

Demiryolu dolgularının taşkın anındaki güvenliğinin değerlendirilmesi

Safety assessment of railway embankments during floods

Melih ÇALAMAK^{1*} 

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, TED Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
melih.calamak@tedu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 07.03.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 19.07.2017
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.50103
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, geniş düzlük üzerine inşa edilen tipik bir demiryolu dolgusunun 200 yıllık tekerrür süresine sahip bir taşkın anındaki güvenliği sızma ve şev stabilitesi analizleriyle incelenmiştir. Bu amaçla, dolgunun sonlu elemanlar yöntemiyle sızma analizleri gerçekleştirilmiş, limit denge analizi yöntemiyle memba ve mansap şevlerinin stabiliteleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre demiryolu dolgusu taşkın anında sızmaya karşı güvenli bulunmuştur. Dolgu, bu anda, demiryolu hattının işletilmediği durumda şevlerinin kaymasına karşı da güvenli bulunmuştur. Ancak, demiryolu hattının taşkın anında işletilmesinin şevlerin stabilite güvenliğini tehlikeye attığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu dolgusu, Yapısal emniyet, Taşkın, Sızma analizi, Şev stabilitesi

Abstract

In this study, the safety of a typical railway embankment built on a large plain subject to a 200-year return period flood investigated with seepage and slope stability analyses. To this end, seepage analyses performed with finite element method. Stability analysis conducted for upstream and downstream slopes using limit equilibrium method. According to the results, the railway embankment found to be safe against seepage during the flood. The embankment also found to be safe against sliding of its slopes when the railway line was not in operation. However, the operation of the railway line during the flood endangered the safety of the stability of the slopes.

Keywords: Railway embankment, Structural safety, Flood, Seepage analysis, Slope stability

1 Giriş

Geniş düzlükler üzerine inşa edilmiş demiryolu dolguları tasarım ömürleri boyunca çeşitli yüklemelere maruz kalırlar. Bunların en önemlileri dolgunun üzerinde hareket eden trenlerin statik yükü, çekiş ve frenlemede oluşturduğu dinamik yük, deprem yükleri ve yüksek tekerrür süresine sahip taşkınlardır. Bu yapıların yıkılma sebepleri arasında taşkın dalgasının gövde üzerinden aşması, taşkın anında gövdede oluşan aşırı miktardaki sızma, şevlerin stabilitesini yitirmesi ve oturma sonucu krest kotunun kabul edilebilir seviyenin altına düşmesi gibi durumlar bulunmaktadır [1].

Bu tür demiryolu dolgularında taşkın anında hem memba hem de mansap tarafında yüksek su seviyeleri gözlemlenebilir. Zira yüksek tekerrür aralığına sahip taşkınlarda geniş alanlara yayılabilir ve taşkın dalgası havzada engel ile karşılaştığı noktalarda yüksek su derinliklerinin oluşmasına neden olabilir. Dolayısıyla, bu düzlüklerdeki dolgular su geçişine izin vermesi için çeşitli sanat yapılarıyla inşa edilir. Sanat yapıları dolgunun bir tarafından diğerine suyun akışını ve birçok durumda ulaşımı da sağlamaktadır. Köprü ve menfezlerden oluşan sanat yapılarının sayısı ve tahliye kapasiteleri, havzanın hidrolojik ve topografik özellikleri dolgunun membaında ve mansabında taşkın anında biriken suyun miktarını ve birikme hızını belirlemektedir. Dolgunun membaında biriken suyun boşalma hızını da yine aynı değişkenler etkilemektedir. Eğer sanat yapılarının kapasiteleri taşkın dalgasıyla gelen suyu dolgunun mansabına iletmede yetersiz kalırsa, demiryolu dolgusunun membaında ihmal edilemeyecek seviyelerde su birikebilir. Aynı zamanda eğer dolgunun mansabındaki düzlüğün eğimi düşükse veya burada başka çeşitli engeller bulunmaktaysa, su dolgunun mansabında da birikebilmektedir. Bahsedilen bu koşullar bir taşkın anında dolgunun membaında ve mansabında zamana bağlı olarak

değişen su seviyelerinin gözlemlenmesine neden olmaktadır. Demiryolu dolgusu ve temeli geçirimli malzemeden oluştuğundan memba ve mansap su seviyelerinin farklılığı hem dolgu gövdesinden hem de dolgunun altından suyun sızmasına neden olmaktadır. Bu sızmanın aşırı miktarda ve büyük hidrolik eğimlere sahip olması dolguda veya temelde ince malzemenin akımla birlikte taşınmasına, daha büyük sızma miktarlarının gözlemlenmesine ve nihayetinde borulanmaya yol açabilir. Bir dolguda borulanmanın gözlemlenmesi yapının göçmesi anlamına gelmektedir. Değişen memba ve mansap sınır koşulları aynı zamanda dolgunun şev stabilitelerini de etkilemektedir. Zira taşkın öncesinde sabit bir emniyet faktörüyle güvenliğini koruyan şevler taşkın anında su seviyelerinin yükselmesiyle güvenliklerini korumaya devam ederken, taşkın dalgasının çekilmesiyle ve su seviyelerinin azalmasıyla stabilitelerini yitirebilmektedir. Çünkü taşkın çekilme anında memba su seviyesi aniden düşerken dolgu gövdesinde sızmadan dolayı oluşan boşluk suyu basınçları bir süre boyunca korunmakta ve bu boşluk suyu basınçlarının uyguladığı kaldırma kuvvetleri dolgu şevlerinin stabilitesini yitirmesine yol açabilmektedir [2]. Dolayısıyla hem sızma esaslı durumlardan hem de şev stabilitesinin yitirilmesinden kaynaklanan göçme durumlarının detaylıca araştırılması gerekmektedir.

Bugüne kadar birçok araştırmacı demiryolu dolgularının ampirik yöntemler, sonlu elemanlar yöntemi ve yapay sinir ağları yöntemiyle tasarımı konusunda araştırmalar yürütmüştür [3]-[5]. Aynı zamanda demiryolu dolgularının güvenliği ile ilgili çalışmalar da dolgunun oturması, deformasyonu, sıcaklık değişimleri altındaki davranışı ve güçlendirilmesi konularında yürütülmüştür. Mu ve diğ. [6] Qinghai-Tibet demiryolu hattının hava koşullarına bağlı olarak donmadan kaynaklı deformasyonlarını hesaplarken, Wei ve diğ. [7] aynı demiryolu hattı dolgusunun deformasyonunu

azaltmak için çeşitli yöntemlerle sıcaklık değişimlerini azaltmaya çalışmıştır. Ma ve diğ. [8] ise Wei ve diğ. [7] çalışmasında önerilen yöntemlerin verimini ve deformasyonları azaltmadaki etkinliğini incelemiştir. Zhuang ve Cui [9] araştırmalarında yumuşak zemin üzerine oturan gerçek bir demiryolu dolgusunun oturma ve deformasyonlarının kontrol altında tutulabilmesi için betonarme kazıklar ile desteklenmesi konusunda modellemelerde bulunmuştur ve analizlerde kullanılan basitleştirilmiş analitik yöntemin oturma miktarının hesaplanmasında gerçekçi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Montanelli ve Piergiorgio [10] yine yumuşak zeminler üzerine oturan demiryolu dolgularının geotekstil ile güçlendirilmesi üzerine deneysel bir araştırma yürütmüş ve bu dolguların geotekstil ile tasarımları üzerine çıkarımlarda bulunmuştur. Demiryolu dolgularındaki sızma üzerine yapılan ender çalışmalardan biri Chen ve diğ. [11] tarafından yürütülmüştür. Çalışmada Etiyopya'da volkanik çakıldan imal edilen bir demiryolu dolgusu üzerinde sızma deneyleri yapılmış, dolgu malzemesinin hidrolik iletkenliği ve sızmanın hidrolik eğimi tespit edilmiştir. Fakat bu çalışmada genelleştirilmiş çıkarımlarda bulunulmamıştır.

Buradan anlaşılacağı üzere literatürde demiryolu dolgularının sızma ve şev stabilitesi güvenliğinin irdelenmesi konusunda bir açık bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı bu dolguların taşkın anındaki sızma ve şev stabilitesi davranışlarını ortaya çıkarmak ve yapının güvenliğini incelemektir. Bu amaçla tipik bir tek yönlü demiryolu dolgusu en-kesiti ele alınmış ve gerçekçi bir taşkın oluşturduğu sınır koşullarında sonlu elemanlar yöntemiyle sızma karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Dolgu kesitinden geçen sızma akımının zamana göre değişimi, kesit boyunca oluşan boşluk suyu basınçları ve maksimum hidrolik eğimler elde edilmiş, dolguda borulanmanın oluşup oluşmayacağı araştırılmıştır. Daha sonra limit denge analizi yöntemiyle dolgunun taşkın anındaki memba ve mansap şevlerinin stabilize davranışlarının zamana bağlı değişimleri tren yükünün olduğu ve olmadığı durumlar için çıkarılmış ve dolgunun güvenliği değerlendirilmiştir.

2 Yöntem

2.1 Sızma modellemesi

Geçirimli ortamlardaki sızma akımı matematiksel olarak Darcy Kanunu ile tanımlanmaktadır. Buna göre, iki boyutlu bir sızma problemi Denklem 1'de verilen kısmi diferansiyel denklemin çözümü ile modellenebilmektedir [12],[13].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q' = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde, h toplam hidrolik yükü, K_x ve K_y sırasıyla x ve y yönlerindeki hidrolik iletkenliği, Q' harici akımı, θ su muhtevasını ve t zamanı göstermektedir. Bu denklem sonlu farklar veya sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemlerle çözülebilmektedir. Literatürde problemlerin bu tekniklerle çözülmesi konusunda kapsamlı çalışmalar bulunmaktadır [13],[14]. Bu çalışma kapsamında iki boyutlu sızma analizleri doygun/doygun olmayan zemin modeliyle sonlu elemanlar yöntemini kullanan SEEP/W [15] yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım, doygun zeminlerdeki kararlı akım problemlerinden, doygun olmayan bölgelerdeki kararsız akım problemlerine kadar oldukça farklı durumların modellenmesinde kullanılmaktadır. SEEP/W literatürdeki çalışmalarda da boşluk suyu basınçlarının belirlenmesinde

[16],[17] ve sızma problemlerinin çözümünde [18]-[21] kullanılmaktadır. Programda, Denklem (1)'de verilen kısmi diferansiyel denklem, ağırlıklı artık yöntemlerinden (weighted residual methods) Galerkin yaklaşımıyla açılmakta ve yinelemeli olarak çözülmektedir. Kullanılan programın detayları GeoStudio Int. Ltd. [15] kaynağından, sızmanın matematiksel modeli ve uygulanan sayısal yöntem hakkında detaylı bilgi ise Papagianakis [13] referansından edinilebilmektedir. Benzer bilgi Güngör (1995) [22]'de de sağlanmaktadır.

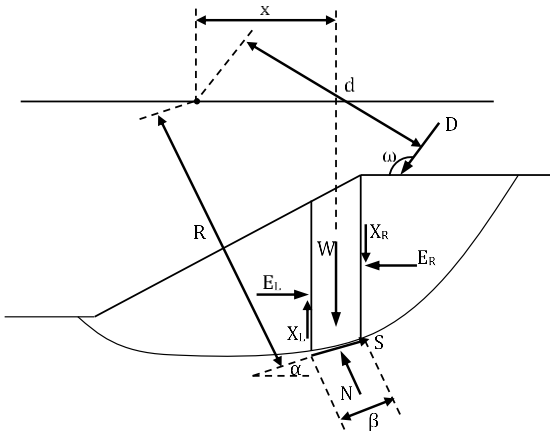
Bunların yanında, doygun ve doygun olmayan zeminlerdeki sızma akımı davranışı ve mekaniği birbirinden oldukça farklıdır. Doygun olmayan bölgedeki akım buradaki su muhtevasına ve boşluklardaki vakum basıncına bağlıdır. Bu iki özellik arasındaki ilişki zemin-su karakteristik eğrisi ile temsil edilmektedir ve doygun olmayan hidrolik iletkenlik bu eğrinin özelliklerine bağlıdır. Zemin-su karakteristik eğrisinin tayini için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan van Genuchten yöntemidir [23]. Bu yöntemde doygun olmayan zeminlerin hidrolik iletkenliği aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir [23].

$$K_r(h) = \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}} \quad (2)$$

Burada α , n , ve m van Genuchten yönteminin eğri uydurmada kullandığı değişkenleri göstermektedir. Denklemdeki m parametresi $m = 1 - 1/n$ bağıntısı ile hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, dolgu gövdesinin serbest sızma yüzeyi üzerinde kalan doygun olmayan bölgedeki sızma akımı van Genuchten yöntemiyle modellenmiştir. Buna göre, dolgu tabakalarını oluşturan zeminlerin α , n , ve m değişkenleri ilgili literatürden alınmış ve hidrolik yükte birlikte yinelemeli hesaplamayla doygun olmayan zeminin hidrolik iletkenliği belirlenerek sızma analizleri yürütülmüştür.

2.2 Şev stabilitesi modellemesi

Dolguların ve yamaçların stabilitelerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan en bilinenleri limit denge analizi ve sonlu elemanlar yöntemi esaslı gerilme analizidir. Gerilme esaslı analizlerde, kayma ihtimali bulunan zemin düzlemindeki gerilmeler hesaplanarak izin verilebilir gerilmelerle karşılaştırılır. Bu yöntem oldukça gelişmiş olup, çeşitli araştırmalarda kullanılmaktadır. Limit denge analizi ise elastik teoriye dayanmaktadır ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisini göz ardı etmesine rağmen kabul edilebilir sonuçlar verdiği için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, limit denge analizi yönteminin kullanıldığı SLOPE/W [24] yazılımıyla şev stabilitesi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde kritik bir kayma düzleminde zemin kütesinin boşluk suyu kuvvetleri ve yer çekimi etkisi altındaki dengesi incelenmektedir. Bu incelemede, zemini harekete geçiren ve tutan kuvvetler ya da momentler birbirlerine oranlanarak bir emniyet faktörü hesaplanır. Emniyet faktörünün 1.0'den küçük olması şevin stabil olmadığını gösterir. Bu amaçla, kayma olasılığı bulunan zemin kütesi sonlu sayıda dilime bölünür ve her bir dilime etkiyen kuvvetler belirlenir [25]. Şekil 1'de limit denge analiziyle irdelenen bir zemin kütesinin serbest cisim diyagramı gösterilmektedir. Burada N normal, S kesme, E_L ve E_R dilimler arası normal, X_L ve X_R ise dilimler arası kesme kuvvetlerini göstermektedir. Limit denge analizleri, göz önünde bulundurduğu denge tipine göre Fellenius, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, Spencer vb. gibi çeşitli yaklaşımlarla gerçekleştirilmektedir [24].



Şekil 1: Dilim Yöntemi ile bir şevin limit denge analizi [24].

Bunlardan Morgenstern-Price ve Spencer yaklaşımlarının hem kuvvet hem de moment dengelerini göz önünde bulundurduğundan diğer tekniklere göre daha hassas ve gerçekçi sonuçlar verdiği bildirilmiştir [24],[26]. Bu çalışmada, Morgenstern-Price yaklaşımıyla hem kuvvet hem de moment dengelerine göre emniyet faktörleri hesaplanmıştır. Moment ve kuvvet dengeleriyle hesaplanan emniyet faktörleri sırasıyla Denklem 3 ve 4'te gösterilmektedir [24].

$$FS_m = \frac{\sum(c'\beta R + (N - u\beta)R \tan \phi')}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (3)$$

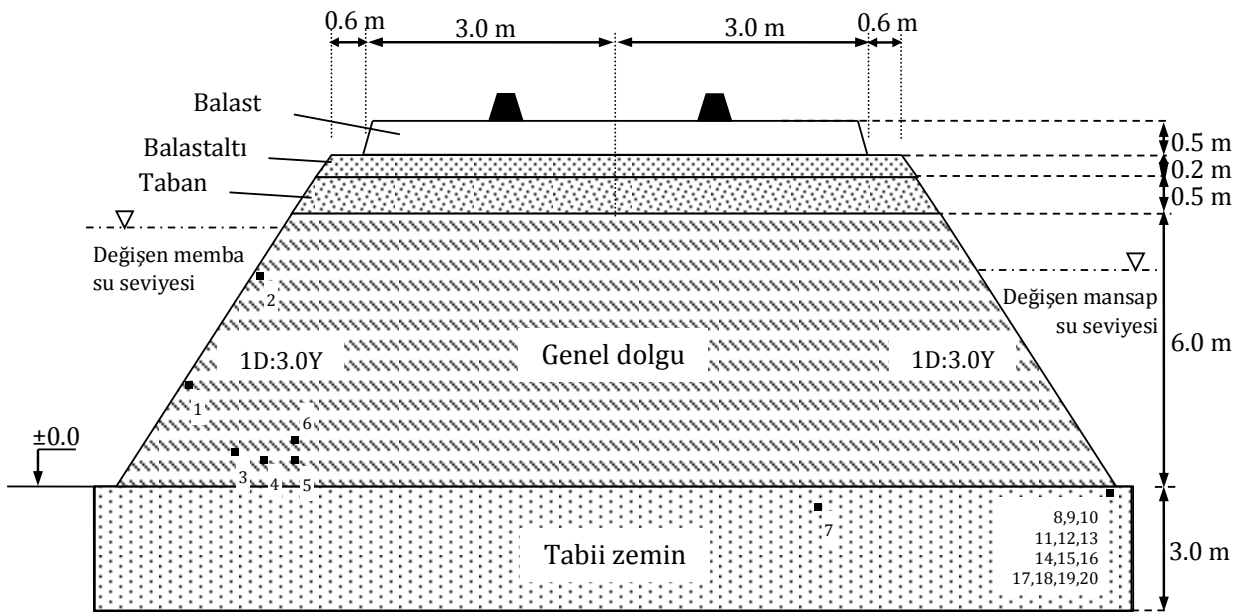
$$FS_k = \frac{\sum(c'\beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \omega} \quad (4)$$

Yukarıda verilen denklemlerde c' efektif kohezyonu, ϕ' efektif içsel sürtünme açısını, N dilim tabanındaki normal kuvveti, W dilim ağırlığını, α dilim alt yüzey eğimini, u boşluk suyu basıncını, D noktasal yükü, β , R , x , f , d ve ω ise geometrik değişkenleri göstermektedir. Olası kayma yüzeyinin tayininde ise deneme yönteminden yararlanılmış, yüzlerce kayma yüzeyi

ve merkezi sınıranarak minimum emniyet faktörünü veren kombinasyon tayin edilmiştir.

3 Uygulama problemi ve analizler

Çalışmadaki uygulama probleminde tipik bir tek yönlü demiryolu en-kesiti ele alınmıştır. Dolgunun en-kesit ve malzeme özellikleri gerçeğe uygun olarak T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü'nün Demiryolları Malzeme, Yapım, Kontrol Ve Bakım Onarım Teknik Esasları'ndan [27] ve literatürde demiryollarının tasarımını ele alan bir çalışmadan [5] belirlenmiştir. Bunlara göre oluşturulan tipik demiryolu dolgusunun tabii zeminden olan yüksekliği 7.2 m'dir ve genel dolgu, taban, balastaltı ve balast olmak üzere dört tabakadan oluşmaktadır. Dolgunun en-kesit görünümü tabakalar ve yükseklikleriyle birlikte **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**de verilmiştir. Balast tabakasının yanal eğimleri 1D:2.0Y iken, balastaltı, taban ve genel dolgununki 1D:3.0Y'dır. Genel dolgu malzemesinin, organik malzeme içermeyen iyi derecelenmiş ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kumlu kil ve çakıllı kilden oluştuğu kabul edilerek zemin özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca bu tabakanın derecelenme katsayısının (C_c) birim değere çok yakın olduğu varsayılmıştır. Balast, balastaltı ve taban tabakalarının ise iyi derecelenmiş, kohezyonsuz, belirli maksimum ve minimum tane çapına sahip agregalardan oluştuğu kabul edilmiş ve buna göre malzeme özelliklerine karar verilmiştir. Tabii zeminin ise kil olduğu varsayımı yapılmıştır. Tüm dolgu tabakalarının ve tabii zeminin malzeme özellikleri **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**de gösterilmektedir. Bu tabloda K_s doygun zemindeki hidrolik iletkenliği, α ve n van Genuchten değişkenlerini, θ_s ve θ_r ise doygun ve artık su muhtevalarını, γ birim hacim ağırlığı, c kohezyonu, ϕ ise içsel sürtünme açısını göstermektedir. Bu tabloda verilen tabakaların K_s , γ , c ve ϕ değerleri USBR'nin Küçük Barajlar Tasarım Rehberi'nden [28], α , n , θ_s ve θ_r değerleri ise Carsel ve Parish [29] çalışmasından elde edilmiştir.

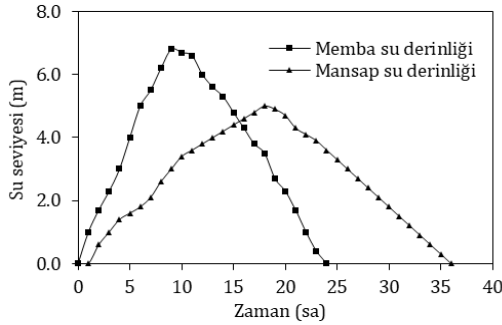


Şekil 2: Çalışmada ele alınan tipik demiryolu dolgusunun en-kesiti.

Tablo 1: Dolgu tabakalarının malzeme özellikleri.

Tabaka	K_s (m/s)	α (cm^{-1})	n	θ_s (m^3/m^3)	θ_r (m^3/m^3)	γ (kN/m^3)	c (kPa)	ϕ (°)
Balast	1.00×10^{-1}	-	-	0.50	-	24	0	42
Balastaltı	1.00×10^{-3}	-	-	0.40	-	22	5	35
Taban	1.00×10^{-4}	-	-	0.20	-	18	25	30
Genel dolgu	2.20×10^{-6}	0.027	1.23	0.38	0.100	18	20	25
Tabii zemin	1.28×10^{-6}	0.008	1.09	0.38	0.068	18	15	15

Gerçekçi bir modelleme için, ele alınan demiryolu dolgusunun memba ve mansap sınır koşulları, daha önce benzer bir demiryolu dolgusunun üzerinde bulunduğu bir havzadaki taşkın modellemesi çalışmasından [30] alınmıştır. Süre, ve diğ. [30], ele alınan geniş ve düz bir havzanın sayısal yükseklik modeli üzerinde 1 boyutlu, 2 boyutlu ve birleştirilmiş 1 boyutlu ve 2 boyutlu (coupled 1-D and 2-D) taşkın modellemelerini 200 yıllık tekrür süresine sahip bir debi ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra havzadaki bir dolgunun memba ve mansabındaki su yüksekliklerini belirlemiştir. Şimdiki çalışmada, Süre ve diğ. [30] çalışmasında belirlenen su yükseklikleri kullanılmıştır. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te demiryolu dolgusunun memba ve mansabındaki su seviyelerinin taşkın anında zamana göre değişimleri verilmiştir. Bu seviyeler **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de gösterilen ± 0.0 kotundan olan seviyeleri göstermektedir. Buna göre dolgunun membaında ve mansabında gözlemlenen maksimum su kotları sırasıyla 6.8 m ve 5.0 m'dir. Dolayısıyla taşkın dalgasının dolgunun üzerinden aşması söz konusu değildir ve demiryolu üstten aşmaya karşı güvenli kabul edilmiştir.



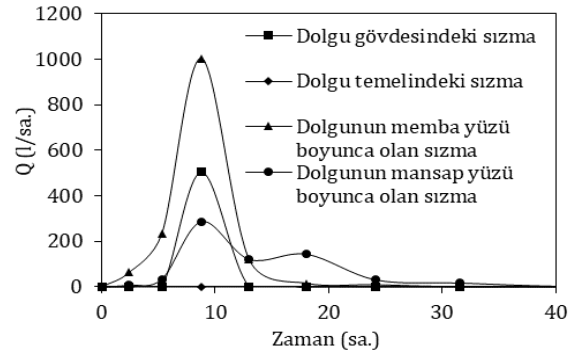
Şekil 3: Dolgunun memba ve mansap sınır koşulları.

Çalışma kapsamında, öncelikle, dolgudaki sızma bahsedilen sınır koşullarıyla kararsız akım durumu için incelenmiştir. Kararsız akım durumunu oluşturan taşkın olayı **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'ten anlaşılacağı üzere 2 günden daha az sürmektedir. Dolgudaki kararsız akımın benzeşim süresi bu süreden oldukça büyük bir zaman olan 20 gün olarak seçilmiştir. Analizlerde dolguyu oluşturan zeminlerin homojen ve izotropik olduğu kabulü yapılmış ve doymuş/doymuş olmayan zemin modelleri kullanılmıştır. Sızma analizi öncesinde dolgunun memba ve mansap su seviyeleri sıfır olarak alınmış ve dolgunun tamamen kuru olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, analiz başlangıcında dolguyu oluşturan zeminlerin su muhtevasının artık su muhtevasında olduğu kabul edilmiştir. Daha sonra sızma analizlerinden elde edilen boşluk suyu basınçları kullanılarak, şevlerin tren yükünün olduğu ve olmadığı koşullardaki stabilitesi limit denge analizi yöntemlerinden Morgenstern-Price tekniğiyle incelenmiştir.

3.1 Sızma analizi sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan sızma analizleriyle dolgu gövdesinden ve temelinden geçen sızma akımı miktarları,

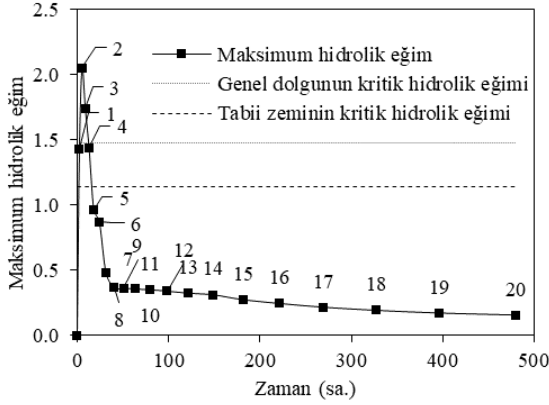
gövdedeki boşluk suyu basınçları ve sızma akımının hidrolik eğimleri elde edilmiştir. Dolgunun gövde, temel, memba ve mansap yüzlerinden geçen akımlar **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te verilmiştir. Buna göre taşkın yükselme evresinde dolgunun temeli haricindeki yerlerde sızma miktarı artmış, daha sonra taşkın çekilirken azalmıştır. Temeldeki sızmanın tüm zamanlar için ihmal edilebilir olduğu tespit edilmiştir. Diğer yerlerdeki sızma akımları $t=8.8$ sa. anında en büyük değerlerini almıştır. En büyük sızma akımı ise $1 \text{ m}^3/\text{sa.}$ ile dolgunun gövdesinde gözlemlenmiştir. Sızma akımının $t=40$ sa. anında tamamen durduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4: Dolgunun farklı yerlerindeki sızma akımının zamana bağlı değişimi.

Dolgunun sızmaya karşı güvenli olup olmadığı borulanmanın oluşup oluşmadığıyla kontrol edilmiştir. Bu amaçla dolgu gövdesindeki ve temelindeki en büyük hidrolik eğimlerin kritik hidrolik eğimden büyük olup olmadığı kontrol edilmiştir. Kritik hidrolik eğim Terzaghi [31] tarafından zeminin batık birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Kritik hidrolik eğim aşıldığında zemin parçacıkları akımla birlikte taşınmaya başlanmakta, bu durum görel olarak uzun süre devam ettiğinde borulanma oluşmaktadır [32]. Dolguda oluşan maksimum hidrolik eğimlerin zamana göre değişimi **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te sunulmuştur. Bu şekilde maksimum hidrolik eğimin gözlemlendiği noktalar numaralandırılmış ve bu noktaların gövde üzerindeki yerleri **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de işaretlenmiştir. Noktalardan 1-6 arasındakiiler genel dolgu tabakasında, 7-20 arasındakiiler ise tabii zeminde yer almaktadır. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te ayrıca maksimum hidrolik eğimin gözlemlendiği tabakalar olan genel dolgu ve tabii zeminin kritik hidrolik eğimleri de yatay çizgilerle gösterilmiştir. Genel dolgunun kritik hidrolik eğimi 1.48 iken, tabii zemininki 1.14 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre yalnızca iki noktada (Nokta 2 ve 3) hidrolik eğim kritik eğimi 10.6 sa. boyunca aşmıştır. Dolguda gözlemlenen maksimum hidrolik eğim 2.05'tir ve $t=5.3$ sa. anında gözlemlenmiştir. Bu hidrolik eğim, kritiği %39 oranında aşmaktadır ve bunun taşkın yükselme evresinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kritiğin aşıldığı bölgenin dolgunun membaında olduğu tespit edilmiştir. Taşkın çekilme

evresinde ve sonrasında gözlemlenen bütün hidrolik eğimlerin kritik hidrolik eğimlerden küçük olduğu bulunmuştur.



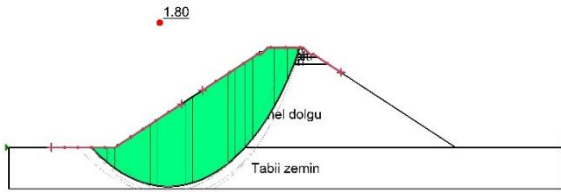
Şekil 5: Maksimum hidrolik eğimin zamana göre değişimi.

Dolgu gövdesindeki sızmayı etkileyen en büyük etmenler dolgu malzemesinin tipi (zemin sınıfı), boşluk oranı, başlangıç su muhtevası ve hidrolik iletkenliğidir ve dolgu üzerinden tren geçerken, dolgunun bu özellikleri değişmemektedir. Dolayısıyla bir taşkın anında, tren geçişi esnasında dolgu gövdesindeki sızma bu geçişten etkilenmemektedir. Bu sebeple, yalnızca tek bir durum için sızma analizleri yapılmıştır. Fakat şevlerin stabilitesi bu durumdan etkileneceğinden analizler iki farklı durum için ayrı ayrı yürütülmüştür.

3.2 Şev stabilitesi analizi sonuçları

3.2.1 Tren yükünün bulunmadığı durum

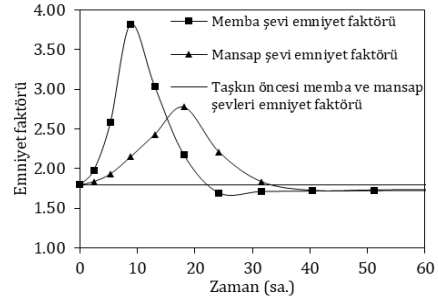
Çalışma kapsamında ele alınan demiryolu dolgusunun şev stabilitesi analizleri ilk olarak dolgu üzerinde tren yükü bulunmazken yürütülmüştür. Burada, öncelikle dolgunun taşkın öncesindeki stabilize durumu incelenmiştir. Taşkın öncesinde dolguya etki eden kuvvetler değişmediğinden şevlerin emniyet faktörü sabit kalmaktadır. Buna göre Morgenstern-Price yöntemiyle yapılan analizlerde memba ve mansap şevlerinin emniyet faktörü 1.80 olarak hesaplanmıştır. Bu durum için limit denge analizinde ele alınan dilimler, kritik kayma düzlemi ve merkezi ve elde edilen emniyet faktörü dolgu kesiti üzerinde **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da sunulmuştur.



Şekil 6: Dolgunun taşkın öncesindeki memba şevi kritik kayma düzlemi ve merkezi.

Taşkın anında dolgudaki boşluk suyu basınçları ve dolguya etkileyen kuvvetler zamanla değiştiğinden şevlerin emniyet faktörleri de zamanla değişmektedir. Memba ve mansap şevlerinin emniyet faktörlerinin zamanla değişimi **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de verilmiştir. Buna göre hem memba hem de mansap şevleri emniyet faktörleri zamanla birlikte önce yükselmekte, daha sonra azalmaktadır. Şevlerin emniyet faktörünün önce artmasının sebebi taşkın anında bunların üzerine gelen suyun kaymaya karşı koyan kuvvet olarak etki etmesidir. Dolgunun her iki yüzünde biriken su ile her iki şevin emniyet faktörü artmaktadır. Fakat bu anda

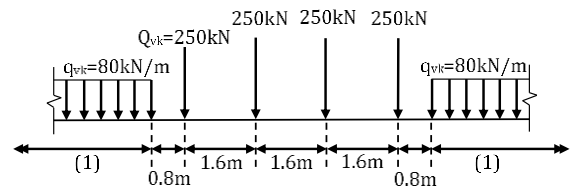
dolguda sızma başlamakta ve boşluk suyu basınçları zamanla artmaktadır. Boşluk suyu basınçları ise şevi kaydırmaya çalışan kuvvet olarak etki etmektedir. Taşkın çekilme evresinde, kaymaya karşı kuvvet olan su yükü azalmakta, dolgudaki boşluk suyu basınçları ise neredeyse değişmediğinden şevlerin emniyet faktörleri zamanla azalmaya başlamaktadır. Dolgu gövdesi ve temeli tamamen drene olana ve boşluk suyu basınçları taşkın öncesi değerlerine dönene kadar şevler düşük bir emniyet faktörüyle stabiliteyi korumaktadır. Gövde ve temel tamamen drene olduktan sonra memba ve mansap şevi emniyet faktörleri taşkın öncesi değerlerine dönmektedir. Taşkın anında memba şevinin karşılaştığı en büyük emniyet faktörü 3.82, en küçüğü ise 1.69 iken mansap şevinin en büyük ve en küçük emniyet faktörleri sırasıyla 2.78 ve 1.73'tür.



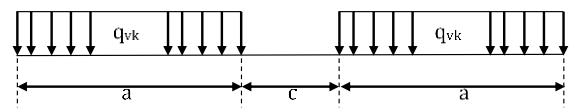
Şekil 7: Memba ve mansap şevleri emniyet faktörlerinin, tren yükü olmaksızın, taşkın anında zamana bağlı değişimi.

3.2.2 Tren yükünün bulunduğu durum

Çalışma kapsamında ayrıca, taşkın anında demiryolu trafiğinin durdurulmadığı durum da gözetilmiştir. Bu amaçla trenin dolgu üzerinde oluşturduğu statik yük göz önünde bulundurulmuş, olası dinamik yükler, ivmelenme ve frenleme yükleri ihmal edilmiştir. Ana demiryolları üzerinde, normal trafik koşullarındaki statik yükün tanımı için ilgili Avrupa Birliği standardı olan "Eurocode 1: Actions on Structures-Part 2: Traffic Loads on Bridges"den [33] yararlanılmıştır. Tren yükünü benzetmek amacıyla bu standartta tanımlanan "Load Model 71 (LM 71)" ve "Load Model SW/0 (LM SW/0)" yük modelleri kullanılmıştır. Her iki model de, Avrupa'daki standart ve geniş ölçekli ana demiryolu hatları üzerinde bulunan köprülerin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken statik normal trafik yükünü tanımlamaktadır [33]. Bu modellerdeki yükler **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ve **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da dolgunun boyuna yönü için verilmiştir.



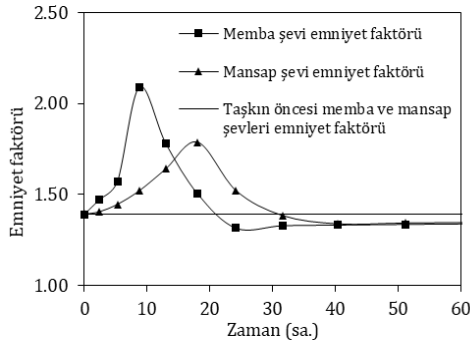
Şekil 8: LM 71 için dolgunun boyuna yönündeki yük dağılımı [33].



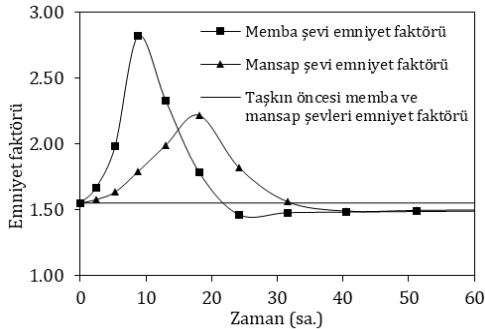
Şekil 9: LM SW/0 için dolgunun boyuna yönündeki yük dağılımı [33].

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'deki (1) mesafesi için bir sınırlama getirilmemiştir.**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'daki a ve c mesafeleri sırasıyla 15.0 m ve 5.3 m olarak, q_{vk} yükü ise 133 kN/m olarak tanımlanmıştır. Yapılan şev stabilitesi analizlerinde "Load Model 71" için en büyük yük olan 250 kN'luk yük, Load Model SW/0 için ise 133 kN'luk yük noktasal olarak dolgu en-kesitine uygulanmıştır.

Bu kapsamda, öncelikle dolgunun taşkın öncesindeki şev stabilitesi davranışı irdelenmiştir. Taşkın öncesinde memba ve mansap şevlerinin kaymaya karşı olan emniyet faktörleri LM 71 yükü için 1.39, LM SW/0 yükü için 1.55 olarak bulunmuştur. Dolgunun, LM 71 tren yükü altında, taşkın anında, şevlerinin kaymaya karşı olan emniyet faktörlerinin zamana göre değişimi **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da, LM SW/0 yükü altında emniyet faktörlerinin değişimi ise **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de sunulmuştur. Bunlara göre tren yükünün olmadığı durumdakine benzer şekilde memba ve mansap şevlerinin emniyet faktörleri zamanla önce artmakta, sonra azalmaktadır. LM 71 yük modeli altında, memba şevinde gözlemlenen en büyük ve küçük emniyet faktörleri sırasıyla 2.09 ve 1.31 iken mansap şevinde en büyük 1.79, en küçük 1.33 değerlerine sahip emniyet faktörleri gözlemlenmiştir. LM SW/0 yük modelinde ise memba şevindeki en büyük ve en küçük emniyet faktörleri sırasıyla 2.82 ve 1.46, mansap şevindeki en büyük ve en küçük emniyet faktörleri ise sırasıyla 2.22 ve 1.49 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 10: Memba ve mansap şevleri emniyet faktörlerinin, LM 71 tren yükü modeliyle, taşkın anında zamana bağlı değişimi.

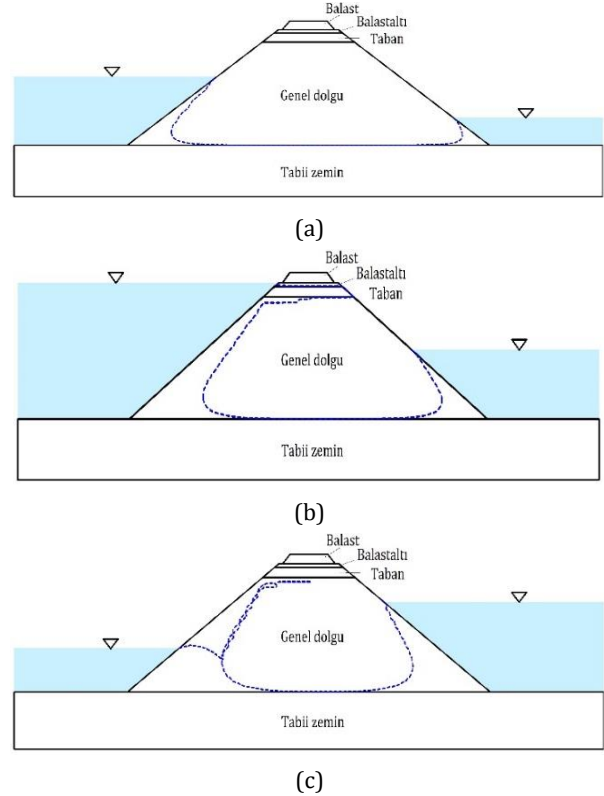


Şekil 11: Memba ve mansap şevleri emniyet faktörlerinin, LM SW/0 tren yükü modeliyle, taşkın anında zamana bağlı değişimi.

4 Tartışma ve çıkarımlar

Çalışmada yürütülen sızma analizleri sonucunda, taşkın anında dolgu gövdesinden geçen maksimum sızma debisi 1 m³/sa. olarak elde edilmiştir (bkz. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**). Fakat bir dolgunun güvenliği gövdesinden ya da

temelinden geçen sızma miktarından çok buralarda oluşan hidrolik eğimlere göre değerlendirilmektedir. Analiz sonuçlarında dolgunun karşılaştığı hidrolik eğimlerin, zamanın büyük bir çoğunluğunda, dolguyu oluşturan zeminlerin kritik hidrolik eğimlerinden küçük olduğu gözlemlenmiştir (bkz. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**). Yalnızca taşkın yükselme evresinde, dolgunun membaında ve genel dolgu tabakasının bazı bölgelerinde, 10.6 sa. boyunca kritik hidrolik eğim aşılmıştır. Bu evrede, sızmanın serbest yüzeyi dolgunun membaından merkezine doğru ilerlemektedir. Fakat bu hat mansap şevine ulaşmadan taşkın çekilme evresine girmekte ve sızmanın serbest yüzeyi memba şevine doğru geri yönde hareket etmektedir. Sızmanın doğu gövdesindeki bu hareketi **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de sunulmuştur. Bu sebeple, kritik hidrolik eğimin aşıldığı bölgelerden taşınma ihtimali bulunan ince taneli zemin hareket ettiğinde dolgunun merkezine doğru ilerleyecek ve hidrolik eğimler zamanla azaldığından burada kalacaktır. Dolayısıyla, dolguda ince taneli zeminler hareket etse bile borulanmanın oluşmayacağından ve dolgunun bu yönden güvenli olduğundan bahsedilebilir. Fakat bu çalışmada ele alınan 200 yıllık tekerrür süresine sahip taşkın, dolgunun güvenli tasarımı için yeterli olsa bile demiryolu hattı faydalı ömrü boyunca daha büyük tekerrür sürelerine sahip taşkınlara maruz kalabilir. Bunlar, memba ve mansapta daha uzun süreli etkiler yaratabilir. Bu durumlarda dolgu gövdesindeki sızma daha uzun süre devam edebilir. Taşınmaya başlayan ince taneli zeminler mansap şevinden yikanarak dolgudan ayrılabilir ve borulanmanın oluşmasına neden olabilir. Bunun engellenmesi için dolgunun memba ve mansap şevleri geçirimsizliği sağlayacak malzemelerle (beton, asfalt, vb.) kaplanabilir. Ayrıca, gövdede ya da temelde geomembran kullanılabilir.



Şekil 12: Taşkın durumunda, (a) t=5 sa.; (b) t=10 sa.; (c) t=20 sa. anlarında dolgu gövdesinde oluşan sızmanın serbest yüzeyi.

Çalışma kapsamında yapılan şev stabilitesi analizleri sonucunda, taşkın anında demiryolu işletilmediğinde oluşan emniyet faktörlerinin her zaman 1.5'ten büyük olduğu gözlemlenmiştir (bkz. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**). USBR'nin Küçük Barajlar Tasarım Rehberi'nde [28], bu barajların şevlerinin güvenli bir biçimde stabilitesini korumaları için sahip olmaları gereken en küçük emniyet faktörü 1.5 olarak verilmiştir. Demiryolu dolguları da geometrileri ve malzeme özellikleri bakımından küçük barajlara benzediğinden, bu emniyet faktörü dolguda sağlandığında, dolgunun güvenli olduğu sonucuna varılabilir. Dolayısıyla, demiryolu hattının taşkın anında işletilmemesi güvenli olduğu sonucu çıkarılabilir. Fakat demiryolunun taşkın anında işletildiği ve tren yükünün gözetildiği durumda, ele alınan her iki yük modelinde de memba ve mansap şevlerinde 1.5'ten küçük emniyet faktörleri gözlemlenmiştir (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ve **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**). Hatta LM 71 yük modelinde, taşkın olmadığında bile, şevlerin 1.5'ten küçük bir emniyet faktörüyle korunduğu ortaya çıkarılmıştır (bkz. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**). Fakat şevlerin emniyet faktörleri hiçbir zaman birim değer altına düşmemiştir. Bu, dolgu şevlerinin göçmediği anlamına gelmektedir. Ancak, güvenli tarafta kalmak için, şevlerin emniyet faktörlerini her zaman 1.5'ten büyük yapacak şev eğimleri seçilebilir ya da dolguda geotekstil uygulaması ile güçlendirme yapılabilir. Bunlara alternatif olarak, taşkın anında demiryolu hattı trafiğinin durdurulması da dolguyu tamamen güvenli kılacaktır. Tren yükünün gözetildiği şev stabilitesi analizleri sonuçlarından, ele alınan yük modelinin emniyet faktörlerini büyük ölçüde etkilediği sonucu da çıkarılmaktadır. Dolayısıyla, taşkın anında demiryolu hattı işletilecekse gerçeğe en yakın yük modeli seçilmeli ya da ele alınan tüm yük modellerinden en kötü sonucu verene göre dolgu tasarlanmalıdır. Ayrıca, yalnızca trenin oluşturduğu statik yük değil tüm dinamik yüklerin (ivmelenme ve frenleme yükleri, merkezkaç kuvvetleri, vb.) göz önünde bulundurulması, demiryolu dolgusunun güvenliğinin daha gerçekçi olarak değerlendirilmesini sağlayacaktır.

5 Sonuçlar

Çalışma kapsamında, geniş düzlükteki tipik bir demiryolu dolgusunun 200 yıllık tekrür süresine sahip bir taşkın anında sızma ve şev stabilitesi yönlerinden güvenliği incelenmiştir. Sızma analizleri sonlu elemanlar yönteminin kullandığı SEEP/W yazılımıyla, şev stabilitesi analizleri ise limit denge analizi yöntemlerinden Morgenstern-Price yaklaşımının kullandığı SLOPE/W yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Şev stabilitesi analizleri taşkın anında demiryolu trafiğinin durdurulduğu ve devam ettirildiği iki farklı durum için yürütülmüştür. Ele alınan demiryolu dolgusu 200 yıllık tekrür süresine sahip taşkın dalgasıyla üstten aşılmadığından bu açıdan güvenli olarak kabul edilmiştir. Dolgunun güvenliği, sızmanın oluşturacağı borulanma ve şevlerin stabilitesinin yitilmesi durumları için incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre demiryolu dolgusunda, taşkın anında, ince taneli zeminin hareketi başlamış, fakat hareketin kısa süreli olduğu ve devamlı olmadığı için dolguda borulanma olayının gözlemlenmediği sonucuna varılmıştır. Ancak, demiryolu dolgusunun daha büyük tekrür süreli bir taşkınla karşılaşma ve bu durumda borulanmanın gerçekleşme ihtimaline karşın dolgu ön yüzünde geçirimsiz kaplama ya da geomembran ile çeşitli önlemler alınabilir. Bunun yanında, taşkın anında, demiryolu hattı işletilmediğinde, dolgu

şevlerinin stabilitesinin güvenli bir şekilde korunduğu elde edilmiştir. Fakat hat işletildiğinde, trenin oluşturduğu yüklerle birlikte taşkın anında şevler stabilitesini yitirmese bile güvenli kabul edilen seviyeden düşük emniyet faktörlerine sahip olmaktadır. Bu durumda bir taşkın anında hattın işletilmemesi dolgunun güvenliği yönünden tercih edilebilir. Eğer yine de taşkın anında demiryolu hattı işletilmek istenirse dolgunun stabilitesini artıracak önlemlere başvurulması önerilmektedir.

6 Kaynaklar

- [1] Morris M, Dyer M, Smith P. *Management of Flood Embankments: A Good Practice Review*. London, UK, Defra, 2007.
- [2] Fredlund M, Lu H, Feng T. "Combined seepage and slope stability analysis of rapid drawdown scenarios for levee design". *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, Dallas, Texas, 13-16 March 2011.
- [3] Woldringh RF, New BM. "Embankment design for high speed trains on soft soils." *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Amsterdam, Netherlands, 7-10 June 1999.
- [4] Egeli I, Usun H. "Designing high-speed train railway embankments using finite element analysis." *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(8), 2127-36, 2012.
- [5] Tayfur G, Egeli İ. "Railway embankment design based on neural networks". *Gradevinar*, 65(4), 319-330, 2013.
- [6] Mu Y, Ma W, Wu Q, Liu Y. "Permafrost-Related embankment deformations along the qinghai-tibet railway". *16th International Conference on Cold Regions Engineering*, Salt Lake City, 19-22 July 2015.
- [7] Wei J, Xu ZY, Yang CY, Xu MX. "Study on temperature and settlement of an air-cooled embankment at the qinghai-tibet railway". *Advances in Earth Structures: Research to Practice*, Shanghai, China, 6-8 June 2006.
- [8] Ma W, Qi J, Wu Q. "Analysis of the Deformation of Embankments on the Qinghai-Tibet Railway". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(11), 1645-54, 2008.
- [9] Zhuang Y, Cui X. "Case studies of reinforced piled high-speed railway embankment over soft soils". *International Journal of Geomechanics*, 16(2), 6015005, 2015.
- [10] Montanelli F, Piergiorgio R. "Geogrid reinforced railways embankments: design concepts and experimental test results". International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE Symposium Report, 2003.
- [11] Chen J, Luo Q, Liang D, Liu M. "On-site seepage test for railway embankment filled with volcanic cinder gravels". *ICLEM 2014: System Planning, Supply Chain Management, and Safety*, Shanghai, China, 9-11 October 2014.
- [12] Richards LA. "Capillary conduction of liquids through porous mediums". *Journal of Applied Physics*, 1(5), 318-33, 1931.
- [13] Papagianakis AT, Fredlund DG. "A steady state model for flow in saturated-unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 21(3), 419-30, 1984.
- [14] Ayvaz MT, Tunçan M, Karahan H, Tunçan A. "An extended pressure application for transient seepage problems with a free surface". *Journal of Porous Media*, 8(6), 613-25, 2005.
- [15] Geo-Slope Int Ltd. "Seepage Modeling with SEEP/W". Geo-Slope International Ltd., Calgary, Canada, User's Manual, 2013.

- [16] Chu-Agor M, Wilson G, Fox G. "Numerical modeling of bank instability by seepage erosion undercutting of layered streambanks". *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(12), 1133-45, 2008.
- [17] Oh WT, Vanapalli SK. "Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes". *Computers and Geotechnics*, 37(5), 649-57, 2010.
- [18] Foster D, Bole D, Deere T. "Rio grande dam-seepage reduction design and construction". *Rocky Mountain Geo-Conference 2014*, Lakewood, Colorado, USA, 7 November 2014.
- [19] Soleymani S, Akhtarapur A. "Seepage analysis for shurijeh reservoir dam using finite element method". *ASCE Proceedings*, 397(41165), 330-1, 2011.
- [20] Calamak M, Yanmaz AM. "Uncertainty quantification of transient unsaturated seepage through embankment dams". *International Journal of Geomechanics*, 17(6), 1-11, 2017.
- [21] Calamak M, Yanmaz AM, Kentel E. "Probabilistic evaluation of the effects of uncertainty in transient seepage parameters". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(9), 1-6, 2017.
- [22] Güngör M. "The finite element model of leakage phenomena under the soil dams". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 1(1), 33-8, 1995.
- [23] Van Genuchten MT. "A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils1". *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898, 1980.
- [24] Geo-Slope Int Ltd. "Stability Modeling with SLOPE/W". Geo-Slope International Ltd., Calgary, Canada, User's Manual, 2014.
- [25] Craig RF. *Craig's Soil Mechanics*. 7th ed. London, UK, Spon Press, 2004.
- [26] Husein Malkawi AI, Hassan WF, Abdulla FA. "Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability." *Structural Safety*, 22(2), 161-687, 2000.
- [27] DLH. "Demiryolları Malzeme, Yapım, Kontrol ve Bakım Onarım Teknik Esasları". T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2007.
- [28] USBR. *Design of Small Dams*. Washington DC, USA, US. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987.
- [29] Carsel RF, Parrish RS. "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics". *Water Resources Research*, 24(5), 755-769, 1988.
- [30] Sürer S, Karaman ÇH, Önder G. "Kebena River Flood Risk Assessment Report". DHI Türkiye Yazılım ve Musavirlik Ltd, Ankara, Türkiye, 2015.
- [31] Terzaghi K, Peck RB, Mesri G. *Soil mechanics in engineering practice*. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [32] Skempton AW, Brogan JM. "Experiments on piping in sandy gravels". *Géotechnique*, 44(3), 449-60, 1994.
- [33] EN 1991-2. "Eurocode 1: Actions on Structures - Part 2: Traffic Loads on Bridges". Brussels, Belgium, 2003.