Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

ALÜVYON ZEMİNDE ISLANMA KAYNAKLI OTURMANIN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

NUMERICAL ANALYSIS OF WETTING-INDUCED COLLAPSE SETTLEMENTS IN ALLUVIAL DEPOSITS

Melih Birhan KENANOĞLU[1], Mehmet AS[2]
Nabi Kartal TOKER[3], Erdal ÇOKÇA[4]

ÖZET

Bu çalışma, bir güç santrali bünyesindeki elektrik binası temelinde gözlemlenen farklı oturmaları, ıslanma ile oturma mekanizması üzerinden incelemektedir. Saha çalışmaları kapsamında bölgede yeni sondaj kuyuları açılmış; laboratuvar aşamasında ise endeks özelliklerinin tayinine ek olarak, hem doygun hem de doygun olmayan numuneler üzerinde ödometre, su tutma eğrisi ve UU üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma kapsamında geoteknik değerlendirmeler için Plaxis 3D yazılımından yararlanılırken, suya doygun olmayan zeminlerdeki hidromekanik süreçleri ve ıslanma kaynaklı oturma davranışını kapsamlı olarak modellemek amacıyla CODE BRIGHT yazılımı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen geri analizler; yangın ve yağmur suyu hatlarındaki sızıntıların, başlangıçta tam doygun olmayan alüvyon zemin üzerinde tetiklediği oturma mekanizmasını doğrulamıştır. Hazırlanan 3-boyutlu sayısal model çalışmalarında, suyun zemin içerisindeki yayılımına bağlı olarak gelişen oturma karakteristiği ve zeminin bu süreçteki davranışı detaylandırılmıştır.
Anahtar Kelimeler: *Islanma, Hidromekanik Modelleme, Suya Doygun Olmayan Zeminler*

ABSTRACT

This study investigates the primary cause of differential settlements observed in the foundation of an electrical building within a power plant through the mechanism of "wetting-induced collapse." "Within the scope of field investigations, new boreholes were drilled in the region. During the laboratory phase, in addition to the determination of index properties, oedometer tests (under both saturated and unsaturated conditions), soil-water retention curve (SWRC) measurements, and UU triaxial compression tests were performed. For the numerical part of the study, Plaxis 3D software was utilized for geotechnical evaluations, while CODE_BRIGHT software was employed to comprehensively model the coupled hydro-mechanical processes in unsaturated soils and the wetting-induced settlement behavior. The back-analyses confirmed that leakages from fire hydrant and rainwater lines triggered the collapse mechanism in the initially unsaturated alluvial soil. In the 3D numerical models, the settlement characteristics developing due to water infiltration in the soil and the behavior of the soil during this process were detailed.
Keywords: *Wetting, Hydromechanical Modeling, Unsaturated Soils*

[1] Dr., TOKER Sondaj ve İnşaat Müh. Müş. A.Ş., melihkenanoglu@toker.com.tr (Sorumlu yazar)
[2] Dr., TOKER Sondaj ve İnşaat Müh. Müş. A.Ş., mehmetas@toker.com.tr
[3] Doç. Dr., Ortadoğu Teknik Üniversitesi, toker@metu.edu.tr
[4] Prof. Dr., Ortadoğu Teknik Üniversitesi, ecokca@metu.edu.tr

1. GİRİŞ

Alüvyal birimler akarsu sistemleri tarafından gerçekleştirilen aşınma, taşıma ve takiben taşkın ovaları ile deltalar gibi düşük enerjili ortamlarda sedimanların depolanmasıyla sonuçlanan flüvyal süreçler neticesinde meydana gelir (Miall, 1996). Bu çökeller, taşıyıcı su kütlesinin değişken akış hızları ve periyodik taşkın olayları ile kontrol edilen belirgin bir yanal/düşey yönlü değişkenlik ve heterojen ardalanma ile karakterize edilir (Bridge, 2003). Ayrıca, bu sedimanların konsolide olmamış ve genellikle jeolojik olarak genç (Holosen) doğası, karmaşık geoteknik davranışlarına sebep olarak; bu birimleri çevresel değişimlere ve dış yükleme koşullarına karşı son derece hassas hale getirmektedir (Fookes, 1997).

Yeraltı su seviyesinin üzerindeki zeminler; katı daneler, su ve havadan oluşan üç fazlı bir sistemle karakterize edilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Zemin suya doygun olmayan durumdaki mekanik davranışını tanımlayan en kritik parametrelerden biri, boşluk havası basıncı ile boşluk suyu basıncı arasındaki farkı temsil eden matrik emmedir (Vanapalli vd., 1996). Kurak ve yarı kurak iklimlerde suya doygun olmayan zeminler genellikle matrik emme ile bağlanan yarı kararlı (metastable) bir yapı sergiler. Ancak Alonso vd. (1990) tarafından ifade edildiği üzere, su içeriğindeki artış emmenin azalmasına neden olur ve bu durum belirli bir çevre gerilmesi altındaki yarı kararlı zemin yapısında plastik hacimsel sıkışma ile sonuçlanır. Islanma kaynaklı çökme olarak bilinen bu durum, yapısal stabilite açısından önemli riskler oluşturur.

Bu çalışmada, bir endüstriyel yapının radye temeli altında, yangın söndürme musluğu ve yağmur suyu hatlarındaki sızıntılar nedeniyle tetiklenen bu mekanizma, gerçek saha verileri ve 3-boyutlu sayısal modelleme çalışmaları üzerinden irdelenmiştir.

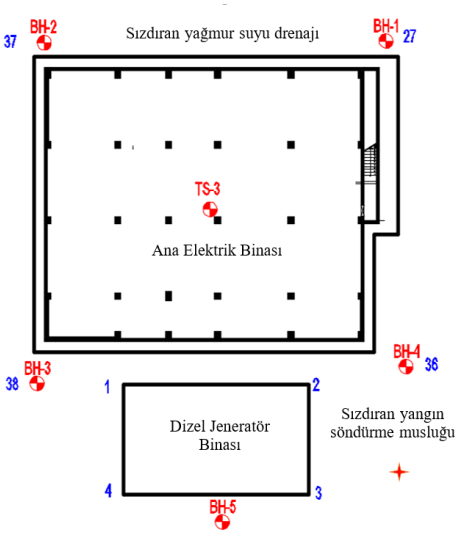
2. ÇALIŞMA SAHASI VE ZEMİN KARAKTERİZASYONU

Farklı oturma nedeniyle bir güç santrali ana elektrik binasında yapısal çatlaklar ortaya çıkmıştır. Gerçekleştirilen saha ziyaretinde ana elektrik binası ile çevresindeki beton kaplamanın konumu arasındaki 2 cm civarındaki boşluk binanın çevredeki dolgu yüzeyinden 2 cm daha az oturduğunu göstermiştir (Şekil 1-a). Topografik ölçümlere göre komşu dizel jeneratör binası, ana elektrik binasından daha fazla oturmuş olmasına rağmen yapıda gözle görülür bir hasar bulunmamıştır. Ana elektrik binasının tüm katlarındaki çeşitli duvarlarda, binanın çevre kolonlarının merkez kolonlardan daha fazla oturduğunu gösteren diyagonal çatlaklar gözlenmiştir (Şekil 1-b,c). Bodrum radye temelinin üst yüzeyinde aşağı doğru içbükey bir eğilmeye işaret eden çatlaklar gözlenmiş; bu durum çevre kolonların daha fazla oturduğu yönündeki değerlendirme ile örtüşmüştür. Ayrıca yakındaki yangın söndürme musluğunda belirsiz süreli bir sızıntı olduğu ve yağmur suyu drenaj hattında da sızıntılar olduğu tesisattaki basınç kaybından anlaşılmış ve yangın söndürme musluğu çevresinde beton kaplama ile dolgu zemin arasında boşluk oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 1-d).

Ana elektrik binası ve komşu dizel jeneratör radye temelleri sırasıyla 27.4mx33.4m ve 10.2mx18.2m boyutlarındadır. Temellerin yerleşimi, topografik ölçüm noktaları ve saha araştırması kapsamındaki sondaj yerleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Beton kaplama ile ana elektrik binası arasında farklı oturma (a), döşeme ve duvarlarda gözlenen diagonal çatlaklar (b-c), yangın söndürme musluğu ile beton kaplama arasında oluşan boşluk (d)



Şekil 2. Ölçüm noktalarının binalara ve sondaj kuyularına göre konumu

2.1. Zemin Karakterizasyonu

Zemin profilinin karakterizasyonu amacıyla, ana elektrik binası temelinin köşelerinde dört, komşu dizel jeneratör binası kenarında ise bir adet olmak üzere, derinlikleri 17.0m ile 19.5m arasında değişen toplam beş adet sondaj kuyusu açılmıştır (Şekil 2). Sondaj verilerine göre zemin profili yüzeyden itibaren sırasıyla dolgu, alüvyon ve kiltaşı/silttaşı/kumtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Dolgu biriminin kalınlığı 3.80m ile 6.20m arasında, alüvyon biriminin kalınlığı ise 10.30m ile 12.30m arasında değişmektedir. Alüvyon birim, SPT-N değerlerinin dağılımı esas alınarak kendi içinde iki alt tabakaya ayrılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre dolgu birimi killi kum (SC), düşük plastisiteli kil (CL) ve yer yer killi çakıl (GC) seviyelerinden oluşmaktadır. Alüvyon birim ise killi kum (SC) ve düşük plastisiteli kil (CL) karakterinde olup, bölgesel olarak düşük plastisiteli silt (ML), killi çakıl (GC) ve siltli kum (SM) ardalanmaları içermektedir. Yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden itibaren 12.45 m ile 18.99 m arasında değişen derinliklerde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen örselenmemiş zemin

numuneleri üzerinde indeks özelliklerinin belirlenmesine ek olarak; hem doygun hem de doygun olmayan koşullarda UU (konsolidasyonsuz-drenajsız) üç eksenli basınç deneyleri, ödometre deneyleri ve ıslanma-kuruma çevrimlerini içeren basınç plakası ile su tutma eğrisi tayini testleri gerçekleştirilmiştir. Kuruma yönünde su tutma eğrileri çıkarılırken numuneler emme artımı öncesi serbest şişmeye bırakılmış, ıslanma yönünde ise numuneler emme artımı öncesi açık havada kurutulmuştur. Su tutma eğrisi ölçüm verisine van Genuchten (1980) tarafından önerilen denklem oturtulmuş ve böylece emme ile suya doygunluk derecesi ilişkisi sürekli olarak tanımlanmıştır. Su tutma eğrisi ölçümleri ve sayısal analizlerde kullanmak üzere ölçüm verisine oturtulmuş denklem Şekil 3'te sunulmuştur. Ayrıca, zeminlerin çökme potansiyelini saptamak amacıyla, doygun olmayan örselenmemiş numunelere, mevcut toplam gerilme ile üst yapıdan aktarılan düşey gerilmelerin toplamına eşdeğer bir yükleme yapılmış ve ardından numuneler suya doygun hale getirilerek hacimsel değişimleri incelenmiştir. Örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda ölçülen çökme potansiyeli (ε_c) değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Buna göre Jennings ve Knight (1975) çalışmasında verilen sınıflandırmaya göre çökme potansiyeline bağlı olarak zeminde karşılaşılabilecek problem büyüklüğü problemli ($5\% < \varepsilon_c < 10\%$) ve aşırı problemli ($10\% < \varepsilon_c < 20\%$) numuneler gözlenmiştir.

Tablo 1. Zeminlerin geoteknik özellikleri

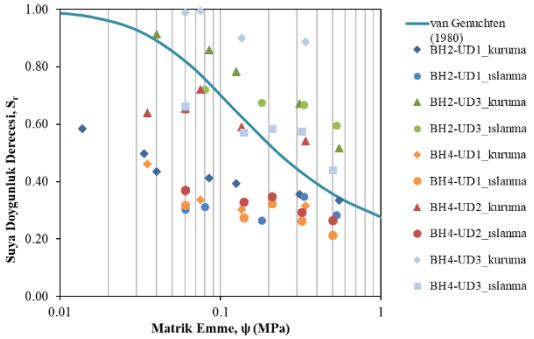
Parametre		Dolgu	Alüvyon-1	Alüvyon-2
Drenajsız kayma dayanımı, c_u (kPa)		35	75	150
Efektif kohezyon, c' (kPa)		1	3	9
Efektif içsel sürtünme açısı, ϕ' (°)		28	31	30
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m^3)		20	20	21
Drenajsız deformasyon modülü, E_u (kPa)		4000-20000	7500-37500	15000-75000
Başlangıç boşluk oranı, e_0		0.508	0.527	0.473
Bakir sıkışma indisi, C_c	Kuru	0.190	0.143	0.061
	Islak	0.140	0.157	0.131
Yeniden sıkışma indisi, C_s	Kuru	0.012	0.010	0.009
	Islak	0.011	0.022	0.023
İkincil sıkışma indisi, $C_{\alpha e}$	Kuru	0.0016	0.0020	0.0010
	Islak	0.0011	0.0015	0.0007
Hacimsel sıkışma katsayısı, m_v (kN/m^2)	Kuru	$4.20\text{x}10^{-4}$	$1.52\text{x}10^{-4}$	$0.67\text{x}10^{-4}$
	Islak	$9.10\text{x}10^{-4}$	$3.02\text{x}10^{-4}$	$1.47\text{x}10^{-4}$
Konsolidasyon katsayısı, c_v (m^2/s)		2.0x10-7	2.0x10-7	1.5x10-7
Hidrolik İletkenlik, k (m/s)		$8.4\text{x}10^{-10}$	$3.0\text{x}10^{-10}$	$9.0\text{x}10^{-11}$
Ortalama SPT-N değeri, N_{60}		9	15	31

Tablo 2. Çökme Deneyleri

Sondaj Adı	Numune Adı	Derinlik (m)	σ_v (kPa)(1)	ε_c (%)(2)
BH-2	UD-1	3.15-3.60	75	5.1
BH-2	UD-3	9.00-9.40	200	0.73
BH-4	UD-1	3.00-3.40	75	0.4
BH-4	UD-2	6.00-6.20	200	11.99
BH-4	UD-3	9.00-9.30	200	2.21
BH-1	UD-2	6.00-6.30	200	0.05
BH-3	UD-2	6.00-6.30	200	0.03

Notlar: (1) Çökme deneyinde uygulanan ve mevcut toplam gerilme ile üst yapıdan aktarılan düşey gerilmelerin toplamına eşdeğer düşey yük değeridir.

(2) Çökme potansiyeli, $\varepsilon_c = \Delta H_c/H_0$ olup burada ΔH_c çökme sırasındaki düşey deformasyon ve H_0 ilk yüksekliktir.



van Genuchten (1980)

$$S_e = \frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}} = \left(1 + \left(\frac{\psi}{P}\right)^{\frac{1}{1-\lambda}}\right)^{\lambda}$$

S_{res}: 0.142
P: 0.07
λ: 0.41

Şekil 3. Su tutma eğrisi ölçümleri ve oturtulan eğri denklemi (van Genuchten, 1980)

3. SAYISAL MODELLEME

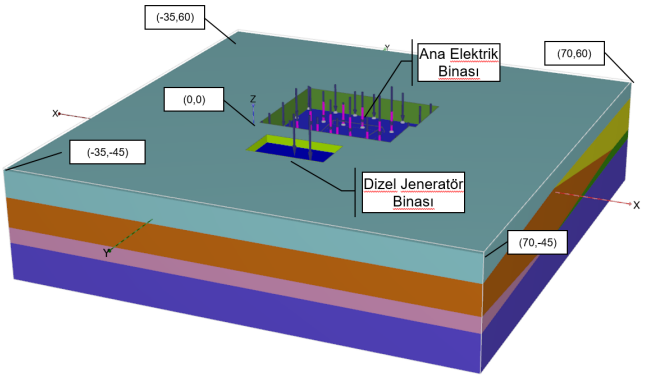
3.1. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulamaları

Sayısal modelleme çalışmaları kapsamında, ana elektrik binasında gözlemlenen farklı oturmalar PLAXIS 3D yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi üzerinden modellenmiştir. Zemin profili sondaj yerlerinin ve tabaka derinliklerinin 3-boyutlu model içerisinde tanımlanması ve tabaka sınırlarının kot ve derinlik verileri üzerinden doğrusal interpolasyon yöntemiyle türetilmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 4).

Dolgu ve alüvyon tabakalarının modellenmesinde Pekleşen Zemin (Hardening Soil) bünye modeli kullanılmıştır. Bu model, elasto-plastisite teorisi çerçevesinde formüle edilmiş hiperbolik bir bünye modeli olup Mohr-Coulomb modelinden farklı olarak, zemin rijitliğinin gerilme seviyesine bağlı değişimini dikkate alır (Schanz, 1998). Modelde rijitlik modülleri, çevre basıncıyla orantılı bir üstel fonksiyon aracılığıyla hesaplanmaktadır. Ayrıca, kayma pekleşmesi (shear hardening) ve hacimsel pekleşme (cap hardening) mekanizmalarını bir arada kullanarak, hem deviyatorik hem de izotropik yüklemeler altında oluşan plastik deformasyonları hassas bir şekilde modellemektedir. Dolgu ve alüvyon tabakaları drenajsız olarak değerlendirilmiş ve efektif gerilme analizi yaklaşımı (Undrained A) kullanılarak modellenmiştir. Bu yöntem, efektif dayanım parametrelerini (c', ϕ) ve efektif rijitlik parametrelerini temel alarak yazılımın aşırı boşluk suyu basınçlarını hesaplamasına ve efektif gerilme artışıyla birlikte kayma dayanımında meydana gelen yükselmeyi dikkate almasına olanak tanır. Alüvyon-1 tabakasının heterojenliğini yansıtmak amacıyla bu tabaka dört alt bölgeye ayrılmıştır: BH-1 ve BH-2 sondajlarının bulunduğu bölge (R1), TS-3 sondajının bulunduğu bölge (R2), BH-3 ve BH-4 sondajlarının bulunduğu bölge (R3) ve BH-5 sondajının bulunduğu bölge (R4) olarak incelenmiştir. Kiltaşı/silttaşı/kumtaşı kaya birimi oturma analizlerinde sıkışmaz tabaka olarak kabul edilmiştir.

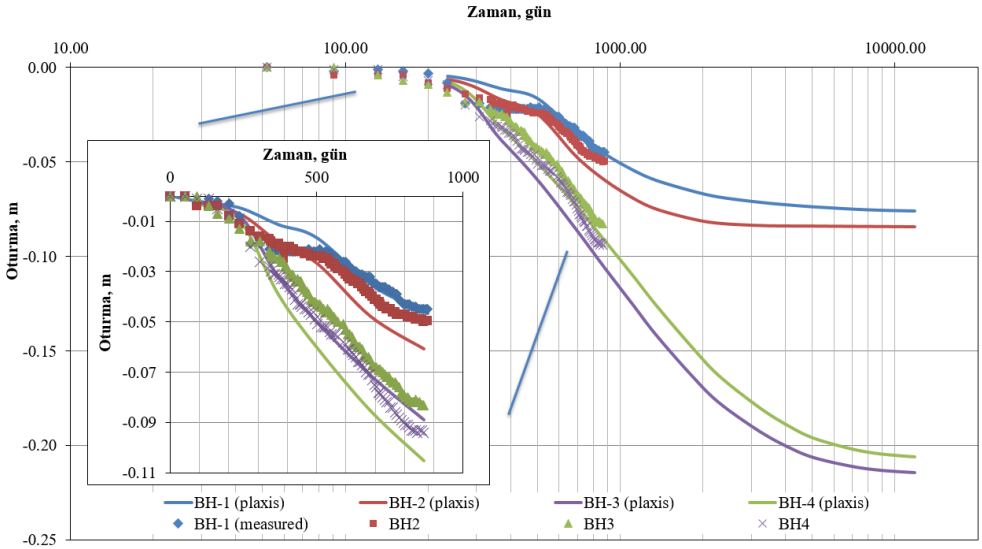
Sayısal analiz, yapım aşamalarını ve gözlem verisini yansıtacak şekilde dokuz aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada başlangıç gerilme durumu yerçekimi yüklemesi (gravity loading) ile tanımlanmış, ardından temel kazısı ve bekleme süreleri (toplam 75 gün) modele yansıtılmıştır. Ana Elektrik Binası inşaatı ve saha düzenleme çalışmaları 243 günlük bir süreç olarak modellenmiş; bunu takiben Dizel Jeneratör binasının inşası, temel yükleri (38 kPa) ve topografik ölçümlerin başlangıcına kadar geçen süreler tanımlanmıştır. Analizin ilerleyen aşamalarında, sahada gözlemlenen oturma-zaman eğrilerindeki eğim değişimlerini ve ikincil konsolidasyon etkilerini temsil etmek amacıyla, alüvyon tabakaları farklı parametre setleriyle güncellenerek zamana bağlı deformasyonlar modellenmiştir.

Geri analiz sürecinde, hidrolik iletkenlik (k) ve deformasyon modülü (E) parametrelerinin deneme-yanılma yoluyla değiştirilmesiyle, her bir ölçüm noktası için ölçülen deplasman-zaman eğrileriyle en iyi uyum sağlanmaya çalışılmıştır. Son aşamada ise yapının 50 yıllık servis ömrü sonundaki nihai oturma değerlerini belirlemek amacıyla uzun süreli konsolidasyon analizi yürütülmüştür.



Şekil 4. Üç boyutlu PLAXIS 3D modeli

Topografik ölçüm dönemi (865gün) sonunda, ana elektrik binasında gözlemlenen oturma değerleri ile geri analiz neticesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmede; BH-1 noktasında 4.5 cm'lik ölçüme karşılık 4.7 cm hesaplanmış, BH-2 noktasında 5.0 cm'ye karşılık 6.2 cm, BH-3 noktasında 8.3 cm'ye karşılık 10.9 cm ve BH-4 noktasında ise 9.6 cm'lik ölçüme karşılık 9.3 cm'lik hesaplanan değerlere ulaşılmıştır (Şekil 5). Yapının 50 yıllık hizmet ömrü boyunca beklenen toplam oturma miktarlarının 7.5 cm ile 22.0 cm arasında değişeceği öngörülmüştür. Oturma değerlerinin binanın kuzey ve güney köşe kolonları arasında belirgin bir farklı oturma göstereceği tespit edilmiştir.



Şekil 5. Üç boyutlu PLAXIS 3D modeli ile geri analiz sonuçları ve tahmini oturmalar

3-Boyutlu Hidromekanik Sonlu Elemanlar Modeli

Islanma kaynaklı oturma probleminin modellenmesinde, CODE_BRIGHT yazılımındaki Desai ve Perzyna tabanlı visko-plastisite modeli kullanılmıştır. Şekil değiştirme hızını temel alarak zamana bağlı deformasyonları simüle eden bu model, pekleşme mekanizmasında Barselona Baz Modelini (BBM) esas alır. Bu sayede, emme değişimlerine bağlı gelişen yükleme-çökme (LC) davranışı ve hidromekanik süreçler doğrudan

modellenebilmektedir. Viskoplastik bünyesel model denklemi (1) akışkanlık parametresi, Γ aracılığıyla birim şekil değiştirmelerin zamana bağlı değişimini (hız etkisini) hesaba katmaktadır:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \Gamma\langle\phi(F)\rangle\frac{\partial G}{\partial\sigma'} \quad (1)$$

Burada $\phi(F)$ elastik davranıştan plastik davranışa geçişin sınırını belirleyen akma fonksiyonu ve G plastik birim şekil değiştirmelerin yönünü ve büyüklüğünü belirleyen potansiyel fonksiyonudur ve bu fonksiyonlar için durum değişkenleri olarak gerilme tensörünün değişmezleri (J_1, J_2 ve J_3) ve emme (ψ) tanımlanmıştır (CODE BRIGHT v.8 manual). Alonso v.d. (2005) akışkanlık parametresinin emme ile ilişkisini üssel bir fonksiyon aracılığıyla tanımlamışlardır:

$$\Gamma_i = \Gamma e^{\delta\psi} \quad (2)$$

Burada δ kalibrasyon parametresi ve ψ emmedir.

Pekleşme modeli BBM tabanlı olarak aşağıdaki denklemler ile ifade edilir:

$$J_1^0 = 3p_c\left(\frac{J_1^{0*}}{3p_c}\right)^{\left(\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(\psi)-\kappa}\right)} \quad (3a)$$

$$\lambda(\psi) = \lambda(0)\left[(1-r)e^{-\beta\psi} + r\right] \quad (3b)$$

Burada λ(0), λ(ψ), κ, p_c viskoplastik model sıkışma parametreleri ve r ve β yükleme-çökme (LC) eğrisi parametreleridir.

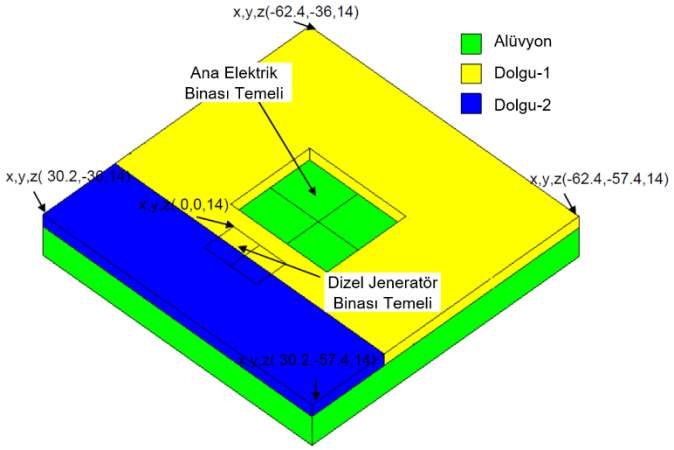
CODE BRIGHT ile analizlerde zemin ortamı 10 m derinliğinde Alüvyon tabakası ile modellenmiş, üzerine 4 m yüksekliğinde dolgu tabakası tanımlanmıştır. Dizel Jeneratör Binası için gerçekleştirilen analiz sonuçları bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmakla birlikte, ilk aşamada gerçekleştirilen geri analiz bulguları doğrultusunda dolgu tabakası, ana elektrik binası ve dizel jeneratör binası çevresinde iki ayrı bölge olarak tanımlanmıştır. Ana elektrik binası ve komşu dizel jeneratör binasının temel alanları sırasıyla 27.4 m × 33.4 m ve 10.2 m × 18.2 m boyutlarıyla modele yansıtılmıştır (Şekil 6). Yük dağılımı modellemesinde ana elektrik binası temeli dörde bölünmüş; BH-1, BH-2, BH-3 ve BH-4 yakınlarındaki çeyrek alanlara sırasıyla 72, 78, 101 ve 101 kPa düzgün yayılı yük uygulanmıştır. Analizde başlangıç emme değeri 300 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, eski sondaj çalışmalarında (TS-3) elde edilen ortalama su içeriğinin (%9.2) ölçülen su tutma eğrisi ile ilişkilendirilmesiyle elde edilmiştir. Dolgu ve alüvyon tabakaları için başlangıç porozite değeri, örselenmemiş numunelerin birim hacim ağırlık ölçümlerinden elde edilen ortalama değerlere dayanarak 0.35 olarak alınmıştır. Sızıntıdan kaynaklanan ıslanma etkisinin gerçekçi modellenmesi hedeflenerek, su tutma eğrisine ait ortalama ıslanma eğrisi analizlerde kullanılmıştır. Hidrolik iletkenlik fonksiyonu olarak Denklem-4'te sunulan ve suya doygunluk derecesine bağlı üssel fonksiyon kullanılmıştır (CODE BRIGHT User's Guide v8-6). Zeminler için hidrolik iletkenlik fonksiyonun tayininde kullanılan parametreler Tablo 3'de verilmiştir.

$$k = k_{sat}k_r = k_{sat}A((S_r - S_{res})/(1-S_r))^{\lambda_r} \quad (4)$$

Burada k hidrolik iletkenlik (m/sn) k_r bağıl geçirgenlik, A denklem sabiti, S_r suya doygunluk derecesi, S_{res} rezidüel suya doygunluk derecesi, λ_r denklem üs parametresidir.

Tablo 3. Hidrolik iletkenlik fonksiyonu parametreleri

Parametre Tanımı	Alüvyon	Dolgu-1	Dolgu-2
k_{sat}	$5x10^{-8}$	$1x10^{-8}$	$1x10^{-8}$
A	1	1	1
$S_{r,r}$	0.08	0.08	0.08
λ	1.3	3.0	1.5



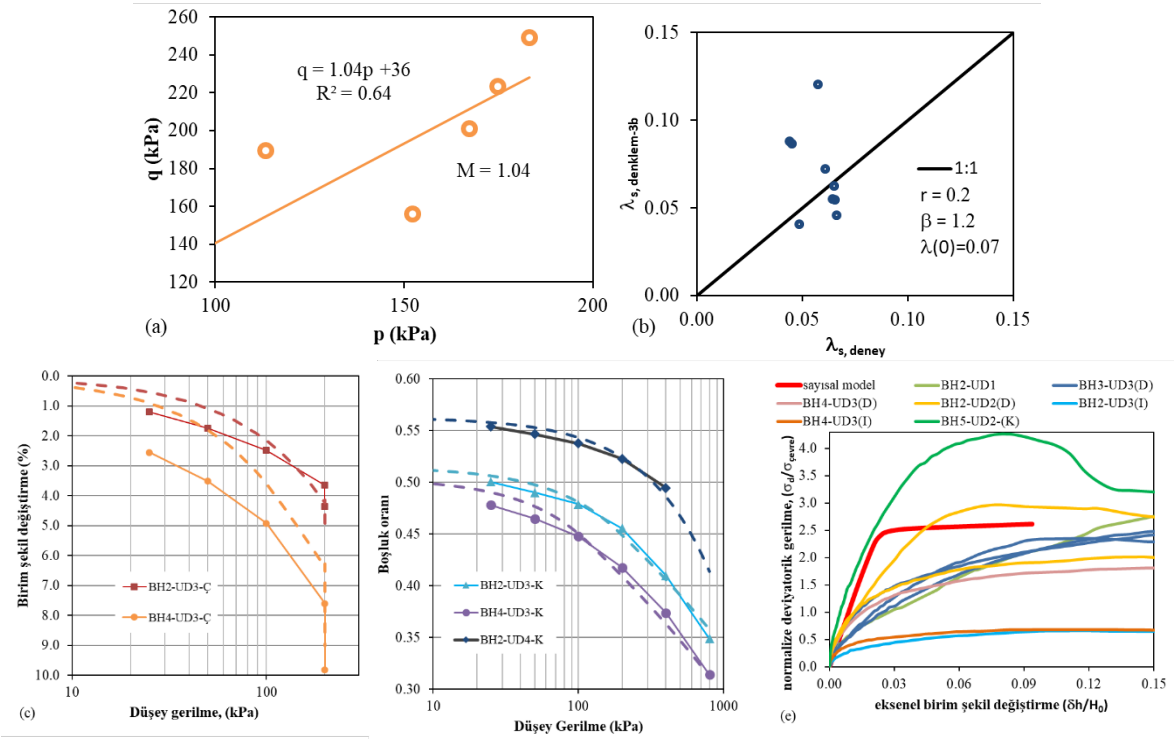
Şekil 6. Üç boyutlu CODE BRIGHT modeli

Sayısal analiz süreci, inşaat ve sızıntı aşamalarını temsil eden beş fazda yürütülmüştür. İlk aşama, Ana Elektrik Binası temel yükleri ve 4 metre yüksekliğindeki dolgu inşaatını içermekte olup analiz süresi 6,5 ay olarak tanımlanmıştır. İkinci aşamada Dizel Jeneratör yükleri modele eklenmiş (süre: 5 ay), üçüncü aşamada ise oturma takibi başlatılarak deformasyon süreci ek bir 6 ay boyunca izlenmiştir. Analizin dördüncü aşamasında (16 ay), izleme başlangıcından 6 ay sonra oluştuğu varsayılan su sızıntısı durumu modellenmiş; bu doğrultuda, drenaj borularından kaynaklanan ıslanma etkisini modellemek amacıyla Ana Elektrik Binası ve Dizel Jeneratör Binası temel kenarlarındaki emme değerleri sınır koşulu olarak kademeli şekilde düşürülmüştür. Model dört çeyreğe bölünmüş, 300 kPa olan başlangıç emme değerleri; BH-1, BH-2, BH-3 ve BH-4 noktalarını içeren üst yüzeydeki çeyrek alanların sınırları boyunca sırasıyla 280, 130, 185 ve 15 kPa seviyelerine düşürülmüştür. Beşinci ve son aşamada emme sınır koşulları kaldırılarak sızıntı etkisi sonlandırılmış ve sistemin denge durumuna ulaşması sağlanmıştır.

Bünyesel Model Parametrelerinin Kalibrasyonu

Suya doygun olmayan zeminler için viskoplastik bünyesel malzeme modeli; elastik bileşenler, zamana bağlı parametreler, akma yüzeyi, akış kuralı ve pekleşme mekanizmasını tanımlayan parametreler dahil olmak üzere toplam 20 adet malzeme parametresine gereksinim duymaktadır. Çok parametreli ve doğrusal olmayan bu tür bünye modelinde, topografik ölçüm verileriyle tutarlı matematiksel çıktılar elde edilse dahi, parametrelerin fiziksel gerçeklikten uzak değerler alması modelin uzun dönem tahmin kabiliyetini olumsuz etkileyecektir. Bu nedenle, çok sayıda değişken içeren geri analiz ve optimizasyon çalışmalarında çözümün tekilliğini korumak ve nihai parametre setinin fiziksel gerçekçiliğini iyileştirmek adına başlangıç değerlerinin doğru bir aralıkta tanımlanması kritik önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, optimizasyon sürecine altlık oluşturacak başlangıç değerlerinin belirlenmesinde, fiziksel karşılığı bulunan BBM parametreleri için (κ, r, β, M) doğrudan UU ve ödometre deneyi sonuçlarından yararlanılmıştır.

Seçilen örnekler üzerinde "kuru" ve "ıslak" olarak adlandırılan iki ödometre deneyi gerçekleştirilmiştir. "Islak" numuneler, ASTM D2435 standardına uygun olarak yükleme öncesinde bir gün boyunca su altında bırakılmış; "kuru" numuneler ise standarttan farklı olarak önceden ıslatılmadan, doğal su içeriklerinde test edilmiştir. Deney süresince buharlaşmayı önlemek amacıyla ödometre hücreleri naylon torbalarla izole edilmiştir. Ayrıca, aynı örselenmemiş numune tüpünden alınan örnekler üzerinde "çökme" (collapse) deneyi yürütülmüştür. Bu kapsamda numuneler, başlangıç toplam gerilmesi ile yapıdan aktarılan ilave yükün toplamına yaklaşık eşit olan maksimum basınca kadar kademeli olarak yüklenmiş ve ardından suya doygun hale getirilmiştir. UU üç eksenli deneylerinde ise numunelerin su içeriği hem ıslanma hem de kuruma yönünde değiştirilmiştir. Islanma yönünde su içeriğini değiştirmek amacıyla numune yan yüzeyi delikli bir kalıp içine yerleştirilip suya boğulmuştur (Kenanoğlu ve Toker, 2018). Kuruma yönünde ise numuneler açık havada bekletilerek su içerikleri azaltılmıştır. Değişken su içeriklerinde ve suya doygun olmayan durumda düşük hidrolik iletkenlik değerlerine sahip numuneler, UU üç eksenli deneylerinde sabit su içeriği koşulu varsayılarak kesmeye tabi tutulmuştur. Kesme hızı, dakikada %0.5 birim şekil değiştirme olarak uygulanmıştır.



Şekil 7. UU üç eksenli deney sonuçlarının ortalama gerilme, p – deviatorik gerilme, q uzayında dağılımı (a), Ödometre deneyleri ve Denklem 3b ile elde edilen sıkışma indisi karşılaştırması (b), CODE BRIGHT ile ödometre deneylerinin modellenmesi (Ç:çökme deneyi) (c), CODE BRIGHT ile ödometre deneylerinin modellenmesi (K:kuru deney) (d), CODE BRIGHT ile UU üç eksenli deneylerinin modellenmesi (I: ıslak deney, K:kuru deney, D: doğal su muhtevasında deney) (e).

CODE BRIGHT programında hem ödometre deneyleri hem de UU üç eksenli deneyleri eksenel simetrik olarak modellenmiştir. Numunelerin başlangıç emme değerleri su içeriği değiştirme çalışmaları sonucunda ulaşılan su muhtevası değerinin su tutma eğrisi üzerinde eşlendiği emme değeri olarak alınmıştır. Yenilme yüzeyi eğimi (M) parametresi UU üç eksenli deneylerinden elde edilen ortalama gerilme ve deviyatorik gerilme değerlerini p-q

uzayında en iyi temsil eden eğim değer olarak 1.13 bulunmuştur (Şekil 7a). M değeri doğal su içeriğinde yapılan UU üç eksenli deneyi sonuçlarına göre 0.7 olarak güncellenmiştir (Şekil 7e). Şekil 7e'de UU üç eksenli deney verisi normalize edilerek kullanılmış ve bu amaçla normalize deviyatorik gerilme değeri deviyatorik gerilme değerlerinin çevre basıncı ile oranı olarak alınmıştır. Yükleme-çökme yüzeyi parametreleri r ve β, ödometre deneylerinden elde edilen sıkışma eğrisi eğim değerlerini Denklem-3b ile en iyi temsil eden değerler olarak sırasıyla 0.2 ve 1.2 bulunmuştur (Şekil 7b). Suya doygun durumdaki sıkışma indisi değeri, λ(0) için suya doygun olarak yapılan ödometre deneylerden elde edilen λ(0) değerlerinin aritmetik ortalaması olarak 0.07 alınmıştır. Yeniden sıkışma indisi, κ parametresi ödometre deneyi sonuçlarından elde edilen yeniden sıkışma eğrilerinin eğimleri ile uyumlu bir aralıkta (0.001-0.002) alınmıştır.

Her bir deney için yapılan sayısal analizlerde viskoplastik bünyesel model parametreleri yukarıda bahsedilen parametreler için başlangıç değerleri belirlendiği haliyle tanımlanıp geri kalanlar parametreler ile birlikte değiştirilerek deney sonucuna en iyi oturan parametre setleri belirlenmiştir. Viskoplastik bünyesel model parametrelerinin başlangıç değerleri, deney sonuçlarına göre belirlenen parametre setlerinin kapsadığı aralıklar dahilinde seçilerek ıslanma kaynaklı oturma geri analizlerinde kullanılmıştır. Geri analizler sonucunda elde edilen viskoplastik bünyesel model parametrelerinin nihai değerleri Tablo 4'te sunulmuştur.

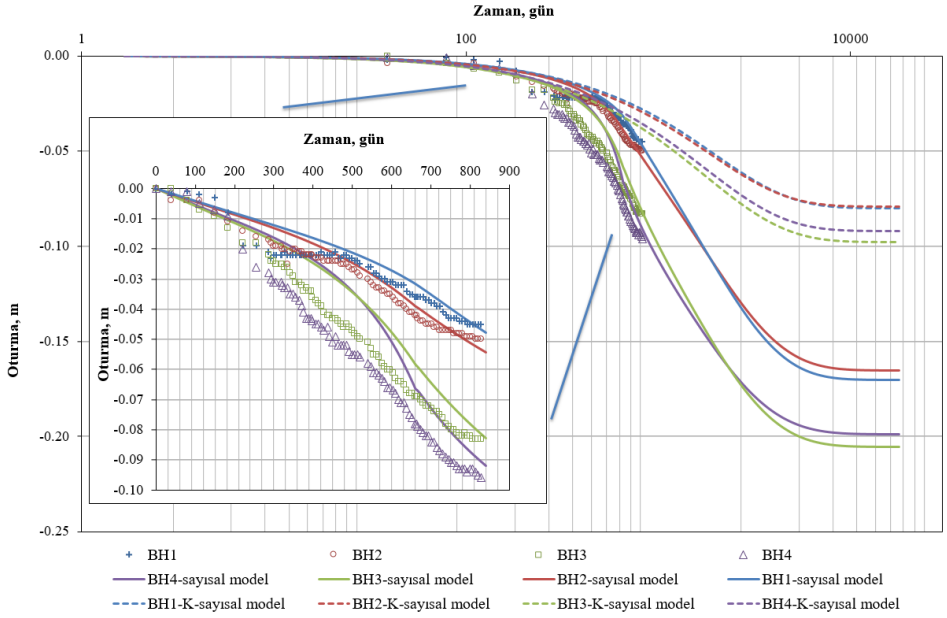
Tablo 4. CODE BRIGHT viskoplastik bünyesel model parametreleri

Parametre	Parametre Tanımı	Alüvyon	Dolgu-1	Dolgu-2
E (MPa)	Young modülü	10	6	6
ν	Poisson oranı	0.35	0.35	0.35
Γ_0 (1/s)	1/Viskozite (sünme etkisinin dahil edilmesi)	2.00E-07	5.00E-07	7.00E-07
N	Gerilme fonksiyonun üssü	1	1	1
F_0 (MPa)	Gerilme fonksiyonu parametresi	1	1	1
δ	Emmenin viskozite üzerindeki etkisi için kullanılan parametre	-9.5	-0.1	-0.5
b	Asosiye akış parametresi	1	1	1
κ	Yeniden sıkışma indisi	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-04
$\lambda(0)$	Sıkışma indisi	0.11	0.07	0.12
r	Yükleme çökme eğrisi parametresi	0.02	0.02	0.02
β	Yükleme çökme eğrisi parametresi	1.2	1.2	1.2
p_c	Yükleme çökme eğrisi parametresi	0.01	0.01	0.01
k_2	Akma fonksiyonu parametresi	-6	-2	-6
k_3	Akma fonksiyonu parametresi	6	2	6
n	Potansiyel fonksiyonun üssü	1	1	1
ɣ	Potansiyel fonksiyon parametresi	-0.111	-0.111	-0.111
J_F (MPa)	Akma fonksiyonun başlangıç boyutu	0.2	0.09	0.08
J_G (MPa)	Akma fonksiyonun başlangıç boyutu	0.2	0.09	0.08
a	Akma fonksiyonu parametresi	4	4	4
M	Akma fonksiyonu parametresi	0.7	0.7	0.7

CODE BRIGHT Analiz Sonuçları

Sayısal modelde başlangıç değerleri tanımlandıktan sonra topografik oturma ölçümü sonuçlarını en iyi temsil edecek şekilde parametre değerleri değiştirilerek geri analiz yapılmıştır (Şekil 8a). Buna göre topografik ölçüm dönemi sonu oturmaları ile karşılaştırıldığında BH-1 noktasında 4.5 cm'lik ölçüme karşılık 4.8 cm, BH-2 noktasında 5.0 cm'ye karşılık 5.2 cm, BH-3 noktasında 8.3 cm'ye karşılık 8.2 cm ve BH-4 noktasında

ise 9.6 cm'lik ölçüme karşılık 9.7 cm'lik hesaplanan değerlere ulaşılmıştır (Şekil 8). Yapının 50 yıllık hizmet ömrü boyunca beklenen toplam oturma miktarlarının 17.4 cm ile 21.0 cm arasında değişeceği öngörülmüştür. Islanmanın oturmalar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla emme sınır koşulu olarak emme düşüşü uygulamadan sayısal model çözümü Şekil 8'de sunulmuştur. Buna göre sızıntının, oturmaları yaklaşık ikiye katladığı bulgulanmıştır.



Şekil 8. a) CODE BRIGHT geri analiz sonuçları, oturma tahminleri (sızıntı olmasaydı ne olacağını gösteren emme sınır koşulu uygulanmamış analizler kesikli çizgi ile gösterilmiş olup lejantta "K" kodu kullanılarak gösterilmiştir).

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, bir güç santrali bünyesindeki ana elektrik binası temelinde gözlenen farklı oturma ve yapısal hasar problemleri; saha araştırmaları, ileri laboratuvar deneyleri ve 3-boyutlu gelişmiş sayısal modelleme yöntemleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ana elektrik binası çevresindeki altyapı sızıntıları zemindeki matrik emmenin düşmesine yol açmış; bu durum plastik hacimsel sıkışmaları tetikleyerek binanın çevre ve merkez kolonları arasında diferansiyel oturmalara ve yapı genelinde hasarlara neden olmuştur. Bu mekanizmanın karakterizasyonu için yürütülen laboratuvar çalışmalarında, standart laboratuvar deneylerine ek olarak suya doygun olmayan numuneler üzerinde ödometre ve UU üç eksenli deneyleri ve su tutma eğrisi testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, Barcelona Basic Model (BBM) tabanlı viskoplastik bünyesel model parametrelerinin kalibrasyonu için kullanılmıştır.

PLAXIS 3D analizlerinde yük durumu aşamaları ve zemin profili detaylı bir biçimde modellenmiştir. PLAXIS 3D modelinde zamana bağlı oturmalar, zemin rijitlik modüllerinin sızıntı periyotlarına bağlı olarak kademeli düşürülmesiyle yakalanabilmiştir. Hidromekanik bağlaşık modelleme sağlayan CODE BRIGHT analizlerinde ise, sızıntı kaynaklı emme değişimlerini zamana bağlı olarak simüle edilmiş ve saha ölçümleriyle tutarlılık göstererek nihai oturma tahminleri teyit edilmiştir. 3-boyutlu sayısal model çalışmaları, saha ölçümü verileriyle uyum sergileyerek yapının 50 yıllık servis ömrü boyunca artan farklı oturma potansiyelini ortaya koymuştur. Santralin hizmet ömrü

içerisinde gerçekleşmesi beklenen gelecekteki (ilave) toplam oturma değerleri 4-12 cm aralığında olup; bu oturmanın 3-6 cm'lik kısmının farklı oturma karakterinde olabileceği analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, santralin hizmet ömrü boyunca yapısal hasar riskinin devam edeceği öngörülmektedir. Bu nedenle gelecekte oluşabilecek ilave deformasyonların sınırlandırılması ve yapısal güvenliğin sağlanması amacıyla, zemin iyileştirme yöntemlerinin (mini kazık sistemi, fore kazık sistemi, jet grout vb.) uygulanması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Alonso, E. E., Gens, A. ve Josa, A. (1990), "A constitutive model for partially saturated soils" Géotechnique, 40(3), 405-430.

Alonso, E. E., Olivella S. ve Pinyol N.M. (2005), "A review of Beliche Dam", Géotechnique, 55(4): , 267–285.

ASTM D2435. (2020), "Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading" West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D2435_D2435M-11R20

Bridge, J. S. (2003), "Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record", Blackwell Publishing.

Desai, C.S. (1987), "Viscoplastic model for geologic materials with generalized flow rule", Int. J. Num. Anal. Methods in Geomech. 11(6):, 603-260.

Fookes, P. G. (1997), "Geology for Engineers: The Geological Model, Prediction and Performance", Geological Society of London.

Fredlund, D. G. ve Rahardjo, H. (1993), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Sons.

Jennings, J.E. ve Knight, K. (1975), "A Guide to Construction on or with Materials Exhibiting Additional Settlement Due to 'Collapse' of Grain Structure" 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, pp.99-105.

Kenanoğlu, M.B. ve Toker, N. K. (2018) "Changing and equilibrating water content of test specimens without suction control", 7th International Conference on Unsaturated Soils, Hong Kong.

Lu, N. ve Likos, W. J. (2004), "Unsaturated Soil Mechanics", John Wiley & Sons.

Miall, A. D. (1996), "The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology", Springer.

Perzyna, J.K., (1966), "Fundamental problems in viscoplasticity", Adv. Appl. Math., 9, pp. 243-377.

Schanz, T., Vermeer, P.A., (1998), "Special issue on Pre-failure deformation behavior of geomaterials", Geotehcnique, 48, pp. 383-387.

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. ve Clifton, A. W. (1996), "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", Canadian Geotechnical Journal, 33(3), 379-392.

van Genuchten, M.T. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.