

İSTANBUL OKAN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



— İSTANBUL —
OKAN ÜNİVERSİTESİ

YERALTI SUYU AKIMI ETKİSİNDE AKARSU KIYISI MODELİNDE OLUŞAN
SIZMA EROZYONUNUN LİF KATKISI İLE ÖNLENMESİNİN
LABORATUVAR DENEYLERİ İLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERT BİLEN

tarafından

YÜKSEK LİSANS

derecesi şartını sağlamak için hazırlanmıştır.

Ağustos 2018

Program: İnşaat Mühendisliği

YERALTI SUYU AKIMI ETKİSİNDE AKARSU KİYİSİ MODELİNDE OLUŞAN
SIZMA EROZYONUNUN LİF KATKISI İLE ÖNLENMESİNİN
LABORATUVAR DENEYLERİ İLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERT BİLEN

tarafından

İSTANBUL OKAN ÜNİVERSİTESİ

İnşaat Mühendisliği Bölümüne

Yüksek Lisans

derecesi şartını sağlamak için sunulmuştur.

Onaylayan:

Dr. Öğr. Üyesi Onur AKAY
Danışman

Doç. Dr. Abdullah Tolga ÖZER
İkinci Danışman

Prof. Dr. Hafzullah AKSOY
Üye

Prof. Dr. Cevza Melek
KAZEZYILMAZ ALHAN
Üye

Prof. Dr. İlknur BOZBEY
Üye

Ağustos 2018

Program: İnşaat Mühendisliği

ÖZET

Akarsu kıyısı erozyonunun en önemli etkenlerinden birisi yeraltı suyu akışıdır. Özellikle, yeraltı suyunun akarsu taban akışını desteklediği dere içine doğru akışı sırasında akarsu kıyısı sediman daneleri sürüklenabilir veya sıvılaşabilir. Geçmiş çalışmalar daha çok yeraltı suyu sızma erozyonunun mekanizmasına yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada, bitki köklerinin doğal yamaçlardaki erozyona karşı etkisini taklit edebilen 6 mm ve 18 mm uzunluğundaki polipropilen lif malzemesini kullanan bir koruyucu önlem metodu laboratuvar fiziksel akarsu kıyısı model deneyleri ile incelenmiştir. Akarsu kıyısı fiziksel modelleri 195 cm uzunluğunda, 100 cm genişliğinde ve 110 cm yüksekliğinde kuru birim hacim ağırlığı 14 kN/m³ ve şev yüzeyi 45° olacak şekilde bir erozyon kanalı içerisinde kum kullanılarak inşa edilmiştir. Erozyon kanalının memba kısmında bulunan su haznesinde deneyler sırasında sabit tutulan 50 cm-H₂O ve 100 cm-H₂O değerindeki piyezometrik yükseklikler akarsu kıyısı şev modelinde iki farklı yeraltı suyu hidrolik eğimi meydana getirmiştir. Akarsu kıyısı şev modeli içerisinde oluşan pozitif boşluk suyu basınçları titreşim telli (vibrating wire – VW) piyezometreler ile ölçülmüştür. Buna ek olarak, erozyon kanalı yan duvarı boyunca konumlandırılan tansiyometreler ile şev yan yüzeyindeki boşluk suyu basınçları ölçülmüştür. Katkısız kum ile yapılan deneyler sırasında yeraltı suyunun şev yüzeyinden çıkış yapmaya başlamasıyla birlikte bu bölgedeki sediman erozyonu gerçekleşmiştir. Erozyon sonucu oluşan oyukların hacimleri üç-boyutlu lazer taraması tekniğiyle hesaplanmıştır. 6 mm %0.3 lif içerikli akarsu kıyısı koruması 50- ve 100 cm-H₂O piyezometrik yük sınır koşulları altında yapılan deneylerdeki toplam sızma erozyonu hacimlerini sırasıyla %65 ve

%53 oranında azaltmıştır. Kohezyondaki artışa bağlı olarak, 6 mm ve 18 mm uzunluklarındaki lifli akarsu kıyısı koruması %1.0 lif içeriğiyle 50- ve 100 cm-H₂O piyezometrik yük sınır koşulu altında katkısız kumda gözlenmiş olan erozyonu tamamen önlemiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey altı akımı; Nehir sediman taşınımı; Şev güçlendirmesi; Erozyon kanalı; Fiber.



ABSTRACT

Groundwater flow is one of the major contributors in streambank erosion. Specifically, sediments on the streambank surface can be entrapped or liquefied by groundwater flow which seeps into the channel and forms the base flow during low-flow conditions. Previous studies mainly focused on groundwater seepage erosion mechanisms. On the other hand, this study investigated the use of 6-mm and 18-mm long discrete monofilament polypropylene (PP) fibers in order to mimic the effect of tree roots against erosion of natural slopes by laboratory physical streambank model experiments. The streambank slope models were 195 cm long, 100 cm wide and 110 cm high and were constructed in an erosion flume with sand dry unit weight of 14 kN/m^3 and slope angle of 45° . The water reservoir located in the upstream section of the erosion flume supplied constant piezometric head boundary conditions (BC) of 50 cm- H_2O and 100 cm- H_2O so that the performance of the fiber use could be tested under two different hydraulic gradients. Positive pore-water pressures developed within the slopes were measured by vibrating wire (VW) piezometers. In addition, tensiometers installed on the side of the erosion flume measured both suction and positive pore-water pressures developed near the side wall. The experiments with unreinforced sand showed that the erosion initiated as the groundwater started seeping on the slope surface. Erosion volumes were calculated by the use of point clouds generated by three-dimensional (3D) laser scanning of the slope surface during the experiments. The inclusion of 6-mm long PP fibers at 0.3% gravimetric content reduced the seepage erosion by 65% and 53% under 50 cm- H_2O and 100 cm- H_2O piezometric head BC, respectively. Due to the increase in cohesion supplied at 1.0%

gravimetric content, the inclusion of 6-mm and 18-mm long PP fibers successfully protected the slope against erosion under groundwater seepage.

Keywords: Subsurface flow; River sediment transport; Slope reinforcement; Erosion flume; Fiber.



TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Onur AKAY'a, tez ikinci danışman hocam Doç. Dr. Abdullah Tolga ÖZER'e teşekkürlerimi sunarım. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar bursiyer olarak görev aldığım Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı 215M745 numaralı proje (Lif katkılı kumlu şevlerin sızma suları altındaki davranışlarının fiziksel laboratuvar deneyleri ve nümerik analizler ile incelenmesi) tarafından desteklenmiştir. Tezin incelenmesindeki katkılarından dolayı Prof. Dr. Hafzullah AKSOY'a, Prof.Dr. Melek KAZEZYILMAZ ALHAN'a ve Prof. Dr. İlkur BOZBEY'e teşekkürlerimi sunarım. Şevlerin imalatı sırasında yardımlarını esirgemeyen teknisyen Halis ŞAHİN'e, yüksek lisans öğrencisi İnşaat Mühendisi Yelda LEVENT YÜZER'e, İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı çalışan öğrenci programında laboratuvarda çalışan Lisans öğrencilerinden Atakan CANOĞLU ve T.Muhammed ŞAHİN'e, teşekkürlerimi sunarım. Son olarak; gösterdikleri sabır ve verdikleri her türlü destek için annem Beltan BİLEN'e, babam Mehmet BİLEN'e ve ağabeyim Meriç BİLEN'e ile bu süreçte yanımda olan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

I. GİRİŞ.....	1
II. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
III. GEREÇ VE YÖNTEM.....	11
IV. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	22
4.1. LİF KATKISIZ ŞEV	22
4.2. 6 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV	29
4.3. 18 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV	35
4.4. 6 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV	40
4.5. 18 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV	45
4.6. LİF KATKISININ SIZMA EROZYONUNA ETKİSİ	50
4.7. ŞEV STABİLİTESİ ANALİZİ	51
V. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
VI. KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	69

TABLO LİSTESİ

TABLO 3.1. AKARSU KIYISI FİZİKSEL MODEL ŞEVLERİNDE KULLANILAN KUMUN	
ÖZELLİKLERİ	13
TABLO 3.2. AKARSU KIYISI FİZİKSEL MODEL ŞEVLERİNDE KULLANILAN LİFİN	
ÖZELLİKLERİ	13
TABLO 3.3. LİF KATKILI KUMUN DOYGUN HİDROLİK İLETKENLİK KATSAYISI ($\times 10^{-4}$ M/S)	
.....	15
TABLO 3.4. 6 MM LİF KATKISI İÇİN KONSOLİDASYONLU DRENAJLI (CD) TEST DEĞERLERİ	
.....	16
TABLO 3.5. 18 MM LİF KATKISI İÇİN KONSOLİDASYONLU DRENAJLI (CD) TEST	
DEĞERLERİ	16
TABLO 3.6. FİZİKSEL ŞEV MODELLERİ İÇİN DENEY KOŞULLARI	20
TABLO 4.1. ŞEV DURAYLILIĞI MODELLERİNDE KULLANILAN MOHR-COULOMB	
PARAMETRELERİ	51
TABLO 4.2. DENEYLERİN SLOPE/W İLE HESAPLANAN ŞEV GÜVENLİK KATSAYILARI	
(FS)	52

ŞEKİL LİSTESİ

- ŞEKİL 3.1. LABORATUVAR EROZYON KANALI: (A) ÇELİK ÇERÇEVE BOYUTLARI; (B) ŞEV MODELİ VE ŞEFFAF POLİ METİL METAKRİLAT (PMMA/PLEKSİGLAS) YAN DUVARA MONTAJI YAPILAN TANSİYOMETRELERİN (T1-T13) KOORDİNATLARI (X, Y, Z)..... 12
- ŞEKİL 3.2. SENTETİK LİF KATKILI KUMUN HAZIRLANMASI: (A) KARIŞIM ÖNCESİ PP LİF (6 MM); (B) DÜŞEY EKSENLİ BETONYER; (C) 6 MM %0.3 LİF KATKILI HOMOJEN KARIŞIM 14
- ŞEKİL 3.3. LABORATUVAR ŞEV MODELİ İMALAT AŞAMALARI: (A) GEÇİRİMSİZ ŞEV TABANININ SIKIŞTIRILMASI VE ÜZERİNE 4 ADET TOPLAM BASINÇ PLAKALARININ YERLEŞTİRİLMESİ; (B) KUMUN 2. KATMAN OLARAK SIKIŞTIRILMASI VE ÜZERİNE 3 ADET PİYEZOMETRENİN YERLEŞTİRİLMESİ; (C) SIKIŞTIRMA İŞLEMİNİN 5 CM TABAKALAR HALİNDE EL TOKMAĞI İLE YAPILMASI; (D) EN ÜST TABAKANIN (22. TABAKA) BİTİRİLMESİYLE 110 CM YÜKSEKLİĞİNDEKİ ŞEV İNŞASININ TAMAMLANMASI 18
- ŞEKİL 4.1. KATKISIZ ŞEV MODELİNİN İNŞASINDA TOPLAM BASINÇ PLAKALARI TARAFINDAN ÖLÇÜLEN ÖRTÜ BASINÇLARI 22
- ŞEKİL 4.2. KATKISIZ ŞEV MODELİ DENeyİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: (A) T = 6840 s; (B) T = 7920 s; (C) T = 10800 s (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 20/03/2017)..... 24
- ŞEKİL 4.3. KATKISIZ ŞEV MODELİ DENeyİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN

ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) T = 6840 s, (C) T = 7920 s, (D) T = 10800 S ZAMANLARINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTLERİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 20/03/2017)	25
ŞEKİL 4.4. KATKISIZ ŞEV MODELİ DENEYİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: (A) T = 2160 s; (B) T = 2520 s; (C) T = 3600 s (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 24/03/2017).....	27
ŞEKİL 4.5. KATKISIZ ŞEV MODELİ DENEYİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) T = 2160 s, (C) T = 2520 s, (D) T = 3600 s ZAMANLARINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTLERİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 24/03/2017)	28
ŞEKİL 4.6. 6 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİNİN İNŞASINDA TOPLAM BASINÇ PLAKALARI TARAFINDAN ÖLÇÜLEN ÖRTÜ BASINÇLARI	29
ŞEKİL 4.7. 6 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: (A) T = 8760 s; (B) T = 9840 s; (C) T = 14280 s (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 07/04/2017)	31
ŞEKİL 4.8. 6 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) T = 8760 s, (C) T = 9840 s,	

(D) T = 14280 S ZAMANLARINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTLERİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 07/04/2017)	32
ŞEKİL 4.9. 6 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENeyİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: (A) T = 3300 S; (B) T = 4080 S; (C) T = 7200 S (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 17/04/2017)	33
ŞEKİL 4.10. 6 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENeyİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) T = 3300 S, (C) T = 4080 S, (D) T = 7200 S ZAMANLARINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTLERİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 17/04/2017)	34
ŞEKİL 4.11. 18 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİNİN İNŞASINDA TOPLAM BASINÇ PLAKALARI TARAFINDAN ÖLÇÜLEN ÖRTÜ BASINÇLARI	35
ŞEKİL 4.12. 18 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENeyİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: T = 14400 S (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 20/12/2017)	36
ŞEKİL 4.13. 18 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENeyİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) = 14400 S ZAMANINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER	

DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 20/12/2017).....	37
ŞEKİL 4.14. 18 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: (A) T = 3240 s; (B) T = 4500 s; (C) T = 7200 s (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 26/12/2017)	38
ŞEKİL 4.15. 18 MM %0.3 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) T = 3240 s, (C) T = 4500 s, (D) T = 7200 s ZAMANLARINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTLERİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 26/12/2017)	39
ŞEKİL 4.16. 6 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİNİN İNŞASINDA TOPLAM BASINÇ PLAKALARI TARAFINDAN ÖLÇÜLEN ÖRTÜ BASINÇLARI	40
ŞEKİL 4.17. 6 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: T = 10800 s (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 16/05/2017).....	41
ŞEKİL 4.18. 6 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) = 10800 s ZAMANINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER	

DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 16/05/2017).....	42
ŞEKİL 4.19. 6 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: T = 4500 S (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 22/05/2017).....	43
ŞEKİL 4.20. 6 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) = 4500 S ZAMANINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 22/05/2017).....	44
ŞEKİL 4.21. 18 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİNİN İNŞASINDA TOPLAM BASINÇ PLAKALARI TARAFINDAN ÖLÇÜLEN ÖRTÜ BASINÇLARI	45
ŞEKİL 4.22. 18 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: T = 10800 S (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 22/02/2018).....	46
ŞEKİL 4.23. 18 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 50 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) = 10800 S ZAMANINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER	

DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 22/02/2018).....	47
ŞEKİL 4.24. 18 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA GÖZLEMLENEN SIZMA EROZYONU VE LAZER TARAMA SONUCU ELDE EDİLEN SAYISAL NOKTA BULUTU: T = 3600 S (FOTOĞRAF ÇEKİM VE LAZER TARAMA TARİHİ: 01/03/2018).....	48
ŞEKİL 4.25. 18 MM %1.0 LİF KATKILI ŞEV MODELİ DENEYİNDE 100 CM-SU HİDROLİK YÜK SINIR KOŞULU ALTINDA (A) TABAN TANSİYOMETRELERİ VE PİYEZOMETRELER TARAFINDAN ÖLÇÜLEN BOŞLUK SUYU BASINÇLARI; (B) = 3600 S ZAMANINDAKİ NOKTA BULUTU ENKESİTİ VE SIZMA EROZYONUNUN DÜŞEY (Z EKSENİ) YER DEĞİŞTİRMELERİ (M) PLAN GÖRÜNÜMÜ (DENEY VE LAZER TARAMA TARİHİ: 01/03/2018).....	49
ŞEKİL 4.26. SIZMA EROZYON HACMİ İLA LİF KATKI ORANI ARASINDAKİ İLİŞKİ	51

SİMGELER

D_{10}	Etkin Dane Çap
C_u	Üniformluk Katsayısı
C_c	Eğrilik Katsayısı
G_s	Yoğunluk
γ_d	Kuru Birim Hacim Ağırlık
k_{sat}	Hidrolik Geçirgenlik
c	Toplam Kohezyon
ϕ	Toplam İçsel Sürtünme Açısı
c'	Efektif Kohezyon
ϕ'	Efektif İçsel Sürtünme Açısı
θ	Hacimsel su muhtevası
θ_s	Doygun hacimsel su muhtevası (van Genuchten modeli)
θ_r	Artık/kalıcı hacimsel su muhtevası (van Genuchten modeli)
α	Hava giriş (kabarcık) basınç yükünün tersi (van Genuchten modeli)
n	Boşluk çapı dağılım indeksi (van Genuchten modeli)

KISALTMALAR

CD	Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi
PA	Poliyamid
PET	Polietilen tereftalat
PE	Polietilen
PMMA	Poli metil metakrilat (Pleksiglas)
PP	Polipropilen
USDA	United States Department of Agriculture

I. GİRİŞ

Akarsu kıyısı erozyonunun en önemli etkenlerinden birisi yeraltı suyu akışıdır. Özellikle, yeraltı suyunun akarsu taban akışını desteklediği dere içine doğru akışı sırasında akarsu kıyısı sediman daneleri sürüklenebilir veya sıvılaşabilir. Benzer şekilde, yeraltı sularının yükselmesiyle doğal yamaç (şev) bölgelerinden çıkış yapan sızma suları stabilite (duraylılık) kayıplarına neden olmaktadır. Bu duraylılık kayıplarının başlıca nedenleri arasında şev bünyesindeki boşluk suyu basınçlarının artması ile birlikte zeminin toplam ağırlığının artması, zemin mekanik özelliklerinin azalması ve şev yüzeyinden çıkış yapan sızma sularının zemin danelerini de birlikte sürüklemesi (borulanma ve erozyon) sayılabilir. Duraylılık kayıpları kendilerini genellikle heyelan/toprak kaymaları şeklinde gösterirler. Bunun sonucunda kentsel bölgelerde can ve mal kayıpları yaşanmaktadır. Şev duraylılık kayıplarının akarsu kıyılarında oluşması ise bunlara ek olarak sudaki sediment miktarını artırmaktadır. Akarsular üzerindeki sanat yapılarının ömrünü önemli ölçüde azaltan sedimentin yarattığı en önemli çevresel sorun ise sudaki ince daneli zemin danelerinin artmasıdır. Su kalitesi açısından önemli bir sorun teşkil ettiği bilinmesi rağmen, gerek deneysel gözlemlerin eksikliği gerekse de arazi mekanizmalarının yeteri kadar aydınlatılmamış olması, akarsulardaki toplam sediment miktarı hesaplarında sızma kaynaklı şev göçmelerinin göz önünde tutulmasını engellemiştir.

Bu çalışmada yeraltı suyu akımı etkisinde kumlu şevde oluşan sızma erozyonunun lif (Polipropilen Monofilament Fiber) katkısı ile önlenmesi laboratuvar deneyleriyle incelenmiştir. Bu kapsamda beş farklı fiziksel şev modeli (şev açısı 45°)

hazırlanmıştır. Bu modeller kuru birim hacim ağırlığı 14 kN/m³ olacak şekilde ve 5 cm yüksekliğinde basamak şeklinde sıkıştırılmıştır. Sızma akışını oluşturmak için 50 cm-su ve 100 cm-su olacak şekilde hidrolik yük sınır koşulu uygulanmıştır. Böylelikle toplam 10 adet fiziksel şev deneyi incelenmiştir. Ayrıca, sızma kuvvetlerinin etkisi altındaki model şevlerin duraylılık/göçme analizleri lif katkılı kumun mekanik ve hidrolik parametrelerini kullanan sayısal modellerle yapılmıştır.

Tezin içeriğinde öncelikle Bölüm II'de akarsu kıyısı sızma erozyonu ve bu erozyonun önlenmesi üzerine literatür özeti sunulmuştur. Bölüm III'de laboratuvar çalışmasında kullanılan malzemelerin sınıflandırma, mekanik ve hidrolik özelliklerinden oluşan kapsamlı deney çalışmaları ve bunlarla birlikte laboratuvar fiziksel şev model deneylerinde kullanılan sistemle ilgili detaylı bilgiler sunulmuştur. Bölüm IV'de laboratuvar şev model deneyleri ve sayısal analizler tartışılarak Bölüm V'de çalışmanın sonuçları özetlenmiştir.

II. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Akarsu kıyısı erozyonu ve buna bağlı olarak şevlerde gözlemlenen geri çekilme veya yatak genişlemesi zirai alanlara ve altyapıya karşı ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Shields vd., 2009). Erozyona yol açan temel mekanizmada genellikle yeraltı suyu hidrolojisi ve yüzeysel akarsu hidroliğinin birbirleri arasındaki etkileşimi rol oynamaktadır (Luppi vd., 2009; Midgley vd., 2012; Rinaldi ve Nardi, 2013; Klavon vd., 2017). Akarsu kıyısı erozyonu nehirlerdeki toplam sediman taşınımının %80'ine kadar bir oranda katkı verebilmektedir (Fox vd., 2007a). Yeraltı suyu akarsu kıyılarında oluşan erozyonun en önemli sebeplerinden biri olarak sayılmaktadır. Bu tip bir erozyon genellikle akarsu hidrografının yükselen bölümünde doygun olmayan şevin içine doğru infiltrasyonla artan şev boşluk suyu basıncının akarsu hidrografının alçalan bölümünde nehir içine doğru yeraltı su akımını başlatması sonucu oluşur. Yeraltı suyunun şev yüzeyinden çıkış yapması olayına sızma/eksfiltrasyon adı verilmektedir (Akay vd., 2018). Saha çalışmaları göstermektedir ki sızma suları hidrografın alçalma bölgesinde nehirdeki akışın (taban akışı olarak da düşünülebilir) önemli bir kısmını teşkil etmektedir (Fox vd., 2007a; Langendoen ve Simon, 2008; Rinaldi vd., 2008). Arazi çalışmalarında genellikle noktasal bölgelerden ve de özellikle katmanlı şev kesitlerinin yüksek hidrolik geçirgenliğe sahip noktalarından çıkan sızma suyu debisinin 5×10^{-5} L/s–0.011 L/s aralığında olabileceği görülmüştür (Wilson vd., 2007; Fox vd., 2011).

Sızma suyunun akarsudaki kıyı sediman yükü üzerindeki rolünde içsel erozyon (borulanma) ve sızma erozyonu (sızma kuvveti etkisinde danelerin ayrışması) olarak

adlandırılan iki farklı mekanizma yer almaktadır (Fox ve Wilson, 2010; Wilson vd., 2018). Bu iki mekanizma aynı anda da gerçekleşebilir (Crosta ve di Prisco, 1999). Sızma erozyonu sebebiyle şevin alt kesimlerinde oluşan oyuklar (sızma oyulması) desteksiz kalan şevin üst kısımlarının bir anda devrilmesini (konsol tipi göçme) de tetikleyebilir ki bu da akarsudaki kıyı sediman girdisini daha da arttırmaktadır (Fox vd., 2006; Dapporto vd., 2001). Akarsu kıyı şevlerinin artan piyezometrik basınç altında azalan dayanıma bağlı olarak göçmesi (dairenel veya düzlemsel kayma) ve sıvılaşması da sızma suyu kaynaklı akarsuya kıyı sediman girdisini artıran ek birer mekanizma olarak söylenebilir (Fox ve Wilson, 2010). Son yapılan çalışmalar sızma erozyonunu etkileyen en önemli faktörleri belirlemiştir (pozitif veya negatif korelasyon): yeraltı suyu hidrolik eğimi (+), boşluk suyu basıncı (+), sızma oyulması derinliği (+), şev eğimi (+), şev toprağının kohezyonu (-), ve emme basıncı (-) (Fox vd., 2006, 2007a, 2010; Chu-Agor vd., 2008, 2009; Ching-Chuan vd., 2009; Karmaker ve Dutta, 2013; Masoodi vd., 2018).

Sızma suyu akışı akarsu kıyı şevinin doymuş bölgesinde meydana geldiğinden, burada Rinaldi ve Casagli (1999) tarafından boşluk hava basıncı (u_a) ve boşluk suyu basıncı (u_w) arasındaki fark olarak tanımlanan emme basıncı (ψ) sıfır olmaktadır. Böylelikle, doymun olmayan toprağın görünür kohezyonu (c_a) aşağıda verilen ilişkiyle emme basıncına (ψ) ve emme sürtünme açısına (ϕ^b) bağlı olduğundan azalmaktadır (Wilson vd., 2007):

$$c_a = \psi \tan \phi^b \quad (2.1)$$

Son yapılan çalışmalarda erozyona yol açan kuvvetlere (yüzeysel akış süpürme kuvveti, yeraltı suyu sızma kuvveti, vb.) karşı konması için akarsu kıyı şevini oluşturan toprağın kayma gerilmesi dayanım özelliklerini artırıcı yollara odaklanılmıştır. Görünür kohezyonun (c_a) doymun durumda yok olduğu ve bunun da şev stabilitesini/duraylılığını azalttığı bilindiğine göre (Simon vd., 2000; Vandamme ve Zou, 2013), erozyona karşı direncin iyileştirilmesindeki tek yol şev zemininin efektif kohezyonunun (c') artırılmasıdır. Doymamış zeminin kayma direnci (τ) Fredlund vd. (1978) formülasyonu ile aşağıda verilmiştir:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + c_a \quad (2.2)$$

burada σ toplam normal gerilmeyi, ve ϕ' efektif içsel sürtünme açısını temsil etmektedir. Zemin boşluklarının tamamen suya doymun olması durumunda ise c_a sıfırlanır ve ayrıca u_a yerine u_w kullanılır. Kum gibi kohezyonsuz zeminlerin doymun durumda efektif kohezyonu (c') yoktur/sıfırdır ve bundan dolayı da sızma akışı altında kolaylıkla erozyona uğrarlar (Wörman, 1993; Hagerty ve Parola, 2001; Ghiassian ve Ghareh, 2008).

Biyomühendislik metotlarını kullanan akarsu rehabilitasyonu çalışmalarında geniş çaplı faydalanılan çeşitli bitki ekimlerinin erozyon kuvvetlerine karşı koymak için efektif kohezyondaki gerekli artışı sağlayabileceği hem laboratuvar hem de saha çalışmalarında gösterilmiştir (USDA, 1996). Bitkilendirme çalışmalarının etkisi özellikle düzensiz rejimli akarsularda meydana gelen ekstrem taşkın olayları sırasında akarsu kıyılarındaki bitkilerin yok olması sonucu oluşan oyulmalar ve yatak genişlemesi ile göze çarpmaktadır (Curran and Hession, 2013). Daha büyük ölçekte

ise orman alanlarındaki ağaçların kesilmesi yüksek eğimli doğal yamaçlarda hem toprak kaymalarının hem de süprüntü madde akışının frekansını artırmaktadır (Imaizumi ve Sidle, 2012). Bitkilendirme zemine ek bir kök kohezyonu, c_r , kazandırmaktadır (Preti ve Giadrossich, 2009; Wu, 2013). Mekanik olarak yüzeysel toprağın kök lifleri sayesinde daha derinlere saplanmasıyla (Capilleri vd., 2016) zeminin kayma gerilmesi dayanımı artar (Pollen, 2007; Burylo vd., 2011). Hidrolojik olarak ise bitkilerin su alması sayesinde toprakta artan emme basınçları (ψ) Denklem 1'de verilen görünür kohezyonu (c_a) artırmaktadır (Pollen-Bankhead ve Simon, 2010; Gonzalez-Ollauri ve Mickovski, 2017). Böylelikle, bitki köklerinin nüfus ettiği doymun zemin koşullarında Denklem 2 aşağıdaki gibi değiştirilebilir (Abernethy ve Rutherford, 2001):

$$\tau = c' + c_r + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (2.3)$$

Biyomühendislik sistemler canlı bitkileri zamanla lif katkısı (kökler) sağlayan/geliştiren ve akarsu kıyısının şev duraylılığını/stabilitesini geliştiren (Simon ve Collison, 2002) ve erozyonun azalmasını sağlayan (Li ve Pan, 2018) bir yapısal bileşen olarak kullanılmaktadırlar. Canlı çalı demetleri ve kazıklar (Petrone ve Preti, 2010; Jotisankasa ve Taworn, 2016), çalı serilmesi (Bischetti vd., 2010) ve çalı şiltesi (Allen ve Fischenich, 2000) erozyona karşı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bitkilerin kök salması için zaman gerektiğinden erozyona karşı korumada gecikme yaşanabilir. Aynı zamanda, bitkilendirme içeren tüm akarsu rehabilitasyon ve erozyon koruma teknikleri taşıma ve dikim sırasında hatırı sayılır miktarda özen gerektirmekte ve bitkilerin canlı kalması dikim zamanına, doğadaki diğer bitkilerle

olan rekabete ve akarsudaki sedimantasyona bağlı olabilmektedir (Shields vd., 1995; Shields vd., 2008; Wu vd., 2014). Biyomühendislik sistemlerin dinamik yapısı ile alakalı belirsizlikler (kök dağılımındaki mevsimsel değişimler, bitki kuruması, vb.) evrensel bir tasarım standardına engel olmuştur (Tardío ve Mickovski, 2016).

Kum ve çakıl özelliği taşıyan iri daneli zeminlerde (daha önce de belirtildiği gibi bu tür zeminler kohezyon olmadığı için erozyona uğrayabilirler) ve özellikle de akarsu taban akışı seviyesinin altında (sızma oyulmasının önlenmesi için) bitkilerin yetişmesi zordur (USDA, 1996). Bundan dolayı bitkilendirmenin mümkün olmadığı durumlarda akarsu rehabilitasyon uygulamaları genellikle kıyı şevlerinin yerinde imalatını gerektirir (Lindow vd., 2009). Yapısal önlemler olarak kullanılan lifli akarsu kıyısı koruma tedbirlerinden lifli silindir (fiber roll) şiltesi (Beighley ve Valdes, 2009) ve erozyon kontrolü için kullanılan tekstil kumaşlar (geotekstil keçe/örtü) (Bhattacharyya vd., 2010) betonarme ve anroşman gibi yapılara göre inşaat sürelerinin daha kısa olması ve maliyetlerinin daha az olmasından dolayı son zamanlarda ortaya çıkmıştır. Biyomühendislik sistemler ve lifli akarsu kıyısı koruma tedbirleri restorasyon çalışmalarında sıklıkla birlikte kullanılmaktadırlar (Li vd., 2006).

Rastgele dağılmış olarak zemin içerisine katılan ayrık lifler (doğal veya yapay/insan yapımı) kayma dayanımı ve şev duraylılığı üzerinde biyomühendislik sistemlerdeki bitkilendirme tekniğinin etkisine benzer şekilde iyileştirme göstermektedir (Diambra vd., 2010; Divya vd., 2014). Laboratuvar deneyleri göstermiştir ki doğal lifler, örneğin hindistancevizi lifi (uzunluğu 40 mm ila 60 mm ve

ağırlıkça katkı içeriği %0 ila %1.5 arasında değişen) borulanma tipi erozyona karşı direnci artırırken (Babu ve Vasudevan, 2008) hurma lifi de (uzunluğu 15 mm ila 45 mm ve ağırlıkça katkı içeriği %0.25 ila %0.5 arasında değişen) katkı yapılan toprağın kayma dayanımını artırmıştır (Ahmad vd., 2010). Yapay lifler ise, örneğin cam lifi (uzunluğu 10 mm ila 15 mm arasında değişen ve ağırlıkça katkı içeriği %0.25 olan) katıldığı kumlu toprağa su muhtevassından bağımsız olan görünür bir kohezyon kazandırırken (Lovisa vd., 2010) literatürde kullanımına en sık rastlanan polipropilen (PP) lifler ise (uzunluğu 25 mm ve ağırlıkça katkı içeriği %0.3) pik kayma dayanımını ve kohezyonu artırmıştır (Nataraj ve McManis, 1997). Ayrıca, PP liflerin (uzunluğu 24 mm ve ağırlıkça katkı içeriği %0.5) katıldıkları kum malzemesine 15 kPa değerinde kohezyon kazandırdığı (Consoli vd., 2007) ve aynı zamanda (uzunluğu 25 mm ila 50 mm ve ağırlıkça katkı içeriği %0.05 ila %0.15 arasında değişen) borulanmaya karşı direnci iyileştirdiği gösterilmiştir (Das ve Viswanadham, 2010).

Lifler zemin iyileştirme projelerinde yukarıdaki laboratuvar test sonuçları ışığında yerel zeminin taşıma kapasitesini ve kayma direncini artıran bir katkı maddesi olarak göz önünde tutulmaya başlamıştır. Örneğin, PP liflerin zemin içerisine karıştırılması düşük maliyeti, kolay taşınabilir olması, hızlı imalatı ve yapısal duraylılığını uzun süre devam ettirmesi gibi avantajlara sahip olmasından dolayı acil durum uçak pistlerinin inşası için yenilikçi bir zemin iyileştirme teknolojisi olarak düşünülmüştür (Ahlrich ve Tidwell, 1994). Bunun için yapılan testler sonucunda uzunluğu 12 mm ve ağırlıkça içeriği %0.5 olan lif katkısının katkısız kuma göre daha yüksek kayma gerilmesi direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Liflerin sahadaki yerel zemine katılışı ve homojen olarak karıştırılması betonyer gibi

geleneksel inşaat ekipmanları ve sonrasında yüzeye yerleştirilmesi standart zemin kompaksiyon metotları kullanılarak yapılabilir (Li, 2005). Bir farklı yöntem ise toprağı ve lifi sırayla tabakalı şekilde yüzeye serip kültivatör vasıtasıyla karışımın elde edilmesi ve sonrasında sıkıştırma işleminin uygulanmasıdır (Falorca vd., 2011). Lif katkısıyla yapılan güçlendirme şev yüzeylerindeki lokal tamir işleri için de ümit vadeden bir alternatiftir (Li ve Zornberg, 2013). Örneğin, ağırlıkça katkının 3.6 kg/m^3 olduğu PP lif katkısı Gregory (2006) tarafından projelendirme aşamasında potansiyel ilerleyen göçmelerin tahmin edildiği bir otoyol dolgu şevinin (yüzey eğimi = 1 düşey:4 yatay) iyileştirilmesi metodu olarak düşünülmüştür. Bundan başka, Collins vd. (2015) PP lifleri (uzunluğu 24 mm, 76 mm ve ağırlıkça katkı içeriği %0.5) otoyol dolgu şevlerindeki kohezyonsuz toprağın inşaat bitiminden hemen sonra (bitkilendirme çalışmalarının daha neticesi alınmadan) oluşabilecek yağmur kaynaklı erozyonunun kontrolü için kullanmıştır. Lif katkısı ile gelen duraylılık bitki örtüsünün daha çabuk oluşmasına ve bu sayede akarsulara olan sediman akışının azalmasına olanak sağlamaktadır. Eab vd. (2014) göstermiştir ki 10 mm uzunluğundaki polyester lifin %2.0 ağırlıkça katkı oranıyla zemine karıştırılması yağmur simülatörü altında yapılan katkısız laboratuvar deneylerindeki göçmeyi önlemiştir.

Gerek laboratuvar testlerinin gerekse de saha uygulamalarının lif kullanımının zeminin kayma direncini artırdığını göstermesine rağmen şev yüzeylerinin suni olarak lif katkısıyla güçlendirilmesi sızma kuvvetleri altındaki performansın bilinmemesinden dolayı şu ana kadar akarsu rehabilitasyonu çalışmalarında tatbik edilmemiştir. Bu yüzden, Akay vd. (2016, 2018) lif katkılı kumlu şevlerin yeraltı suyu sızma akımı altındaki davranışının iç yüzünü anlamak için laboratuvarında iki-boyutlu

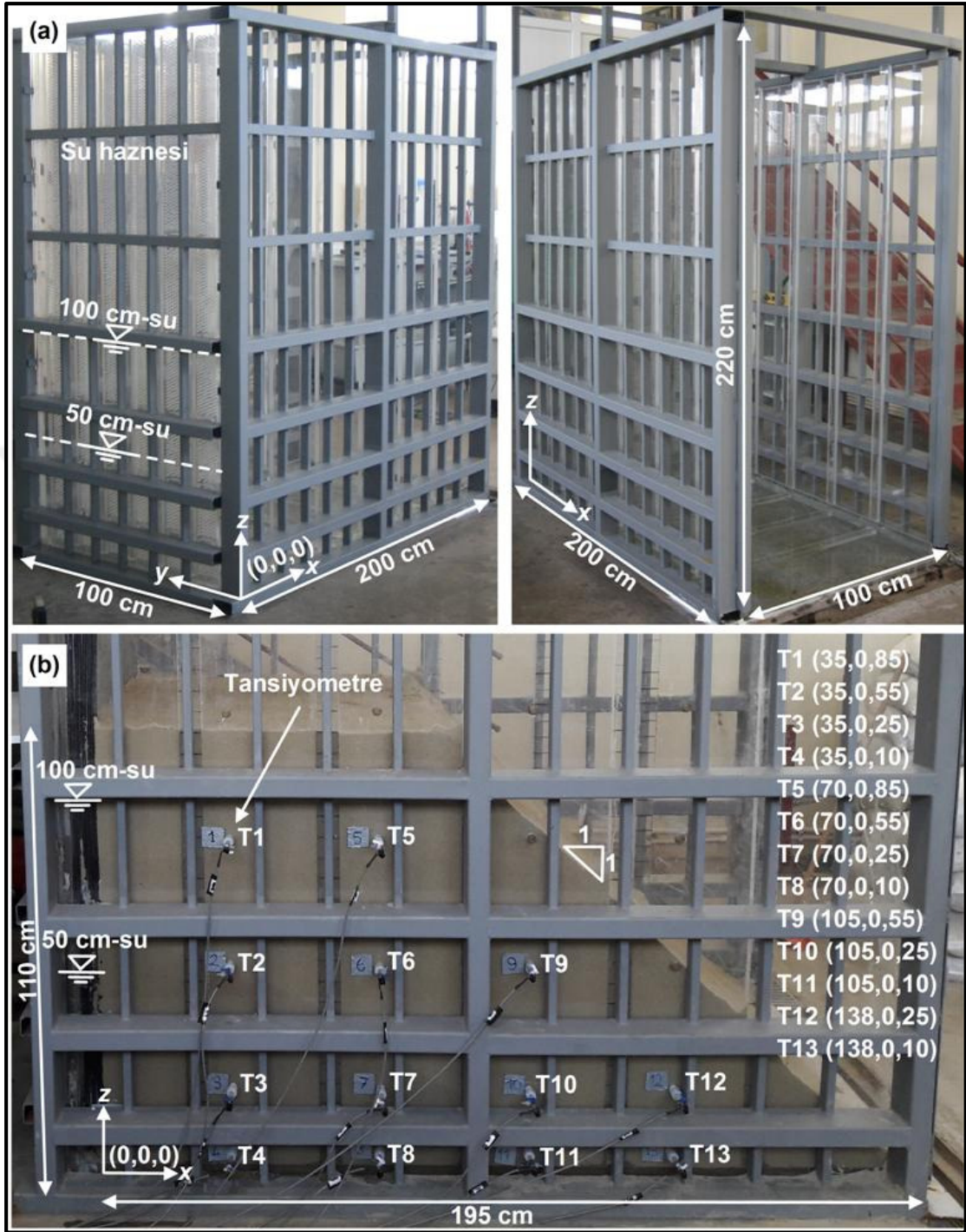
(2D) fiziksel Şev model (100 cm uzunluğunda, 20 cm genişliğinde ve 55 cm yüksekliğinde) deneyleri yapmış ve PP lif katkısının (uzunluğu 6 mm, 12 mm ve ağırlıkça katkı iğeriği %0.3, %1.0) katkısız kum Őevinde oluşan sızma sularının tetiklediği ilerlemeli (progresif) göçmeleri engellediğini fotoğraflarla göstermiştir. Aynı zamanda Şev içerisindeki boşluk suyu basınęlarını ve kum-lif kompozit malzemesinin dayanım parametrelerini (efektif kohezyon ve içsel sürtünme açısı) kullanarak yapılan nümerik analizler ile iyileşen global güvenlik faktörü de hesaplanmıştır.

Bu ęalıřmada yeraltı suyu kaynaklı sızma suyu etkisi altında oluşan erozyon süreci laboratuvar erozyon kanalında katkısız ve lif katkılı olarak inşa edilen daha büyük lęekli fiziksel Şev modelleri (195 cm uzunluğunda, 100 cm genişliğinde ve 110 cm yüksekliğinde) kullanılarak araştırılmıştır. Üç-boyutlu (3D) lazer tarama tekniği kullanılarak ęıkartılan Şev yüzeyi sayısal topografyası (nokta bulutu) sayesinde erozyon debisi (E , kg/s) hesaplamaları yapılmıştır. Ek olarak, lif katkılı kum numuneler (lif ağırlıkça katkı oranı %0.0 ila %1.0 arasında) zerinde liften kaynaklanan ek kohezyonun, c_f , belirlenmesi için üç-eksenli basınę testleri (konsolidasyonlu drenajlı, CD) ve doğun hidrolik iletkenlik katsayısının, K_{sat} , belirlenmesi için de sabit seviyeli hidrolik geçirgenlik testleri yapılmıştır. Ayrıca, hidrolik testler kapsamında doğun olmayan ortamın geçirgenlik karakteristiklerini belirlemek için su tutma testleri de yapılmıştır. Son olarak, deneylerden elde edilen erozyon hacimleri ila sentetik lif katkı oranı arasında ampirik bir ilişki kurulmuştur.

III. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında toplam 5 adet fiziksel şev modeli inşa edilmiştir. Bu deneylerden biri sadece kum malzemesi kullanılarak yapılan şevden (katkısız şev) oluşurken diğerleri lif katkısı ile güçlendirilmiş şevlerden oluşmuştur. Akarsu kıyısı fiziksel laboratuvar modelleri 195 cm uzunluğunda, 100 cm genişliğinde ve 110 cm yüksekliğindedir (Şekil 3.1). Şev modelleri kuru birim hacim ağırlığı 14 kN/m^3 ve şev yüzeyi 45° olacak şekilde bir erozyon kanalı içerisine 5'er cm yüksekliğindeki tabakaların kontrollü biçimde sıkıştırılmasıyla inşa edilmiştir. Modellerde doygun durumda kohezyonu olmadığı için diğer toprak türlerine göre erozyon sürecinin daha kolay izlenmesinden dolayı kum malzemesi kullanılmıştır. Kumun malzeme özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Bitki köklerinin doğal yamaçlardaki erozyona karşı gösterdiği etkiyi taklit edebilmesi için 6 mm ve 18 mm uzunluğundaki ayırık monofilament polipropilen (PP) lif (model no: M06 ve M18, Polyfibers Polipropilen Elyaf Sanayi, İstanbul, Türkiye) kum içerisine katılmıştır. Çalışmada kullanılan lifin malzeme özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Kullanılan PP lifin 350 MPa olan çekme mukavemeti (TS) birçok tekil bitki kök lifinin sahip olduğu dayanımla benzer büyüklük mertebesindedir. Örneğin, Preti ve Giadrossich (2009) tarafından katırtırnağı (Spanish broom/ Spartium junceum) bitkisinin köklerinin kullanıldığı 98 çekme testi sonucunda çekme dayanımı ile kök lifi çapı arasında geliştirilmiş regresyon denklemi bu çalışmada kullanılan PP lifin eşdeğer çapı (D_{eq}) olan $32 \mu\text{m}$ için 108 MPa değerinde çekme mukavemeti vermektedir.



Şekil 3.1. Laboratuvar erozyon kanalı: (a) çelik çerçeve boyutları; (b) şev modeli ve şeffaf Poli Metil Metakrilat (PMMA/Pleksiglas) yan duvara montajı yapılan tansiyometrelerin (T1-T13) koordinatları (x, y, z)

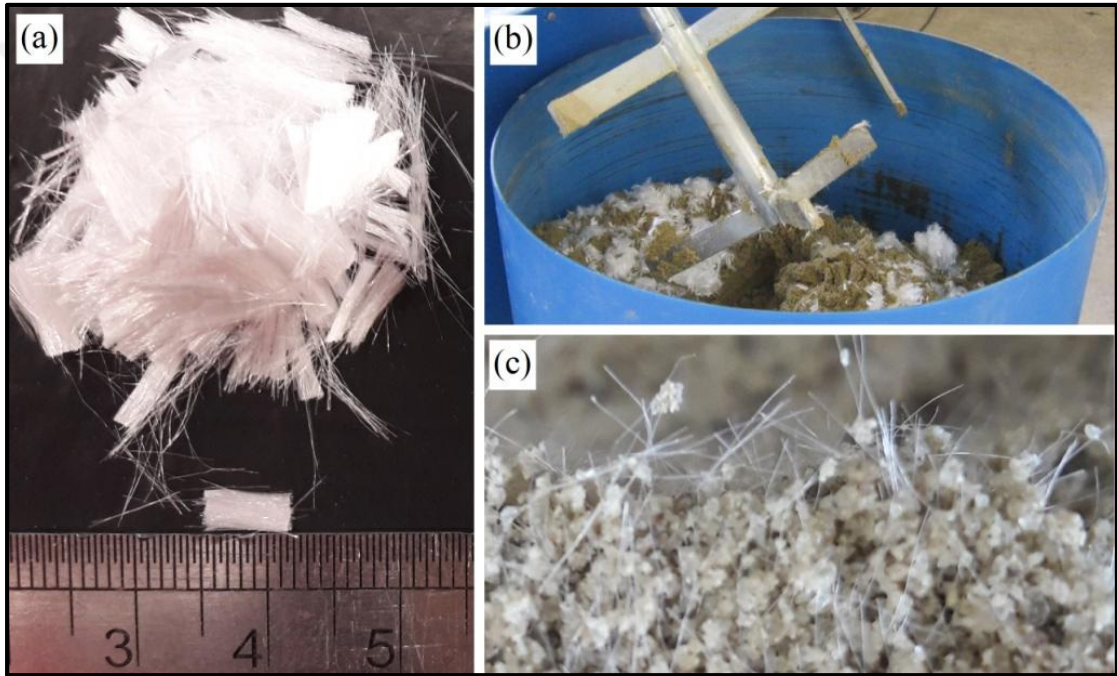
Tablo 3.1. Akarsu kıyısı fiziksel model şevlerinde kullanılan kumun özellikleri

Özellik	Sembol ve birimi	Değeri
Sınıflandırması	USDA taksonomisi	İri Kum
Dane çapı dağılımı	Kum (%), silt + kil (%)	98.0, 2.0
Efektif çap	d_{10} (mm)	0.17
Ortalama çap	d_{50} (mm)	0.39
Uniformluk katsayısı	C_u (d_{60}/d_{10})	3.5
Eğrilik katsayısı	C_c ($d_{30}^2/d_{10}d_{60}$)	0.7
Bağlı özgül ağırlık	S	2.65
Efektif kohezyon	c' (kPa)	0
Efektif içsel sürtünme açısı	ϕ' ($^\circ$)	29.6
Doygun hidrolik iletkenlik	K_{sat} (m/s)	1.5×10^{-4}
van Genuchten parametreleri	$\theta_s, \theta_r, \alpha$ (1/cm), n	0.45, 0.0, 0.06, 2.69

Tablo 3.2. Akarsu kıyısı fiziksel model şevlerinde kullanılan lifin özellikleri

Özellik	Sembol ve birimi	Değeri
Kompozisyon	Polimer (polipropilen)	Monofilament PP
Boy	L (mm)	6, 18
Lineer yoğunluk	D (denier) (g/9000 m)	6.5
Eşdeğer çap	D_{eq} (μm)	32
Bağlı özgül ağırlık	S	0.91
Su emme	w (%)	Nil
Erime sıcaklığı	T_m ($^\circ\text{C}$)	165
Elastisite modülü	E (GPa)	1.0
Çekme gerilmesi dayanımı	TS (MPa)	350

Laboratuvarda elde edilen tecrübenin gösterdiği üzere PP liflerin topaklanmadan kuru kum ile homojen olarak karışması oldukça zordur. Bundan dolayı, kum malzemesi ağırlıkça su muhtevası 0.08 ila 0.10 olacak şekilde önce nemlendirilmiş, daha sonra da düşey betonyer içerisinde rastgele dağılmış (segregasyonsuz homojen) bir karışım elde edinceye kadar (görsel inceleme) PP liflerle karıştırılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Sentetik lif katkılı kumun hazırlanması: (a) Karışım öncesi PP lif (6 mm); (b) düşey eksenli betonyer; (c) 6 mm %0.3 lif katkılı homojen karışım

Deneylerde kullanılacak ağırlıkça lif katkı oranları (kuru lif ağırlığının kuru kum ağırlığına oranı) ileride 4. Bölüm: Bulgular ve Tartışma bölümünde değinilecek üç- eksenli basınç testleri sonucunda %0.3 ve %1.0 olarak belirlenmiştir. Katkısız kumdan oluşan akarsu kıyı model deneyinin kuru birim hacim ağırlığı 14 kN/m^3

olduğundan porozitesi 0.45'dir. Lif katkılı modellerin kompozit kuru birim hacim ağırlıkları da %0.3 ve %1.0 lif içerikleri için sırasıyla 14.04 kN/m^3 ve 14.14 kN/m^3 olmaktadır.

Doygun hidrolik iletkenlik katsayısının, K_{sat} , lif katkısı ile değişip değişmediğini anlamak için sabit seviyeli hidrolik geçirgenlik testler (ASTM, 2006) kuru kum birim hacim ağırlığı 14 kN/m^3 olan ve ağırlıkça lif katkısı oranı (w_f) %0.0'dan başlayarak (katkısız numune) %0.1 artışlarla %1.0 katkı oranına kadar Levent Yüzer (2018) tarafından yapılmıştır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Lif katkılı kumun doygun hidrolik iletkenlik katsayısı ($\times 10^{-4} \text{ m/s}$)

w_f	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
K_{sat}	1.5	1.5	1.3	1.6	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	0.9

Doygun olmayan ortamın geçirgenlik karakteristiklerini belirlemek için ise aynı katkı oranları için (%0.0 ila %1.0 arası) su tutma testleri Akay vd. (2013) tarafından geliştirilen test metodu kullanılarak 6.4 cm uzunluğunda ve 7.3 cm çapındaki numuneler üzerinde Levent Yüzer (2018) tarafından yapılmıştır. Lif uzunluğunun ve katkı oranlarının kumun yarı-doygun hidrolik özelliğini değiştirmediği görüldüğünden, Tablo 3.1'de katkısız kum için verilen van Genuchten model parametreleri (van Genuchten, 1980) katkılı kum için de geçerlidir.

Lif katkısından kaynaklanan kohezyonun, c_f , belirlenmesi için konsolidasyonlu drenajlı (CD) üç-eksenli basınç testleri (ASTM, 2011) bilgisayar-kontrollü olarak

14.5 cm uzunluğunda ve 7.3 cm çapında ve aynı katkı oranlarına (%0.0 ila %1.0 arası) sahip numuneler (kuru kum birim hacim ağırlığı: 14 kN/m³) üzerinde Levent Yüzer (2018) yapılmıştır. Bu tezde kullanılacak lif katkı oranları için elde edilen sonuçlar 6 mm ve 18 mm lif uzunlukları için sırasıyla Tablo 3.4 ve Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.4. 6 mm lif katkısı için konsolidasyonlu drenajlı (CD) test değerleri

6 mm lif katkı oranı (%)	Pik Deviatorik Gerilme (kPa)			Efektif kohezyon c' (kPa)	Efektif içsel sürtünme açısı ϕ' (°)
	Hücre Basıncı 50 kPa	Hücre Basıncı 100 kPa	Hücre Basıncı 200 kPa		
0.0	114.1	196.2	389.5	0	29.6
0.3	97.1	220.4	463.0	1.6	31.2
1.0	129.8	270.7	484.9	6.2	32.5

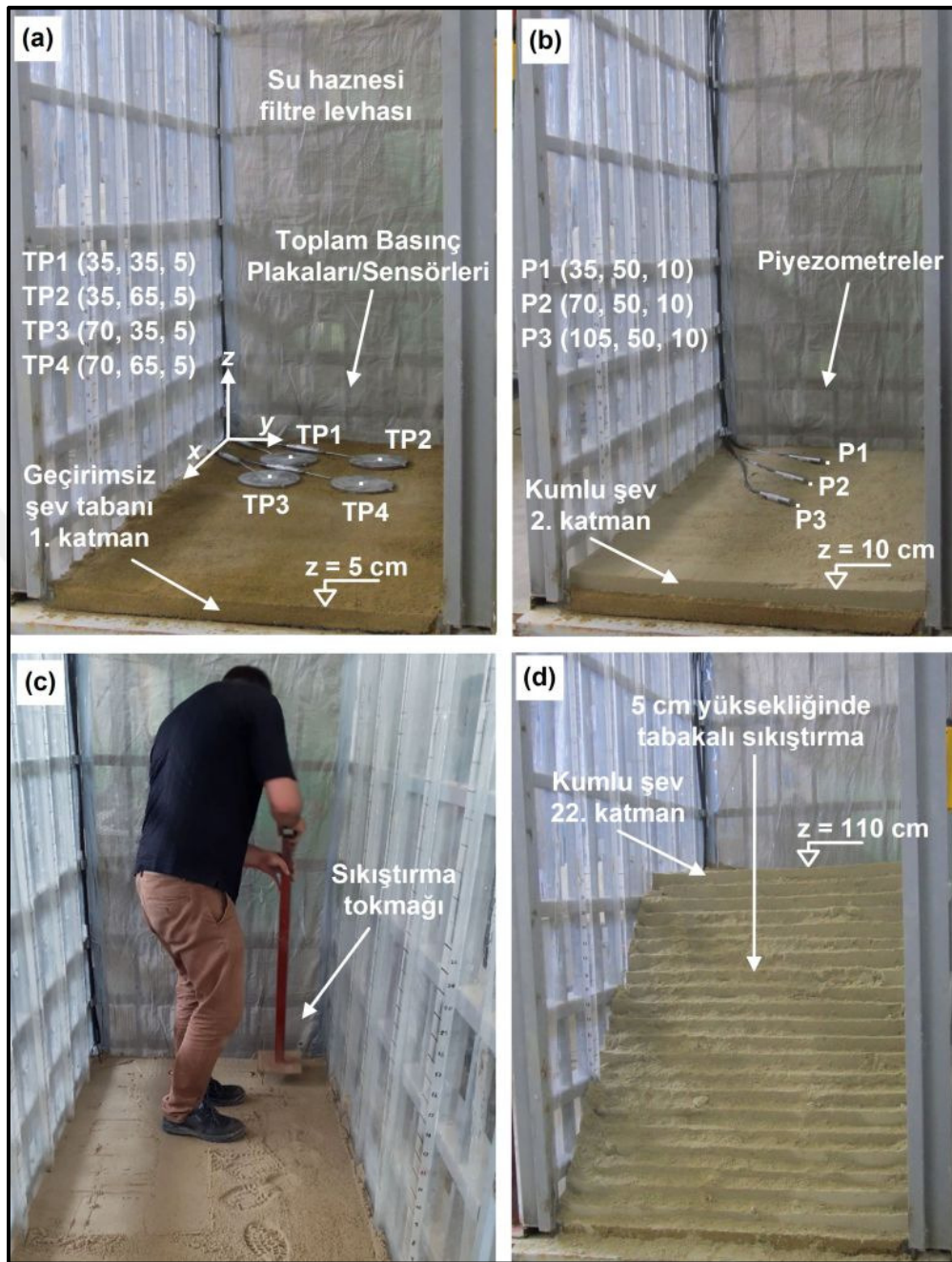
Tablo 3.5. 18 mm lif katkısı için konsolidasyonlu drenajlı (CD) test değerleri

18 mm lif katkı oranı (%)	Pik Deviatorik Gerilme (kPa)			Efektif kohezyon c' (kPa)	Efektif içsel sürtünme açısı ϕ' (°)
	Hücre Basıncı 50 kPa	Hücre Basıncı 100 kPa	Hücre Basıncı 200 kPa		
0.0	114.1	196.2	389.5	0	29.6
0.3	167.9	253.6	509.4	18.4	31.6
1.0	251.5	417.9	668.7	31.1	35.2

Her bir akarsu kıyısı şev modelinin erozyon kanalının memba kısmında bulunan su haznesinde sabit tutulan 50 cm-H₂O ve 100 cm-H₂O değerindeki iki farklı piyezometrik yükseklik sınır koşulu altında deneyi yapılmıştır. 50 cm-H₂O sınır

koşulu altında tamamlanan deneyden sonra şev modelleri doymun olmayan duruma gelince kadar drene edilmiş, daha sonra sınır koşulu 100 cm-H₂O piyezometrik yüksekliğe çıkartılmasıyla şevin performansı daha yüksek hidrolik eğim altında test edilebilmiştir. Deneyler erozyon kanalının memba kısmında bulunan haznesine su verilmesiyle başlamıştır (başlangıç zamanı, $t = 0$) (Şekil 3.1). Memba kısmından infiltrasyonla model içerisine giren ve mansap kısmına doğru ilerleyen yeraltı suyunun şev yüzeyinden çıkış zamanı (sızma zamanı) da kaydedilmiştir.

Deneyler süresince akarsu kıyısı şev modeli içerisinde oluşan pozitif boşluk suyu basınçları 3 adet titreşen telli (vibrating wire – VW) piyezometre (model no: 52610520, Durham Geo Slope Indicator, Stone Mountain, Georgia, Amerika Birleşik Devletleri) tarafından 120 s aralıklarla ölçülmüştür (Şekil 3.3). Piyezometreler kıyı modelinin inşası sırasında ikinci tabakanın sıkıştırılmasından hemen sonra $z = 10$ cm seviyesinde yerleştirilmiştir. Buna ek olarak, erozyon kanalı yan duvarı boyunca konumlandırılan 13 adet tansiyometre (model no: CL-029B, Soil Measurement Systems, Tucson, Arizona, Amerika Birleşik Devletleri) şev yan yüzeyinde oluşan negatif (emme) ve pozitif boşluk suyu basınçlarını ölçmüştür (Şekil 3.1b). Tansiyometreler 10 s aralıkla yapılan ölçümü veri toplayıcısına (model no: CR1000, Campbell Scientific, Logan, Utah, Amerika Birleşik Devletleri) aktaran çift yönlü basınç dönüştürücüye (model no: ASDXRRX005PDAA5, Honeywell Sensing and Control, Golden Valley, Minnesota, Amerika Birleşik Devletleri) bağlanmıştır. Bu ekipman düzeneği daha önce Akay (2016, 2018), Akay ve Özer (2015, 2018a, 2018b), Akay vd. (2012, 2013, 2014a, 2014b, 2016a, 2016b, 2017, 2018a, 2018b), Özer (2016), Özer ve Akay (2014) ve Özer vd. (2014) tarafından başarıyla kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Laboratuvar şev modeli imalat aşamaları: (a) geçirimsiz şev tabanının sıkıştırılması ve üzerine 4 adet toplam basınç plakalarının yerleştirilmesi; (b) kumun 2. katman olarak sıkıştırılması ve üzerine 3 adet piyezometrenin yerleştirilmesi; (c) sıkıştırma işleminin 5 cm tabakalar halinde el tokmağı ile yapılması; (d) en üst tabakanın (22. tabaka) bitirilmesiyle 110 cm yüksekliğindeki şev inşasının tamamlanması

Alt sıra tansiyometrelerinden T4, T8 ve T11 ile şev içerisindeki P1, P2 ve P3 piyezometrelerin konumlarının sırasıyla aynı x ve z koordinat değerlerine sahip olması ölçülen pozitif boşluk suyu basınçlarının doğrudan karşılaştırılmasına olanak vermektedir. Bu sayede şev ortasındaki ve model yan duvarındaki yeraltı suyu ilerlemesinin şev genişliği boyunca üniform olup olmadığı anlaşılacaktır. Deneyle piyezometreler ve tansiyometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçlarının zamanla değişmediği durumda (kararlı yeraltı suyu akımı olduğunda) erozyon kanalının memba kısmında bulunan haznesindeki suyun boşaltılmasıyla sonlandırılmıştır.

Akarsu kıyısı şev modellerinin fiziksel durumlarının deney süresince takip edilmesinde dijital fotoğraflamanın kullanılmasına ek olarak bu çalışma üç-boyutlu (3D) lazer tarama tekniğini kullanarak şev yüzeylerinin sayısal topografyasını (nokta bulutunu) çıkartmıştır. Bu sayede erozyon hacimleri belirlenerek sızma erozyonu debisi (E , kg/s) hesaplamaları yapılmıştır. Lazer tarama tekniği hidrolojik çalışmalarda ilk kez saha uygulamalarında karşılaşılmaktadır. Örneğin, Pizzuto vd. (2010) ve Resop ve Hession (2010) akarsu kıyısı geri çekilmesinin ve yatak genişlemesinin topoğrafik olarak izlenmesinde sırasıyla LiDAR (Light Detection and Ranging) ve yersel lazer tarayıcı (terrestrial laser scanning) teknolojilerini kullanmışlardır. Chu-Agor vd. (2008) ise lazer tarama teknolojisini laboratuvarında yaptıkları erozyon kanalı deneyleri sırasında 25 cm yüksekliğinde ve 50 cm genişliğindeki şevde oluşan oyulmaların üç-boyutlu koordinatlarını elde etmekte kullanmıştır. Aksoy vd. (2012) de bu teknolojinin ümit vaat edici olduğunu 650 cm boyundaki ve 136 cm genişliğindeki erozyon kanalının topografyasının elde

edilmesiyle belirtmiştir. Son olarak, Akay vd. (2017) ve Akay ve Özer (2018a, 2018b) bu çalışmada da kullanılan erozyon kanalında yapılan model deneylerinde erozyon hacimlerinin belirlenmesinde kullanmıştır. Bu çalışmada elde taşınır lazer tarayıcı (model no: Freestyle^{3D}, FARO, Lake Mary, Florida, Amerika Birleşik Devletleri) kullanılarak elde edilen 3D nokta bulutları 0.2 mm çözünürlükte ve 1.5 mm hassasiyettedir. Sayısal nokta bulutları daha sonra açık kaynaklı yazılım olan CloudCompare (Esposito, 2017; Thiele vd., 2017; CloudCompare, 2018) bilgisayar programı ile erozyon hacimlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Tez kapsamında yapılan fiziksel şev modelleri için deney koşulları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Fiziksel şev modelleri için deney koşulları

Deney koşulu	Değer
Boyutlar (En, Boy, Yükseklik)	100 cm, 195 cm, 110 cm
Su Haznesi (Piyezometrik Yük) Sınır Koşulları	50 cm-su, 100 cm-su
Kuru kum miktarı	2233 kg
Lif Katkısı Ağırlıkça Oranları	%0.0, %0.3, %1.0
Lif Uzunlukları	6 mm, 18 mm
Deney Sayısı	10 (2 katkısız + 8 katkılı)

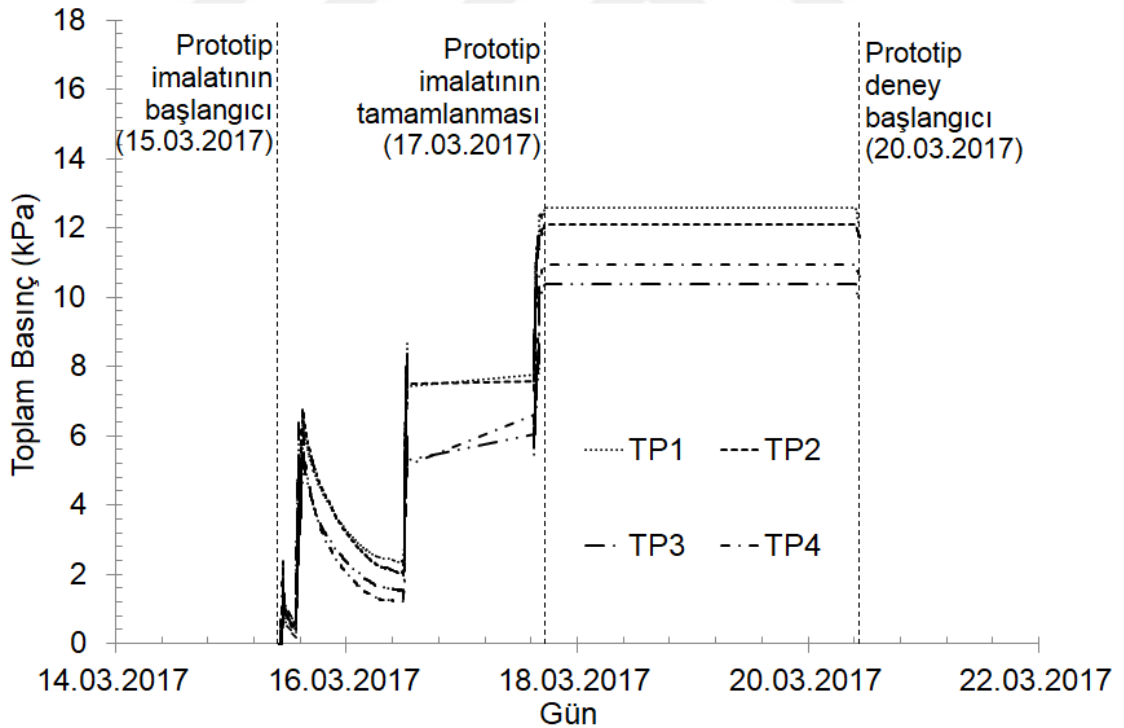
Sızma kuvvetlerinin etkisi altındaki şevlerin duraylılık/göçme analizleri lif katkılu kumun geoteknik ve hidrolik parametrelerini kullanan sayısal modellerle yapılmıştır. Bu amaçla önceki çalışmalarda da (Akay vd., 2013, 2014b; Özer vd.,

2014; Akay, 2016; Özer, 2016) kullanılan SLOPE/W (Geo-Slope International Ltd. tarafından geliştirilen sonlu elemanlar bilgisayar programları) şev duraylılığının modellenmesinde kullanılmıştır. Bu amaçla, zeminin Mohr-Coulomb kayma zarfı parametreleri SLOPE/W şev duraylılığı bilgisayar modeline girilmiştir (Geo-Slope, 2012). Buna ek olarak duraylılığın hesaplanacağı zamanlar olarak seçilen deneylerin başlangıç anında, sızma zamanında ve kararlı akım zamanlarındaki boşluk suyu basıncı dağılımları (tansiyometre okumaları) gözlem verisi olarak modele tanımlanmıştır. Deney programında belirtilen toplam 10 adet deneye (2 katkısız + 8 katkılı) ait dairesel göçmeye karşı şev güvenlik katsayıları (FS) limit denge yaklaşımı ile çözüm yapan Spencer metodu (Spencer, 1967) kullanılarak hesaplanmıştır.

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Lif Katkısız Şev

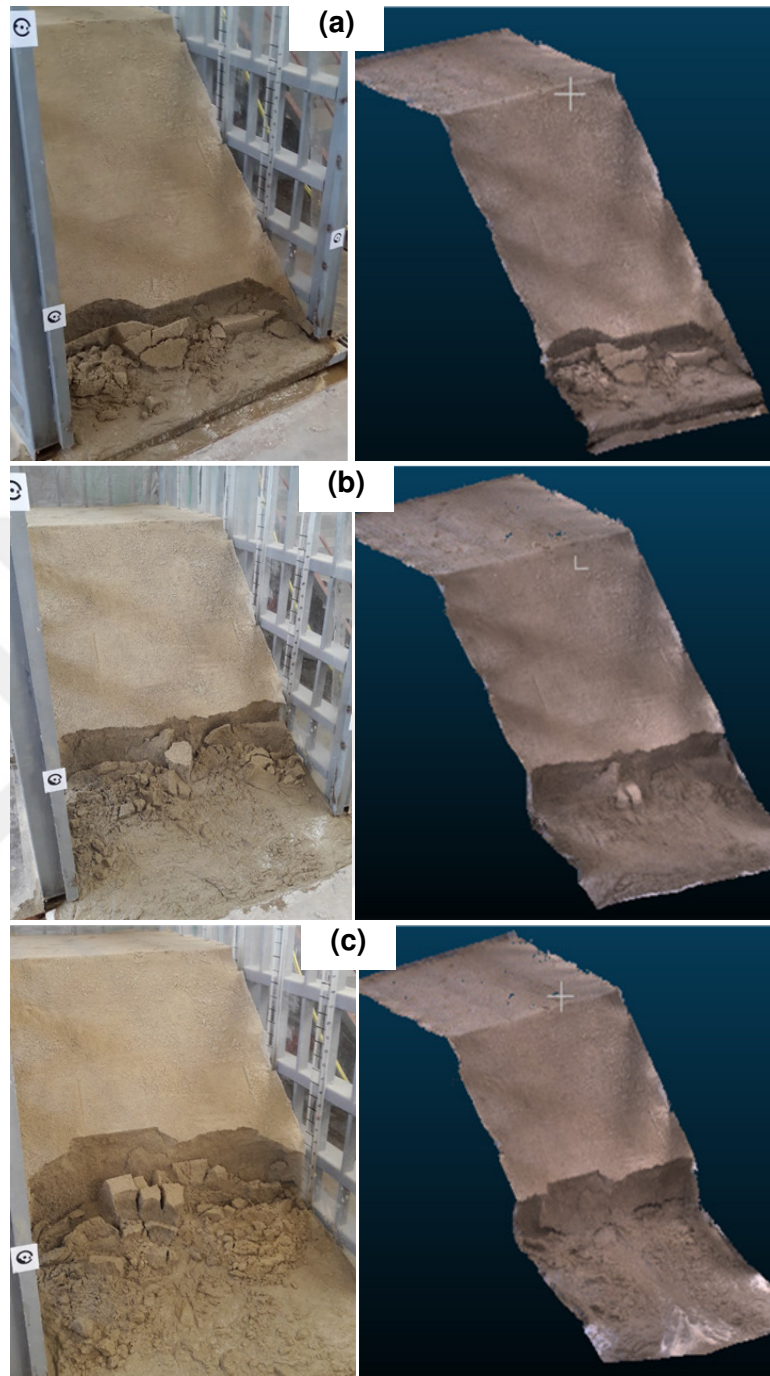
Katkısız şev imalatı 15 Mart 2017 tarihinde başlamış ve 17 Mart 2017 tarihinde bitirilmiştir. Bu zaman içerisinde 5 cm yüksekliğinde kademeler halinde yapılan kontrollü sıkıştırma işlemi sırasında (Şekil 3.3) ölçülen toplam basınç kaydı Şekil 4.1’de verilmiştir. Dolgu imalatı tamamlandığında 16.2 kPa ($14 \text{ kN/m}^3 \times 1.05 \text{ m} \times (1 + \%10 \text{ su muhtevası})$) olarak tahmin edilen 105 cm yüksekliğindeki (110 cm şev yüksekliği – 5 cm basınç plaka seviyesi) zemin toplam basınç değerine yaklaşıldığı görülmektedir.



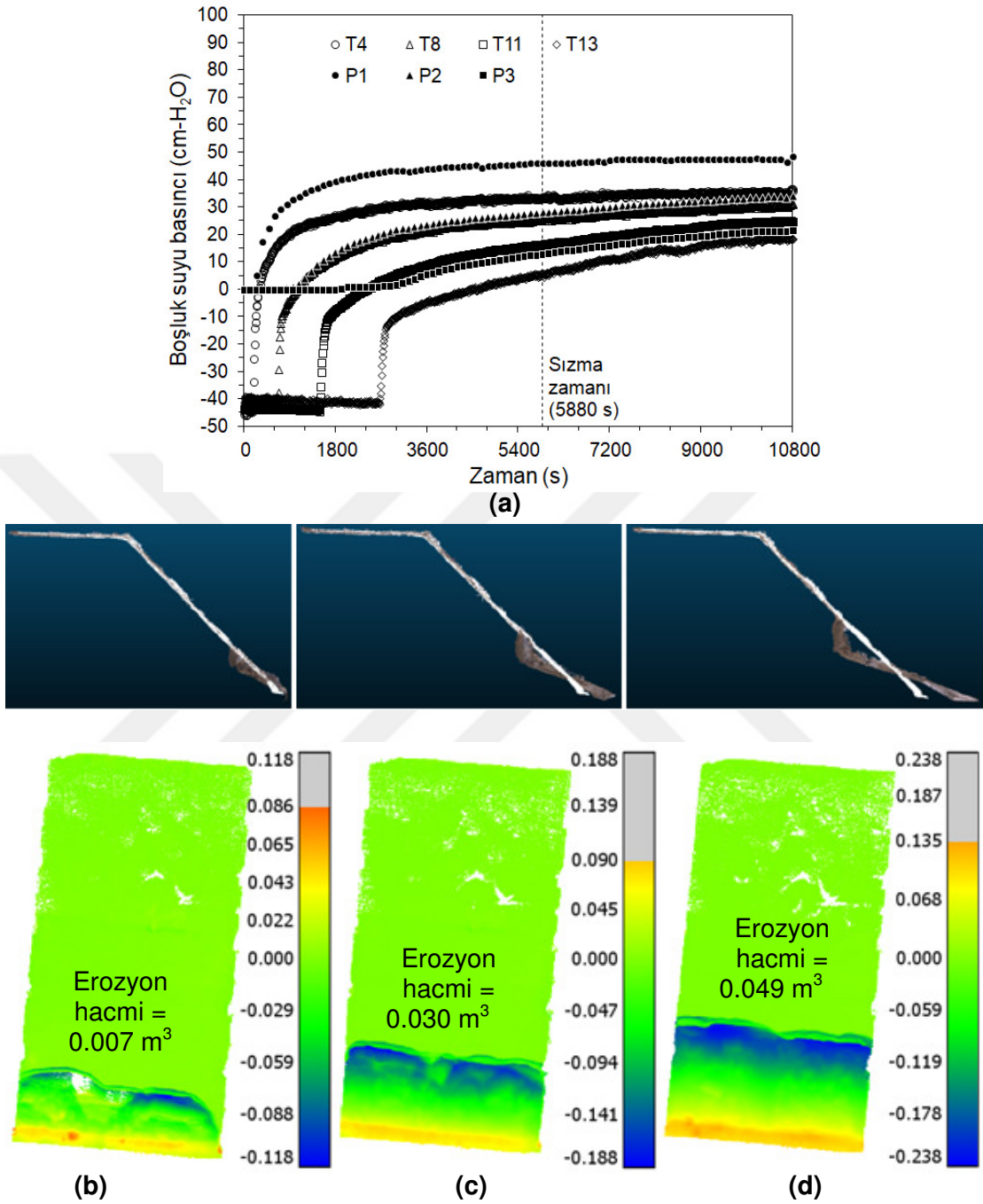
Şekil 4.1. Katkısız şev modelinin inşasında toplam basınç plakaları tarafından ölçülen örtü basınçları

20 Mart 2017 tarihinde 50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu (SK) altında başlayan deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı $t = 5880$ s zamanında gerçekleşmiştir. Topuk bölgesinden sızma sularının çıkmasıyla birlikte kumlu şevde erozyon başlamıştır (Şekil 4.2a). Deney sonunda ise sızma erozyonu $y = 20$ cm ile $y = 30$ cm düzlemleri (tansiyometrelerin kurulduğu kanal yan duvarı $y = 0$ düzlemidir, Şekil 3.1) arasında kanal tabanından 55 cm yüksekliğe kadar etkisini göstermiştir (Şekil 4.2c). Deney sırasında yapılan lazer taraması sonucu elde edilen sayısal nokta bulutları da Şekil 4.2'de sunulmuştur. Sızma erozyonunun deney sonuna doğru azalarak bitmesi şev içerisindeki yeraltı suyu akımının kararlı duruma gelmesinden çok erozyonla topuk bölgesine yığılan kum malzemesinin şevi sızma kuvvetlerine karşı korumasındandır. Burada belirtmek gerekir ki, laboratuvar ortamında topuk bölgesinde erozyonla biriken malzeme doğada olduğu gibi akarsular tarafından sürüklenmeye maruz kalmamıştır. Erozyonla şev yüzeyinden topuk bölgesine yığılan malzemenin erozyonun ilerlemesini durdurmasına Midgley vd. (2013) şevin kendi kendini iyileştirmesi olarak tanımlamıştır.

Deney sırasında piyezometreler ve $z = 10$ cm seviyesinde olan tansiyometreler tarafından ölçülen boşluk-suyu basınçları Şekil 4.3(a)'da verilmiştir. T4, T8 ve T11 ile şev içerisindeki P1, P2 ve P3 tarafından ölçülen boşluk-suyu basınçlarının benzer olması freatik hattın su haznesinden şev yüzeyine doğru ilerleyişinin genişlik boyunca uniform olduğunu göstermektedir. Lazer taramasından elde edilen nokta bulutlarının şevin deforme olmamış $t = 0$ anındaki nokta bulutu ile kıyaslanmasıyla elde edilen erozyon hacimleri Şekiller 4.3(b), 4.3(c) ve 4.3(d)'de verilmiştir. Deney su haznesinin boşaltılmasıyla $t = 10800$ s zamanında sonlandırılmıştır.



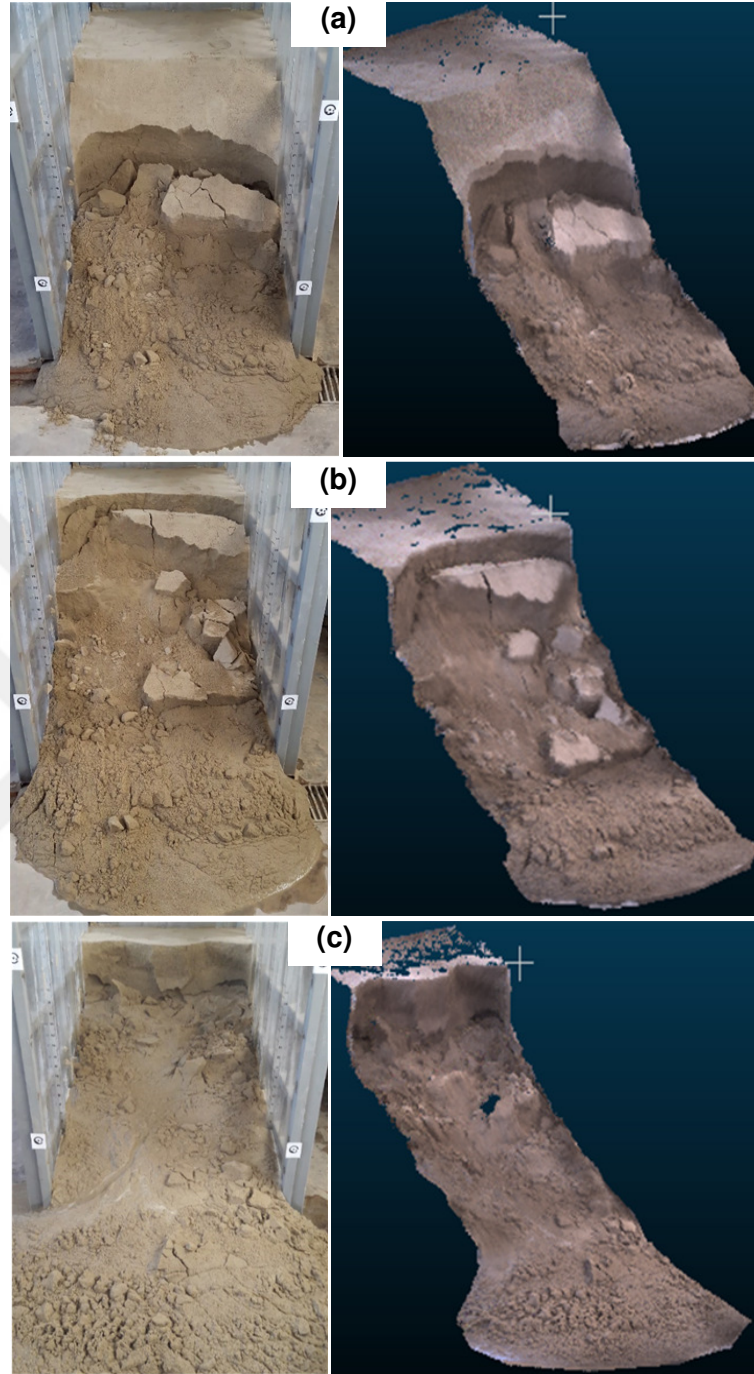
Şekil 4.2. Katkısız şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu: (a) $t = 6840$ s; (b) $t = 7920$ s; (c) $t = 10800$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi: 20/03/2017)



Şekil 4.3. Katkısız şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında
 (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) $t = 6840 \text{ s}$, (c) $t = 7920 \text{ s}$, (d) $t = 10800 \text{ s}$ zamanlarındaki nokta bulutu enkesitleri ve sızma erozyonunun düşey (z eksen) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 20/03/2017)

Katkısız şev modeli 4 gün serbest drenaja bırakıldıktan sonra 24 Mart 2017 tarihinde 100 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altındaki deney başlamıştır. Bu deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı 50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altındaki deneye göre daha önce ($t = 1740$ s zamanında) gerçekleşmiştir. Hem şev nemi başlangıç koşulunun ilk deneye göre daha ıslak olması (Şekil 4.3a'daki dört tansiyometre dahil olmak üzere $t = 0$ anındaki 13 tansiyometrenin ortalaması = -36.8 cm-su; Şekil 4.5a'daki dört tansiyometre dahil olmak üzere $t = 0$ anındaki 13 tansiyometrenin ortalaması = -28.4 cm-su) hem de su haznesindeki hidrolik sınır koşulunun 100 cm-su'ya çıkartılmış olması gözlemlenen sızma zamanı süresini azaltmıştır. Artan hidrolik eğimle birlikte 50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altında 'kendi kendini iyileştirmiş' şevde tekrar yeraltı suyu sızma erozyonu başlamıştır (Şekil 4.4). Kararlı akım oluşmadan önce sızma erozyonunun etki alanı şev kretine ($z = 110$ cm) ulaşmıştır (Şekil 4.4b). Erozyonun su haznesine doğru ilerlemesi yavaşlayarak devam etmiş ve kararlı akım oluştuğunda deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.4c).

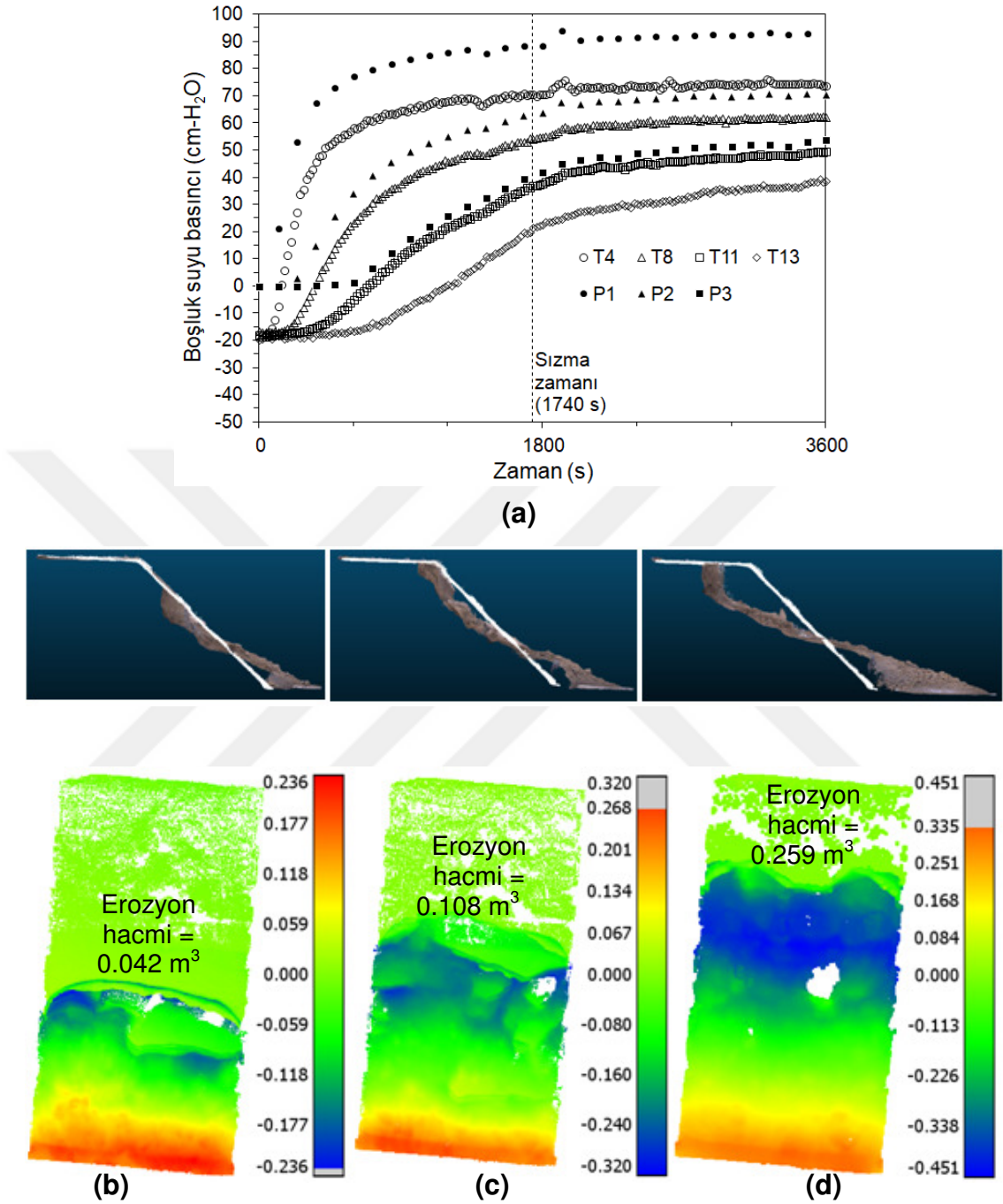
Deney sırasında piyezometreler ve $z = 10$ cm seviyesinde olan tansiyometreler tarafından ölçülen boşluk-suyu basınçları Şekil 4.5(a)'da verilmiştir. T4, T8 ve T11 ile şev içerisindeki P1, P2 ve P3 tarafından ölçülen boşluk-suyu basınçlarının benzer olması freatik hattın su haznesinden şev yüzeyine doğru ilerleyişinin genişlik boyunca uniform olduğunu göstermektedir. Lazer taramasından elde edilen nokta bulutlarının şevin deforme olmamış $t = 0$ anındaki nokta bulutu ile kıyaslanmasıyla elde edilen erozyon hacimleri Şekiller 4.5(b), 4.5(c) ve 4.5(d)'de verilmiştir. Deney su haznesinin boşaltılmasıyla $t = 3600$ s zamanında sonlandırılmıştır.



Şekil 4.4. Katkısız şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu:

(a) $t = 2160$ s; (b) $t = 2520$ s; (c) $t = 3600$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi:

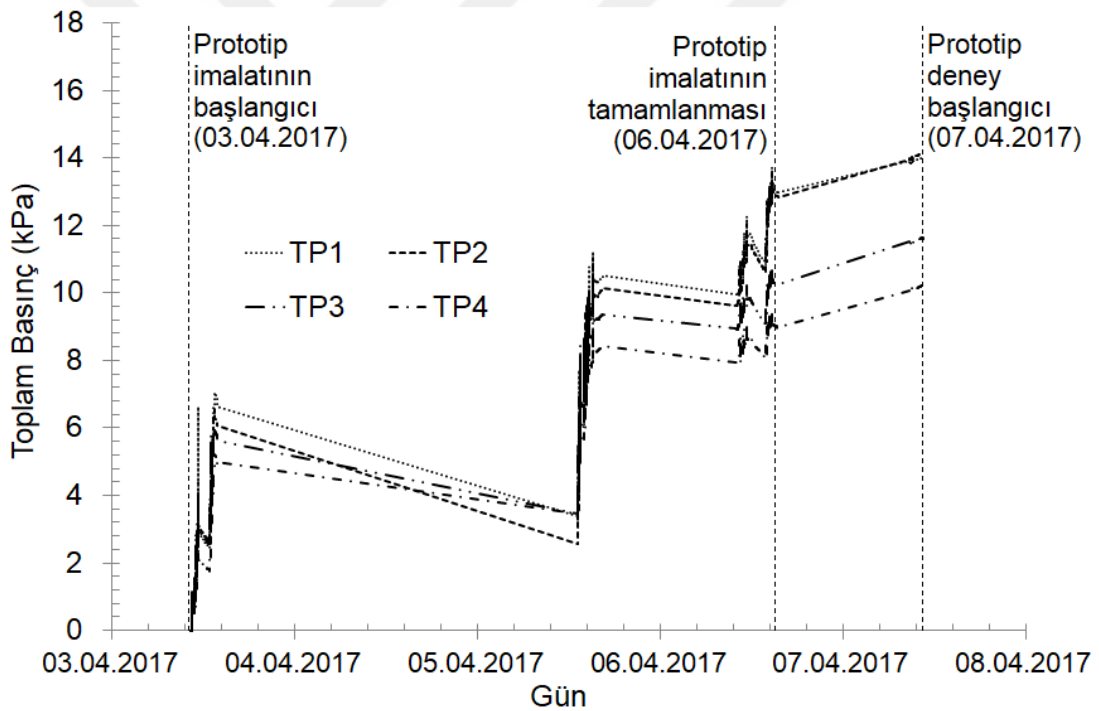
24/03/2017)



Şekil 4.5. Katkısız şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreleri tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) t = 2160 s, (c) t = 2520 s, (d) t = 3600 s zamanlarındaki nokta bulutu enkesitleri ve sızma erozyonunun düşey (z eksen) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 24/03/2017)

4.2. 6 mm %0.3 Lif Katkılı Şev

6 mm %0.3 lif katkıli şev imalatı 3 Nisan 2017 tarihinde başlamış ve 6 Nisan 2017 tarihinde bitirilmiştir. Bu zaman içerisinde 5 cm yüksekliğinde kademeler halinde yapılan kontrollü sıkıştırma işlemi sırasında ölçülen toplam basınç kaydı Şekil 4.6'de verilmiştir. Dolgu imalatı tamamlandığında 16.2 kPa ($14.04 \text{ kN/m}^3 \times 1.05 \text{ m} \times (1 + \%10 \text{ su muhtevası})$) olarak tahmin edilen 105 cm yüksekliğindeki (110 cm şev yüksekliği – 5 cm basınç plaka seviyesi) zemin toplam basınç değerine yaklaşıldığı görülmektedir.

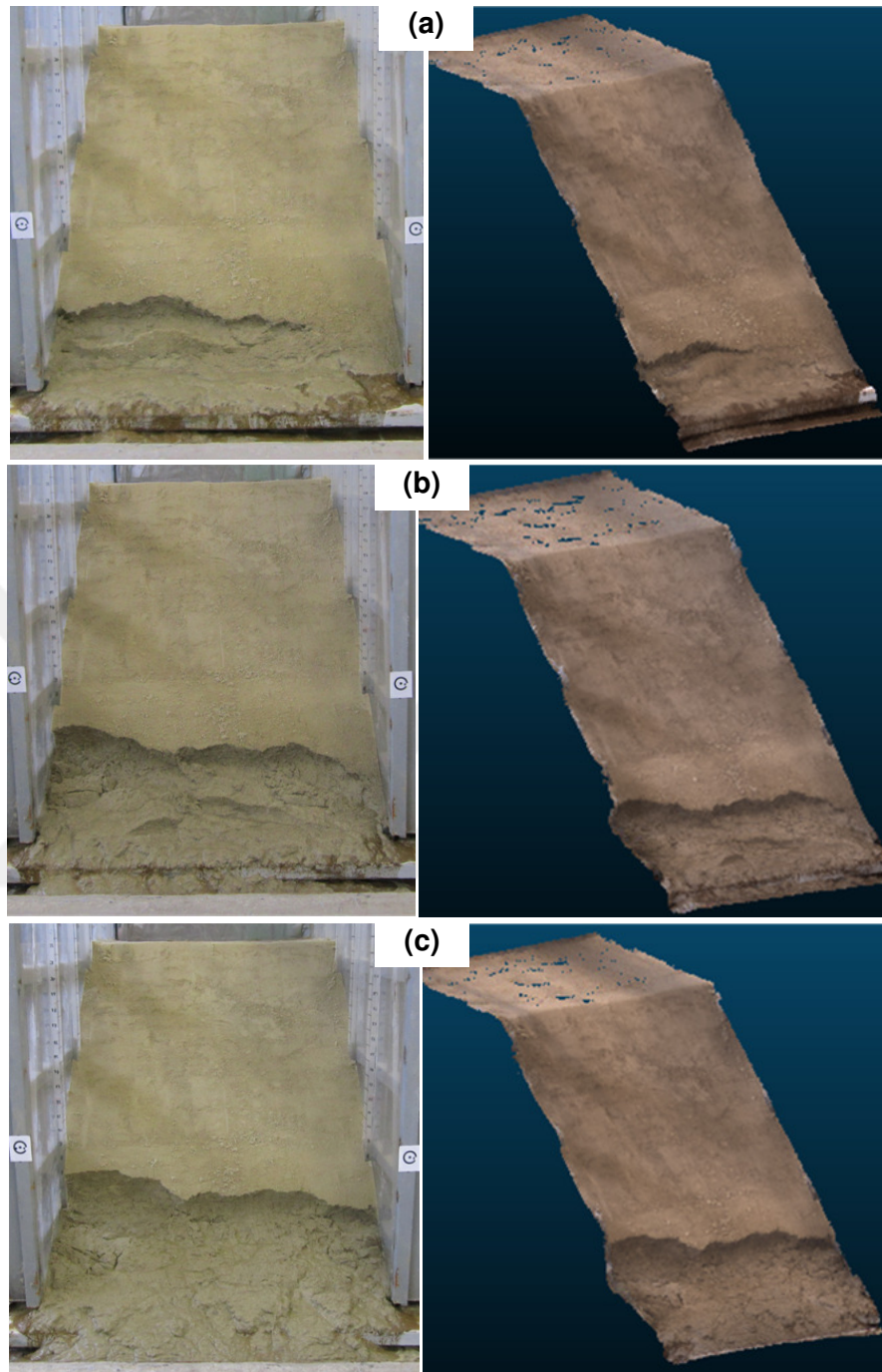


Şekil 4.6. 6 mm %0.3 lif katkıli şev modelinin inşasında toplam basınç plakaları tarafından ölçülen örtü basınçları

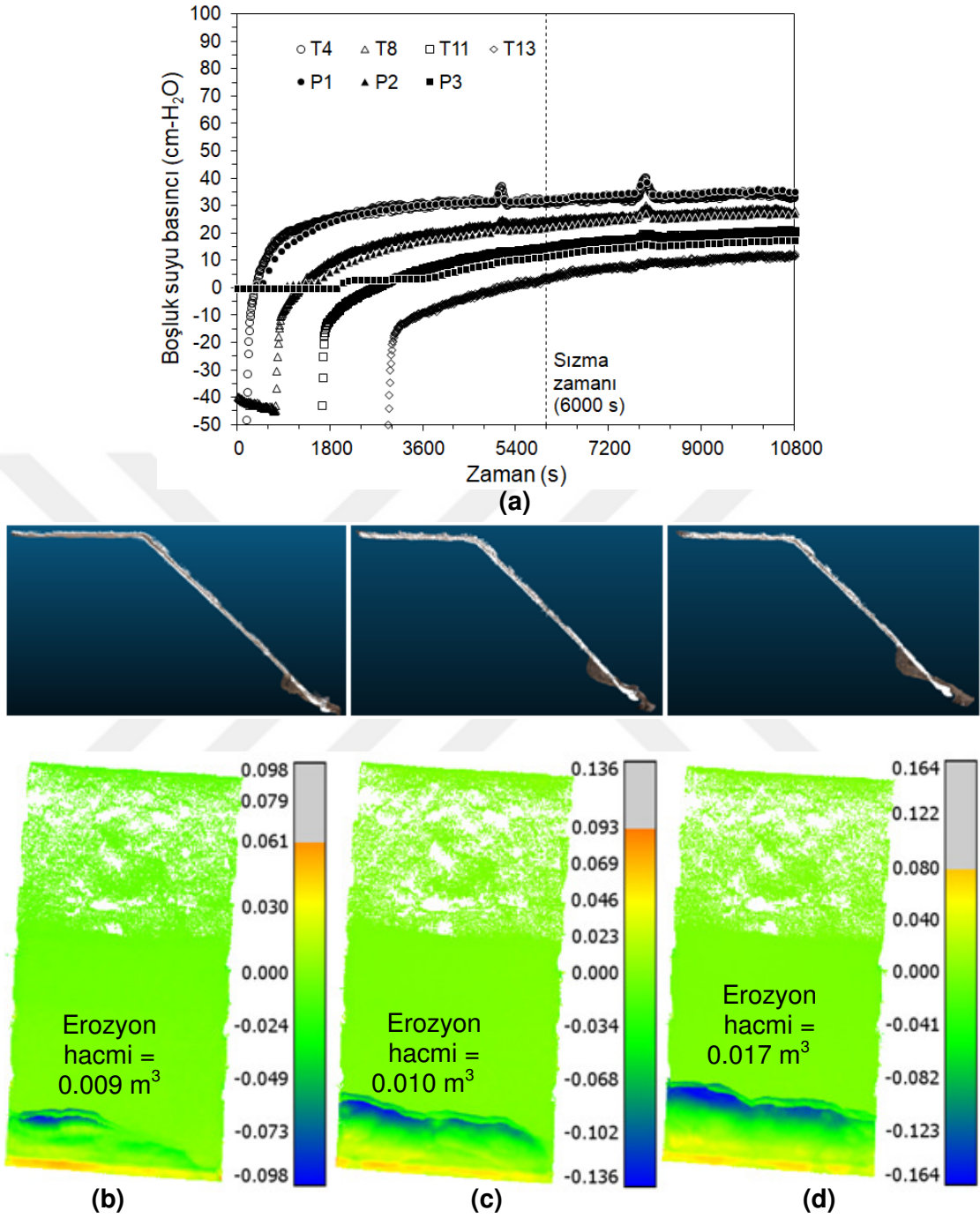
7 Nisan 2017 tarihinde 50 cm-su piyezometrik yük SK altında başlayan deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı $t = 6000 \text{ s}$ zamanında gerçekleşmiştir. Topuk

bölgesinden sızma sularının çıkmasıyla birlikte kumlu şevde erozyon başlamıştır (Şekil 4.7a). Deney sonunda ise sızma erozyonu $y = 0$ düzleminde kanal tabanından 35 cm yüksekliğe kadar etkisini göstermiştir (Şekil 4.7c). Deney sırasında yapılan lazer taraması sonucu elde edilen sayısal nokta bulutları da Şekil 4.7'de sunulmuştur. Deney sırasında piyezometreler ve $z = 10$ cm seviyesinde olan tansiyometreler tarafından ölçülen boşluk-suyu basınçları Şekil 4.8(a)'da verilmiştir. Lazer taramasından elde edilen nokta bulutlarının şevin deforme olmamış $t = 0$ anındaki nokta bulutu ile kıyaslanmasıyla elde edilen erozyon hacimleri Şekiller 4.8(b), 4.8(c) ve 4.8(d)'de verilmiştir. Deney su haznesinin boşaltılmasıyla $t = 14280$ s zamanında sonlandırılmıştır.

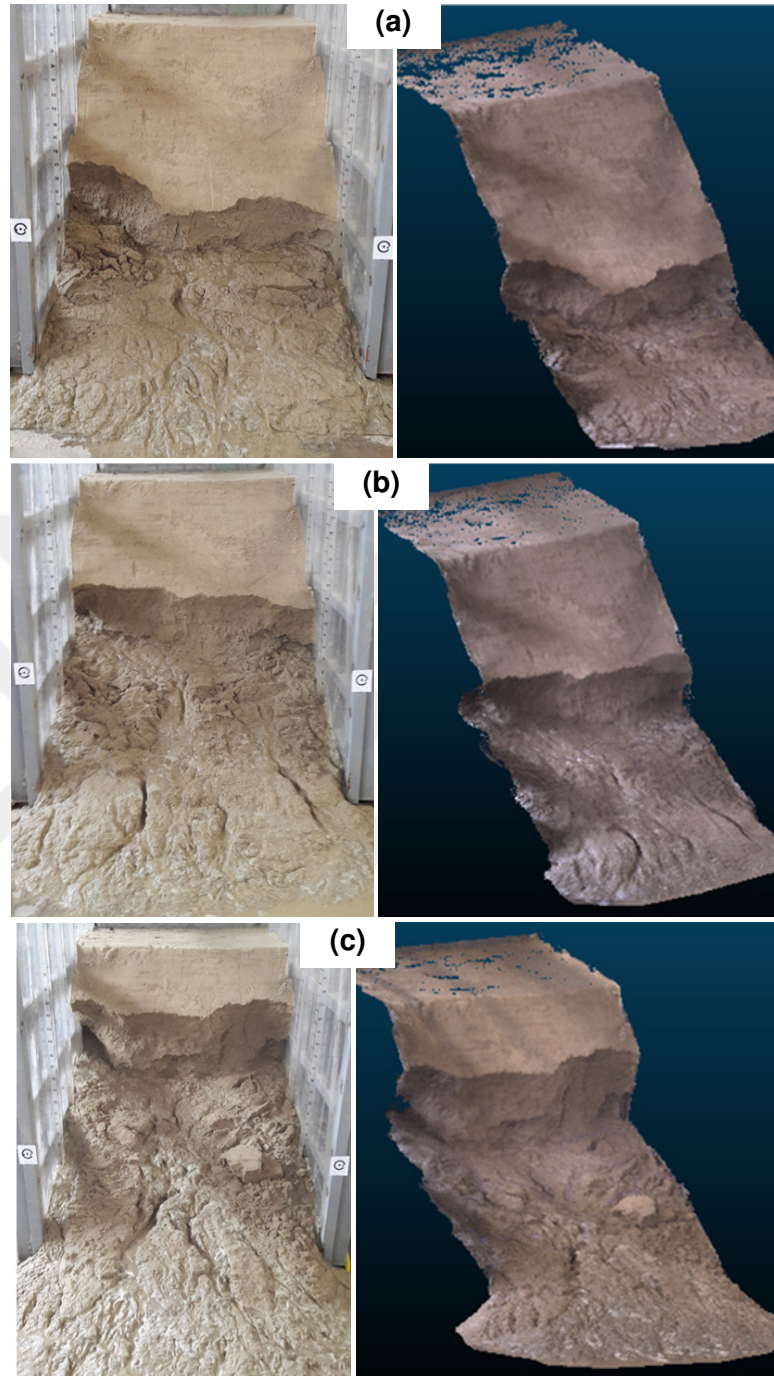
6 mm %0.3 lif katkıli şev modeli 10 gün serbest drenaja bırakıldıktan sonra 17 Nisan 2017 tarihinde 100 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altındaki deney başlamıştır. Bu deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı beklendiği gibi 50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altındaki deneye göre daha önce ($t = 1680$ s zamanında) gerçekleşmiştir. Artan hidrolik eğim neticesinde şev yüzeyinde oluşan erozyon kanal tabanından 85 cm yüksekliğe kadar etkisini göstermiştir (Şekil 4.9). Böylelikle, $t = 7200$ s zamanında karalı akım oluşmasıyla sonlandırılan deneyde erozyon şev kretine ulaşmamıştır (Şekil 4.9c). Deney sırasında piyezometreler ve $z = 10$ cm seviyesinde olan tansiyometreler tarafından ölçülen boşluk-suyu basınçları Şekil 4.10(a)'da verilmiştir. Lazer taramasından elde edilen nokta bulutlarının şevin deforme olmamış $t = 0$ anındaki nokta bulutu ile kıyaslanmasıyla elde edilen erozyon hacimleri Şekiller 4.10(b), 4.10(c) ve 4.10(d)'de verilmiştir. Deney su haznesinin boşaltılmasıyla $t = 7200$ s zamanında sonlandırılmıştır.



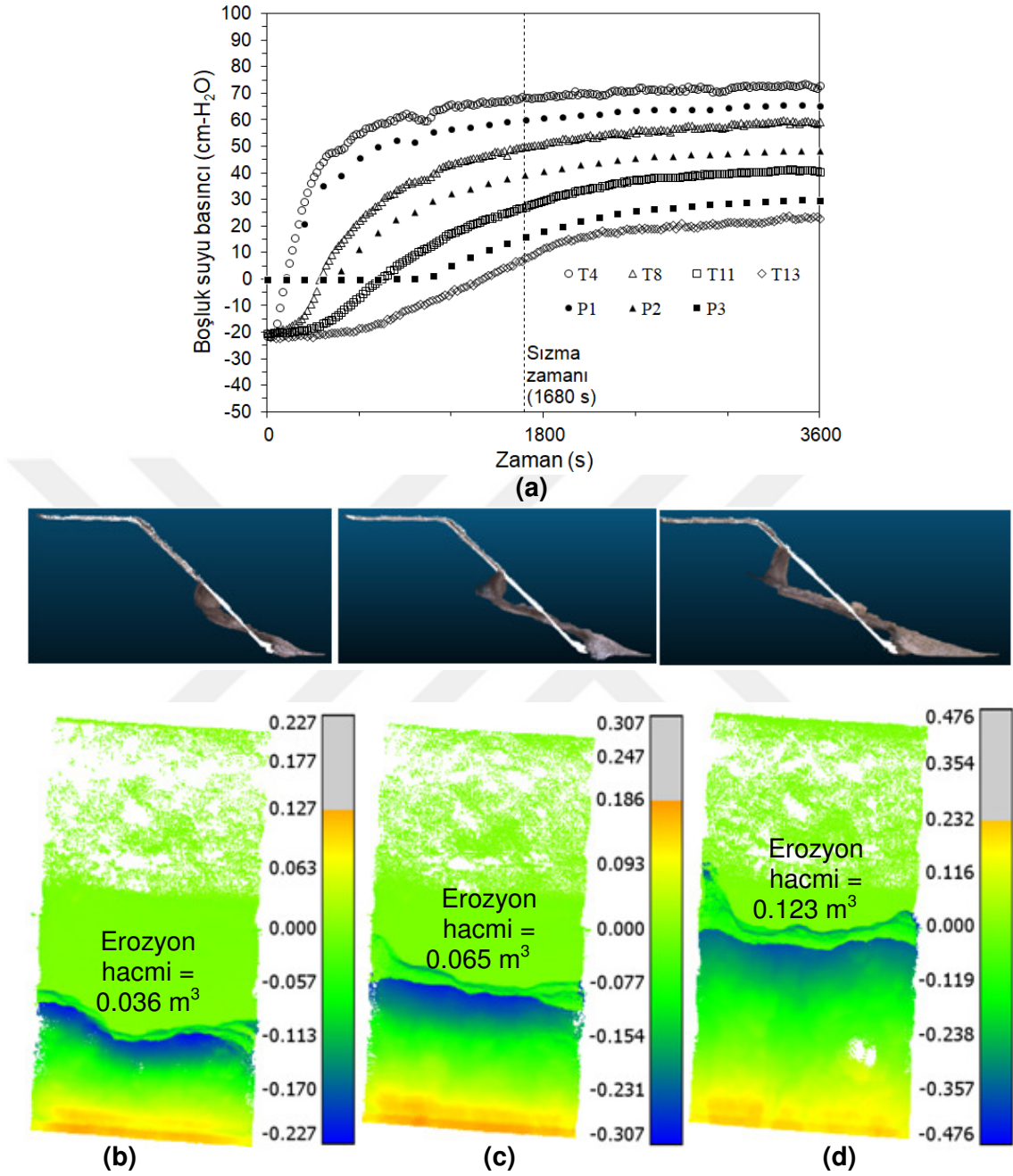
Şekil 4.7. 6 mm %0.3 lif katkılı şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu: (a) $t = 8760$ s; (b) $t = 9840$ s; (c) $t = 14280$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi: 07/04/2017)



Şekil 4.8. 6 mm %0.3 lif katkılı şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) $t = 8760$ s, (c) $t = 9840$ s, (d) $t = 14280$ s zamanlarındaki nokta bulutu enkesitleri ve sızma erozyonunun düşey (z eksen) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 07/04/2017)



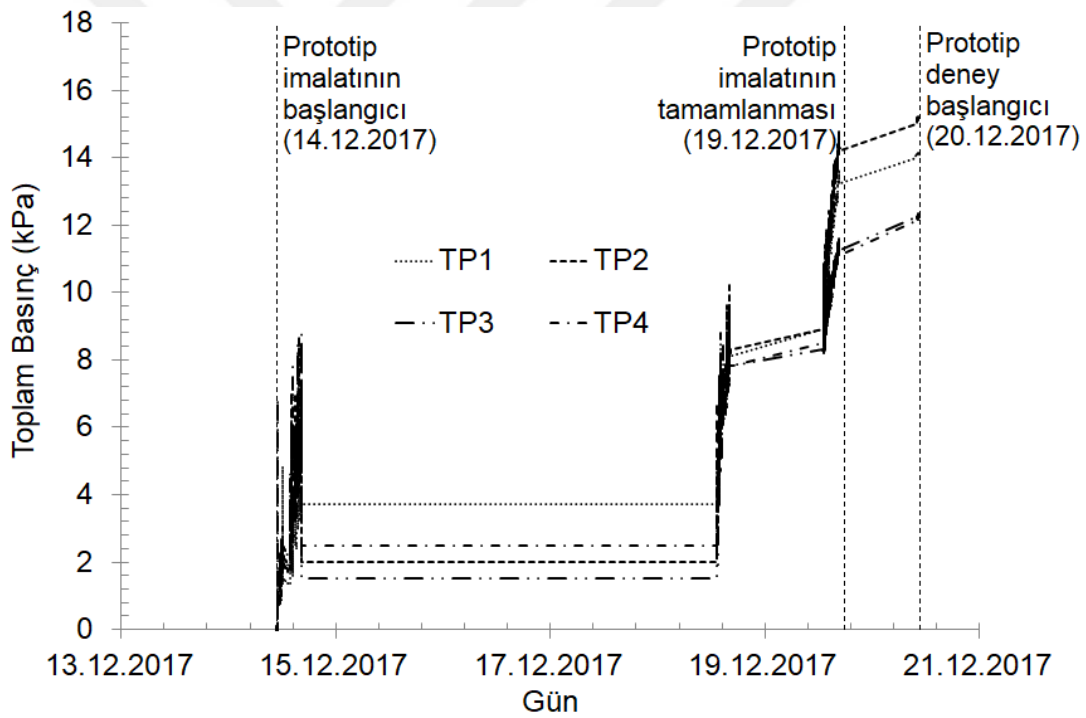
Şekil 4.9. 6 mm %0.3 lif katkılı şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu: (a) $t = 3300$ s; (b) $t = 4080$ s; (c) $t = 7200$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi: 17/04/2017)



Şekil 4.10. 6 mm %0.3 lif katkılı şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) t = 3300 s, (c) t = 4080 s, (d) t = 7200 s zamanlarındaki nokta bulutu enkesitleri ve sızma erozyonunun düşey (z eksen) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 17/04/2017)

4.3. 18 mm %0.3 Lif Katkılı Şev

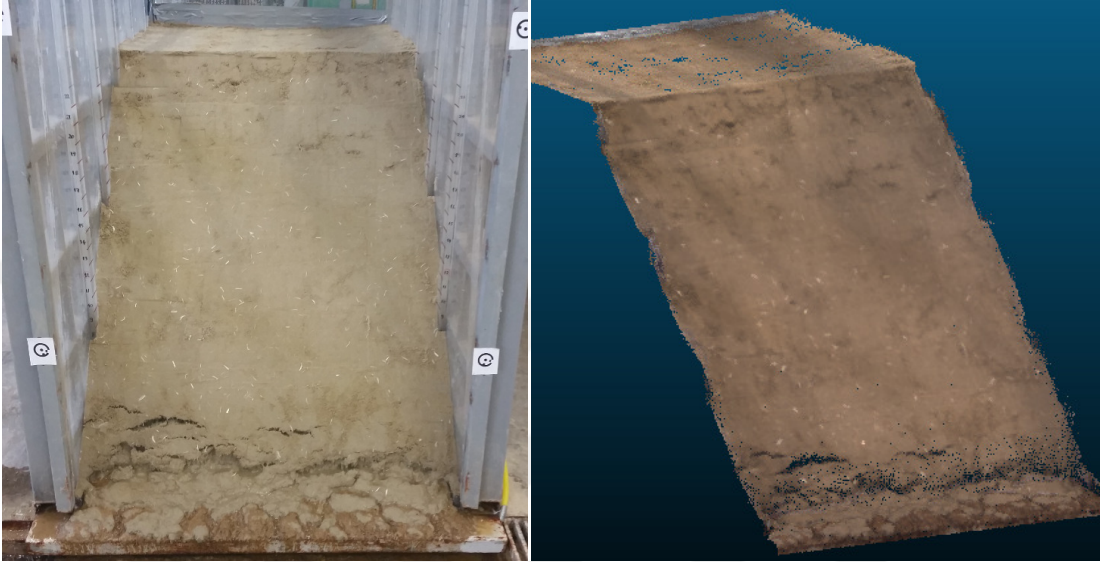
18 mm %0.3 lif katkılı şev imalatı 14 Aralık 2017 tarihinde başlamış ve 19 Aralık 2017 tarihinde bitirilmiştir. Bu zaman içerisinde 5 cm'lik kademeler halinde yapılan kontrollü sıkıştırma işlemi sırasında ölçülen toplam basınç kaydı Şekil 4.11'de verilmiştir. Dolgu imalatı tamamlandığında 16.2 kPa ($14.04 \text{ kN/m}^3 \times 1.05 \text{ m} \times (1 + \%10 \text{ su muhtevası})$) olarak tahmin edilen 105 cm yüksekliğindeki (110 cm şev yüksekliği – 5 cm basınç plaka seviyesi) zemin toplam basınç değerine yaklaşıldığı görülmektedir.



Şekil 4.11. 18 mm %0.3 lif katkılı şev modelinin inşasında toplam basınç plakaları tarafından ölçülen örtü basınçları

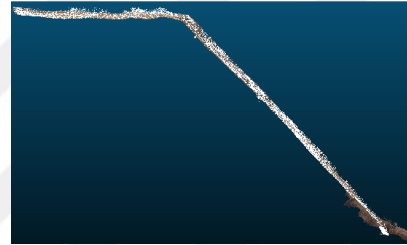
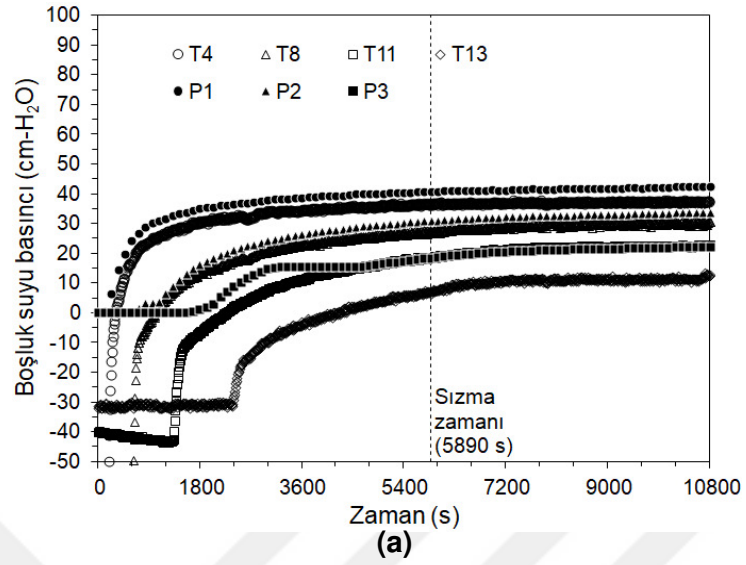
20 Aralık 2017 tarihinde 50 cm-su piyezometrik yük SK altında başlayan deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı $t = 5890 \text{ s}$ zamanında gerçekleşmiştir.

Ancak sızma zamanından kararlı akıma ulaşıldıktan sonra deneyin sonlanmasına ($t = 14400$ s) kadar herhangi bir erozyon oluşmamış, sadece gözle görülebilen şekil değişime gözlenmiştir (Şekil 4.12 ve Şekil 4.13).



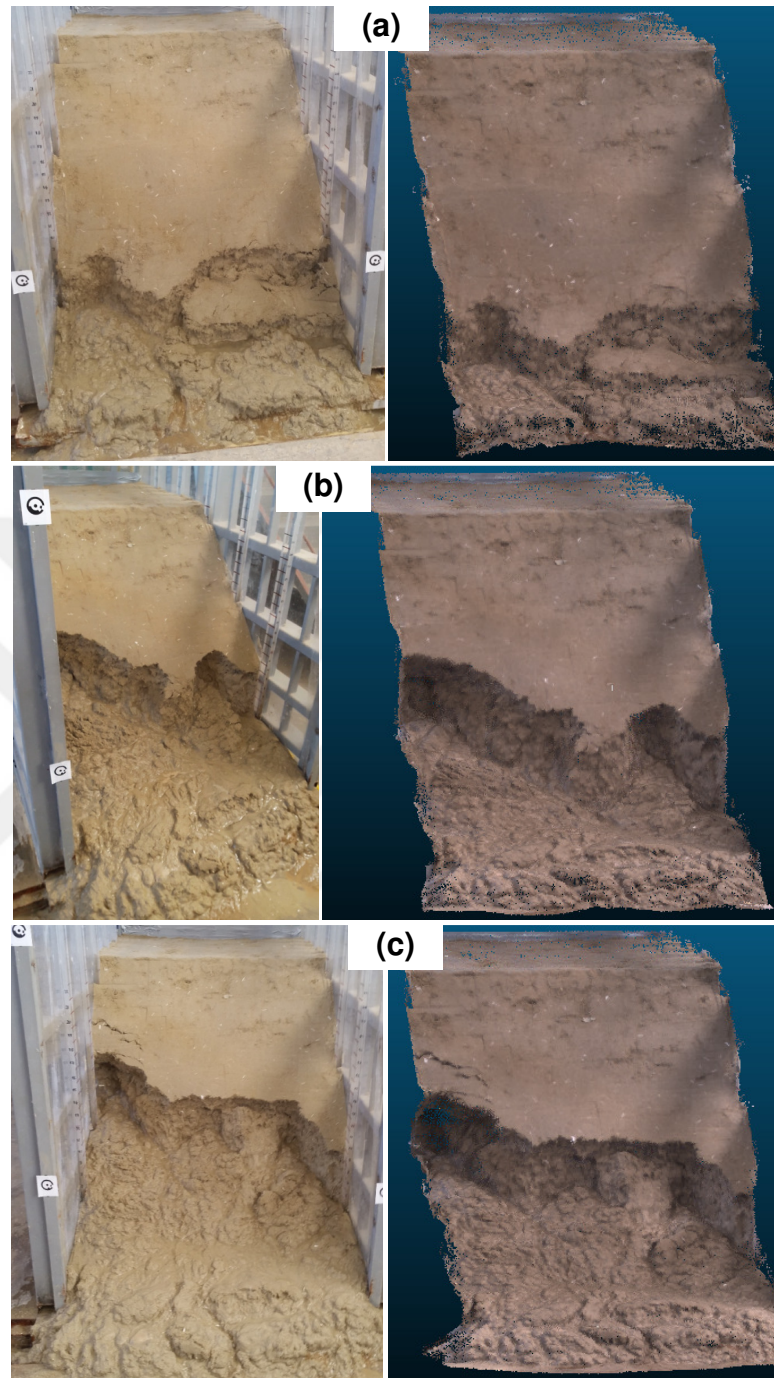
Şekil 4.12. 18 mm %0.3 lif katkılı şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu: $t = 14400$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi: 20/12/2017)

18 mm %0.3 lif katkılı şev modeli 6 gün serbest drenaja bırakıldıktan sonra 26 Aralık 2017 tarihinde 100 cm-su piyezometrik yük SK altındaki deney başlamıştır. Bu deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı beklendiği gibi 50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altındaki deneye göre daha önce ($t = 592$ s zamanında) gerçekleşmiştir. Artan hidrolik eğim neticesinde şevin ortasında ($y = 50$ cm düzlemi) oluşan erozyon kanal tabanından 60 cm yüksekliğe kadar etkisini göstermiştir (Şekil 4.14). Erozyon hacimleri Şekiller 4.15(b), 4.15(c) ve 4.15(d)'de verilmiştir. Deney $t = 7200$ s zamanında sonlandırılmıştır.

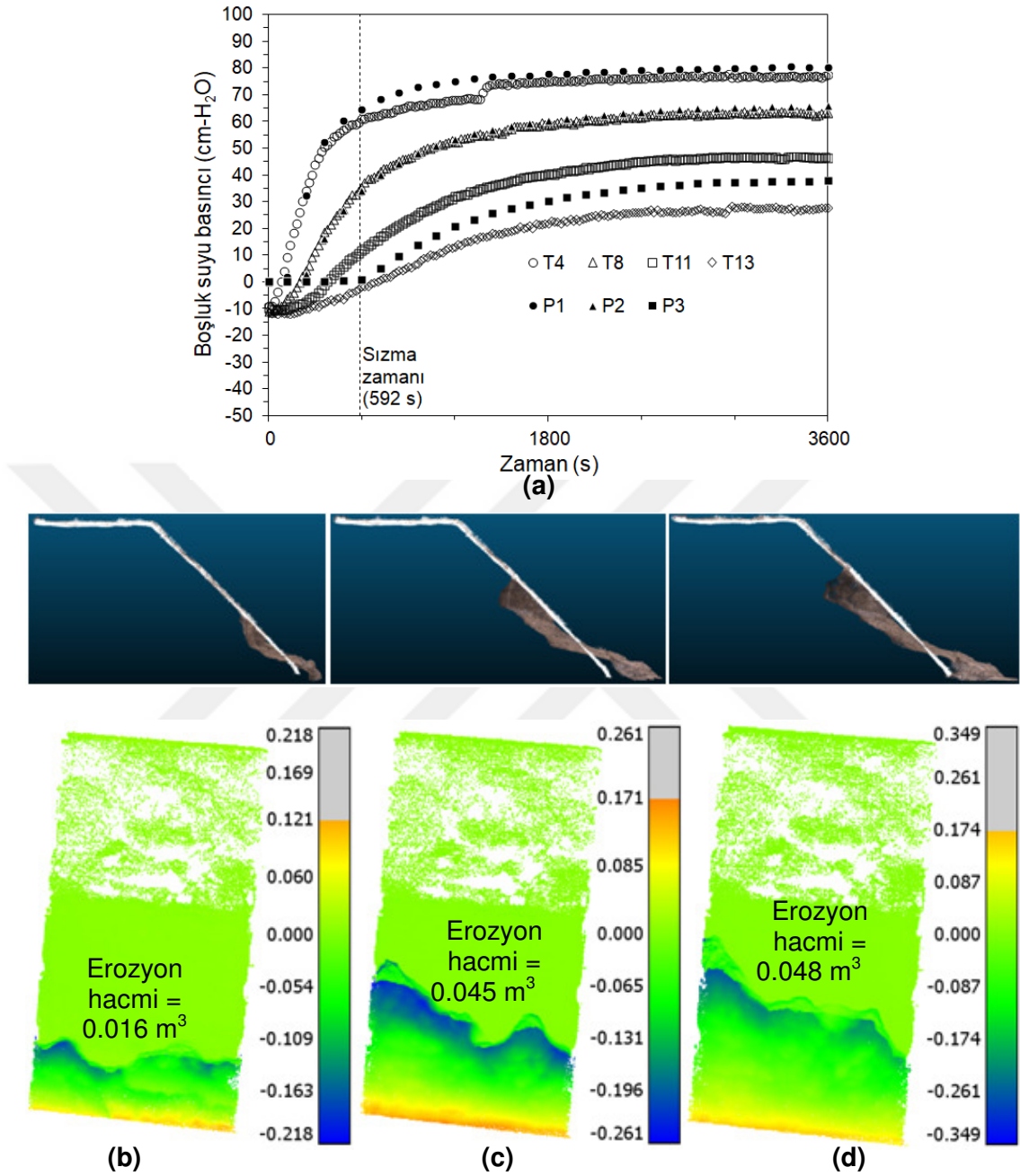


(b)

Şekil 4.13. 18 mm %0.3 lif katkılı şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) = 14400 s zamanındaki nokta bulutu enkesiti ve sızma erozyonunun düşey (z eksen) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 20/12/2017)



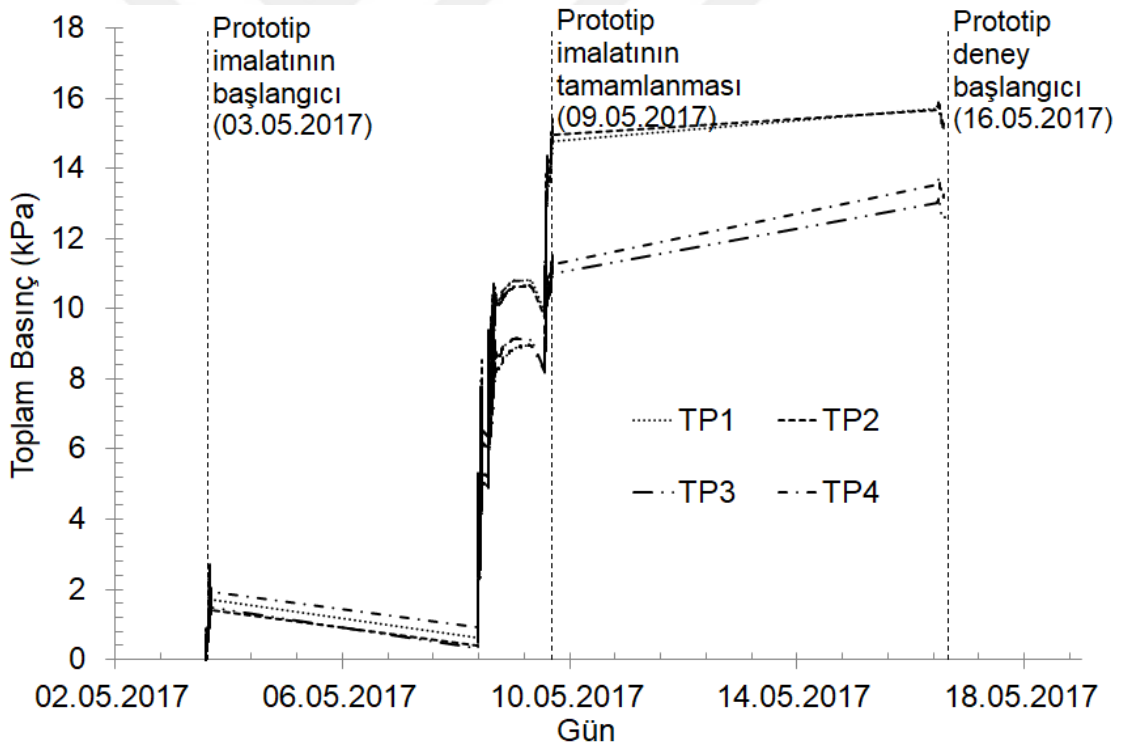
Şekil 4.14. 18 mm %0.3 lif katkılı şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu: (a) $t = 3240$ s; (b) $t = 4500$ s; (c) $t = 7200$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi: 26/12/2017)



Şekil 4.15. 18 mm %0.3 lif katkılı şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) $t = 3240$ s, (c) $t = 4500$ s, (d) $t = 7200$ s zamanlarındaki nokta bulutu enkesitleri ve sızma erozyonunun düşey (z eksen) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 26/12/2017)

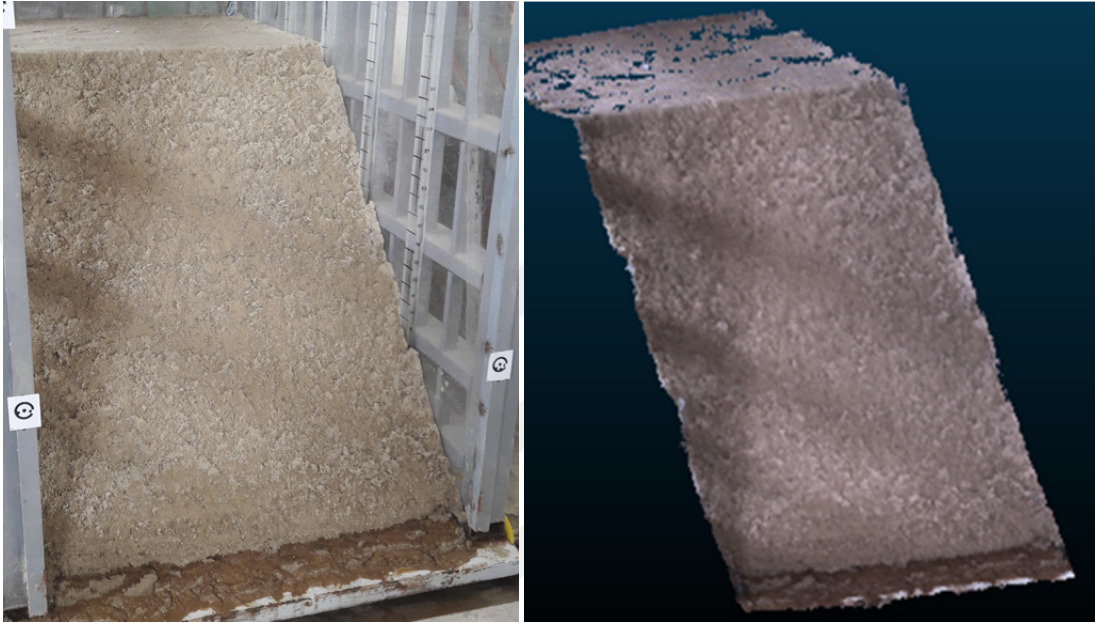
4.4. 6 mm %1.0 Lif Katkılı Şev

6 mm %1.0 lif katkıli şev imalatı 3 Mayıs 2017 tarihinde başlamış ve 9 Mayıs 2017 tarihinde bitirilmiştir. Bu zaman içerisinde 5 cm'lik kademeler halinde yapılan kontrollü sıkıştırma işlemi sırasında ölçülen toplam basınç kaydı Şekil 4.16'da verilmiştir. Dolgu imalatı tamamlandığında 16.3 kPa ($14.14 \text{ kN/m}^3 \times 1.05 \text{ m} \times (1 + \%10 \text{ su muhtevası})$) olarak tahmin edilen 105 cm yüksekliğindeki (110 cm şev yüksekliği – 5 cm basınç plaka seviyesi) zemin toplam basınç değerine yaklaşıldığı görülmektedir.



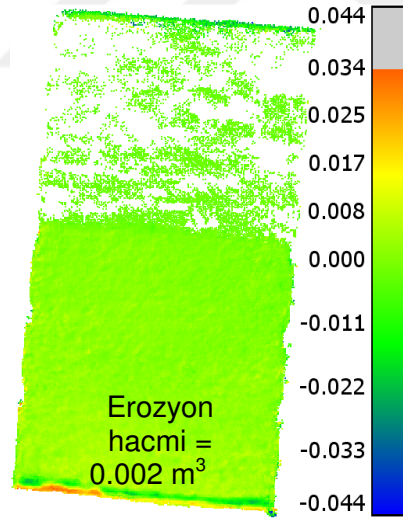
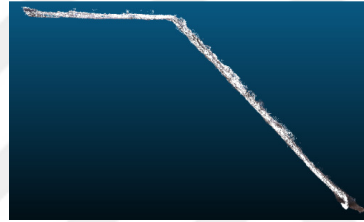
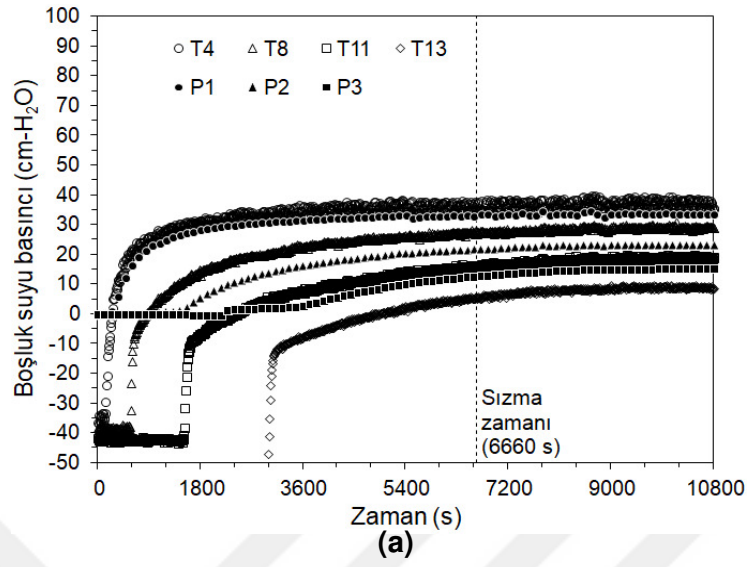
Şekil 4.16. 6 mm %1.0 lif katkıli şev modelinin inşasında toplam basınç plakaları tarafından ölçülen örtü basınçları

16 Mayıs 2017 tarihinde 50 cm-su piyezometrik yük SK altında başlayan deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı $t = 6660$ s zamanında gerçekleşmiştir. Ancak sızma zamanından kararlı akıma ulaşıldıktan sonra deneyin sonlanmasına ($t = 10800$ s) kadar herhangi bir erozyon oluşmamıştır (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18).



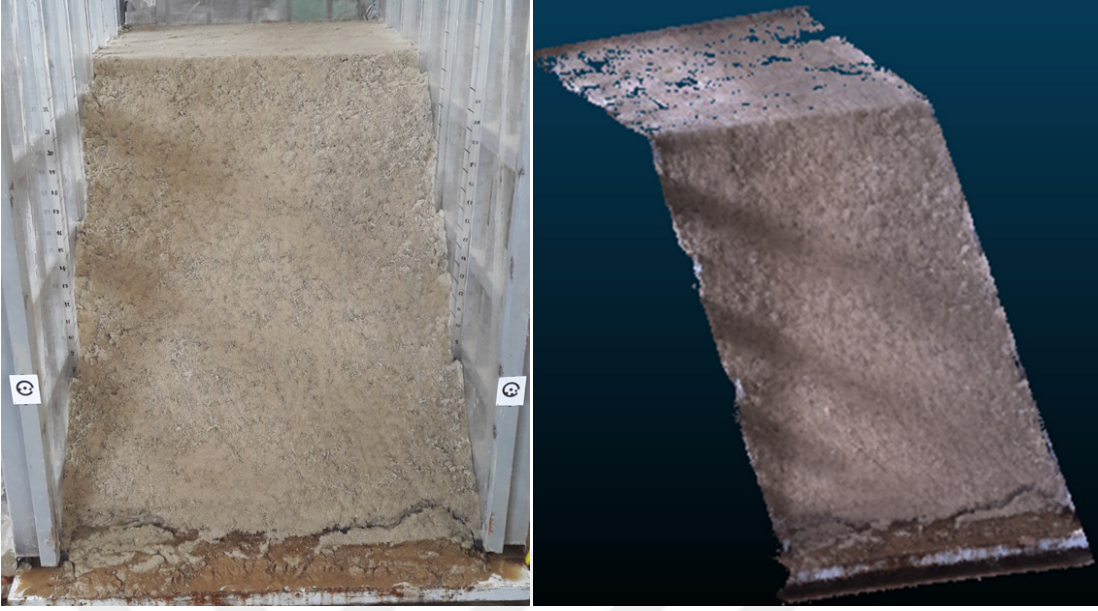
Şekil 4.17. 6 mm %1.0 lif katkılı şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu: $t = 10800$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi: 16/05/2017)

6 mm %1.0 lif katkılı şev modeli 6 gün serbest drenaja bırakıldıktan sonra 22 Mayıs 2017 tarihinde 100 cm-su piyezometrik yük SK altındaki deney başlamıştır. Bu deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı beklendiği gibi 50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altındaki deneye göre daha önce ($t = 660$ s zamanında) gerçekleşmiştir. Artan hidrolik eğime rağmen şev yüzeyinde herhangi bir erozyon oluşmamıştır (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20).

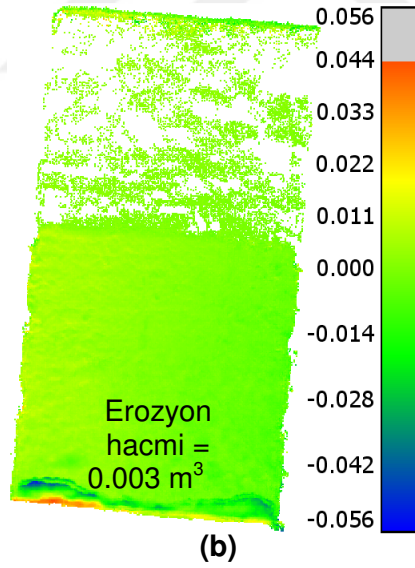
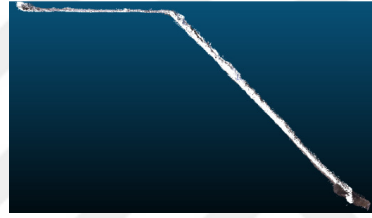
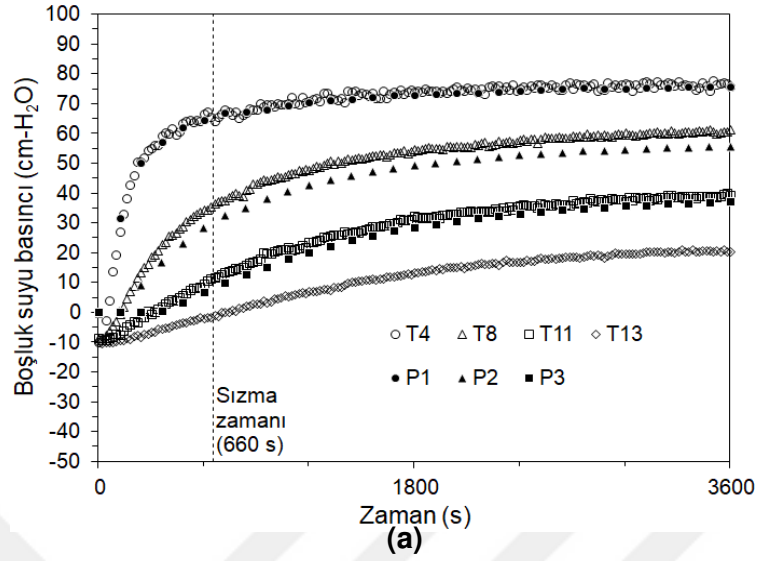


(b)

Şekil 4.18. 6 mm %1.0 lif katkılı şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) = 10800 s zamanındaki nokta bulutu enkesiti ve sızma erozyonunun düşey (z eksenini) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 16/05/2017)



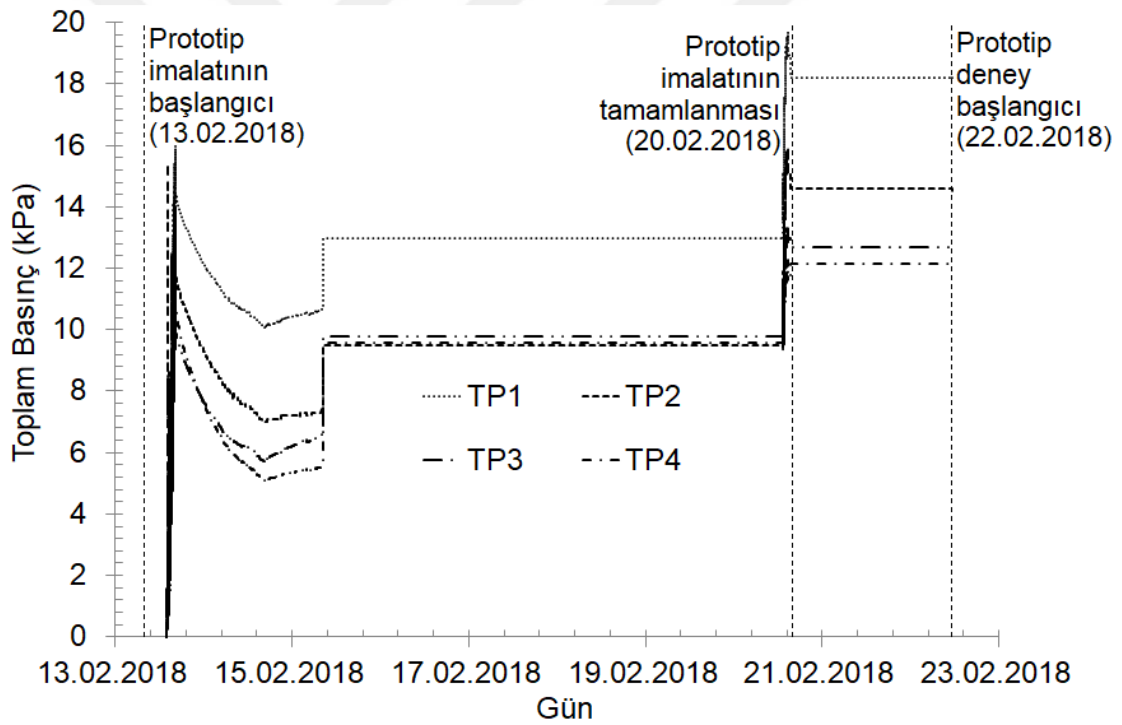
Şekil 4.19. 6 mm %1.0 lif katkılı şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu: $t = 4500$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi: 22/05/2017)



Şekil 4.20. 6 mm %1.0 lif katkılı şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) = 4500 s zamanındaki nokta bulutu enkesiti ve sızma erozyonunun düşey (z eksenini) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 22/05/2017)

4.5. 18 mm %1.0 Lif Katkılı Şev

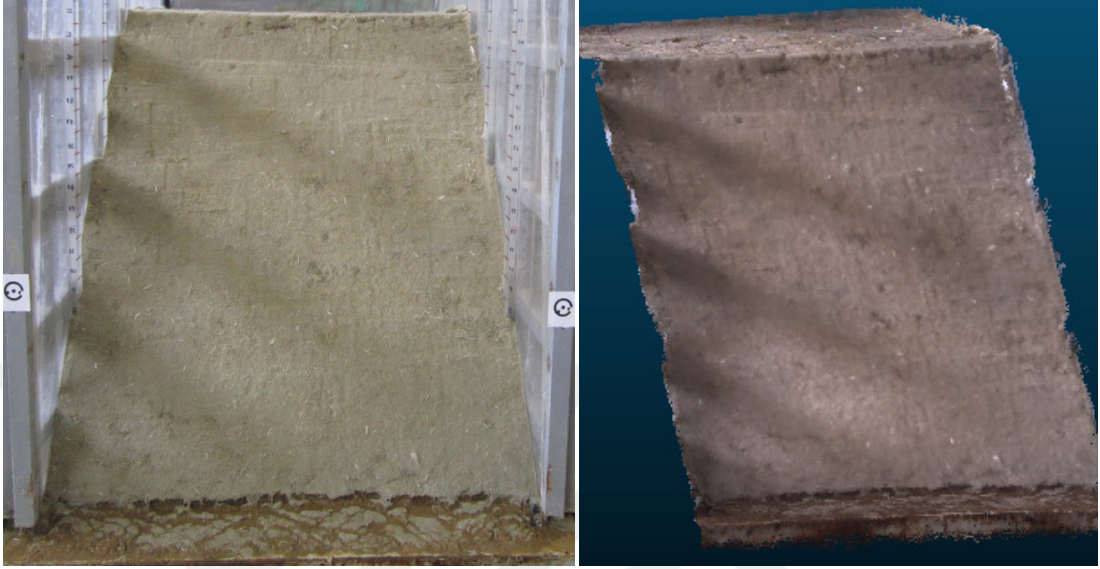
18 mm %1.0 lif katkıli şev imalatı 13 Şubat 2018 tarihinde başlamış ve 20 Şubat 2018 tarihinde bitirilmiştir. Bu zaman içerisinde 5 cm'lik kademeler halinde yapılan kontrollü sıkıştırma işlemi sırasında ölçülen toplam basınç kaydı Şekil 4.21'de verilmiştir. Dolgu imalatı tamamlandığında 16.3 kPa ($14.14 \text{ kN/m}^3 \times 1.05 \text{ m} \times (1 + \%10 \text{ su muhtevası})$) olarak tahmin edilen 105 cm yüksekliğindeki (110 cm şev yüksekliği – 5 cm basınç plaka seviyesi) zemin toplam basınç değerine yaklaşıldığı görülmektedir.



Şekil 4.21. 18 mm %1.0 lif katkıli şev modelinin inşasında toplam basınç plakaları tarafından ölçülen örtü basınçları

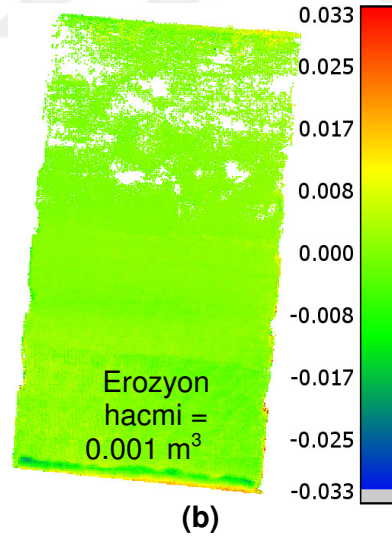
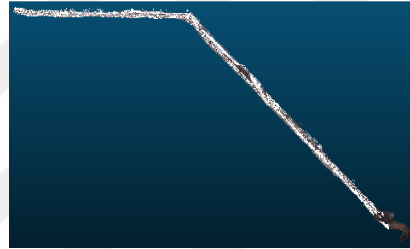
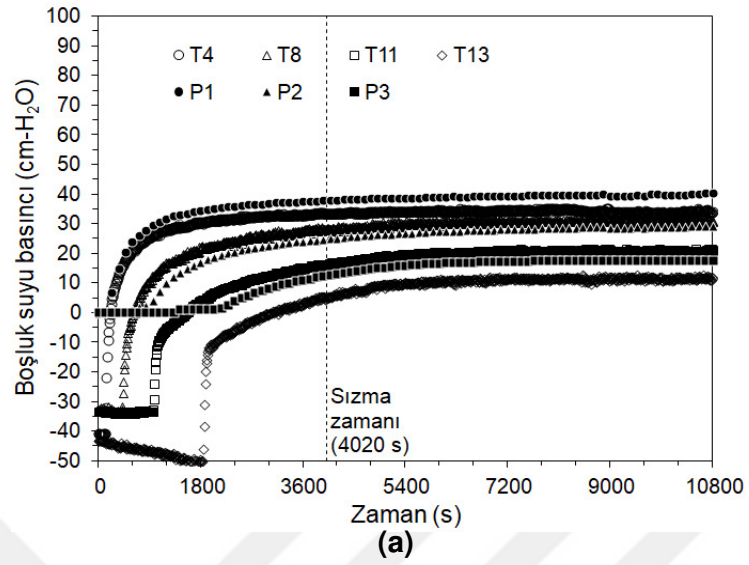
22 Şubat 2018 tarihinde 50 cm-su piyezometrik yük SK altında başlayan deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı $t = 4020 \text{ s}$ zamanında gerçekleşmiştir.

Ancak sızma zamanından kararlı akıma ulaşıldıktan sonra deneyin sonlanmasına ($t = 10800$ s) kadar herhangi bir erozyon oluşmamıştır (Şekil 4.12 ve Şekil 4.23).

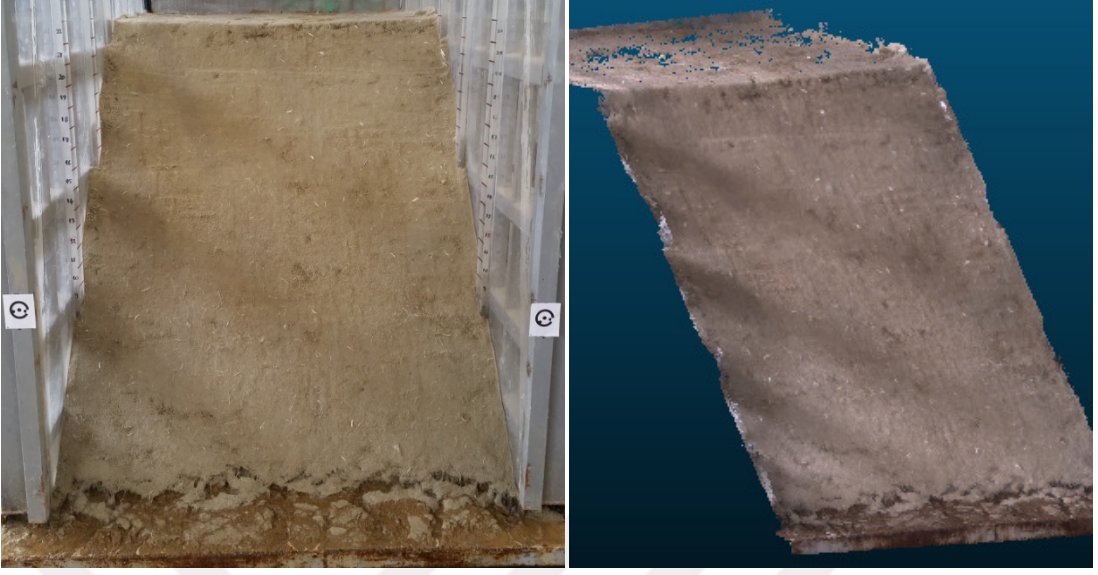


Şekil 4.22. 18 mm %1.0 lif katkılı şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu: $t = 10800$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi: 22/02/2018)

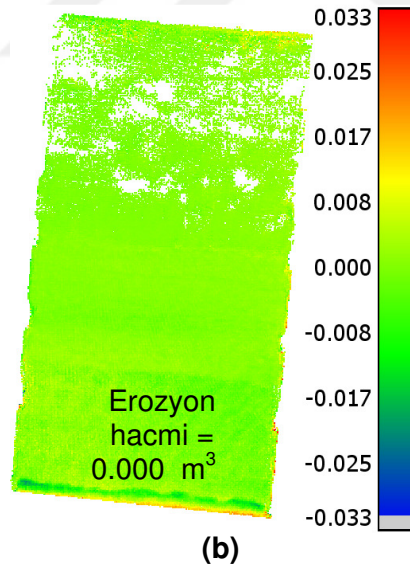
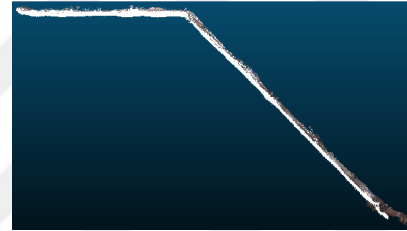
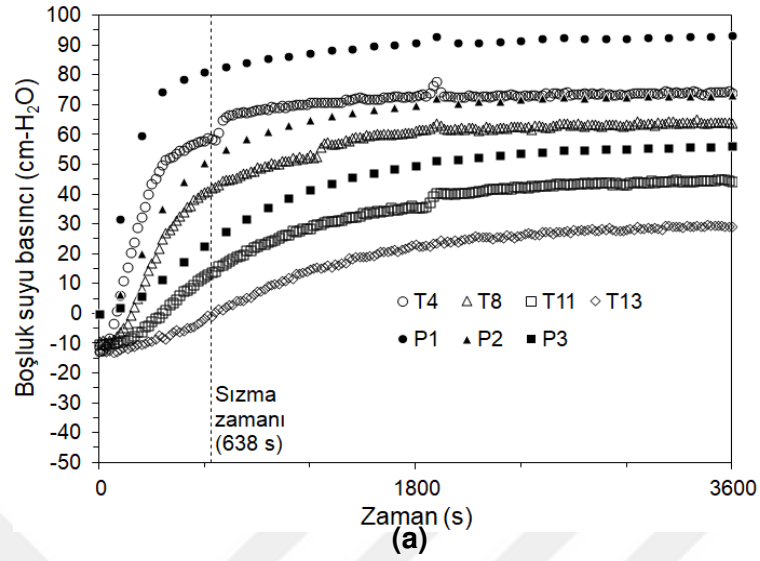
18 mm %1.0 lif katkılı şev modeli 7 gün serbest drenaja bırakıldıktan sonra 1 Mart 2018 tarihinde 100 cm-su piyezometrik yük SK altındaki deney başlamıştır. Bu deneyde şev yüzeyinden sızma suyunun çıkışı beklendiği gibi 50 cm-su piyezometrik yük sınır koşulu altındaki deneye göre daha önce ($t = 638$ s zamanında) gerçekleşmiştir. Artan hidrolik eğime rağmen şev yüzeyinde herhangi bir erozyon oluşmamıştır (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20).



Şekil 4.23. 18 mm %1.0 lif katkılı şev modeli deneyinde 50 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) = 10800 s zamanındaki nokta bulutu enkesiti ve sızma erozyonunun düşey (z eksen) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 22/02/2018)



Şekil 4.24. 18 mm %1.0 lif katkılı şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında gözlemlenen sızma erozyonu ve lazer tarama sonucu elde edilen sayısal nokta bulutu: $t = 3600$ s (Fotoğraf çekim ve lazer tarama tarihi: 01/03/2018)

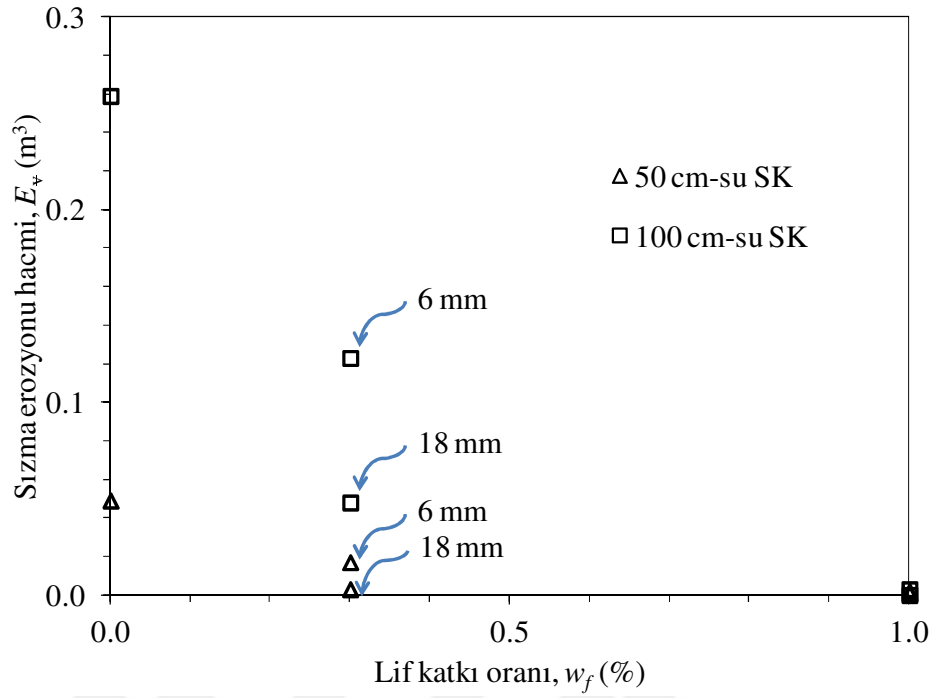


Şekil 4.25. 18 mm %1.0 lif katkılı şev modeli deneyinde 100 cm-su hidrolik yük sınırı koşulu altında (a) taban tansiyometreleri ve piyezometreler tarafından ölçülen boşluk suyu basınçları; (b) = 3600 s zamanındaki nokta bulutu enkesiti ve sızma erozyonunun düşey (z eksen) yer değiştirmeleri (m) plan görünümü (Deney ve lazer tarama tarihi: 01/03/2018)

4.6. Lif Katkısının Sızma Erozyonuna Etkisi

Toplam 10 adet deneyin sonunda hesaplanan erozyon hacimleri, E_v , (Şekiller 4.3d, 4.5d, 4.8d, 4.10d, 4.13b, 4.15d, 4.18b, 4.20b, 4.23b ve 4.25b) dikkate alındığında gerek 6 mm gerekse de 18 mm lif uzunluklarının %1.0 katkı oranında katkısız şevde 50 cm-su ve 100 cm-su piyezometrik yük SK altında gözlemlenen sızma erozyonunu tamamen önlediği ($E_v < 0.003 \text{ m}^3$) görülmüştür. Katkı oranının %0.3 olduğu durumda ise 6 mm uzunluğundaki lif kullanımının katkısız şevde 50 cm-su ve 100 cm-su piyezometrik yük SK altında gözlemlenen sızma erozyonunu önlemediği ama sırasıyla %65 ve %53 oranında azalttığı görülmüştür. 18 mm uzunluğundaki lif ise katkısız şevde 50 cm-su piyezometrik yük SK altında gözlemlenen sızma erozyonunu tamamen önleyebilmiştir. Ayrıca, 18 mm uzunluğundaki lifin %0.3 katkı oranında kullanımı 100 cm-su piyezometrik yük SK altında gözlemlenen sızma erozyonunu %81 oranında azaltmıştır.

Sızma erozyonuna karşı 18 mm uzunluğundaki lif kullanımının 6 mm'ye göre daha etkili olması 18 mm uzunluğundaki lifin 6 mm uzunluğa göre daha fazla kohezyon kazandırmasıyla açıklanabilir (Tablo 3.4 ve 3.5). Deney sonu hesaplanan erozyon hacimleri, E_v , ile lif katkısı, w_f , arasındaki eksponansiyel ilişki Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Sızma erozyon hacmi ile lif katkı oranı arasındaki ilişki

4.7. Şev Stabilitesi Analizi

Şev duraylılığının modellenmesinde kullanılan SLOPE/W bilgisayar programına girilen zeminin Mohr-Coulomb parametreleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Şev duraylılığı modellerinde kullanılan Mohr-Coulomb parametreleri

Kum (% lif katkısı)	Efektif kohezyon, c' (kPa)	Efektif içsel sürtünme açısı, ϕ' ($^{\circ}$)
katkısız kum	0	29.6
6 mm %0.3	1.6	31.2
6 mm %1.0	6.2	32.5
18 mm %0.3	18.4	31.6
18 mm %1.0	31.1	35.2

Toplam 10 adet deneyin belirli zamanlarında (deney başlangıcı (t_1), sızma zamanı (t_2) ve deney sonu (t_3)) hesaplanan şev güvenlik katsayıları (FS) Tablo 4.2’de verilmiştir. FS < 1.0 durumu şev göçmesinin olabileceğini, FS > 1.0 olması durumu ise şevin dairesel kaymaya/göçmeye karşı güvenli olduğunu göstermektedir. Lif kullanımının uzunluktan ve katkı oranından bağımsız olarak şevlerin global stabilitesini artırdığı görülmektedir. Ancak belirtmek gerekir ki FS değerinin 1.0’dan büyük olması sızma erozyonunun olmayacağı anlamına gelmemektedir. Örneğin, 6 mm %0.3 lif katkılı şev modeli ve 18 mm %0.3 lif katkılı şev modeli deneylerinde 100 cm-su hidrolik yük sınır koşulu altında sırasıyla 0.123 m³ (Şekil 4.10d) ve 0.048 m³ (Şekil 4.15d) sızma erozyonu gerçekleşmiştir. Bu deneyler için deney sonu ($t = t_3$) şev güvenlik katsayıları sırasıyla 1.4 ve 8.1 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Deneylerin SLOPE/W ile hesaplanan şev güvenlik katsayıları (FS)

Lif uzunluğu (mm)	Lif Katkısı (%)	Sınır koşulu (cm-su)	SLOPE/W FS		
			t_1	t_2	t_3
-	-	50	0.8	0.8	0.6
-	-	100	1.0	0.7	0.6
6	0.3	50	1.7	1.7	1.6
6	0.3	100	1.7	1.6	1.4
18	0.3	50	8.6	8.5	8.4
18	0.3	100	8.6	8.5	8.1
6	1.0	50	3.8	3.6	3.6
6	1.0	100	3.8	3.7	3.2
18	1.0	50	14.8	14.8	14.7
18	1.0	100	14.1	13.9	13.7

V. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sentetik lif ile güçlendirilmiş akarsu kıyısı şev modelinin yeraltı suyu sızma kuvvetleri altındaki davranışı laboratuvar deneyleri ile incelenmiştir. 6 mm ve 18 mm uzunluğundaki PP lifler doğada bitki köklerinin erozyona karşı kazandırdığı direnci laboratuvar koşullarında taklit edebilmiştir. Laboratuvar deneyleri lif katkısı oranının, w_f , artmasıyla sızma kaynaklı erozyon hacimlerinin, E_v , düştüğünü göstermiştir.

Erozyon kanalının ve inşa edilen model deneylerinin ölçeği daha önce arazi çalışmalarında gözlemlenen akarsu kıyısı yeraltı suyu sızma ve erozyon debilerine benzer değerlere ulaşılmasına imkan vermiştir. Laboratuvar deneyleri sırasında ölçülen kararlı akım sızma suyu debisi, Q , aralığı (0.009 L/s – 0.036 L/s) ve erozyon debisi, E , aralığı (0.001 kg/s – 0.262 kg/s) Midgley vd. (2013) tarafından sahada yapılan sızma erozyonu deneylerindeki ölçümlere (en yüksek kararlı akım sızma suyu debisi ve erozyon debisi sırasıyla 0.007 L/s ve 0.014 kg/s) benzemektedir.

Sızma akışından kaynaklanan erozyon hacimlerinin hesaplanmasında üç-boyutlu (3D) lazer tarama tekniğinin yarattığı şev yüzeyi sayısal topografyasının (nokta bulutunun) kullanılması tekniği başarılı olmuştur. 6 mm lif katkılı akarsu kıyısı koruması %0.3 içeriğiyle 50- ve 100 cm-H₂O piyezometrik yük sınır koşulu altında yapılan deneylerdeki toplam sızma erozyon hacimlerini sırasıyla %65 ve %53 oranında azaltmıştır. Kohezyondaki artışa bağlı olarak, lifli akarsu kıyısı koruması

%1.0 lif içeriğiyle 50- ve 100 cm-H₂O piyezometrik yk sınır koşulu altında katkısız kumda gözlenmiş olan erozyonu tamamen önlemiştir.

Lif katkılı deneylerde sızma kaynaklı global şev göçmesine rastlanmaması durumunu şev stabilite analizi FS değerlerini 1.0'dan büyük hesaplayarak sayısal olarak da doğrulamıştır. Ancak bu alışma FS değerinin 1.0'dan büyük olması durumunda bile sızma erozyonunun olabileceğini göstermiştir. Bunun nedeni, hidrolik eğime bağlı olarak oluşan sızma kuvveti etkisinin SLOPE/W şev duraylılığı analizlerinde hesaba katılmamasıdır.

Gelecek alışmalar kohezyonsuz kum malzemesine ek olarak içsel kohezyona sahip silt veya kil malzemeleri kullanarak da lif katkısının etkisini incelemelidir. Aynı zamanda PP lif yerine doğal liflerin de kullanımını araştırılmalıdır.

VI. KAYNAKLAR

- Abernethy, B., Rutherford, I.D., 2001. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrol. Process.* 15, 63–79.
- Ahlrich, R.C., Tidwell, L.E., 1994. Contingency airfield construction: Mechanical stabilization using monofilament and fibrillated fibers. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station Technical Report GL-94-2, Vicksburg, MS, USA, 54 p.
- Ahmad, F., Bateni, F., Azmi, M., 2010. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotext. Geomembr.* 28, 93–99.
- Akay, O., 2018. Experimental investigation of sandy loam soil erosion on a 45-degree slope under the effect of groundwater flow. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* (DOI: 10.5505/pajes.2017.29863)
- Akay, O., 2016. Slope stabilisation using EPS block geofom with internal drainage system. *Geosynthetics Int.* 23 (1), 9–22.
- Akay, O., Özer, A.T., 2018a. Laboratory experiments of hillslope erosion induced by groundwater seepage. European Geosciences Union General Assembly 2018, *Geophys. Res. Abstr.* 20, EGU2018–3071.
- Akay, O., Özer, A.T., 2018b. Use of polypropylene fiber against hillslope erosion induced by groundwater seepage. 5th IAHR Europe Congress, 12–14 June 2018, Trento, Italy.

- Akay, O., Özer, A.T., 2015. Kumlu şevlerin sızma kuvvetleri altındaki davranışlarının iki ve üç boyutlu laboratuvar fiziksel modelleri ile araştırılması, 6. Geoteknik Sempozyumu, 26-27 Kasım 2015, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Akay, O., Özer, A.T., Fox, G.A., Wilson, G.V., 2018a. Application of fibrous streambank protection against groundwater seepage erosion. *J. Hydrol.* 565, 27–38.
- Akay, O., Özer, A.T., Fox, G.A., Wilson, G.V., 2018b. Fiber reinforced sandy slopes under groundwater return flow. *J. Irrig. Drain. Eng.* 144 (5). (DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001300).
- Akay, O., Özer, A.T., Levent Yüzer, Y., Bilen, M., Bozkır, Ş., 2017. Sızma erozyonunun laboratuvar ölçeğinde değerlendirilmesinde üç-boyutlu lazer tarama. 9. Ulusal Hidroloji Kongresi, 04–06 Ekim 2017, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Akay, O., Özer, A.T., Fox, G.A., Wilson, G.V., 2016a. Behavior of fiber-reinforced sandy slopes under seepage, in: Pathak, C.S., Reinhart, D. (Eds.), *Watershed Management, Irrigation and Drainage, and Water Resources Planning and Management*. ASCE EWRI World Environmental and Water Resources Congress 2016, pp. 397–406.
- Akay, O., Özer, A.T., Elbeyli, Y., Pular, M., 2016b. Investigating the failure mechanisms of sandy slopes under seepage using reduced scale laboratory models. 4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics

and Geotechnical Engineering, 2–4 June 2016, Near East University, Nicosia, North Cyprus.

Akay, O., Özer, A.T., Fox, G.A., 2014a. Use of EPS block geofoam with internal drainage for sandy slopes subjected to seepage flow. 10th Int. Conf. on Geosynthetics, German Geotechnical Society, Essen, Germany.

Akay, O., Özer, A.T., Fox, G.A., 2014b. Assessment of EPS block geofoam with internal drainage for sandy slopes subjected to seepage flow. *Geosynthetics Int.* 21 (6), 364–376.

Akay, O., Özer, A.T., Fox, G.A., Bartlett, S.F., Arellano, D., 2013. Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofoam under seepage flow. *Geotext. Geomembr.* 37, 81–98.

Akay, O., Özer, A.T., Fox, G.A., 2012. Experimental investigation of failure mechanism of expanded polystyrene block geofoam slope system under seepage. 5th European Geosynthetics Congress, EuroGeo5, 16th – 19th of September, Valencia, Spain, Volume 4 – Soil Improvement and Reinforcement, pp. 13–17.

Aksoy, H., Unal, N.E., Cokgor, S., Gedikli, A., Yoon, J., Koca, K., Inci, S.B., Eris, E., 2012. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. *Catena* 98, 63–72.

Allen, H.H., Fischenich, J.C., 2000. Brush mattresses for streambank erosion control. EMRRP Technical Notes Collection (TN EMRRP-SR-23), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, USA.

- ASTM., 2006. Standard test method for permeability of granular soils (constant head). Standard D2434. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA.
- ASTM., 2011. Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils. Standard D7181. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA.
- Babu, G.L.S., Vasudevan, A.K., 2008. Seepage velocity and piping resistance of coir fiber mixed soils. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134 (4), 485–492.
- Bhattacharyya, R., Smets, T., Fullen, M.A., Poesen, J., Booth, C.A., 2010. Effectiveness of geotextiles in reducing runoff and soil loss: A synthesis. *Catena* 81, 184–195.
- Beighley, R.E., Valdes, J.R., 2009. Slope interrupter best management practice experiments on a tilting soil bed with simulated rainfall. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135 (4), 480–486.
- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., D'Agostino, V., Simonato, T., 2010. Quantifying the effect of brush layering on slope stability. *Ecol. Eng.* 36, 258–264.
- Burylo, M., Hudek, C., Rey, F., 2011. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *Catena* 84, 70–78.
- Cancienne, R.M., Fox, G.A., Simon, A., 2008. Influence of seepage undercutting on the stability of root-reinforced streambanks. *Earth Surf. Process. Landforms* 33 (11), 1769–1786.

- Capilleri, P.P., Motta, E., Raciti, E., 2016. Experimental study on native plant root tensile strength for slope stabilization. *Procedia Eng.* 158, 116–121.
- Ching-Chuan, H., Yih-Jang, J., Lih-Kang, H., Jin-Long, L., 2009. Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures. *J. Hydrol.* 370, 39–51.
- Chu-Agor, M.L., Fox, G.A., Cancienne, R.M., Wilson, G.V., 2008. Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes. *J. Hydrol.* 359 (3–4), 247–259.
- Chu-Agor, M.L., Fox, G.A., Wilson, G.V., 2009. Empirical sediment transport function predicting seepage erosion undercutting for cohesive bank failure prediction. *J. Hydrol.* 377, 155–164.
- CloudCompare, 2018. 3D point cloud and mesh processing software version 2.6.1 user manual. <http://www.danielgm.net/cc/> (accessed on 2 April 2018).
- Collins, R., Zhang M., Zhang, X., Hulsey, L., Ravens, T., Van Veldhuizen, R., 2015. Evaluation of geofibers and nontraditional liquid additives on erodible slopes in Interior Alaska. *Geotext. Geomembr.* 43, 412–423.
- Consoli, N.C., Heineck, K.S., Casagrande, M.D.T., Coop, M.R., 2007. Shear strength behavior of fiber-reinforced sand considering triaxial tests under distinct stress paths. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 133 (11), 1466–1469.
- Crosta, G., di Prisco, C., 1999. On slope instability induced by seepage erosion. *Can. Geotech. J.* 36 (6), 1056–1073.

- Curran, J.C., Hession, W.C., 2013. Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system. *J. Hydrol.* 505, 364–376.
- Dapporto, S., Rinaldi, M., Casagli, N., 2001. Failure mechanisms and pore water pressure conditions: analysis of a riverbank along the Arno River (Central Italy). *Eng. Geol.* 61, 221–242.
- Das, A., Viswanadham, B.V.S., 2010. Experiments on the piping behavior of geofiber-reinforced soil. *Geosynthetics Int.* 17 (4), 171–182.
- Diambra, A., Ibraim, E., Muir Wood, D., Russell, A.R., 2010. Fibre reinforced sands: Experiments and modeling. *Geotext. Geomembr.* 28, 238–250.
- Divya, P.V., Viswanadham, B.V.S., Gourc, J.P., 2014. Evaluation of tensile strength-strain characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests. *J. Mater. Civ. Eng.* 26 (1), 14–23.
- Eab, K.H., Takahashi, A., Likitlersuang, S., 2014. Centrifuge modelling of root-reinforced soil slope subjected to rainfall infiltration. *Géotech. Lett.* 4, 211–216.
- Esposito, G., Mastrorocco, G., Salvini, R., Oliveti, M., Starita, P., 2017. Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environ. Earth Sci.*, 76 (103). (DOI: 10.1007/s12665-017-6409-z).
- Falorca, I.M.C.F.G., Gomes, L.M.F., Pinto, M.I.M., 2011. A full-scale trial embankment construction with soil reinforced with short randomly distributed polypropylene microfibers. *Geosynthetics Int.* 18 (5), 280–288.

- Fox, G.A., Wilson, G.V., Periketi, R.K., Cullum, R.F., 2006. Sediment transport model for seepage erosion of streambank sediment. *J. Hydrol. Eng.* 11 (6), 603–611.
- Fox, G.A., Wilson, G.V., Simon, A., Langendoen, E.J., Akay, O., Fuchs, J.W., 2007a. Measuring streambank erosion due to ground water seepage: correlation to bank pore water pressure, precipitation and stream stage. *Earth Surf. Process. Landforms* 32 (10), 1558–1573.
- Fox, G.A., Chu-Agor, M.L., Wilson, G.V., 2007b. Erosion of noncohesive sediment by ground water seepage: lysimeter experiments and stability modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71 (6), 1822–1830.
- Fox, G.A., Wilson, G.V., 2010. The role of subsurface flow in hillslope and streambank erosion: a review. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74 (3), 717–733.
- Fox, G.A., Heeren, D.M., Wilson, G.V., Langendoen, E.J., Fox, A.K., Chu-Agor, M.L., 2010. Numerically predicting seepage gradient forces and erosion: Sensitivity to soil hydraulic properties. *J. Hydrol.* 389, 354–362.
- Fox, G.A., Heeren, D.M., Miller, R.B., Mittelstet, A.R., Storm, D.E., 2011. Flow and transport experiments for a streambank seep originating from a preferential flow pathway. *J. Hydrol.* 403, 360–366.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., Widger, R.A., 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 15 (3), 313–321.

- Geo-Slope International Ltd., 2012. Stability Modeling with SLOPE/W 2012, an Engineering Methodology, November 2012 edition, Geo-Slope International Ltd, Calgary, Alberta, Canada.
- Ghiassian, H., Ghareh, S., 2008. Stability of sandy slopes under seepage conditions. *Landslides* 5 (4), 397–406.
- Gonzalez-Ollauri, A., Mickovski, S.B., 2017. Hydrological effect of vegetation against rainfall-induced landslides. *J. Hydrol.* 549, 374–387.
- Gregory, G.H., 2006. Shear strength, creep and stability of fiber-reinforced soil slopes. Ph. D. Dissertation, Oklahoma State University, OK, 225 p.
- Hagerty, D.J., Parola, A.C., 2001. Seepage effects in some riprap revetments. *J. Hydraul. Eng.* 127 (7), 556–566.
- Howard, A.D., McLane III, C.F., 1988. Erosion of cohesionless sediment by groundwater seepage. *Water Resour. Res.* 24 (10), 1659–1674.
- Imaizumi, F., Sidle, R.C., 2012. Effect of forest harvesting on hydrogeomorphic processes in steep terrain of central Japan. *Geomorphology* 169–170, 109–122.
- Jotisankasa, A., Taworn, D., 2016. Direct shear testing of clayey sand reinforced with live stake. *Geotech. Test. J.* 39 (4), 608–623.
- Karmaker, T., Dutta, S., 2013. Modeling seepage erosion and bank retreat in a composite river bank. *J. Hydrol.* 476, 178–187.
- Klavon, K., Fox, G.A., Guertault, L., Langendoen, E., Enlow, H., Miller, R., Khanal, A., 2017. Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization:

- insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). *Earth Surf. Process. Landforms* 42, 191–213.
- Langendoen, E.J., Simon, A., 2008. Modeling the evolution of incised streams. II: Streambank erosion. *J. Hydraul. Eng.* 134 (7), 905–915.
- Levent Yüzer, Y., (2018). Lif katkili kumun hidrolik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve yeraltı suyu sızma erozyonuna karşı uygulanmasının incelenmesi. Yüksek lisans Tezi, İstanbul Okan Üniversitesi, İstanbul.
- Li, C., 2005. Mechanical response of fiber-reinforced soil. Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, TX, 212 p.
- Li, C., Zornberg, J.G., 2013. Mobilization of reinforcement forces in fiber-reinforced soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 139 (1), 107–115.
- Li, X, Zhang, L., Zhang, Z., 2006. Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Town, Shanghai, China. *Ecol. Eng.* 26 (3), 304–314.
- Li, C., Pan, C., 2018. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall. *J. Hydrol.* 558, 90–103.
- Lindow, N., Fox, G.A., Evans, R.O., 2009. Seepage erosion in layered stream bank material. *Earth Surf. Process. Landforms* 34 (12), 1693–1701.
- Lovisa, J., Shukla, S.K., Sivakugan, N., 2010. Shear strength of randomly distributed moist fibre-reinforced sand. *Geosynthetics Int.* 17 (2), 100–106.

- Luppi, L., Rinaldi, M., Teruggi, L.B., Darby, S.E., Nardi, L., 2009. Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (central Italy). *Earth Surf. Process. Landforms* 34, 530–546.
- Masoodi, A., Noorzad, A., Tabatabai, M.R.M., Samadi, A., 2018. Application of short-range photogrammetry for monitoring seepage erosion of riverbank by laboratory experiments. *J. Hydrol.* 558, 380–391.
- Midgley, T.L., Fox, G.A., Heeren, D.M., 2012. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks. *Geomorphology* 145, 107–114.
- Midgley, T.L., Fox, G.A., Wilson, G.V., Heeren, D.M., Langendoen, E.J., Simon, A., 2013. Seepage-induced streambank erosion and instability: in situ constant-head experiments. *J. Hydrol. Eng.* 18 (10), 1200–1210.
- Nataraj, M.S., McManis, K.L., 1997. Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers. *Geosynthetics Int.* 4 (1), 65–79.
- Özer, A.T., 2016. Laboratory study on the use of EPS-block geofoam for embankment widening. *Geosynthetics Int.* 23 (2), 71–85.
- Özer, A.T., Akay, O., Fox, G.A., Bartlett, S.F., Arellano, D., 2014. A new method for remediation of sandy slopes susceptible to seepage flow using EPS-block geofoam. *Geotext. Geomembr.* 42, 166–180.
- Özer, A. T., Akay, O., 2014. Use of interlocked EPS block geofoam for sandy slopes subjected to seepage flow. *Proceedings of 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin, Germany.*

- Petrone, A., Preti, F., 2010. Soil bioengineering for risk mitigation and environmental restoration in a humid tropical area. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 239–250.
- Pizzuto, J., O'Neal, M., Stotts, S., 2010. On the retreat of forested, cohesive riverbanks. *Geomorphology* 116, 341–352.
- Pollen, N., 2007. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *Catena* 69, 197–205.
- Pollen-Bankhead, N., Simon, A., 2010. Hydrologic and hydraulic effects of riparian root networks on streambank stability: Is mechanical root-reinforcement the whole story? *Geomorphology* 116, 353–362.
- Preti, F., Giadrossich, F., 2009. Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, 1713–1726.
- Resop, J.P., Hession, W.C., 2010. Terrestrial laser scanning for monitoring streambank retreat: comparison with traditional surveying techniques. *J. Hydraul. Eng.* 136 (10), 794–798.
- Rinaldi, M., Casagli, N., 1999. Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River (Italy). *Geomorphology* 26, 253–277.
- Rinaldi, M., Mengoni, B., Luppi, L., Darby, S.E., Mosselman, E., 2008. Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend. *Water Resour. Res.* 44 (9), 1–17.

- Rinaldi, M., Nardi, L., 2013. Modeling interactions between riverbank hydrology and mass failures. *J. Hydrol. Eng.* 18 (10), 1231–1240.
- Shields, F.D.Jr., Bowie, A.J., Cooper, C.M., 1995. Control of streambank erosion due to bed degradation with vegetation and structure. *Water Resour. Bull.* 31 (3), 475–489.
- Shields, F.D.Jr., Pezeshki, S.R., Wilson, G.V., Wu, W., Dabney, S.M., 2008. Rehabilitation of an incised stream using plant materials: the dominance of geomorphic processes. *Ecol. Soc.* 13 (2), 54.
- Shields, F.D.Jr., Simon, A., Dabney, S.M., 2009. Streambank dewatering for increased stability. *Hydrol. Process.* 23, 1537–1547.
- Simon, A., Collison, A.J.C., 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surf. Process. Landforms* 27, 527–546.
- Simon, A., Curini, A., Darby, S.E., Langendoen, E.J., 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology* 35, 193–217.
- Spencer, E., 1967. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17 (1), 11–26.
- Tardío, G., Mickovski, S.B., 2016. Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices. *Ecol. Eng.* 92, 138–147.

- Thiele, S.T., Grose, L., Samsu, A., Micklethwaite, S., Vollgger, S.A., Cruden, A.R., 2017. Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data. *Solid Earth* 8, 1241–1253.
- USDA, 1996. Streambank and shoreline protection, In: *Engineering Field Handbook*. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. Government Print Office, Washington, DC, USA.
- van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 (5), 892–898.
- Vandamme, J., Zou, Q., 2013. Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method. *Comput. Geotech.* 48, 9–20.
- Wilson, G.V., Periketi, R.K., Fox, G.A., Dabney, S.M., Shields, F.D., Cullum, R.F., 2007. Soil properties controlling seepage erosion contributions to streambank failure. *Earth Surf. Process. Landforms* 32, 447–459.
- Wilson, G.V., Wells, R., Kuhnle, R., Fox, G.A., Nieber, J., 2018. Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes. *Earth Surf. Process. Landforms* 43, 45–63.
- Wörman, A., 1993. Seepage-induced mass wasting in coarse soil slopes. *J. Hydraul. Eng.* 119 (10), 1155–1168.
- Wu, T.H., 2013. Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. *Can. Geotech. J.* 50, 259–274.

Wu, T.H., Kokesh, C.M., Trenner, B.R., Fox, P.J., 2014. Use of live poles for stabilization of a shallow slope failure. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 140 (10). (DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001161).



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Mert BİLEN

Doğum Yeri: İSKENDERUN

Doğum Tarihi: 22.09.1988

EĞİTİM

Lisans: Okan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2012 – 2015

Önlisans: Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi: İnşaat Teknolojisi Bölümü, 2007 – 2010

Lise: Şemsettin Mursaloğlu lisesi, 2003 – 2006

İŞ DENEYİMİ

Biyotek İnşaat LTD ŞTİ. – Saha Sorumlusu

Model Grup Mimarlık – Şantiye Şefi

İLETİŞİM

bilenmert@hotmail.com