KUTU MENFEZ VE ALTGEÇİTLERDE KONSOLİDASYON KAYNAKLI BOYUNA DAVRANIŞIN ANALİZİ

ANALYSIS OF CONSOLIDATION-INDUCED LONGITUDINAL BEHAVIOR IN BOX CULVERTS AND UNDERPASSES

Berat ERTEKİN[1], Yavuz Selim DEMİREL[2]

ÖZET

Kutu tipi menfez ve altgeçit yapıları, tasarım aşamasında genellikle birim genişlik üzerinden iki boyutlu (2B) modellerle analiz edilmektedir. Ancak, düşük taşıma kapasitesine sahip ve konsolidasyon oturmalarının kritik olduğu yumuşak zeminlerde, yapı boyunca oluşan zamana bağlı farklı oturmalar yapının boyuna doğrultudaki bütünlüğünü tehdit etmektedir. Bu çalışmanın amacı, konsolidasyon potansiyeli yüksek zeminlerdeki kutu tipi sanat yapılarının boyuna yöndeki yapısal tepkisini incelemek ve geleneksel 2B analizlerin bu etkileri karşılamadaki yetersizliğini ortaya koymaktır. Çalışma kapsamında; SAP2000 ile oluşturulan 3B yapısal modeller ve Plaxis ile gerçekleştirilen konsolidasyon analizlerini içeren ileri seviye sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmıştır. Analizlerde, değişken zemin profillerinin ve zamana bağlı konsolidasyon oturmalarının yapısal iç kuvvetler, boyuna eğilme momentleri ve derz açılmaları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, konsolidasyon kaynaklı farklı oturmaların kesitlerde ciddi ek gerilmelere yol açtığını; bu durumun boyuna donatı hesabı ve sızdırmazlık sağlayan derz detaylandırması için belirleyici olduğunu göstermektedir.
Anahtar Kelimeler: *Kutu Menfez, Konsolidasyon Oturması, Boyuna Davranış, Plaxis 2D, SAP2000*

ABSTRACT

Box culverts and underpass structures are generally analyzed in engineering practice using two-dimensional (2D) models based on cross-sectional unit width. However, on soft soils where consolidation settlements are critical, time-dependent differential settlements along the structure threaten the longitudinal integrity of the building. The objective of this study is to investigate the longitudinal structural response of box-type structures on soils with high consolidation potential and to demonstrate the inadequacy of 2D analyses in addressing these effects. Within the scope of the study, advanced finite element methods were utilized, including 3D structural FEM models in SAP2000 and consolidation analyses in Plaxis. In the analyses, the effects of variable soil profiles and time-dependent consolidation settlements on structural internal forces, longitudinal bending moments, and joint openings were evaluated. The findings indicate that consolidation-induced differential settlements lead to significant additional stresses in sections, which is decisive for longitudinal reinforcement design and water-tight joint detailing.
Keywords: *Box Culverts, Consolidation Settlement, Longitudinal Behavior, Plaxis 2D, SAP2000*

1. GİRİŞ

Kutu tipi menfez ve altgeçit yapıları, ulaşım altyapı projelerinde su geçişlerini sağlamak, hat sürekliliğini korumak ve kesişen akslardaki trafiği düzenlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan betonarme yapılardır. Bu yapıların tipik tasarım süreçlerinde, yapı profili boyunca

[1] Y. İnş. Müh., Ar-Ge ve Özel Yap. Dep. Müd., SYSTRA Türkiye, bertekin@systra.com (Berat ERTEKİN)
[2] Y. İnş. Müh., Geoteknik Müh., SYSTRA Türkiye, ysdemirel@systra.com

geometrik ve zemin koşullarının homojen olduğu varsayımıyla, yapıdan alınan birim genişlikteki bir enkesit üzerinden iki boyutlu (2B) düzlem çerçeve analizleri yapılmaktadır.

Geleneksel 2B (düzlem şekil değiştirme) analiz yöntemleri, üç boyutlu zemin-yapı etkileşimi ile konsolidasyon kaynaklı deformasyon alanlarını doğru yansıtmakta yetersiz kalmaktadır (Gourvenec vd., 2014). Bu kısıtlama, yapı boyunca oluşan bu boyuna eğilme momentlerini, kesme kuvveti değişimlerini ve derzlerde meydana gelen açılmaları hesaplamakta yetersiz kalmaktadır.

Çeşitli saha uygulamalarında incelemeler yapıldığında, 2B yaklaşımlarla tasarlanan kutu yapıların boyuna yöndeki donatı yetersizlikleri ve derz detaylandırma eksiklikleri nedeniyle serviste çatlaklar oluşturduğu, derzlerde sızdırmazlık kaybı yaşandığı ve uzun vadede yapısal bütünlüğün riske girdiği görülmektedir.



Şekil 1. Menfez yapısı genleşme derzi bölgesindeki hasarlar

Bu çalışmanın amacı; zayıf zeminler üzerinde inşa edilen kutu menfez ve altgeçitlerde konsolidasyon kaynaklı farklı oturmaların boyuna doğrultudaki yapısal davranışa etkilerini incelemektir. Bu doğrultuda, geleneksel 2B çerçeve tasarım yaklaşımlarının kısıtları ortaya koyulmuş; detaylı yapısal ve geoteknik modellemelerin tasarım güvenliği ve servis ömrü açısından gerekliliği parametrik olarak değerlendirilmiştir.

2. GEOTEKNİK VE YAPISAL MODELLEME YAKLAŞIMLARI

Bu çalışmada, geleneksel iki boyutlu (2B) enkesit analizlerinin kısıtlarını ortaya koymak ve zamana bağlı konsolidasyon oturmalarının yapının boyuna doğrultudaki iç kuvvetlerine etkisini incelemek amacıyla iki aşamalı bir sayısal modelleme metodolojisi izlenmiştir.

2.1 Geoteknik Modelleme Yaklaşımı ve İdealize Zemin Profilleri

İlk aşamada, farklı mühendislik özelliklerine sahip idealize edilmiş zemin profilleri tanımlanmıştır. Geleneksel tasarım pratiklerinde sıklıkla uygulandığı üzere, öncelikle taşıma gücü ve bir boyutlu konsolidasyon teorisine dayalı oturma kontrolleri gerçekleştirilmiştir (AASHTO, 2024). Bu klasik hesap yöntemlerine göre yeterli güvenliği sağladığı görülen kesit ve zemin koşulları, yapının boyuna doğrultudaki davranışını değerlendirmek amacıyla Plaxis 2D yazılımı ile yeniden analiz edilmiştir.

Plaxis analizlerinde, killi zeminlerin doğrusal olmayan elasto-plastik davranışını temsil edebilmek adına gelişmiş bir bünye modeli olan Pekleşen Zemin (Hardening Soil) modeli tercih edilmiştir. Bu model, zeminin gerilmeye bağlı elasto-plastik davranışını temsil edebilmekte ve zeminin farklı yükleme aşamalarındaki rijitlik değişimlerini hesaba katabilmektedir. Kil tabakalarının altında uzanan kiltaşı ise Mohr-Coulomb ile modellenmiştir. Menfez yapısı eşdeğer zemin hacim elemanları ve arayüz elemanlarıyla modellenmiştir (Mar, 2002).

Plaxis model sınırları; sınır etkilerini sönümleyecek biçimde (Berilgen, 2014) ve etki derinliği gerilme artışının efektif gerilmenin %20'sinin altına düştüğü ($\Delta\sigma_v \leq 0.20\times \sigma'_v$) seviye esas alınarak (TS EN 1997-1:2004; DIN 4019) belirlenmiştir. Sayısal ağ, ilgili kılavuza (User Manuals PLAXIS 2D, 2025) uygun olarak 15 düğümlü 3465 üçgen eleman ve 28327 düğüm noktasıyla oluşturulmuştur. Mekanik sınır koşulları altta tam tutulu (fully fixed), yanlarda yatay tutulu (normally fixed); hidrolik koşullar ise üst/yanlarda açık (open), altta geçirimsiz (closed) ve başlangıçta hidrostatik (phreatic) tanımlanmıştır. İmalatlar kademeli inşaat (staged construction) yaklaşımıyla (başlangıç gerilmeleri, menfez inşası ve kısa sürede yapıldığı kabul edilen dolgu yapımı) sırasıyla modellenmiş; konsolidasyon analizi %90 konsolidasyon derecesine ulaşıldığında sonlandırılmıştır.

Analizlerde efektif dayanım parametreleri esas alınmıştır. Bunun temel nedeni, çalışmanın kısa dönem drenajsız davranıştan ziyade uzun dönem drenajlı koşullar altında gelişen konsolidasyon ve oturma davranışına odaklanmasıdır. Drenajsız kayma dayanımı kısa süreli yüklemelerin değerlendirilmesinde yararlı olmakla birlikte, zamana bağlı boşluk suyu basıncı sönümünü ve buna bağlı uzun dönem deformasyonları doğrudan temsil etmemektedir (Ozkul, 2014). Bu nedenle analizlerde zamana bağlı konsolidasyon aşaması tanımlanmıştır. Analizler sonucunda, yapının boyuna ekseni boyunca farklı noktalardaki yük-deformasyon ilişkileri elde edilmiştir.

İdealize Zemin Parametreleri

Çalışma alanı, ilgili şekilde gösterilen temsili bir araştırma sondaj kuyusu (S) ile temsil edilmiştir. Analizlerde esas alınan idealize geoteknik parametreler literatürdeki temsili mühendislik değerleri dikkate alınarak oluşturulmuş (Waltham, 2002); rijitlik parametreleri ise Plaxis malzeme kılavuzu önerileri ve kabul görmüş ampirik korelasyonlar doğrultusunda tanımlanmıştır (User Manuals PLAXIS 2D, 2025). Killi zemin parametreleri Tablo 1'de, kiltaşı parametreleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Geoteknik analizlerde esas alınan killi zemin parametreleri

Tabaka Adı	SPT-N (bpf)	PI (%)	LL (%)	γ (kN/m^3)	E_{50}^{ref} (kPa)	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)	v_{ur} (-)	m (-)	p_{ref} (kN/m^2)	c' (kPa)	Φ' (º)	R_f (-)	k_v=k_h (m/s)	K_0 (-)
Katı Kil	16	20	30	18.5	7040	7040	21120	0.2	1	100	6	29	0.9	1.00E-08	0.52
Çakıllı Sert Kil	R	28	47	20.0	46000	46000	138000	0.2	0.8	100	23	28	0.9	2.22E-11	0.53

Burada verilen zemin parametreleri PLAXIS analizlerinde ve analitik hesaplarda girdi olarak kullanılmıştır.

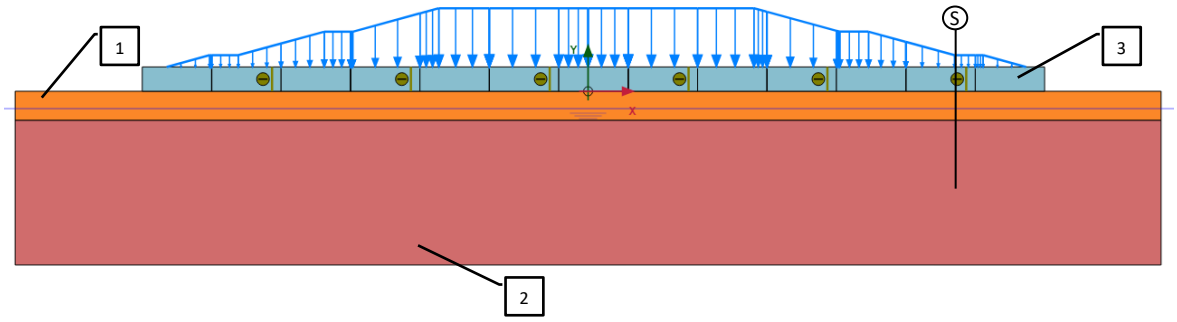
Tablo 2. Geoteknik analizlerde esas alınan kiltaşı parametreleri

Tabaka Adı	γ (kN/m^3)	E' (kPa)	c' (kPa)	Φ' (º)	k_v=k_h (m/s)
Kiltaşı	20	175000	125	17	1.00E-09

Burada verilen parametreler PLAXIS analizlerinde girdi olarak kullanılmıştır.

Zemin Profili-1 (Üniform Zemin Koşulu)

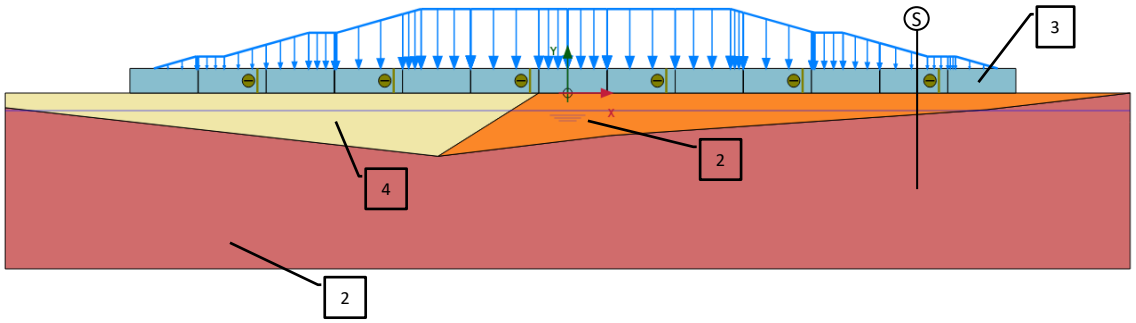
Birinci profil, hat boyunca üniform ve oldukça elverişli bir tabakalanmayı temsil etmektedir. Bu profilde yüzeyden itibaren 5 m kalınlığında çakıllı sert kil tabakası ve bu tabakanın altında kiltaşı birimi yer almaktadır. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 1 m derinlikte tanımlanmıştır. Bu kurgu, saha uygulamalarında sıklıkla yapılan tipik bir mühendislik yaklaşımını simüle etmektedir. Şöyle ki; hat boyunca sınırlı sayıda açılan tek bir sondaj verisinin, yapının tamamı altında geçerli olduğu varsayılmakta ve tüm boyuna hat bu üniform kabule göre tasarlanmaktadır. Aşağıdaki şekillerde belirtilen numaralar küçükten büyüğe sırasıyla; çakıllı sert kil, kiltaşı, menfez ve katı kil şeklindedir.



Şekil 2. Zemin Profili-1'in Plaxis ekran görüntüsü

Zemin Profili-2 (Değişken Zemin Koşulu)

Bu zemin profili gerçekte sıklıkla karşılaşılabilen geoteknik heterojenliği temsil etmektedir. Bu senaryoda zemin tabakalanması, yapının orta eksenine doğru çakıllı sert kil tabakasından, sıkışabilirliği yüksek ve oturmaya meyilli katı kil tabakasına geçiş yapmaktadır. Bu profilde kil tabakalarının kalınlığı 0 m'den 10 m'ye tedrici olarak değişmektedir.

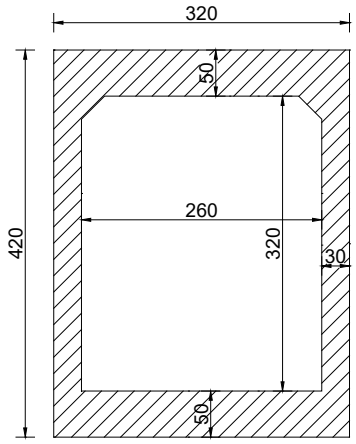


Şekil 3. Zemin Profili-2'nin Plaxis ekran görüntüsü

Yapı ve Yük Bilgisi

Betonarme olan menfez yapısının beton sınıfı C30/37'dir. Birim genişlik esas alınarak gerçekleştirilen 2D Plaxis analizlerinde; yapının ataleti ve en kesit alanı, iç boşluklu yapı geometrisi dikkate alınarak tanımlanmıştır. Yapı toplam 13 anodan oluşmakta olup her bir anonun uzunluğu 12.1 m'dir. Her iki anoda bir genleşme derzi düzenlenmiş; diğer ano birleşimleri ise inşaat derzi olarak tasarlanmıştır. Donatılı betonun birim hacim ağırlığı 25 kN/m^3 kabul edilmiştir.

Yapı üzerinde yer alan otoyol dolgusu çift palyeli olup maksimum dolgu yüksekliği 25 m'dir. Şevler 3Y:2D eğimle modellenmiş, her 10 m yükseklikte bir 5 m genişliğinde palye teşkil edilmiştir. Dolgu birim hacim ağırlığı 20 kN/m^3 kabul edilmiş ve Plaxis analizlerinde çizgisel dış yük olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Menfez tip enkesiti (ölçüler cm'dir)

2.2 Yapısal Modelleme

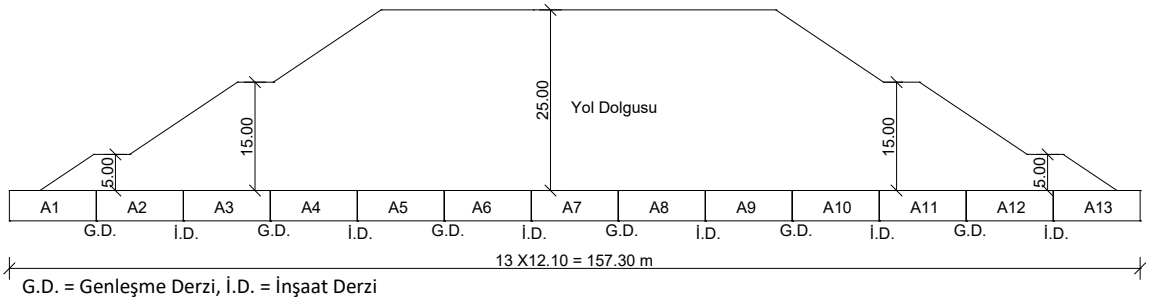
Yapısal analizler, SAP2000 yazılımı kullanılarak üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar metoduyla gerçekleştirilmiştir. Yapının geometrik tanımı, malzeme özellikleri ve kesit boyutları birebir dikkate alınarak kabuk (shell) elemanlar ile modellenmiştir. Yapı tabanındaki zemin davranışı, Plaxis analizlerinden elde edilen verilere paralel olarak sadece basınca çalışan elastik yatak katsayıları ile temsil edilmiştir. Yapı üzerindeki değişken dolgu yükseklikleri, kesit boyunca değişkenlik gösteren alan yükleri olarak yapısal modele etkitilmiştir. Dolgu yüklerinin ve yapısal öz ağırlığın doğrudan oluşturduğu etkileri net bir şekilde gözlemleyebilmek adına analizlerde nominal (arttırılmamış) yük değerleri kullanılmış, yük kombinasyon katsayıları dikkate alınmamıştır. Yapı yan duvarları ile etrafındaki dolgu malzemesi arasında oluşabilecek çevre sürtünmesi etkileri ihmal edilmiştir. Yapısal modeller, Plaxis geoteknik analizlerinde tanımlanan iki farklı zemin senaryosu (Üniform Zemin ve Değişken Zemin) ile tam uyumlu olacak şekilde iki ayrı durum için yürütülmüştür. Yapı toplam 13 ano olarak düzenlenmiştir ve her bir anonun uzunluğu 12.10 m'dir. Her iki anoda bir genleşme derzi teşkil edilmiştir.

Malzeme Bilgisi

C30/37 sınıfı beton için 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı f_{ck} = 30 MPa ve elatisite modülü E_c = 32000 MPa kabul edilmiştir (TS500, 2000). Donatı için kabul edilen karakteristik akma dayanımı f_{yk} = 420 MPa kabul edilmiştir.

Zemin Yatak Katsayıları

Üniform zemin durumu için yatak katsayısı değeri yapı boyunca değişken olmakla beraber 22800 ile 67200 kN/m^3 aralığında değişmektedir. Değişken zemin durumunda ise belirtilen değer 1850 ile 41250 kN/m^3 aralığındadır. Detaylı değerlendirmelere ilerleyen bölümlerde yer verilecektir.



Şekil 5. Menfez profili ve derz konumları

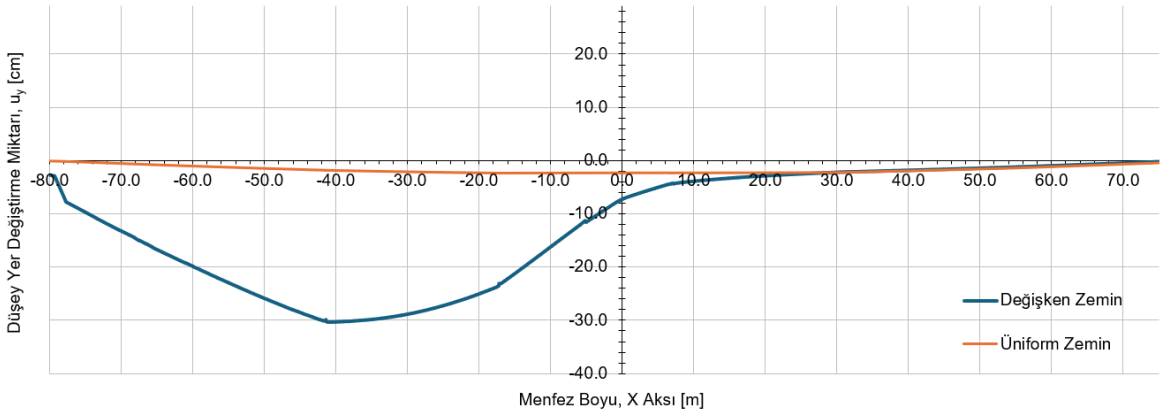
3. ANALİZ BULGULARI

Bu bölümde, iki farklı zemin profili (Zemin Profili-1 ve Zemin Profili-2) altında gerçekleştirilen Plaxis 2D konsolidasyon analizleri ile SAP2000 3B sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.1 Plaxis Oturma Analizi Sonuçları ve Yatak Katsayısı Dağılımları

Zemin Profili-1 (Üniform) altında yapılan analizlerde, yapı boyunca dolgu yüksekliğinin değiştiği bölgelerde dahi oturma farklarının sınırlı kaldığı ve toplam oturmanın ~2.50 cm mertebesinde gerçekleştiği görülmüştür. Yatak katsayıları hat boyunca 22800 - 67200 kN/m^3 aralığında nispeten yüksek ve dengeli bir dağılım göstermiştir.

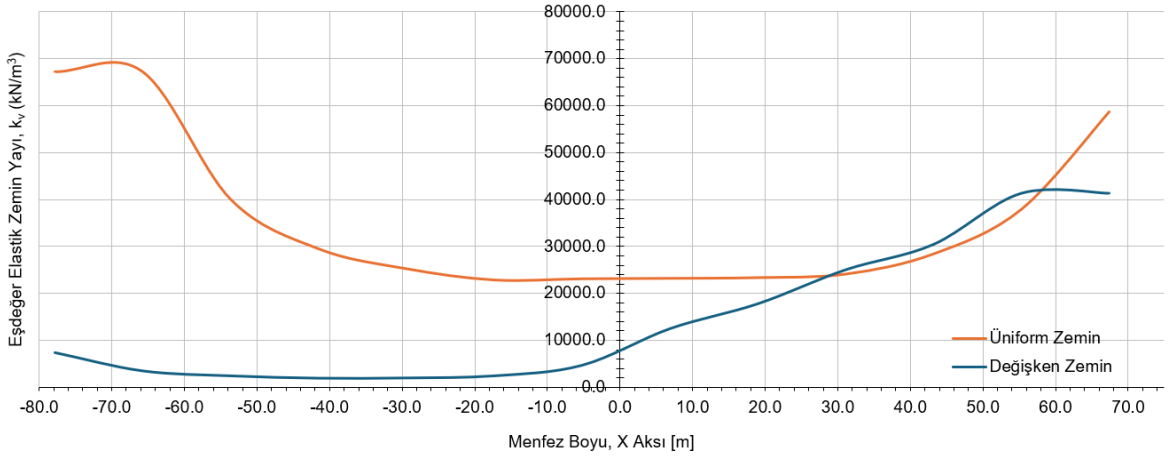
Zemin Profili-2 (Değişken) altında ise, katı kilden çakıllı sert kile geçiş bölgesinde belirgin bir oturma gradyanı oluşmuştur. Sıkışabilir killi tabaka kalınlığının arttığı orta eksende maksimum oturma miktarı ~30.10 cm değerine ulaşırken, komşu anolar arasında ciddi bağıl oturma farkı ($\Delta\delta \approx 11.70$ cm) meydana gelmiştir. Bu durum, hat boyunca şiddetli bir rijitlik süreksizliğine yol açmıştır.



Şekil 6. Menfez uzunluğu boyunca konsolidasyon oturması profili

Plaxis 2D ile yapılan zamana bağlı konsolidasyon analizleri, 157.30 m toplam uzunluğa sahip ve 13 anodan (A1-A13) oluşan menfez yapısının boyuna ekseni boyunca belirgin bir deformasyon farkı ortaya koymuştur. Toplam 25 m maksimum dolgu yüksekliği altında, Üniform Zemin durumunda oturma profili hat boyunca oldukça benzer olarak ~2.50 cm mertebesinde sınırlanırken; Değişken Zemin senaryosunda zemin sertliğinin düştüğü A3-A5 anoları bölgesinde (X = -41.0 m civarı) maksimum düşey yer değiştirme (u_y) ~30.10 cm

değerine ulaşmıştır. Bu durum, yapının diğer ucunda oturmanın birkaç santimetrede kalmasıyla birlikte boyuna hatta yaklaşık ~28.0 cm mertebesinde kritik bir farklı oturma profili oluşturmuştur. Oturma eğrisinin gösterdiği bu ani eğim değişimi, özellikle geçiş zonundaki anolar arasında yer alan genleşme derzleri (G.D.) ile inşaat derzleri (İ.D.) üzerinde doğrudan bir makaslama ve dönme zorlanması yaratmaktadır. Bağıl oturma farklarının yüksek seviyeye çıktığı bölgelerdeki genleşme derzleri, bu bağıl ötelemeleri karşılayabilmek adına eksenel ve açısal açılmalara zorlanmakta; bu da 2B analizlerde öngörülemeyen bağıl deformasyonların, yüksek iç kuvvetlerin ve derz sızdırmazlık risklerinin doğrudan sebebi haline gelmektedir.



Şekil 7. Menfez uzunluğu boyunca eşdeğer elastik zemin yayı

Plaxis 2D non-lineer konsolidasyon analizlerinden elde edilen verilerin SAP2000 3B yapısal modeline doğru aktarılması amacıyla, Winkler (1867) hipotezi esas alınmıştır. Bu doğrultuda, yapı tabanı boyunca her bir metrede elde edilen düşey gerilme (σ_v) ve düşey yer değiştirme (u_y) değerleri kullanılarak eşdeğer elastik düşey zemin yatak katsayısı $k_v(x) = \sigma_v(x) / u_y(x)$ [kN/m³] bağıntısıyla hesaplanmıştır. Bu oranlar üzerinden türetilen eşdeğer elastik düşey zemin yatak katsayısı (k_v) dağılımları Şekil 7'de sunulmuştur. Bu metodolojinin temel amacı; geoteknik analiz yazılımı (Plaxis) ile yapısal analiz yazılımı (SAP2000) arasındaki taban deformasyon profilini eşdeğer kılmak ve zemin-yapı etkileşimini tutarlı bir şekilde yapısal modele yansıtmaktır.

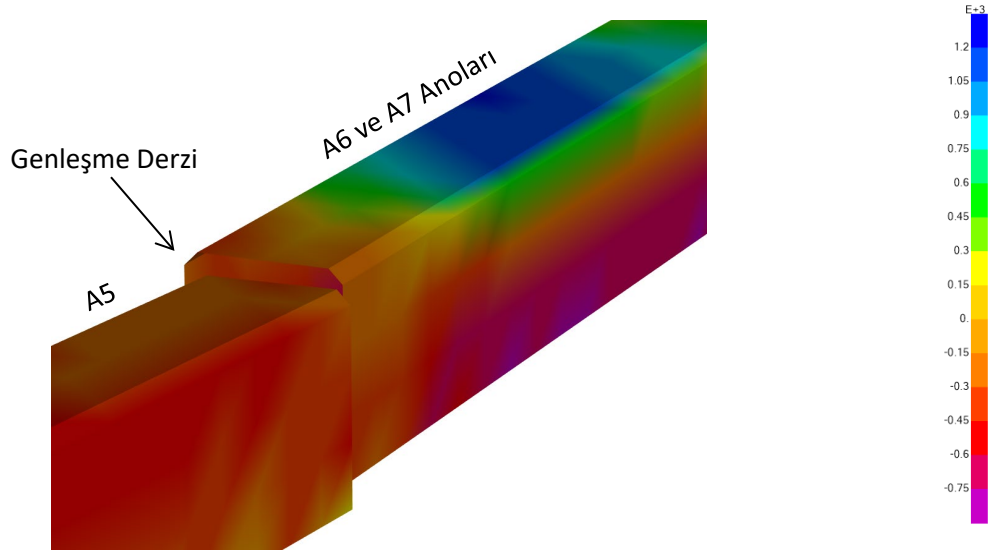
3.2 SAP2000 Yapısal Modeli ve Analiz Sonuçları

Üniform Zemin ve Değişken Zemin senaryoları esas alınarak hazırlanan iki ayrı SAP2000 3B kabuk (shell) modelinden elde edilen yapısal iç kuvvetler, gerilme yığılmaları ve deformasyon davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Aralarında 3.0 cm genleşme derzi bulunan menfez anolarında yapısal süreklilik bulunmamaktadır. Genleşme derzinde yer alan plastik su tutucular ise oldukça esnek olup harekete izin vermek üzere tasarlanmıştır. Bu sebeplerle SAP2000 ortamında genleşme derzleri doğrusal olmayan boşluk bağlantı elemanları (gap elements) ile temsil edilmiştir. Bu elemanlar 3 cm'lik kapanma hareketinden sonra rijit davranışa geçecek ve basınç kuvvetlerini aktaracak şekilde modellenmiştir. Anoların birbirine temas ettikten sonra arayüzde açığa çıkacak sürtünme kuvveti ise ihmal edilmiştir.

Homojen ve elverişli zemin koşullarında gerçekleştirilen analizlerde, ardışık anolar arasında oluşan bağıl oturma farkları ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır. Buna bağlı olarak, genleşme

derzi (G.D.) bölgelerinde herhangi bir yapısal zorlanma, kot farkı veya sızdırmazlık riski gözlemlenmemiştir.

Sağlam zeminden sıkışabilir zayıf zemine geçiş bölgesinde yer alan anolar arasında, geoteknik analizlerle uyumlu olarak artan farklı oturmalar neticesinde belirgin kot farkları oluşmuştur. Genleşme derzlerinde meydana gelen bu bağıl düşey ötelemeler, çalışmanın **GİRİŞ** bölümünde sunulan saha uygulamalarındaki derz hasarı görseli ve saha gözlemleriyle niteliksel olarak benzer bir deformasyon mekanizması sergilemektedir (**Şekil 1** ve **Şekil 8**).

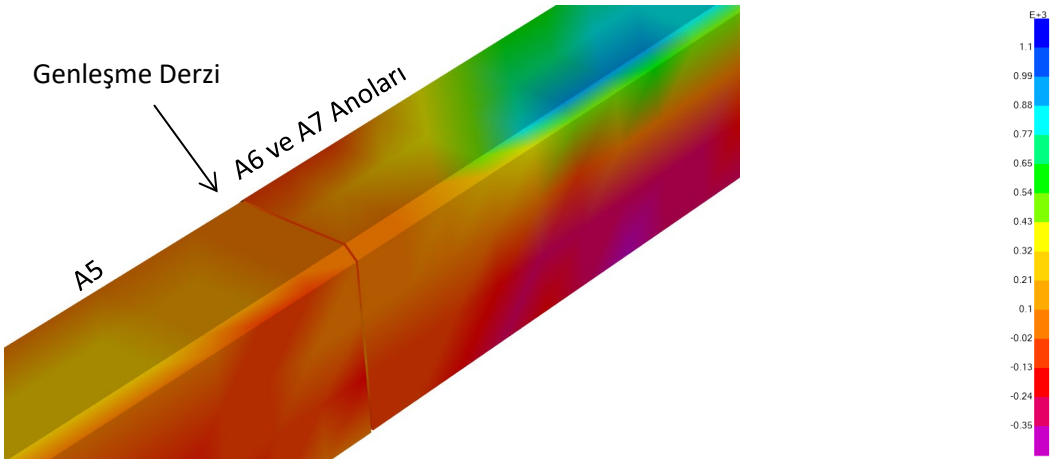


Şekil 8. Değişken Zemin / (A5-A6) arası genleşme derzi deformasyonu ile A6 ve A7 anolarının üst tabliyesinde açığa çıkan menfez boyuna yön F11 çekme kuvvetleri (kN/m)

Değişken zemin koşulunda, menfezin üst döşemesinde boyuna eksene paralel yönde yüksek çekme kuvvetleri (F11) açığa çıkmıştır. Bu tip ve ölçekteki sanat yapılarının geleneksel tasarımlarında boyuna doğrultuda tipik olarak Φ12/200 dağıtma donatısı kullanılmaktadır. 1 adet Φ12 inşaat demirinin enkesit alanı $A_{donatı}$ = 113 mm^2'dir. Kesit bazında bir metre genişlik için (alt ve üst yüzey toplamı) 10 adet Φ12 dağıtma donatısı yer almakta olup bu donatıların toplam enkesit alanı $\Sigma A_{donatı}$ = 1130 mm^2'dir. Bu donatıların karakteristik akma kapasitesi yaklaşık Fy = 1130 x 420 = 474600 N/m (~ 475 kN/m) mertebesindedir. Ancak 3B sonlu elemanlar modelinde okunan nominal boyuna çekme kuvveti 1080 kN/m seviyesine ulaşmıştır. Yük ve malzeme güvenlik katsayıları ihmal edilip doğrudan nominal değerler üzerinden kıyaslama yapıldığında dahi, mevcut dağıtma donatısı kapasitesinin lokal olarak 2.27 kat aşıldığı görülmektedir. Bu durum, kesitte çatlak gelişiminin kaçınılmaz olduğunu, yapının hem taşıma gücü hem de uzun vadeli durabilite (servis ömrü) açısından ciddi risk altına girebileceğini göstermektedir.

Anolar arasındaki yüksek bağıl oturmaları karşılayamayan genleşme derzlerinde, sızdırmazlığı sağlayan su tutucu bantların yırtılacağı ve işlevini kaybedeceği değerlendirilmiştir. Sızdırmazlığın kaybolması, betonarme kesite su sızıntılarına ve korozyon süreçlerinin hızlanmasına yol açacaktır. Bununla beraber anolar arasında zamanla açığa çıkan kot farkı, hidrolik menfezlerde su akışına altgeçitlerde ise trafik akışına zarar verecektir.

Üniform ve görece sağlam zemin üzerine oturan modelde, ardışık anolar arasındaki bağıl oturma farkları ihmal edilebilir düzeyde kaldığından genleşme derzi bölgelerinde hasar oluşturacak seviyede bir deplasman gözlemlenmemiştir. Ancak, Plaxis analizlerinden elde edilen oturma profili ve 25 m'ye ulaşan yüksek dolgu yükü dağılımı ile ilişkili olarak, yapının bazı kritik kesitlerinde beklenenin üzerinde (F11) çekme kuvveti artışları tespit edilmiştir. Her ne kadar bu kuvvetler Değişken Zemin senaryosundaki kadar aşırı seviyelere ulaşmasa da kayda değer bir mertebededir. Bu bulgu; zemin homojen görünse dahi, yüksek dolgu yükü altındaki uzun menfez ve altgeçit yapılarının her zaman boyuna doğrultuda detaylı bir kontrol gerektirdiğini açıkça göstermektedir.



Şekil 9. Üniform Zemin / (A5-A6) arası genleşme derzi deformasyonu ile A6 ve A7 anolarının üst tabliyesinde açığa çıkan menfez boyuna yön F_{11} çekme kuvvetleri (kN/m)

Kritik F_{11} değerleri aşağıda tablo halinde de sunulmuştur.

Tablo 3. Üst döşemeye esas kabuk elemanı maksimum F11 değerleri

Model Adı	F_{11} (kN/m)
Değişken Zemin SAP2000	1080
Üniform Zemin SAP2000	890

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, zayıf ve heterojen zeminler üzerinde inşa edilen kutu menfez ve altgeçit yapılarının konsolidasyon kaynaklı boyuna davranışı, iki aşamalı ileri sonlu elemanlar yöntemi (Plaxis 2D ve SAP2000 3B) kullanılarak incelenmiştir. Geleneksel iki boyutlu (2B) enkesit tasarım kabulleri ile üç boyutlu (3B) bütüncül zemin-yapı etkileşimli analiz sonuçları karşılaştırılmış ve aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Tipik tasarım pratiğinde sıklıkla uygulanan 2B enkesit analizleri, yapı boyunca oluşan farklı oturmaları, eksenel çekme gerilmelerini ve derzlerdeki bağıl deformasyonları hesaplamakta yetersiz kalmaktadır. Tek sondaj verisine dayanılarak yapılan (bkz. **Şekil 2** ve **Şekil 3**) homojen zemin kabulü, hat boyunca değişen zemin koşullarında ciddi tasarım riskleri doğurmaktadır. Bu nedenle saha araştırmaları, zemin geçişleri ve sıkışabilir tabaka derinliklerini dikkate alacak şekilde planlanmalı; özellikle uzun yapılarda boyuna doğrultudaki idealize zemin profili yeterli doğrulukla tanımlanmalıdır.

- Değişken zemin koşullarında (Zemin Profili-2), katı kilden çakıllı sert kile geçiş bölgesinde hat boyunca yaklaşık ~28.0 cm farklı oturma tespit edilmiştir. Bu durum, ardışık anolar arasında belirgin kot farklarına yol açmış; saha gözlemlerindeki derz hasarları ile birebir örtüşen bağıl ötelenmelere neden olmuştur. Oluşan bu deformasyonlar, genleşme derzlerindeki su tutucu bantların yırtılmasına ve durabilite kaybına sebebiyet vermektedir.

- Yüksek dolgu altındaki farklı oturmalar, menfezin üst döşemesinde 1080 kN/m mertebesinde nominal eksenel çekme kuvveti yaratmıştır. Tip projelerde standart olarak kullanılan Φ12/200 dağıtma donatısının toplam akma kapasitesi (475 kN/m) bu talebi karşılayamamaktadır. Nominal yükler altında dahi donatı kapasitesinin aşılması, kesitte kontrolsüz çatlak gelişimi ve taşıma gücü kaybı anlamına gelmektedir.

- Homojen ve sağlam zemin koşullarında dahi (Zemin Profili-1), 25.0 m'ye ulaşan yüksek dolgu yükü dağılımı nedeniyle boyuna eksende kayda değer kuvvet artışları gözlemlenmiştir. Bu durum, uzun yapılarda zemin elverişli görünse bile boyuna doğrultuda kontrol yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

- Boyuna donatı miktarı yalnızca rötre ve yapım aşaması kısıtlarına göre değil, muhtemel farklı oturma senaryolarından türetilen eksenel çekme kuvvetleri dikkate alınarak boyutlandırılmalıdır.

- Genleşme derzi aralıkları ve detayları, geoteknik analizlerden elde edilen bağıl dönme ve oturma miktarlarını tolere edecek esneklikte tasarlanmalıdır.

KAYNAKLAR

AASHTO (2024), “LRFD Bridge Design Specifications (10th Edition) and Materials Standards (HM-44) (44th Edition)”, American Association of State Highway and Transportation Officials.

Berilgen, M.M. (2014), “Geoteknikte Sayısal Analizler - Yöntemler, Esaslar ve Sınırlamalar”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi, 16-17 Ekim 2014, ODTÜ, Ankara.

DIN 4019 (2014), “Baugrund - Setzungsberechnungen (Subsoil - Calculation of Settlements)”, Deutsches Institut für Normung.

Gourvenec, S.M., Vulpe, C. and Murthy, T.G. (2014), “A method for predicting the consolidated undrained bearing capacity of shallow foundations”, Géotechnique, 64, No. 3, 215–225.

Mar, A. (2002), “How To - Undertake Finite Element Based Geotechnical Analysis”, NAFEMS Ltd.

Ozkul, Z.H. (2014), “Offshore mudmats: Sensitivity of deflections to selected soil model”, Numerical Methods in Geotechnical Engineering - Proceedings of the 8th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, NUMGE 2014, Volume 2, 1283-1288.

Plaxis (2025), “User Manuals Plaxis 2D”, Bentley Systems / Seequent.

TS EN 1997-1 (2004), “Geoteknik Tasarım - Bölüm 1: Genel Kurallar”, Türk Standardları Enstitüsü.

Waltham, T. (2002), “Foundations of Engineering Geology”, 2nd ed., Spon Press.

Winkler, E. (1867), Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit (Esneklik ve Mukavemet Teorisi), H. Dominicus, Prag.