA, 2011)	3	(Demir, 2012) ²⁴
S5: Dinlenme Alanı Sağlama	0	(Ceron ve diğ., 2015) ²⁴	1	(NWRM, 2013)	0	*
S6: Bataklık ve Koku Oluşturmama	0	(CASQA, 2003) ²⁴	5	*	5	*
Sosyal Etki Oranı	%23		%73		%50	
E1: Ekonomik Olma	3	(MDE ve CWP, 2000)	3	(EA, 2012; NWRM, 2013; CLCA, 2011)	1	(Demir, 2012) ²⁴
E2: Ürün Çeşitliliği ve Verimini Arttırma	3	(Bakır ve diğ., 2011) ²⁴	4	(Bakır ve diğ., 2011) ²⁴	0	*
E3: Enerji Tasarrufu Sağlama	4	(Bakır ve diğ., 2011) ²⁴	5	(Bakır ve diğ., 2011) ²⁴	0	(Sert, 2013) ²⁴
E4: Enerji Üretimi	0	*	0	(NWRM, 2013)	0	(Sert, 2013) ²⁴
Ekonomik Etki Oranı	%50		%60		%5	
ASİ	%43		%60		%19	

²⁰A: Islak Yağmur Hendeği.²¹B: Kuru Yağmur Hendeği.²²C: Geleneksel Sistemler.²³Islak yağmur hendekleri sulak alanlara benzer özellik gösterdiği için puanlama sulak alan özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır.²⁴Puanlama ilgili makale/rapor/tez dikkate alınarak yazarlar tarafından yapılmıştır.

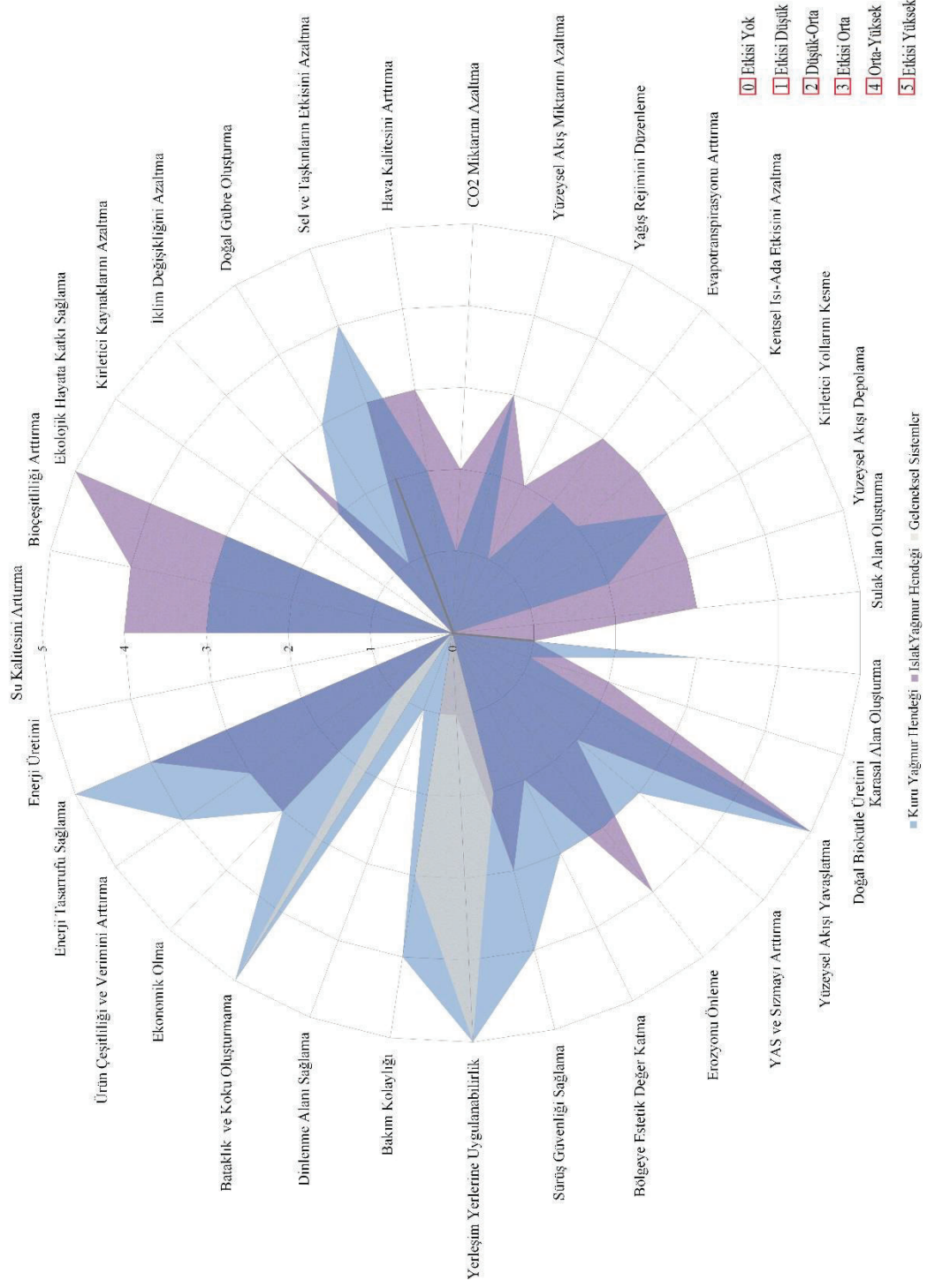
*Puanlama yazarların görüş ve deneyimleri doğrultusunda yapılmıştır.



Şekil 4.3: Islak yağmur hendegine ait radar grafiği.



Şekil 4.4: Kuru yağmur hendegine ait radar grafiği.



Şekil 4.6: Tüm sisteme ait radar grafiği.

4.3. OPTİMUM ŞEV EĞİMİ

Yağmur hendekleri hem yüzeysel akışı toplayarak hendek içinde taşıma hem de bu suyu yüzeyinde bulunan bitki örtüsü ile arıtma amacıyla tasarlanmaktadır. Bölgenin topografik şartları ve hendeğin kullanım amacı doğrultusunda bazı yerlerde taşıma ön plana çıkarken bazı yerlerde arıtma daha ön planda olmaktadır. Taşıma kapasitesinin daha yüksek olması istenen yağmur hendeklerinde şev eğimleri daha yüksek seçilirken arıtma kapasitesinin daha yüksek olması istenen yerlerde şev eğimleri daha düz seçilmelidir. Yapılan literatür araştırmasına göre taşıma kapasitesinin yüksek olması istenen bölgelerde şev eğimi maksimum 1:2 (düşey: yatay) olarak seçilirken, arıtma kapasitesinin yüksek olması istenen bölgelerde şev eğimi maksimum 1:10 (düşey: yatay) olarak seçilmektedir (Claytor ve Schueler, 1996; WSUD, 2006).

Taşıma ve arıtma kapasitelerinin optimum olduğu şev eğimi ise literatürde belirtilmemektedir. Bu tez çalışması kapsamında bu iki değişkenin optimum olduğu şev eğimi, üçgen ve trapez enkesitler için araştırılmaktadır.

Yapılan çalışmalara göre üçgen enkesitler için optimum şev değeri, hendek içindeki su derinliğinden bağımsız olarak 0,20 ile 0,17 (1:5 ile 1:6) değerleri arasında bulunmuştur. Trapez enkesitler için ise optimum şev değeri, hendeğin taban genişliğine ve içinde bulunan su derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Taban genişliğinin maksimum 2,5 m olduğu ve içinde kontrol barajının bulunmadığı trapez enkesitli yağmur hendeklerinde optimum şev değeri, genel olarak 0,20 ile 0,17 (1:5 ile 1:6) arasında değişirken, taban genişliğinin arttığı ve su derinliğinin azaldığı durumlarda optimum şev eğimi 0,17 (1:6)'ye yaklaşmaktadır. Kontrol barajının bulunduğu trapez enkesitli yağmur hendeklerinde ise optimum şev eğimi genel olarak 0,17 (1:6) olmakla birlikte bazı durumlarda 0,14 (1:7)'e bazı durumlarda ise 0,20 (1:5)'ye yaklaşmaktadır. Bu tez çalışmasında uygulama kolaylığı olması açısından hem üçgen hem de trapez enkesitli yağmur hendekleri için optimum şev eğiminin 0,17 (1:6) olarak dikkate alınması yapılan çalışmalar sonucunda tavsiye edilmektedir. Üçgen ve trapez enkesitler için hendek başlangıç su derinliği ve taban genişliğine bağlı olarak değişen optimum şev değerine ait 9x10'luk sonuç matrisi Tablo 4.3'te verilmektedir.

4.4. OPTİMUM HİDROLİK YARIÇAP

Hidrolik yarıçap ıslak alanın ıslak çevreye oranı olarak tanımlanmaktadır. Taşıma kapasitesinin yüksek olması istenen bölgelere inşa edilen yağmur hendeklerinde hidrolik yarıçap değerinin mümkün mertebe fazla olması gerekir iken, arıtma kapasitesinin yüksek olması istenen bölgelere inşa edilen yağmur hendeklerinde bu değer mümkün olduğunca az olması gerekmektedir. Hem taşıma hem de arıtma kapasitesinin aynı anda en iyi durumda olması için ise gerekli hidrolik yarıçap değeri optimum şev değerine bağlı olarak belirlenmektedir. Bu bölümde arıtma ve taşıma kapasiteleri bakımından optimum hidrolik yarıçap değeri araştırılmaktadır.

Yapılan çalışmalara göre şev eğimi 1:2 ile 1:10 arasında değişen, maksimum su derinliği 0,45 metreye kadar artan üçgen enkesitler için optimum hidrolik yarıçap değeri 0,01 ile 0,14 arasında hesaplanmıştır. Trapez enkesitler için ise optimum hidrolik yarıçap değerinin, kontrol barajlarının olmaması durumunda 0,03 ile 0,25 değerleri arasında, olması durumunda ise 0,04 ile 0,28 değerleri arasında değiştiği belirlenmiştir. Üçgen ve trapez enkesitler için hendek başlangıç su derinliği ve taban genişliğine bağlı olarak değişen optimum hidrolik yarıçap değerleri Tablo 4.4'te verilmektedir.

Optimum hidrolik yarıçap değerinin üçgen ve trapez enkesitlerde ortalama bir değer olarak verilmesi yapılacak hesapları kolaylaştıracaktır. Bu sebeple üçgen enkesitler için ortalama optimum hidrolik yarıçap değeri 0,07 olarak belirlenmiştir. Trapez enkesitler için ise bu değer hendek içinde kontrol barajının olmaması durumunda 0,13 ve kontrol barajı olması durumunda 0,16 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 4.4 yardımıyla belirlenmiştir. Hesaplanan ortalama optimum hidrolik yarıçap değerlerinin yağmur hendeği enkesit elemanlarının belirlenmesinde yardımcı olacağı düşünülmektedir. Örneğin taban genişliği ve şev eğimi belirlenen trapez enkesitli hendeklerdeki su derinliğinin hesaplanmasına katkı sağlayacaktır.

Tablo 4.4: Hendek su derinliği ve taban genişliğine bağlı optimum hidrolik yarıçap.

Optimum Hidrolik Yarıçap (m)	Hendek Taban Genişliği (m)														
	Üçgen Enkesit	Kontrol Barajı Olmaması Durumunda Trapez Enkesit							Kontrol Barajı Olması Durumunda Trapez Enkesit						
		0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5				
Hendekin Başlangıçtaki Su Derinliği (m)	0,05	0,01-0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04-0,05	
	0,10	0,03	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	
	0,15	0,04-0,05	0,07	0,08-0,09	0,09	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,11	0,11	0,11	0,12	
	0,20	0,06	0,08-0,09	0,10-0,11	0,11-0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,15	
	0,25	0,07-0,08	0,10-0,11	0,12-0,13	0,13-0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18	
	0,30	0,09	0,11-0,12	0,13-0,15	0,15-0,16	0,16-0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,19	0,19	0,20	0,20	
	0,35	0,10-0,11	0,13-0,14	0,15-0,16	0,17-0,18	0,18-0,20	0,19-0,21	0,20-0,22	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	
	0,40	0,11-0,12	0,14-0,16	0,17-0,18	0,18-0,20	0,20-0,22	0,21-0,23	0,22-0,24	0,23-0,25	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	
	0,45	0,13-0,14	0,16-0,17	0,18-0,20	0,20-0,22	0,22-0,23	0,23-0,25	0,24-0,26	0,25-0,27	0,26-0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	

4.5. UYGULAMA ÖNERİLERİ

Yağmur hendeklerinden en iyi şekilde yararlanabilmek için bu hendeklerin tasarım ve uygulamalarının doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu sebeple hendeğe ait tasarım kriterleri bölge şartlarına ve amaca en uygun şekilde seçilmelidir. Burada tipik bir yağmur hendeğinin tasarımı için gerekli olan kriterler özetlenmektedir.

Yağmur hendekleri 2 ile 4 hektarlık havza alanına sahip bölgelerin sürdürülebilir olarak iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Daha geniş alanlı havzalarda yağmur hendekleri diğer yeşil altyapı uygulamaları ile birlikte kullanılmalıdır. Yağmur hendekleri üçgen, trapez veya parabolik enkesitlerde inşa edilebilmektedir. Üçgen enkesitler küçük alanlı bölgelerde kullanılan arıtma ve taşıma kapasitesi trapez ve parabolik enkesitlere göre daha düşük olan hendeklerdir. Yağmur hendekleri bölgenin topografik şartları ve istiklak durumu elverişli ise uygulama kolaylığı olması açısından trapez olarak inşa edilmelidir.

Yağmur hendeklerinin arıtma ve taşıma kapasitesi açısından taban genişliği minimum 0,6 m, maksimum 2,5 m olarak seçilmelidir. Hendeği bölen tümsek ya da kontrol barajı varsa bu genişlik 4,87 metreye kadar arttırılabilir. Hendeğin boyuna eğimi minimum %1 maksimum %4 olmalıdır. %1'in altında boyuna eğime sahip yağmur hendeklerinin tabanında filtre, geçiş ve altdrenaj tabakaları oluşturulmalı, %4'ün üzerindeki boyuna eğimlerde kontrol barajları inşa edilmelidir. Hendeğin şev eğimleri 1:2 ile 1:10 (düşey: yatay) arasında değişmelidir.

Arıtma ve taşıma kapasitesinin optimum olması istenen üçgen ve trapez enkesitli yağmur hendeklerinde optimum şev eğimi genel olarak 0,17 (1:6) olarak seçilmelidir. Hendek içinde su arıtımı için ayrılan faydalı su derinliği ortalama 0,30 m, maksimum 0,45 m olmalıdır. Hendek tabanının oyulmasını önlemek için hendek içindeki akım hızı 2 ile 10 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışı taşıyan hendeklerde 0,5 m/s'den az, 50 ile 100 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışı taşıyan hendeklerde ise 2,0 m/s'den az olması gerekmektedir. Ayrıca yağmur hendeklerinin uzunluğu arıtma performansı açısından minimum 30 m olarak belirlenmeli ve hendek içindeki suyun kalış süresi minimum 9 dk olmalıdır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. MEVCUT LİTERATÜR VE KATKILARIMIZ

Dünyada her geçen gün suya olan ihtiyaç artmakta fakat su kaynakları; nüfus artışı, iklim değişikliği, su havzalarının yerleşime açılması gibi pek çok sebepten dolayı giderek bu talebi sürdürülebilir şekilde karşılayamamaktadır. Bu durum su kaynaklarının doğru ve etkin bir şekilde kullanımını amaçlayan “optimum sürdürülebilir bütünleşik su yönetimi” kavramını ortaya çıkarmaktadır. Bu kavram su kaynaklarının çevresel, sosyal ve ekonomik unsurlar göz önüne alınarak sürdürülebilir uygulamalarla korunması ve kirlenmesinin önüne geçilmesi anlamına gelmektedir. Yağmur hendekleri bu üç unsuru (çevresel, sosyal, ekonomik) içinde barındıran kentsel ve kırsal bölgelerin sürdürülebilirliğine pek çok katkısı bulunan yeşil altyapı uygulamasıdır.

Yağmur hendeklerinin sürdürülebilirliğe en önemli katkısı, yağış sonucunda elde edilen yağmur suyunu geçirimsiz yüzeylerden toplayarak bu suyun israf edilmesini engellemesi ve yeraltı suyuna arıtılmış şekilde sızmasını sağlamaktır. Bu haliyle yağmur hendekleri yeraltı sularının kirlenmesini engeller ve yeraltı su seviyesinin artmasına katkıda bulunur. Bu katkı özellikle kurak dönemlerde sulama suyuna duyulan ihtiyacı azaltmaktadır. Ayrıca bu hendekler ekolojik hayata katkı, su kalitesi, ekonomi, enerji tasarrufu, hava kalitesi, bioçeşitlilik gibi yönlerden de sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Tüm bu avantajlarından dolayı yağmur hendekleri ülkemizdeki mevcut suyun sürdürülebilirliğine büyük katkı sağlamaktadır. Bu sebeple yağmur hendeklerinin kullanımı yurtdışında olduğu gibi ülkemizde de yaygınlaştırılmalı ve bu konuda farkındalık oluşturulmalıdır.

Ülkemizde sadece permakültür çiftliklerinde tarımda sulama suyuna duyulan ihtiyacı azaltma amacıyla kullanılan bu hendeklerin kentsel bölgelerde sel ve taşkınları önleme, yeraltı su kaynaklarını besleme ve su kalitesini artırma amacıyla kullanılması için gerekli çalışmalar yapılmalı, yağmur hendeklerinin kullanımı teşvik edilmelidir. Bu hendeklerden daha kapsamlı bir şekilde yararlanmak için diğer sürdürülebilir uygulamalar ile birlikte kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu husus 23 Haziran 2017 tarihli 30105 sayılı yağmur suyu toplama, depolama ve deşarj sistemleri yönetmeliğinde de belirtilmektedir. Yönetmeliğe göre geleneksel sistemler sürdürülebilir sistemlerle (yağmur hendekleri, filtre şeritleri, gözenekli kaplamalar, sızdırma hazneleri, sızdırma kuyusu) birlikte kullanılmalıdır. Böylece geleneksel sistemlerin ömrü

uzatılarak bu sistemlerin daha sağlıklı şekilde işletilmesi sağlanabilir. Buna rağmen yönetmelikte çoğunlukla geleneksel yağmur suyu yönetim sistemlerinin hesap yöntemleri açıklanmakta, sürdürülebilir sistemler ve bu sistemlerin hesap yöntemleri yeterince açıklanmamaktadır. Dolayısıyla bu yönetmelik daha çok geleneksel yağmur suyu sistemlerinin hesabında başvurulabilecek bir kaynaktır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan örnek yağmur hendeği hesabında genellikle uluslararası literatürden faydalanmakla birlikte yönetmeliğin ilgili bölümleri yağmur hendekleri için uyarlanmış ve yönetmelikten de yararlanılmıştır. Böylece uluslararası literatürün ve yönetmeliğin belirli kısımlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Uluslararası literatürde yüzeysel akış katsayısının hesaplanması için 10 ve 100 yıllık tekerrür aralıkları ayrı ayrı dikkate alınırken 30105 sayılı yönetmelikte böyle bir ayırım yapılmamakta ve tek bir yüzeysel akış katsayısı değeri verilmektedir. Bu da özellikle 100 yıllık taşkın pik debisinin hesabında büyük farklara neden olmaktadır.

Uluslararası literatürde geçiş süresi, şiddet-süre-tekerrür eğrileri kullanılarak 10 ve 100 yıllık taşkın debileri için iterasyon yöntemi ile hesaplanır ve bu hesaba göre 10 ve 100 yıllık taşkın debileri için farklı geçiş süreleri elde edilir. Yönetmelikte ise geçiş süresi 10 ve 100 yıllık taşkın debileri için tek bir süre olarak hesaplanmaktadır. Bu durum özellikle 100 yıllık taşkın debisinin hesabı için büyük farka sebep olmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan örnek hesapta literatüre göre 10 yıllık yağış şiddeti 71 mm/sa, 100 yıllık yağış şiddeti ise 138 mm/sa olarak belirlenmiştir. Yönetmeliğe göre ise 10 yıllık yağış şiddeti 67 mm/sa, 100 yıllık yağış şiddeti ise 100 mm/sa olarak belirlenmiştir. Bu örnekte de görüldüğü gibi 100 yıllık yağış şiddetindeki fark büyüktür. Bu farkın taşkın hesaplarında önemli hatalara sebep olabileceği düşünülmektedir. Bu yüzden uluslararası literatürdeki hesap yöntemlerinin kullanılmasının daha iyi sonuçlar verdiği kanaati oluşmuştur.

Ayrıca günümüzde giderek yeşil altyapı sistemlerinin önemi anlaşılmakta ve pek çok çevre ajansı tarafından şiddetle bu sistemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Buna rağmen 23 Haziran 2017 tarihinde yayımlanmış olan yağmur suyu toplama, depolama ve deşarj sistemleri yönetmeliğinde bu sistemlere yeterince yer verilmemektedir. Bu sebeple yönetmelikte yeşil altyapı sistemlerine daha fazla ağırlık verilmesi gerektiği düşünülmekte, bu tez çalışmasıyla da bu boşluğun doldurulacağı tahmin edilmektedir.

ASI'ye göre ıslak yağmur hendekleri %43, kuru yağmur hendekleri %60 ve geleneksel sistemler de %19 oranında sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Bu durum yağmur hendeklerinin geleneksel sistemlere göre pek çok yönden daha başarılı olduğunu göstermektedir. Radar grafikleri de bu durumu kanıtlar niteliktedir. Yağmur hendeklerinin türleri arasında da sürdürülebilirliğe katkı bakımından farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklardan hendeğin daha çok hangi amaçla kullanılacağını belirlemek için yararlanılabilir. Islak yağmur hendekleri daha çok çevresel anlamda etkili olurken kuru yağmur hendekleri genel olarak sosyal ve ekonomik yönden daha etkili olmakla birlikte çevresel açıdan da ıslak yağmur hendeklerine yakın bir performans sergilemektedir. Kısaca kentsel ve kırsal bölgelerin sürdürülebilirliğini sağlamak adına geleneksel sistemlerle beraber yağmur hendekleri gibi sürdürülebilir sistemlere de yer verilmelidir. Hatta mümkün olan bölgelerde sürdürülebilir sistemler tek başlarına kullanılmalıdır. Böylece geleneksel sistemlerin hidrolik yükü azaltılarak kentleşmeden kaynaklı sel/taşkın, su kirliliği, erozyon ve kuraklık gibi sorunların önüne geçilebilir, gelecek nesiller için su merkezli, daha sağlıklı ve daha yaşanabilir bir kent ortamı sağlanabilir.

Literatürde yağmur hendeklerine ait şev eğiminin 1:2'den fazla olmaması ve çoğunlukla 1:4 veya 1:5 şeklinde uygulanması tavsiye edilmektedir (Claytor ve Schueler, 1996; UDFCD, 2010; WVDEP, 2012). Bu tavsiye genellikle hendeğin bakım faaliyetlerinin kolaylığı ve taşıma kapasitesi açısından tercih edilmektedir. Oysa yağmur hendeklerinden en iyi şekilde yararlanmak için bu hendeklerin taşıma ve arıtma kapasitelerinin optimum düzeyde olması gerekir. Bu ise hendeğin şev eğimine bağlı olarak değişmektedir. Yağmur hendeklerinde optimum şev eğimi yapılan çalışmalar sonucunda üçgen enkesitler için 0,20 ile 0,17 (1:5 ile 1:6) arasında, trapez enkesitler için ise çoğunlukla 0,17 (1:6) olarak bulunmuştur. Uygulama kolaylığı olması açısından hem üçgen hem de trapez enkesitler için optimum şev eğimi 0,17 (1:6) olarak tavsiye edilebilir. Yağmur hendeklerine ait optimum hidrolik yarıçap değeri ise; üçgen enkesitlerde 0,01 ile 0,14 arasında trapez enkesitlerde 0,03 ile 0,28 arasında değişmektedir.

Optimum şev eğiminin hesaplanması sırasında kullanılan Manning katsayısı ve boyuna eğim değerleri literatürdeki kısıtlamalar göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bu kısıtlar: Manning katsayısı için hendek içindeki bitki örtüsünün su derinliğinden daha fazla yüksekliğe sahip olması durumunda 0,15-0,30 arasında, daha az yüksekliğe sahip olması durumunda ise 0,03-

0,05 arasında olması gerektiğidir (WSUD, 2006). Boyuna eğim için ise %1 ile %4 arasında kalması gerektiğidir (WSUD, 2006). Hesaplamalarda Manning katsayısı 0,03 ve boyuna eğim %3 olarak seçilmiştir. Bu değerden farklı değerler seçilmesi hendeğin kapasitesini değiştirecektir fakat Q/Q_{max} oranını etkilemeyecektir. Bu oran değişmediği için hendeğin optimum şev değeri de değişmeyecektir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında bulunan optimum şev eğimi her Manning sayısı ve her boyuna eğim değeri için geçerli olacaktır. Ayrıca hendeğin arıtma kapasitesi üzerinde etkili olan bitki örtüsü yoğunluğunun ortalama bir yoğunluğa sahip olduğu ve bu yoğunluğun zamanla değişmediği kabulü yapılmıştır.

Sonuç olarak su kaynaklarımızdan daha verimli şekilde yararlanmak için geleneksel sistemler yerine sürdürülebilir uygulamalara ağırlık verilmeli ve yasal mevzuatlar/yönetmelikler hazırlanarak bu uygulamaların kullanılması devlet politikası haline getirilmelidir. Su ve çevre bütün olarak değerlendirilmeli ve mümkün mertebe yağmur suyundan daha fazla yararlanmak için insanlar bilinçlendirilmelidir. Bu konuda belediyeler ve yetkili kuruluşlar tarafından sürdürülebilir sistemlerin önemini anlatan reklam, broşür, etkinlik vb. uygulamalarla gerekli altyapı oluşturmalı ve çiftçilere gerekli teşvik ve destek verilmelidir. Her il için o kentin su verimliliğini gösteren raporlar düzenlenmeli, bu raporlar sayesinde kente ait içme ve kullanma suyu analizi yapılarak suyun sürdürülebilirliği hakkında bilgi edinilmelidir. Bu raporlara göre o kente ait sürdürülebilir uygulamaların performans değerlendirmesi yapılmalı ve sonuca göre alınabilecek önlemler belirlenmelidir. Tüm bunlar ülkemizdeki iklim değişikliği, kuraklık, taşkın gibi doğal afetlerin oluşturacağı zararların etkilerinin azaltılmasına yardımcı olacaktır.

5.2. YAĞMUR SUYU TOPLAMA, DEPOLAMA VE DEŞARJ SİSTEMLERİ YÖNETMELİĞİNE EKLENMESİ İÇİN ÖNERİLERİMİZ

23 Haziran 2017 tarihinde yayımlanan ve yağmur suyu toplama, depolama ve deşarj sistemlerinin planlaması, tasarımı, projelendirilmesi, hesap yöntemleri, yapımı ve işletilmesi ile ilgili olan bu yönetmelik, günümüzde önemi git gide artan sürdürülebilir sistemlerin türlerine (yağmur hendekleri, yağmur bahçeleri, sızdırma hendekleri, filtre şeritler, gözenekli kaplamalar gibi), hesap yöntemlerine, tasarım adımlarına ve uygulanma şekillerine yeterince yer vermemektedir. Oysaki bu sistemler tez içinde de belirtildiği gibi pek çok açıdan geleneksel sistemlerden daha ekonomik, daha çevre dostu ve daha fazla sudan yararlanma amacı güden

sistemlerdir. Bu sebeple bu tez çalışması dahilinde sürdürülebilir sistemlerden biri olan yağmur hendekleri ele alınmış ve bu sistemlerin geleneksel sistemlere göre üstünlükleri belirlenmiştir.

Yönetmeliğin geleneksel sistemlerin yanı sıra sürdürülebilir sistemler konusunda da geliştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle aşağıda maddeler halinde verilen önerilerin dikkate alınması yönetmeliğin bu konudaki eksikliğini giderecektir. Böylece yönetmelik, yağmur suyu yönetimi ile ilgili tüm sorulara cevap verebilecek bir nitelik kazanacaktır.

- Amaç, kapsam, dayanak ve tanımlar bölümünde (yönetmeliğin birinci bölümü) sürdürülebilir sistemlerin inşa edilme amaçları, kapsamı, dayanağı ve sürdürülebilir sistem, yeşil altyapı, permakültür, rıprap, forebay, kontrol barajları, filtre, geçiş ve drenaj tabakası gibi sürdürülebilir yapılara ait terimler kısaca açıklanmalıdır.
- Genel esaslar ile güzergah seçimi ve kent planlanmasına ilişkin esaslar bölümünde (yönetmeliğin ikinci bölümü) sürdürülebilir sistemlerin tasarımı, inşası, bakımı ve işletilmesi ile ilgili yağmur hendekleri için tez kapsamında belirtilen esaslar dikkate alınmalıdır. Ayrıca güzergah seçimi ve kent planlanması için her bir sürdürülebilir sistemin uygulama alanları belirtilmelidir. Yağmur hendeklerinin uygulama alanları olarak yol kenarları, orta refüjler, otoparklar, parklar, yerleşim alanları, sanayi ve ticaret alanları seçilebilir.
- Etüt, planlama ve fizibilite esasları bölümünde (yönetmeliğin üçüncü bölümü) yağmur hendeği veya diğer sürdürülebilir sistemlerin inşa edileceği bölgenin yerleşim planı, havza planı, hidrolik planlar ile enkesitler, boykesitler, hesap yöntemleri ve belirlenen sürdürülebilir sistem için yapısal elemanlar belirtilmelidir. Yağmur hendekleri için yapısal elemanlar rıprap, ince çakıl diyafram, kontrol barajları, savak, orifis ve delikli drenaj borusundan oluşmaktadır.
- Yağmur suyu sistemlerinin tasarım ve projelendirilmesine ilişkin esaslar bölümünde (yönetmeliğin dördüncü bölümünde) her bir sürdürülebilir sistem için tasarım kriterleri ve bu kriterlerin olması gereken değer aralıkları belirtilerek gerekli sürdürülebilir sistem tasarlanmalıdır. Yağmur hendeklerinin tasarımı için gerekli olan tasarım kriterleri ve bu kriterlerin değer aralıkları bu tez kapsamında (Bölüm 2.3) anlatılmaktadır. Ayrıca yine yönetmeliğin bu bölümünde yağmur suyu pik debisinin hesaplanması, hendeğe ait kapasite hesapları, minimum hidrolik kalış süresinin belirlenmesi, hız kontrolü, savak uzunluğunun hesaplanması ve boyutlandırılması, orifis hesapları, filtre, geçiş ve drenaj

tabakalarına ait hesap adımlarının da anlatılması gerekmektedir. Yönetmelikte sadece pik debinin hesap adımları yer almaktadır.

- Yağmur suyu sistemlerinin yapımına ilişkin esaslar bölümünde (yönetmeliğin beşinci bölümü) hangi tür sürdürülebilir sistem inşa edilecekse o sisteme ait uygulama aşamaları anlatılmalıdır. Bu tezde incelenen yağmur hendekleri için yapım aşamaları kısaca şöyledir. Öncelikle bölgeye uygun olan yağmur hendeği türü (ıslak ya da kuru yağmur hendeği) ve enkesiti belirlenmelidir. Enkesit olarak trapez kesitler taşıma kapasitesi ve inşaat kolaylığı bakımından tavsiye edilmektedir. Daha sonra bölgenin topografik özelliklerine ve istiklak durumuna bağlı olarak yağmur hendeğinin taban genişliği Bölüm 2.3'te anlatılan değer aralıkları arasından seçilmelidir. Yağmur hendeğine ait şev eğimleri yine aynı bölümden alınmalı veya taşıma ve arıtma kapasitelerinin optimum olduğu ve tez kapsamında da incelenmiş olan 1:6 (düşey: yatay) değeri seçilmelidir. Yağmur hendeğinin arıtma kapasitesini arttırmak için yine tez içerisinde bulunan (Bölüm 2.5.3) bitki türleri hendek içine ekilmeli/dikilmelidir. Ayrıca hendek tabanın malçlama işlemi de yapılmalıdır. Hendek eğimini azaltmak için gerekli yapısal elemanlar tasarlanmalı ve bu elemanlar boyutlandırılmalıdır.
- Yağmur suyu sistemlerinin işletme ve bakımına ilişkin esaslar bölümünde (yönetmelikte altıncı bölüm) sürdürülebilir sistemlerin bakım faaliyetleri ve bu faaliyetlerin sıklığı belirtilmelidir. Yağmur hendekleri için bakım faaliyetleri çim biçme, sulama, çöp ve biriken sediment malzemesini temizleme, eğim kontrolü, tabanda oluşan oyulmaları kontrol etme gibi işlemlerden oluşmaktadır. Bu işlemler ve uygulama sıklığı tez kapsamında açıklanmaktadır.
- Yönetmeliğin yedinci ve son bölümü olan çeşitli ve son hükümler performans testleri bölümünde tasarlanan sürdürülebilir sistemlerin kirletici maddeleri uzaklaştırma, taşkın kontrolü, sızma, bitki örtüsü ve bitkilendirme, işletme ve bakım gibi performans analizleri yapılmalıdır. Bu analizler tablolar veya grafikler halinde verilmelidir. Ayrıca bu sistemlerin inşasının hem doğru bir şekilde yapılabilmesi hem de iş sağlığı ve güvenliği açısından bu işlerde çalışacak personele sürdürülebilir sistemler ve bu sistemlerin uygulanma şekilleri hakkında bilgilendirme amaçlı eğitimler verilmelidir ve bu eğitimler belli aralıklarla tekrarlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Ak, F., Tıngır, M., Ünsal, M.H. ve Balcı, O., 2013, *Doğal arıtım yöntemleri ve sulak alanların belirlenmesi*, Bitirme tezi, Bartın Üniversitesi.
- Argue, J.R., 1986, *Storm drainage design in small urban catchment: A handbook for Australian practice*, Australian road research board, Vermont South, Australia.
- Association of state wetland managers (ASWM), 2015, *Wetland and climate change: Considerations for wetland program managers*, Windham ME, USA.
- Auckland regional council (ARC), 1992, *Stormwater treatment devices design guideline manual*, Technical publication, Auckland, New Zealand.
- Bakır, M.F., Akhuy, S. ve Aydemir, G., 2011, *Permakültür el kitabı ve marmariç örneği*, http://marmaric.org/permakultur_el_kitabi.pdf, [Ziyaret tarihi: 28 Ağustos 2017].
- Belentepe permakültür çiftliği (BPC), 2015, *Arazinin dönüşümü*, belentepe.org/arazi-donusum.asp, [Ziyaret tarihi: 25 Mayıs 2018].
- Bostancık, 2009, *Eş yükselti eğrileri kullanımında*, bostancik.blogspot.com/2009/12/esyukselti-hendekleri-kullanimda.html, [Ziyaret tarihi: 25 Mayıs 2018].
- Boston water and sewer commission, 2013, *Stormwater best management practices (BMP): guidance document*, Boston, USA.
- California department of transportation (CALTRANS), 2004, *Best management practice retrofit pilot program final report*, California, USA.
- California stormwater quality association (CASQA), 2003, *Stormwater best management practice handbook: New development and redevelopment*, California, USA.
- Center for neighborhood technology (CNT), 2010, *The value of green Infrastructure: A guide to recognizing its economic, environmental and social benefit, Bioretention and infiltration practices*, W. North Avenue, Chicago.
- Center for watershed protection (CWP), 1998, *Better site design: A handbook for changing development rules in your Community*, Ellicott, Maryland.
- Center for watershed protection (CWP), 1999, *Design for stormwater filtering systems*, Ellicott, USA.
- Ceron, C.N., Melesse, A.M., Price, R., Dessu, S.B. and Kandel, H.P., 2015, Operational actual wetland evapotranspiration estimation for South Florida using MODIS imagery, *Remote sensing*, 7(2015), 3613-3632.
- Chaves, H.M.L. and Alipaz, S., 2007, An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life and policy: The watershed sustainability index, *Water resources management*, 21(5), 883-895.

- Claytor, R.A. and Schueler, T.R., 1996, *Design of stormwater filtering systems*, Center for watershed protection and chesapeake research consortium, Ellicott, USA.
- Connecticut department of transportation (CONNDOT), 2000, *Conndot drainage manual: Outlet hydraulics*, Newington, USA.
- Çevre ve şehircilik bakanlığı (ÇŞB), 2017, *Yağmur suyu toplama, depolama ve deşarj sistemleri hakkında yönetmelik*, Resmi gazete, Sayı: 30105.
- Dağdelen, E., 2012, *Debi ölçümü*, <https://www.researchgate.net/publication/274583879>, [Ziyaret tarihi: 02 Mayıs 2018].
- Dağlı, S., 2006, *Evsel atıksulardan yapay sulak alan sistemleriyle fosfor gideriminin incelenmesi*, Doktora tezi, Fen bilimleri enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Demir, D., 2012, *Konveksiyonel yağmuru suyu yönetim sistemleri ile sürdürülebilir yağmur suyu yönetim sistemlerinin karşılaştırılması: İTÜ Ayazağa yerleşkesi örneği*, Yüksek lisans tezi, Fen bilimleri enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Department of natural resources and water, 2007, *Queenslad urban drainage manual (QUDM)*, Brisbane, Australia.
- Department of planning and local government, 2010, *Water sensitive urban design (WSUD) technical manual for the greater Adelaide region*, Adelaide, South Australia.
- Devlet su işleri (DSİ), 2014, *Toprak ve su kaynakları*, www.dsi.gov.tr/toprak-ve-su-kaynaklari, [Ziyaret tarihi: 04 Ağustos 2017].
- Dorman, M.E., Hartigan, J., Steg, R.F. and Quasebarth, T., 1989, *Retention, detention and overland flow for pollutant removal from highway stormwater runoff*, Washington, USA.
- Dublin city council (DCC), 2005, *Greater Dublin strategic drainage study: Regional drainage policies*, Environmental Management, Dublin, Ireland.
- Ekşi, M., 2016, Yağmur bahçelerinin nicel değerlendirilmesi: İstanbul üniversitesi orman fakültesi örneği, *Gazi üniversitesi mühendislik ve mimarlık fakültesi dergisi*, 31(4), 1113-1123.
- Environment agency (EA), 2012, *Rural sustainable drainage systems*, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291508/scho0612buwh-e-e.pdf, [Ziyaret tarihi: 02 Mayıs 2018].
- European Comission (EC), 2015, *Science for environment policy in depth report: Indicators for sustainable cities*, Bristol, England, ISBN: 978-92-79-85127-8.
- Gold coast city council (GCCC), 2007, *Gold coast planning scheme policies, Policy 11: Land development guidelines*, Section 13.13: Plant section for WSUD systems.
- Government of Western Australia department of water, 2011, *Water sensitive urban design (WSUD) swales and buffer strips*, Western Australia.

- Graham, A., Day, J., Bray, B. and Mackenzie, S., 2012, *Sustainable drainage systems: A guide for local authorities and developers*, <https://www.rspb.org.uk/globalassets/downloads/documents/positions/planning/sustainable-drainage-systems.pdf>, [Ziyaret tarihi: 30 Mayıs 2018].
- Harper, H., 1988, *Effects of stormwater management systems on groundwater quality*, Orlando, USA.
- Harris, J.M., 2000, *Basic principles of sustainable development*, Global development and environment institute, Working paper 00-04, Tufts University.
- Healty waterways partnership, 2006, *Water sensitive urban design (WSUD) technical design guidelines for South East Queensland*, Brisbane, Australia.
- Karel Bayrakcı, F., Karaer, F., Tombul, M. ve Koparal, A.S., 2016, Eskişehir ili yağmur suyu karakterizasyonu, *International symposium of water and wastewater management (ISWWM)*, 26-28 October 2016, Malatya, Türkiye, 1-9.
- Kaypak, Ş., 2011, Küreselleşme sürecinde sürdürülebilir bir kalkınma için sürdürülebilir bir çevre, *KMÜ sosyal ve ekonomik araştırmalar dergisi*, 13(20), 19-33.
- Kercher, W.C., Landon, J.C. and Massarelli, R., 1983, Grassy swales prove cost-effective for water pollution control, *Public works*, (16), 53-55.
- Khalid, N.J., 2014, *Urban heat island in Erbil city*, Master thesis, Department of physical geography and ecosystem science, Lund University.
- Koon, J., 1995, *Evaluation of water quality ponds and swales in the Issaquah/East lake Sammamish basins*, Washington department of ecology, Washington, USA.
- Köken, K., 2017, *Sürdürülebilir kentsel tasarım kriterleri açısından kentsel dönüşüm projelerinin incelenmesi*, Uzmanlık tezi, İller Bankası A.Ş.
- Kuşçu Şimşek, Ç. ve Şengezer, B., 2012, İstanbul metropoliten alanında kentsel ısınmanın azaltılmasında yeşil alanların önemi, *Megaron journal*, 7(2), 116-128.
- Lai, S.H., Kee, L.C., Zakaria, N.A., Ghani, A.A., Chang, C.K. and Leow, C.S., 2009, Flow pattern and hydraulic characteristic for subsurface drainage module, *International conference on water resources (ICWR 2009)*, 26-27 May 2009, Malaysia.
- Lashford, C., Charlesworth, Sue., Warwick, F. and Blackett, M., 2014, Deconstructing the sustainable drainage management train in terms of water quantity-preliminary results for coventry UK, *Clean journal*, 42(2), 187-192.
- Maryland department of the environment (MDE) water management administration and Center for watershed protection (CWP), 2000, *Maryland stormwater design manual*, Baltimore, USA.
- Melbourne water corporation (MWC), 2013, *Healty waterways gardens: Instruction sheet building a swale*, Melbourne, Australia, ISBN: 978-1-921603-93-8.

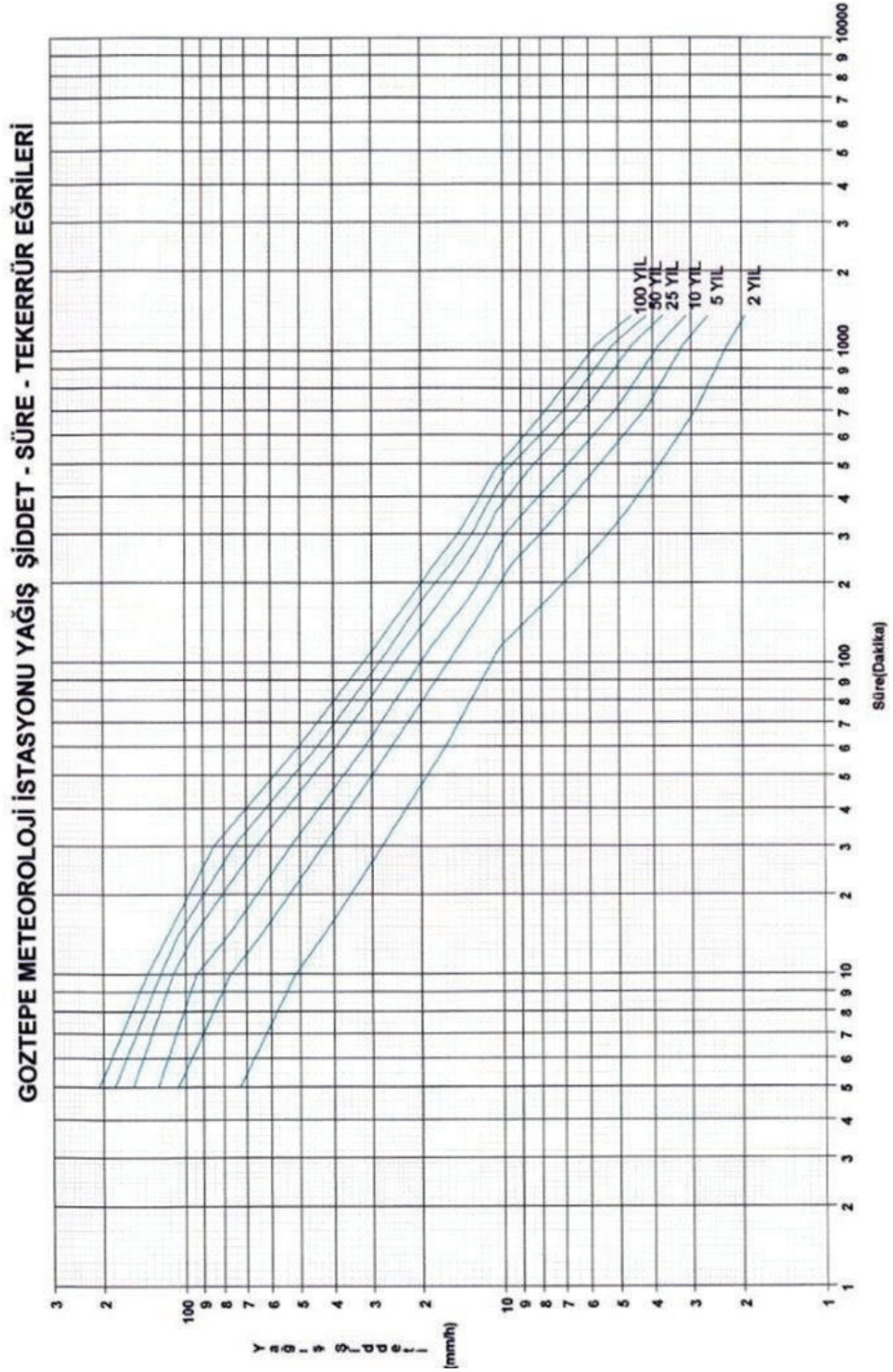
- Meteoroloji genel müdürlüğü (MGM), Göztepe meteoroloji istasyonu yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrileri.
- Metropolitan council and Barr engineering company, 2001a, *Minnesota urban small sites best management practice (BMP) manual: Stormwater best management practices for cold climates*, Section constructed wetlands: Wet swales, Minneapolis, St. Paul, USA.
- Metropolitan council and Barr engineering company, 2001b, *Minnesota urban small sites best management practice (BMP) manual: Stormwater best management practices for cold climates*, Section detention systems: Dry swales, Minneapolis, St. Paul, USA.
- Minnesota pollution control agency (MPCA), 2000, *Protecting water quality in urban areas: Best management practices for dealing with stormwater runoff from urban, Suburban and developing areas of Minnesota*, Minneapolis, St. Paul, USA.
- Mitsch, W.J., Bernal, B., Nahlik, A.M., Mandar, U., Zhang, L., Anderson, C.J., Jorgensen, S.E. and Brix, H., 2013, Wetlands carbon and climate change, *Landscape ecology*, 28(2013), 583-597.
- Mollison, B., 1988, *Permaculture: A designers manual*, Tagari publications, Australia.
- Muluk, Ç.B., Kurt, B., Turak, A., Türker, A., Çalışkan, M.A., Balkız, Ö., Gümrükçü, S., Sarıgül, G. ve Zeydanlı, U., 2013, *Türkiyede suyun durumu ve su yönetiminde yeni yaklaşımlar: Çevresel perspektif, İş dünyası ve sürdürülebilir kalkınma derneği doğa koruma merkezi*, Ankara, Türkiye.
- Müftüoğlu, V. ve Perçin, H., 2015, Sürdürülebilir kentsel yağmur suyu yönetimi kapsamında yağmur bahçesi, *İnönü üniversitesi sanat ve tasarım dergisi*, 5(11), 27-37.
- Natural water retention measures (NWRM), 2013, *Individual NWRM: Swales*, http://nwrn.eu/sites/default/files/nwrn_ressources/u4_-_swales.pdf, [Ziyaret tarihi: 02 Mayıs 2018].
- Özdemir, N., 1995, Türkiyede tarım bölgelerine göre toprak korumaya yönelik sorunlar ve öneriler, *Atatürk üniversitesi ziraat fakültesi dergisi*, 26(3), 460-473.
- Perrin, C.L., Milburn, L.S., Hunt, S., Bruce, R., Mclendon, S., Job, D., Lindbo, S., Smutko, H., Fisher, R., Tucker, J., Calabria, K., Debusk, K.C., Cone, M., Smith-Gordon, J., Spooner, T., Blue, N., Deal, J., Lynn, D., Rashash, R., Rubin, M., Senior, N., White, D. and Jones, W.E., 2009, *Low impact development: A guide book for North Carolina*, NC cooperative extension service, North Carolina State University.
- Revitt, D.M., Ellis, J.B. and Lundy, L., 2017, Assessing the impact of swales on receiving water quality, *Urban water journal*, 14(8), 839-845.
- Ripl, W., 1995, Management of water cycle and energy flow for ecosystem control: The energy-transport-reaction (ETR) model, *Ecological modelling*, 78, 61-76.
- Saygın, N. and Ulusoy, P., 2011, Stormwater management and green infrastructure techniques for sustainable campus design, *Journal of polytechnic*, 14(3), 223-231.

- Sert, E., 2013, *Enerji etkin peyzaj tasarımında yağmur suyu*, Yüksek lisans tezi, Fen bilimleri enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Schueler, T., 1987, *Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs*, Metropolitan Washington council of governments, Washington DC, USA.
- Scotland and Northern Ireland forum for environmental research (SNIFFER), 2004, *SUDS in Scotland the monitoring programme of the Scottish Universities SUDS monitoring group*, Final report SR(02) 51.
- Southeastern Wisconsin regional planning commission (SEWRPC), 1991, *Cost of urban nonpoint source water pollution control measures*, Technical report, Waukesha, USA.
- Tahtacıörencik doğal yaşam kolektifi (TADYA), 2012, *Tahtacıörencik'te yağmur hendekleri çalışması*, <https://kircocuklari.wordpress.com/2012/11/19/355/>, [Ziyaret tarihi: 25 Mayıs 2018].
- Tang, N.Y., Li, T. and Ge, J., 2016, Assessing ability of a wet swale to manage road runoff: A case study in Hefei, China, *J. cent. south univ.*, 23(2016), 1353-1362.
- T.C. kalkınma bakanlığı (TCKB), 2014, *Onuncu kalkınma planı 2014-2018*, Su kaynakları yönetimi ve güvenliği özel ihtisas komisyonu raporu, Ankara, Türkiye.
- Tennessee department of environment and conservation (TDEC), 2014, *Vegetated Swale*, Tennessee permanent stormwater management and design guidance manual, Chapter: 5.4.3, University of Tennessee, 103-116.
- The city of Lancaster a city authentic (CLCA), 2011, *Green infrastructure plan*, cityoflancasterpa.com/sites/default/files/documents/cityoflancaster_giplan_fullreport_april2011_final_0.pdf, [Ziyaret tarihi: 13 Ekim 2017].
- Thomas, S.B., Michale, J.W. and Harry Stewatt, P.E., 2008, *Designing best management practices*, New Hampshire stormwater manual: Post-construction best management practices selection and design, Chapter 4, 139-152.
- Türkiye erozyonla mücadele ağaçlandırma ve doğal varlıkları koruma vakfı (TEMA), 2014, *Toprağımız akıp gitmesin*, www.tema.org.tr/web_14966-2_1/entitalfocus.aspx?primary_id=1361&target=categorial1&type=2&detail=single, [Ziyaret tarihi: 30 Mayıs 2018].
- Türkiye mühendis ve mimar odaları birliği (TMMOB), 2014, *Peyzaj mimarları odası, Kentlerde karbon ölçümleri karbon emisyonları ve peyzaj mimarlığı ilişkisi seminer sunum notları*, www.peyzajmimoda.org.tr/resimler/ekler/82471df92555334_ek.doc, [Ziyaret tarihi: 28 Ekim 2017].
- United nations (UN), 1987, *Report of the world commission on environment and development: Our common future*, Oxford university press, ISBN: 019282080X.
- United states environmental protection agency (EPA), 1999a, *Stormwater technology fact sheet: Vegetated swales*, EPA 832-F-99-006, Washington, USA.

- United states environmental protection agency (EPA), 1999b, *Preliminary data summary of urban stormwater best management practices*, EPA 821-R-99-012, Washington, USA.
- United states environmental protection agency (EPA), 2000, *Low impact development a literature review*, EPA 841-B-00-005, Washington, USA.
- United states environmental protection agency (EPA), 2008, *Reducing urban heat islands: Compendium of strategies*, Washington, USA.
- Upper parramatta river catchment trust, 2004, *Water sensitive urban design (WSUD): Technical guidelines for Western Sydney*, URS Australia Pty Ltd, Australia.
- Urban drainage and flood control district (UDFCD), 2010, *Urban storm drainage criteria manual: Stormwater Best Management Practices*, Denver, Colorado, USA.
- Vermont agency of natural resources (VANR), 2002, *Vermont stormwater management handbook: Stormwater treatment standards*, Vermont, USA.
- Wang, C. and Zhu, W., 2011, Analysis of the impact of urban wetland on urban temperature based on remote sensing technology, *Procedia environmental sciences*, 10(2011), 1546-1552.
- Wang, T., Spyridakis, D., Mar, B. and Horner, R., 1981, *Transport, deposition and control of heavy metals in highway runoff*, Department of civil engineering, University of Washington, Washington, USA.
- West sussex county council (WSSCC), 2013, *Suds design and adoption guidance, Water people places: A guidance for master planning sustainable drainage into developments*, https://www.westsussex.gov.uk/media/2270/suds_design_guidance.pdf. [Ziyaret tarihi: 12 Ekim 2017].
- West Virginia department of environmental protection (WVDEP), 2012, *West Virginia stormwater management and design guidance manual*, West Virginia, USA.
- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R. and Kellagher, R., 2015, *Swales*, The suds manual, In: Beverley, P. (ed.), Chapter 17, CIRIA, London, ISBN: 978-0-86017-760-9, 313-330.
- Xie, J., Wu, C., Li, H. and Chen, G., 2017, Study on stormwater management of grassed swales and permeable pavement based on SWMM, *Water journal*, 9(840), 1-12.
- Yao, R., 2013, *Design and management of sustainable built environments*, Springer, London, Britain.
- Yiğit Avdan, Z., Yıldız, D. ve Çabuk, A., 2015, Yağmur suyu yönetimi açısından yeşil altyapı sistemlerinin değerlendirilmesi, *2nd International sustainable buildings symposium (ISBS)*, 28-30 May 2015, Ankara, Türkiye, 733-740.

EKLER

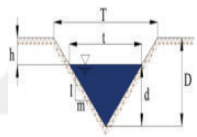
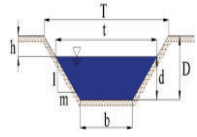
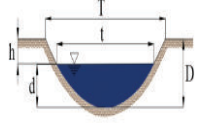
EK 1. İstanbul ili Göztepe meteoroloji istasyonu yağış şiddeti-süre-tekerrür eğrileri (MGM).



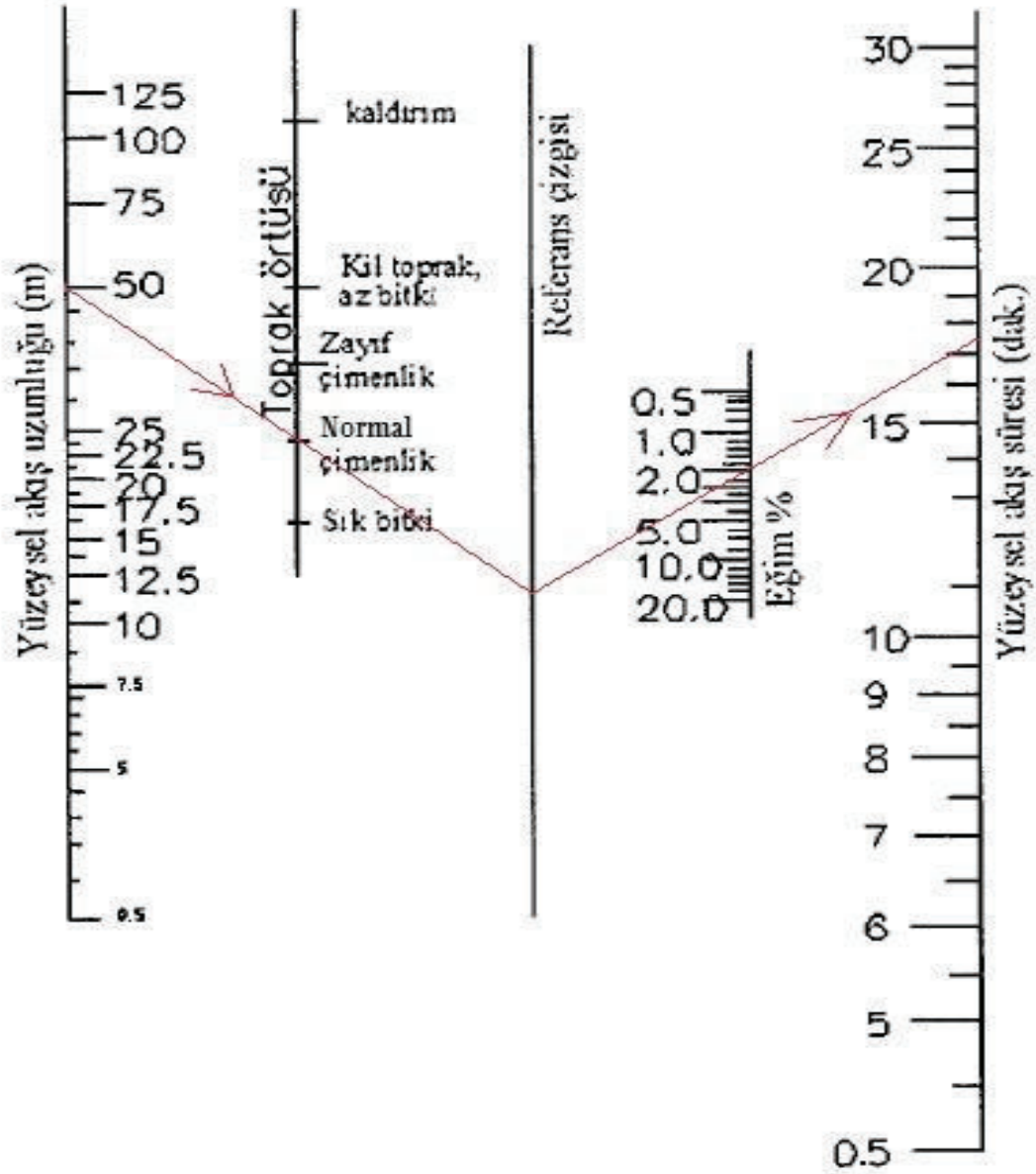
EK 2. 500 hektardan küçük havza alanları için varsayılan ortalama akarsu hızları (QUDM, 2007).

Arazi Tipi	Havza Yüzeyinin Ortalama Eğimi (%)	Varsayılan Ortalama Hızlar (m/s)
Düz	0 – 1,5	0,3
Dalgalı	1,5 – 4,0	0,7
Dağlık	4,0 – 8,0	0,9
Dik yokuş, uçurum	8,0 – 15,0	1,5
Çok dik kayalık dağlar	> 15,0	3,0

EK 3. Enkesit tipine göre yağmur hendeği parametrelerinin hesabı.

Enkesit	Şekil	Su Yüzeyi Genişliği (t)	Islak Alan (A_w)	Islak Çevre (P_w)	Hidrolik Yarıçap (R_h)
Üçgen		$2 * d * m$	$m * d^2$	$2 * d * \sqrt{1 + m^2}$	$\frac{m * d^2}{2 * d * \sqrt{1 + m^2}}$
Trapez		$b + 2 * d * m$	$b * d + m * d^2$	$b + 2 * d * \sqrt{1 + m^2}$	$\frac{b * d + m * d^2}{b + 2 * d * \sqrt{1 + m^2}}$
Parabol		$\frac{A}{0,67 * d}$	$\frac{2 * t * d}{3}$	$t + \frac{8 * d^2}{3 * t}$	$\frac{t^2 * d}{1,5 * t^2 + 4 * d^2}$

EK 4. Giriş süresinin hesabında kullanılan abak (ÇŞB, 2017).



EK 5. Gecikme katsayısına ait değerler (ÇŞB, 2017).

Yüzey Şekli	Gecikme Katsayısı (C_r)
Pürüzsüz Asfalt Yüzey	0,007
Beton Yollar	0,012
Katran ve Çakıl Kaplamalar	0,017
Çimenle Örtülü Alanlar	0,046
Sık Çimle Kaplı Yüzeyler	0,060

EK 6. Bölge inceleme kontrol listesi (WSUD, 2010)

BÖLGE İNCELEME KONTROL LİSTESİ		
Yağmur Hendeği No:	Ziyaret Tarihi:	
Yağmur Hendeğinin Bölgesi:	Ziyaret Saati:	
Kontrol Eden Kişi:		
Bölge Bilgisi		Yorumlar
Bölgenin Boyutları (m)		
Bölgenin Alanı (m ²)		
Bölgenin Mevcut Kullanımı		
Bölgede Bulunan Mevcut Yapılar (Yaşı, Durumu vb.)		
Drenaj Tipi: Durumu: Çıkış Noktası:		
Bölge Güvenliği		Yorumlar
Potansiyel Kirlilik Kaynakları		
Çevresel Tehlikeler		
Diğer Tehlikeler		
Yerel ve Bölgeler Bilgileri		Yorumlar
Topografya		
Hidroloji		
Etrafındaki Bölgelerin Durumu (Kullanım Şekli, Sınırları vb.)		
Saha Çalışmaları		Yorumlar
Erişim, Kullanım		
Diğer Sınırlamalar		
Diğer Bilgiler		Yorumlar
Ek Bilgiler		Yorumlar

EK 7. Yağmur hendeği tasarım özet sayfası (WSUD, 2006).

YAĞMUR HENDEĞİ TASARIM HESABI ÖZET SAYFASI			
Havzanın Özellikleri	Sonuç	Birim	Kontrol
Havza Alanı		ha	
Havzanın Kullanım Şekli (yerleşim, yol ticari vb.)		—	
Havzanın Eğimi (%)		—	
Tasarım			
Yağmur Hendeğinin Üst Genişliği		m	
Yağmur Hendeğinin Uzunluğu		m	
Yağmur Hendeğinin Konumu (yol kenarı, park vb.)		—	
Tasarım Akımlarını Belirleme			
Geçiş Süresi		dk.	
Yağış Şiddeti	2 ve 10 yıllık taşkın debisi	mm/sa	
	50 ve 100 yıllık taşkın debisi	mm/sa	
Yüzeysel Akış Katsayısı	2 ve 10 yıllık taşkın debisi	—	
	50 ve 100 yıllık taşkın debisi	—	
Pik Tasarım Debisi	2 ve 10 yıllık taşkın debisi	m ³ /s	
	50 ve 100 yıllık taşkın debisi	m ³ /s	
Yağmur Hendeği Boyutları			
Taban Genişliği		m	
Şev eğimi (düşey: yatay)		—	
Boyuna Eğim		—	
Bitki örtüsü Yüksekliği		mm	
Manning Katsayısı (n)		—	
Yağmur Hendeğinin Kapasitesi		m ³ /s	
Yağmur Hendeğinin Maksimum Uzunluğu		m	
Doğrulama Kontrolleri			
2 ve 10 Yıllık Taşkın Debisi için Hız (< 0,5 m/s)		m/s	
50 ve 100 Yıllık Taşkın Debisi için Hız (< 2,0 m/s)		m/s	
2 ve 10 Yıllık Taşkın Debisi için Hız x Derinlik (< 0,6 m ² /s)		m ² /s	
50 ve 100 Yıllık Taşkın Debisi için Hız x Derinlik (< 0,4 m ² /s)		m ² /s	
Savak ve Orifis Boyutu			
2 ve 10 Yıllık Taşkın Debisi Taşıyacak Savak Boyutu (Uzunluk x Genişlik)		m x m	
50 ve 100 Yıllık Taşkın Debisi Taşıyacak Savak Boyutu (Uzunluk x Genişlik)		m x m	
2 ve 10 Yıllık Taşkın Debisi Taşıyacak Orifis Boyutu (Uzunluk x Genişlik)		m x m	
50 ve 100 Yıllık Taşkın Debisi Taşıyacak Orifis Boyutu (Uzunluk x Genişlik)		m x m	
Filtre, Geçiş ve Drenaj Tabakaları			
Filtre Tabakasının Hidrolik İletkenliği		mm/sa	
Filtre Tabakasının Kalınlığı		mm	
Hendek İçindeki Su Derinliği		mm	
Geçiş Tabakasının Kalınlığı		mm	
Drenaj Tabakasının Kalınlığı		mm	
Filtre Tabakasının Sızma Hızı		m ³ /s	
Delikli Drenaj Borusunun Çapı		mm	
Delik Kapasitesi		m ³ /s	
Boru Kapasitesi		m ³ /s	

EK 8. Yağmur hendeği bakım kontrol listesi (WSUD, 2006).

YAĞMUR HENDEĞİ BAKIM KONTROL LİSTESİ			
Yağmur Hendeği No:			
Kontrol Sıklığı:	1 - 6 Ay	Ziyaret Tarihi:	
Yağmur Hendeğinin Bölgesi:			
Kontrol Eden Kişi:			
Kontrol Maddeleri	Evet	Hayır	Yapılması Gereken
Giriş akımlarının olduğu bölgelerde sediment birikiyor mu?			
Yağmur hendeğinin boyuna eğimi ve şev eğimi uygun mu ?			
Giriş akımlarının olduğu bölgede veya diğer önemli yapılarda erozyon var mı?			
Trafik etkisinden kaynaklı hasar var mı ?			
Evsel atık gibi hendek içinde çöp yığılı var mı ?			
Bitki örtüsü yoğunluk bakımından yeterli mi ?			
Bitki örtüsünün sulanması gerekli mi ?			
Bitki örtüsünü tekrar oluşturmak gerekli mi ?			
Bitki örtüsünü biçmek gerekli mi ?			
Çıkış noktalarında sediment birikiyor mu ?			
Drenaj noktalarında tıkanmalar var mı ?			
Göllenme var mı ?			
Zemine katkı maddeleri veya iyileştirme gerekli mi ?			
Budama, ölü ya da hastalıklı bitki örtüsünün uzaklaştırılması gerekli mi ?			
Drenaj sistemi kontrol edildi mi ?			
Yorumlar			

EK 9. Yağmur hendeği tasarım değerlendirme kontrol listesi (WSUD, 2006).

YAĞMUR HENDEĞİ TASARIM DEĞERLENDİRME KONTROL LİSTESİ			
Yağmur Hendeği No:			
Yağmur Hendeğinin Bölgesi:			
2 ve 10 Yıllık Taşkın Debisi (m ³ /s):		50 ve 100 Yıllık Taşkın Debisi (m ³ /s):	
Havza Alanı (m ²):		Yağmur Hendeği Alanı (m ²):	
Aritma		Evet	Hayır
Aritma performansı kontrol edildi mi ?			
Yağmur Hendeği Giriş Akımları Sistemleri		Evet	Hayır
Giriş akımları uygun şekilde dağıtıldı mı ?			
Yağmur hendeği giriş noktalarında enerji dağılımı sağlandı mı ?			
Yağmur Hendeğinin Yapısı ve Taşıma		Evet	Hayır
Yağmur hendeğinin boyuna eğimi %1 ile %4 arasında mı ?			
Önerilen bitki örtüsü tipi için Manning katsayısı uygun mu ?			
Tasarım taşkın debisi için tüm akım taşıma iletim sistemi yeterli mi ?			
Akım kapasitesinin aşıldığı bölgelerde dolu savak var mı ?			
Yağmur hendeğindeki hız oyulmaya neden oluyor mu ?			
Maksimum su derinliği ve hız halk güvenliğini etkiliyor mu ? ($V \times d < 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$, $V \times d < 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$)			
Yağmur hendeklerinin bakım faaliyetleri (biçme vs.) için yeterli alan var mı ?			
Filtre, Geçiş, Drenaj Tabakaları		Evet	Hayır
Filtre tabakası, geçiş tabakası ve drenaj tabakalarının kalınlıkları yeterli mi ?			
Filtre tabakası ile drenaj tabakası arasına geçiş tabakası uygulandı mı ?			
Delik kapasitesi > filtre ortamı sızma kapasitesi mi ?			
Boru kapasitesi > filtre ortamı sızma kapasitesi mi ?			
Peyzaj		Evet	Hayır
Seçilen bitki türleri periyodik su baskınlarını ve tasarım hızlarını tölöre edebilir mi ?			
Bitkilerin ekim şekli, kabul edilebilir görüş hattı ve güvenlik gereksinimleri ile uyumlu mu ?			
Üst toprak tabakasının bitkiler için 300 mm çim için 100 mm derinliği var mı ?			
Mevcut ağaçların iyi durumunda olup olmadığı araştırıldı mı ?			
Yağmur hendeği peyzaj tasarımı onu çevreleyen doğal veya yapay çevre ile bütünleşiyor mu ?			
Yorumlar			

EK 10. Yağmur hendeği inşaat kontrol listesi (WSUD, 2006).

YAĞMUR HENDEĞİ İNŞAAT KONTROL LİSTESİ				
Yağmur Hendeği No:		Kontrol Eden Kişi:		
Yağmur Hendeğinin Bölgesi:		Kontrol Tarihi:		
İnşaat ve Kuruluş Sırasında	Kontrol Edildi		Yapısal Bileşenler	Kontrol Edildi
A) İŞLEVSEL KURULUM	Evet	Hayır		Evet
Ön Hazırlık Çalışmaları			Dolu savakların konumu ve seviyesi planlandığı gibi yapılmıştır	
Erozyon/sediment kontrolü			Güvenlik koruması sağlanmıştır	
Trafik kontrol önlemleri			Kontrol barajlarının konumu planlandığı gibi yapılmıştır	
Konumlar planlarla aynı			Yağmur hendeği geçişleri planlandığı gibi yapılmıştır	
Mevcut akımlardan bölgenin korunması			Boru bağlantıları planlandığı gibi yapılmıştır	
Toprak çalışmaları/hafriyat			Giriş noktaları uygun şekilde yapılmıştır	
Mecut üst toprak yeniden kullanım için depolanmaktadır.			Giriş bölgelerine erozyon koruma yapıları yapılmıştır	
Yağmur hendeği yatak seviyesi			B) EROZYON VE SEDİMENT KONTROLÜ	
Şev eğimleri planlandığı gibi			Alandaki silt engeller ve trafik kontrolü	
Boyuna eğim tasarım aralığında			Toprak çalışmalarından hemen sonra stabilizasyon yapılmıştır	
Hafif eğimler için alt toprak drenajının sağlanması (< %1)			C) İŞLETME KURULUMU	
Sıkıştırma işlemi tasarlandığı gibi			Bitki örtüsü	
Alt drenaj sistemi tasarlandığı gibi kuruldu			Üst toprağı test etme ve iyileştirme	
Drenaj tabakası ortamı tasarlandığı gibi			Bitki türleri ve yoğunlukları plandığı gibi	
Geçiş tabakası tasarlandığı gibi			Yabani otları uzaklaştırma ve sulama	
Göllenme derinliği tasarlandığı gibi				
SON KONTROL				
Giriş ve çıkış bölgelerini kontrol etme			Zeminin düzensiz yerleşimini kontrol etme	
Bölgedeki trafik kontrolü			Giriş bölgelerinde erozyon koruması için çalışmalar	
Yapısal elemanların boyut kontrolü			Bakım erişimi sağlanmıştır	
Şev eğimlerini kontrol etme			İnşaattan kaynaklanan sediment uzaklaştırılmıştır	
Bitki örtüsü planlandığı gibi			Yüzey göllenmesi	

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Uğur ÜNAL
Doğum Yeri	Gaziosmanpaşa
Doğum Tarihi	25.06.1990
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0531 614 92 83
E-Posta Adresi	ugur_unal1990@hotmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Selçuk Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	17.01.2014

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler	
Ünal, U. ve Akyüz, D.E., 2017, Yağmur hendeklerinin kapasite ve maliyet hesapları, <i>Karadeniz fen bilimleri dergisi</i> , 7(2), 19-46.	
Ünal, U. ve Akyüz, D.E., 2017, Sürdürülebilirlik açısından yağmur hendekleri, <i>Akademia mühendislik ve fen bilimleri dergisi</i> , 2(3), 71-82.	
Ünal, U. ve Akyüz, D.E., 2017, Sürdürülebilir kentsel drenaj sistemlerinde yağmur hendeklerinin değerlendirilmesi, <i>Uluslararası sürdürülebilir mühendislik ve teknoloji dergisi</i> , 1(1), 15-24.	
Ünal, U. ve Akyüz, D.E., 2018, Yeşil altyapı uygulamaları kapsamında yağmur hendeklerinin önemi ve sürdürülebilir kent anlayışı ile değerlendirilmesi, <i>Uluslararası su ve çevre kongresi (SUÇEV)</i> , 22-24 Mart 2018, Bursa, Türkiye, ISBN: 978-605-68414-1-5, 504-512.	
Ünal, U. ve Akyüz, D.E., 2017, Sürdürülebilirlik açısından yağmur hendekleri, <i>Uluslararası sürdürülebilir kalkınma için yeni yaklaşımlar ve teknolojiler kongresi</i> , 21-24 Eylül 2017, Isparta, Türkiye, 750-751.	