



---

**Makale / Research Paper**

---

**Derin Kazı Analizlerinde Küçük Şekil Değişirme Rijitliğinin Etkisi**

**A. Arda BAHADIR\*, M. İnanç ONUR\*\***

\*Sağlık Bakanlığı, 06824 ANKARA/TÜRKİYE

\*\*Anadolu Üniversitesi, 26555 ESKİŞEHİR/TÜRKİYE

[arda527@hotmail.com](mailto:arda527@hotmail.com) [mionur@anadolu.edu.tr](mailto:mionur@anadolu.edu.tr)

**Received/Geliş:** 10.12.2017

**Revised/Düzeltilme:** 19.12.2017

**Accepted/Kabul:** 26.12.2017

**Özet:** Zemin-yapı etkileşiminde derin kazı destek sistemlerinin davranışı son yıllarda pek çok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Ancak zeminin küçük şekil değiştirme rijitliğini dikkate alan çalışmalar çok fazla bulunmamaktadır. Bu durumun sebebi olarak bu etkiyi değerlendiren sonlu elemanlar programlarının yeterli sayıda bulunmayışı söylenebilir. Bu çalışma kapsamında geoteknik problemlerin çözümünde sıkça kullanılan bir sonlu elemanlar programı olan Plaxis yazılımı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Programın kütüphanesinde birçok zemin modeli bulunmaktadır. Bunlar arasında sıkça kullanılan Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model) ve bu modelin küçük şekil değiştirme rijitliği etkilerini dikkate alan Pekleşen Zemin Küçük Birim Deformasyon Modeli (Hardening Soil Small Strain Model) bu çalışmada kullanılmıştır. Bu modeller ile üç adet vakanın analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları inklinometre ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda model analiz sonuçları ile yerinde alınan ölçümler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. HS\_ss modelin HS modele göre saha ölçümlerine daha yakın olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Derin Kazılar, Pekleşen Zemin Modeli, Pekleşen Zemin Küçük Birim Deformasyon Modeli

---

**The Effect of Small Strain Stiffness in Deep Excavation Analyzes**

**Abstract:** The behavior of deep excavation support systems at soil-structure interaction has been studied by many researchers in recent years. However, studies that considering the rigidity of the small strain of the soil are not very common. For this situation, it can be said that there is not enough number of finite element programs evaluating this effect. Within the scope of this study, analyzes were performed by Plaxis software, is a finite element program, is frequently used to solve geotechnical problems. There are many soil models in the library of the program. Among these, Hardening Soil Model (HS), which is frequently used, and Hardening Soil Small Strain Model (HS\_ss), which takes into account the effects of small strain stiffness of this model, were used in this study. Three cases were analyzed with these models. The analysis results were compared with the inlinometer measurements. As a result of the study, model analysis results and in situ measurements are presented comparatively. The HS\_ss model was found to be closer to the field measurements than the HS model.

**Keywords:** Deep Excavation, Hardening Soil Model, Hardening Soil Small Strain Model.

---

**1. Giriş**

Derin kazı destek sistemlerinin nümerik analizler ile çözümü günümüzde plastisite teorisine dayalı çeşitli ileri zemin modelleri ile yapılmaktadır. Ancak bu modeller içerisinde küçük şekil değiştirme rijitliğini dikkate alan modeller oldukça azdır. Buna rağmen literatürde bazı çalışmalar bulmak mümkündür.

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Bahadır, A.A., Onur, M.İ. "Derin Kazı Analizlerinde Küçük Şekil Değişirme Rijitliğinin Etkisi" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2018, 5(1); 96-106.

*How to cite this article*

Bahadır, A.A., Onur, M.İ. "The Effect of Small Strain Stiffness in Deep Excavation Analyzes" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2018, 5(1); 96-106.

Lim ve diğ. [1] tarafından model çalışmalarında sıkça kullanılan Modified Cam Clay (MCC), Hardening Soil (HS), The Hardening Soil Small Strain (HS\_ss) ve The Undrained Soft Clay (USC) zemin modelleri saha uygulaması üzerinde karşılaştırılmıştır. Sahada ölçülen deplasman ve oturma değerleri ile model analiz değerleri karşılaştırılarak zemin modellerinden hangisinin gerçek davranışa daha yakın olduğu ortaya konulmuştur. Zhang ve diğ. [2] yumuşak zeminlerde inşa edilen destek sistemlerinin davranış tahmininde zemin modelleri ilişkisini araştırmışlardır. Bu amaçla HS\_ss modeli kullanılmış ancak, kazı geometrisi, zemin mukavemeti, rijitlik özellikleri ve duvar rijitliği gibi parametrelerin davranışı etkilediği tespit edilmiştir. Hsiung ve Sakai [3] kalın kum tabakalarından oluşan zemin profili içerisinde inşa edilen kazı destek sisteminin arazi ölçümleri ile bilgisayar modelini karşılaştırmışlardır. Gerçek arazi değerleri ile HS, HS\_ss ve MC modelleri ile yapılan model sonuçları ilişkilendirilmiştir.

Mu ve diğ. [4] kil zeminde inşa edilen derin kazı destek sistemini HS\_ss modeli kullanarak analiz etmişlerdir. Duvarının deplasman değerlerinin tahmini için ampirik yöntemler geliştirilmiş, sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır. Likitlersuang ve diğ. [5] killi zemin içerisinde yapılacak kazı için gerilme davranışı ve kayma modülünün belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile HS\_ss kullanılarak yapılan zemin modelini incelemişlerdir. Castaldo ve De Iulius [6] derin kazıların sismik etki altındaki davranışını araştırmışlardır. Zeminin sismik etkilere karşı davranışı HS ve MC modelleri kullanılarak gerçek bir uygulama üzerinde belirlenmeye çalışılmıştır. Lim ve Ou [7] tarafından bir derin kazı uygulamasında MC, HS, HS\_ss zemin modelleri ile drenajsız zemin davranışı araştırılmıştır. Gerçek oturma ve deplasman değerleriyle model sonuçları karşılaştırılarak davranışta zemin modellerinin etkisi ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada derin kazıların davranışını belirlemek amacıyla Plaxis programı kullanılarak Hardening Soil (HS) ve Hardening Soil Small Strain (HS\_ss) zemin modelleri ile analiz çalışması yapılarak, sonuçlar üç adet uygulamanın yerinde yapılan ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Zemin Modelleri

Literatürde nümerik analizler için birçok zemin modeli verilmesine rağmen pratikte en çok kullanım alanı bulan Hardening Soil (HS) model ve son yıllarda popüleritesi artan, zeminin küçük şekil değiştirme rijitliğini dikkate alan Hardening Soil Small Strain (HS\_ss) modeli bu çalışmanın kapsamına alınmıştır.

### 2.1. Hardening Soil Model

Hardening soil (pekleşen zemin) modeli plastisite teorisi bazlı olarak geliştirilmiş bir zemin modelidir [8]. Bu model Duncan-Chang, [9] hiperbolik modelin gelişmiş bir versiyonudur ve hiperbolik modelden farklı olarak elastik teori yerine plastik teoriyi kullanır. Plastik şekil değiştirmeler Koiter kuralına göre çoklu yüzey (multi surface) akış kriteri ile hesaplanmaktadır. HS Model gerilmeye bağlı rijitlik değerlerini dikkate almaktadır. HS Modelde Mohr-Coulomb parametrelerine ilave olarak, drenajlı üç eksenli deneylerle elde edilen sekant rijitliği  $E_{50}^{ref}$ , drenajlı odömetre deneyleriyle elde edilen tanjant rijitliği  $E_{oed}^{ref}$  ve elastik yükleme/boşaltma rijitliği  $E_{ur}^{ref}$  kullanılmaktadır. Bu üç farklı rijitlik parametresi kullanmasından dolayı zemin gerçek davranışa daha yakın modellenmektedir.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{c \cos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad (1)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{c \cos\phi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin\phi}{c \cos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad (2)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{c \cos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad (3)$$

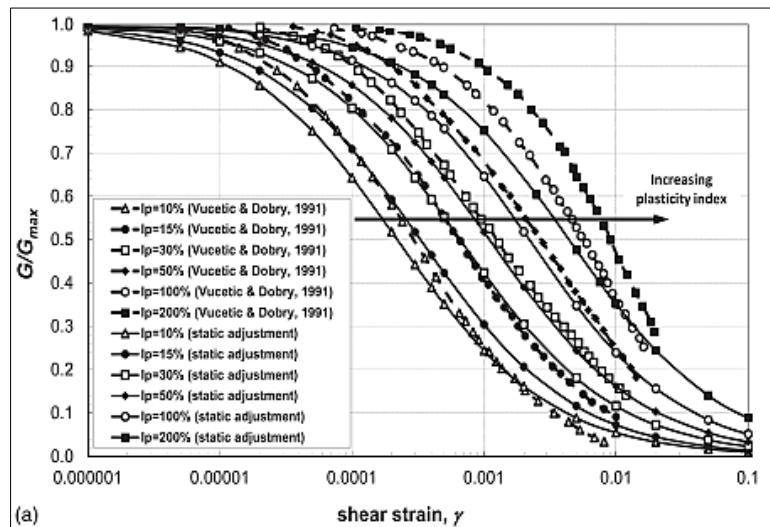
Bu denklemlerde  $m$  gerilmeye (yüklemeye seviyesi) üs değeridir, genellikle kum ve siltler için 0.5~1 yumuşak zeminler için ise 1 alınmaktadır. Janbu [10] bu değerleri Norveç kumu ve silt için 0.5 hesaplarken Kempfert [11], yumuşak killer için 0.38~0.84 olarak hesaplamıştır. Denklemlerde;  $p^{ref}$  referans gerilme ( $p^{ref} = 100$  kPa) ve  $K_0^{nc}$  Normal konsolidasyon katsayısı olmak üzere Jaky [12] formülüne göre ( $K_0^{nc} = 1 - \sin\phi$ ) şeklinde hesaplanmaktadır. Ancak çok aşırı konsolide killerin davranışının karmaşık olduğu ve davranışı etkileyen birçok faktör bulunduğu unutulmamalıdır [13].

## 2.2. Hardening Soil Small Strain Model

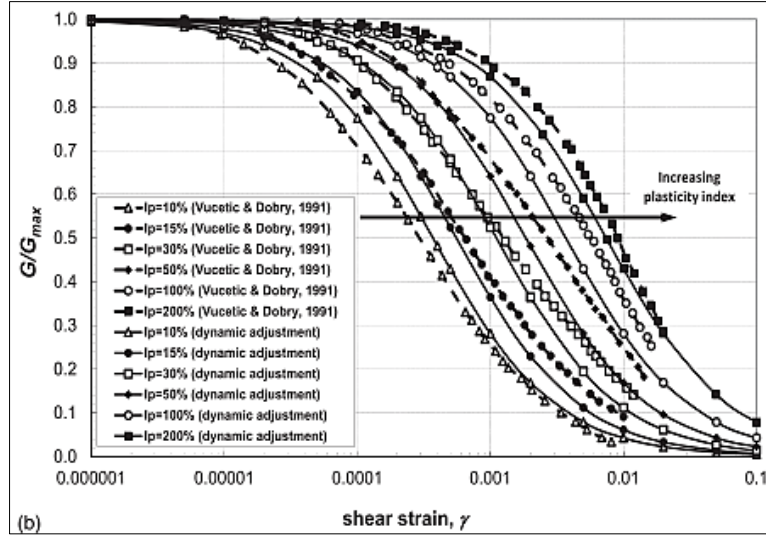
Bu model Hardening Soil model için belirlenen tüm parametrelere ilave olarak küçük birim deformasyon rijitliğinde zeminin artan rijitliğini de dikkate almaktadır [14]. HS\_ss modelde başlangıç birim deformasyon geçmişi modülü, küçük birim deformasyon kayma modülü  $G_0^{ref}$  ve kayma modülünün küçük deformasyon kayma modülüne göre %70 azalması durumundaki birim deformasyon seviyesi olarak  $\gamma_{0.7}$  hesaplanır.

$$\gamma_{0.7} \approx \frac{1}{9G_0} [2c'(1 + \cos 2\phi') - \sigma'_1(1 + K_0) \sin 2\phi'] \quad (4)$$

Yukarıda verilen denklem 4 ile yaklaşık olarak hesaplanabileceği gibi [15]  $\gamma_{0.7}$  değerinin kumlar için  $1.10^{-4}$ – $2.10^{-4}$  killer için  $5.10^{-5}$ – $1.10^{-4}$  aralığında olduğu Zimmermann ve diğ. [16] tarafından ortaya konulmuştur. Yamashita ve diğ. [17] ise kum, kil ve yumuşak kaya gibi çeşitli zeminler üzerinde yaptıkları üç eksenli ve çevrimli testlerde bu değerleri  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  aralığında hesaplamışlardır. Dong ve Ning [18] efektif gerilme  $\sigma'_1$  ve küçük şekil değiştirme kayma modülü  $G_0$  arasındaki ilişkileri grafiksel olarak göstermişlerdir. Vardanega ve diğ. [19] farklı plastisite seviyelerine ait  $G/G_{max} - \gamma$  tablolarını elde etmişlerdir ve bu veriler ışığında çeşitli ampirik yaklaşımlar geliştirmişlerdir.



(a)



(b)

Şekil 1. (a) Statik uygulamalar için azalım modülü-kayma şekil değiştirmesi ilişkisi [19].

(b) Dinamik uygulamalar için azalım modülü-kayma şekil değiştirmesi ilişkisi [19].

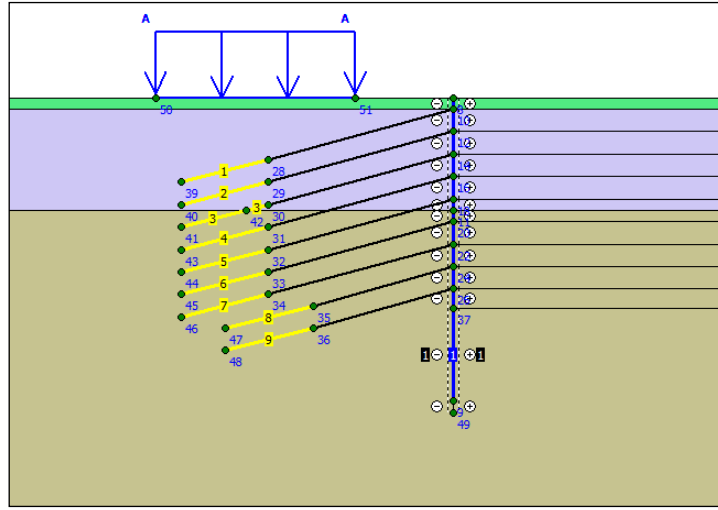
Bu model küçük deformasyon özelliği gösteren granüler dolgularda ve aşırı konsolide olmuş killerde kullanıldığında uygun sonuçlar vermektedir.

### 3. Model Çalışması

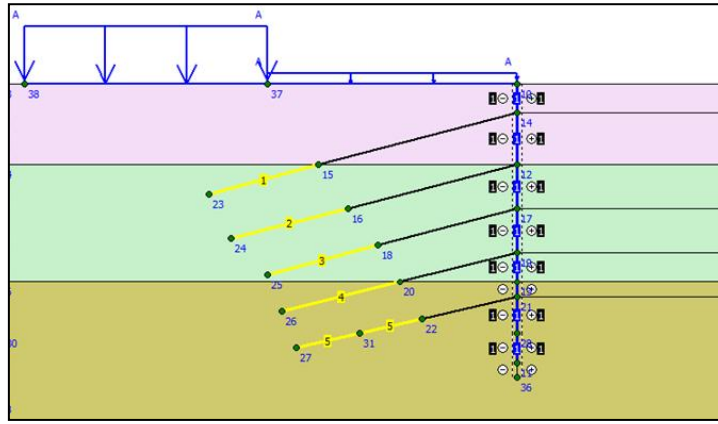
Model çalışması için otopark ve konut olarak kullanılmak üzere inşa edilmiş çok bodrumlu yapıların kazı destek sistemi projeleri seçilmiştir. Projelerde kazı bilgilerinin yanı sıra zemin incelemesi ve inklinometre ölçümleri bulunmaktadır. Bu çalışmada zeminlerin küçük şekil değiştirme rijitliği etkilerini incelemek amacıyla iksa sistemleri Hardening Soil ve Hardening Soil Small Strain modelleri ile analiz edilmiştir. Seçilen projeler Model-1, Model-2 ve Model-3 olarak adlandırılacaktır.

#### 3.1. İksa sistemi

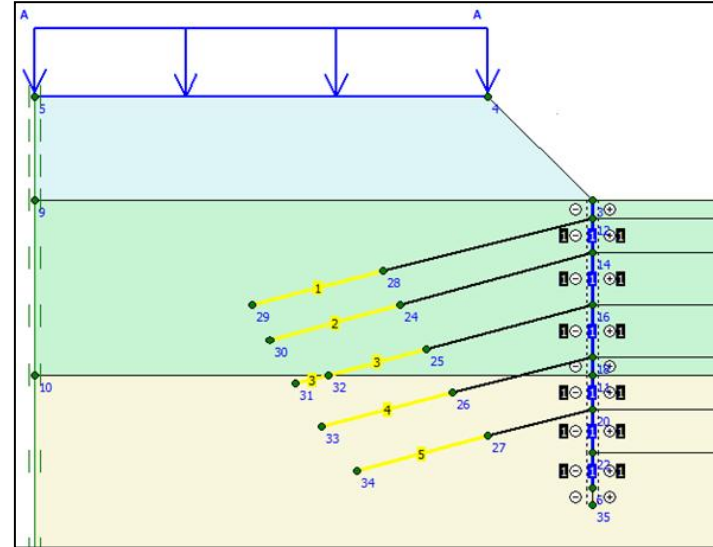
Model-1 İksa sistemi inşaatı için -37.00 kotundan -18.00 kotuna kadar, Model-2 için -50.00 kotundan -35.50 kotuna kadar, Model-3 için -52.50 kotundan -35.50 kotuna kadar kazı yapılmıştır. Bu amaçla her üç kazı için de  $\phi=65/80$  gibi değişen çaplarda fore kazık imalatları yapılmıştır. Bu kazıkları desteklemek amaçlı sırasıyla 9, 5 ve 5 sıra geçici ankraj sistemi teşkil edilmiştir. Bu ankrajların boyları BS8081 ankraj şartnamesine göre ampirik olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu ankrajlara 8m'lik bir kök bölgesi tanımlanmıştır. İdealize kesit üzerinde trafik ve mevcut yapı yükleri düşünülerek sırasıyla 20 kPa, 55 kPa-10 kPa, ve 10 kPa'lık bir sürşarj yükü etki ettirilmiştir. İksa sistemi idealize kesitleri Şekil 2' de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2. (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3 idealize zemin profili ve İksa sistemleri

### 3.2. Zemin durumu

Model- 1 için Zemin durumu, yüzeyden 1-1,5 metre boyunca çeşitli boyutlarda yapay dolgu tabakası, bu dolgunun alt kısmında yaklaşık 8-10 metre derinliğe kadar çok sert kil, marn birimleri ve daha derinlerde kıltaşı gözlemlenmiştir. Sondaj sırasında yapılan yeraltı suyu ölçümlerinde 2-4

metre derinlikleri aralığında değişen yeraltı suyuna rastlanmıştır. Zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerden zemin sınıfı; CL, likit limit; 45, plastik limit; 25, ve plastisite indisi; 20 şeklinde tespit edilmiştir. Model-2 için zemin durumu tüm katmanlarda farklı plastisite değerlerine sahip yaklaşık 17 metrelik kazı boyunca kil tabakaları gözlenmiş yeraltı suyuna rastlanmamıştır. Zemin sınıfı CL likit limit:25, plastik limit: 15 ve plastisite indisi: 10 olarak hesaplanmıştır. Model-3 için 14.50 metrelik kazının yaklaşık 10 metresi kil kalan kısım ayrılmış kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Statik bir su seviyesine rastlanmamıştır. Zemin sınıfı CL likit limit: 50, plastik limit: 25 ve plastisite indisi: 25 olarak hesaplanmıştır.

Modellere ait zemin parametreleri aşağıda Tablo 1, 2, 3, 4, 5 ve 6' da gösterilmiştir. Zemin index parametreleri zemin etüt raporundan alınmış ancak ileri zemin modelleri için gerekli rijitlik parametreleri yukarıda verilen 1, 2, 3 ve 4 nolu denklemler yardımı ile hesaplanmıştır. Kayma modülü parametreleri ise plastisite indisine dayalı olarak literatürde verilen grafiklerden elde edilmiştir.

Tablo 1. Model-1 HS Modeli Zemin Parametreleri

Zemin	Birim	Dolgu	Kil	Kiltaşı
$\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	19/21	18/19	22/22
$E_{50}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	1,5.10 <sup>4</sup>	3,0.10 <sup>4</sup>	1,1.10 <sup>5</sup>
$E_{oed}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	1,5.10 <sup>4</sup>	3,0.10 <sup>4</sup>	1,1.10 <sup>5</sup>
$E_{ur}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	4,5.10 <sup>4</sup>	9,0.10 <sup>4</sup>	3,3.10 <sup>5</sup>
$m$	[-]	0,5	0,5	0,5
$\nu/\nu_{ur}$	[-]	0,2	0,2	0,2
$c/c_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	1	10	24
$\phi$	[°]	30	28	25
$\psi$	[°]	0	0	0

Tablo 2. Model-1 HS\_ss Modeli Zemin Parametreleri

Zemin	Birim	Dolgu	Kil	Kiltaşı
$\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	19/21	18/19	22/22
$E_{50}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	1,5.10 <sup>4</sup>	3,0.10 <sup>4</sup>	1,1.10 <sup>5</sup>
$E_{oed}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	1,5.10 <sup>4</sup>	3,0.10 <sup>4</sup>	1,1.10 <sup>5</sup>
$E_{ur}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	4,5.10 <sup>4</sup>	9,0.10 <sup>4</sup>	3,3.10 <sup>5</sup>
$m$	[-]	0,5	0,5	0,5
$\nu/\nu_{ur}$	[-]	0,2	0,2	0,2
$c/c_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	1	10	24
$\phi$	[°]	30,0	28	25
$\psi$	[°]	0	0	0
$\gamma_{0,7}$	[-]	1.10 <sup>-4</sup>	1.10 <sup>-4</sup>	1,5.10 <sup>-5</sup>
$G_0^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	1,35.10 <sup>5</sup>	2,7.10 <sup>5</sup>	9,9.10 <sup>5</sup>

Tablo 3. Model-2 HS Modeli Zemin Parametreleri

Zemin	Birim	Dolgu	Kil	Kiltaşı
$\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	19/20	19/20	20/22
$E_{50}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	2.10 <sup>4</sup>	5,3.10 <sup>4</sup>	7,5.10 <sup>4</sup>
$E_{oed}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	2.10 <sup>4</sup>	5,3.10 <sup>4</sup>	7,5.10 <sup>4</sup>
$E_{ur}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	6.10 <sup>4</sup>	1,6.10 <sup>4</sup>	2,25.10 <sup>5</sup>
$m$	[-]	0,5	0,5	0,5

$v/v_{ur}$	[-]	0,2	0,2	0,2
$c/c_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	10	15	20
$\phi$	[°]	25	25	25
$\psi$	[°]	0	0	0

Tablo 4. Model-2 HS\_ss Modeli Zemin Parametreleri

Zemin	Birim	Dolgu	Kil	Kiltaşı
$\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	19/20	19/20	20/22
$E_{50}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$2.10^4$	$5,3.10^4$	$7,5.10^4$
$E_{oed}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$2.10^4$	$5,3.10^4$	$7,5.10^4$
$E_{ur}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$6.10^4$	$1,6.10^4$	$2,25.10^5$
$m$	[-]	0,5	0,5	0,5
$v/v_{ur}$	[-]	0,2	0,2	0,2
$c/c_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	10	15	20
$\phi$	[°]	25	25	25
$\psi$	[°]	0	0	0
$\gamma_{0.7}$	[-]	$3.10^{-5}$	$5.10^{-5}$	$7.10^{-5}$
$G_0^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$1,8.10^5$	$4,8.10^5$	$6,75.10^5$

Tablo 5. Model-3 HS Modeli Zemin Parametreleri

Zemin	Birim	Dolgu	Kil	Kiltaşı
$\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	19/20	19/20	20/21
$E_{50}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$2,4.10^4$	$3,5.10^4$	$1,8.10^5$
$E_{oed}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$2,4.10^4$	$3,5.10^4$	$1,8.10^5$
$E_{ur}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$7,2.10^4$	$1,05.10^5$	$5,4.10^5$
$m$	[-]	0,5	0,5	0,5
$v/v_{ur}$	[-]	0,2	0,2	0,2
$c/c_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	20	15	20
$\phi$	[°]	25	25	25
$\psi$	[°]	0	0	0

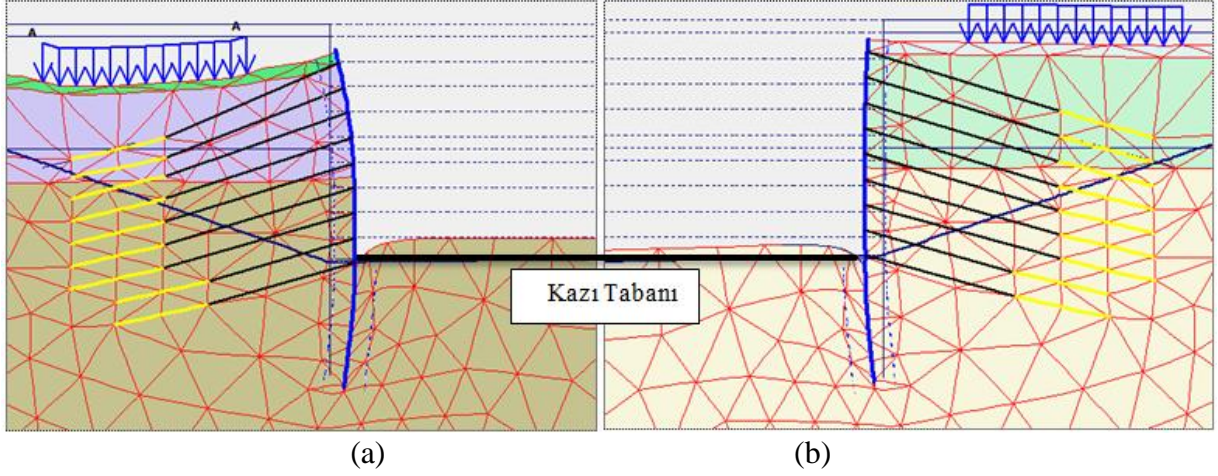
Tablo 6. Model-3 HS\_ss Modeli Zemin Parametreleri

Zemin	Birim	Dolgu	Kil	Kiltaşı
$\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	19/20	19/20	20/21
$E_{50}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$2,4.10^4$	$3,5.10^4$	$1,8.10^5$
$E_{oed}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$2,4.10^4$	$3,5.10^4$	$1,8.10^5$
$E_{ur}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$7,2.10^4$	$1,05.10^5$	$5,4.10^5$
$m$	[-]	0,5	0,5	0,5
$v/v_{ur}$	[-]	0,2	0,2	0,2
$c/c_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	20	15	20
$\phi$	[°]	25	25	25
$\psi$	[°]	0	0	0
$\gamma_{0.7}$	[-]	$2,5.10^{-5}$	$6,5.10^{-5}$	$7.10^{-5}$
$G_0^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	$2,16.10^5$	$3,15.10^5$	$1,62.10^6$

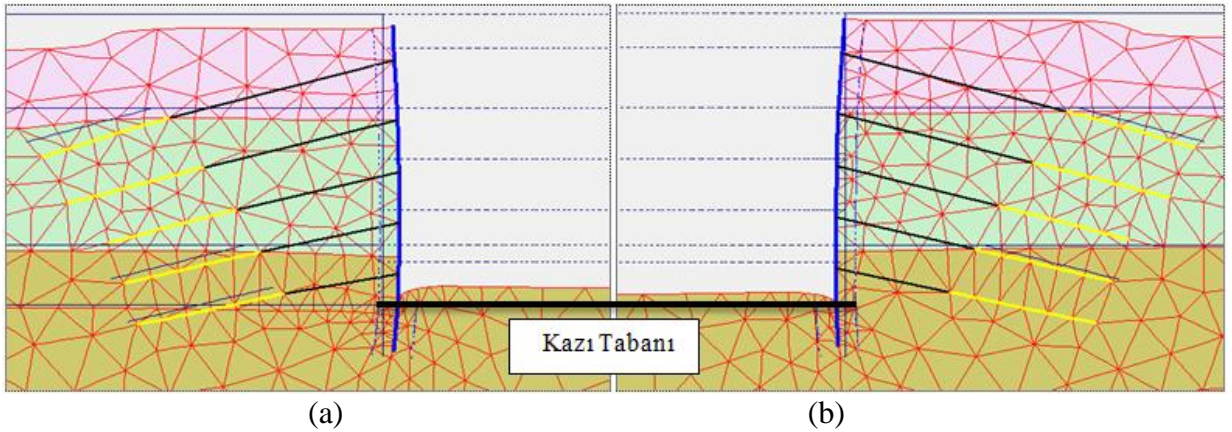


### 3.3. Model Analizleri

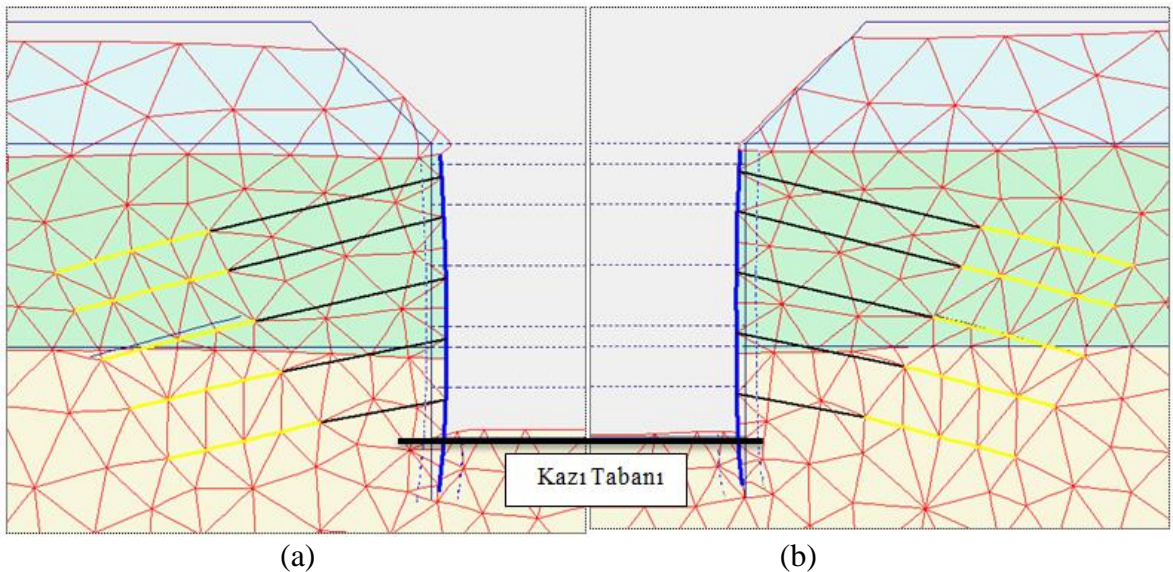
Hardening Soil (HS) ve Hardening Soil Small Strain (HS<sub>ss</sub>) zemin modelleri kullanılarak yapılan modellerin deformasyon durumlarının Plaxis programından alınan görüntüleri Şekil 3, 4 ve 5’de verilmiştir.



Şekil 3. Model-1 (a) HS ve (b) HS<sub>ss</sub> Model deformasyon durumları



Şekil 4. Model-2 (a) HS ve (b) HS<sub>ss</sub> Model deformasyon durumları

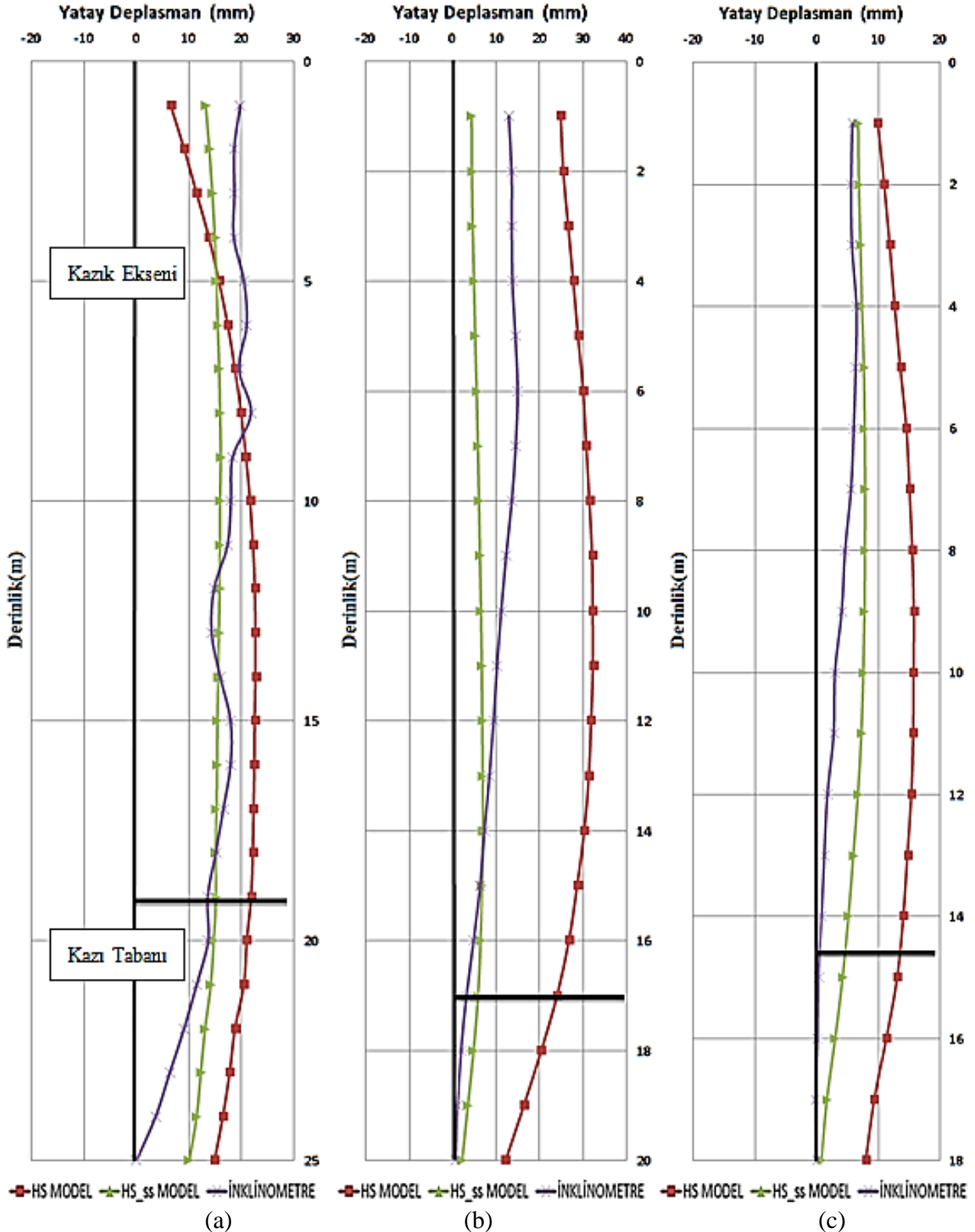


Şekil 5. Model-3 (a) HS ve (b) HS<sub>ss</sub> Model deformasyon durumları



### 3.4. İnklinometre Okumaları

Temel kazısı etrafındaki tüm cephelere inklinometreler yerleştirilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde maksimum deformasyon düzeyi hesaplanan kesitlerde sırasıyla yaklaşık 20, 13 ve 6 mm mertebesinde tespit edilmiştir. Yanal deformasyon değerleri ( $\delta/H$ ), sırasıyla % 1.05, 0.76 ve 0.40 mertebesinde olup literatürde verilen çalışmalarla uyumludur [20]. Bu sonuçlar Plaxis model sonuçları ile mukayese edilmiş ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3 sonuçları ve inklinometre okumaları

#### 4. Sonuçlar

Yapılan analizlerde elde edilen deplasman değerleri ile, moment ve kesme kuvvetleri karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Zemin modellerinin deforme olmuş kesitleri karşılaştırıldığında kazı tabanı HS modellerinde HS\_ss modellerine nazaran daha fazla yükseldiği görülmüştür, bu durumun HS\_ss modellerindeki kayma parametrelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Deplasman değerlerinde ileri model sonuçları için bir paralellik söz konusu olmakla beraber HS\_ss model, HS modele oranla inklinometre ölçümlerine daha yakın kaldığı görülmüştür. Bu durum, analizlerde kullanılan kayma modülü ( $G_0^{ref}$ ) ve küçük şekil değiştirme katsayısından ( $\gamma_{0.7}$ ) kaynaklı yanal deformasyonların sınırladığını göstermektedir.
- Tüm bu sonuçlar ışığında HS\_ss modelin HS modele göre saha ölçümlerine daha yakın olduğu görülmüştür. Literatür ile uyumlu olan bu sonuçlar değerlendirildiğinde, özellikle kum, kıltaşı, kireçtaşı gibi küçük şekil değiştirme rijitliği özelliği gösteren zeminlerin bu modelde daha hassas sonuçlar verdiği görülmüştür.

#### Kaynaklar

- [1] Lim, A., Ou, C. Y., and Hsieh, P. G., "Evaluation of Clay Constitutive Models for Analysis of Deep Excavation under Undrained Conditions", *Journal of GeoEngineering*, 2010, 5(1): 9-20.
- [2] Zhang, W., Goh, A. and Zhang Y., "Probabilistic Assessment of Serviceability Limit State of Diaphragm Walls for Braced Excavation in Clays", *ASCE-ASME J. Risk Uncertainty Eng. Syst., Part A: Civ. Eng.*, 2015, 1(3): 06015001-1.
- [3] Hsiung B.B., Sakai, T., "Failure Analysis of Underground Construction—Lessons Learned from Taiwan", *Forensic Geotechnical Engineering*, 2016, 1: 197-208.
- [4] Mu, L., Finno, R. J., Huang, M., Kim, T., & Kern, K., "Defining The Soil Parameters For Computing Deformations Caused By Braced Excavation", *Maejo International Journal of Science and Technology*, 2015, 9(2): 165-175.
- [5] Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski, D., Oh, E., & Balasubramaniam, A., "Finite Element Analysis of A Deep Excavation: A Case Study from the Bangkok MRT", *Soils and Foundations*, 2013, 53(5): 756-773.
- [6] Castaldo, P., & De Iuliis, M., "Optimal Integrated Seismic Design of Structural and Viscoelastic Bracing-Damper Systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 43(12): 1809-1827.
- [7] Lim, A., & Ou, C. Y., "Stress paths in deep excavations under undrained conditions and its influence on deformation analysis." *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017. 63: 118-132.
- [8] Schanz, T., Vermeer, P., and Bonier, P., "Formulation and Verification of the Hardening Soil Model. In *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema, Rotterdam, 1999.
- [9] Duncan, J. M. and Chang, C. Y., "Nonlinear Analysis of Stress And Strain in Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1970, 96: 1629-1653.
- [10] Janbu, N., "Soil Models In Offshore Engineering", *Géotechnique*, 1985, 35(3): 241-281.
- [11] Kempfert, H. G., & Gebreselassie, B., "Constitutive Soil Models and Soil Parameters", *Excavations and Foundations in Soft Soils*, 2006, 1: 57-116.
- [12] Jaky, J., "The coefficient of earth pressure at rest", *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, 1944, 78(22): 355-358.
- [13] Brinkgreve, R.B.J., "PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analysis-Version 8". Balkema, Rotterdam, 2002.
- [14] Benz, T., "Small-Strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences", *Phd Thesis, Universitat Sttuttgart*. 2007.

- [15] Hardin, B. O., & Drnevich, V. P., “Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves”, *Journal of Soil Mechanics & Foundations* 1972, 98: 7.
- [16] Zimmermann, T., Truty, A., Podles, K., “Numerics In Geotechnics And Structures”, Elmepress international, Lausanne, 2010.
- [17] Yamashita, S., Kawaguchi, T., Nakata, Y., Mikami, T., Fujiwara, T., & Shibuya, S., “Interpretation Of International Parallel Test On The Measurement of Gmax Using Bender Elements. *Soils and Foundations*”, 2009, 49(4): 631-650.
- [18] Dong, Y., Ning L., F., “Correlation between Small-Strain Shear Modulus and Suction Stress in Capillary Regime under Zero Total Stress Conditions” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, GT.1943-2016, 1943-5606.0001531.
- [19] Vardanega, P.J., Bolton, M.D., ”Stiffness of Clays and Silts: Normalizing Shear Modulus and Shear Strain”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2013,1943-5606.0000887.
- [20] Clough, G.W. ve O'Rourke, T.D. “Wall Deflection and Ground Surface Settlement Induced by Excavation”, In *Proceedings of the 4th National Geotechnical Conference*, Hawlin, Taiwan, 1990.