

Yeraltı suyu akımı etkisinde 45 derecelik şevde oluşan kumlu tın toprak erozyonunun deneysel incelenmesi

Experimental investigation of sandy loam soil erosion on a 45-degree slope under the effect of groundwater flow

Onur AKAY^{1*} 

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Okan Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
onur.akay@okan.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.08.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 30.11.2017
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.29863
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yeraltı suyu akımları doğal şevlerde toprak kaymasına; toprak dolgu şevlerde ve barajlarda da sığ ve derin kayma yüzeyli göçmelere yol açan erozyonun başlıca etkeni olabilmektedir. Bu çalışmada, yeraltı suyu akımı kaynaklı erozyon mekanizmaları kumlu tın toprak kullanılarak inşa edilmiş üç-boyutlu fiziksel şev modeli ile incelenmiştir. Bu amaçla, laboratuvarında 100 cm uzunluğunda, 50 cm genişliğinde ve 60 cm yüksekliğinde bir erozyon kanalı inşa edilmiştir. Homojen bir kumlu tın fiziksel modeli elde edebilmek için 45 derecelik yüzey açısında sahip olan şev 2.5 cm yüksekliğinde basamaklar halinde kontrollü olarak sıkıştırılmıştır. Yeraltı suyu erozyon kanalının bir tarafında bulunan su haznesinde uygulanan 50 cm-su piyezometrik yük altında oluşturulmuştur. Su haznesinden (mamba) akışa geçen yeraltı suyu erozyon kanalının diğer tarafındaki şev yüzeyinden (mansap) sızma suyu olarak çıkış yapmıştır. Toprak partikülleri doymun durumdaki şev yüzeyinden çıkış yapan sızma suyu tarafından sürüklenmiştir. Sızma suyu erozyonunun oluşturduğu oyuk deney süresince mamba kesimine doğru toprak kaymaları ile ilerlemiş ve yüksekliği deney sonunda şev kretine kadar ulaşmıştır. Şev erozyonunun kararlı akım durumundaki boşluk-suyu basınçlarına bir etkisi olmamıştır.

Anahtar kelimeler: Yeraltı suyu akımı, Sızma erozyonu, Erozyon kanalı, Sediment taşınımı

Abstract

Groundwater flow is considered as a major contributor for erosion that may result in landslides of natural hill slopes and shallow and deep-seated failures of engineered embankments. In this study, erosion mechanisms of a sandy loam slope due to groundwater flow were investigated using a three-dimensional physical model. For this purpose, an erosion flume with dimensions of 100 cm long, 50 cm wide and 60 cm high was constructed in the laboratory. The physical slope model with a 45 degree slope angle was compacted in 2.5 cm lifts to obtain a homogenous sandy loam slope. The groundwater flow was generated under a piezometric head of 50 cm-water that was applied at the water reservoir located at one end of the erosion flume. The groundwater flow directed from the water reservoir (upstream) seeped out of the slope surface at the other end of the flume (downstream). Soil particles became entrained in the seepage flow that exfiltrated the slope surface at the saturated zone. The extent of the cavity due to seepage erosion progressed upstream via sapping during the experiment and the height of the cavity reached the crest of the slope at the end of the experiment. Seepage erosion did not affect the steady-state pore-water pressures.

Keywords: Groundwater flow, Seepage erosion, Erosion flume, Sediment transport

1 Giriş

Türkiye’de zirai alanların %59’u, orman alanlarının %54’ü, mera alanlarının da %64’ünde aktif erozyon bulunmaktadır [1]. Havza ölçeğinde ele alınan erozyon ve sediment taşınımı modellerinde genellikle rüzgâr, yağmur ve yüzeysel akış olayları temel hidrolojik etken olarak ele alınmaktadır [2]. Ancak, havzalarda meydana gelen erozyon sadece sıralanan bu hidrolojik etkenlere bağlı olmamakta; zemin danelerinin ana kayadan çözülerek ve ayrışarak yer değiştirmesiyle tanımlanabilen erozyon olayına aynı zamanda yeraltı suları da neden olabilmektedir. Dik topoğrafik yamaçlar, sığ yeraltı su seviyesinin devamlılığını sağlayan yıllık yağışlar ve kohezyonu düşük zemin karakteristikleri bir havzada yeraltı suyunun yüzeysel oluklara ve toprak kaymalarına sebebiyet vermesini sağlayabilir [3]. Yüzeysel su akışının sebep olduğu erozyonun yeraltı suyunun artezyen şekilde çıkış yaptığı bölgelerde arttığı da belirtilmiştir [4].

Havza yamaçlarında meydana gelen sediment taşınımı/erozyonu ile ilgili olan jeomorfolojik ve hidrolojik mekanizmalar genellikle suyun toprak yüzeyindeki akışını, zemin içerisine sızmasını, perkolasyon ile derine inmesini ve yeraltı suyu akışını kapsamaktadır [5]. Laboratuvarında çeşitli

boyutlarda erozyon kanalları üzerinde belirli sınır koşulları altında yapılan fiziksel deneyler havzalarda bahsi geçen hidrolojik mekanizmalarla meydana gelen erozyonun matematiksel modeller ile yapılan tahminlerinin iyileştirilmesinde kullanılmışlardır. Hidrolojik mekanizmalardan yüzeysel akışın yarattığı erozyon literatürde erozyon kanallarının yaygın olarak kullanıldığı bir araştırma konusudur. Örneğin, Regmi ve diğ. [6] 500 cm boyunda, 30 cm genişliğinde ve 50 cm yüksekliğindeki erozyon kanalı içerisindeki silis kumdan imal edilmiş bir yapay yamacın yağmur simülâtörü altındaki duraylılık kayıplarını incelemiş ve yamacın mansap bölgesinin doygunluğu arttıkça zemindeki sıvılaşmayı ve takip eden kaymaları gözlemlemiştir. Aksoy ve diğ. [7]-[8] ise 650 cm boyunda, 136 cm genişliğinde ve 17 cm yüksekliğindeki erozyon kanalı içerisine orta ve ince kum toprak yerleştirmiş, uygulanan yağmurlama olayı neticesinde mansap kesitinde yüzeysel ve sızma suları ile sediment miktarlarını ölçerek sediment taşınımının yağmur şiddeti ve yüzey eğimi ile doğrusal ilişkisini belirlemiştir. Ayrıca, Römkens ve diğ. [9] 370 cm boyunda, 61 cm genişliğinde ve 23 cm yüksekliğindeki erozyon kanalının mamba kısmında kanal boyunca yüzeysel akışı sağlayan bir su tankı ve aynı zamanda yağmur etkisini inceleyebilmek için de üst kısmında bir yağmur simülâtörü konumlandırmıştır. Deneyler siltli tın

(%2 kum, %80 silt, %18 kil) bünye sınıfındaki toprak üzerine yağın yağmurlama şiddetinin artmasıyla mansap kısmında toplanan yüzeysel akımın sediment konsantrasyonunun arttığını göstermiştir. İlginç olan yeraltı suyu seviyesinin düşürülmesiyle (deneylerde bu durum kanal tabanına negatif (emme) basıncı verilerek sağlanmıştır) sediment konsantrasyonunun hızla düştüğünün de tespit edilmesidir. Bunu takip eden çalışmalarda, 10 m uzunluğundaki erozyon kanalında yağmurlama sistemi ile tetiklenen yüzeysel erozyon hızının doygun olmayan yeraltı boşluk-suyu basıncının doymaya başlamasıyla (yeraltı suyu seviyesinin yükselmesiyle) arttığı da ayrıca tespit edilmiştir [10],[11].

Son zamanlardaki araştırmalarda, yeraltı suyunun havzalardaki akarsu kıyıları (sevleri) ve doğal yamaçların güvenliği (duraylılığı) üzerine yol açabileceği olumsuz etkiler vurgulanmaya başlamıştır [12]-[14]. Wilson ve diğ. [15] deneysel havzalarda yaptıkları radyoaktif izleyici testlerinden akarsulardaki sediment taşınımının %80'e varabilen kısmının şevlerdeki erozyonla geldiğini tespit etmişlerdir. Yeraltı sularının havzalarda yol açtığı erozyonun genellikle akarsu şevlerinde yoğunlaşmasının nedeni ise taşkın hidrografının yükselme (kabarma) zamanında kanaldan doygun olmayan şev toprağının içine doğru infiltrasyon yoluyla girmiş olan suyun, taşkın hidrografının çekilme (alçalma) zamanında geriye dönerek (ters akım) kanal içerisine sızma suyu olarak giriş yapmasıdır [16]. Şev yüzeyinden (genellikle de topuk bölgesinden) akarsuya giriş yapan sızma suları beraberinde sırasıyla zemin daneleri sıvılaşmasını, şev erozyonunu ve alttan oyulma ile birlikte geleneksel dairesel kayma göçmesini veya konsol tipi göçmeleri (topuk bölgesinin oyulmasıyla üst bölgenin desteksiz kalması ve zeminin blok şeklinde göçmesi) tetikleyebilmektedir [13],[14]. Hidrografının çekilme (alçalma) döneminde kanal tabanı erozyonunun giderek azalmasına karşın sızma suları sebebiyle akarsu şevlerindeki erozyonun arttığı saha çalışmalarında gösterilmiştir [14],[17]. Akarsu kanalı akışı ile yeraltı suyu akışı arasındaki ilişkinin şev duraylılığına olan etkisinin incelendiği laboratuvar testlerinde ise kanaldaki su seviyesi alçalmasının şev içerisinde ters yeraltı suyu akımı yarattığı ve bu nedenle şev göçmelerinin tetiklendiği gösterilmiştir [18].

Yeraltı suyunun neden olduğu şev erozyonunu yüzeysel suların veya akarsu kanalı içindeki su akımının neden olduğu erozyondan ayırt etmek için Fox ve Wilson [19] tarafından sızma erozyonu terimi kullanılmıştır. Yüzeysel suların yarattığı sediment taşınımı araştırmaları için geliştirilen laboratuvar erozyon kanalları sızma erozyonu araştırmalarında da kullanılmıştır. Örneğin, Lourenço ve diğ. [20] erozyon kanalı içerisinde standart silis kumundan imal ettikleri 100 cm boyunda, 30 cm genişliğinde ve 45 cm yüksekliğindeki şevleri (mümkün olan en düşük birim hacim ağırlığı kullanarak) hem aşağı yönlü infiltrasyon (yağmurlama ile) hem de yukarı yönlü infiltrasyon (artezyen koşulu) altında test etmiş, her iki durumda da oluşan boşluk suyu basınçlarının ve sızma erozyonunun gözlemlenen şev göçmelerinin nedeni olduğunu belirtmişlerdir. Standard silis kumu yerine Fox ve diğ. [21] 100 cm boyunda, 15 cm genişliğinde ve 100 cm yüksekliğindeki erozyon kanalı içerisine tınlı kum bünye sınıfında toprak (%87 kum, %6 silt, %7 kil) yerleştirmiş, 60 ve 90° yüzey açısına sahip şevlerde yeraltı suyunun etkisini incelemişlerdir. Deneylerde üç aşamalı erozyon mekanizması tespit edilmiştir:

- i. Sızma erozyonu,
- ii. Şev yüzeyinde veya kretinde çekme çatlağı oluşumu,

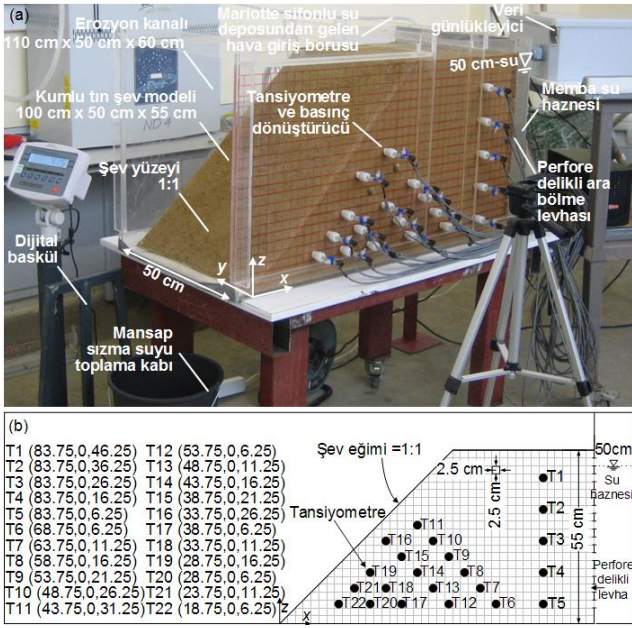
- iii. Şev göçmesi.

Chu-Agor ve diğ. [22] ise kohezyonlu ve kohezyonsuz 90°lik dik şevleri (20 cm boyunda, 50 cm genişliğinde ve 25 cm yüksekliğinde) 50 cm boyunda, 50 cm genişliğinde ve 50 cm yüksekliğindeki erozyon kanalında inşa ederek yeraltı suyu sızma deneyleri yapmışlar, Chu-Agor ve diğ. [23] de sızma erozyonu debisi (kg/s) olarak ifade edilen sediment taşınımı ile yeraltı suyu hidrolik eğimi arasında lineer olmayan bir ilişki elde etmişlerdir. Kohezyonsuz kumdan inşa edilen şev yüzeyine paralel kanal akımının yaratıldığı laboratuvar düzeneği kullanılarak sediment taşınımının başladığı kritik kayma gerilmesinin şevden kanal içerisine doğru olan sızma suyu hareketiyle düştüğü de gözlenmiştir [24].

Su kalitesi açısından önemli bir sorun teşkil ettiği bilinmesine rağmen, gerek doğal toprak malzemesi ile yapılmış laboratuvar deneylerinin eksikliği gerekse arazi mekanizmalarının yeteri kadar aydınlatılmamış olması, sediment taşınımı miktarı hesaplarında sızma erozyonunun göz önünde tutulmasını engellemiştir. Ayrıca, sızma sularının şevlerde yarattığı duraylılık kayıplarının birbiriyle bağlantılı üç farklı mekanizmanın (zeminin kayma direncinin boşluk-suyu basıncındaki artışla azalması, sızma suyu kuvveti, sediment taşınımı veya sızma erozyonu) bileşkesinden kaynaklanması karmaşık bir problemin varlığını belirtmektedir [22]. Bu çalışmada, daha önce kohezyonsuz kumlu şev modelleri için Akay ve diğ. [16],[25]-[29], Akay [30], Özer ve diğ. [31]-[32], Özer [33] tarafından kullanılmış iki-boyutlu erozyon kanalı üç-boyutlu hale getirilerek literatürde kullanılmamış kohezyonlu doğal topraktan oluşan bir şevin sızma suları altındaki davranışı boşluk-suyu basınç ölçümleri ışığı altında incelenmiştir.

2 Yöntem

Fiziksel şev modeli 110 cm boyunda, 50 cm genişliğinde ve 60 cm yüksekliğindeki erozyon kanalında inşa edilmiştir (Şekil 1a). Polimetil metakrilat (PMMA-Pleksiglas) malzemeden imal edilmiş erozyon kanalının memba tarafında deney süresince zamanla değişmeyen 50 cm-su piyezometrik yükü sağlayan bir su haznesi mevcut iken mansap tarafında şevden çıkış yapan sızma sularını toplayan bir kap bulunmaktadır. Şev malzemesi olarak Hasdal, İstanbul bölgesindeki doğal yamaçtan örselenmiş olarak alınmış toprak kullanılmıştır. Araziden laboratuvar ortamına alınan bu toprağın bitki kökü vb. yabancı maddelerden arındırıldıktan sonra ağırlıkça su muhtevası %17.2 (doygunluk derecesi: 0.46, hacimsel su muhtevası: 0.228) olarak ölçülmüştür. Toprak malzemesinin fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Bünye sınıflandırması kumlu tın olan toprak (toplam ağırlığı 309.6 kg) erozyon kanalı içerisine kuru birim hacim ağırlığı 13 kN/m³ olacak şekilde 2.5 cm yüksekliğinde tabakalar halinde (toplam 22 tabaka) sıkıştırılmıştır. Bu sayede, 100 cm boyunda, 50 cm genişliğinde ve 55 cm yüksekliğinde şev modeli inşa edilmiştir (Şekil 1a). Erozyon kanalının mansap tarafında şev yüzeyinin açısı 45° iken memba tarafında 90°dir. Su haznesinden şev içerisine yeraltı suyunun girmesi için ara bölme levhası 8 mm çaplı perfore delikli olarak tasarlanmıştır (Şekil 1b). Perfore deliklerin şevin sıkıştırma işlemi sırasında toprak partikülleri tarafından tıkanmasını önlemek amacıyla gözenek açıklığı 0.063 mm olan 50 cm genişliğinde ve 55 cm yüksekliğinde paslanmaz çelik filtre teli ara bölme levhasının mansap tarafına yerleştirilmiştir.



Şekil 1: Laboratuvar fiziksel modelinin deney düzeneği.
(a): Üç-boyutlu erozyon kanalı ve şev modeli.
(b): tansiyometrelerin (T1-T20) koordinatları (x,y,z).

Tablo 1: Şev imalatında kullanılan toprak malzemesinin fiziksel özellikleri.

Özellik	Tanım ve birim	Değer
Dokusal sınıflandırma	USDA üçgeni	Kumlu tın
Dane Çapı Dağılımı	Kum, Silt, Kil (%)	55, 35, 10
Efektif çap	D ₁₀ (mm)	0.003
Üniformluk katsayısı	Cu (-)	55
Derecelenme katsayısı	Cc (-)	1.6
Özgül ağırlık	Gs (-)	2.7

Deney su haznesine suyun doldurulmasıyla başlamış ve o an deney başlangıç zamanı (t = 0) olarak kaydedilmiştir. Boş su haznesinden 50 cm-su piyezometrik yük seviyesine yaklaşık bir dk. içerisinde çıkmıştır. Daha sonra su haznesine Mariotte tipi sifonla çalışan bir su deposu bağlanarak şev içerisinde sızan sudan dolayı oluşan kayıp neticesinde 50 cm-su piyezometrik yük seviyesinin düşmemesi ve bu sınır koşulunun deney süresince sabit kalması sağlanmıştır. Bu düzenekte, Mariotte tipi sifonla çalışan su deposunun üst kısmında bir hava giriş vanası ve alt kısmında da suyun cazibeyle erozyon kanalının su haznesine ileten bir deşarj vanası bulunmaktadır. Su deposunun hava giriş vanasına bağlanan bir plastik borunun diğer ucu 50 cm-su piyezometrik yük seviyesine gelecek şekilde erozyon kanalının su haznesine yerleştirilmiştir (Şekil 1a). Böylelikle su haznesindeki seviyenin düşmesi hava giriş borusu ağzını atmosfere açık hale getirerek su deposuna hava girmesini sağlamıştır. Atmosfer basıncına gelen su deposundaki hava boşluğu deşarj borusundan su çıkışına imkân vermiş ve erozyon kanalının su haznesi beslenmiştir. Su haznesindeki seviyenin 50 cm-su piyezometrik yüke çıkması hava giriş borusu ağzının tekrar kapanmasını ve su haznesine deşarjın kesilmesini sağlamıştır.

Su haznesinden şev mansap ucuna doğru gerçekleşen yeraltı suyu akımının şev içerisinde yarattığı boşluk suyu basınç yükleri (cm-su) erozyon kanalının yan tarafına (y = 0 düzlemi) yerleştirilen toplam 22 adet kalem tipi tansiyometreler (Soil Measurement Systems pencil-size tensiometer) tarafından

ölçülmüştür (Şekil 1b). Tansiyometrelerin yerleşim şeması ve koordinatları (şev mansabındaki topuk noktası referans alınarak) Şekil 1b'de verilmiştir. Tansiyometrenin 7.5 cm uzunluğundaki PVC tüpünün şev toprağının içine itilerek sokulan poroz seramik ucunun dış çapı 0.67 cm iken uzunluğu 2.54 cm'dir. Tansiyometre tüpleri bir şırınga yardımı ile suyla doldurulduktan sonra diğer ucuna ölçüm kapasiteleri -416 cm-su basınç yükü ile +416 cm-su basıncı yükü aralığında olan analog basınç dönüştürücüleri (Honeywell Sensing and Control ASDX series pressure transducer) hava sızdırmaz valfler ile bağlanmıştır. Negatif (emme/vakum) basınçların olduğu yarı-doygun toprakta tansiyometre tüpü içindeki su poroz seramikten geçerek zemin boşluğuna girmektedir. Ancak bu durum tüpün basınç dönüştürücü bağlanan ucunda oluşmaya başlayan emme basıncının toprak emme basıncına eşitleninceye kadar devam etmektedir. Böylelikle veri günlükleyici (Campbell Scientific CR1000 multiplexer datalogger) tarafından her 10 saniyede bir kaydedilen basınçlar denge durumuna gelen boşluk suyu basınçlarıdır. Yeraltı suyunun aktığı doygun toprak bölgesindeki su ise pozitif boşluk suyu basıncının etkisiyle poroz seramikten geçerek tansiyometre tüpünün içine girmeye çalışmaktadır. Tansiyometre tüpünün içindeki hava bu durumda pozitif boşluk suyu basıncına eşitleninceye kadar sıkışır. Basınç dönüştürücü tarafından ölçülen bu denge basıncı her 10 saniyede bir veri günlükleyicide herhangi bir düzeltme yapılmadan kaydedilmektedir (Şekil 1b).

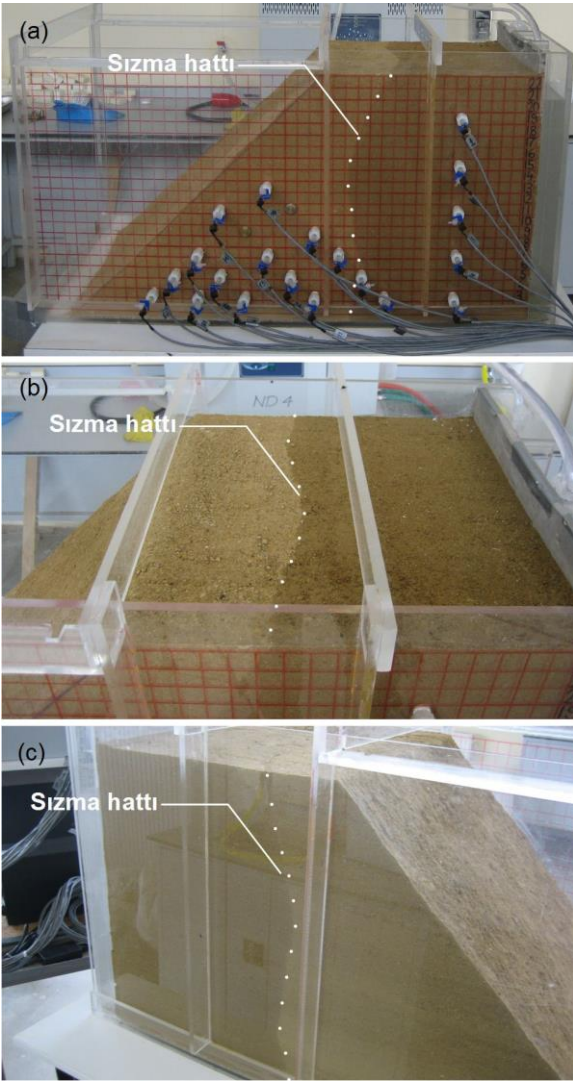
Deney başlangıcından (t=0) sızma suyunun şevin mansap yüzeyinden çıkmasına kadar süre (t=sızma zamanı) kaydedilmiştir. Bu andan itibaren sızma suları erozyon kanalının mansap ucunda bulunan dijital baskül ile ağırlığı ölçülen toplama kabında biriktirilmiştir (Şekil 1b). Sızma akımı etkisi altında erozyona uğrayarak şevden kopan toprak malzemesi çeşitli aralıklarla çelik tepsilere biriktirilmiş, fırında kurutularak sedimentin kuru ağırlıkları alınmıştır. Erozyon neticesinde şevde oluşan fiziksel değişimler erozyon kanalının yanına ve mansabına yerleştirilen dijital fotoğraf makineleri ile izlenmiştir. Şev içerisindeki boşluk suyu basınçlarının kararlı akım (zamanla değişmeyen) durumuna gelmesinden sonra deney erozyon kanalındaki su haznesinin boşaltılmasıyla sonlandırılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

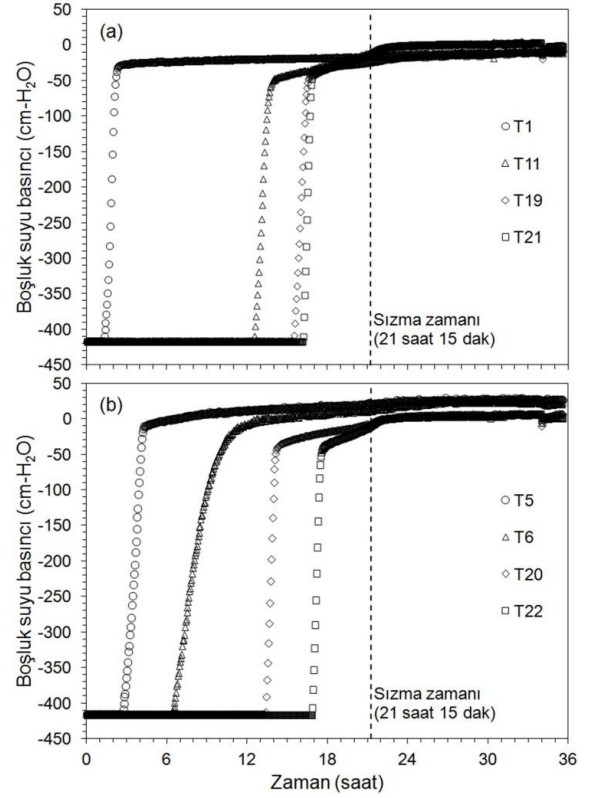
50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altında su haznesinden şev içerisine doğru infiltrasyon başlamış ve bu yolla şev yüzeyine doğru ilerleyen yeraltı suyu akımı oluşmuştur. Yeraltı suyu akımının çıplak gözle ayırt edilebilir olan sızma hattı Şekil 2'de görülebilir. Deney başlangıcından 5 sa. 15 dk. sonraki durumu yansıtan sızma hattının memba tarafındaki zeminin doygunluğu artmış olduğundan rengi sızma hattının mansap tarafındaki (henüz ıslanmamış) nemli toprağa (deney başlangıcında şevin su muhtevası=%17.2) göre daha koyu gözükmetedir. Üç-boyutlu erozyon kanalının tansiyometrelerin yerleştirildiği şeffaf yan yüzünden (Şekil 2a), şev kretinden (Şekil 2b) ve de tansiyometrelerin yerleştirildiği şeffaf yan yüzeyin karşı düzleminden (Şekil 2c) izlenebilen sızma hattı ilerleyişinden yeraltı suyu akımının kanal genişliği boyunca üniform olduğu söylenebilir (Şekil 2b). Bu açıdan imalat aşamasındaki kontrollü toprak sıkıştırması işlemi hidrolik iletkenlik açısından homojen bir şev yaratmıştır.

Sızma hattının su haznesinden şev yüzeyine doğru ilerleyişi tansiyometrelerin ölçtüğü boşluk-suyu basınçlarından da izlenebilmiştir (Şekil 3). Deney başlangıcında tansiyometreler

tarafından ölçülen tüm boşluk-suyu basınçları -416 cm-su değerini göstermektedir ki bu değer tansiyometrelere bağlı olan analog basınç dönüştürücülerin emme basıncı ölçüm kapasitesidir. Bundan dolayı şev içerisinde deney başlangıcındaki %17.2 su muhtevasına karşılık gelen kapiler basınçların gerçekte -416 cm-su'dan daha küçük olduğu söylenebilir. Şev içerisindeki su haznesinden şev yüzeyine doğru olan yeraltı suyu akımının yarattığı boşluk-suyu basıncındaki artış ilk olarak T1 tarafından deney başladıktan 1 sa. 15 dk. sonra algılanmıştır (Şekil 3a). Bu an sızma hattının T1 noktasına vardıgı zamanı belirtmektedir. Sızma hattının şev yüzeyine doğru ilerlemesine devam etmesiyle birlikte şev kreti ve şev yüzeyi bölgesine yerleştirilen tansiyometrelerden T11, T19 ve T21 deney başlangıcından sırasıyla 12 sa. 28 dk. 15 sa. 28 dk. ve 16 sa. 8 dk. sonra sızma hattının bu noktalara eriştiğini algılamışlardır (Şekil 3a). Ayrıca, taban bölgesine yerleştirilen tansiyometrelerden T5, T6, T20 ve T22 de deney başlangıcından sırasıyla 2 sa. 20 dk. 6 sa. 24 dk. 13 sa. 21 dk. ve 16 sa. 50 dk. sonra sızma hattının bu noktalara eriştiğini algılamışlardır (Şekil 3b).

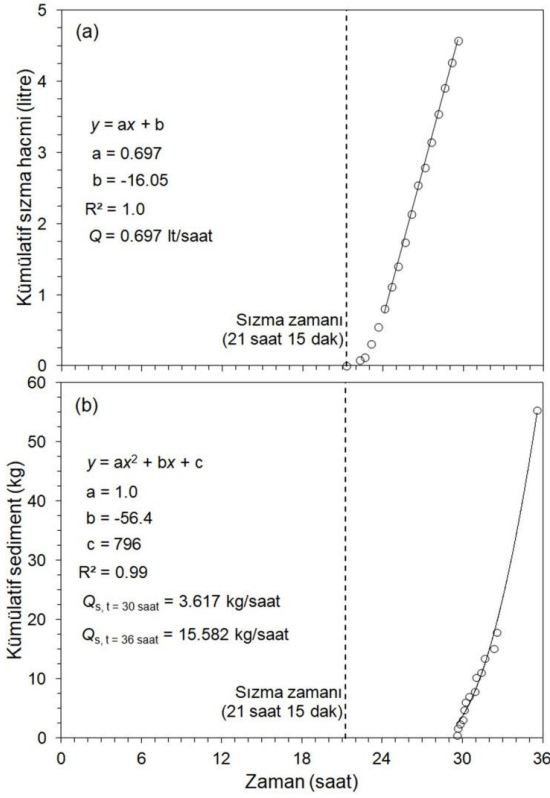


Şekil 2: Sızma sularının deney başlangıcından 5 sa. 15 dk. sonraki ilerleyişindeki durum. (a): Erozyon kanalının yandan görünüşü (tansiyometrelerin yerleştirildiği $y = 0$ düzlemi), (b): Erozyon kanalının üstten görünüşü, (c): Erozyon kanalının yandan görünüşü ($y = 50$ cm düzlemi).



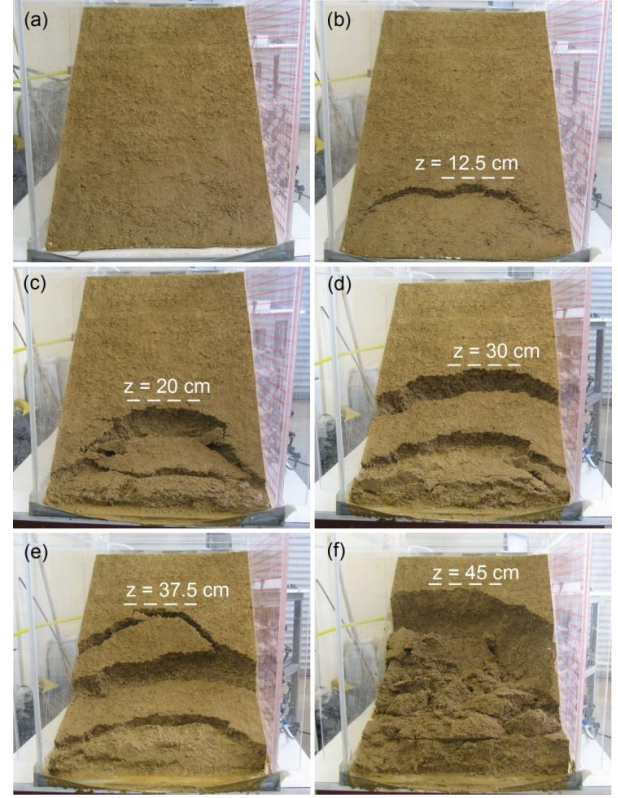
Şekil 3: Laboratuvar deneyi boyunca 50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altında tansiyometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları. (a): Şev kreti ve şev yüzeyi bölgesi, (b): Şev tabanı bölgesi.

Su haznesinden şevin 45° lik yüzeyine doğru ilerleyen yeraltı suyu akımının sızma zamanı 21 sa. 15 dk. olarak ölçülmüştür. İlk sızma olayı şevin topuk bölgesinden (Şekil 1a'daki y eksenini boyunca) başlamıştır. Bu anda topuk bölgesine en yakın olan tansiyometrenin (T22) ölçtüğü boşluk-suyu basıncı -8.6 cm-su'dur. T22'nin yerleştirildiği noktanın şev tabanına göre yüksekliği 6.25 cm olduğuna dikkate alındığında (Şekil 1b) şev topuk bölgesinin neredeyse doymuş hale geldiği (-8.6 cm + 6.25 cm = -2.35 cm-su ≈ 0) tansiyometrelerin ölçtüğü boşluk-suyu basınçlarından da izlenebilmektedir. Sızma zamanından itibaren erozyon kanalının mansap ucunda toplanan sızma suyu hacim değerleri Şekil 4a'da verilmiştir. Kümülatif sızma hacminin zamanla değişiminin doğrusallık izlemeye başlaması yeraltı suyu akımının kararlı akım durumuna gelmesini göstermektedir. Bu açıdan lineer regresyon katsayısının (R^2) bir e eşit olduğu denklemin (lineer regresyon kümülatif sızma hacminin deney başlangıcından 24 sa. 5 dk. ila 29 sa. 35 dk. arasındaki değerleri için yapılmıştır) eğimine eşit olan kararlı akım debisi (Q) 0.7 lt/sa. olarak bulunmuştur (Şekil 4a). Sızma suyu etkisi altında şev toprağının erozyona uğraması deney başlangıcından 29 sa. 35 dk. sonra (sızma zamanından 8 sa. 20 dk. sonra) başlamıştır. Bu andan itibaren sediment yüklü sızma suları çeşitli aralıklarla çelik tepsiye biriktirildikten sonra fırında kurularak sedimentin kuru ağırlıkları alınmıştır (Şekil 4b). Kümülatif sediment kütlesinin zamanla doğrusal olarak artmadığı gözlemlendiğinden lineer olmayan regresyon analizi yapılmıştır ($R^2=0.99$). Çeşitli zamanlardaki sediment debisini (Q_s) bulmak için regresyon denkleminin türevi alınmış ve deney başlangıcından 30 ve 36 sa. sonraki değerleri sırasıyla 3.617 kg/sa. ve 15.582 kg/sa. bulunmuştur (Şekil 4b).



Şekil 4: Deney süresince 50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altında ölçülen hidrolojik kayıtlar. (a): Şev yüzeyinden çıkan sızma suyu hacmi, (b): Sediment kütlesi.

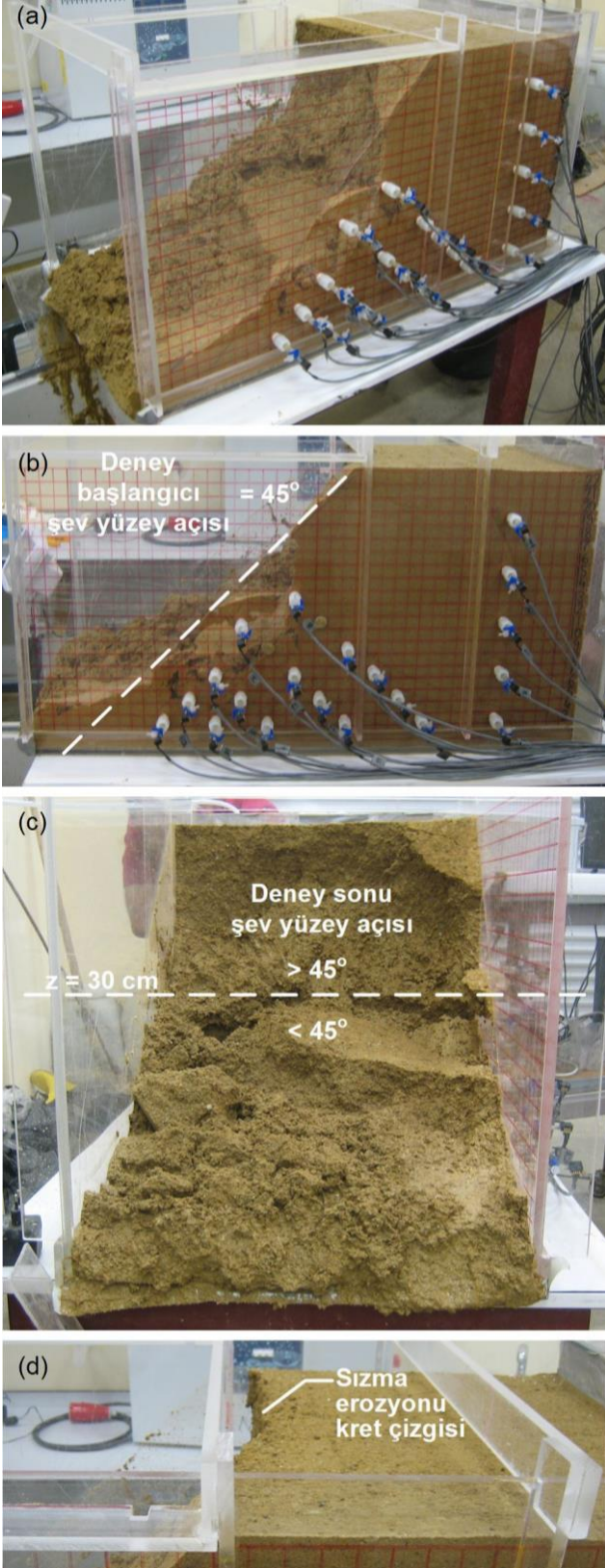
Deneyde gözlemlenen sızma erozyonu süreci Şekil 5'te özetlenmiştir. Sızma zamanında (21 sa. 15 dk.) şev yüzeyinde herhangi bir erozyon yaşanmamıştır. Sızmanın başlamasından 2 sa. 45 dk. sonrasındaki (deney başlangıcından 24 sa. sonra) şev yüzeyinde fiziksel bir değişiklik yoktur (Şekil 5a). Şev yüzeyindeki ilk hareket deney başlangıcından 29 sa. sonra gözlenmiştir (Şekil 5b). Erozyon kanalının genişliği boyunca yayılan bu yarığın şev yüzeyi düzlemindeki yüksekliği 12.5 cm'dir (Şekil 5b). Bu hareketten 35 dk. sonra ikinci bir hareket gözlenmiş, bu sefer yarığın şev yüzeyi düzlemindeki yüksekliği 20 cm'ye çıkmıştır (Şekil 5c). Bu andan itibaren (deney başlangıcından 29 sa. 35 dk. sonra) sızma suyunun biriktirilmesine son verilmiş, kuru ağırlıkları alınmak üzere sediment yüklü sızma suyunun tepelerde toplanmasına başlanmıştır. Bu ana kadarki kümülatif sızma hacmi 4.57 lt'dir (Şekil 4a). Sızma erozyonunun memba kesitine doğru ilerlemesi devam ettikçe oluşan yarığın şev yüzeyi düzlemindeki yüksekliği de artmıştır. Deney başlangıcından 30 sa. 10 dk. sonra yarığın yüksekliği 30 cm'ye çıkmıştır (Şekil 5d). Burada belirtmek gerekir ki oluşan yarığın mansap kısmındaki toprak kütlesinin şev ile fiziksel bağlantısı kesilmiş olmasına rağmen erozyona uğrayan kütle hesaplanırken erozyon kanalı dışına taşan ve tepsi içinde biriktirilen sediment kütlesi esas alınmıştır (Şekil 4b). Deneyin devamında da deney başlangıcından 31 sa. ve 32 sa. 35 dk. sonra yarığın şev yüzeyi düzlemindeki yüksekliği sırasıyla 37.5 cm ve 45 cm'ye çıkmıştır (Şekil 5e ve Şekil 5f). Sızma erozyonunun şev membasına doğru ilerlemesi sürecinin tansiyometreler tarafından ölçülen boşluk-suyu basınçlarına bir etkisi olmadığı (erozyonun başladığı deney başlangıcından 29 sa. sonrası ile deney sonu arasında yaklaşık olarak yatay olan eğrilerde herhangi bir sapma oluşmamıştır) görülmüştür (Şekil 3).



Şekil 5: Deneyin belirli zamanlarında şev sızma erozyonunun mansaptan görünümü. (a): 24 sa. (b): 29 sa. (c): 29 sa. 35 dk. (d): 30 sa. 10 dk. (e): 31 sa. (f): 32 sa. 35 dk.

Deney kararlı akım durumuna gelmesi sonrası (Şekil 3'teki boşluk-suyu basıncı-zaman eğrilerinin yatay olması) deney başlangıcından 36 sa. sonra su haznesinin boşaltılmasıyla sonlandırılmıştır. Bu anda şev içerisindeki en yüksek boşluk suyu basıncı T5 tarafından 26.1 cm-su olarak ölçülmüştür (Şekil 3b). Kararlı akım durumunda erozyon kanalı boyunca tabanda ölçülen boşluk-suyu basınçlarının su haznesinden şev yüzeyine yaklaştıkça düşüş gösterdiği de gözlenmiştir (Şekil 3b). Örneğin, T6, T20 ve şev yüzeyinden sızmanın ilk olarak başladığı topuk bölgesine en yakın tansiyometre olan T22 (Şekil 1b) deneyler sonlandırıldığında boşluk suyu basıncını sırasıyla 23.6 cm-su, 6.1 cm-su ve 1.7 cm-su olarak ölçmüştür (Şekil 3b). Bu durum kararlı akım durumundaki freatik hat seviyesinin su haznesinden şev yüzeyine doğru düştüğünü göstermektedir.

Deney süresince meydana gelen sızma erozyonu neticesinde yaşanan kütle kayıplarının şevin fiziksel durumuna olan etkisi Şekil 6'da verilmiştir. Topuk bölgesinde başlayan sızma erozyonunun deney süresince şev içerisine doğru ilerlemesinden dolayı deney sonlandırıldığında bazı tansiyometrelerin (T16 ve T19) poröz seramik uçlarının atmosfere açık hale geldiği görülmüştür (Şekil 6a). Deney sonunda erozyona uğramış kümülatif sediment kütlesinin 55.4 kg (Şekil 4b) olmasına rağmen erozyon kanalı boyunca şev tabanı boyuna eşit olduğundan şevden oyulan bu kütle kanal dışına çıkmış ve bundan dolayı topuk bölgesinde herhangi bir yığılma oluşmamıştır (Şekil 6b). Şevin deney başlangıcındaki 45° yüzey açısı (Şekil 6b) oluşan erozyon neticesinde deney sonunda topuk bölgesinde azalırken (z=30 cm düzleminin altında kalan bölge) şev kretine doğru çıktığında (z = 30 cm düzleminin üstünde kalan bölge) artmıştır (Şekil 6c). Sızma erozyonunun etkisi kret kotunda da gözlenmiştir (Şekil 6d).



Şekil 6: Sızma erozyonunun deney sonu görünümü. (a): Erozyon kanalı genel görünüm, (b): Erozyon kanalının yandan görünüşü (tansiyometrelerin yerleştirildiği $y = 0$ düzlemi), (c): Erozyon kanalının mansaptan görünümü, (d): Kret çizgisi üstten görünüm.

4 Sonuçlar ve öneriler

Yüksek kotlardan gelen drenaj sularına, sulamaya, kar erimesine, yeraltı drenaj borularının tıkanmasına ya da kapatılmasına, yağmur sularına ek olarak taşkın hidrografının yükselme zamanında kanaldan doymun olmayan şev toprağının içine doğru infiltrasyon yoluyla suyun girmesi şevlerdeki yeraltı su seviyesinin yükselmesine neden olur. Bir akarsudaki taban oyulmalarının en aza indiği düşük akım rejimi döneminde su seviyesinin havzadaki yeraltı suyu seviyesinin altına inmesiyle de yeraltı suyu akarsu yatağı içerisine sızar. Bu çalışmada, yeraltı suyu akımı kaynaklı erozyon mekanizmaları üç-boyutlu kumlu tın fiziksel şev modeli kullanılarak incelenmiştir. Deney sırasında toprak partikülleri doymun durumdaki şev yüzeyinden çıkış yapan sızma suyu tarafından sürüklenmiştir. Sızma suyu erozyonunun oluşturduğu oyuk deney süresince memba kesimine doğru toprak kaymaları ile ilerlemiş ve yüksekliği deney sonunda şev kretine kadar ulaşmıştır. Şev erozyonunun kararlı akım durumundaki boşluk-suyu basınçlarına bir etkisi olmamıştır. Bu çalışmada elde edilen deneysel bulgular, benzer toprak bünye sınıfına ve şev yüzey açısında sahip havzalarda meydana gelen erozyonun yeraltı suyu akımı neticesinde oluşabileceğini göstermiştir.

İleriki çalışmalarda şev yüzey açısının (60 ve 90° olacak şekilde) kumlu tın bünye sınıfı toprağın sızma erozyonu mekanizmasına olan etkisi araştırılacaktır. Bununla birlikte, bu çalışmada elde edilen zamana bağlı kümülatif sızma hacmi ve kümülatif sediment kütlesi eğrileri de kullanılarak kumlu tın şevlerde kararlı akım debisi ile sediment taşınımı arasında bir bağ kurulabilecektir. Ayrıca, bu çalışmada inşa edilen şevin taban uzunluğunun kullanılan erozyon kanalının uzunluğuna eşit olmasından dolayı sızma erozyonu ile şevden kopan toprak malzemesi kanal içerisinde kalmamıştır. Gelecek deneylerde benzer toprak yapısına sahip şevler daha uzun erozyon kanalında inşa edilmesi ve böylelikle erozyona uğrayan malzemenin topuk bölgesinde yığılmasına izin verilmesi planlanmaktadır. Böylelikle, kendi kendini iyileştiren şev araştırmalarına ışık tutulabilecektir.

5 Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan kumlu tın toprağın İstanbul ili Hasdal-Kemberburgaz bölgesinden temin edilmesindeki yardımından dolayı Karayolları Genel Müdürlüğü'nden Mehmet Tokgöz'e; erozyon kanalı ve şevin inşası aşamalarındaki yardımı için Okan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı teknisyeni Halis Şahin'e ve deney sırasında verdiği destekten dolayı Doç. Dr. A. Tolga Özer'e teşekkür ederim.

6 Kaynaklar

- [1] T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı. "Erozyonla Mücadele Eylem Planı 2013-2017". <http://www.cem.gov.tr/erozyon/Files/yayinlarimiz/EROZYON%20EYLEM.pdf> (20.12.2017).
- [2] Aksoy H, Kavvas ML. "A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models". *Catena*, 64(2-3), 247-271, 2005.
- [3] Tóth J. "Groundwater discharge: A common generator of diverse geologic and morphologic phenomena". *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin (Hydrological Sciences Journal)*, 16(1), 7-24, 1971.

- [4] Liu L, Liu QJ, Yu XX. "The influences of row grade, ridge height and field slope on the seepage hydraulics of row sideslopes in contour ridge systems". *Catena*, 147, 686-694, 2016.
- [5] Bryan RB. "Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope". *Geomorphology*, 32, 385-415, 2000.
- [6] Regmi RK, Jung K, Nakagawa H, Kang J. "Study on mechanism of retrogressive slope failure using artificial rainfall". *Catena*, 122, 27-41, 2014.
- [7] Aksoy H, Unal NE, Cokgor S, Gedikli A, Yoon J, Koca K, Inci SB, Eris E. "A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume". *Catena*, 98, 63-72, 2012.
- [8] Aksoy H, Unal NE, Cokgor S, Gedikli A, Yoon J, Koca K, Inci SB, Eris E, Pak G. "Laboratory experiments of sediment transport from bare soil with a rill". *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1505-1518, 2013.
- [9] Römkens MJM, Helming K, Prasad SN. "Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes". *Catena*, 46, 103-123, 2001.
- [10] Rockwell DL. "The influence of groundwater on surface flow erosion processes during a rainstorm". *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 495-514, 2002.
- [11] Rockwell DL. "Headcut erosive regimes influenced by groundwater on disturbed agricultural soils". *Journal of Environmental Management*, 92, 290-299, 2011.
- [12] Fox GA, Wilson GV, Periketi RK, Cullum RF. "Sediment transport model for seepage erosion of streambank sediment". *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(6), 603-611, 2006.
- [13] Fox GA, Wilson GV, Simon A, Langendoen E, Akay O, Fuchs JW. "Measuring streambank erosion due to ground water seepage: correlation to bank pore water pressure, precipitation and stream stage". *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1558-1573, 2007.
- [14] Wilson GV, Periketi RK, Fox GA, Dabney SM, Shields FD, Cullum RF. "Soil properties controlling seepage erosion contributions to streambank failure". *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 447-459, 2007.
- [15] Wilson CG, Kuhnle RA, Bosch DD, Steiner JL, Starks PJ, Tomer MD, Wilson GV. "Quantifying relative contributions from sediment sources in conservation effects assessment project watersheds". *Journal of Soil and Water Conservation*, 63(6), 523-532, 2008.
- [16] Akay O, Özer AT, Yüzer YL, Bilen M, Bozkır Ş. "Sızma erozyonunun laboratuvar ölçeğinde değerlendirilmesinde üç-boyutlu lazer tarama". 9. Ulusal Hidroloji Kongresi, Diyarbakır, Türkiye, 4-6 Ekim, 2017.
- [17] Rinaldi M, Mengoni B, Luppi L, Darby SE, Mosselman E. "Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend". *Water Resources Research*, 44, 1-17, 2008.
- [18] Chen CH, Hsieh TY, Yang JC. "Investigating effect of water level variation and surface tension crack on riverbank stability". *Journal of Hydro-environment Research*, 15, 41-53, 2017.
- [19] Fox GA, Wilson GV. "The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: A review". *Soil Science Society of America*, 74(3), 717-733, 2010.
- [20] Lourenço SDN, Sassa K, Fukuoka H. "Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides". *Geomorphology*, 73, 115-130, 2006.
- [21] Fox GA, Chu-Agor ML, Wilson GV. "Erosion of noncohesive sediment by ground water seepage: lysimeter experiments and stability modeling". *Soil Science Society of America Journal*, 71, 1822-1830, 2007.
- [22] Chu-Agor ML, Fox GA, Cancienne R, Wilson GV. "Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes". *Journal of Hydrology*, 359, 247-259, 2008.
- [23] Chu-Agor ML, Fox GA, Wilson GV. "Empirical sediment transport function predicting seepage erosion undercutting for cohesive bank failure prediction". *Journal of Hydrology*, 377, 155-164, 2009.
- [24] Lu Y, Lu Y, Chiew Y. "Incipient motion of cohesionless sediments on riverbanks with ground water injection". *International Journal of Sediment Research*, 27, 111-119, 2012.
- [25] Akay O, Özer AT, Fox GA. "Experimental investigation of failure mechanism of expanded polystyrene block geofoam slope system under seepage". 5th European Geosynthetics Congress (EuroGeo5), Valencia, Spain, 13-17 September 2012.
- [26] Akay O, Özer AT, Fox GA, Bartlett SF, Arellano D. "Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofoam under seepage flow". *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 81-98, 2013.
- [27] Akay O, Özer AT, Fox GA. "Use of EPS block geofoam with internal drainage for sandy slopes subjected to seepage flow". 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin, Germany, 21-25 September 2014.
- [28] Akay O, Özer AT, Fox GA. "Assessment of EPS block geofoam with internal drainage for sandy slopes subjected to seepage flow". *Geosynthetics International*, 21(6), 364-376, 2014.
- [29] Akay O, Özer AT, Fox GA, Wilson GV. "Behavior of fiber-reinforced sandy slopes under seepage". ASCE EWRI World Environmental and Water Resources Congress, West Palm Beach, Florida, USA, 22-26 May 2016.
- [30] Akay O. "Slope stabilisation using EPS block geofoam with internal drainage system". *Geosynthetics International*, 23(1), 9-22, 2016.
- [31] Özer AT, Akay O, Fox GA, Bartlett SF, Arellano D. "A new method for remediation of sandy slopes susceptible to seepage flow using EPS-block geofoam". *Geotextiles and Geomembranes*, 42(2), 166-180, 2014.
- [32] Özer AT, Akay O. "Use of interlocked EPS block geofoam for sandy slopes subjected to seepage flow". 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin, Germany, 21-25 September 2014.
- [33] Özer AT. "Laboratory study on the use of EPS-block geofoam for embankment widening". *Geosynthetics International*, 23(2), 71-85, 2016.