

ORGANİK ZEMİN ÜZERİNE İNŞA EDİLMİŞ BİR DOLGUNUN ZAMANA BAĞLI DAVRANIŞI

TIME DEPENDENT BEHAVIOR OF AN EMBANKMENT BUILT ON ORGANIC SOIL

Resul SALMAN¹, Abdulazim YILDIZ²

ÖZET

Geleneksel konsolidasyon teorisi, konsolidasyon oturmalarının aşırı boşluk suyu basınçlarının sönümlenme sürecinden dolayı efektif gerilmedeki artış devam ederken meydana geldiği varsayımına dayanmaktadır. Zeminin sabit bir efektif gerilme değerine ulaştıktan sonra gerçekleşen deformasyonlar çoğu zaman ihmal edilebilmektedir. İkincil konsolidasyon oturmaları veya krip olarak isimlendirilen bu deformasyonlar organik zeminlerde, inorganik zeminlere oranla ciddi oranlarda büyümektedir. Bu sebeple organik zeminlerin krip deformasyonlarının ileri seviye zemin modelleri ile dikkate alınması önemlidir. Bu çalışma kapsamında, organik zemin üzerine inşa edilmiş Sackville dolgusu Modifiye Cam Kili (MCC) modelinin yanı sıra ileri seviye zemin modeli olan CREEP-SCLAY1S ile de analiz edilmiştir. CREEP-SCLAY1S modeli, MCC modelinin dikkate alamadığı anizotropiyi, yapısal bozulmayı ve viskoz davranışı da dikkate alabilmektedir. İlgili zemin modellerinin dolgudan kaynaklanan deformasyonları ve aşırı boşluk suyu basınçlarını ne ölçüde doğru yansıttığını belirleyebilmek amacıyla çalışma sonunda sayısal analizler, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Organik zemin, dolgu, zamana bağlı davranış, krip.

ABSTRACT

Traditional consolidation theory is based on the assumption that consolidation settlements occur when the increase in effective stress continues due to the process of dissipation of excess pore pressures. The deformations that occur after the soil reaches a constant effective stress value are often negligible. These deformations, which are called secondary consolidation settlements or creep, grow at a significant rate in organic soils compared to inorganic soils. For this reason, it is important to consider the creep deformations of organic soils with advanced soil models. In this study, the Sackville embankment constructed on organic soil was analyzed with Modified Cam Clay (MCC) model as well as the advanced soil model CREEP-SCLAY1S. The CREEP-SCLAY1S model can also take into account anisotropy, structural deterioration, and viscous behavior that the MCC model cannot take into account. At the end of the study, numerical analyses were compared with the experimental results to determine how accurately the relevant soil models reflect the deformations caused by the embankment.

Keywords: Organic soil, embankment, time-dependent behavior, creep.

1. GİRİŞ

İnce daneli zeminlerin, kaba daneli zeminlere oranla üzerlerine inşa edilen yapılardan dolayı daha uzun süreli deformasyonlar gösterdikleri bilinmektedir (Terzaghi, 1923; Taylor, 1942). Literatürde krip deformasyonları

¹ MSc, Çukurova Üniversitesi, salmanresul@gmail.com (sorumlu yazar)

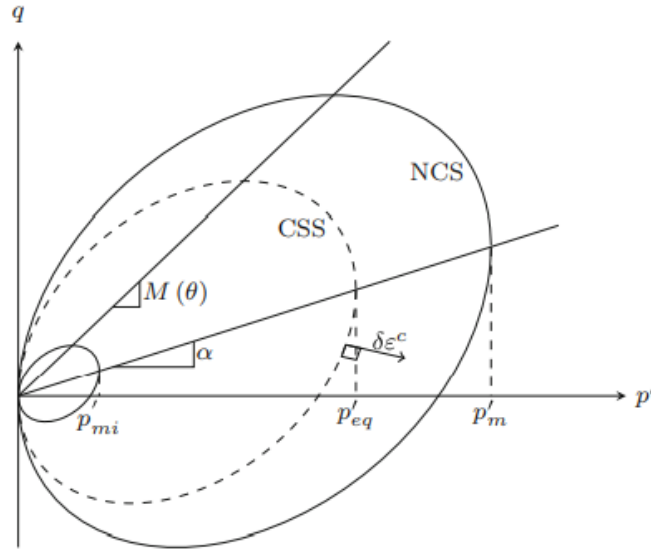
² Prof. Dr., Çukurova Üniversitesi, azim@cukurova.edu.tr

(ikincil konsolidasyon, zamana bağlı şekil değiştirmeler) olarak nitelenen bu deformasyonlar, gerilme izi ve yükleme hızı gibi başka parametrelerin de etkili olmasından dolayı görece düşük zaman aralıklarında da geçerli olabilmekte ve zeminin göçmesine sebebiyet verebilmektedir (Yin vd., 2010). Krip deformasyonlarının etki derecesini etkileyen en önemli hususlardan biri şüphesiz zeminin bünyesinde barındırdığı organik maddenin miktarıdır. Organik madde miktarının toplam deformasyon miktarını ve süresini etkilediği literatürde sıklıkla bahsedilmiş olup, organik madde miktarı arttıkça, ikincil konsolidasyon katsayısının, birincil konsolidasyon katsayısına oranı da dikkate değer oranda artış göstermektedir (Feng ve Wang, 2021; Mesri, 1973).

Bu çalışmada Rowe vd. (1995) tarafından göçme anına kadar hızlı bir şekilde yüklenen Sackville dolgununun numerik analizi yapılmıştır. Rowe vd. (1995) tarafından da ifade edildiği üzere dolgu yüksek miktarda organik madde içeren bir zemin üzerine inşa edilmiş, dolgu krip (zamana bağlı) etkisinde göçmüştür. Zamana bağlı şekil değiştirmeleri dikkate alan zemin modellerinin çoğu ilgili deformasyonların sadece plastik şekil değiştirmeler üzerinde etkili olduğu - viskoplastik zemin modelleri - varsayımına dayanmakta olduğundan Sackville dolgununun zamana bağlı davranışını viskoplastik bir zemin modeli ile dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada dolgunun modellenmesi için sıklıkla kullanılan elasto-plastik zemin modeli olan Modifiye Cam Kili'nin (MCC) yanı sıra elasto-viskoplastik zemin modeli olan Creep-SCLAY1S modeli de kullanılarak gerçek deplasman sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

2. CREEP-SCLAY1S ZEMİN MODELİ

Gelişmiş zemin modellerinden biri olan Creep-SCLAY1S anizotropiyi, yapısal bozulmayı ve krip davranışı dikkate alabilen bir zemin modeli olup kritik durum teorisini kullanan MCC zemin modeli üzerine inşa edilmiştir (Yin ve Karstunen, 2008; Yin vd., 2010; Sivasithamparan vd, 2015). MCC'nin dikkate alamadığı bu zemin davranışlarını dikkate alabilmek amacıyla modele birçok parametre eklenmiştir.



Şekil 1. Creep-SCLAY1S modeli için Akma Yüzeyleri (Gras vd., 2018)

Elasto-viskoplastik zemin modeli olan Creep-SCLAY1S'de toplam şekil değiştirmeler, hacimsel (ϵ_v) ve kayma (ϵ_q) şekil değiştirmeler üzerinden incelenir. Her iki bileşen kendi içerisinde elastik ve krip şekil değiştirmeler olmak üzere alt iki bileşene ayrılmaktadır.

$$d\epsilon_v = d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^c$$
$$d\epsilon_q = d\epsilon_q^e + d\epsilon_q^c$$

Creep-SCLAY1S zemin modelinde toplam 3 adet akma yüzeyi bulunmaktadır (Şekil 1). İlgili zemin modelinde, anizotropinin dikkate alınabilmesi amacıyla akma yüzeyleri kesmeye uğramış elips şeklindedir. CSS akma yüzeyi şu an zeminin üzerinde geçerli olan gerilmeyi dikkate almakta iken, NCS akma yüzeyi ise normal

konsolidasyon yüzeyini belirtmektedir. Bu iki akma yüzeyinin üst üste gelmesi durumunda şu an geçerli olan gerilme durumunun normal konsolidasyon yüzeyinde yer aldığı söylenebilir. CSS ve NCS olarak nitelenen akma yüzeyleri aşağıda yer alan bağıntı vasıtasıyla dikkate alınır.

$$p'_m = p' + \frac{(q - \alpha p')^2}{(M(\theta_\alpha)^2 - \alpha^2)p'}$$

İlgili bağıntıdaki p'_m terimi akma yüzeyinin boyutunu tarif etmektedir. Akma yüzeyinin boyutunu gösteren bu terim CSS akma yüzeyinin boyutu için p'_{eq} ile gösterilirken, NCS akma yüzeyinin boyutunu tarif etmek için ise p'_{eq} terimi kullanılmaktadır. $M(\theta_\alpha)$ terimi kritik durumdaki gerilme oranını ifade etmektedir. α terimi ise akma yüzeylerinin eğimini göstermekte olup, bu terim ile zeminin anizotropisi modelde dikkate alınabilmektedir.

İçsel akma yüzeyi tüm yapısal bağ kuvvetlerinin kopmuş olduğu zemini temsil etmektedir. İçsel akma yüzeyi olarak nitelenen akma yüzeyinin, statik akma yüzeyi ile arasındaki tek fark daha küçük bir boyuta sahip olmasıdır (Şekil 1). Akma yüzeylerinin boyutları arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı bulunmaktadır.

$$p'_m = (1 + \chi)p'_{mi}$$

İlgili bağıntıda yer alan χ parametresi başlangıç yapısal bağ durumunu tarif etmekte olup killer üzerinde yapılan hassaslık deneyleri ile tespit edilebilmektedir. p'_m terimi CSS akma yüzeyinin başlangıç anındaki boyutunu ifade ederken p'_{mi} terimi ise içsel akma yüzeyinin başlangıç boyutunu ifade etmektedir.

Model, kripi davranışını Perzyna (1963, 1966) tarafından geliştirilen aşırı gerilme teorisi üzerine inşa edilmiştir. Modelin en önemli özelliklerinden biri sadece elastik şekil değiştirmelerin geçerli olduğu bir bölgenin olmamasıdır. Çok küçük gerilmeler altında bile zeminde akma gerçekleşebilmektedir. Modelin bir diğer kayda değer önemli özelliği ise kripten kaynaklanan şekil değiştirmeleri sabit almamaktadır.

$$d\varepsilon_v^c = d\Lambda \frac{\partial p'_{eq}}{\partial p'}$$

$$d\varepsilon_q^c = d\Lambda \frac{\partial p'_{eq}}{\partial q}$$

Üstteki ifadelerde yer alan $d\Lambda$ terimi viskoplastik çarpan olup, ilgili çarpan aşağıdaki ifade aracılığıyla dikkate alınmaktadır.

$$d\Lambda = \frac{\mu^*}{\tau} \left(\frac{p'_{eq}}{p'_p} \right)^\beta \left(\frac{M(\theta_\alpha)^2 - \alpha_{K_0^{NC}}^2}{M(\theta_\alpha)^2 - \eta_{K_0^{NC}}^2} \right)$$

OCR=1 olması durumunda; $p'_{eq} = p'_p$ olmaktadır. Bu durumda CSS akma yüzeyi boyunca viskoplastik çarpan sabit bir değere sahip olmaktadır. Denklemden yer alan μ^* terimi modifiye kripi indeksi, τ referans süre (konsolidasyon deneyleri için 1 gün), β kripi kuvveti, $\alpha_{K_0^{NC}}^2$ normal konsolidasyon bölgesinde akma yüzeylerinin eğimi, $\eta_{K_0^{NC}}^2$ ise K_0^{NC} yüklemesi altındaki gerilme oranıdır.

Modifiye kripi indeksi sekonder konsolidasyon oranına bağlı olarak şu şekilde hesaplanabilir.

$$\mu_i^* = \frac{C_{ai}}{\ln 10 (1 + e_0)}$$

Kripi kendi arasında birincil, ikincil ve üçüncül kripi olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Birincil kripi anında kripi etki zamana bağlı olarak azalır, ikincil kripi anında sabit bir değere ulaşır ve üçüncül kripi anında tekrar bir artış

göstermeye başlar ve zemin göçer. Üçüncül krip olarak adlandırılan ve zeminin zamanla göçmesine sebebiyet veren durum Creep-SCLAY1S modeli ile modellenenmektedir (Karlsson vd., 2019)

3. SACKVILLE DENEME DOLGUSU

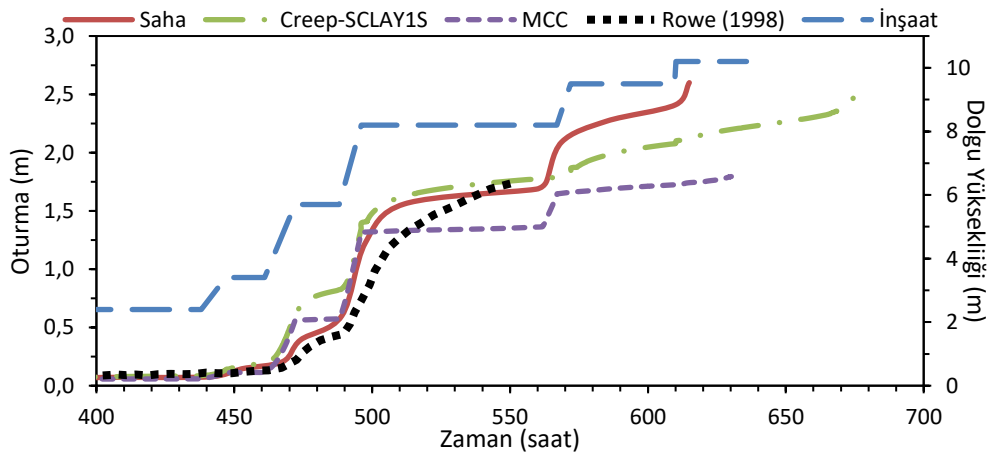
1995 yılında, Kanada'da organik madde miktarı yüzde onları bulan bir yumuşak zemin üzerine göçme gerçekleşene kadar inşa edilmiştir. Sackville deneme dolguları biri geotekstil ile güçlendirilmiş diğeri ise herhangi bir güçlendirme işlemi görmemiş iki farklı dolgudan oluşmaktadır. Geotekstil ile güçlendirilmiş dolgunun inşa edildiği alan, güçlendirilme işlemi görmemiş dolguya istinaden daha fazla organik madde içermekte ve daha zayıf bir zeminden oluşmaktadır. Yeraltı su seviyesi zeminden itibaren 0,4 m derinlikte yer almaktadır. Zemin normal konsolide ve az aşırı konsolide killerden oluşmakta olup zeminin üst tabakasının işlem görmesinden dolayı normal konsolide kil olduğu varsayımı yapılmaktadır. Zeminin anizotropik özelliğinin düşük olduğu genellikle izotropik olduğu varsayımı yapılmaktadır. Zeminin sahip olduğu yapısal bağ kuvvetleri ile ilgili bir deney gerçekleştirilmemiştir. Dolgunun göçme anına kadar göstermiş olduğu davranış inklinometre, oturma plakaları ve piyezometreler ile kayıt altına alınmıştır. Araştırmacılara göre dolgu yükleme hızına bağlı olarak krip etkisi altında ile göçmektedir (Rowe, 1995).

4. ZEMİN PARAMETRELERİ

Geotekstil ile güçlendirilmiş stabilize dolgu Mohr-Coulomb zemin modeli ile dikkate alınmıştır. Dolgu, güçlendirilmiş tabaka (ilk 0.7 m yüksekliğe sahip dolgu) ve güçlendirilmemiş tabaka (geri kalan dolgu) olmak üzere iki tabaka olarak modellenmiştir. Geotekstil eleman ise elastoplastik olarak modellenmiştir. Dolgu altındaki zemin için biri MCC diğeri Creep-SCLAY1S olan iki farklı zemin modeli kullanılmıştır. Anizotropinin düşük olduğu ve yapısal bağın olmadığı kabulü yapılmıştır. Bu duruma istinaden model, CREEP-MCC olarak da kabul edilebilmektedir. Mesri (1973) tarafından yapılan deneysel araştırmalarda; $C\alpha/Cc$ değerinin organik madde miktarı yüksek zeminlerde $0,04 \pm 0,01$ aralığında kaldığı gösterilmiştir. İlgili ilişkinin bu dolgu için geçerli olduğu kabul edilerek $\mu^*/\lambda^* = 0,05$ olarak analizlere dahil edilmiştir. İlgili modeller için kullanılan parametreler Rowe vd. (1998) tarafından varsayıldığı gibidir.

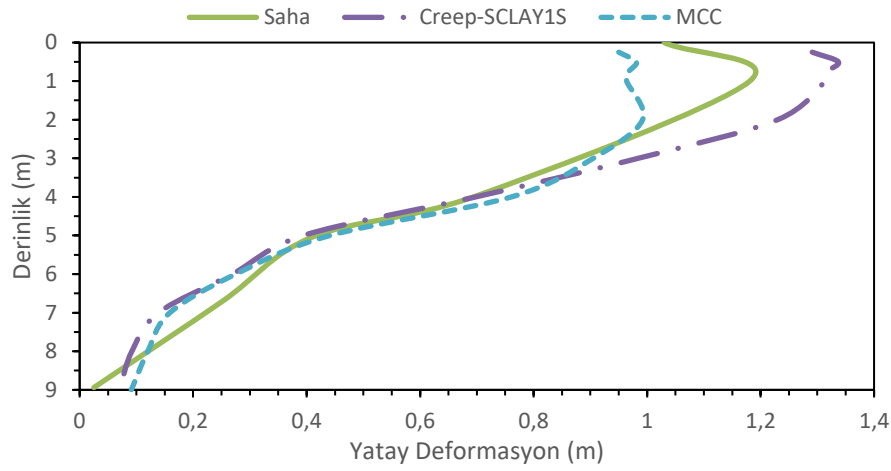
5. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde, organik zemin üzerine inşa edilen geotekstil ile güçlendirilmiş Sackville deneme dolgusunun Plaxis 2D Connect Edition V22 (Plaxis, 2022) ile gerçekleştirilen analiz sonuçları verilmiştir. Analizlerde, MCC ve Creep-SCLAY1S yapısal zemin modelleri kullanılmış ve nümerik analiz sonuçları ile arazi ölçüm değerleri karşılaştırılmıştır. Ayriyeten Rowe (1998) vd. tarafından gerçekleştirilen hıza bağımlı farklı bir modelin analiz sonuçları da gösterilmiştir. Yeraltı su seviyesi zeminden itibaren 0,4 m derinliktedir. Dolgu en kesitinin simetrik olmamasından dolayı dolgunun tümü düzlem şekil değiştirme koşullarda 6 düğümlü üçgen elemanlar kullanılarak analiz edilmiştir. Dolgu ve yumuşak kil zemin tabakaları, 1755 elemandan oluşan sonlu elemanlar ağı ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde, yanal sınırlar sadece yatay yönde, alt sınır ise her iki yönde tutuludur. Sadece zemin yüzeyinin drenaja açık olduğu kabul edilmiştir.



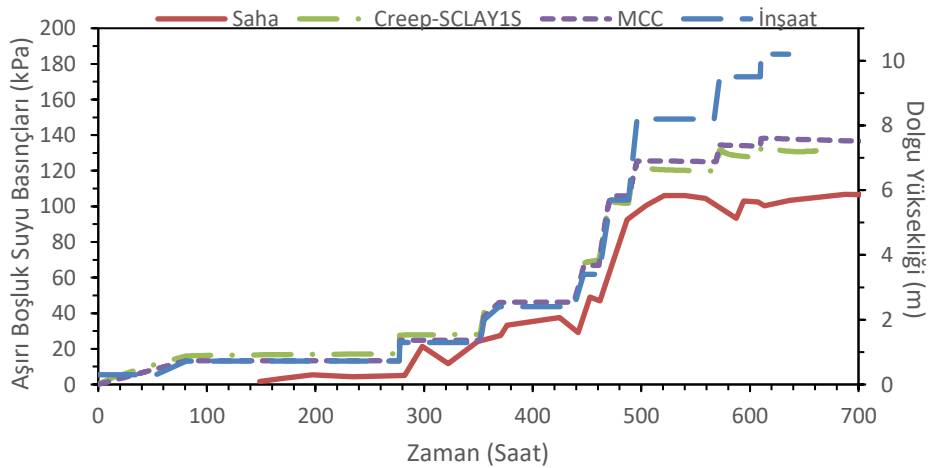
Şekil 2. 7S Plakası Oturma Sonuçlarının Farklı Zemin Modelleri ile Karşılaştırılması

Şekil 2'de 7S olarak isimlendirilmiş plaka tarafından ölçülmüş konsolidasyon oturmaları ve farklı modeller ile hesaplanan konsolidasyon oturmaları karşılaştırılmıştır. Sonuçların karşılaştırılması amacıyla literatürde yer alan hıza bağımlı farklı bir modelin de sayısal sonuçları gösterilmiştir (Rowe, 1998). Ancak Rowe vd. (1998) modelin sadece 400-550 saatleri arasındaki davranışını dikkate almışlardır. Bu sebeple grafikte 550 saatten sonraki süreç gösterilememiştir. İzotropik model MCC, ölçülmüş oturma değerlerinden oldukça küçük oturma değerleri hesaplamış olup dolguda göçme anı saha sonuçlarına yakındır. Rowe vd. (1998) tarafından geliştirilen model ise MCC'den daha doğru davranış göstermiştir. Ancak arazi ölçüm değerleri ile en uyumlu değerleri, Creep-SCLAY1S modeli göstermiştir. Fakat, Creep-SCLAY1S modeli ile hesaplanan göçme anı, gerçek göçme anından bir süre sonra gerçekleşmiştir. Creep-SCLAY1S ile yapılan analizlerde göçmenin üçüncül krip etkisinde olduğu gözlemlenmişken, MCC zemin modelinde üçüncül krip etkisi gözlemlenememiştir.



Şekil 3.5 5 Metre Dolgu Altında 231 İnklinometresi Yatay Deformasyon Sonuçlarının Farklı Zemin Modelleri İle Karşılaştırılması

Dolgunun inşaatı boyunca gerçekleşecek yatay deformasyonları ölçmek için birçok inklinometre yerleştirilmiştir. Şekil 3'de 5 metre dolgu altında 231 inklinometresi tarafından ölçülen gerçek saha sonuçları, MCC ve Creep-SCLAY1S zemin modelleri kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. MCC zemin modeli inşa sonrası süreçte yatay deformasyonlarda büyük bir değişiklik tespit edememiş olmasına rağmen, Creep-SCLAY1S tarafından hesaplanan yatay deformasyonlarda büyüme devam etmiştir. Bu duruma istinaden her iki zemin modeli de saha davranışını belli ölçülerde doğru yansıtırken, ilerleyen süreçlerde MCC zemin modelinin yatay deformasyon sonuçlarını yansıtmak açısından zayıf kalacağı söylenebilir.



Şekil 4. 28 Nolu Piyezometrenin Aşırı Boşluk Suyu Basınç Sonuçlarının
Farklı Zemin Modelleri İle Karşılaştırılması

İnşaat süreci boyunca aşırı boşluk suyu basınçlarındaki değişimi ölçebilmek amacıyla zemin boyunca farklı derinliklerde piyezometreler yerleştirilmiştir. Dolgu merkezinden 4 m derinliğe yerleştirilen 28 nolu piyezometre tarafından ölçülen aşırı boşluk suyu basınçlarının, MCC ve Creep-SCLAY1S zemin modelleri kullanılarak sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’de bu modeller tarafından tahmin edilen davranış, gerçek saha davranışı ile karşılaştırılmıştır. Her iki zemin modeli de aşırı boşluk suyu basınçlarını gerçek saha davranışından daha yüksek hesaplamıştır. Creep-SCLAY1S zemin modeli tarafından yapılan analizlerde aşırı boşluk suyu basınçlarının göçme süreci boyunca yükseldiği görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, organik yumuşak bir zemin üzerine inşa edilmiş bir dolgunun kriplenebilir davranışı dikkate alınmayan MCC ve kriplenebilir davranışı dikkate alan Creep-SCLAY1S modelleri tarafından sayısal analizleri yapılmıştır. Creep-SCLAY1S modeli yapısal bağların kopmasından kaynaklanan şekil değiştirmeleri ve anizotropiyi de dikkate alabilmesine rağmen Sackville deneme dolgusunun zemininin anizotropi derecesinin düşük olduğu ve zeminin hassaslığının az olduğu kabulleri yapılarak bu davranışlar dikkate alınmamış sadece kriplenebilir davranış dikkate alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda Creep-SCLAY1S modelinin, MCC modeline göre inşaat sürecinde gerçekleşen deformasyonları daha doğru şekilde tespit edebildiği belirlenmiştir. Creep-SCLAY1S zemin modeli, MCC zemin modeline göre zamana bağlı deformasyonları daha doğru tespit edebilmesine rağmen göçme anı bir süre gecikmiştir. Yapılan çalışma sonucunda dolguların inşaat sürecinde göstermiş oldukları deformasyonları daha doğru tespit eden Creep-SCLAY1S modelinin inşa edilecek dolgularda kullanılmasının daha uygun olduğu öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Feng, R., Wang, L., Wei, K., & Zhao, J. (2021). Consolidation settlement of soil foundations containing organic matters subjected to embankment load. *Geomechanics and Engineering*, 24(1), 43-55
- Gras, J. P., Sivasithamparam, N., Karstunen, M., & Dijkstra, J. (2018). Permissible range of model parameters for natural fine-grained materials. *Acta Geotechnica*, 13, 387-398.
- Karlsson, M., Yannie, J., & Dijkstra, J. (2019). Modeling aging of displacement piles in natural soft clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(10), 04019070.
- Mesri, G. (1973). Coefficient of secondary compression. *J Soil Mech Found Div, ASCE* 99, 123–137.
- Perzyna, P. (1963). The constitutive equations for work-hardening and rate sensitive plastic materials. *Proc. Vibration Problems, Warsaw* 3, 281–290
- Perzyna, P. (1966). Fundamental problems in viscoplasticity. *Advd Appl. Mech.* 9, No. 3, 244–377.
- Plaxis bv, Bentley Systems Inc. 2022 PLAXIS 2D Manuals Connect Edition V22.02
- Rowe, R.K., Gnanendran, C.T., Landva, A.O., & Valsangkar, A.J. 1995. Construction and performance of a full-scale geotextile reinforced test embankment, Sackville, New Brunswick. *Canadian Geotechnical Journal*, 32: 512–534; Erratum 33: 208, 1996
- Rowe, R. K., & Hinchberger, S. D. (1998). The significance of rate effects in modelling the Sackville test embankment. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 500-516.
- Sivasithamparam, N., M. Karstunen, and P. Bonnier. 2015. “Modelling creep behaviour of anisotropic soft soils.” *Comput. Geotech.* 69 (Sep): 46–57.
- Taylor, D. W. (1942). *Research on Consolidation of Clays*. Department of Civil and Sanitary Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts
- Terzaghi, K. (1923). Die berechnung der durchlassigkeitzifer des tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungserscheinungen, *Mathematisch-naturwissenschaftliche, Klasse. Akademie der Wissenschaften, Vienna*, 125-138.
- Yin, Z. Y., & Karstunen, M. (2008, October). Influence of anisotropy, destructuration and viscosity on the behavior of an embankment on soft clay. In *proceedings of the 12th international conference of*

international association for computer methods and advances in geomechanics (IACMAG), Goa, India (pp. 1-6).

Yin, Z. Y., Chang, C. S., Karstunen, M., & Hicher, P. Y. (2010). An anisotropic elastic–viscoplastic model for soft clays. *International Journal of Solids and Structures*, 47(5), 665-677.