

DÜŞEY DRENLERİN SAYISAL ANALİZİ

Yrd.Doç.Dr.Abdulazim Yıldız⁴

ABSTRACT

Most embankment analyses are conducted under two dimensional plane strain conditions. But, the consolidation of soil around a vertical drain is more appropriately analysed as an axisymmetric problem. Hence, the vertical drain system under an embankment must be converted into equivalent plane strain model. This can be achieved by manipulating either the drain spacing and/or soil permeability. Certain simplifying assumptions are made: each single drain is assumed to work independently, soil has a constant permeability and the consolidation takes place in a uniform soil column with linear compressibility characteristics in the absence of lateral movement. Such restrictive conditions are not likely to be achieved in normally or lightly overconsolidated soils under embankment loading. This paper studies the performance of the mapping procedures when used elastoplastic Modified Cam Clay model in the analysis. For comparison, the simulations are also performed by Plaxis 3D Foundation. The results of 2-D analyses are compared with the results of 3-D analysis.

Key words: Vertical Drain, Finite Element Method, Plaxis.

ÖZET

Dolgular genellikle 2 boyutlu düzlem şekil değiştirme koşullarında analiz edilirler. Fakat, bir düşey drenin etrafındaki zeminin konsolidasyon davranışı eksenel simetrik bir problemdir. Bu nedenle, dolgu altındaki düşey dren sisteminin eşdeğer düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmesi gerekir. Dönüştürme işlemi, drenler arası mesafe ve/veya permeabilite değerleri ayarlanarak gerçekleştirilir. Dönüştürme yöntemlerinde genellikle, her bir drenin birbirinden bağımsız çalıştığı, zeminin lineer elastik davranış gösterdiği, permeabilitenin sabit kaldığı, zeminde yanal hareketler oluşmadığı gibi birtakım kabuller

⁴ Yrd. Doç. Dr. , Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, E-mail: azim@cukurova.edu.tr

yapılır. Fakat az aşırı veya normal konsolide killerde bu kabuller geçerli değildir. Bu çalışmada, sayısal analizlerde zemin davranışı Modifiye Cam kili modeli ile modellendiğinde eşleme yöntemlerinin performansı araştırılmıştır. Karşılaştırma amacıyla problem üç boyutlu olarak da analiz edilmiştir. Çalışma sonunda iki ve üç boyutlu analiz sonuçları karşılaştırılarak eşleme yöntemlerinin doğruluğu araştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Düşey Dren, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Plaxis.

GİRİŞ

Yumuşak zeminler üzerine inşa edilen dolguların davranışı geoteknik mühendisliğinin en önemli araştırma konularından biridir. Yumuşak kil zeminlerin yüksek sıkışabilirliği ve düşük permeabilitesi nedeniyle konsolidasyon oturmalarının tamamlanması uzun yıllar sürebilir. Bu tür uygulamalarda genellikle sürşarj yükü ile birlikte dolgu altına düşey kum drenlerinin inşa edilmesi ilk akla gelen zemin iyileştirme yöntemidir. Düşey kum dren sistemlerinde, drenaj boyu kısaltılarak konsolidasyonun hızlandırılması hedeflenirken aynı zamanda kil zeminin stabilitesi de arttırılmaktadır. Son yıllarda kum drenler yerine daha çok prefabrike düşey drenlerin (PDD) tercih edildiği görülmektedir. PDD'lerin daha efektif çalışması, ekonomik olması ve arazide basit ekipman ile daha hızlı inşa edilebilmesi kum drenlere göre önemli üstünlükleridir (Chai and Miura (5)). PDD'ler genellikle plastik bir çekirdek ve onu saran geotekstil filtre malzemesi ile kanal şeklinde imal edilir.

Farklı araştırmacılar tarafından zemin iyileştirme amaçlı olarak kullanılan düşey drenlerin konsolidasyon analizlerine yönelik analitik çözümler geliştirilmiştir (Carillo, (6); Baron, (1); Yoshikuni and Nakanode, (17); Hansbo, (7); Onoue, (15); Zeng and Xie, (18) v.b.). Bu araştırmalarda genellikle birim hücre yöntemi esas alınarak radyal yöndeki konsolidasyon davranışı analiz edilmiştir. Geoteknik mühendisliği ile ilgili problemlerin analizinde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile karmaşık geometriye ve yükleme koşullarına sahip problemler kısa zamanda ve

doğru olarak analiz edilebilmektedir. Son yıllarda düşey drenlerin SEY ile analiz edilmesine yönelik çalışmaların sayısında önemli artışlar gözlenmektedir (Bergado, (2); Borges, (3); Hawlader, (8); Hird ve ark., (10); Kim and Lee, (13); Indraratna and Redana, (11); Lin, (14) v.b.). Genellikle dolgular, SEY ile 2 boyutlu ve düzlem şekil değiştirme koşullarında analiz edildiği için, silindirik geometriye sahip düşey drenlerin düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmesi gerekir. Eksenel simetrik geometriye sahip bir düşey drenin eş değer düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Hird ve ark., (9); Indraratna and Redana, (11)). Bu yöntemlerde genellikle Barron (1) ve Hansbo (7) tarafından geliştirilen analitik çözümler esas alınmıştır. Eksenel simetriden eş değer düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürme için düşey drenler arasındaki aralık ve/veya dren etrafındaki zeminin permeabilitesi ayarlanmaktadır. Fakat bu eşleme yöntemlerinde zeminin lineer elastik davranış gösterdiği, zemindeki deplasmanların üniform olduğu, permeabilitenin sabit kaldığı ve yatay deplasmanların oluşmadığı gibi bazı basit kabuller yapılmıştır. Oysaki yumuşak kil zeminlerde bu kabullerin geçerli olmadığı bilinmektedir. Son yıllarda özellikle yumuşak kil zemin davranışını modellemek için yeni zemin modelleri geliştirilmiştir. Dolayısıyla, sayısal analizlerde Modifiye Cam Kili modeli (Roscoe and Burlan, (16)) gibi elasto-plastik zemin modelleri kullanıldığında söz konusu eşleme yöntemlerinin performansının nasıl etkilendiğinin de araştırılması da önemli bir konudur.

Bu çalışmada Plaxis 8.2 ve Plaxis 3D Foundation (Brinkgreve, (4)) bilgisayar programları kullanılarak düşey drenlerin iki ve üç boyutlu analizleri yapılmıştır. Analizlerde zemin davranışı Modifiye Cam Kili modeli ile modellenmiştir. İki boyutlu eşdeğer düzlem şekil değiştirme ile üç boyutlu analiz sonuçları karşılaştırılarak eşleme yöntemlerinin geçerliliği araştırılmıştır.

DÜŞEY DRENLERİN SAYISAL ANALİZİ

Dolgu altına inşa edilen düşey drenlerin sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu olarak doğrudan analiz edilmesi mümkün değildir. Silindirik geometriye sahip olduğu kabul edilen düşey drenlerin düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmesi gereklidir.

Gerçekte bu tür problemlerin üç boyutlu olarak analiz edilmesi gerekir. Fakat üç boyutlu analizlerin çok fazla işlem ve zaman gerektirmesi pratik uygulamalar için uygun değildir. Bu nedenle uygun bir eşleme yöntemi ile düşey drenlerin düzlem şekil değiştirme koşullara dönüştürülmesi gereklidir. Hird ve ark. (9) tarafından geliştirilen eşleme yönteminde tek bir düşey dren esas alınarak birim hücre modeli kullanılmış ve eşdeğer düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürme için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$\frac{B}{R} = \left\{ \left(\frac{3}{2} \right) \left[\ln \left(\frac{R}{s} \right) + \left(\frac{k}{k_s} \right) \ln \left(\frac{r_s}{r} \right) - \left(\frac{3}{4} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Bu eşleme yönteminde geometrik uygunluk dikkate alınmıştır. Bu bağıntıda, B; düzlem şekil değiştirme koşullarındaki birim hücrenin yarı genişliği, R; eksenel simetrik birim hücrenin yarı çapı, r_w ; drenin yarı çapı, r_s ; örselenmiş bölgenin yarı çapı, k; doğal zeminin yatay permeabilitesi ve k_s ; örselenmiş bölgedeki yatay permeabilitedir. Bu yöntemde, eksenel simetrik ve düzlem şekil değiştirme durumları için permeabilitenin değişmediği kabul edilir ve analizlerde örselenmiş bölgenin gösterilmesine gerek yoktur. Hird ve ark. (9) tarafından önerilen diğer yöntemde ise, model geometrisi korunarak eşleme için permeabilite değerleri eksenel simetrik ve düzlem şekil değiştirme koşulları arasında dönüştürülür (Permeabilite eşleme).

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \frac{2}{3 \left[\ln \left(\frac{R}{r_s} \right) + \left(\frac{k_{ax}}{k_s} \right) \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) - \left(\frac{3}{4} \right) \right]} \quad (2)$$

Burada k_{pl} ve k_{ax} sırasıyla düzlem şekil değiştirme ve eksenel simetrik koşullardaki permeabilite değerleridir. Ayrıca hem geometrik hem permeabilite değerleri dönüştürülmek suretiyle de eşleme işlemi gerçekleştirilebilir (Birleşik eşleme).

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \frac{2B^2}{3R^2 \left[\ln \left(\frac{R}{r_s} \right) + \left(\frac{k_{ax}}{k_s} \right) \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) - \left(\frac{3}{4} \right) \right]} \quad (3)$$

Bu son yöntem, daha çok sonlu elemanlar ağının istenen geometrik koşullara göre ayarlanması için kullanılır.

İKİ VE ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMAN MODELLEMESİ

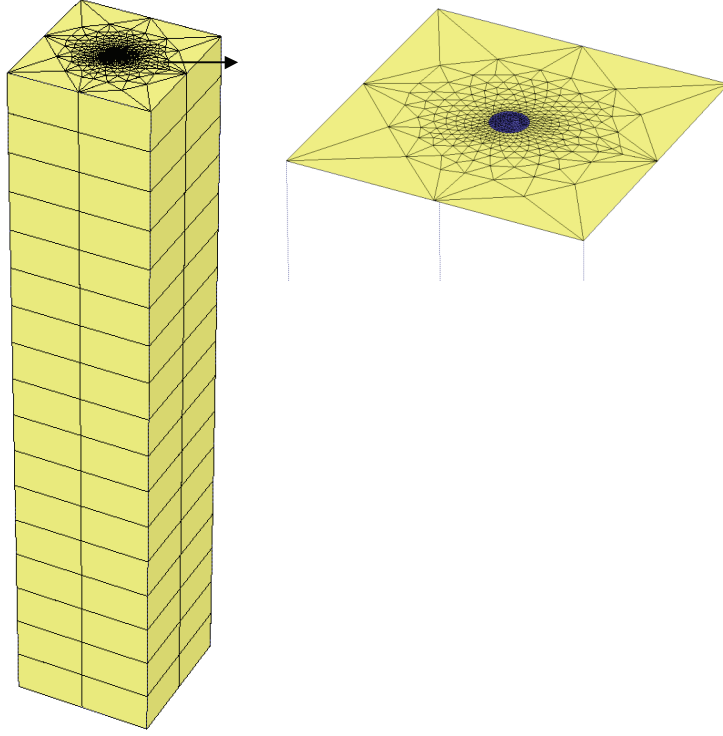
Sayısal analizlerde tek bir düşey dren ve onun etki bölgesi esas alınmıştır. Üç boyutlu analizlerde kullanılan birim hücre modeli Şekil 1’de görülmektedir. Düşey dren ile ilgili bilgiler Tablo 1’de verilmektedir. Düşey dren uzunluğu 10m, eşdeğer dren çapı 0,67cm ve eşdeğer dren etki bölgesinin çapı ise 1.13m’dir. Sayısal analizler üç seri olarak yapılmıştır.

Tablo 1. Dren özellikleri

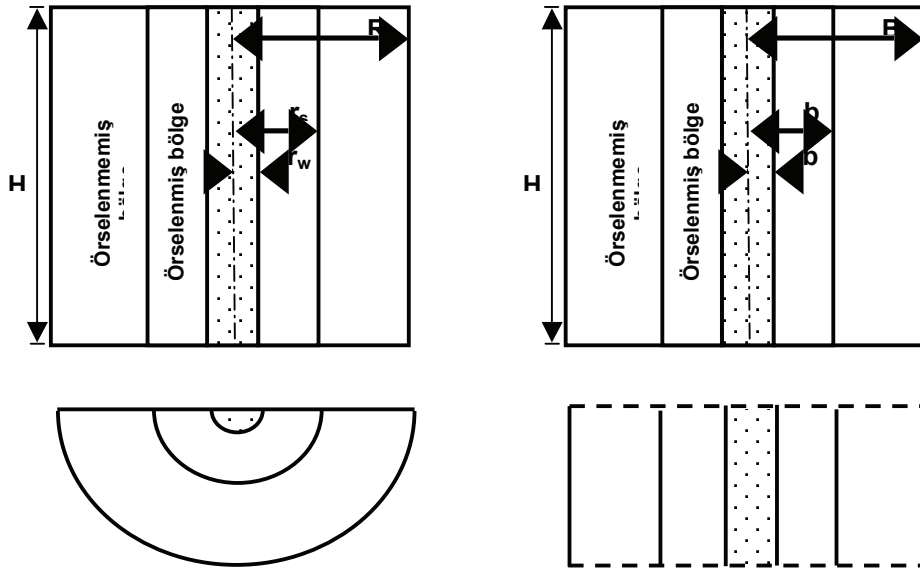
Dren yerleştirme modeli	Kare
Drenler arası mesafe (m)	1
Ortalama dren genişliği	98.7
Dren kalınlığı (mm)	6.83
Boşaltım kapasitesi (m ³ /yıl)	157

I. Seri Analizler

Bu serideki sayısal analizlerde, Hird ve ark. (9) tarafından önerilen eşleme yöntemlerinin doğruluğu araştırılmıştır. Analizlerde, düşey dren ve onun etki bölgesi eksenel simetrik koşullardan eşdeğer düzlem deformasyon koşullarına geometrik, permeabilite ve birleşik eşleme yöntemleri kullanılarak dönüştürülmüştür (Şekil 2). Sayısal analizlerde; eşleme yöntemlerindeki basit kabuller aynen korunarak zemin davranışının lineer elastik olduğu kabul edilmiştir. Zeminin birim hacim ağırlığı 15 kN/m³, elastisite modülü 1000 kN/m² ve poisson oranı ise sıfır alınmıştır. Tüm serilerdeki analizlerde yatay ve düşey permeabiliteler birbirine eşit ve 10⁻³ m/gün alınmıştır. Hesaplamalar sonucunda her üç farklı eşleme yöntemi ile elde edilen oturma-zaman eğrileri Şekil 3’de görülmektedir. Bu sonuçlardan üç eşleme yönteminin de aynı sonuçları verdiği görülmektedir. Şekil 4’de ise eşdeğer düzlem deformasyon analiz sonuçları ile 3 boyutlu analiz sonuçları karşılaştırılmış ve eşdeğer yöntemin 3 boyutlu analiz sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



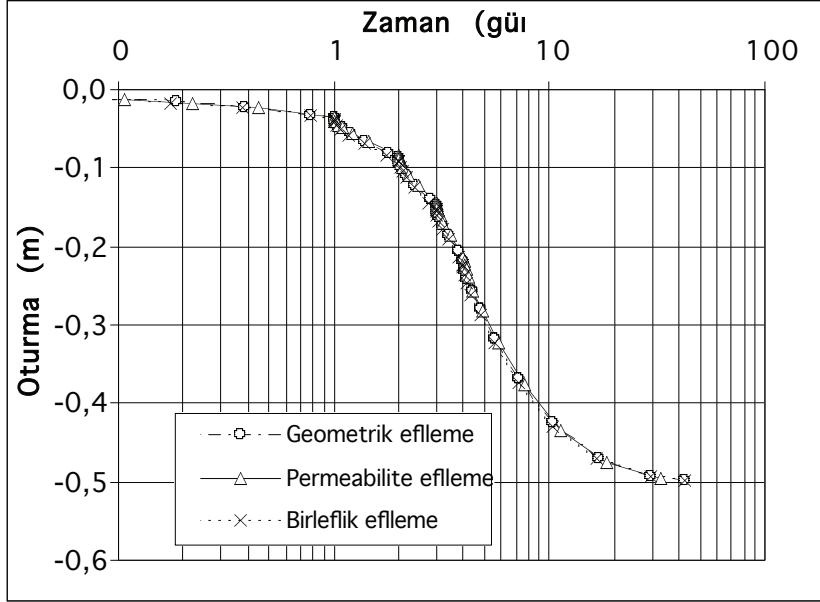
Şekil 1. Üç boyutlu model



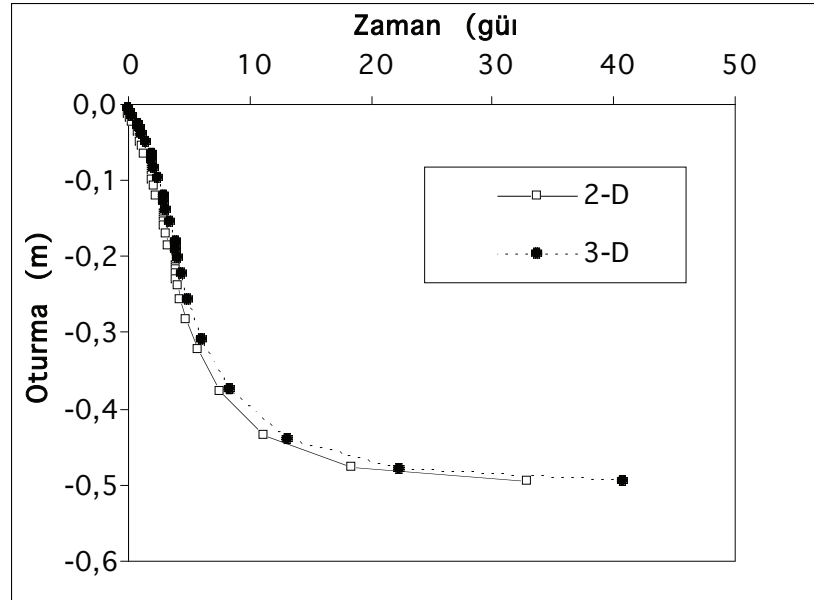
(a) Aksel simetrik

(b) Düzlem deformasyon

Şekil 2. Birim hücre modeli



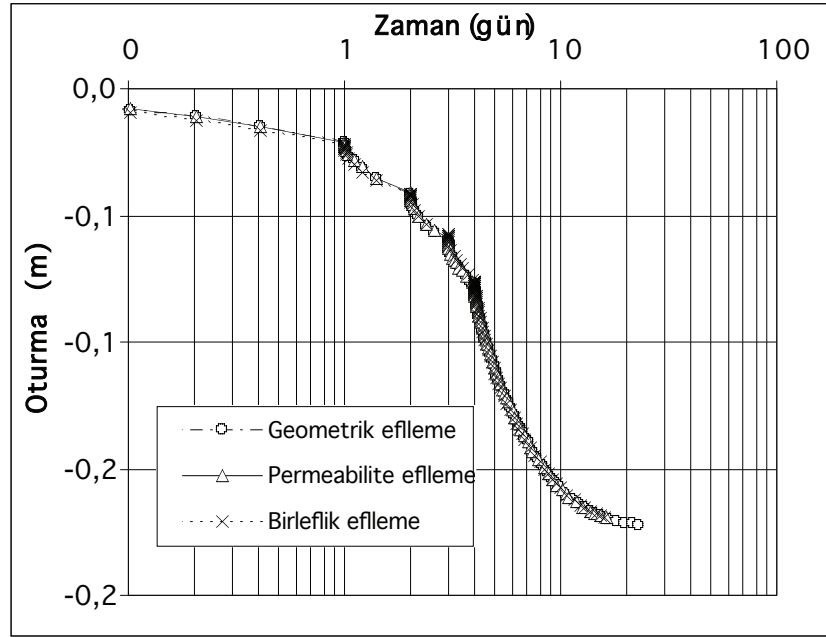
Şekil 3. Üç eşleme yöntemi için lineer elastik model ile elde edilen sonuçlar



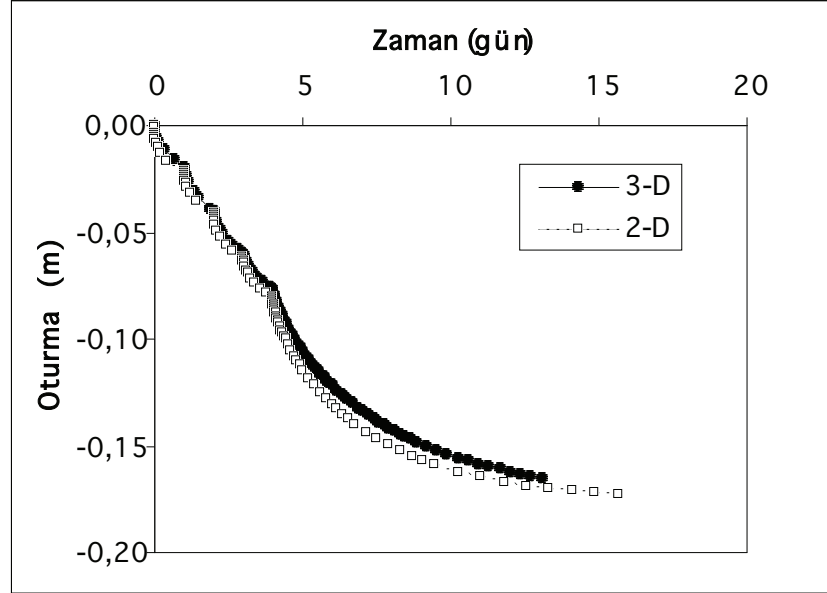
Şekil 4. İki ve üç boyutlu analiz sonuçları

II. Seri Analizler

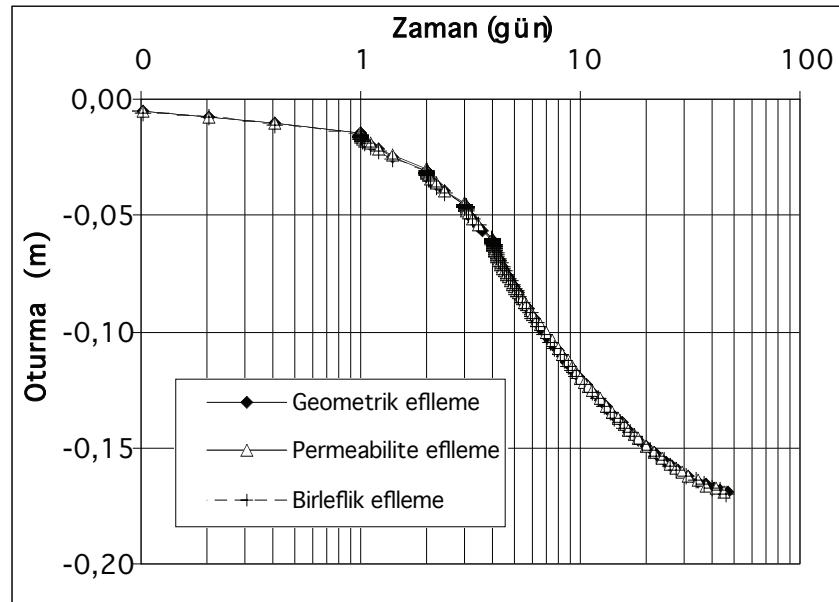
Bu serideki analizlerde zemin davranışı, elasto-plastik zemin modeli Modifiye Cam Kili ile modellendiğinde eşleme yöntemlerinin performansının nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Modifiye Cam Kili zemin parametreleri; $\lambda=0.3$, $\kappa=0.03$, $\nu'=0.2$, $\phi'=28.8^\circ$, $POP=40\text{kN/m}^2$ ve $\gamma=15\text{ kN/m}^3$ olarak alınmıştır. Modifiye Cam Kili kullanıldığında üç eşleme yöntemi ile elde edilen oturma-zaman eğrileri Şekil 5’de görülmektedir. Üç farklı eşleme yöntemi ile yapılan hesaplamalarda aynı sonuçlar elde edilmiştir. Eşdeğer düzlem deformasyon analiz sonuçları ile 3 boyutlu analiz sonuçları ise Şekil 6’da karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasındaki uyumun oldukça iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Üç eşleme yöntemi için Modifiye Cam Kili modeli ile elde edilen sonuçlar



Şekil 6. İki ve üç boyutlu analiz sonuçları

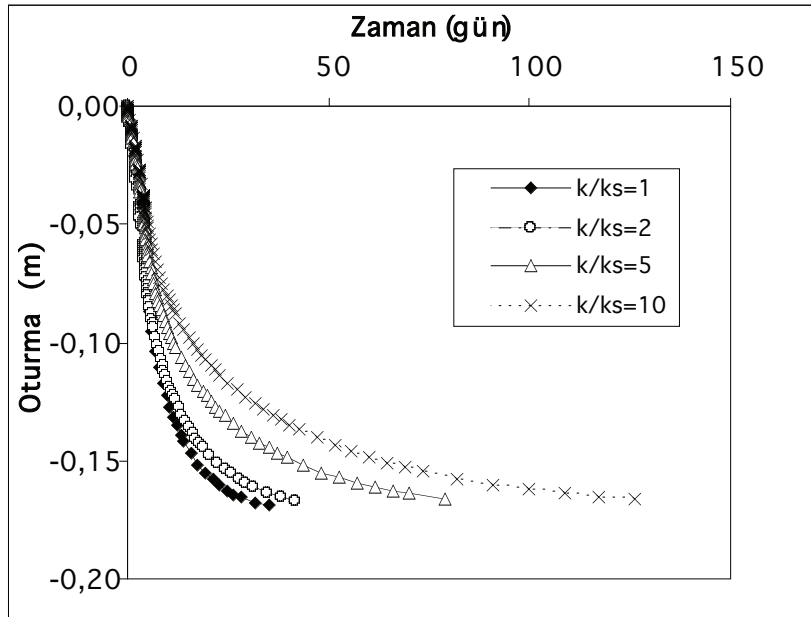


Şekil 7. Örselenme dikkate alındığında üç eşleme yöntemi için sayısal analiz sonuçları

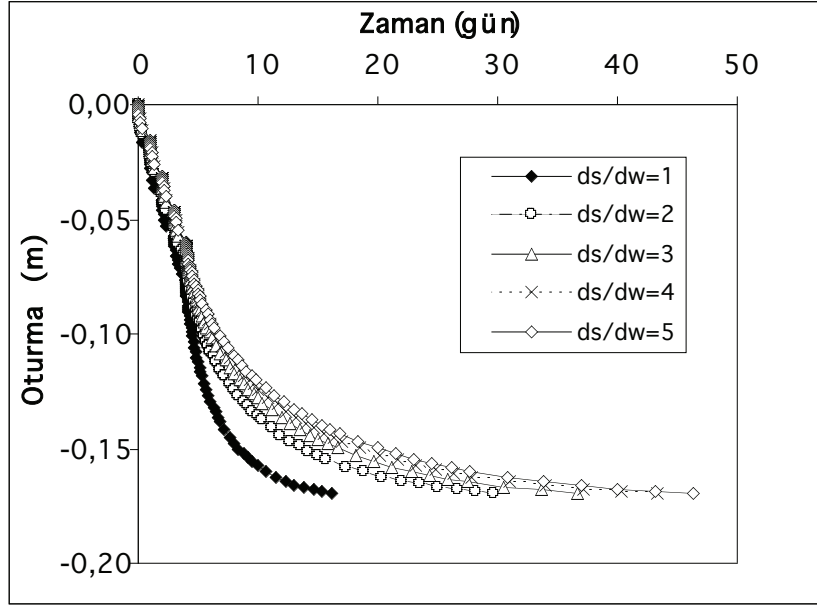
III. Seri Analizler

Düşey drenler, çelik muhafaza (mandrel) yardımıyla zemin içerisine çakılarak ya da itilerek yerleştirilir. Bu esnada düşey dren etrafındaki zemin içerisinde önemli ölçüde

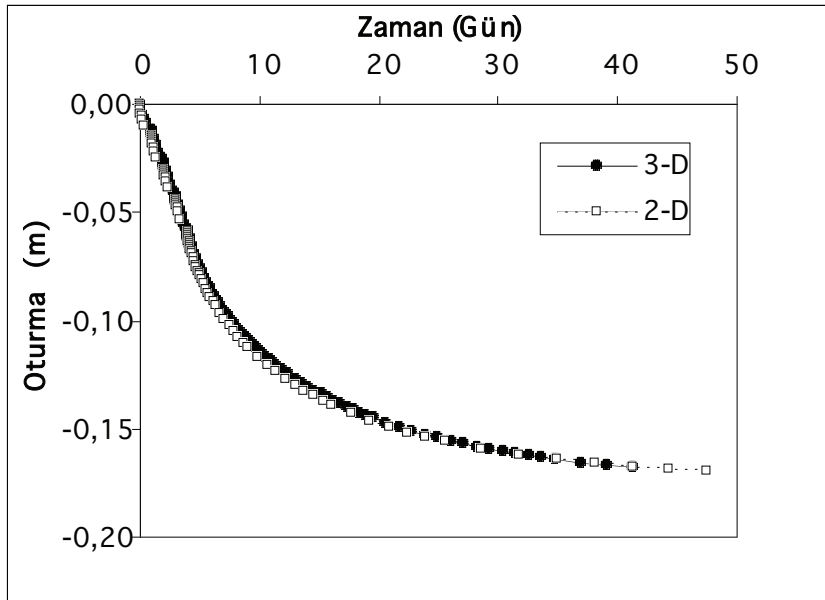
örselenmeler meydana gelir. Bu örselenme, zemin yapısına, drenlerin yapım şekline, muhafazanın boyutlarına ve şekline bağlıdır. Dolayısıyla analizlerde örselenmiş bölgenin kalınlığı ve bu bölge içerisindeki permeabilite değerindeki değişimin sayısal analizlerde dikkate alınması gerekir. Bu serideki analizlerde düşey drenlerin inşası sırasında zeminde meydana gelen örselenme etkisi (smear effect) dikkate alınarak II. Serideki analizler tekrarlanmıştır. Bu seride çelik muhafaza nedeniyle zeminde meydana gelen örselenmelerin sonuçlara ve eşleme yöntemlerinin performansına etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Şekil 7’de $d_s/d_w=5$ ve $k/k_s=5$ için üç eşleme yöntemi ile hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmış ve üç yöntemin de aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Şekil 8 ve 9’da örselenmiş bölgenin çapı ve permeabilitesinin sonuçlara etkisini araştırmak üzere yapılan hesaplama sonuçları görülmektedir. Önce $d_s/d_w=5$ sabit tutularak örselenmiş bölgedeki permeabilitenin (k_s) etkisi, daha sonra $k/k_s=5$ sabit tutularak örselenmiş bölge (d_s) kalınlığının sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 8 ve 9’dan her iki parametrenin de sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Şekil 10’da ise, $d_s/d_w=5$ ve $k/k_s=5$ için eşdeğer düzlem deformasyon sonuçları ile üç boyutlu analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. İki boyutlu eşdeğer yöntem ile üç boyutlu analiz sonuçları arasındaki uyumun oldukça iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Örselenmiş bölgedeki permeabilitenin sonuçlara etkisi



Şekil 9. Örselenmiş bölge kalınlığının sonuçlara etkisi



Şekil 10. İki ve üç boyutlu analiz sonuçları

SONUÇLAR

Bu çalışmada, dolgular altına inşa edilecek düşey drenlerin 2 boyutlu olarak düzlem şekil değiştirme koşullarında analiz edilebilmesi için geliştirilen yöntemlerin doğruluğu 3 boyutlu analiz sonuçları ile karşılaştırılarak araştırılmıştır. Sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS V8.2 ve PLAXIS 3D FOUNDATION bilgisayar programları kullanılmıştır. Eksenel simetrik koşullara sahip düşey drenler, Hird ve ark. (7) tarafından geliştirilen eşleme yöntemleri kullanılarak eşdeğer düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmüştür. Bu araştırma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

Düşey drenlerin iki boyutlu olarak analiz edilebilmesi için eksenel simetrik koşullardan düzlem şekil değiştirme koşullara dönüştürülmesi gerekir.

Sayısal analizlerde elasto-plastik zemin modeli kullanıldığında ve örselenme etkisi dikkate alındığında Hird ve ark. (7) tarafından geliştirilen üç yöntem de aynı sonuçları vermektedir. Bu yöntemler içerisinde kullanım kolaylığı ve sonlu elemanlar ağı üzerinde kontrol imkanı sağlaması açısından birleşik eşleme yöntemi en pratik olanıdır.

Sayısal analizlerde elasto-plastik zemin modeli kullanıldığında iki boyutlu eşdeğer model ile üç boyutlu analiz sonuçları arasındaki uyum oldukça iyidir. Dolgu altına inşa edilecek düşey drenler, Hird ve ark. (7) tarafından geliştirilen eşleme yöntemleri kullanılarak iki boyutlu düzlem şekil değiştirme koşullarda analiz edilebilir.

Örselenmiş bölgenin kalınlığı ve permeabilitesi sayısal analizlerde dikkate alınmalıdır. Ayrıca sayısal analizlerin doğruluğu açısından düşey dren etrafındaki örselenmiş bölgenin permeabilitesindeki etkilenmeye ilave olarak sıkışabilirliği ile ilgili değişimlerin de dikkate alınması gerekir.

KAYNAKLAR

1. Barron, R.A., Consolidation of fine-grained soils by drain wells. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113, 718–743, 1948.
2. Bergado, D.T., Mukherjee, K., Alfaro, M.C., Balasubramaniam, A.S., Prediction of vertical-band-drain performance by the finite-element method. Geotextiles and Geomembranes, 12, 567-586, 1993.
3. Borges, J. L., Three-dimensional analysis of embankments on soft soils incorporating vertical drains by finite element method, Computers and Geotechnics, 31, 665-676, 2004.
4. Brinkgreve, R.B.J., PLAXIS, Finite element code for soil and rock analyses. Rotterdam: Balkema, 2002.
5. Chai, J. C., and Miura, N., Investigation of factors affecting vertical drain behavior. J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 125(3), 216–226, 1999.
6. Carrillo, N., Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils. J. Math. Phys., 21, 1–5, 1942.
7. Hansbo, S., Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. In Proc. of the 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng., Stockholm, 3, 677–682, 1981.
8. Hawlader, B. C., Imaib, G., Muhunthanc, B., Numerical study of the factors affecting the consolidation of clay with vertical drains, Geotextiles and Geomembranes, 20, 213-239, 2002.
9. Hird, C.C., Pyrah, I.C., Russell, D., Finite element modeling of vertical drains beneath embankments on soft ground. Géotechnique, 42. 499-511, 1992.
10. Hird, C.C., Pyrah, I.C., Russell, D., Cinicioglu, F., Modelling the effect of vertical drains in two-dimensional finite element analyses of embankments on soft ground. Canadian Geotechnical Journal, 32. 795-807, 1995.

11. Indraratna, B. & Redana, I.W., Laboratory determination of smear zone due to vertical drain installation. *J. Geotech. and Geoenvironmental Engineering*, 124, 180-184, 1998.
12. Indraratna, B. & Redana, I. W., Numerical modeling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay. *Can. Geotech. J.*, 37, 132–145, 2000.
13. Kim, Y.T. & Lee, S.R., An equivalent model and back-analysis technique for modelling in situ consolidation behavior of drainage-installed soft deposits. *Comput. Geotech.*, 20(2), 125–142, 1997.
14. Lin, D.G., Kim, H.K. & Balasubramaniam, A.S., Numerical modelling of prefabricated vertical drain. *Geotech. Eng. J., Southeast Asian Geotechnical Society*, 31(2), 109–125, 2000.
15. Onoue, A., Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration. *Technical note. Soils and Foundations* 28 (4), 165–174, 1988.
16. Roscoe K. H, Burland J. B., On the generalized stress-strain behaviour of ‘wet’ clay. *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press: 553-609, 1968.
17. Yoshikuni, H. & Nakanodo, H., Consolidation of fine-grained soils by drain wells with finite permeability. *Soil Mech. Found. Eng.*, 14(2), 35–46, 1974.
18. Zeng, G.X., Xie, K.H., New development of vertical drain theories. *Proceedings of the 12th ICSMFE, Rio de Janeiro*, 2, 1435–1438, 1989.