

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAĞIŞ KAYNAKLI EROZYON VE KATI MADDE HAREKETİNİN
LABORATUVAR MODELİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kaan KOCA**

Anabilim Dalı : Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği

Programı : Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAĞIŞ KAYNAKLI EROZYON VE KATI MADDE HAREKETİNİN
LABORATUVAR MODELİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kaan KOCA
(517091006)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.05.2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 03.06.2011

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hafzullah AKSOY (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. M. Emin Savcı (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. M. İshak YÜCE (GAÜN)**

HAZİRAN 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Erozyon zemin parçacıklarının rüzgar, yağış ve akış ile yerinden ayrılıp taşınması olarak tanımlanır ve dünyanın en çok sıkıntı çektiği problemlerin başında gelmektedir. Engebeli bir yapıya sahip olan Türkiye'de de erozyonunun etkisi aşırı boyutlara ulaşmıştır. Her yıl erozyon sonucu Türkiye'de 840 t/km² toprak kaybolmaktadır. Bu nedenle, akarsu havzalarında katı madde hareketinin incelenmesi büyük önem taşır.

Öncelikle böyle bir çalışmanın literatürdeki ihtiyacını fark eden, bilimsel çalışmalar konusunda verdiği fikirler ile vizyonumu genişletmeme katkıda bulunan, çalışmamın her aşamasında beni teşvik eden değerli danışman hocam Prof. Dr. Hafzullah AKSOY'un çalışmadaki emeğinin çok büyük olduğunu belirtmek isterim. Bu çalışma onun izlediği bilimsel yol sayesinde sonuçlanmıştır. Kendilerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve Kore Araştırma Vakfı (KRF) ortak destekli 108Y250 no'lu uluslararası araştırma projesinin bir parçası olarak gerçekleşmiştir. TÜBİTAK'a bana sağladığı yüksek lisans bursu için ayrıca teşekkür ederim.

Projede beraber çalıştığım değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Necati Erdem ÜNAL, Doç. Dr. Şevket ÇOKGÖR, Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ ve Doç. Dr. Jaeyoung YOON'a deney düzeneği ve deney prosedürü aşamasındaki önemli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Deneyler sırasında yardımlarından dolayı hidrolik laboratuvarı personeline, çalışmamın belli dönemlerindeki katkılarından dolayı İnş. Yük. Müh. Özgür DURMUŞ'a, deneyler ve ölçümler sırasındaki yardımlarından dolayı Çev. Müh. Şevket Boran İNCİ'ye ve tezimin yazım aşamasında bana yardımcı olan, dostluğunu ve değerli fikirlerini esirgemeyen Ar. Gör. Dr. Ebru ERİŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, çalışmalarım süresince maddi ve manevi olarak benden hiçbir zaman yardımını esirgemeyen, her koşulda yanımda olan ve bana tüm kalbiyle inanan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2011

Kaan KOCA
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Konu ve Kapsam	1
1.2 Amaç	1
1.3 Konunun Önemi ve Değeri.....	2
1.4 Çalışmanın Düzeni	2
2. LİTERATÜR	5
2.1 Tanımlar ve Kavramlar	5
2.2 Katı Madde Taşınımı.....	9
2.3 Laboratuvar ve Arazi Çalışmaları	14
2.3.1 Laboratuvar çalışmaları	14
2.3.2 Arazi çalışmaları.....	19
2.4 Erozyon ve Katı Madde Taşınım Modelleri.....	21
3. İTÜ YAĞIŞ SİMÜLATÖRÜ.....	25
3.1 Genel	25
3.2 Yağış Simülatörleri ile Yapılan Çalışmalar.....	27
3.3 İTÜ Yağış Simülatörü Elemanları.....	33
3.4 Erozyon Kanalı.....	35
3.5 Kanal Eğiminin Ayarlanması	38
4. DENEYLER.....	41
4.1 Katı Madde	41
4.1.1 Elek analizi	41
4.1.2 Zeminin üniformluğu.....	42
4.1.3 Özgül ağırlık tayini	42
4.2 Kumun Kanala Yerleştirilmesi.....	44
4.3 Yağış Deneyleri	45
4.3.1 Yağış şiddeti	45
4.3.2 Yağış üniformluğu	47
4.4 Deney Prosedürü	50
4.4.1 Deney sisteminin çalıştırılması.....	50
4.4.2 Katı madde ölçümleri	52
4.4.3 Kuru katı madde hesabı	53
5. UYGULAMA VE DEĞERLENDİRMELER.....	57

5.1 Derecikte ve Derecikler Arası Alanda Meydana Gelen Erozyon Miktarının Karşılaştırılması	57
5.2 Yağış Şiddetinin Erozyon ve Hacimsel Katı Madde Konsantrasyonu Üzerine Etkisi.....	58
5.3 Eğimin Erozyon ve Hacimsel Katı Madde Konsantrasyonu Üzerine Etkisi ...	60
5.4 Katı Madde Yüğü Taşınımı Denklemi Geliştirilmesi	65
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR.....	71

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASCE	: American Society of Civil Engineers
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
KRF	: Korea Research Foundation
TS	: Türk Standartları
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Akımın taşıma kapasitesi (T_c) ve akım içindeki katı madde yükünün (Q_s) farklı durumlarında gözlenen katı madde hareket modları (Aksoy ve diğ., 2009).	10
Çizelge 2.2: Kum için sediment taşıma kapasitesi (g/dak), yağış şiddeti 122 mm/sa, (Meyer ve diğ., 1983).	15
Çizelge 2.3: Erozyon ve katı madde taşınım modelleri.	23
Çizelge 3.1: Eğim matrisi (işaretler kanalın enine ve boyuna doğrultuda alacağı eğimleri göstermektedir).	38
Çizelge 3.2: Eğim ayarlama tablosu.	39
Çizelge 4.1: Elek analizi sonuçları	41
Çizelge 4.2: Özgül ağırlık deneyi.	43
Çizelge 4.3: Sayaç değeri belirleme deneyleri (VeeJet 8070).	46
Çizelge 4.4: Uygun yağış şiddetinin elde edilebilmesi için gerekli simülator ayarları.	47
Çizelge 4.5: Yağış üniformluk sınıfları	47
Çizelge 4.6: Erozyon kanalı üzerinde yağış üniformluğu.	48
Çizelge 5.1: Katı madde taşınım denklemi ampirik katsayıları.	66
Çizelge 5.2: Derecik-derecikler arası alanda (birlikte) meydana gelen erozyon.	67
Çizelge 5.3: Bileşke eğim ile erozyon arasındaki ilişkinin ampirik katsayıları.	68

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Akarsu havzasından alınan A-A kesit (Aksoy ve diğ., 2009).	6
Şekil 2.2: Havza yamacındaki topografik oluşumlar (Kavvas ve diğ., 2006).	7
Şekil 2.3: Doğal arazide mikrotopoğrafik oluşumlar (İTÜ Ayazağa kampüsü Hidrolik laboratuvarı doğu cephesine bakan doğal örtülü şev, Foto: H. Aksoy, Mart 2004).	8
Şekil 2.4: Yapay arazide mikrotopoğrafik oluşumlar (Garzweiler linyit kömürü açık madeninde kazı sonrasında yeniden dolgu ile oluşturulan şev, Bonn, Almanya. Foto: H. Aksoy, Ağustos 2009).	8
Şekil 2.5: Hendek erozyonu (Url-1, 2011).	9
Şekil 3.1: Damla şekillendirici (Url-2, 2010).	28
Şekil 3.2: Basınçlı püskürtücü VeeJet 80100.	29
Şekil 3.3: Rainulator, 1960-1970 Tarım Araştırma Merkezi, Indiana, ABD (Url-3, 2010).	30
Şekil 3.4: Swanson'un hareketli kollardan oluşan simülatörü (Url-3,2010).	30
Şekil 3.5: Püskürtücü çeşitleri a) sabit püskürtücü, b)dönen püskürtücü, c)dönen diskli püskürtücü (Url-2, 2010).	31
Şekil 3.6: Norton yağış simülatörü (Url-3, 2010).	32
Şekil 3.7: Norton yağış simülatörü detayı (a) püskürtücü, (b) motor (Url-3, 2010)..	33
Şekil 3.8: Yağış simülatörü elemanları ve erozyon kanalı.	34
Şekil 3.9: Havza yamacındaki topografik oluşumlar (Laboratuvar modelinde kırmızı çerçeve içine alınan kısım incelenmektedir).	35
Şekil 3.10: Erozyon kanalı planı ve kesitleri.	37
Şekil 3.11: Eğim ayarlama sistemi.	39
Şekil 4.1: Granülometri eğrisi.	41
Şekil 4.2: Erozyon kanalında yağış öncesi oluşturulan derecik.	44
Şekil 4.3: Derecik oluşturulmadan önceki durum.	45
Şekil 4.4: Derecik şablonu.	45
Şekil 4.5: Kanal alanı boyunca yağış üniformluğunun belirlenmesi için kanal yüzeyine yerleştirilen 88 adet ölçüm kabı.	49
Şekil 4.6: Yağışın kanal yüzeyinde alansal dağılımı (üniformluk) deneyi.	50
Şekil 4.7: %5 enine-%5 boyuna eğimde, 105 mm/sa'lik yağış altında yapılan deney sonrası mikrotopografyanın görünümü.	51
Şekil 4.8: Katı madde ölçümleri a) ölçülecek numuneler b)su ve katı madde ağırlığı c)katı madde ağırlığı.	52
Şekil 4.9: Kuru haldeki katı madde konsantrasyonunun hesaplanması.	54
Şekil 5.1: 85 mm/sa yağış için meydana gelen katı madde kaybı [kg].	57
Şekil 5.2: 105 mm/sa yağış için meydana gelen katı madde kaybı [kg].	58
Şekil 5.3: Bileşke eğim ile toplam hacim, toplam ağırlık, katı madde ağırlığı ve hacimsel katı madde konsantrasyonu değişimi.	60

Şekil 5.4: Boyuna eğim (S_y) =%20 için enine eğimin (S_x) değişmesiyle 1 no'lu çıkış ağzından toplanan katı madde kayıpları.	62
Şekil 5.5: 85 mm/sa'lik yağış için eğime bağlı katı madde grafikleri.	63
Şekil 5.6: 105 mm/sa'lik yağış için eğime bağlı katı madde grafikleri.	64

YAĞIŞ KAYNAKLI EROZYON VE KATI MADDE HAREKETİNİN LABORATUVAR MODELİ

ÖZET

Erozyon zemin parçacıklarının yağış, akış ve rüzgar etkisiyle yerinden aşınması ve taşınmasıdır. Zemin parçacıklarının yağış ve akış tarafından parçalanarak taşınması olarak tanımlanan su erozyonu ise, süreci en karmaşık ve zararı en çok olan erozyon biçimidir. Akış ile birlikte katı madde ve kirleticiler deniz ve göllere taşınır; suyun kalitesini bozar. Bu nedenle, çevrenin korunması açısından erozyon miktarının tahmin edilmesi önemlidir.

Erozyon bir akarsu havzasında yamaçlarda veya akarsu yatağında meydana gelebilir. Yamaç ölçeğinde birçok erozyon modeli bulunmaktadır. Yamaçlarda meydana gelen erozyon sürecini tanımlamak için fiziksel tabanlı yağış-akış modellerinin kullanılması esastır. Fakat, bu modeller için bazı parametrelerin önceden kalibre edilmesi gerekmektedir. Literatürde yapılan birçok çalışma havza yamaçlarını düzlemsel kabul edip, erozyonu sadece boyuna doğrultudaki eğimin etkisi altında incelemiştir. Öte yandan doğada yamaçlar enine doğrultuda da eğime sahiptirler. Yamaçlarda meydana gelen akışı ve katı madde hareketini hassas ve güvenilir bir şekilde modelleyebilmek için 2-boyutlu modeller geliştirilmiş; fakat bu modellerin laboratuvar ve arazi verileriyle kalibre edilmesi mümkün olmamıştır. Geliştirilen bu modellerin performansının belirlenmesi ve kalibrasyonunun yapılabilmesi için laboratuvar çalışmaları gerekmektedir.

Bu amaçla İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda, enine ve boyuna doğrultuda eğimi ayarlanabilen bir laboratuvar kanalında, erozyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılmak üzere, doğadaki yağışın fiziksel özelliklerine benzer yağış elde etmek ve farklı çevre koşullarının (eğim, yağış şiddeti gibi) erozyon üzerindeki etkisini belirleyebilmek için bir yağış simülatörü geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında 650 cm uzunluk, 136 cm genişlik ve 17 cm derinliğindeki bir erozyon kanalında, medyan çapı (D_{50})=0,45 mm olarak belirlenen ve bitki örtüsü korumasına sahip olmayan (çıplak) üniform kumda, iki farklı yağış şiddetinde (85 ve 105 mm/sa) ve belirli enine-boyuna eğimlerde 20 farklı erozyon deneyi yapılmıştır.

Yağış simülatöründe 85 ve 105 mm/sa'lik yağış için sırasıyla VeeJet 8060 ve VeeJet 8070 olmak üzere beşer adet püskürtücü kullanılmıştır. Püskürtücüler yatay bir çubuk (püskürtücü çubuğu) üzerine yerleştirilmiştir. Püskürtücü çubuğu ile yatay kanal tabanı arasındaki mesafe 2,60 m olarak ayarlanmıştır. Literatürde bu mesafedeki VeeJet püskürtücülerden yayılan yağmur damlalarının doğadaki yağmur damlalarının eşdeğeri limit hıza ulaştığı belirtilmiştir. Kanal alanı üzerinde üniform yağış dağılımı elde etmek için üniformluk deneyleri yapılmış ve püskürtücüler arasındaki mesafe 125 cm iken Christiansen Üniformluk Katsayısı (CuC) VeeJet 8070 için % 87,3, VeeJet 8060 için ise % 83,0 olarak belirlenmiştir.

Erozyon deneyleri sırasında veri kümesini elde etmek için kanaldan ilk yüzeysel akışın çıkışa ulaşması ile beraber 15 saniye ile 1 dakika arasında değişen zaman aralıklarında akış verileri toplanmıştır.

Bu tez çalışmasında yapılan deneyler sonucunda, enine ve boyuna eğimin artmasıyla erozyonun arttığı, yağış şiddetinin artmasıyla da erozyonun arttığı ancak hacimsel katı madde konsantrasyonunun etkilenmediği gözlenmiştir. Katı madde yükü ile akış debisi ve eğim arasında; ayrıca eğim ile erozyon arasında farklı ilişkiler kurulmuştur. Çalışmanın sonucunda elde edilen bilgiler, kumlu zeminlerin yağış sonucu meydana gelen erozyon karşısında davranışı hakkında bilgi verirken, 2-boyutlu erozyon modellerini kontrol ve kalibre etmek amacıyla da kullanılabilir.

LABORATORY MODELING OF RAINFALL INDUCED EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT

SUMMARY

Erosion is detachment and transportation of soil particles by the factors such as rainfall, runoff and wind. Water erosion which is defined as detachment and transportation of soil particles by rainfall and runoff, is the most complex and destructive form of erosion. Runoff along with the sediments and contaminants carry soil to the sea and lakes and degrade water quality. Thus, estimating the amount of erosion is important to protect to environment.

Soil erosion by water can occur on hillslopes and in stream channels. Several hillslope scale erosion modeling alternatives exist. The use of a physically based rainfall-runoff model is basis in identifying the erosion process in such areas. However, such models need prior calibration of some parameters. Existing studies in literature are examined hillslope as a plane surface with a certain longitudinal slope. On the other hand, most hillslopes also have a transversal slope in nature. For modeling runoff and sediment movement on hillslopes precisely and reliably, 2D models have been developed, but these models have not been able to calibrated with laboratory and field data so far. Laboratory studies are required to do calibration and to determine performance of these models.

For this purpose, the laboratory experiments were conducted at Hydraulics Laboratory of the Technical University of Istanbul with an erosion flume, adjustable to two different slopes, one in longitudinal dimension, and the other one is in transversal dimension. Furthermore, a rainfall simulator was developed to simulate physical characteristics of the natural rainfall as closely as possible and to study the effect of environmental conditions (such as slope and rainfall intensity).

In this thesis, 20 erosion experiments were conducted with a laboratory flume, 650 cm long, 136 cm width, 17 cm depth, on bare uniform sand with a median grain size of $(D_{50})=0.45$, using two different rainfall intensities (85 mm/hr and 105 mm/hr) and with certain transversal-longitudinal slopes.

In order to deliver 85 mm/hr and 105 mm/hr rainfall, VeeJet 8060 and VeeJet 8070 nozzles, mounted on a horizontal bar (nozzle bar), were used in the rainfall simulator, respectively. The distance between the flume bed and nozzles was set to 2.60 m. In literature, it is stated that this distance is adequate for raindrops to achieve their terminal velocity closely equivalent to that of natural rainfall. In order to obtain the uniform rainfall distribution over the entire flume, uniformity experiments were carried out and it was found that Christiansen Uniformity Coefficient (CuC) is %87.3 for 105 mm/hr rainfall, % 83.0 for 85 mm/hr rainfall while the spacing between the nozzles is 125 cm.

During the erosion experiments in order to obtain a data set, samples of the flow were started to be collected when the first surface runoff reached the outlet. The time between consecutive samples was range from 15 s to 1 min.

Based on the results of experimental studies performed in this thesis, it was concluded that soil loss was increasing with increasing longitudinal and transversal slope as well as with increasing rainfall intensity, however, it was observed that volumetric sediment concentration did not change with increasing rainfall intensity. Different relationships were obtained between the sediment load, flow rate and slope steepness, and between slope and erosion. The data obtained from these experiments account for the behaviour of sand under rainfall and can also be used to check and calibrate different 2D erosion models.

1. GİRİŞ

1.1 Konu ve Kapsam

Erozyon her türlü toprak kaybı olarak bilinir ve rüzgar, yağış ya da akış kaynaklı olabilir. Bunlar sırası ile rüzgar erozyonu, yağış erozyonu ve akış erozyonu olarak adlandırılır. Yağış ve akış erozyonu olarak ikiye ayrılan su erozyonu en karmaşık ve zararı en fazla olan erozyon biçimidir. Su ile oluşan erozyonun şiddeti ve miktarı, topografya, iklim, zemin çeşidi, bitki örtüsü ve arazi kullanımı gibi birçok faktöre bağlıdır.

Erozyon bir havzada şev yüzeyinin yağış tarafından aşınması ile başlar ve şevlerde oluşan dereciklerde yoğunlaşır veya tabaka erozyonu olarak devam eder. Derecik olmayan alanlarda suyun akış hızı ve meydana gelen erozyon miktarı düşüktür. Dereciklerde ise akım hızlı olduğundan erozyon miktarı fazladır.

Bu tez çalışması kapsamında yağış-akış-katı madde verilerinin elde edilmesi amacıyla bir yağış simülatörü oluşturulmuştur. Bu simülatör kullanılarak bitki örtüsü korumasına sahip olmayan (çıplak) kum üzerinde iki farklı yağış şiddetinde (85 ve 105 mm/sa) ve belirli enine-boyuna eğimlerde 20 farklı erozyon deneyi yapılmıştır. Deneylerin sonuçları her bir deneyde erozyona uğrayan toplam katı madde miktarının belirlenmesi ve hacimsel katı madde konsantrasyonunun hesaplanması suretiyle ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

1.2 Amaç

Çalışmanın amacı, (1) derecik ve derecikler arası alanda meydana gelen erozyonun karşılaştırılması, (2) yağış şiddetinin toplam erozyon ve hacimsel katı madde konsantrasyonu üzerine etkisinin belirlenmesi, (3) enine, boyuna ve bileşke eğimin toplam erozyon ve hacimsel katı madde konsantrasyonu üzerine etkisinin belirlenmesi, (4) katı madde yük kaybı için bileşke eğim ve akış debisine bağlı matematiksel bir denklem geliştirilmesi ve bu denklemin ampirik katsayılarının

literatürde yamaç ölçeğindeki erozyon modellerinde katı madde yükü kaybının belirlenmesi için en çok kullanılan denklem ile karşılaştırılması olarak özetlenebilir.

1.3 Konunun Önemi ve Değeri

Çevrenin korunması açısından erozyon miktarının tahmin edilmesi önemlidir. Erozyon, su kalitesinin bozulmasına yol açar. Dolayısıyla, denizlere ve göllere taşınan katı madde miktarının bilinmesi çevre planlaması açısından önemlidir. Çünkü, su ile beraber sadece katı madde değil aynı zamanda fosfor ve azot gibi besi maddeleri ve kirleticiler de katı madde taneciklerine yapışarak taşınır. Ayrıca, erozyon, tarım arazilerinin verimliliğini azaltır ve ekosistemin düzenini bozar. Erozyona engel olmak, bütünleşik yönetim çalışmalarıyla mümkün olabilmektedir. Bu sebeple meydana gelecek erozyon miktarının ve şeklinin tahmin edilmesi önemlidir.

Bu çalışmada, havza modeline ilk adım olabilecek nitelikte yamaç ölçeğindeki katı madde hareketinin laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmaya arazideki mikrotopografyanın da dahil edilmesi, daha hassas ve gerçekçi tahminler yapılmasını sağlamaktadır. Literatürde mikrotopografik oluşumları tamamen ve açık bir şekilde dikkate alan sınırlı sayıda model mevcuttur. Bu tip modellerin parametrelerinin ayarlanması için gerekli veri de sınırlıdır. Kilinc ve Richardson (1973) tarafından 1,21 m yükseklik, 1,52 m genişlik ve 4,57 m uzunluğundaki deney düzeneği ile elde edilen veriler literatürde mevcut veriler arasında halen en çok kullanılanlardandır.

Literatürde mikrotopografyayı da hesaba katan sınırlı sayıdaki model, derecikler arası alandan akış yatağına ulaşan katı maddeyi ihmal etmiştir. Bu çalışma sırasında dereciklerden akış yatağına ve derecikler arası alandan akış yatağına ulaşan katı madde zamana bağlı olarak iki farklı çıkış ağzından ölçülmüştür.

Ayrıca literatürde şu ana kadar laboratuvar erozyon kanalının iki doğrultuda eğim verilmesi sonucu elde edilen yağış-akış-katı madde verilerine de rastlanmamıştır. Bu sebeple, bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler, literatürdeki mevcut modellerin denenmesi açısından önemlidir.

1.4 Çalışmanın Düzeni

Çalışmanın ikinci bölümünde öncelikle konu ile ilgili tanımlar ve kavramlar açıklanmış, daha sonra literatürde katı madde taşınımı ile ilgili yapılmış çalışmalar,

benzer dzenekler ile yapılan laboratuvar ve arazi deneyleri ve katı madde taşınımını modellemek için geliştirilen modeller detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde İTÜ İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda yağış-akış-katı madde verilerini elde edebilmek için geliştirilen erozyon kanalı ve yağış simülatörü hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Katı madde hareketinin laboratuvar deneylerinin yapılması amacıyla belirlenen enine ve boyuna doğrultuda eğimler anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde geliştirilen yağış simülatörü ve erozyon kanalı ile ilgili yapılan başlangıç deneylerine yer verilmiş, kullanılan malzemenin fiziksel özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler (elek analizi, zemin üniformluğu, özgül ağırlık tayini) anlatılmıştır. Katı madde hareketinin laboratuvar deneylerinin yapılması amacıyla kullanılan yağış şiddetleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde yağış şiddeti ve eğimin erozyon ve akış içindeki toplam hacimsel katı madde konsantrasyonu üzerine etkisi incelenmiş, erozyona uğrayan katı madde miktarı ile eğim ve akış debisi arasında ilişkiler oluşturulmuştur.

Altıncı bölümde çalışma sonucu ortaya çıkan genel sonuçlardan bahsedilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR

Bu çalışma, yağış ve akış sonucu oluşan katı madde hareketinin laboratuvar deneylerine dayandığından bu bölümde önce gerekli tanımlar ve kavramlar verilmiş, daha sonra katı madde taşınımı, laboratuvar ve arazi deneyleri ve geliştirilen erozyon modelleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

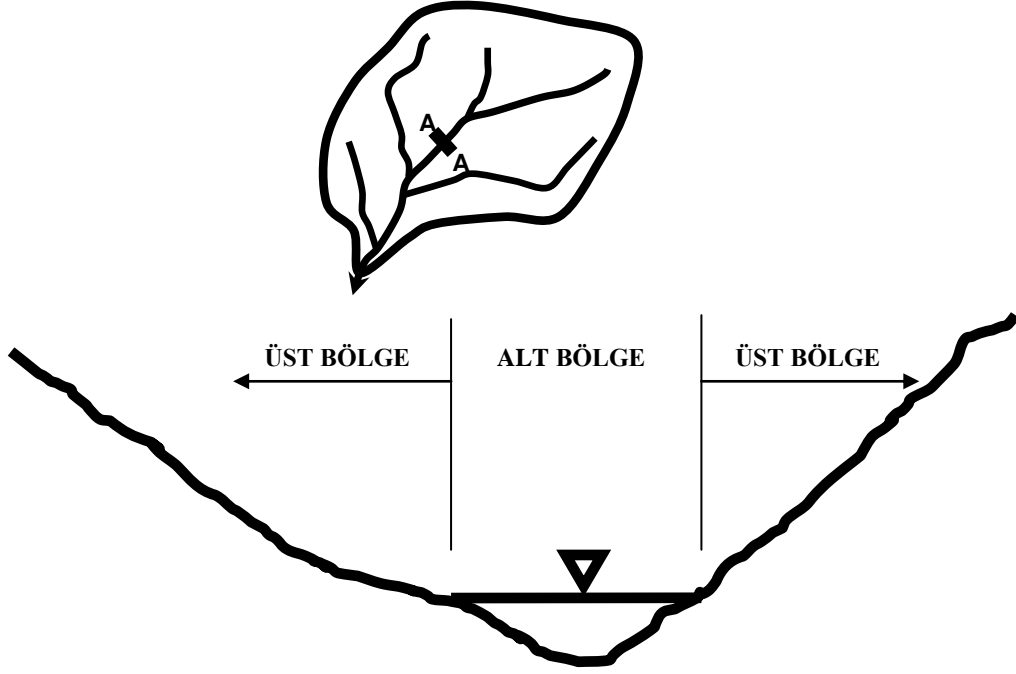
2.1 Tanımlar ve Kavramlar

Erozyon, katı madde taneciklerinin rüzgar, yağış ve akış gibi etmenlerin etkisi ile yerinden ayrılarak taşınması olarak tanımlanır (Foster ve Meyer, 1972). Erozyon aynı zamanda yeryüzündeki taş ve toprağın gevşeyerek veya ayrışarak yerinden kopması olarak da tanımlanabilir (ASCE, 1970). Buna göre erozyon rüzgar, yağış ve akış erozyonu olarak sınıflandırılabilir.

Erozyon bir akarsu havzasında yamaçlarda veya akarsu yatağında meydana gelebilir. Akarsu havzası içerisinde Şekil 2.1'deki gibi akarsuyun enine herhangi bir kesit ele alınsın. Bu enkesitte şevin yukarı kısımlarında yüzeysel akış gözlenir. Bu kısım üst bölge (yukarı bölge) olarak adlandırılır. Akarsu yatağı ile yatağa yakın şev bölgeleri de alt veya aşağı bölge olarak bilinir. Üst bölgede meydana gelen erozyon havzanın hidrolojisi, topoğrafyası, zeminin erozyona ve taşınmaya karşı direnci, bitki örtüsü, arazi kullanımı, yüzeyaltı koşulları ve arazinin işlenme şekline bağlıdır (Foster, 1982). Buna göre akım ile birlikte taşınan katı madde debisi (dolayısıyla erozyon) akımın hidrolik özellikleri, zeminin fiziksel özellikleri ve yüzey karakteristiklerinin bir fonksiyonudur.

Akarsu enkesitinde yukarı bölgede katı maddenin yerinden ayrılması ve taşınımı dört farklı şekilde olabilir: (1) yağış ile yerinden ayrılma, (2) akım ile yerinden ayrılma, (3) yağış ile taşınım, (4) akım ile taşınım (Kılınç ve Richardson, 1973). Hem yağış hem de akım etkisi ile yerinden ayrılma basit bir süreç olmadığından genellikle ampirik denklemler ile ifade edilir (Bennett, 1974). Ayrıca bu bölgede katı madde taneciklerinin harekete başlamasında şev eğimi ve akımın Reynolds sayısının

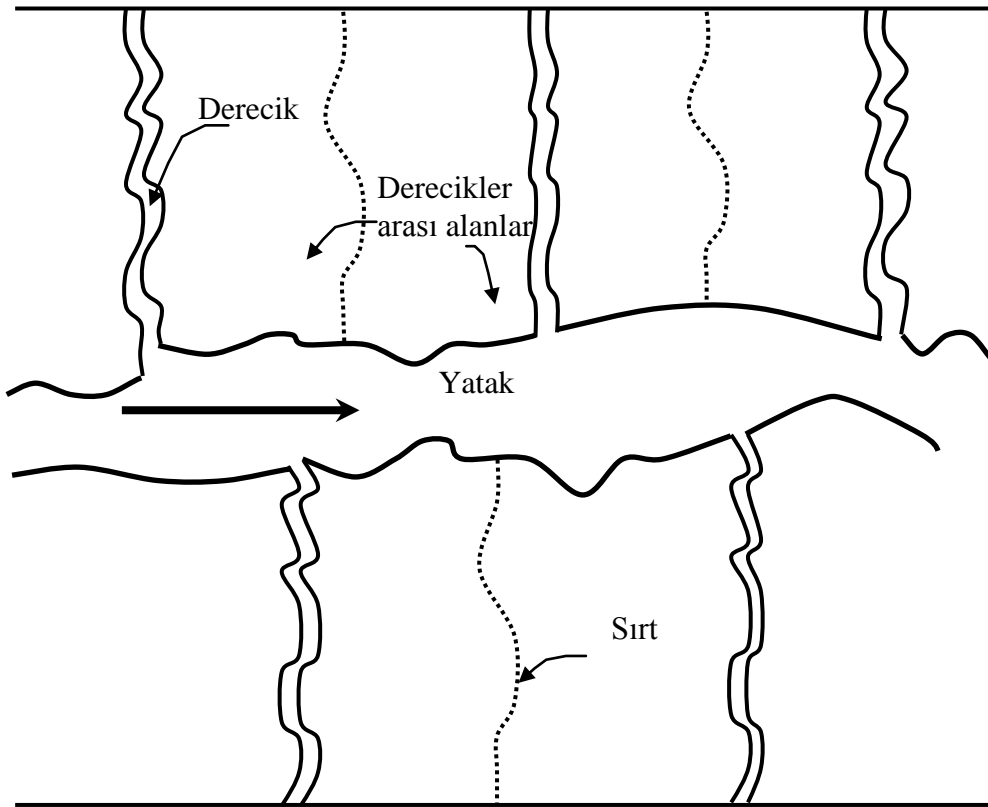
etkisinin olduğu Lau ve Engel (1999) tarafından gösterilmiştir. Artan şev eğimi hareket için gereken kritik kayma gerilmesini azaltarak katı madde taneciklerinin hareketini kolaylaştırmaktadır.



Şekil 2.1: Akarsu havzasından alınan A-A kesit (Aksoy ve diğ., 2009).

Üst bölgelerde meydana gelen erozyon tek başına tabaka erozyonu olarak değerlendirilmemelidir. Üst bölgede erozyon yağış etkisi ile başlar ve tabaka erozyonu şeklinde devam eder (Meyer ve diğ., 1975). Düşen yağmur damlaları zemin yüzeyine çarptığında zemin taneciklerini ayırarak havaya sıçratır. Buna sıçrama erozyonu denir. Yağışın zemin taneciklerini ayırma etkisi, yağışın damla çapına, yağışın dağılımına, yağışın kinetik enerjisine ve zemin tanelerinin özelliklerine bağlıdır. Yağış etkisiyle zeminden ayrılan katı madde tanecikleri ince bir tabaka şeklinde hareket eder (tabaka erozyonu) ve zamanla küçük kanallarda yoğunlaşır. Bu kanallara derecik adı verilir (Foster, 1971). Derecikler içerisinde akış etkisiyle meydana gelen erozyon derecik erozyonu olarak adlandırılır. Havza yamacındaki erozyonun ayrıntısına inildiğinde, yamaçlardaki derecikler ve derecikler arasında kalan alanlarda meydana gelen iki farklı oluşum olduğu Şekil 2.2’de görülmektedir. Buna göre yamaç erozyonu dereciklerde ve derecikler arasındaki alanlarda meydana gelen erozyon olarak ikiye ayrılabilir. Dereciklerde ve derecikler arası alanlarda meydana gelen erozyon mekanizması birbirinden farklılık gösterir. Dereciklerdeki erozyonun akımın etkisi altında olduğu, buna karşın derecikler

arasındaki alanlarda yağışın etkin bir erozyon kaynağı olduğu söylenebilir (Meyer ve diğ., 1975). Derecikleri besleyen alanlarda meydana gelen erozyon sonucu yerinden ayrılan katı madde tanecikleri dereciklere, oradan da havza yamacı sonundaki kanala taşınır (Foster, 1971). Dereciklerde meydana gelen erozyon üst bölge erozyonunun önemli bir oranını oluşturmaktadır. İstanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa kampüsünde Hidrolik laboratuvarının doğusundaki doğal yamaçta bu mikrotopğrafyanın nasıl oluştuğu Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Benzer şekilde Şekil 2.4'te, Almanya'da Bonn yakınlarındaki Garzweiler linyit kömürü açık maden ocağında kazı sonrasında ortaya çıkan toprak ile oluşturulan bir şevde bu mikrotopografya bariz bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2.2: Havza yamacındaki topografik oluşumlar (Kavvas ve diğ., 2006).

Bu derecikler zeminin işlenmesi (örneğin toprağın tarımsal amaçla sürülmesi) ile ortadan kaybolacak büyüklüktedir. Derecik erozyonunun miktarının bilinmesi havzada neden olacağı zararın tahmin edilmesi ve önleme çalışmaları açısından önemlidir.



Şekil 2.3: Doğal arazide mikrotopoğrafik oluşumlar (İTÜ Ayazağa kampüsü Hidrolik laboratuvarı doğu cephesine bakan doğal örtülü şev, Foto: H. Aksoy, Mart 2004).



Şekil 2.4: Yapay arazide mikrotopoğrafik oluşumlar (Garzweiler linyit kömürü açık madeninde kazı sonrasında yeniden dolgu ile oluşturulan şev, Bonn, Almanya. Foto: H. Aksoy, Ağustos 2009).

Havzada dereciklerden daha büyük topoğrafik oluşumlar da gözlenir. Bunlar Şekil 2.5'te görüldüğü üzere toprağın işlenmesi sırasında kaybolmayan hendeklerdir. Bu hendeklerde de dereciklerdekine benzer şekilde akımın etken olduğu erozyon gözlenir (Foster ve Meyer, 1975; Morgan, 2005). Bu tür hendekler havzada bitki

örtüsünün önemli miktarda kaybolması veya arazinin yoğun olarak kullanılması sonucu ortaya çıkar. Hendek erozyonunu kontrol etmek için yapılan çalışmalar oldukça zor ve pahalıdır.



Şekil 2.5: Hendek erozyonu (Url-1, 2011).

2.2 Katı Madde Taşınımı

Yağış, akış ve rüzgar ile birlikte katı madde tanecikleri ayrıldıkları yerden uzak noktalara taşınır. Katı madde taşınımı, yağış, akış veya rüzgar ile yerinden ayrılan katı madde miktarı ve taşıyıcı etmenin (rüzgar veya genellikle akım) katı madde taşıma kapasitesi ile sınırlıdır. Yani, katı maddeyi taşıyabilecek kapasite fazlası olduğu halde yerinden ayrılacak katı madde potansiyeli veya yerinden ayrılmış katı madde olduğu halde bu katı maddeyi taşıyacak kapasite fazlası yok ise erozyon meydana gelmez. Özetle, katı madde taşıma kapasitesi, akımın taşıyabileceği maksimum katı madde miktarıdır (Huang ve diğ., 1999; Li ve Abrahams, 1999).

Akım içerisinde bulunan katı madde miktarı akımın katı madde taşıma kapasitesinin altında kaldığı sürece katı madde taşınımı meydana gelir. Ancak bu tek başına yeterli

değildir. Aynı zamanda akımın yarattığı kayma gerilmesinin katı madde taneciklerini hareket ettirebilecek kritik minimum değerın üstünde olması gerekmektedir. Aksi takdirde, erozyon yerine birikme gözlenecektir. Buna göre Çizelge 2.1'deki üç farklı hareket modu sözkonusudur. Akım içerisinde bulunan katı madde miktarı taşıma kapasitesinin üstünde ($T_c < Q_s$) ise akım, taşıma kapasitesi kadar katı maddeyi taşıyacak, geri kalanını biriktirecektir. Taşıma kapasitesi kadar katı maddenin varlığı durumunda ($T_c = Q_s$) ise var olan katı maddenin tamamı taşınacaktır. Katı madde miktarının taşıma kapasitesinin altında olması ($T_c > Q_s$) durumunda da akım kapasite eksikliğini zeminden katı madde taneciklerini ayırarak tamamlayacaktır. Doğada bu üç hareket modu (birikme, taşınma ve erozyon) aynı anda gerçekleşir. Dolayısıyla hem yerinden ayrılan, hem hareket halinde olan ve hem de birikme sonucu zemin yüzeyine yapışan katı madde tanecikleri gözlenir. Yerinden ayrılan katı madde miktarı kadar zemine geri dönen katı madde olması durumuna denge durumu adı verilir (Croley, 1982). Dolayısıyla, yukarıda belirtildiği üzere katı taşıma kapasitesi, erozyon modellerinde malzemenin yerinden ayrılması, taşınması ve birikmesi sürecini belirlemede kullanılır. O halde, katı madde hareketinin incelenmesinde akımın taşıma kapasitesinin bilinmesi gerekmektedir.

Çizelge 2.1: Akımın taşıma kapasitesi (T_c) ve akım içindeki katı madde yükünün (Q_s) farklı durumlarda gözlenen katı madde hareket modları (Aksoy ve diğ., 2009).

Hareket Modu	Durum	Birikme	Taşınım	Erozyon
I	$T_c < Q_s$	•	•	
II	$T_c = Q_s$		•	
III	$T_c > Q_s$		•	•

Akımın katı madde taşıma kapasitesinin doğru ve hassas olarak hesaplanması, erozyon ve katı madde hareketini doğru modellemek açısından önemlidir (Ahmandi ve diğ., 2006; Hessel ve Jetten, 2007). Fiziksel tabanlı erozyon modelleri için taşıma kapasitesine duyulan ihtiyaç (Nearing ve diğ., 1989; De Roo ve diğ., 1996; Morgan ve diğ., 1998); zemin tanelerinin yerinden ayrılması, taşınması ve birikmesi sürecini tanımlamak için, araştırmacıları taşıma kapasitesi için çeşitli formüller kullanmaya yönlendirmiştir (Foster ve Meyer, 1972; Finkner ve diğ., 1989; Govers, 1990b, Ferro, 1998; Hessel ve Jetten, 2007). Bu amaçla, Meyer-Peter-Muller (1948), Bagnold (1966), Laursen (1958), Yalin (1963) ve Yang (1973) denklemleri veya benzer bir denklem kullanılabilir.

Çoğu taşıma kapasitesi denklemi açık kanal akımları için geliştirilmiştir. Oysa akarsudaki akış ile yüzeysel akış birbirinden farklıdır.

- Yüzeysel akış sığdır. Sığ sularda akım karakteristikleri sürekli değişir (Alonso ve diğ., 1981; Singh, 1997)
- Yüzeysel akış, yüzey pürüzlülüğü ve yağmur damlasının aşındırma etkisinden daha çok etkilenir (Alonso ve diğ., 1981; Singh, 1997; Abrahams ve diğ., 1998).
- Yüzeysel akışta askı maddesi halinde taşınma akış derinliğinin küçük olmasından dolayı sınırlıdır ve yatak yükü daha önemlidir (Julien ve Simons, 1985; Morgan, 1995; Singh, 1997).
- Akarsularda akım genelde türbülanslıdır; yüzeysel akış türbülanslı veya laminer rejimde olabilir (Julien ve Simons, 1985).

Buna rağmen, erozyon çalışmalarında genellikle akarsular için geliştirilen katı madde taşınım denklemleri kullanılır. Derecikler arası alanlar için geliştirilen taşıma kapasitesi denklemleri de vardır (Evaraert, 1991; Huang, 1995). Fakat bu denklemler laboratuvarda küçük kanallar için geliştirilmiştir ve arazi çalışmaları için uygun değildir. Denklemler genellikle pürüzlü olmayan yüzeyler için çıkarılmıştır. Derecikler arası alanlarda pürüzlü yüzeyler için geliştirilmiş herhangi bir taşıma kapasitesi denklemine rastlanmamıştır.

Katı madde taşıma kapasitesi için geliştirilen ampirik denklemlerin çoğu katı madde taşınımını, akım hızı ve debisi, akım derinliği ve zemin özelliklerinin fonksiyonu olarak ele alır. Bu denklemlerin elde edilmesinde genellikle laboratuvar çalışmaları kullanılmıştır. Doğal olarak her bir denklem geliştirildiği koşullar ile sınırlıdır (Beschta, 1987).

Low (1989), akımın katı madde taşıma kapasitesinin belirlenmesi için geliştirilen bazı modelleri kendi laboratuvar verileriyle denemiş ve Einstein-Brown (1950) denkleminin kabul edilebilir sonuçlar verdiğini, öte yandan Meyer-Peter Muller (1948), Shields (1936), Bagnold (1966), Yalin (1963) ve Smart (1984) denklemlerinin sonuçlarının tatmin edici olmadığını belirtmiştir.

Alonso ve diğ. (1981), Yang denklemi (kaba kumlar için), Laursen denklemi (ince kumlar için) ve Yalin (1963) denklemi başta olmak üzere taşıma kapasitesi için

geliştirilmiş dokuz farklı denklemi laboratuvar ve arazi verileriyle incelemiş, ayrıca literatürdeki verileri kullanarak açık kanal akımları için geliştirilen katı madde taşıma kapasitesi denklemlerini yüzeysel akış için konkav yüzeylerde test etmiştir. Yalin (1963) denkleminin hem sığ sularda kumlar ve düşük yoğunluklu malzemeler için hem de derin sularda düşük yoğunluklu malzemeler için tatmin edici sonuçlar verdiğini, Laursen (1958) denkleminin ise akarsular (derin sular) için kumlar ve düşük yoğunluklu malzemelerde iyi sonuçlar verdiğini belirlemiştir. Alonson ve diğ. (1981)'e göre Yang (1973) denklemi ise sadece derin sularda kumlu zeminler için kullanılabilir. Sonuç olarak Yalin (1963) denkleminin yüzeysel akış için kullanılabilir en uygun denklem olduğunu belirlemiştir, ayrıca Meyer-Peter Muller (1948) denkleminin zaman zaman iyi sonuçlar verdiğini söylese de Bagnold (1966), Laursen (1958) ve Yang (1973) denklemlerinin yüzeysel akış için kullanılmasının doğru olmadığını belirtmiştir.

Govers (1992a), bazı denklemlerin yüzeysel akış için performansını ve uygulanabilirliğini incelemiş, bu amaçla Govers (1990b) tarafından laboratuvar kanalından elde edilen verileri kullanmıştır. Yang (1973) denkleminin yüzeysel akış için uygun olmadığını belirtmiş, kayma gerilmesine ve akış gücüne dayalı denklemlerin daha iyi sonuçlar verdiğini bulmuştur.

Prosser ve Rustomji (2000), bazı taşıma kapasitesi denklemlerini karşılaştırmıştır. Debinin ve eğimin katı madde taşınımını etkileyen en önemli faktörler olduğunu; debi ve eğim kullanılarak kayma gerilmesi ve akış gücünün elde edilebileceğini belirtmiştir.

Erozyona ve katı madde hareketine etki eden faktörler iklim, topoğrafya, zemin cinsi, bitki örtüsü ve arazi kullanımı olarak gösterilebilir (Kuznetsov ve diğ., 1998). Bu faktörlerden en önemlisi olarak bilinen yağışın zemini aşındırma gücü (erozivite), yağışın şiddetine, süresine ve frekansına bağlıdır (Wischmeier ve Smith, 1978). Doğal bitki örtüsünden yoksun kurak bölgelerde yüzeysel akış, önemli miktarda katı maddenin taşınmak üzere yerinden ayrılmasına neden olmaktadır. Buna karşın, sulak bölgelerde var olan bitki örtüsü katı maddenin yerinden ayrılmasına engel olur. Bu yüzden yağış başlangıcındaki doğa koşulları önemlidir. Benzer nedenle akım ile birlikte taşınan katı madde miktarı kış aylarında yaz aylarındakinden az olur. Ancak kış aylarında bile olsa yüksek şiddetteki yağışların önemli sayılabilecek erozyonla sonuçlanabildiği unutulmamalıdır (ASCE, 1970).

Katı madde hareketi akımın hidroliğine duyarlıdır. Bu yüzden erozyon modellerinin yağış ve akış erozyonuna ait parametrelerinin kalibrasyonu yerine akım hız ve derinlik profillerinin detaylı bir şekilde incelenmesi çok daha önemlidir. Ancak erozyonun (yerel koşullara bağlı olarak) bu parametrelerden de etkilenebileceği göz önüne alınmalıdır (Smith ve diğ., 1999).

Artan yağış şiddeti havzada kararsız zemin ortamlarına neden olmaktadır. Bu yüzden havzada toprak kaymaları da beklenebilir. Toprak kaymaları erozyon kaynağı olarak değerlendirilir. Bununla ilgili çalışmalar literatürde yer almıştır. Montgomery ve Dietrich (1994) sığ toprak kaymalarının yerini belirlemeye yarayan bir şev stabilite modeli önermiştir. Ayrıca son yıllarda, sığ toprak kaymaları için fiziksel tabanlı modeller geliştirilmeye başlanmıştır (Burton ve Bathurst, 1998; Lancaster ve Grant 1999; Venkatachalam, 1999; Kuriakose ve diğ., 2009). Böylelikle toprak kayması beklenen sorunlu bölgelerin risk haritalarının çıkarılması mümkün olabilmektedir.

Yağış şiddetinin artması ile kinetik enerji ve dolayısıyla yağmur damlalarının katı madde taneciklerini yerlerinden ayırma yeteneği artacağından katı madde konsantrasyonu da artar. Yağış boyunca akımın debisi artacağından konsantrasyon yavaş yavaş azalır. Bu yüzden akım içerisinde katı madde konsantrasyonu yağışın başlangıcında büyük olduğu halde kararlı bir duruma ulaşmaya kadar azalması beklenir (Proffitt ve diğ., 1991). Akımın artması ile zemin yüzeyinde bir su tabakası oluşur. Bu su tabakası katı madde taneciklerinin yağış ile yerlerinden ayrılmasını engelleyen koruyucu bir tabaka şeklini alır (Singh ve Prasad, 1982).

Yağış erozyonu çoğunlukla yağışın başlangıcında etkindir. Yağışla birlikte akımın oluşması ile yağış erozyonunun toplam erozyon içindeki payı azalmakta, akım erozyonu etkin olmaya başlamaktadır. Bu yüzden yağış erozyonu, katı madde miktarının zamanla değişimini veren katı madde zaman serilerinde (sedimentgraflarda) yükselme eğrisini, akım erozyonu da çekilme eğrisini oluşturmaktadır (Park ve diğ., 1982).

Havzada üst bölgenin aksine havzanın alt bölgelerinde genellikle daha kaba taban katı maddesi taşınır. Buralarda kesintili olmayan bir akım söz konusudur. Taban katı maddesinin akım içerisinde akım ile birlikte hareket ettiği ve boyuna dispersiyonun ihmal edilebilecek mertebede olduğu kabul edilebilir (Bennett, 1974). Aslında havzada alt bölgede meydana gelen erozyon akarsu tabanında ve şevinde olmak

üzere iki farklı şekilde incelenebilir. Çok basit bir yaklaşım olarak; akarsu debisi (Q) ve kanal taban eğimi (S)'nin çarpımının, taban katı madde debisi (Q_s) ve katı madde parçacıkları çapı (d_s)'in çarpımı ile Denklem 2.1'de görüldüğü üzere doğru orantılı olduğu söylenebilir (ASCE, 1970).

$$QS \propto Q_s d_s \quad (2.1)$$

Akarsu yatağında akım hızı şevlere yakın bölgelerde eksendekine göre daha düşüktür. Eksene yakın bölgelerde kaba malzeme taşınabildiği halde şevlere yakın bölgelerde ince malzemenin bile taşınmayıp biriktiği gözlenebilir. Bu durum akarsu kanalındaki erozyon için 1-boyutlu modellerin yeterli olamayacağını, bu yüzden 2-boyutlu modellerin kullanılması gerektiğini göstermektedir. Ancak uygulamadaki zorluklar nedeniyle modeller tek boyuta indirgenmiştir. Akarsu enkesitindeki bu durum enkesitin belki farklı bölgelere ayrılması yolu ile ele alınabilir. Örneğin, akarsu enkesiti eksen ve şev bölgeleri diye iki farklı kısımda incelenebilir. Bu amaçla kullanılan başka bir yaklaşım akarsuda etkin bir derinliğin tanımlanmasıdır (Johanson ve Leytham, 1977).

2.3 Laboratuvar ve Arazi Çalışmaları

Laboratuvarda ve arazide yapılan çalışmalar, erozyon ile uğraşan araştırmacıların erozyonu etkileyen parametreleri belirlemesi ve bu parametreleri kontrol edebilmesi açısından önemlidir. Literatürde erozyon konusundaki ilk bilimsel çalışma Alman araştırmacı Wollny (1877-1895) tarafından gerçekleştirilmiştir (Hudson, 1995). O günden bu yana yıllardan bu yana bilimsel çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalar, laboratuvarda ve arazide deneyler yapmak ve matematik modeller geliştirmek şeklinde olmuştur.

2.3.1 Laboratuvar çalışmaları

Laboratuvar çalışmaları genel olarak dereciklerdeki erozyonun hangi koşullar altında oluştuğu ve dereciklerdeki akımın karakteristikleri üzerine yoğunlaşmıştır.

Meyer ve diğ. (1983) farklı dane çapına sahip kumlar için akımın taşıma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla bir seri deney yapmıştır. Deneyler uzunluğu 1,8 m olan bir kanalda gerçekleşmiştir. Deneyler sırasında akım taşıma kapasitesine ulaşıncaya kadar kanal içerisine katı madde eklenmiştir. Deneyler dört farklı eğimde, dört farklı debide ve dört farklı dane çapına sahip kum için 122 mm/sa yağış altında

ve yağışsız ortamda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile eğimin akımın katı madde taşıma kapasitesini etkileyen en önemli faktör olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 2.2: Kum için sediment taşıma kapasitesi (g/dak), yağış şiddeti 122 mm/sa, (Meyer ve diğ., 1983).

Debi (kg/dak)	Kanal eğimi (%)	D=0,125-0,177 mm (g/dak)		D=0,250-0,354 mm (g/dak)		D=0,500-0,707 mm (g/dak)	
		Yağış	Yağış yok	Yağış	Yağış yok	Yağış	Yağış yok
26	0,2	0,4	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1
	1,0	22,6	18,0	24,3	37,0	22,6	36,8
	2,5	425,4	346,6	263,8	226,8	196,8	218,0
	5,0	1795,1	1651,6	966,9	722,2	658,5	754,2
39	0,2	0,6	1,1	0,7	0,5	0,4	1,0
	1,0	61,6	49,4	50,5	61,2	43,4	65,2
	2,5	998,1	958,5	332,4	378,9	334,6	392,7
	5,0	2602,0	2202,0	192,2	1003,5	1102,6	1150,0

Eğim artınca, taşıma kapasitesinde ani bir artış olmuştur. Çizelge 2.2, debinin ve dane çapının taşıma kapasitesi üzerine etkisi olmasına rağmen eğim kadar önemli olmadığını göstermektedir. Dane çapı (D) küçüldükçe ve debi büyüdükçe taşıma kapasitesi artmaktadır.

Govers (1990b), laboratuvarında akımın taşıma kapasitesini belirlemek için beş iyi derecelendirilmiş kuvars materyali kullanarak 436 tane deney yapmıştır. Deneylerde eğim 1^0 ile 12^0 arasında, akış debisi ise 2 ile $100 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ arasında değişmiştir. Çalışma sonucunda birim katı madde yükü (q_s) ile birim debi (q) ve eğim (S) arasında çoklu regresyon analizi yapılarak Denklem 2.2 elde edilmiştir.

$$q_s = Aq^B S^C \quad (2.2)$$

Denklemde, q_s birim katı madde yükü ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$); q birim debi ($\text{m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$); S eğim (m m^{-1}); A, B, C farklı dane boyutlarıyla değişen ampirik katsayılarıdır. Govers (1990b) üniform kum için denklemde eğimin C üssünü, birim debinin B üssünden daha büyük bulmuştur. Nearing ve diğ. (1997) de yaptığı araştırma sonucunda Govers (1990b)'nin sonucunu doğrulayarak üniform kum için eğimin C üssünün birim debinin B üssünden daha büyük olduğunu göstermiştir.

Schum ve diğ. (1984) ve Parsons (1987), laboratuvarında gerçekleştirdikleri çalışmalarda kanal eğiminin artmasıyla, derecikler arasındaki mesafenin azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca Schum ve diğ. (1984) yüksek eğimlerde dereciklerin birbirine daha paralel hale geldiğini belirtmiştir. Wischmeier ve Smith (1978) ve Govers (1991), toprak kaybının eğimle doğrusal olmayan şekilde arttığını bulmuştur.

Foster ve diğ. (1984) derecikler içerisindeki akımın hızını, büyüklüğünü, zamanla değişimini ve akımın yarattığı kayma gerilmelerini incelemiştir. Çalışmalar, derecik gibi davranan ve eğimi değişmeyen on beş fiberglass kanal içerisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma, derecik boyunca akım hızı ve kayma gerilmesi gibi parametrelerin üniform olmadığını ve akım hızının normal dağılım eğrisi gibi değişime uğradığını göstermiştir. Derecik içerisindeki kayma gerilmeleri sıcak-film sensörleri ve anemometre yardımıyla belirlenmiştir. Derecik şeklinin pürüzlülüğünün, zeminin pürüzlülüğüne göre kayma gerilmesi üzerinde daha etkili olduğu, fakat bu farkın yüksek eğimlerde azaldığı belirtilmiştir.

Cassol (1988) tarafından yapılan çalışma danecik çapının ve şeklinin akımın taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermiştir. Deneyler konkav şekilli 0,5 m x 3 m kesit alanına sahip erozyon kanalında, yağış simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yağış şiddetinin dereciklerdeki katı madde taşınımı üzerine etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır (Moldenhauer ve Long, 1964; Al- Durrah ve Bradford, 1982; Khan, 1989; Parsons ve Gadian, 2000). Khan (1989) çalışmaları sırasında parabolik ve geçirimsiz bir kanal kullanmıştır. Çalışmada yağışın artmasıyla genel olarak akımın katı taşıma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Ancak geçirimsiz kanal kullanıldığından, yağış şiddetindeki artış, akış derinliğinin ve kayma gerilmelerinin artmasıyla sonuçlanmıştır. Khan (1989), gelecekteki çalışmalarda dereciğin gerçeğe daha yakın temsil edilebilmesi açısından deneyler sırasında kanalın her iki tarafından katı madde ile beslenmesini önermiştir.

Cochrane (1995), 3,66 m uzunluğunda 0,20 m genişliğinde, eğimi 20%'ye kadar ayarlanabilen bir kanalda oluşturduğu dereciği her iki tarafından katı madde ile beslemiş ve akımın özelliklerini incelemiştir. Kullanılan katı maddenin ortalama dane çapı 0,326 mm (kum) olarak belirlenmiştir. Deneyler sırasında 80 ve 100 mm/sa yağış elde edebilmek için Foster ve diğ. (1982) tarafından geliştirilen iki adet programlanabilir yağış simülatörü kullanılmıştır. Bu çalışma sonunda Yalın (1963) taşıma kapasitesi denkleminin düşük tahminler yaptığı; fakat WEPP modeli denkleminin (Foster ve diğ., 1995) uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca yağışın, yarattığı türbülans nedeniyle akım hızını azalttığı ve akımın taşıma kapasitesini düşürdüğü belirlenmiştir. İleriki çalışmalar için infiltrasyonun katı

maddenin üç hareket modu (aşınma, birikme ve taşınma) üzerindeki etkisinin çalışılması önerilmiştir.

Nearing ve diğ. (1997), farklı eğim ve debi koşullarının derecik erozyonu üzerine etkisini 3 m'lik laboratuvar kanalında ve arazide incelemiştir. Meydana gelen erozyon ile Reynolds sayısı, akım hızı, hidrolik sürtünme ve derecik genişliği arasındaki ilişkiyi değerlendirmiştir. 3 m'lik laboratuvar kanalında %5, %10, %15, %20; 50 cm uzunluğundaki daha küçük bir laboratuvar kanalında %5, %10, %20; arazi çalışmasında ise %3, %6, %10, %15, %20 eğimlerini kullanmıştır. Deneyler sonucunda eğimin dereciklerdeki ortalama akım hızına etkisi olmadığı belirlenmiştir. Bu ise yoğun olarak kullanılan Chezy ve Manning gibi denklemlerin, erozyona uğrayan dereciklerdeki kullanımında zorluklar çıkarmaktadır. Elde edilen veriler birim debinin erozyona uğrayan dereciklerde akım hızlarının belirlenmesinde kullanılabilceğini desteklemektedir. Ayrıca birim debi yöntemi, türbülans rejiminde debi ve akım hızı arasındaki ilişki zeminin özelliklerine bağlı olmasına rağmen, akım hızının belirlenmesinde en tutarlı sonuçları vermiştir. Deneylerden elde edilen verilerle birim katı madde yükünü hesaplamada en doğru sonucu akım gücünün verdiği bulunmuştur. Akım gücü yaklaşımı hem laboratuvar hem de arazi çalışmalarında bütün zemin tipleriyle uyumluluk göstermiştir.

Römkens ve diğ. (2002), 0,60 metre genişliğinde ve 3,75 metre uzunluğundaki erozyon kanalında, farklı yağış koşullarında, farklı eğimlerde, farklı yüzeyaltı zemin suyu basınçlarında ve farklı yüzey pürüzlülük koşullarında meydana gelen akış ve erozyonu incelemiştir. Çalışmada üniform yağış elde edebilmek için yağış simülatörü (Meyer ve Harmon, 1979), yüzeyde oluşan mikrotopografyanın incelenmesi için lazer tarayıcı ve yüzeyaltı zemin suyu basıncının erozyon üzerindeki etkisinin belirlenmesi için basınç sensörleri kullanılmıştır. Çalışma, uzun süren yağışlarda pürüzlü olmayan yüzeylerde katı madde konsantrasyonunun önce aniden arttığı, daha sonra yavaşça azaldığını göstermiş; ayrıca yüzeyaltı zemin suyu basıncının akım içindeki katı madde konsantrasyonunu önemli derecede etkilediğini ancak akış hacmini etkilemediğini ortaya çıkarmıştır.

Shao ve Wang (2004), dereciklerde oluşan akımın kritik koşullarının araştırılmasında kayma hızı yaklaşımını kullanmıştır. 6 m uzunluğunda, 3 m genişliğinde kanal ve yağış simülatöründen oluşan bir düzende kanal eğiminin değişmesiyle kritik kayma

hızının değişmediği ve kanal eğiminin artmasıyla kritik kayma hızının azaldığı iki durum çalışılmıştır.

Gimenez ve diğ. (2004), 0,40 metre genişliğinde ve 4,50 metre uzunluğundaki kanalda, Gimenez ve Gover (2001) tarafından öne sürülen artan kanal eğiminin akımın nehir rejimine geçmesi için gereken mesafeyi azalttığı, Froude sayısının ve akım hızının eğimden bağımsız olarak sabit kaldığı düşüncesini çalışmıştır. Deneyler sonucunda düşüncenin doğru olduğu fakat farklı eğim, debi ve zemin tipleri için araştırılması gerektiği önerilmiştir.

Hairsine ve diğ. (1992); Onstad (1984); Huang ve Bradford (1990), yüzey pürüzlülüğünün akış ve erozyon üzerindeki etkisini incelemiş; yüzey pürüzlülüğünün, zeminin yağış etkisiyle ayrılmasına direnç göstermesini sağlayıp, akım hızını ve dolayısıyla erozyonu azalttığını belirlemişlerdir. Diğer taraftan pürüzlü yüzeylerde akış, pürüzlü olmayan yüzeylere göre daha derin ve yavaş olur ve bu da derecik oluşumuna neden olur (Abrahams ve Parsons, 1990; Helming ve diğ., 1998a; Gomez ve Nearing, 2005).

Poessen ve Ingelmosanchez (1992), laboratuvarında yağış simülatörü kullanarak yaptıkları bir çalışmada, farklı boyutlardaki taşları zemin katmanına gömmüş ve yüzeysel akışla toprak kaybının arttığını gözlemiştir.

Berger ve diğ. (2010), dereciklerin zaman içerisindeki gelişimini incelemek için 1 m genişliğinde ve 2 m uzunluğundaki erozyon kanalında, sırasıyla %10, %20, %30 boyuna eğimde ve 60, 90, 120 mm/sa yağış altında (toplam yağış miktarını aynı tutarak) 15 deney gerçekleştirmiştir. Oluşan derecik ağının gelişiminin belirlenmesi için fotogrametri yardımıyla sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur. Deneyler sonucunda yağış şiddetinin artmasının, toprak kaybı üzerinde eğime göre daha etkili olduğunu belirlemiştir.

Öte yandan, Ali ve diğ. (2011) debinin, ortalama akım hızı ve derinliğinin ve eğimin akımın katı madde taşıma kapasitesi üzerine etkisini incelemiştir. Akımın taşıma kapasitesi ile kayma gerilmesi, akım gücü, birim akım gücü, efektif akım gücü arasındaki ilişkiyi değerlendirmiştir. Deneyleri 0,5 m genişliğinde ve 3 metre uzunluğundaki kanalda gerçekleştirmiştir. Deneylerde medyan çapı (D_{50}) sırasıyla 0,230, 0,536, 0,719, 1,022 mm olan kum kullanılmıştır. Çalışma debi ve eğimin artmasıyla akımın katı madde taşıma kapasitesinin arttığını; fakat eğimin debiden

daha önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Ayrıca artan eğim ile katı maddenin ayrılıp taşındığı ve akım hızının azaldığı belirtilmiştir.

2.3.2 Arazi çalışmaları

Erozyon genel olarak zeminin aşınabilirliğine, arazinin özelliklerine ve arazinin kullanım durumuna bağlı olarak değişir (Lal, 1988). Erozyonun zararları ve erozyonun tahrip edici etkisinin belirlenebilmesi için erozyonu etkileyen faktörlerin bilinmesi ve kontrol altına alınması gerekmektedir (Bennett ve Chapline, 1928). Yağış simülatörüyle, belirli yağış koşulları altında yapılan arazi çalışmaları sonucunda erozyonu etkileyen faktörler (1) eğim (2) yağış şiddeti-kinetik enerji (3) bitki örtüsü (4) zeminin erozyona eğilimi (erodibilite) (Lal, 1988; Ghadiri, 2004).

Dereciklerde oluşan erozyon üzerine ilk çalışmalar Kozmenko (1909, 1910) tarafından yapılmıştır. Loch ve Donnollan (1978), Queensland’da oluşturduğu 22,5 metrelik kanalda rainülator kullanarak derecik erozyonunun oluşumunu gözlemiş ve derecik erozyonunun tabaka erozyonuna göre daha fazla toprak kaybına sebep olduğunu belirtmiştir. Savat ve De Ploey (1982), dereciklerin genellikle 2– 3° veya daha dik eğimlerde oluştuğunu belirlemişlerdir. Govers (1991), derecik erozyonun miktarını belirlemek amacıyla Belçika’da tarım alanlarında üç yıl süreyle yaptığı çalışmada, meydana gelen erozyonu ortalama 0,36 kg/m² olarak saptamıştır. Bununla birlikte eğimin ve eğim uzunluğunun erozyon üzerindeki etkisi Yair ve Raz-Yassif (2004) tarafından araştırılmıştır. Çalışmada, kurak ve yarı kurak bölgelerde, eğim uzunluğunun, eğimin derecesine göre erozyon açısından daha önemli bir faktör olduğunu ileri sürmüştür. Deferssha ve diğ. (2010), Alemeya (Etiyopya) da uyguladığı çalışmada derecikler arasındaki alanlarda eğimin etkisini belirlemek için bölgeden elde ettiği verilerle beş farklı modeli karşılaştırmış ve WEPP modelinin en iyi sonucu verdiğini belirlemiştir. Kalman (1976) % 8 – 40 eğim aralığında, eğimin dereciklerdeki akım hızı üzerine etkisinin olmadığını belirlemiştir. Diğer taraftan, Meyer ve diğ. (1983) ve Foster ve diğ. (1984), eğimin akım hızı üzerinde yağış şiddetine göre daha fazla etkisinin olduğunu belirtmiştir.

Yağışın şiddeti ile aşındırıcı gücü (erozivite) arasındaki ilişki Nyssen ve diğ. (2005) tarafından kuzey batı dağlık arazilerinde incelenmiştir. Lal (1998), yağışlı iki sezon için yağışın erozivitesini, yağışın damla çapı dağılımı ve kinetik enerjisinin fonksiyonu olarak incelemiştir. Lopez-Bermudez ve Albaldejo’ya (1990) göre yarı kurak iklimlerde erozyon ile yağış arasında belirgin bir ilişki vardır. Amorim ve diğ.

(2001), derecikler arasındaki alanlar için yağış simülatörü kullanarak yaptığı çalışmada, toprak kaybının eğim ve yağışın kinetik enerjinin artmasıyla arttığını; fakat yağışın kinetik enerjinin daha etkili olduğunu belirtmiştir.

Prudhomme (1999), yağışın dağılımını ve toplam yağış miktarını belirlemek için dağlık arazilerde çalışmalar yapmıştır. Marques ve diğ. (2007), 20 m uzunluğa ve 8 m genişliğe sahip sekiz adet parselde yaptığı çalışmada bitki örtüsü korumasına sahip zeminlerde ve çıplak zeminlerde yağışın erozyon üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda düşük şiddete sahip (20,75 mm/sa) yağışın erozyon üzerindeki etkisinin bitki örtüsüyle kaplı zeminlerde ihmal edilebileceğini; fakat çıplak zeminlerde önemli ölçüde toprak kaybı olduğunu belirtmiştir. Düşük yağış şiddetlerinin, toprak kaybı üzerindeki etkisinin yağışın olma sıklığıyla ilişkilendirilmesi gerektiğini önermiştir. Alberts ve Neibling (1994), yüzeysel akış ve toprak kaybının bitki örtüsü korumasına sahip zeminlerde daha az olduğunu, çünkü bitkilerin düşen yağışın erozivitesini azalttığını ve sızmayı artırdığını bildirmiştir. Govers (1991), eğim ve dereciklerde oluşan erozyon arasındaki ilişkinin değişken olduğunu ve % 20–40 oranında bitki örtüsü korumasına sahip alanlarda meydana gelen derecik erozyonunun, çıplak alanlara göre % 30 oranında daha az olduğunu belirlemiştir.

Öte yandan, zeminlerin kendine özgü nitelikleri nedeniyle erozyona karşı gösterdikleri direncin derecesini ifade eden erozyon eğiliminin (erodibilite) erozyon üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmektedir (Bryan, 2000). Bryan (2000)'nın, derecik erozyonu için gerekli hidrolik koşulların, derecik ağı oluşumunun ve havza yamaçlarında katı madde taşınımının zeminin dinamik özelliklerinden etkilendiğini belirtmiştir.

Farklı zemin tipleri farklı erodibiliteye sahip olduğundan erozyon karşısında farklı tepki verirler. Erodibilite, farklı ülkelerde farklı zemin tipleri için çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Veihe (2002), Gana'da gerçekleştirdiği çalışmada, çeşitli zemin tiplerinin erodibilitesindeki değişimleri incelemiştir. Gobin ve diğ. (1998), güneydoğu Nijerya'da meydana gelen toprak kaybını değerlendirmiştir. Bewket ve Sterk (2003), Kuzey Batı Etiyopya dağlık arazilerinde dereciklerin oluşumunu incelemiştir. Boardman ve diğ. (2003), Güney Afrika büyük Karoo Dağlarında hendeklerin gelişimini incelemiştir. Hurni (1986, 1999),

Etiyopya için oluşturduğu, erozyon ve erozyonun zararları konusundaki kaynak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

2.4 Erozyon ve Katı Madde Taşınım Modelleri

Erozyon modelleri, katı madde hareketini benzeştirir ve araştırmacıların erozyona etki eden parametreleri kontrol etmelerine yardımcı olur. Erozyon modelleri, erozyon konusundaki bilgilerin geliştirilmesinde ve toprakları koruma çalışmalarındaki gereksinimleri karşılamada önemli bir yere sahiptir (Nearing ve diğ., 2005). Bu modeller, toprakla uğraşan araştırmacılara erozyonu azaltmak için gerekli önlemleri almada yardımcı olurken, diğer yandan mühendislere baraj haznelerinde birikecek katı madde miktarını belirlemede, denizlere ve göllere taşınacak katı madde miktarını ve su kalitesini tahmin etmelerinde yardımcı olurlar. Erozyonun ilk matematiksel ifadesi Zingg (1940) tarafından yapılmış, şev uzunluğu ve derecesinin erozyon üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Havza hidroloji modelleri Singh ve Woolhiser (2002) tarafından değerlendirilmiştir. Bryan (2000), havzada meydana gelen erozyonu yamaç ölçeğinde incelemiştir, Zhang ve diğ. (1996a) havza ölçeğinde geliştirilmiş erozyon modellerini ele almıştır. Merritt ve diğ. (2003) ise geniş bir çalışma yapmış, havza ölçeğindeki erozyon ve katı madde taşınım modellerini giriş-çıkış verileri, model yapısı, akış-erozyon-katı madde taşınımı-su kalitesi arasındaki ilişki, her bir modelin üstünlük ve eksikliğini dikkate alacak detayda birer birer incelemiştir. Aksoy ve Kavvas (2005), yamaç ve havza ölçeğinde geliştirilmiş mevcut erozyon ve katı madde modellerini ampirik, kavramsal ve fiziksel tabanlı olarak ayrı ayrı inceledikten sonra yüzeysel akımın katı madde taşıma kapasitesinin belirlenmesi, modellerin veri gereksinimi, modellerin besin maddesi ve kirlilik yükü taşınım modelleri olarak da kullanılabilme potansiyeli konularını değerlendirmiş; sonunda modellerin geleceğine yönelik projeksiyonlar yapmıştır.

Modeller farklı kriterler gözönünde bulundurularak sınıflandırılabilir. Modelde incelenen olayın tanımı, model ölçeği veya çözüm tekniğine göre sınıflandırma yapmak mümkündür (Singh, 1995).

Model gözlenmiş bir veri kümesine ve istatistiksel analizine dayanabilir (Nearing ve diğ., 1994). Bu tür modeller ampirik modeller olarak adlandırılır. Ampirik modeller geliştirildikleri koşullar ile sınırlıdır. Bunun dışında sınır koşulları ile

karşılaştığında bu modelin kullanılmasından kaçınılmalıdır. Akarsu havzasının çok sayıda ama farklı işlevleri olan depolardan oluşan bir sistem olduğu kabulüne dayanan kavramsal modeller de sözkonusudur. Kavramsal modeller, ampirik ve fiziksel tabanlı modellerin karışımıdır (Beck, 1987). Ayrıca kütle ve momentum korunum denklemlerine dayanan fiziksel tabanlı modeller vardır (Legesse ve diğ., 2003). Bu modeller deterministik modeller olarak da bilinir.

Akarsu havzalarındaki erozyon ve katı madde hareketi için geliştirilen USLE (Üniversel Toprak Kaybı Denklemi) ABD'den toplanan veri kümesine dayanan ampirik bir modeldir (Wischmeier ve Smith, 1978). AGNPS adlı model de USLE'ye dayandığından ampirik yaklaşımlarla havzadaki erozyonu tahmin etmeye çalışmaktadır (Young ve diğ., 1989). Buna karşın ANSWERS adlı modelin hidrolojik bileşeni kavramsal bir yapıya sahiptir (Beasley ve diğ., 1980). KINEROS (Smith, 1981), WESP (Lopes, 1987), SEM (Storm ve diğ., 1987), SHESED (Wicks, 1988) ve EUROSEM (Morgan ve diğ., 1998) ise havzadaki katı maddenin kütle korunum ve hareket denklemlerine dayanan fiziksel tabanlı, deterministik modellerdir.

Her ne kadar modelleme çalışmalarının başlangıcında daha çok USLE tipi ampirik ve kavramsal modelleme tekniklerine yönelim olmuşsa da Çizelge 2.3'ten de gözleneceği üzere sonradan fiziksel tabanlı deterministik modeller rağbet görmeye başlamıştır.

Çizelge 2.3: Erozyon ve katı madde taşınım modelleri.

Model	Kaynak	Ampirik	Kavramsal	Fiziksel tabanlı (Deterministik)
USLE	Wischnier ve Smith (1978)	•		
MUSLE	Williams (1975)	•		
RUSLE	Renard ve diğ. (1991)	•		
SEDD	Ferro ve Porto (2000)	•		
SEDNET	Prosser ve diğ. (2001c)	•		
AGNPS	Young ve diğ. (1989)	•		
LASCAM	Sivapalan ve diğ. (1996a, b, c)		•	
EMSS	Watson ve diğ. (2001)		•	
SWRRB	Williams ve diğ. (1984)		•	
ANSWERS	Beasley ve diğ. (1980)			•
LISEM	De Roo ve diğ. (1996a, b)			•
CREAMS	USDA, (1980)			•
WEPP	Nearing ve diğ. (1989)			•
EUROSEM	Morgon ve diğ. (1998)			•
KINEROS	Woolhiser ve diğ. (1990)			•
KINEROS2	Smith ve diğ. (1995a, b)			•
RUNOFF	Borah (1989)			•
WESP	Lopes (1987) Lopes ve Lane (1998)			•
CASC2D-SED	Johnson ve diğ. (2000)			•
SEM	Storm ve diğ. (1987)			•
SHE/SHESED	Abbott ve diğ. (1986a,b) Bathurst ve diğ. (1995)			•
WEHY	Kavvas ve diğ. (2004)			•
GUEST	Misra ve Rose (1996)			•
PERFECT	Littleboy ve diğ. (1992b)			•
HEM	Lane ve diğ. (1998)			•
EROSION 2D/3D	Schmidt ve diğ. (1997)			•
MEFIDIS	Nunes ve diğ. (2005)			•
PEPP	Schramm (1994) Gerlinger (1997)			•

3. İTÜ YAĞIŞ SİMÜLATÖRÜ

Bu bölümde yağış, akış ve katı madde hareketi verilerinin elde edilebilmesi için oluşturulan İTÜ yağış simülatörü ve erozyon kanalı anlatılmıştır.

3.1 Genel

Yağış-akış-katı madde taşınım modellerinde kullanılan parametrelerin kalibrasyonu gereklidir. Bu amaçla arazide ya da laboratuvar ortamında gözlenen verilere gereksinim duyulur. Yağış simülatörleri bu amaçla kullanılan deney sistemleri olup doğada ya da laboratuvarda kurulmaları mümkündür. 1930'lu yıllardan beri kullanılan bu simülatörler sayesinde doğal yağmurun fiziksel özelliklerine benzer yağış üretilebilir.

Doğada yağmurun oluşumu karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle geliştirilecek yağış simülatörleri doğa şartlarında oluşabilecek yağmurun fiziksel özelliklerini mümkün olduğunca benzeştirmelidir. Örneğin; benzeştirilen yağmurun damla çapı dağılımı doğadaki yağmurunkine benzer olmalıdır. İdeal bir yağış simülatörü, üretilmesi ve işletilmesi pahalı olmayan, yağışı mükemmel şekilde uygulayan, hareket ettirmesi kolay ve istenildiği yerde ve şekilde kullanılabilen simülatördür (Meyer, 1958). Çoğu araştırmacıya göre bu bir ütopya'dır. Bundan dolayı yağış simülatörü geliştirme çabaları günümüzde de devam etmektedir.

Yağış simülatörleri doğada yağmur yağmasını beklemeden ölçüm yapmaya imkan verir. Ayrıca doğal yağmurun kararsız durumunu ortadan kaldırır, kontrollü ve üniform yağmurla çalışma imkanı sağlar. Araştırmalarda hangi tür ve boyutlarda simülatör kullanılacağına çalışmanın amacına göre karar verilir. Sızma ve akış çalışmaları için benzeştirilen yağmurun, doğal yağmurun karakteristiklerini tam olarak yansıtması gerekli değildir. Erozyon çalışmalarında ise benzeştirilen yağmur, doğal yağmurun karakteristiklerini mümkün olduğunca yansıtmalıdır.

Doğal yağmuru benzeştirmede kullanılacak yağış simülatöründe göz önüne alınması gereken en önemli yağmur karakteristikleri; damla çapı dağılımı, yağmurun zemine

çarpma hızı ve şiddetidir. Bu üç faktör, akışın oluşmasında ve zeminin aşınmasında anahtar rol oynar.

Literatürde iki çeşit yağmur üretici mekanizma vardır. Bunlardan birisi, yağmur damlası bir başlangıç hızına sahip olacak şekilde çalışan basınçlı püskürtücülerdir. Diğeri ise yağmurun başlangıç hızı olmaksızın yerçekimi etkisiyle ivmelenip hız kazanmasına olanak veren damla şekillendirici püskürtücülerdir.

Erozyon çalışmalarında ve hidrolojik çalışmalarda kullanılacak yağış simülatörleri için arzu edilen karakteristikler aşağıdaki gibidir:

- Damla çapı dağılımı: Benzeştirilen yağmurun damla çapı dağılımı doğadaki yağmur damlası çapı dağılımına benzer olmalıdır. Doğada yağmur damlalarının çapı 7 mm'ye kadar çıkabilmektedir. Yağmur damlaları çapının dağılımı oldukça değişkendir ve yağış şiddetinin artmasıyla büyük çapa sahip damlaların oranı artar. Erozyon meydana gelebilmesi için damla çapı ortalama 1 mm ile 3 mm arasında olan yağış yeterli olmaktadır.
- Damla limit hızı: Doğal yağmur sonucu oluşan damlalar havadayken yerçekimi kuvveti etkisiyle ivmelenir ve zemine çarpmadan önce maksimum hızlarına ulaşır. Buna damla limit hızı denir. Limit hız damla çapının fonksiyonudur ve yağışın düşme mesafesi ile doğrudan ilgilidir. Örneğin, 2 mm çapa sahip yağmur damlalarının 6-7 m/s arasında bir hızla düştüğü gözlenmiştir.
- Kinetik Enerji: Yağmurun kinetik enerjisi damlaların ortalama kinetik enerjisidir. Kinetik enerji hız ve damla çapının fonksiyonu olup, erozyona etki eden en önemli parametredir. Bu değerler tam olarak elde edilemediği için kinetik enerji yalnızca yağışın şiddeti ve süresine bağlı ifadeler ile belirlenmektedir.
- Doğada yağışın şiddeti sürekli olarak değişmekte ve 150 mm/saat'e kadar çıkabilmektedir. Genel olarak çok düşük yağış şiddetleri, erozyon ve hidrolojik çalışmalar açısından önemli olmamakla beraber, çok büyük yağış şiddetlerinin incelenmesi ise istisnai durumlarda uygulanmaktadır. Erozyon çalışmaları ve hidrolojik çalışmalar bakımından en çok incelenen yağış şiddeti aralığı 12 ile 120 mm/sa'tir.

Yağış ile ilgili bu karakteristiklerin elde edilebilmesi için yağış simülatörünün aşğıdaki koşulları sağlaması beklenir:

- Çalışmanın amacına göre yağmurun uygulanacağı alan gerçekçi sonuçlar verebilecek kadar büyük olmalı ve yağış simülatörü de bu alana yağmur uygulayabilmelidir.
- Yağmur damlası karakteristikleri ve şiddeti çalışma alanı üzerinde olabildiğince üniform dağılmalıdır.
- Yüksek sıcaklık ve rüzgara karşı önlem alınmalı, rüzgardan etkilenmemesi için arazi çalışmalarında, yağış simülatörünün etrafı korunmalıdır.
- Simülatör mümkün olduğunda hafif ve portatif olmalı, gerektiğinde çalışma alanları arasında rahatça taşınabilmelidir. Fakat bu şartı sağlarken sistemin stabil olmasına da dikkat edilmelidir.

Yağış simülatörü bu karakteristiklere sahip olmalı; ama tüm bu karakteristikleri mükemmelce sağlaması beklenmemelidir.

3.2 Yağış Simülatörleri ile Yapılan Çalışmalar

Yağış simülatörleri 1930'lu yıllardan bu yana toprak erozyonu, akış karakteristiklerinin belirlenmesi, sızma, erozyon kontrolü gibi çalışmalarda kullanılmaktadır. Arada geçen 81 yıl boyunca araştırmacılar yağmuru en doğru şekilde benzeştirebilmek için birçok teknik ve donanım kullanmıştır. Yağış simülatörlerinin en önemli bileşeni, benzeştirilen yağmur damlalarını üretecek damla şekillendiricilerinin seçimidir. Bu nedenle deneyin amacına göre önce damla üretim aracı seçilir, daha sonra gerekli mekanik ve elektronik bileşenler geliştirilir.

Yağış simülatörleri “damla şekillendirici” ve “basınçlı püskürtücü” simülatörleri olmak üzere iki gruba ayrılır (Thomas ve Swaify, 1989). İki tür simülatörde de yağış şiddetinin kolayca kontrol edilmesine ihtiyaç vardır. Yağış şiddeti gerektiği zaman sabit tutulabilmeli, gerektiği zaman da değiştirilebilmelidir. Ayrıca benzeştirilen yağmurun, damla hızları ve damla çapı dağılımı, doğadakine mümkün olduğunca benzer olmalıdır.

Şekil 3.1'de gibi damla şekillendirici simülatörlerde damlalar boruların ucundan başlangıç hızları olmaksızın yerçekimi etkisiyle ivmelenerek serbest düşmeye

birakılır. Damlaların ağırlığı, yüzey gerilme kuvvetlerini aştığı zaman damlalar düşmeye başlar (Gunn ve Kinzer, 1949). Damlanın boyutu borunun boyutuna bağlıdır. Bu tür simülatörlerin en önemli avantajı damlaların boyutlarının sabit olmasıdır. Buna ek olarak yağmurun dağılımı üniformdur ve düşük basınç altında da yağmurun istenilen fiziksel özelliklerine ulaşılabilir. Ancak bu simülatörde yağmur damlalarının limit hızlarına ulaşması için borular yerden 10 m'yi aşkın bir yüksekliğe konulmalıdır. Mesela, 5 mm çapındaki yağmur damlasının limit hızına ulaşabilmesi için 12 m gibi bir düşme mesafesine ihtiyacı vardır. Ayrıca belli bir yağış şiddetinde, bu simülatörler aynı şartlar altındaki doğal yağmurdan daha düşük kinetik enerjiye sahip olma eğilimi gösterir.

Basınçlı püskürtücüler ise birçok kullanım amacı için uygundur. Bu tarzdaki simülatörlerin yağış şiddetleri damla şekillendiricilere göre değişebilmektedir (Grierson ve Oades, 1977). Ayrıca damlalar püskürtücünden belli bir basınç altında çıktığından bu simülatörlerden üretilecek yağmur damlaları daha düşük mesafelerde limit hızlarına ulaşabilmektedir. Yağışın şiddeti, püskürtücünün orifis çapıyla, püskürtücüdeki hidrolik basınç ve püskürtücüler arasındaki mesafeyle değişmektedir (Meyer ve Harmon, 1979).



Şekil 3.1: Damla şekillendirici (Url-2, 2010).

Püskürtücüdeki suyun yüksek basıncından dolayı yağış şiddeti ve damla hızları sıklıkla arzu edilen değeri aşar ve bu da doğal olmayan yağış koşulları meydana getirir. Bu problemin üstesinden gelebilmek için püskürtücüyü açıp-kapamak, sürekli akımdan saptırmak için hareket eden diskler, hareket eden kollar ve titreşimli püskürtücü kullanmak gibi yöntemler denenmiştir. Deneyler sonucunda titreşimli kol üzerinde veya hareket eden kol üzerinde kullanılan püskürtücünün en uygun olduğu anlaşılmıştır (Bubenzer, 1979b).

Doğal yağışın karakteristiklerinin belirlenmesi için ilk çalışmalar 1940 yıllarında yapılmıştır. Laws (1941), yağmur damlası düşme hızını, yağmur damlası çapını ve düşme yüksekliğini çalışmıştır. Laws ve Parsons (1943) yağmur damlalarının çap dağılımı ve yağış şiddeti ile ilgilenmiştir.

1940 yılından sonra yapılan çalışmalarda birçok püskürtücü denenmiştir. Daha sonra simülator çalışmaları Meyer (1958) tarafından devam ettirilmiş olup, 1950'li yılların sonlarına doğru ABD Tarım Araştırma Birimi, Lafayette'de arazi çalışmaları için kullanılmak üzere bir yağış simülatorü oluşturmuştur (Meyer ve McCuen, 1959). Meyer (1958), VeeJet 80100, VeeJet 8070, FullJet 106SQ, FullJet 50SQ isimli dört adet püskürtücüyü denemiş, bu püskürtücüleri damla hızı, damla çapı dağılımı, kinetik enerjileri bakımından değerlendirmiştir. VeeJet tipi basınçlı püskürtücülerin doğal yağmurun fiziksel özelliklerini en iyi yansıtan püskürtücü olduğu gözlenmiş, nitekim 1959 yılında geliştirilen Rainulator' de de Şekil 3.2'de görülen VeeJet 80100 basınçlı püskürtücüsü kullanılmıştır.



Şekil 3.2: Basınçlı püskürtücü VeeJet 80100.

Simülatorde kullanılan püskürtücüler 2,44 m yükseklikten 41 kPa basınca sabitlenip, taradıkları çizgisel alan açısından değerlendirilmiş ve doğal yağmur damlalarının dağılımına oldukça benzer damla dağılışı verdiği gözlenmiştir. Ek olarak, Meyer ve McCune (1959) VeeJet 80100 tipi püskürtücülerden çıkan damlaların 41 kPa basınç altında 8,8 m/s çıkış hızına sahip olduğunu ve bu damlaların 3 m yükseklikten limit hızlarına ulaşip, 4 mm'den küçük damla çapı oluşturduğunu belirlemiştir. Daha sonra doğal yağmur sonucu alınan veriler ile Meyer ve McCuen (1959) tarafından geliştirilen simülatorden elde edilen veriler karşılaştırılmış ve simülatorün erozyon çalışmaları için kabul edilebilir sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Bu simülatorde Şekil

3.3'te görüldüğü üzere püskürtücünün ürettiği yüksek yağış şiddetini düşürmek için sabit konumdaki püskürtücüyü ileri-geri hareket ettiren bir sistem kullanılmıştır.



Şekil 3.3: Rainulator, 1960-1970 Tarım Araştırma Merkezi, Indiana, ABD (Url-3, 2010).

Swanson (1965) tarafından geliştirilen simülatörde de VeeJet 80100 püskürtücüleri kullanılmıştır. Şekil 3.4'te görülen, dönerek hareket eden on adet kol üzerine yerleştirilen püskürtücülerden oluşan bu simülatörde, hareketli kollar üzerine sabitlenen püskürtücüler sürekli yağmur üretmekte, akım dairesel bir yol izlemektedir.

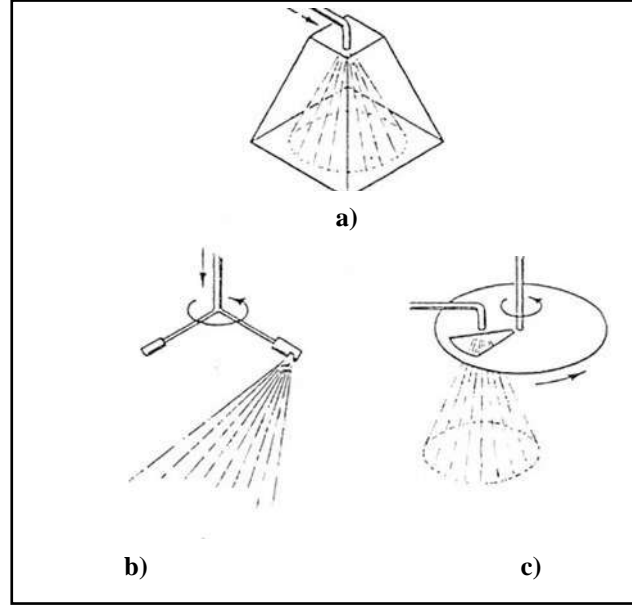


Şekil 3.4: Swanson'un hareketli kollardan oluşan simülatörü (Url-3,2010).

Meyer ve Harmon (1979) ile Neiblin ve diğ. (1981) tarafından geliştirilen simülatörde yağış şiddeti püskürtücünün titreşimiyle kontrol edilmiş ve istenilen şiddette yağmur elde edilmiştir. Yağış şiddeti püskürtücünün üzerine bulunduğu kolun frekansı ile artmaktadır.

Morin ve diğ. (1967) dönerek hareket eden diskten oluşan simülatör sistemlerinde full-jet püskürtücüler kullanmıştır (Şekil 3.5). Bu simülatörle yağış şiddeti,

püskürtücünün altında kullanılan ve hareket eden diskin üzerindeki deliklerin boyutuyla belirlenir. Bu simülatörde yaklaşık 35 mm/saat'lik yağış şiddetinde, doğadaki yağmurun ve benzeştirilen yağmurun damla çapı dağılımları benzer olmasına rağmen, benzeştirilen yağmurun kinetik enerjisi doğadakinden daha küçüktür.



Şekil 3.5: Püskürtücü çeşitleri a) sabit püskürtücü, b)dönen püskürtücü, c)dönen diskli püskürtücü (Url-2, 2010).

Norton (1998) tarafından geliştirilen Şekil 3.6'daki Norton Yağış Simülatörü tüm dünya tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Simülatör üzerinde birbirinden 1,37 m uzaklıkta bulunan VeeJet püskürtücüler bulunmaktadır. Bu püskürtücü 6 psi (41 kPa) basınçta doğadaki yağmurun damla çapı dağılımına benzer sonuçlar vermektedir (Bubenzer, 1979a). Püskürtücüler zeminden 2,5 m yükseklikte bulunmaktadır.

Bu tür simülatörler 5°C ve 43.9°C arasındaki sıcaklıkta ve %20 arazi eğimine kadar güvenli olarak çalışabilmektedir. Norton Yağış Simülatörü'nde VeeJet 80100 ve VeeJet 80150 olmak üzere iki çeşit basınçlı püskürtücü kullanılmaktadır.

Norton Yağış Simülatörü 41 kPa basınçta çalıştırılmak üzere geliştirilmiştir. Bu basınç altında VeeJet 80100 püskürtücülerden suyun çıkış hızı $8,8 \text{ m/s}$ 'dir. Püskürtücülerden $14,75 \text{ l/dak}$ su çıkışı olmaktadır.



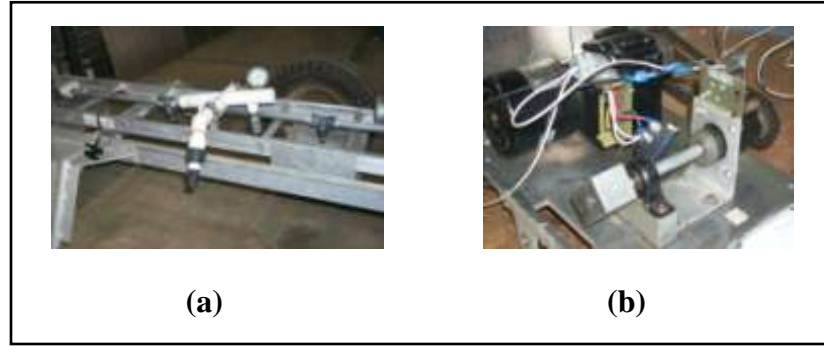
Şekil 3.6: Norton yağış simülatörü (Url-3, 2010)

Ayrıca VeeJet 80100 püskürtücüler için yağış enerjisi 200 kJ/ha-mm, VeeJet 80150 püskürtücüler için ise 275 kJ/ha-mm'dir. Bu değerler doğadaki yağmurun kinetik enerji değerleriyle uyuşmaktadır (Meyer ve Harmon, 1979).

Norton Yağış Simülatörü'nde yağışın şiddeti, süpürücünün frekansını ayarlayabilen bir devre aracılığıyla gerçekleştirilir. Süpürücünün frekansının yüksek olması daha büyük yağış şiddetine, düşük olması daha düşük yağış şiddetine denk gelmektedir. Üzerinde neredeyse yağış simülatörü için gerekli olabilecek tüm yağış şiddetlerini ayarlayabilen 10 adet hazır, 2 adet de değiştirilebilen kontrol edici devresi bulunmaktadır. VeeJet 80100 cinsi püskürtücü için en düşük yağış şiddeti 9,65 mm/saat, en yüksek yağış şiddeti ise 104,24 mm/saat olarak ayarlanmıştır.

Norton Yağış Simülatörü için genelde VeeJet 80100 cinsi püskürtücü kullanılmış olsa da, bu daha yüksek yağış şiddetleri hedeflendiği anda VeeJet 80150 ile değiştirilebilir. Unutulmaması gereken nokta, iki püskürtücünün yağış oranları ve dolayısıyla yağış dağılımları farklı olacağından, yağış şiddetlerini belirlemek için her birinin ayrı ayrı kalibrajının yapılması gerekmektedir.

100 mm/saat'ten daha büyük yağış şiddetinin kullanılması durumunda VeeJet 80150 cinsi püskürtücüler kullanılmalıdır. Norton Yağış Simülatörü'nde kullanılan düzenek Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7: Norton yağış simülatörü detayı (a) püskürtücü, (b) motor (Url-3, 2010).

3.3 İTÜ Yağış Simülatörü Elemanları

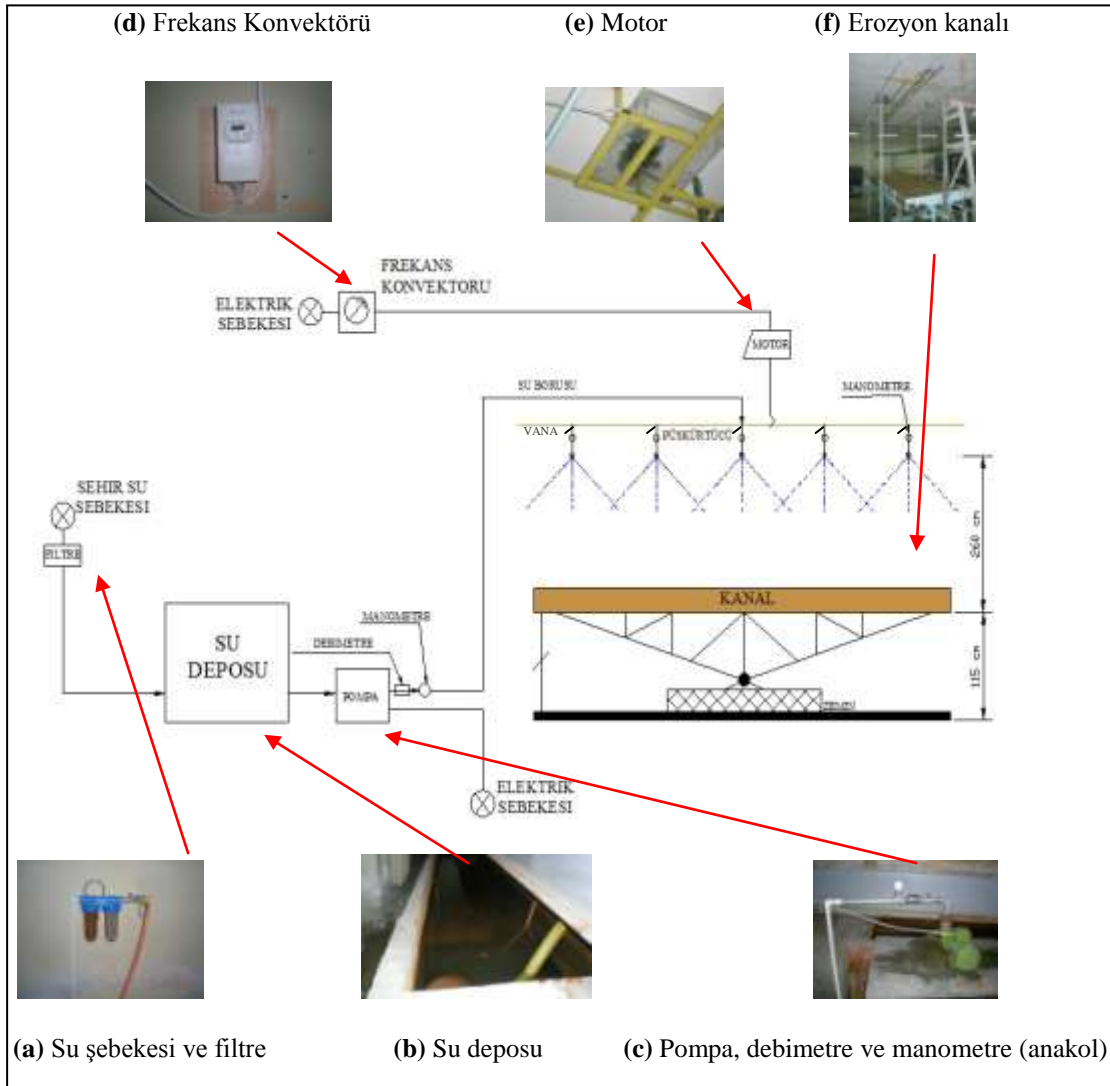
Planlanan yağış-akış-katı madde hareketi verilerinin elde edilmesi için literatürden yararlanılarak İTÜ Hidrolik Laboratuvarı'nda bir yağış simülatörü kurulmuştur. Yağış simülatörü aşağıdaki elemanlara sahiptir.

Deney için gerekli olan su, şehir şebekesinden sağlanmakta; filtre edildikten sonra (Şekil 3.8a) 20 mm çapındaki boru yardımıyla su deposuna (Şekil 3.8b) aktarılmaktadır. Su, depodan pompa (Şekil 3.8c) aracılığı ile püskürtüçülere iletilmektedir. Depodan çekilen su miktarını belirlemek için pompanın çıkışına debimetre konmuştur (Şekil 3.8c). Püskürtüçülerde sabit bir basınç olması istenmektedir. Bu nedenle her bir püskürtücünün girişine 2,5 bar basınca kadar ayarlanabilen dijital manometreler yerleştirilmiştir.

VeeJet (8070,8060) tipinde beş adet püskürtücü, aralarındaki mesafe 1,25 m, püskürtücü uçları ile yatay kanal tabanı arasındaki düşey mesafe 2,60 m olacak şekilde yerleştirilmiştir. Püskürtüçüler yatay bir çubuk (püskürtücü çubuğu) üzerine monte edilmiştir (Şekil 3.8f). Püskürtücü çubuğu tavana sabitlenmiştir. Bir motora bağlı (Şekil 3.8e) kol vasıtası ile çubuk, püskürtücü çubuğunu kanal enine doğrultusunda belli bir açı yapacak şekilde ileri geri hareket ettirmektedir. Çubuğun bu ileri geri hareketinin frekansı, çubuğu hareket ettiren motora bağlı bir frekans dönüştürücü ile ayarlanmaktadır (Şekil 3.8d). Motor 1.5 hp'lik güce sahip olup, kanal tabanından 2,5 m kadar yukarıda püskürtüçülere yakın bir sehpaye bağlanmıştır (Şekil 3.8f).

Öncelikle püskürtücü olarak Norton Yağış Simülatörü'nünde kullanılan VeeJet 80100 tipinde 3 adet püskürtücü kullanılmıştır. Ancak yapılan deneyler sonrasında üç püskürtücü kullanılması durumunda kanalın belli bölgelerine yağış düşmediği görülmüş, düşen yağış miktarı da 180 mm/saat civarında bulunmuştur. Bu nedenle

yağış simülöründe kullanılan püskürtücü sayısı ve tipinde değişikliklere gidilmiştir. Kanal yüzeyinde üniform yağış elde etmek ve deneylerde kullanılan yağış şiddeti değerlerini ayarlayabilmek için VeeJet 8070 ve VeeJet 8060 olmak üzere iki tip püskürtücü kullanılmıştır. Kullanılan püskürtücülerin orifis çapları sırasıyla 5,2 ve 4,8 mm'dir. Püskürtücü sayısının sabit kalması suretiyle, püskürtücü orifis çapının küçülmesi, akış debisi küçüldüğünde damlaların kanal yüzeyindeki saçılımının azalmasına engel olur. Böylelikle akış debisinin azalması, yağış şiddetinin azalmasını sağlarken, yağışın üniformluğu korunmuş olur.



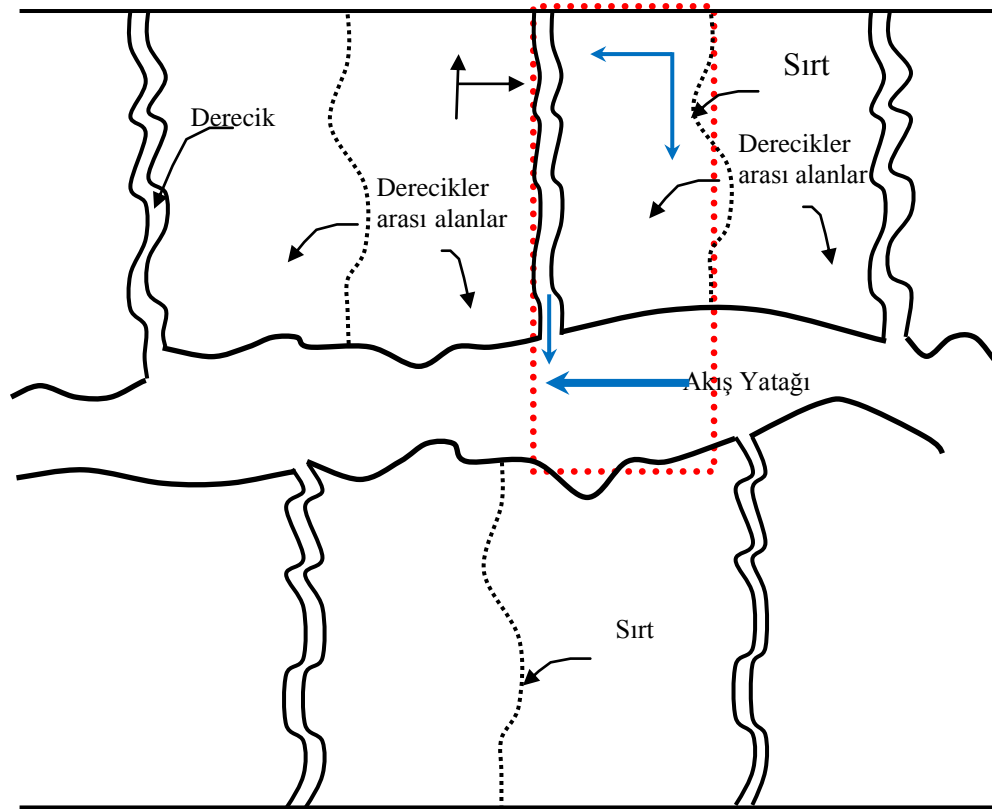
Şekil 3.8: Yağış simülörünün elemanları ve erozyon kanalı.

Püskürtücülerin arasındaki mesafe yağışın kanal yüzeyinde üniform olmasını sağlayacak şekilde yapılan bir seri deney sonrasında belirlenmiştir. Her bir püskürtücü tipi için ayrı üniformluk deneyi yapılmıştır. Bu şekilde tasarlanan yağış

simülâtörünün üniform yağış ürettiği görülmüştür. Bu konu ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4'te verilmiştir.

3.4 Erozyon Kanalı

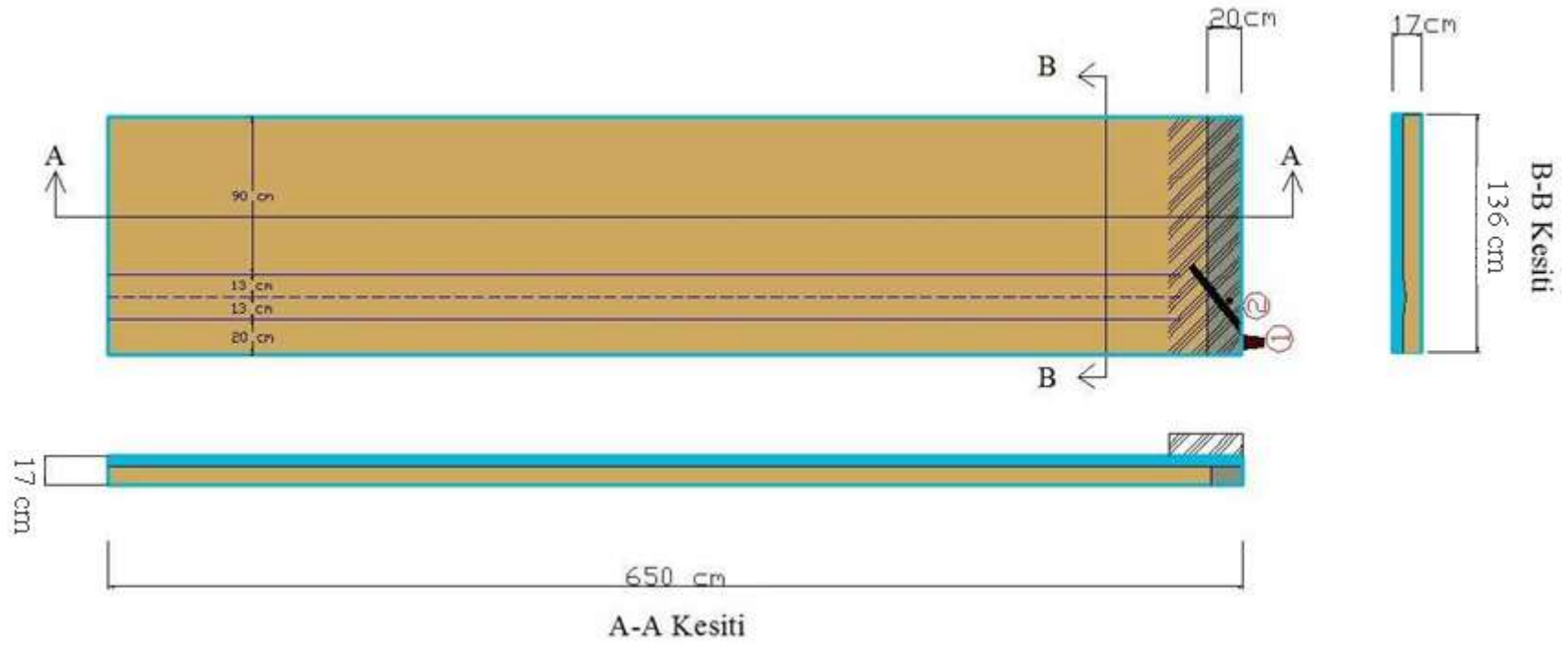
Yağış simülâtörünün altında genişliği 1,36 m, uzunluğu 6,50 m ve derinliği 17 cm olan; boyuna ve enine doğrultuda eğimi değiştirebilen erozyon kanalı mevcuttur (Şekil 3.8). Kanalın boyutları, mikrotopografyanın oluşumu ve yağış-akış-katı madde verilerinin üretilmesi için yeterlidir. Kanalın uzunluğunun 20 cm'lik kısmı yağış kaynaklı akış ve katı maddeyi toplamak ve gözlemek üzere ayrılmıştır. Ve bu bölgenin üzeri bölgeye düşecek yağış sonucu zeminde meydana gelebilecek kaymaları önlemek için plexiglass plakalarla kapatılmıştır. Kanalı, Şekil 3.9'da şematize edilen akarsu yamacı olarak tanımlayabiliriz.



Şekil 3.9: Havza yamacındaki topografik oluşumlar (Laboratuvar modelinde kırmızı çerçeve içine alınan kısım incelenmektedir).

Fiziksel tabanlı erozyon modelleri için geliştirilen matematik modeller genellikle hem derecikten hem de derecikler arası alandan akış yatağına gelen akış ve katı madde miktarının ayrı ayrı gözlenmesi esasına dayanmaktadır. (Aksoy ve diğ., 2009; Aksoy ve diğ., 2010a, b) Bu nedenle, Şekil 3.10'da görüldüğü üzere erozyon kanalına iki

ayrı çıkış ağız yapılmıştır. Derecikler arası alandan önce dereciğe gelen, sonra derecikteki akım ile birleşerek akış yatağına ulaşan akış ve katı maddenin zamana bağlı ölçümü için **1** no'lu çıkış ağız yapılmıştır. Derecikler arası alandan ise doğrudan akış yatağına ulaşan akış ve katı maddenin zamana bağlı ölçümü için **2** no'lu çıkış ağız yapılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Erozyon kanalı planı ve kesitleri.

3.5 Kanal Eğiminin Ayarlanması

Her deney öncesinde, kanala, enine ve boyuna doğrultuda aynı anda farklı eğimler verilmiştir (Çizelge 3.1). Tablodaki her tik işareti kanalın enine ve boyuna doğrultuda ayarlandığı eğimleri göstermektedir. Ortagonelin altında kalan eğimler; yani enine eğimin boyuna eğimden büyük olduğu durumlar için deney yapılmamıştır. Bunun nedeni, doğada akarsu yamaçlarında enine eğimin, boyuna eğimden büyük olduğu durumların nadir görülmesidir.

Çizelge 3.1: Eğim matrisi (işaretler kanalın enine ve boyuna doğrultuda alacağı eğimleri göstermektedir).

Boyuna Enine	%5	%10	%15	%20
%5	+	+	+	+
%10		+	+	+
%15			+	+
%20				+

Her yağış şiddeti için (85 ve 105 mm/sa), Çizelge 3.1’de verilen eğimler ayarlanarak toplam 20 deney gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.11, kanalda enine ve boyuna doğrultuda eğimin ayarlandığı kısımları göstermektedir. Boyuna eğimin ayarlanmasında 1 no’lu çubuk, enine eğimin ayarlanmasında ise 2, 3 ve 4 numaralı çubuklar kullanılmaktadır. Eğimin sağlanması için Denklem 3.1’den faydalanılmıştır.

$$Eğim (\%) = \frac{h}{L} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada, h= kanalın kaldırılan kısmı ile alt kısmı arasındaki yükseklik (m), L= kanalın eğimin belirleneceği doğrultudaki uzunluğu (m) olarak ifade edilmektedir.

Denklem 3.1’e göre kanalın tamamen yatay konumundan (enine eğim = boyuna eğim = %0) enine ve boyuna eğimini ayarlamak için kaldırılması gereken yükseklik miktarları hesaplanmış ve Çizelge 3.2’ de verilmiştir.



Şekil 3.11: Eğim ayarlama sistemi.

Çizelge 3.2: Eğim ayarlama tablosu.

Eğim (%)	Boyuna (cm)	Enine (cm)
5	16,3	6,8
10	32,5	13,6
15	48,8	20,4
20	65,0	27,2

4. DENEYLER

Deneyleerde, bitki örtüsü korumasına sahip olmayan (çıplak) kum kullanılmıştır. Bu bölümde, kullanılan kumun fiziksel özellikleri ve kanala yerleştirilmesi işlemini anlatılmıştır.

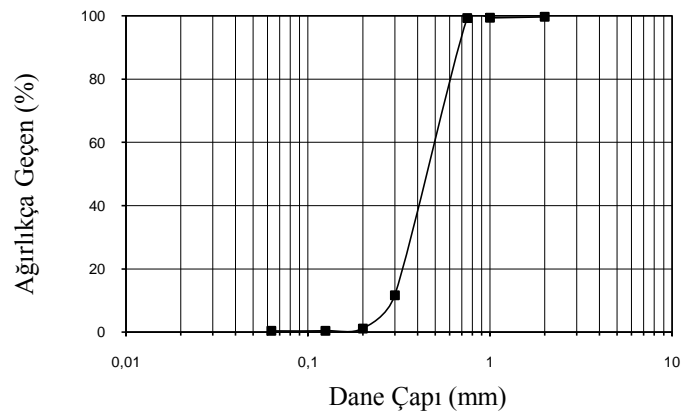
4.1 Katı Madde

4.1.1 Elek analizi

Kullanılan malzemenin granülometrisinin belirlenmesi için elek analizi yapılmıştır. Elek analizi sonuçları Çizelge 4.1, ortaya çıkan granülometri eğrisi de Şekil 4.1'de verilmiştir. Buna göre, kullanılan malzemenin, medyan çapı $D_{50} = 0,45$ mm olan orta kum olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 4.1: Elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	Elekte kalan (g)	Elekten geçen (g)	Ağırlıkça geçen (%)
2,000	4,50	1407,00	99,68
1,000	4,50	1402,50	99,36
0,750	1,50	1401,00	99,26
0,300	1236,50	164,50	11,65
0,200	148,00	16,50	1,17
0,125	10,50	6,00	0,43
0,063	0,50	5,50	0,39
Tava	5,50	0,00	0,00



Şekil 4.1: Granülometri eğrisi.

4.1.2 Zeminin üniformluğu

Kullanılan malzemenin (kumun) üniformluğunun ölçülmesi amacı ile üniformluk katsayısı hesaplanmıştır (TS 1500, 2000). Üniformluk katsayısı (C_u) ile belirlenir.

$$C_u = D_{60}/D_{10} \quad (4.1)$$

Burada; D_{10} ve D_{60} dane çapı dağılımı eğrisinden sırasıyla %10 ve %60'a karşı gelen çapları göstermektedir.

TS 1500'e göre temiz kumlar, $C_u < 6$ olması durumunda üniform kum sınıfına girmektedir. Elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisinden okunan $D_{10} = 0,281$ mm ve $D_{60} = 0,497$ mm değerleri kullanılarak $C_u = 1,768$ olarak belirlenmiştir. Buna göre kullanılan malzemenin (kumun) üniform yapıda bir kum olduğu söylenebilir.

4.1.3 Özgül ağırlık tayini

Etüvde kurutulan kum, darası alınmış bir kap içerisine yerleştirilerek 0,5 g duyarlılıklı bir dijital terazi ile tartılmıştır. Bu şekilde kuru ağırlığı belirlenen kum, içinde belli bir hacimde su bulunan ölçekli bir kaba boşaltılarak kap içerisindeki suyun seviyesindeki değişim gözlenmiştir. Su seviyesindeki artış kumun hacmini vermektedir. Böylece, kumun özgül ağırlığı,

$$\gamma = W/V \quad (4.2)$$

ile hesaplanabilir. Burada; γ = Kumun özgül ağırlığı (g/cm^3); W = Kuru kumun ağırlığı (g); V = Kuru kumun hacmidir (cm^3). Özgül ağırlık deneyi 39 kum numunesi için tekrarlanmış, yapılan bu deneylerden elde edilen özgül ağırlıkların ortalaması alınmak sureti ile kumun özgül ağırlığı $2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$ olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2: Özgül ağırlık deneyi.

Numune No	Kuru Kum Ağırlığı (g)	Kurum Kum hacmi (cm ³)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
1	254,5	95	2,68
2	371,5	140	2,65
3	342,5	130	2,63
4	414,5	155	2,67
5	445,0	170	2,62
6	431,0	160	2,69
7	423,0	150	2,82
8	429,0	160	2,68
9	429,0	160	2,68
10	463,5	175	2,65
11	459,5	180	2,55
12	442,5	170	2,60
13	499,0	195	2,56
14	458,5	170	2,70
15	477,5	180	2,65
16	473,5	170	2,79
17	421,0	160	2,63
18	413,0	160	2,58
19	416,5	155	2,69
20	444,0	170	2,61
21	492,5	190	2,59
22	419,5	160	2,62
23	409,0	155	2,64
24	411,5	155	2,65
25	384,0	145	2,65
26	389,0	145	2,68
27	392,5	145	2,71
28	383,0	145	2,64
29	352,0	125	2,82
30	377,0	140	2,69
31	356,0	135	2,64
32	348,5	135	2,58
33	378,0	145	2,61
34	363,0	140	2,59
35	397,0	155	2,56
36	355,0	135	2,63
37	372,0	140	2,66
38	448,5	175	2,56
39	375,0	140	2,68
ORTALAMA			2,65

4.2 Kumun Kanala Yerleştirilmesi

Boyutları 1,36 x 6,50 m olan dikdörtgen kanal 13 cm kalınlığında kumla doldurulmuş, hafifçe sıkıştırılıp, düzeltilmiştir. Kanal içindeki kum derinliğinin kanal boyunca aynı olabilmesi için kanalın düzeltilmesi sırasında su terazisi kullanılmış ve kanal boyunca derinlik ölçümleri yapılmıştır.

Kanaldaki kumun erozyon kanalına yerleştirilip, sıkıştırılıp, düzeltilmesinden sonra akış yönünün sağ tarafında Şekil 4.2'deki gibi bir derecik oluşturulmuştur. Dereciğin yağış öncesinde oluşturulması düşüncesi başlangıç deneylerinde yapılan gözlemlerden sonra ortaya çıkmıştır. Çünkü derecik oluşturulmadan önce kanala iki doğrultuda eğim verildiğinden dolayı, enine eğimin etkisiyle su kanal kenarlarında toplanmış ve Şekil 4.3'de görülen bölgedeki malzemeyi erozyona uğratmıştır. Nitekim, Gilley ve diğ. (1992) tarafından yapılan çalışmada da yağış öncesinde derecik oluşturulduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada da dereciğin yağış öncesinde oluşturulması yoluna gidilmiştir. Şekil 4.2'teki oklar erozyon deneyleri sırasında meydana gelen akışın yönlerini göstermektedir.



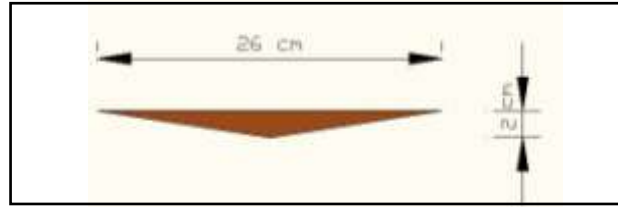
Şekil 4.2: Erozyon kanalında yağış öncesi oluşturulan derecik.

Ayrıca, deneyler sırasında kanala iki doğrultuda eğim verilmesi, dereciğin yerini ve dolayısıyla ölçüm amaçlı çıkış ağzının yerinin bilinmesini gerekli kılmaktadır. Çünkü yapılacak deneylerde derecikte meydana gelen akış ve bunun beraberinde getirdiği katı madde miktarın ölçülmesi planlanmıştır.

Derecik oluşturulurken Şekil 4.4'teki derecik şablonu kullanılmıştır. Derecik oluşturma şablonunun derinliği 2 cm ve yüzey genişliği 26 cm'dir. Bu boyutlar deney sırasında erozyonla beraber kanal tabanının ve kanal kenarının ortaya çıkmaması için belirlenen minimum değerlerdir.



Şekil 4.3: Derecik oluşturulmadan önceki durum.



Şekil 4.4: Derecik şablonu.

Her deney sonrasında kanalın boyuna eğimi 20% değerine ayarlanmıştır ve içindeki suyun dışarı akması için bir gün beklenmiştir. Daha sonra kanalın içine kum doldurma, kumu sıkıştırma ve düzeltme işlemi tekrar edilmiştir. Böylelikle kanalın başlangıç su içeriğinin hemen hemen aynı olması sağlanmıştır.

4.3 Yağış Deneyleri

Bu bölümde, deneyler için gerekli iki farklı adımdan söz edilmiştir. Önce yağış şiddetinin belirlenmesi için püskürtücülerle yapılan deneylere yer verilmiş, daha sonra söz konusu yağışın kanal alanı boyunca üniformluğunun sağlanması için yapılan deneyler anlatılmıştır.

4.3.1 Yağış şiddeti

Deneyler sırasında 85 ve 105 mm/sa olmak üzere iki farklı yağış şiddeti kullanılmıştır. Bu değerlere ulaşabilmek için orifis çapları sırasıyla 4,8 ve 5,2 mm olan VeeJet 8060 ve VeeJet 8070 tipi püskürtücüler kullanılmıştır. Yağış şiddeti, kullanılan püskürtücü tipine, ayrıca püskürtücülerin monte edildikleri çubuğun ileri-geri hareketinin frekansına bağlıdır. Çünkü, çubuğun ileri-geri hareketi sırasında püskürtücüler her defasında suyu bir süre kanalın dışına püskürtmektedir. Deneyler

sırasında püskürtücülere ulaşan su miktarı aynıdır. Çubuğun ileri geri hareketinin frekansı arttığında yağmur damlacıklarının yatay hız bileşeni ve dolayısıyla bileşke hızı artacağından, daha fazla miktarda damlacık dışarı çıkar ve kanalın içine düşen su miktarı azalır. Bu nedenle, hareketin frekansına bağlı olarak kanalın içine düşen suyun miktarının değiştiği söylenebilir. Şekil 3.8d'deki frekans konvektörü sayacında yapılan okuma, püskürtücü çubuğunun ileri-geri hareketinin bir göstergesidir. Artan sayaç okumaları hızlı harekete karşı gelir. Sayaçta 50 değeri okunduğunda püskürtücü çubuğu dakikada 75 defa ileri-geri hareket yapmaktadır. Bu değer belirlenirken kanalının üstü geçirimsiz naylon bir örtü ile kapatılıp sayacın 30, 40 ve 50 değerleri için VeeJet 8070 püskürtücüler belli bir süre (15 dakika) çalıştırılmıştır. Kanal üstüne düşen yağış tek bir çıkış noktasına yönlendirilmek sureti ile toplanmış ve hacmi ölçülmüştür. Bu hacim, kanal yüzey alanına bölünerek yağış şiddeti hesaplanmıştır. Bu deney bir kaç kez tekrar edilmiş, böylece yağış şiddeti belirlenmiştir. VeeJet 8070 için hesaplanan yağış şiddeti değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Hareketin frekansının belli bir değer üzerine çıkması ile birlikte yağış şiddetinin artık etkilenmediği görüldüğünden sayacın 50 değeri (75 hareket/dakika) ile çalışmanın uygun olduğuna karar verilmiştir.

Çizelge 4.3: Sayaç değeri belirleme deneyleri (VeeJet 8070).

Sayaç Okuması	Yağış şiddeti (mm/saat)
30	120
40	106
50	105

Püskürtücü çapı daha küçük olan VeeJet 8060 tipi için ise sayaç okuma-yağış şiddeti ilişkisinin belirlenmesine yönelik herhangi bir deney yapılmamış olup sayaç okuması 50 kabul edilip, yukarıda belirtilen yöntemle yağış şiddeti hesaplanmıştır.

Özetle, püskürtücülere ulaşacak gerekli su miktarı ayarlandığında, VeeJet 8060 ve VeeJet 8070 tipi püskürtücülerin her biri sayaç okumasının 50 değeri için sırasıyla 85 ve 105 mm/sa'lik yağış şiddeti değerlerine ulaşmaktadır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4: Uygun yağış şiddetinin elde edilebilmesi için gerekli simülasyon ayarları.

Püskürtücü tipi	Anakol debi	Anakol basınç	Püskürtücüde basınç	Püskürtücü aralarındaki mesafe	Yağış şiddeti
VeeJet	(l/dak)	(bar)	(bar)	(cm)	(mm/sa)
8070	32,05	1,0-1,5	0,4	125	105
8060	26,47	1,0	0,3	125	85

Anakol: Püskürtüçülere su sağlayan pompanın çıkışındaki boru.

4.3.2 Yağış üniformluğu

Uygulamada yağış uygulanan alan üzerinde mutlak bir üniformluk elde etmek mümkün değildir. Yağışın uygulama alanı üzerindeki dağılımının üniformluğu püskürtücüdeki basınç, püskürtücü çapı, püskürtücünün yüksekliği ve püskürtücüler arasındaki mesafeye bağlıdır (Keller ve Blieser, 1990; Wilson ve Zoldaske, 1997; Tarjuelo ve diğ., 1999). Bunlardan özellikle püskürtücüler arasındaki mesafe yağış dağılımının üniform olmasında etkili olan en önemli parametre sayılabilir. Püskürtücüler arasındaki mesafenin artması ile üniformluk azalır (Tarjuelo ve diğ., 1999).

Bu çalışmada kanalın üzerinde yağışın üniformluğu literatürde de sıkça kullanıldığı üzere (Moazed ve diğ., 2010) Christiansen Üniformluk Katsayısı (C_uC) ile kontrol edilmiştir. Bu katsayı Denklem 4.3 yardımı ile hesaplanır.

$$C_uC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{N\bar{x}}\right) \times 100 \quad (4.3)$$

Burada; x_i = i noktasındaki yağışın miktarı (cm^3), \bar{x} = ortalama yağış miktarı (cm^3) ve N yağış ölçülen nokta sayısıdır. C_uC 'nin %80'nin üzerinde olması kabul edilebilir bir değerdir. C_uC kullanılarak yapılan üniformluk sınıflandırması Çizelge 4.5'te verilmiştir (Moazed ve diğ., 2010).

Çizelge 4.5: Yağış üniformluk sınıfları

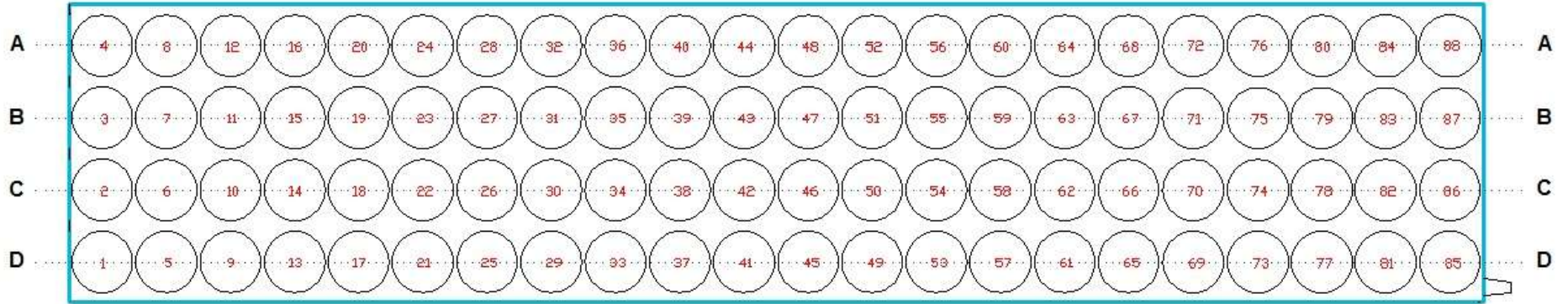
C_uC (%)	Üniformluk Sınıfı
≥ 90	Çok iyi
80-89	İyi
70-79	Zayıf
≤ 69	Çok zayıf

Kanal alanınca yağışın üniformluğunun belirlenmesi için kanal yüzeyine 88 adet 10 l ölçekli kap yerleştirilmiştir (Şekil 4.5; 4.6). Üniformluk deneyleri her bir püskürtücü için (VeeJet 8070 ve VeeJet 8060) ayrı ayrı yapılmış ve 15 dakika sonucu kaplarda

biriken yağış dikkate alınmıştır. 84 adet kabın içerisinde biriken su ağırlığı tartılmıştır. Kenarda kalan 85, 86, 87 ve 88 no'lu kaplar kanal çıkış noktasında olup yeterince yağış almadığından hesaplarda dikkate alınmamıştır. Bu şekilde yapılan hesaba göre Çizelge 4.6 kullanılarak VeeJet 8070 için % 87,3, VeeJet 8060 için ise % 83,0'lık bir yağış üniformluğu sağlanmıştır. Bu değerler Çizelge 4.5'e göre iyi nitelikte üniform bir yağışa karşı gelmektedir. Sonuç olarak hesaplanan bu değerler erozyon deneylerinin yapılabilmesi için yeterli değerlerdir.

Çizelge 4.6: Erozyon kanalı üzerinde yağış üniformluğu.

105 mm/sa (VeeJet 8070)				85 mm/sa (VeeJet 8060)			
Ağırlık (g)				Ağırlık (g)			
1569,5	1139,5	1103,5	1139,5	1423,5	926,5	928,5	865,0
1856,0	1533,5	1426,0	1462,0	1471,0	1237,0	1198,5	1103,0
1498,0	1426,0	1318,5	1354,5	1673,5	1607,0	1568,5	1621,0
1569,5	1498,0	1498,0	1462,0	1298,0	1218,0	1240,0	1292,5
2040,5	1820,5	1963,5	1963,5	997,0	849,0	823,0	815,5
1892,0	1533,5	1533,5	1426,0	1265,0	1107,0	1110,5	1015,0
1856,0	1677,0	1677,0	1533,5	1831,0	1626,0	1790,0	1566,0
1748,5	1533,5	1533,5	1426,0	1533,0	1363,0	1516,0	1398,0
2232,5	1641,0	1605,5	1462,0	1419,0	1176,0	1173,5	1132,0
2117,0	1569,5	1569,5	1462,0	1324,0	1107,0	1122,5	1005,0
1748,5	1605,5	1569,5	1498,0	1717,0	1579,0	1634,0	1519,0
1892,0	1713,0	1677,0	1569,5	1675,0	1501,5	1556,5	1502,5
1641,0	1247,0	1283,0	1283,0	1208,0	988,5	1050,5	1045,0
3038,5	1856,0	1820,5	1713,0	1803,5	1213,0	1187,0	1043,0
2002,0	1677,0	1569,5	1462,0	1635,0	1456,5	1493,5	1340,0
1641,0	1498,0	1462,0	1462,0	1656,0	1484,5	1555,5	1401,5
1641,0	1390,5	1390,5	1247,0	1138,5	978,0	1044,0	1009,5
2271,0	1892,0	2002,0	1963,5	1254,5	1097,5	1044,5	1132,5
2040,5	1748,5	1784,5	1784,5	1617,5	1549,0	1484,5	1446,5
1748,5	1677,0	1748,5	1605,5	1460,0	1524,0	1518,0	1493,5
1641,0	1426,0	1390,5	1283,0	1247,5	1187,5	1176,0	1170,5
\bar{x} (g)		1634,2		\bar{x} (g)		1316,1	
$\sum_1^{84} x_i - \bar{x} $ (g)		17492,8		$\sum_1^{84} x_i - \bar{x} $ (g)		18745,8	
C_uC (%)		87,3		C_uC (%)		83,0	



Şekil 4.5: Kanal alanı boyunca yağış üniformluğunun belirlenmesi için kanal yüzeyine yerleştirilen 88 adet ölçüm kabı.



Şekil 4.6: Yağışın kanal yüzeyinde alansal dağılımı (üniformluk) deneyi.

4.4 Deney Prosedürü

Deneyler yapılırken yapılan kabuller aşağıdaki gibidir:

- Her bir deneyden sonra diğer deney için 24 saat beklendiğinden dolayı her deney öncesinde kumun su içeriği açısından başlangıç koşulları aynı kabul edilmiştir.
- Derecik oluşturulurken dereciğin akış yönünün sağ tarafında oluşturulan küçük alanda meydana gelecek erozyon kayıpları ihmal edilmiştir (Şekil 4.2). Şekil 3.10'daki 1 no'lu çıkış ağzından yapılan ölçümün, derecikler arası alandan dereciklere geçen ve derecikteki akış erozyonu ile birleşen yağış-akış-katı madde ölçümü olduğu kabul edilmiştir.
- Akış ve katı madde verilerinin toplanmasına derecikte yüzeysel akışın Şekil 3.10'da görülen 1 no'lu çıkış ağzına ulaşması ile başlanmıştır.

4.4.1 Deney sisteminin çalıştırılması

Erozyon kanalı içerisine kum yerleştirilip, gerekli hazırlıklar yapıldıktan sonra deneyler aşağıdaki sıra izlenerek yapılmıştır.

- Frekans konvektörü sayaç okuma değeri 50 olarak ayarlanır. Püskürtücülerin üzerinde bulunduğu çubuğun ileri geri hareketi sağlanır.
- Pompa çalıştırılır.

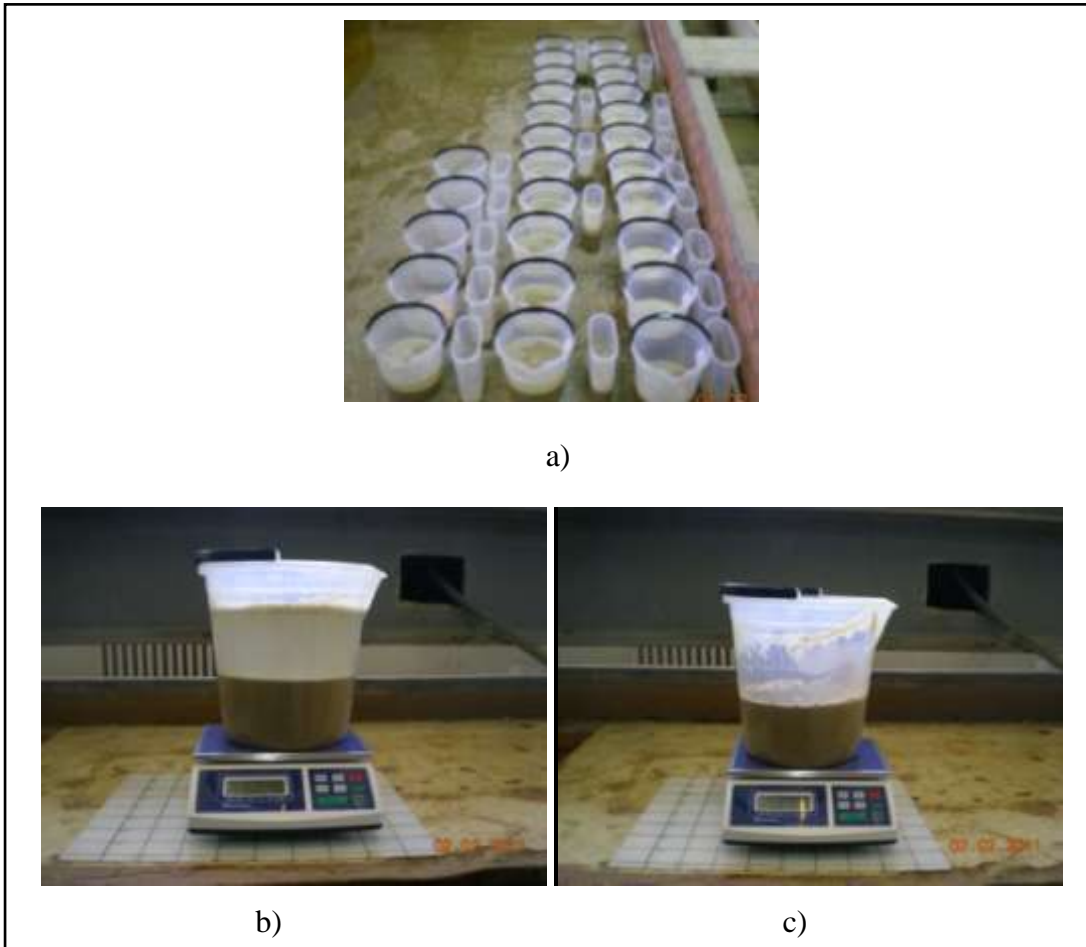
- Pompa üzerinde bulunan önceden debi ayarı yapılmış vana açılır.
- Kanalda yüzeysel akışın ilk başladığı, 1 no'lu çıkış ağzından çıktığı süre kaydedilir.
- Bu andan itibaren 15 dakika boyunca yağış uygulanır.
- Kanalın her iki çıkış ağzından belli zaman aralıklarında akış ve katı madde verileri ölçekli kaplar yardımıyla toplanır ve kaplar içindeki malzeme, çökmesi için bir gün bekletilir.
- Akış ve katı madde verilerinin toplanması yüzeysel akışın 1 no'lu çıkış ağzından gözlenmesinden sonra 15 dakika boyunca yapılır. Yağışın kesilmesinin ardından da hidrograf ve sedimentagrafin çekilme eğrisini oluşturacak şekilde 10 dakika boyunca verilerin toplanmasına devam edilir.
- Deney sonunda kanalda oluşan mikrotopografya Şekil 4.7'deki gibi çeşitli açılardan fotoğraflanır.
- İçindeki malzeme ile bir gün bekletilen kaplarda akış ve katı madde ölçümleri yapılır.
- Bir sonraki deney için kanal içerisindeki kumun yüzeyden 1-2 cm'lik kısmı kaldırılır, yeni kum doldurulur ve hafifçe sıkıştırılarak düzeltilir. Ardından derecik oluşturulur.



Şekil 4.7: %5 enine-%5 boyuna eğimde, 105 mm/sa'lik yağış altında yapılan deney sonrası mikrotopografyanın görünümü.

4.4.2 Katı madde ölçümleri

Deneyler sırasında yüzeysel akışın başladığı ve 1 no'lu çıkış ağzından çıktığı süre kaydedilmiş ve deneyler yüzeysel akışın 1 no'lu kanal ağzından çıkmasından sonra 15 dakika sürmüştür. Deney süresinin yüzeysel akışın kanaldan çıkmasından sonra 15 dakika olarak belirlenmesinin nedeni, bu süre içerisinde akışın ve erozyonun kararlı duruma gelmesi ve kanalın her tarafının ıslanmasıdır. Veri kümesini elde etmek için kanaldan ilk yüzeysel akışın çıkması ile beraber 15 saniye ile 1 dakika arasında değişen zaman aralıklarında kanalın her iki çıkış ağzından da akış ve katı madde toplanmıştır (Şekil 4.8a). Veriler 1 no'lu çıkış ağzından daraları bilinen 10 l ölçekli kaplarla, 2 no'lu çıkış ağzından ise daraları bilinen 4 l ölçekli kaplarla toplanmıştır. Veri toplama aralıkları yüksek eğimlerde erozyon kararlı hale geldiğinde daha düşük olmuştur. Bunun nedeni yüksek eğimlerde akışın daha hızlı olmasıdır. Akış ve katı madde verilerinin bulunduğu kaplar daha sonra içerisindeki katı maddenin çökmesi için 1 gün bekletilmiştir.



Şekil 4.8: Katı madde ölçümleri a) ölçülecek numuneler b)su ve katı madde ağırlığı c)katı madde ağırlığı.

Bu çalışmada önce kapla beraber akış ve katı madde ağırlığı ve toplam hacim Şekil 4.8b'deki gibi ölçülmüş; daha sonra kaplar içerisindeki su boşaltılıp, ıslak katı madde ağırlığı ölçülmüştür (Şekil 4.8c). Ardından kuru katı madde ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

4.4.3 Kuru katı madde hesabı

Yağışın meydana getirdiği yüzeysel akış ile birlikte hareket eden katı madde miktarının belirlenmesi gereklidir. Bunun için kurutulmuş katı madde miktarı ölçülmelidir. Ancak çalışma kapsamında yapılan deneylerde alınan örnek sayısının çok olması bu işi olanaksız hale getirmiştir. Bu nedenle kum için aşağıdaki gibi bir deney yapılmıştır.

Kum ile dolu erozyon kanalı üzerine yağış uygulanmıştır. Yağıştan kaynaklanan akış kanalın 1 no'lu çıkış ağzından (Şekil 3.10) 2 l'lik 40 adet ölçekli cam kap kullanılarak toplanmış, katı maddenin çökmesi amacı ile kaplar, içindeki su ve katı madde ile birlikte 1 gün bekletilmiştir. Katı maddenin suyun içinde çökmesinin ardından kabın içindeki su ve katı maddenin toplam hacmi (V_{top}) [l] ve kap dahil toplam ağırlığı ($W_{top,brüt}$) [kg] ölçülmüştür. Kabın dibinde biriken katı maddenin suya tekrar karışmasını önleyecek şekilde kap içindeki su, başka bir ölçekli kaba boşaltılmıştır. Bu şekilde suyun hacmi (V_{su}) [l] ve ölçekli kap ile birlikte suyun ağırlığı ($W_{su,brüt}$) [kg] ölçülmüştür. Kullanılan kabın darasının çıkarılması ile suyun ağırlığı ($W_{su,net}$) [kg] elde edilmiştir.

Bu arada kapta kalan katı maddenin ıslak haldeki hacmi ($V_{sed,ıslak}$) [l]

$$V_{sed,ıslak} = V_{top} - V_{su} \quad (4.4)$$

ile hesaplanmış, ayrıca kap ile birlikte katı madde ıslak ağırlığı ($W_{sed,ıslak,brüt}$) [kg] ölçülmüş, kap darasının çıkarılması ile katı madde ıslak ağırlığı ($W_{sed,ıslak,net}$) [kg] elde edilmiştir.

Bu ölçümlerin ardından kaplar içlerindeki katı madde ile birlikte etüvde kurutulmaya bırakılmıştır. Kurutma işleminden sonra kaplar içlerindeki katı madde ile birlikte tartılmış, böylece katı maddenin kap dahil kuru ağırlığı ($W_{sed,kuru,brüt}$) [kg] bulunmuş, kabın darasının çıkarılması ile katı madde kuru ağırlığı ($W_{sed,kuru,net}$) [kg] hesaplanmıştır.

Kurutulan katı madde, içinde belli bir hacimde ($V_{su,ölçek}$) [l] su bulunan ölçekli bir kaba boşaltılmış, katı madde dahil hacim ($V_{su+katı madde,ölçek}$) [l] okunmuştur. Bu iki hacim arasındaki farkın alınması ile

$$V_{sed,kuru} = V_{su+katı madde,ölçek} - V_{su,ölçek} \quad (4.5)$$

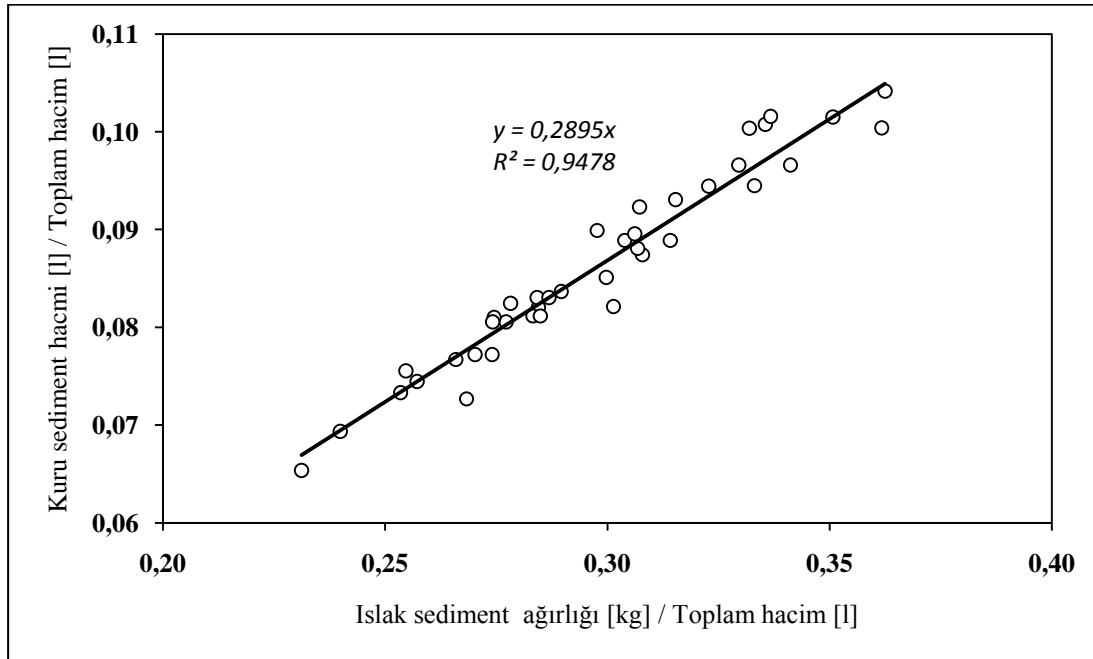
kuru haldeki katı maddenin hacmi ($V_{sed,kuru}$) [l] hesaplanmıştır. Bu hacmin toplam hacme (V_{top}) [l] oranı

$$C_s = V_{sed,kuru}/V_{top} \quad (4.6)$$

her bir kaptaki hacimsel katı madde konsantrasyonunu (C_s) [-] verecektir. Orta kum için bu şekilde alınan 40 kabın değerlendirilmesi sonucunda,

$$C_s = 0,2895W_{sed,ıslak,net}/V_{top} \quad (4.7)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Bağntı $R^2 = 0,95$ kadar yüksek bir determinasyon katsayısına sahiptir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Kuru haldeki katı madde konsantrasyonunun hesaplanması.

Bu pratik bir bağıntıdır. Buna göre; kuru haldeki katı madde konsantrasyonunun belirlenmesi için deney sırasında belli aralıklarla alınan her bir ölçekli kaptaki biriken toplam hacim ile katı maddenin ıslak haldeki ağırlığının ölçülmesi yeterlidir. Toplam hacim (V_{top}) [l] kabın içindeki su ve katı madde karışımının toplamının hacmidir ve

ölçekli kaptan kolaylıkla okunabilir. Katı madde ağırlığı ($W_{sed,ıslak,brüt}$) [kg] ise 1 gün bekletilen kabın içindeki su boşaltıldıktan sonra kabın katı madde ile birlikte tartılması ile belirlenmektedir. Kabın darasının çıkarılması ile ($W_{sed,ıslak,net}$) [kg] elde edilmektedir.

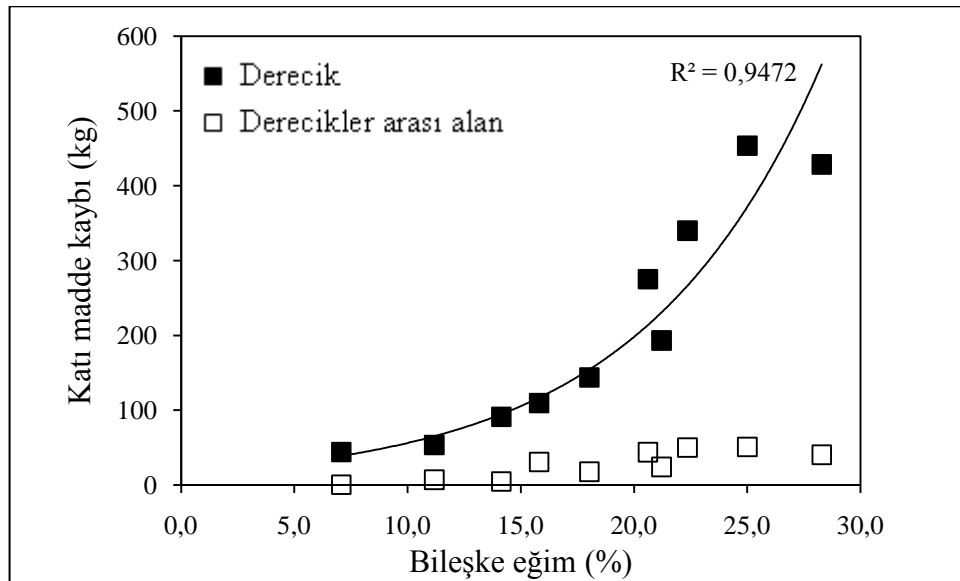
Bu tez çalışmasında hacimsel katı madde konsantrasyonu hesaplanırken kuru katı madde ağırlığı kumun özgül ağırlığına (2650 kg/m^3) bölünerek hacme çevrilmiş, daha sonra Denklem 4.6 yardımıyla hacimsel katı madde konsantrasyonu hesaplanmıştır.

5. UYGULAMA VE DEĞERLENDİRMELER

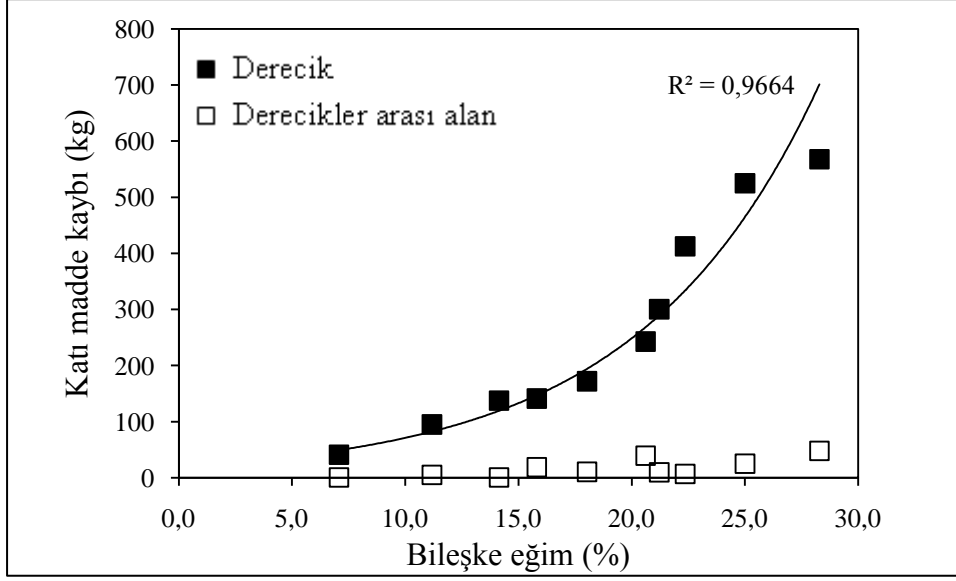
Bu çalışmada yapılan hesaplar, her eğim için kanaldan ilk akışın çıkması ile beraber değişen zaman aralıklarında toplanan akış ve katı maddenin toplam ağırlığı ve toplam hacmi kullanılmak suretiyle yapılmıştır. Yani akış debisi, erozyona uğrayan katı madde ağırlığı ve hacimsel katı madde konsantrasyonunun zamana bağlı değişimi verilmek yerine, su ve katı madde ağırlığı (toplam ağırlık), katı madde ağırlığı ve su-katı madde hacmi (toplam hacim) ölçülen her bir kaptan elde edilen değerler toplanmıştır. Böylelikle her bir deneyde derecik, derecikler arası alan ve derecik-derecikler arası alanda (birlikte) erozyona uğrayan toplam katı madde miktarı hesaplanabilmiştir.

5.1 Derecikte ve Derecikler Arası Alanda Meydana Gelen Erozyon Miktarının Karşılaştırılması

Derecikte ve derecikler arası alanda meydana gelen erozyonu karşılaştırmak için 85 mm/sa ve 105 mm/sa'lık yağış için derecik ve derecikler arası alanda meydana gelen erozyon miktarları Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de üst üste çizilmiştir.



Şekil 5.1: 85 mm/sa yağış için meydana gelen katı madde kaybı [kg].



Şekil 5.2: 105 mm/sa yağış için meydana gelen katı madde kaybı [kg].

Grafikler incelendiğinde dencikteki erozyonun, dencikler arası alanda meydana gelen erozyona göre çok daha büyük olduğu görülmektedir. Bu da akarsu yamaçlarında meydana gelen erozyonda denciklerin daha etkin olduğu ve hidrolojik modellemelerde denciklerin mutlaka hesaba katılması gerektiğini gösterir. Özetle dencikten çıkış ağzına (1 no'lu) ve dencikler arası alandan çıkış ağzına (2 no'lu) ulaşan katı madde miktarları karşılaştırıldığında dencikler arası alanın toplam erozyona katkısı çok az olduğundan bu çalışmada, dencikler arası alandan çıkış ağzına (2 no'lu) ulaşan veri detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Bu verinin toplanmasının nedeni tezin dışındaki amaçlar için söz konusu verinin bilinmesinin gerekliliğidir.

5.2 Yağış Şiddetinin Erozyon ve Hacimsel Katı Madde Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Şekil 5.3'te dencik, dencikler arası alan ve dencik-dencikler arası alan (birlikte) için yağış şiddeti ve bileşke eğim ile toplam hacim, toplam ağırlık, toplam katı madde kaybı ve hacimsel katı madde konsantrasyonunun değişim grafikleri verilmiştir. Bileşke eğimle ve genel olarak yağış şiddetinin artmasıyla katı madde kaybının arttığı gözlenmektedir.

Deneylerle belirlenebilen katı madde kayıp miktarı (Şekil 5.3) ile yağış şiddeti arasındaki ilişki ayrıca Morgan (1986) tarafından tanımlanan "Erozivite İndeksi" terimi ile açıklanabilir.

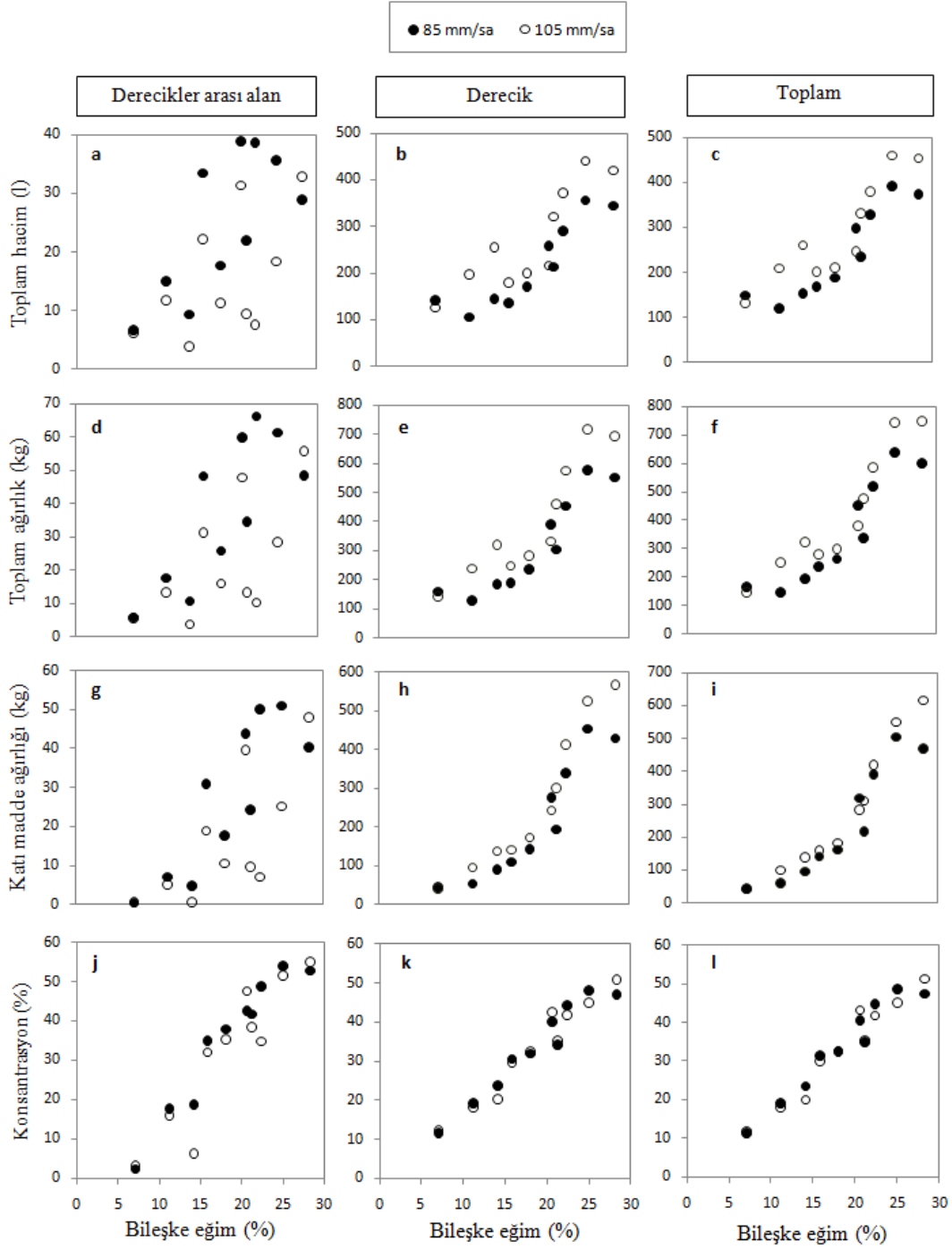
$$R = \sum EI_{30} \quad (5.1)$$

Burada, E yağmur damlalarının kinetik enerjisi, I_{30} 30 dakikalık yağış şiddeti olarak ifade edilmiştir. Yağmur damlalarının kinetik enerjisi E , yağışın şiddeti ve süresinin fonksiyonudur. Bunlardan birinde meydana gelecek artış yağmur damlalarının kinetik enerjisini ve dolayısıyla meydana gelecek erozyon miktarını artıracaktır.

Yapılan deneylerde yağış süresi (15 dak.) ve yağış uygulandığı alan aynı ($1,36 \times 6,50 = 8,84 \text{ m}^2$) olduğundan yağış şiddetinin artmasıyla meydana gelen toplam akışın artması beklenir. Sonuç olarak yağış şiddeti arttığında daha fazla erozyon meydana gelmesi beklenen bir durumdur.

Derecikler arası alandan çıkış ağzına (2 no'lu) ulaşan toplam hacim, toplam ağırlık ve toplam katı madde ağırlığının yağış şiddetine göre değişimi (Şekil 5.3a, d, g) dereciğe göre daha dağınıktır. Derecikte ise toplam hacim, toplam ağırlık ve toplam katı madde kayıp miktarının yağış şiddeti arttıkça arttığı söylenebilir (Şekil 5.3b, e, h). Derecik-derecikler arası alanda (birlikte) bu değerlerin yağış şiddetiyle olan artışını belirleyen derecilerde akım ile beraber taşınan katı madde miktarı olduğu görülmektedir (Şekil 5.3c, f, i).

Öte yandan derecik ve derecik-derecikler arası alan (birlikte) için yağış şiddetinin hacimsel katı madde konsantrasyonuna fazla etkisi olmadığı belirlenmiştir. Şekil 5.3 (k, l)'de görüldüğü üzere 85 ve 105 mm/sa'e karşılık gelen hacimsel konsantrasyon noktaları neredeyse birbiriyle çakışmaktadır. Buradan yağış şiddetinin hacimsel katı madde konsantrasyonu üzerine önemli bir etkisi olmadığını çıkarmak mümkündür.



Şekil 5.3: Bileşke eğim ile toplam hacim, toplam ağırlık, katı madde ağırlığı ve hacimsel katı madde konsantrasyonu değişimi.

5.3 Eğimin Erozyon ve Hacimsel Katı Madde Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Wischeimer ve Smith (1978)'e göre eğimin erozyon üzerinde pozitif etkisi vardır. Derecikler arası alandan çıkış ağzına (2 no'lu) taşınan toplam hacim, toplam ağırlık, toplam katı madde kaybı ve hacimsel katı madde konsantrasyonu bileşke eğime göre genel bir artış göstermektedir (Şekil 5.3a, d, g, j). Bu artış derecikde daha belirgindir

(Şekil 5.3b, e, h, k). Derecik-derecikler arası alanda (birlikte) bu değerlerin eğime göre gidişatını belirleyen derecikteki değişimdir (Şekil 5.3c, f, i, l). Derecik-derecikler arası alan (birlikte) için bileşke eğime ve yağış şiddetine bağlı erozyona uğrayan toplam katı madde kaybı grafiği incelendiğinde (Şekil 5.3c, f, i, l), elde edilen grafiğin derecik için çizilen grafik ile (Şekil 5.3b, e, h, k) paralellik gösterdiği gözlenmektedir.

Toy ve diğ. (2002)'e göre eğim arttığında zemine çarpan yağmur damlalarının teğetsel hızı artar ve zemin tanecikleri yerinden daha rahat ayrılır. Derecikler arası alanda erozyonun asıl kaynağı yağış olduğundan enine eğim arttığında daha fazla katı madde taneciğinin yerinden ayrılması beklenir. Ayrıca eğime bağlı olarak, yüzey ve yüzeyaltı su akışı hızlanır ve bu akış dereciğe doğru yönlendirilir. Tüm bunların sonucunda daha fazla katı madde dereciğe taşınır. Şekil 4.7, $S_x=5\%$ ve $S_y=5\%$ iken kanala 105 mm/sa'lik yağış uygulanması sonucu oluşan mikrotopografyayı göstermektedir. Şekil 4.7'den derecikler arası alan boyunca dereciğe doğru yönlendirilmiş olan akış rahatlıkla görülebilmektedir.

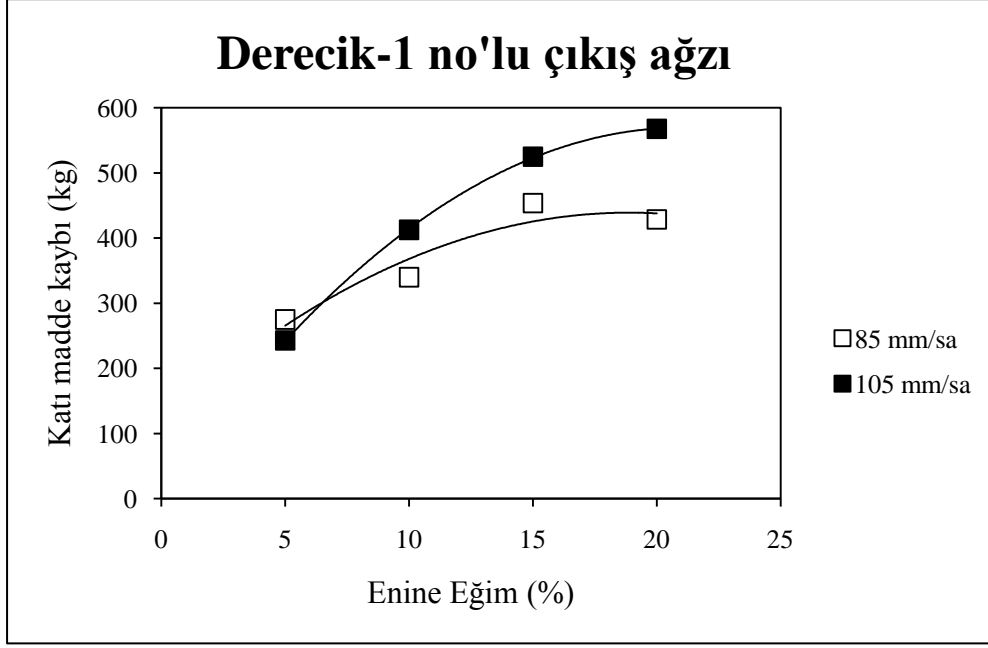
Literatürde derecikler arası alandan dereciklere doğru katı madde hareketini modelleyen 1-boyutlu modeller mevcuttur. Örneğin WEPP modeli (Foster ve diğ., 1995), derecikler arası alandan yağış etkisiyle yerinden ayrılıp dereciklere ulaşan katı madde miktarını aşağıdaki şekilde tanımlamıştır.

$$D_i = K_i I^2 S_F \quad (5.2)$$

Burada D_i derecikler arası alanda meydana gelen erozyon ($\text{kg/m}^2\text{-s}$); K_i zeminin erodibilitesi (kg-s/m^4); I yağış şiddeti (m/s) ve S_F eğim faktörü'dür.

Denklemden görüldüğü üzere yağış şiddetinin ve eğimin artmasıyla derecikler arası alandan dereciklere ulaşan katı madde miktarı artmaktadır.

Derecikler arası alanda meydana gelen erozyon enine eğimin artışıyla direkt olarak derecikteki akıma ulaştığından enine eğimin etkisi değerlendirilirken derecikteki erozyon değerleri (1 no'lu çıkış ağzı) dikkate alınmıştır. Boyuna eğim ($S_y=20\%$) sabitken, farklı enine eğimlerde (S_x), 85 ve 105 mm/sa'lik yağışlar için 1 no'lu çıkış ağzından toplanan katı madde miktarı Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

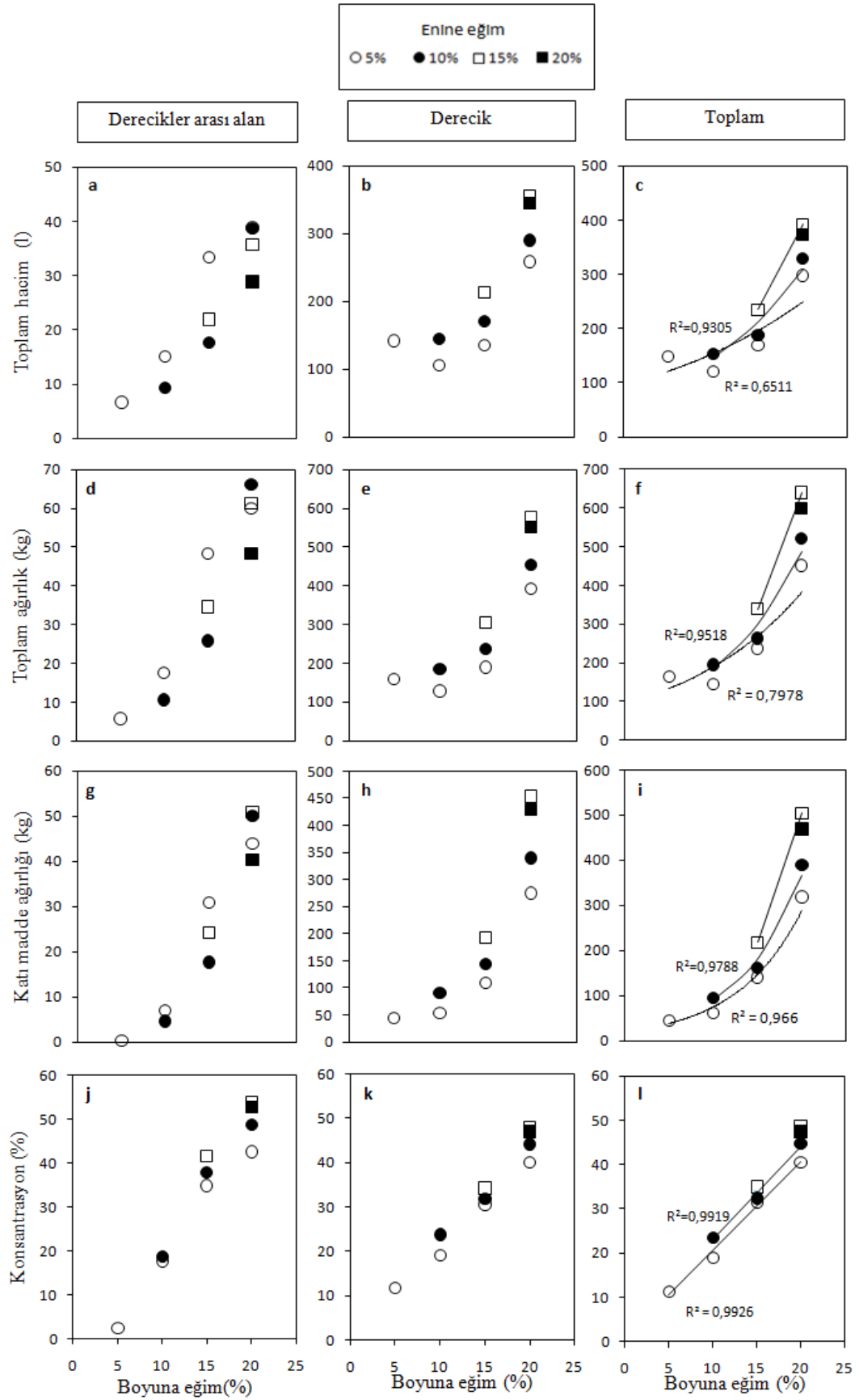


Şekil 5.4: Boyuna eğim (S_y) =%20 için enine eğimin (S_x) değişmesiyle 1 no'lu çıkış ağızından toplanan katı madde kayıpları.

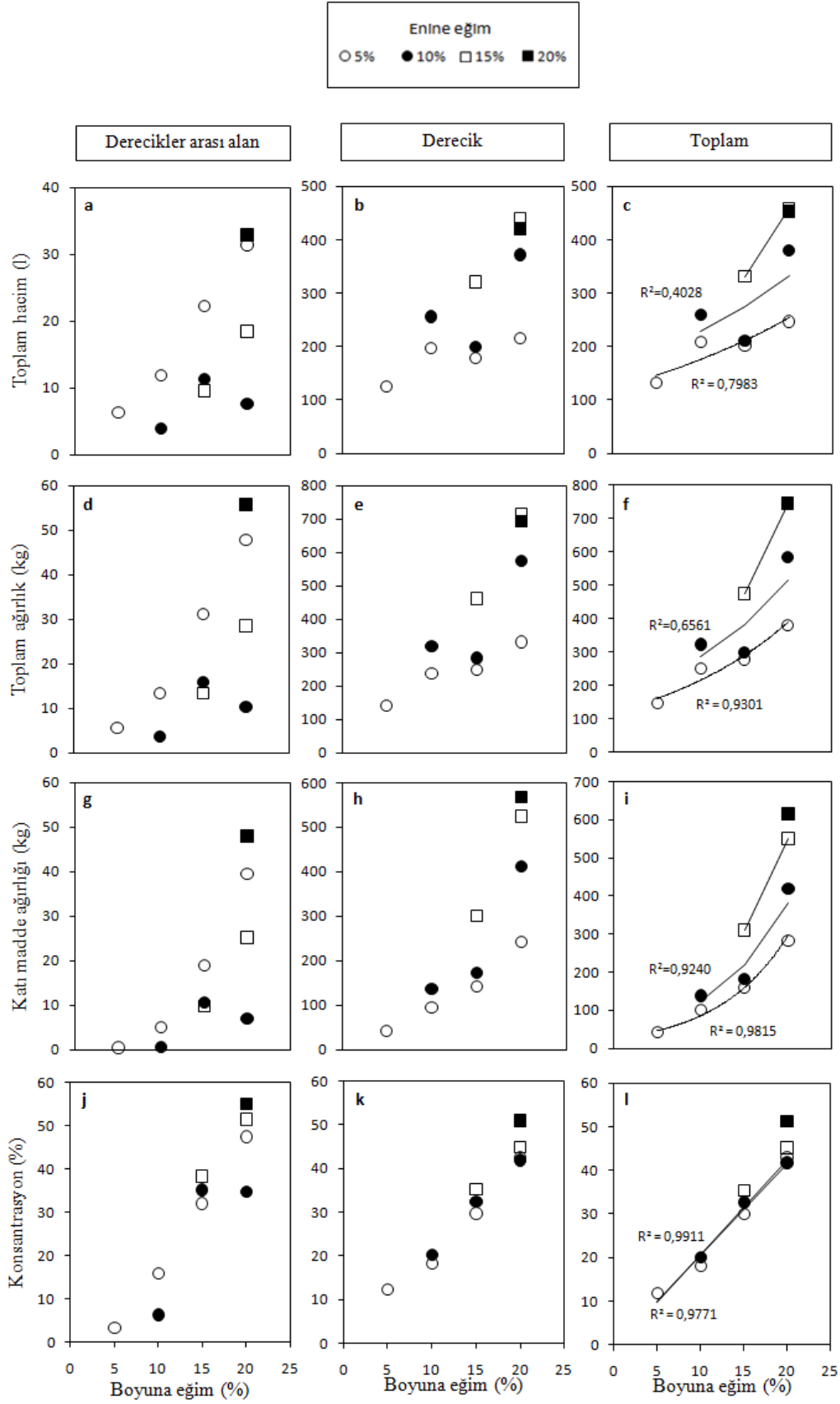
Şekil 5.4'te enine eğim ile katı madde kaybı arasında azalan hızlı polinomial bir pozitif ilişki olduğu görülmektedir. Bu ilişki derecikler arası alanlar için deneyler yapan ve eğim ile erozyon arasında polinomial bir ilişki olduğunu ifade eden Singer ve Blackard (1982)'in bulgularıyla uyum göstermektedir.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da 85 ve 105 mm/sa için toplam hacim, toplam ağırlık, toplam katı madde ağırlığı ve hacimsel katı madde konsantrasyonunun eğim ile olan değişim grafikleri verilmiştir. Şekle göre derecikte, derecikler arası alanda ve derecik-derecikler arası alanda (birlikte) toplam hacim, toplam ağırlık, toplam katı madde kaybı her iki yağış şiddeti için de hem boyuna hem de enine eğim ile genel olarak bir artış sergilemektedir. Ayrıca toplam hacimsel katı madde konsantrasyonunun enine ve boyuna eğim ile değişimi iki yağış şiddeti için de birbirine yakın ve doğrusaldır (Şekil 5.5j, k, l ve Şekil 5.6j, k, l).

Artan boyuna eğim ile erozyonun artışı ise derecikteki akım hızı ve akımın katı madde taşıma kapasitesinin artışına dayandırılmıştır (Meyer ve diğ., 1983). Çünkü hızın artması sonucu suda daha fazla çalkantı meydana gelir ve bu çalkantılar zeminin daha fazla aşınmasına neden olur.



Şekil 5.5: 85 mm/sa'lık yağış için eğime bağlı katı madde grafikleri.



Şekil 5.6: 105 mm/s'lik yağış için eğime bağlı katı madde grafikleri.

Derecik için 85 mm/sa'lik yağış sonucunda hesaplanmış hacimsel katı madde konsantrasyonu grafiği (Şekil 5.5k) incelendiğinde sabit enine eğim için ($S_x=\%5$), $S_y=\%5$ iken katı madde konsantrasyonu % 11,7; $S_y=\%10$, $S_y=\%15$, $S_y=\%20$ iken katı madde konsantrasyonu sırasıyla %19,2, %30,5 ve %40,1 olarak bulunmuştur. Pierce, F. J. (1987), boyuna eğimin erozyon miktarı üzerindeki etkisinin en çok %10 ile %25 arasındaki eğimlerde gösterdiğini belirtmiştir.

Derecik için 105 mm/sa'lik yağış sonucunda hesaplanmış hacimsel katı madde konsantrasyonu grafiği (Şekil 5.6k) incelendiğinde sabit enine eğim için $S_x=\%5$, $S_y=\%5$ iken katı madde konsantrasyonu % 12,3, $S_y=\%10$, $S_y=\%15$ ve $S_y=\%20$ iken katı madde konsantrasyonu sırasıyla %18,2, %29,7 ve %42,5 olarak bulunmuştur.

Bu çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlar birçok araştırmacının sonuçlarıyla uyum içerisindedir (Zingg, 1940; Römkens ve diğ., 2002; Nearing ve diğ., 1997; Govers, 1990b; Everaert, 1991).

Enine ve boyuna eğimin değişiminin erozyon üzerine etkisinin değerlendirilmesi sonucu elde edilen tüm bilgilerin ışığında artan eğimin erozyona uğrayan katı madde miktarını arttırdığı, boyuna eğimin erozyon üzerinde enine eğimden daha etkili olduğu görülmüştür. Çünkü boyuna eğimin artmasıyla katı madde konsantrasyonunda ani artışlar olduğu gözlenirken, enine eğim artışıyla ani artışlar gözlenmemiştir. Enine eğim, yalnızca yağış etkisiyle dereciğe doğru katı madde taşınımını artırır. Öte yandan boyuna eğim dereciği şekillendirir ve derecikteki akımın katı madde taşıma kapasitesini direkt olarak etkiler.

5.4 Katı Madde Yükü Taşınımı Denklemi Geliştirilmesi

Govers (1990b), 12 m'lik kanalında, kanalın 6 m'lik bölümünü kullanarak 436 adet deney gerçekleştirmiştir. Bu deney sonucunda çoklu regresyon analizi yaparak birim katı madde yükü, birim akış debisi ve eğim arasında bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Bu ilişki Denklem 2.2'de de verildiği üzere aşağıdaki şekilde tanımlanmış olup, birçok araştırmacı A, B, C parametrelerini geliştirme yoluna gitmiştir.

$$q_s = Aq^B S^C \quad (5.3)$$

Burada q_s birim katı madde yükü ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); q birim akış debisi ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$) ve S eğim (m m^{-1}) olarak verilmiştir. A , B ve C katsayıları kullanılan farklı boyuttaki malzemelerle ve farklı akım rejimlerinde değişmektedir.

Bu çalışmada da erozyona uğrayan toplam katı madde miktarı ile akış debisi ve bileşke eğim arasında ilişki kurabilmek için çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi yapılırken Denklem 5.4'den yararlanılmıştır:

$$\log_{10}(qs) = \log_{10}(A) + B\log_{10}(q) + C\log_{10}(S) \quad (5.4)$$

Analiz, her bir yağış şiddeti için ve toplu (85+105 mm/sa) olarak yapılmıştır. Analiz sırasında Minitab istatistik programından yararlanılmıştır.

Çizelge 5.1: Katı madde taşınım denklemi ampirik katsayıları.

	A	B	C
i=85 mm/sa	0,032	1,04	1,07
i=105 mm/sa	0,083	0,68	1,39
Toplu (85 +105 mm/sa)	0,046	0,90	1,19

Çizelge 5.1, çoklu regresyon analizi sonucunda Denklem 5.3'deki A , B ve C katsayılarının aldığı değerleri göstermektedir.

Govers (1990b), denklemi üniform olmayan toprak ve üniform kum için geliştirmiş olup, çalışmada kullandığı kumun boyutları 0,218 mm ile 0,414 mm arasında değişmiştir. Govers (1990b) ve Nearing ve diğ. (1997), yapmış oldukları çalışmalar sonucunda üniform kumda eğimin C üssünün değerinin, debinin B üssünün değerinden daha büyük olduğunu, fakat diğer zemin türleri için B üssünün değerinin C üssünün değerinden daha büyük olduğunu ortaya koymuşlardır. Prosser ve Rustomji (2000), literatürde mevcut çalışmalarda Denklem 5.3 için elde edilen ampirik katsayıları incelemiş ve araştırmaları sonucunda B üssünün değerinin 1,0 ve 1,8 arasında, C üssünün değerinin ise 0,9 ile 1,8 arasında değiştiğini saptamıştır.

Deneyler sonucunda elde edilen denklemin B ve C üsleri, Govers (1990b) ve Nearing ve diğ. (1997)'in bulgularıyla karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.1'e göre 85, 105 mm/sa yağış ve toplu halde eğimin C değeri akış debisinin B değerinden büyüktür. Deneylerde üniform kum kullanıldığı göz önünde bulundurulduğunda sonuçların Govers (1990b) ve Nearing ve diğ. (1997)'nin bulgularını desteklediği söylenebilir.

Ayrıca Denklem 5.3 için elde edilen B ve C katsayıları için B 'nin 105 mm/sa'lik yağış ve toplu (85+105 mm/sa) için Prosser ve Rustomji (2000) tarafından belirtilen sınır değerlerin biraz altında, C 'nin ise sınır değerler arasında kaldığını söylemek mümkündür.

Akış parametreleri q_s ve q_s olan modelin genel denklemi aşağıda verilmiştir.

$$q_s = 0,046q^{0.90}S^{1.19} \quad (R^2=0,99) \quad (5.5)$$

Katı madde yük kaybının sadece eğim ile ilişkisi incelemek için ise Zingg (1940) denkleminde yararlanılabilir. Zingg (1940), arazide yapmış olduğu çalışma sonucu meydana gelen erozyon ile eğim derecesi arasında $y=ax^b$ olan bir ilişki elde etmiştir. Burada a 0,065, b 1,48, x eğim derecesi, y erozyon miktarı (kg) olarak belirlenmiştir. Denklem, erozyonun eğim ile exponansiyel olarak arttığını göstermektedir.

Çizelge 5.2: Derecik-derecikler arası alanda (birlikte) meydana gelen erozyon.

				Derecik - derecikler arası alan (85 mm/sa)				Derecik + derecikler arası alan (105 mm/sa)			
S_x	S_y	S_{xy}	S_{xy}	W_{sed}^*	W_{top}^{**}	V_{top}	C_s	W_{sed}^*	W_{top}^{**}	V_{top}	C_s
(%)	(%)	(%)	($^{\circ}$)	(kg)	(kg)	(l)	(%)	(kg)	(kg)	(l)	(%)
5	5	7,1	4,06	44,5	164,8	148,9	11,3	41,7	147,7	132,2	11,9
5	10	11,2	6,39	60,7	145,7	120,5	19,0	100,1	251,4	208,8	18,1
5	15	15,8	8,98	140,6	238,0	168,9	31,4	160,2	279,1	201,5	30,0
5	20	20,6	11,6	318,9	452,1	297,8	40,4	282,3	379,8	247,1	43,1
10	10	14,1	8,03	95,8	195,6	153,8	23,5	138,0	323,0	260,2	20,0
10	15	18,0	10,2	161,5	263,7	187,9	32,4	182,6	299,5	211,0	32,6
10	20	22,4	12,6	389,9	520,7	329,1	44,7	419,6	585,2	379,6	41,7
15	15	21,2	12,0	217,4	338,7	234,9	34,9	310,1	475,0	330,8	35,4
15	20	25,0	14,0	504,3	639,7	392,2	48,5	550,0	745,0	459,3	45,2
20	20	28,3	15,8	468,9	599,8	373,5	47,4	615,5	748,5	453,5	51,2

*= $W_{sed,kuru,net}$; **= $W_{top,net}$; $W_{top,net} = W_{top,brüt} - dara$; $C_s = V_{sed,kuru}/V_{top}$; S_{xy} =bileşke eğim

Çizelge 5.2'teki 85 ve 105 mm/sa'lik yağış sonucu erozyona uğrayan katı madde miktarları ($W_{sed,kuru,net}$) kullanılarak regresyon analizi yapılmış ve bileşke eğim derecesi (S_{xy}) ile meydana gelen erozyon arasındaki ilişkinin ($y=ax^b$) a ve b katsayıları belirlenmiştir (Çizelge 5.3). 85 ve 105 mm/sa'lik (toplu) yağış için derecik- derecikler arası alanda (birlikte), bileşke eğim ile erozyon arasında aşağıdaki ilişki bulunmuştur.

$$E = 2,07S^2 \quad (R^2=0,93) \quad (5.6)$$

Burada, E toplam katı madde ağırlığı (kg); S eğim derecesi ($^{\circ}$) olarak ifade edilmektedir.

Çizelge 5.3'te Denklem 5.6'nin a katsayısının yağış şiddeti arttıkça arttığı, b katsayısının ise yağış şiddetinin değişiminden bağımsız olarak sabit kaldığı görülmektedir. Bu durum, aynı eğim altında yağış şiddetinin artması ile meydana gelecek erozyonun artacağını gösterir.

Çizelge 5.3: Bileşke eğim ile erozyon arasındaki ilişkinin ampirik katsayıları.

	a	b
$i=85$ mm/sa	1,91	2,00
$i=105$ mm/sa	2,23	2,00
Toplu (85 +105 mm/sa)	2,07	2,00

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma sonucunda:

- Artan eğim ile erozyon artmıştır. Meydana gelen toplam erozyonun eğime göre gidişatını derecikteki değişimin belirlediği görülmüştür
- Hacimsel katı madde konsantrasyonu eğim ile artmıştır. Hacimsel katı madde konsantrasyonunun enine ve boyuna eğim ile değişimi iki yağış şiddeti için de birbirine yakın ve doğrusal bulunmuştur.
- Artan yağış şiddeti ile erozyonun çok bariz olmasa da arttığı fakat hacimsel katı madde konsantrasyonunun yağış şiddetinden etkilenmediği görülmüştür.
- Erozyona uğrayan katı madde miktarının eğimin karesi ile doğru orantılı ($E = 2,07S^2$) olduğu bulunmuştur.

Yağış şiddetinin ve eğimin erozyon ve hacimsel katı madde konsantrasyonu üzerine etkisi farklı yağış koşulları, farklı eğim ve farklı dane çapına sahip katı maddeler kullanarak tekrar edilmelidir. Böylelikle farklı malzemelerin, farklı eğim ve yağış şiddeti koşulları altında davranışı belirlenebilir.

Ayrıca kanal çıkışında akış ile beraber katı maddeyi toplayan ve çöktüren bir cihaz geliştirilmelidir. Böylelikle hem ölçümler daha hassas yapılabilir, hem de zamandan tasarruf sağlanır.

KAYNAKLAR

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O’Connell, P.E., and Rasmussen, J.,** 1986a. An introduction to the European hydrological system – systeme hydrologique European, “SHE”, 1: history and philosophy of a physically based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, **87**, 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O’Connell, P.E., and Rasmussen, J.,** 1986b. An introduction to the European hydrological system – systeme hydrologique European, “SHE”, 2: structure of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, **87**, 61-77.
- Abrahams, A.D. and Parsons, A.J.,** 1990. Determining the mean depth of overland flow in field studies of flow hydraulics. *Water Resources Research*, **26**, 501–503.
- Abrahams, A.D., Li, G., Krishnan, C., and Atkinson, J.F.,** 1998. Predicting sediment transport by interrill overland flow on rough surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, 1087-1099.
- Ahmandi, S.H., Amin, S., Keshavarzi, A.R., and Mirzamostafa, N.,** 2006. Simulating watershed outlet sediment concentration using the ANSWERS model by applying two sediment transport capacity equations. *Biosystems Engineering*, **94**, 615-625.
- Aksoy, H. and Kavvas, M.L.,** 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, **65**, 247-271.
- Aksoy, H., Ünal, N. E., Çokgör, S., Gedikli, A., and Yoon, J.,** 2009. *Akarsu havzaları için yamaç ölçeğinde katı madde taşınım modeli geliştirilmesi*, TÜBİTAK 108Y250 **Rapor no: 1**, İTÜ, İstanbul, Türkiye.
- Aksoy, H., Ünal, N. E., Çokgör, S., Gedikli, A., Yoon, J., and Koca, K.,** 2010a. *Akarsu havzaları için yamaç ölçeğinde katı madde taşınım modeli geliştirilmesi*, TÜBİTAK 108Y250 **Rapor no: 2**, İTÜ, İstanbul Türkiye.
- Aksoy, H., Ünal, N. E., Çokgör, S., Gedikli, A., Yoon, J., Koca, K.,** 2010b. *Akarsu havzaları için yamaç ölçeğinde katı madde taşınım modeli geliştirilmesi*, TÜBİTAK 108Y250 **Rapor no: 3**, İTÜ, İstanbul Türkiye.
- Alberts, E. E. And Neibling, W. H.,** 1994. Influence of crop residues on water erosion, pp: 19-39, *In P. W. Unger (ed.) Managing agricultural residues*. Lewis Publ., Ann Arbor, MI, USA.

- Al-Durrah, M. N. and Bradford, J. M.**, 1982. Parameters for describing soil detachment due to single water drop impact, *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, **46**, 836-840.
- Ali, M., Sterk, G., and Peters, P.**, 2011. Influence of hydraulic parameters on sediment transport in shallow flows, *EGU General Assembly*, **13**.
- Alonso, C.V., Neibling, W.H., and Foster, G.R.**, 1981. Estimating sediment transport capacity in watershed modelling. *Transactions of the ASAE*, **24** (5), 1211 – 1220.
- Amorim, R. S. S., Silva, D. D., Pruski, F. F., and Matos, A. T.**, 2001. Influence of the soil slope and kinetic energy of simulated precipitation in the interrill erosion process, *In Soil erosion research for the 21st century Proceedings of the International Symposium*, Honolulu, Hawaii, USA, January 3-5.
- ASCE Task Committee**, 1970. Sediment sources and sediment yields. *ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, **96** (HY6), 1283-1329.
- Bagnold, R.A.**, 1966. *An approach to the sediment transport problem for general physics*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 442-I, USA.
- Bathurst, J.C., Wicks, J.M., and O`Connell, P.E.**, 1995. The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modeling system. In: Singh, V.P., (Editor), *Computer Models of Watershed Hydrology*, 563-594, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F., and Monke, E.J.**, 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, **23**, 938-944.
- Beck, M. B.**, 1987. Water Quality Modeling: A Review of Uncertainty. *Water Resources Res.*, **23**, 1393-1442.
- Bennett, H. H. and Chapline, W. R.**, 1928. *Soil erosion – a national menace*, U.S. Department of Agriculture, Circular 33.
- Bennett, J.P.**, 1974. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. *Water Resources Research*, **10**(3), 485-492.
- Berger, C., Schulze, M., Rieke-Zapp, D., and Schlunegger, F.**, 2010. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, **35**. 1456-1467.
- Beschta, R. L.** 1987, Conceptual models of sediment transport in streams. In: *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, 387-419, Thorne CR, Barhurst JC, Hey RD (eds). Wiley, Newyork, USA.
- Bewket, W. and Sterk, G.**, 2003. Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **97**, 81-93.
- Boardman, J., Parsons, A.J., Holland, R., Holmes, P. J., and Washington, R.**, 2003. Development of badlands and gullies in the Sneeuwberg, Great Karoo, South Africa. *Catena*, **50**, 165-184.
- Borah, D.K.**, 1989. Sediment discharge model for small watersheds. *Transactions of the ASAE*, **32** (3), 874-880.

- Brown, C.B.** 1950. *Sediment transportation. Engineering Hydraulics*, ed. H.Rouse, John Wiley, New York.
- Bryan, R.B.**, 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, **32**, 385-415.
- Bubenzner, G.D.**, 1979a. Rainfall characteristics important for simulation, in *Proc. Of the Rainfall Simulator Workshop*, U.S. Department of Agriculture Science and Administration Agricultural Reviews and Manuals, Tucson, Arizona, USA, March 7-9.
- Bubenzner, G.D.**, 1979b. "characteristics important for simulation, in *Proc. of the Rainfall Simulator Workshop*, U.S. Department of Agriculture Science and Administration Agricultural Reviews and Manuals, Tucson, Arizona, March 7-9.
- Burton, A. and Bathurst J.C.**, 1998. Physically based modelling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale. *Environmental Geology*, **35**, 89-99.
- Cassol, E. A.**, 1988. Sediment transport and deposition of various textures soils in shallow flow. *PhD. Dissertation*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Cochrane, T. A.**, 1995. Detachment and deposition in a simulated rill, *Msc Thesis*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Croley, T.E.**, 1982. Unsteady overland sedimentation. *Journal of Hydrology*, **56**, 325-346.
- Defersha, M. B., Quraishi, S., and Melesse, A.**, 2010. Interrill erosion, runoff and sediment size distribution as affected by slope steepness and antecedent moisture content, *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, **7**, 6447-6489.
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., and Ritsema, C.J.**, 1996. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrological Processes*, **10**, 1107-1117.
- Einstein H. A.** 1950. *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*, **Technical Bulletin No: 1026**, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D.C, USA.
- Everaert, W.**, 1991. Empirical relationships for the transporting capacity of overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, **16**, 513-532.
- Ferro, V.**, 1998. Evaluating overland flow sediment transport capacity. *Hydrol. Proc.*, **12**, 1895-1910.
- Ferro, V. and Porto, P.**, 2000. Sediment delivery distributed (SEDD) model. *ASCE, J. Hydrologic Engineering*, **5** (4), 411-422.
- Finkner, S.C., Nearing, M. A., Foster, G. R., and Gilley, J. E.**, 1989. A simplified equation for modeling sediment transport capacity. *Trans. ASAE.*, **32**, 1545-1550.

- Foster, G. R.**, 1971. The overland flow process under natural conditions. Biological Effects in the Hydrological Cycle, in Proc. of the *Third International Seminar for Hydrology Professors*, Purdue University, West Lafayette, July 18-30.
- Foster, G.R. and Meyer, L.D.**, 1972. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In: Shen, H.W., (Editors), Sedimentation symposium in honor Prof. H.A. Einstein, Fort Collins, CO, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA, June 17-19.
- Foster, G.R. and Meyer, L.D.**, 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources, Washington, DC, USDA Agricultural Service, 190-207.
- Foster, G.R.**, 1982. Modeling the erosion process. In: Haan, C.T., Johnson, H.P., Brakensiek, D.L., (Editors), *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, 297-380, ASAE Monograph no. 5, St. Joseph, MI, USA.
- Foster, G. R., Neibling, W. H., and Nattermann, R. A.**, 1982. A programmable rainfall simulator, *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, Michigan, 82-2570.
- Foster, G.R., Huggins, L.F., and Meyer, L.D.**, 1984. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships. *Transactions of the ASAE*, Vol: **27**(3), 797-804.
- Foster, G. R., Flanagan, D. C., Nearing, M. A., Lane, L. J., Risse, L. M., and Finkner, S. C.**, 1995, *Hillslope Erosion Component*. In USDA – Water Erosion Prediction Project (WEPP), Hillslope profile and watershed model documentation, USDA – Agricultural Research Service, National Soil erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, USA.
- Gerlinger, K.**, 1997. *Erosionsprozesse auf Lössböden: Experimente und Modellierung*. Mitt. Inst. F. Wasserbau und Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe 194.
- Ghadari, H.**, 2004. Crater formation in soils by raindrop impact, *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 77-89.
- Gilley, J.E., Kincaid, D.C., Elliot, W.J., and Laflen, J.M.**, 1992. Sediment delivery on rill and interrill areas, *Journal of Hydrology*, **140**, 313-341.
- Giménez, R. and Govers, G.**, 2001. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills. *Water Resources Research*, **37**, 791-799.
- Giménez, R., Planchon, O., Silvera, N., and Govers, G.**, 2004. Longitudinal velocity patterns and bed morphology interaction in a rill. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 105-114.
- Gobin, A. M., Campling, P., Deckers, J. A., Poesen, J., and Feyen, J.**, 1998. Soil Erosion assessment at the Udi-Nsukka Cuesta (Southeastern Nigeria). *Land Degradation and Development*, **10**, 141-160.
- Gomez, J.A. and Nearing, M.A.** 2005. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment. *Catena*, **59**, 253-266.

- Govers, G.**, 1990b. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. *Erosion, Transport and Deposition Processes*, **189**, pp: 45-63.
- Govers, G.** 1991, A field study on topographical and topsoil effects on runoff generation, *Catena*, **18**, 91– 111.
- Govers, G.**, 1992a. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow. *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*, Ed.A.J. Parsons and A.D Abrahams, London: UCL Press., 243-273.
- Grierson, I.T. and Oades, J.M.**, 1977. A rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion, *Agricultural Engineering Research*, **22**, 37-44.
- Gunn, R. and Kinzer, G.D.**, 1949. The terminal velocity of fall for water droplets, *Journal of Meteorology*, **6**, 243-248.
- Hairsine, P. B., Moran, C. J., and Rose, C. W.**, 1992. Recent developments regarding the influence of soil surface characteristics on overland flow and erosion. *Aust. J. Soil Res.*, **30**, 249-264.
- Helming, K., Römken, M. J. M., and Prasad, S. N.**, 1998a. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: a flume study. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, **62**, 243-250.
- Hessel, R. and Jetten, V.**, 2007. Suitability of transport equations in modeling soil erosion for a small Loess Plateau catchment. *Eng. Geol.*, **91**, 56-71.
- Huang, C. H. and Bradford, J. M.**, 1990. Depressional storage for Markov-Gaussian surfaces. *Water Resources Research*, **26**, 2235-2242.
- Huang, C.**, 1995. Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas, *Soil Science Society of America Journal*, **59**, 982-990.
- Huang, C.H., Wells, L.K., and Norton, L.D.**, 1999. Sediment transport capacity and erosion processes: Model concept and reality. *Earth Surf. Proc. Landforms.*, **24**, 503-516.
- Hudson, N.**, 1995. *Soil Conservation*. Fully revised and updated third edition. BT Bastford Ltd., London.
- Hurni, H.**, 1986. *Soil Conservation in Ethiopia*. Guidelines for Development Agents Community Forests and Soil Conservation Development Department, Ministry of Agriculture, Ethiopia.
- Hurni, H.**, 1999. *Methods and Materials in Soil Conservation*. A Manual FAO, Rom, Ethiopia.
- Johanson, R.C. and Leytham, K.M.**, 1977. Modeling sediment transport in natural channels. In: Corell, D.L., (Editor), *Watershed Research in Eastern North America: A workshop to compare results*. Chesapeake Bay center for Environmental Studies, Smithsonian Institution, Edgewater, Maryland, USA.
- Johnson, B.E., Julien, P.Y., Molnar, D.K., and Watson, C.C.**, 2000. The two-dimensional upland erosion model CASC2D-SED. *Journal of American Water Resources Association*, **36** (1), 31-42.
- Julien, P.Y. and Simons, D.B.**, 1985. Sediment transport capacity of overland flow. *Transactions of the ASAE*, **28**(3), 755-762.

- Kalman, R.**, 1976. Etude experimentale de l'érosion par griffes. *Revue de Geographie Physique et de Geologie Dynamique*, **18**, 395-405.
- Kavvas, M.L., Chen, Z.Q., Dogrul, C., Yoon, J.Y., Ohara, N., Liang, L., Aksoy, H., Anderson, M.L., Yoshitani, J., Fukami, K., and Matsuura, T.**, 2004. Watershed environmental hydrology (WEHY) model based on upscaled conservation equations: hydrologic module, *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, **9**(6), 450-464.
- Kavvas, M.L., Yoon, J.Y., Chen, Z.Q., Liang, L., Dogrul, E.C., Ohara, N., Aksoy, H., Anderson, M.L., Reuters, J., and Hackley, S.**, 2006. Watershed environmental hydrology model: Environmental module and its application to a California watershed, *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, **11**(3), 261-272.
- Keller, J. and Bliesner, R.D.**, 1990. *Sprinkle and Trickle Irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Khan, M. J.**, 1989. Sediment transport in shallow flow through a parabolic flume. *PhD. Dissertation*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Kılınc, M. and Richardson, E.V.**, 1973. *Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall*. Hydrology Papers, **63**, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, UK.
- Kozmenko, A. S.**, (1909, 1910). *Sunken dow, landslide and erosion formations in the northeastern part of the Novosilsk rayon of the Tula Province* (in Russian), Zemlevedenie III, IV, Moscow.
- Kuriakose, S. L., Van Beek, L. P. H., and Van Westen, C. J.**, 2009. Parameterizing a physically based shallow landslide model in a data poor region. *Earth Surface Processes and Landforms*, **34**, 867-881.
- Kuznetsov, M.S., Gendugov, V.M., Khalilov, M.S., and Ivanuta, A.A.**, 1998. An equation of soil detachment by flow. *Soil, Tillage Research*, **46**, 97-102.
- Lal, R.**, 1998. Drop size distribution and energy load of rain storms at Ibadan, western Nigeria. *Soil and Tillage Research*, **48**, 103-114.
- Lancaster, S.T. and Grant, G. E.**, 1999, Modeling the interaction of landslides, debris flows, and the channel network. *EOS, Trans. AGU*, **80**, 127.
- Lane, L. J., Shirley, E. D., and Singh, V. P.**, 1988. Modelling erosion on hillslopes. In: *Modelling Geomorphological Systems*, 287-308, Anderson MG (ed.): Wiley: Chichester, UK.
- Lau, Y.L. and Engel, P.**, 1999. Inception of sediment transport on steep slopes. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, **125** (5), 544-547.
- Laursen, E. M.**, 1958. The total sediment load of streams, *J. Hydr. Div. ASCE*, **84**, 1530-1536.
- Laws, J.O.**, 1941. Measurements of fall velocity of water drops and raindrops, *Transactions of American Geophysics Union*, **22**, 709-721.
- Laws, J.O. and Parsons, D.A.**, 1943. The relationship of raindrop size to intensity, *Transactions of American Geophysics Union*, **24**, 452-459.

- Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., and Gasse, F.,** 2003. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: a case study South Central Ethiopia. *Journal of Hydrology*, **275**, 67-85.
- Li, G. and Abrahams, A. D.,** 1999. Controls of sediment transport capacity in laminar interrill flow on stone-covered surfaces. *Water Resources Res.*, **35**, 305-310.
- Littleboy, M, Silburn, M. D., Freebairn, D. M., Woodruff, D. R., Hammer, G. L., and Leslie, J. K.,** 1992b. Impact of soil erosion on production in cropping systems. I. Development and validation of a simulation model. *Australian Journal of Soil Research*, **30**, 757-774.
- Loch, R. J. and Donnollan, T. E.,** 1983. Field Rainfall simulator studies on two clay soils of the Darling Downs. Queensland, I. The effects of plot length and tillage orientation on erosion processes and runoff and erosion rates. *Aust. J. Soil. Res.*, **21**, 33-46.
- Lopes, V.L.,** 1987. A numerical model of watershed erosion and sediment yield. *Ph.D. thesis*, The University of Arizona.
- Lopes, V.L. and Lane, L.J.,** 1988. Modeling sedimentation processes in small watersheds. *IAHS Publications*, **174**, 497-508.
- López-Bermúdez, F. and Albaladejo, J.,** 1990. Environmental factors land degradation in the Mediterranean area. In: Albaladejo J, Stocking MA, Díaz E (eds), Degradation and regeneration soil under Mediterranean environmental conditions, 15-46.
- Low, H. S.,** 1989. Effect of sediment density on bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, **115**, 124-138.
- Marques, M. J., Bienes, R., Pérez-Rodríguez, R., and Jiménez, L.,** 2007. Soil degradation in Central Spain due to sheet water erosion by low-intensity rainfall events, *Earth Surface Processes and Landforms*, **33**, 414-423.
- Merritt, W.S., Latcher, R.A., and Jakeman, A.J.,** 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, **18**, 761-799.
- Meyer-Peter, E. and Muller, R.,** 1948. Formulas for bed-load transport. *Rept 2nd Meeting Int. Assoc. Hydraul. Struct. Res.*, Stockholm, Sweden, June 6-7.
- Meyer, L.D.,** 1958. *An investigation of methods for simulating rainfall on standard runoff plots and a study of the drop size, velocity and kinetic energy of selected spray nozzles*, **USDA Special Report 81**, Lafayette, Indiana, USA.
- Meyer, L.D. and McCune, D.L.,** 1959. Rainfall simulator for runoff plots, *Agricultural Engineering*, **10**, 644-648.
- Meyer, L. D., Foster, G. R., and Römken, M. J.,** 1975. *Source of soil eroded from upland slopes*. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, USDA ARS, **ARS-40**, Washington D. C.

- Meyer, L.D. and Harmon, W.C.**, 1979. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **22**, 100-103.
- Meyer, L. D., Zuhdi, B. A., Coleman, N. L., and Prasad S. N.**, 1983. Transport of sandsized sediment along crop-row furrows. *Transactions of the ASAE*, **26**(1), 106-111.
- Misra, R. K. and Rose, C. W.**, 1996. Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST. *European Journal of Soil Science*, **47**, 593-604.
- Moldenhauer, W. C. and Long, D. C.**, 1964. Influence of rainfall energy on soil loss and infiltration rates: I. Effect over a range of texture. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.* **28**, 813-817.
- Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E.**, 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, **30** (4), 1153-1171.
- Morgan, R. P. C.**, 1986. *Soil Erosion and Conservation*. Longman Group, Oxford, United Kingdom.
- Morgan, R. P. C.**, 1995. *Soil Erosion and Conservation*. Longman Group, Oxford, United Kingdom.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., and Styczen, M.E.**, 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, 527-544.
- Morgan, R. P.C.**, 2005. *Soil erosion and conservation*, Blackwell Publishing, Malden, MA, USA.
- Morin, J., Goldberg, D., and Seginer, I.**, 1967. A rainfall simulator with rotating disk, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **10**, 74-79.
- Mozaed H, Bavi A, Boroomand-Nasab S, Naseri A, and Albaji M**, 2010. Effects of climatic and hydraulic parameters on water uniformity coefficient in solid set systems, *Journal of Applied Sciences*, **10** (16), 1792-1796.
- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J., and Finkner, S.C.**, 1989. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. *Transactions of the ASAE*, **32** (5), 1587-1593.
- Nearing, M. A., Lane, L. J., and Lopes, V.L.**, 1994. Modeling Soil Erosion. *Lal, R. (Ed.) Soil Erosion Research Methods.*, 127-156.
- Nearing, M. A., Norton, L. D., Bulgakov, D. A., Larionov, G. A., West, L. T., and Dontsova, K. M.**, 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills, *Water Resources Research*, **33**, 865-876.

- Nearing, M. A., Jetten, V., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M., Le Bissonnais, Y., Nichols, M. H., Nunes, J.P., Renschler, C. S., Souchere, V., and Van Oost, K.,** 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover, *Catena*, **61**, 131-154.
- Neibling, W.H., Foster, G.R., Natternam, R.A., Nowhin, J.O., and Holbert, P.V.,** 1981. Laboratory and field testing of a programmable plot-sized rainfall simulator, *In: Erosion and Sediment Transport Measurement, Proceedings to the Florence Symposium*, IAHS, Italy, June 22-26.
- Norton, D. L.,** 1998. Kişisel görüşme.
- Nunes, J. P., Vieira, G. N., Seixas, J., Gonçalves, P., and Carvalhais, N.,** 2005. Evaluating the MEFIDIS Model for runoff and soil erosion prediction during rainfall events, *Catena*, **61**, 210-228.
- Nyssen, J., Vandenreyken, H., Poesen, J., Moeyersons, J., Deckers, J., Haile, M., Salles, C., and Govers, G.,** 2005. Rainfall erosivity and variability in the Northern Ethiopian Highlands. *Journal of Hydrology*, **331**, 172-187.
- Onstad, C. A.,** 1984. Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the ASAE*, **27**, 729-732.
- Park, S.W., Mitchell, J.K., and Scarborough, J.N.,** 1982. Soil erosion simulation on small watersheds: A modified ANSWERS model. *Transactions of the ASAE*, 1581-1588.
- Parsons, A. J.,** 1987. The role of slope and sediment characteristics in the initiation and development of rills. *In Processus Mesure de l'Erosion*, Paris, France, 211-220, August 28-29.
- Parsons, A. J. and Gadian, A. M.,** 2000. Uncertainty in modeling the detachment of soil by rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, **25**, 723-728.
- Pierce, F. J.,** 1987. Complexity of the Landscape. In F. Runge and W. E. Larson (eds.) *Making Soil and Water Conservation Work: Scientific, State and Federal Policy Perspectives*. Soil and Water Conserv. Soc. of Amer.
- Poesen, J., and Ingelmo-Sanchez, F.,** 1992. Runoff and sediment yield from top soils with different porosity as affected by rock fragment cover and position. *Catena*, **19**, 451 – 474.
- Proffitt, A.P.B., Rose, C.W., and Hairsine, P.B.,** 1991. Rainfall detachment and deposition: Experiments with low slopes and significant water depths. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55**, 325-332.
- Prosser, I.P. and Rustomji, P.,** 2000. Sediment transport capacity relations for overland flow. *Progress in Physical Geography*, **24** (2), 179-193.
- Prosser, I. P., Young, B., Rustomji, P., Hughes, A., and Moran, C.,** 2001c. A model of river sediment budgets as an element of river health assessment. *In Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2001)*, Canberra, Australia, December 10-13.

- Prudhomme, C.**, 1999. Mapping a statistic extreme rainfall in a mountain region. *Phys.Chem. Earth*, **24**, 79-84.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., and Porter, J. P.**, 1991. RUSLE-Revised Universal Soil Loss Equation, *Journal of Soil and Water Conservation*, **46** (1), 30-33.
- Römken, M. J. M., Helming, K., and Prasad, S. N.**, 2002. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena*, **46**, 103-123.
- Savat, J. and De Ploey, J.**, 1982. Sheetwash and rill development by surface flow, *In Badland Geomorphology and Piping*, R.B. Bryan and A. Yair, Norwich: Geo Books, 126-133.
- Schmidt, J., Werner, M. V., Michael, A., and Schmidt, W.** 1997. *EROSION 2D/3D*. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser: Hrsg: Sachsische und Sachsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg/Sachsen.
- Schramm, M.**, 1994. *Ein Erosionsmodell mit zeitlich und raumlich veränderlicher Rillengeometrie*. Mitt. Inst. F. Wasserbau und Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe **190**.
- Schumm, S. A., Harvey, M. D., and Watson, C. C.**, 1984. *Incised Channels: Morphology, Dynamics and Control*, Water Resources Publications: Littleton, CO, USA.
- Shao, X. and Wang, H.**, 2004. Critical conditions for rill flow erosion on hillslopes. In Liang, Phoon & Babovic (eds), *6th International Conference on Hydroinformatics*, Singapore, June 21-24.
- Shields, A.**, 1936. *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf de Geschiebebewegung*, Mitt. Der Preussischen Versuchsanstalt for Wasserbau und Schiffbau, **HELF 26**, Berlin (in german).
- Singer, M. J. and Blackard, J.**, 1982. Slope angle-interrill soil loss relationships for slopes up to 5%. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **46**, 1270-1273.
- Singh, V.P. and Prasad, S.N.**, 1982. Explicit solution to kinematic equations for erosion on an infiltrating plane. In: Singh, V.P., (Editor), *Modeling Components of Hydrologic Cycle*, Water Resources Research, Littleton, Colorado, 515-538.
- Singh, V.P.**, 1995. Watershed modelling. In: Singh, V.P., (Editor), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publ., Highlands Ranch, Colorado, 1-22.
- Singh, V. P.**, 1997. *Kinematic wave modeling in water resources*, Environmental Hydrology, Wiley and Sons, Newyork.
- Singh, V.P. and Woolhiser, D.A.**, 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, **7**(4), 270-292.
- Sivapalan, M. Ruprecht, J. K., and Viney, N. R.**, 1996a. Water and salt balance modeling to predict the effects of land use changes in forested catchments: 1. Small catchment water balance model. *Hydrological Processes*, **10**, 393-411.

- Sivapalan, M. Ruprecht, J. K., and Viney, N. R.,** 1996b. Water and salt balance modeling to predict the effects of land use changes in forested catchments: 2. Coupled model of water and salt balances. *Hydrological Processes*, **10**, 413-428.
- Sivapalan, M. Ruprecht, J. K., and Viney, N. R.,** 1996c. Water and salt balance modeling to predict the effects of land use changes in forested catchments: 3. The Large catchment model. *Hydrological Processes*, **10**, 429-446.
- Smart, G. M.,** 1984. Sediment transport formula for steep channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, **110**, 267-277.
- Smith, R.E.,** 1981. A kinematic model for surface mine sediment yield. *Transactions of the ASAE*, **24** (6), 1508-1514.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., and Quinton, J.N.,** 1995a. Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: The KINEROS2 and EUROSEM models. *J. Soil and Water Cons.*, **50** (5), 517-520.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., and Unkrich, C.L.,** 1995b. KINEROS-A kinematic runoff and erosion model. In: Singh, V.P., (Editor), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 697 – 732.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., and Unkrich, C.L.,** 1999. Simulation of selected events on the Catsop catchment by KINEROS2, a report for the GCTE conference on catchment scale erosion models. *Catena*, **37**, 457-475.
- Storm, B., Jorgensen, G.H., and Styczen, M.,** 1987. Simulation of water flow and soil erosion processes with a distributed physically-based modeling system. *IAHS Publications*, **167**, 595-608.
- Swanson, N.P.,** 1965. Rotating boom rainfall simulator. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **8**, 71-72.
- Tarjuelo, J.M., Montero, J., Honrubia, F.T., Ortiz, J.J., and Ortega J.F.,** 1999. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in semi-arid area. *Agric. Water Manage.*, **40**, 315-331.
- Thomas, N.P. and Swaify, S.A.,** 1989. Construction and calibration of a rainfall simulator, *Journal of Agricultural Engineering Research*, **43**, 1-9.
- Toy, T.J., Foster, G.R., and Renard, K.G.,** 2002. *Soil Erosion: Process, Prediction, Measurement and Control*, John Wiley & Sons. Inc, Newyork.
- TS-1500,** 2000. İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Url-1** <<http://www.plantandsoil.unl.edu>>, alındığı tarih 08.04.2011.
- Url-2** <<http://www.fao.org/docrep/t0848e/t0848e-11.htm>>, alındığı tarih 05.08.2010.
- Url-3** <<http://www.stormwater.ucf.edu>>, alındığı tarih 05.08.2010.
- USDA,** 1980. *CREAMS: A field scale model for chemical, runoff and erosion from agricultural management systems*, W. G. Knisel, ed., Conservation Research Rep. No. 26, Washington, D. C., USA.

- Watson, F., Rahman, J., and Seaton, S.,** 2001. Deploying environmental software using the Tarsier Modelling framework. *In: Proceedings of the Third Australian Stream Management Conference*, Brisbane, Australia, August 27-29.
- Veihe, A., Quinton, J., and Poesem, J.,** 2000. Sensitivity analysis of EUROSEM using Monte Carlo simulation II: the effect of rills and rock fragments. *Hydrological Processes*, **14**, 915-926.
- Venkatachalam, P.,** 1999. Geographic information system - an introduction, *In: Digital Image Processing and Geographic Information Systems*, QIP Short Term Course, 16-27.
- Wicks, J.M.,** 1988. Physically-based mathematical modelling of catchment sediment yield, *PhD Dissertation*, Department of Civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne, UK.
- Williams, J. R.,** 1975. *Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor*. Present and Prospective Technology for Prediction Sediment Yields and Sources, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, USA.
- Williams, J. R., Jones, C. A., and Dyke, P. T.,** 1984. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE*, **27**, 129 -144.
- Wilson, T.P. and Zoldoske, D.F.,** 1997. Evaluating Sprinkler Irrigation Uniformity, <http://www.waterright.org/site2/reference/evalsprink.asp>, alındığı tarih, 09.03.2011.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D.,** 1978. *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*, **Agriculture Handbook No: 537**, U.S. Department of Agriculture, USA.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., and Goodrich, D.C.,** 1990. *KINEROS, a kinematic runoff and erosion model, Documentation and user manual*, USDA, Agricultural Research Service, USA.
- Yair, A. and Raz-Yassif, N.,** 2004. Hydrological processes in a small arid catchment: Scale effects of rainfall and slope length, *Geomorphology*, **61**, 155-169.
- Yalin, M.S.,** 1963. An expression for bed-load transportation. *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, **89** (HY3), 221-250.
- Yang, C. T.,** 1973. Incipient Motion and Sediment Transport. *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, **99**, 919-934.
- Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., and Anderson, W.P.,** 1989. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, March-April, 168-173.
- Zhang, L., O'Neill, A.L., and Lacey, S.,** 1996a. Modelling approaches to the prediction of soil erosion in catchments. *Environmental Software*, **11**(1-3), 123-133.

Zingg, A. W., 1940, Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff.
In Morgan R.P.C. (1986) *Soil Erosion and conservation*. Longman
Scientific & Technical, Harlow, England.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Kaan Koca

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1987

Adres: Kartaltepe Mah. Çağlayan Sok. No:12/10 Bakırköy/İstanbul.

Lisans Üniversitesi: Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

Yayın Listesi

- Aksoy, H., Ünal, N. E., Çokgör, S., Gedikli, A., Yoon, J., **Koca, K.**, İnci, B., Eriş, E., Pak, G., 2011. Experimental analysis of sediment transported from a bare soil with rill, *Relations man/environment and sediment transport: a spatial approach*, Book of Abstracts, Algiers, Algeria, June 07-08.
- **Koca, K.**, Dündar, S., Çokgör, S., Ozen, B., Durmuş, Ö., 2011. Modeling of turbulence fields in front of the rubble mound breakwater, *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Coastal Research*, Aachen, Germany, June 06-09.
- Çokgör, S., Dündar, S., **Koca, K.**, Ozen, B., 2011. Laboratory experiments for turbulence characteristics near the rubble mound breakwater. *Journal of Coastal Research*, **SI 64**, 488-491.
- **Koca, K.**, Aksoy, H., 2010. Rainfall Simulation: a brief review. *The 4th International Student Conference on Advanced Science and Technology*, Izmir, Turkey, May 25-26.
- **Koca, K.**, Aksoy, H., Durmuş, Ö., Ünal, N. E., Çokgör, S., Gedikli, A., Yoon, J., 2010. Akarsu havzalarında erozyon ve katı madde hareketi için yağış simülatörü geliştirilmesi, 6. *Ulusal Hidroloji Kongresi*, Denizli, Türkiye, 22-24 Eylül.
- Aksoy, H., Ünal, E., Çokgör, S., Gedikli, A., Yoon, J., **Koca, K.**, 2010-2011. *Akarsu havzaları için yamaç ölçeğinde katı madde taşınım modeli geliştirilmesi*, TÜBİTAK 108Y250 Rapor no: 2, 3, 4, İTÜ, İstanbul, Türkiye.