

# ALÜVYAL VE SIVILAŞABİLEN ZEMİNLERDE TÜNELLERİN DEPREM RİSK ANALİZİ: ADAPAZARI ÖRNEĞİ

Ayşe SAÇAR<sup>1</sup>, İsa VURAL<sup>2</sup>

1. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans, Sakarya, Türkiye

2. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

## Özet

Yaşanan son büyük depremlerde 1995 Kobe, Japonya depremi, 1999 Chi-Chi, Tayvan depremi ve 1999 Kocaeli, Türkiye depreminde mevcut yeraltı yapılarında hasarlar oluşmuştur. Bu durum yeraltı yapılarının sismik tasarımının önemini ve gerekliliğini bir kez daha gözler önüne sermiştir. Bu çalışmada tünellerin sismik performansını değerlendirilmesi için, nümerik modelleme yapılarak, sıvılaşma ve oturma parametrelerine bağlı hasarlar incelenmiştir. Yapılan çalışmada Adapazarı zeminlerinde inşa edilebilecek bir tünel için farklı derinlik, farklı çap ve farklı kalınlık değerlerinin sıvılaşma eğilimi, maksimum yer ivmesi ve zemin deformasyonları araştırılmıştır. Adapazarı bölgesinde gerekli geoteknik çalışmalar yapılması koşulu ile tünel inşa edilebileceği sonucuna varılmıştır. Çalışma sonucunda Adapazarı zeminlerinde bir tünel 15 m derinlikte, 4 m çapta ve 1 m kalınlıkta inşa edilebilir.

Anahtar kelimeler: sıvılaşma, nümerik model, tünel, deprem, Adapazarı

## Abstract

The earthquakes that happened in the near past, 1995 Kobe, Japan earthquake, 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake and 1999 Kocaeli, Turkey earthquake all caused a devastation to underground structures. These natural disasters showed the importance and necessity of seismic layouts for underground structures. In this study, through numeric modeling, the damages dependant on liquefaction and subsidence are observed to evaluate the seismic performance of tunnels. In this study, liquefaction tendency of different depths, diameters and thickness of a tunnel that can be built underground of Adapazarı have been searched and observed along with maximum ground acceleration and underground deformations.

Keywords: liquefaction, numeric modeling, tunnel, earthquake. Adapazarı

## 1. GİRİŞ

Gelişen dünyada endüstriyel faaliyetlerin giderek atması sonucu insan nüfusu şehirlerde giderek atmaktadır. Bu durum mevcut yerüstü alanlarını daha kıymetli kılmaktadır ve ulaşım problemlerine yol açmaktadır. Bunun bir sonucu olarak insanoğlu yeraltını daha aktif olarak kullanmak zorundadır. Yeraltı yapıları tarih boyunca ulaşım, madencilik, savunma, kanalizasyon gibi çok çeşitli amaçlarla inşa edilmiştir. Deprem sırasında yeraltı yapıları yerüstü yapılarından daha güvenli olmasına karşın 1995 Kobe depremi sırasında Daikai metrosunda oluşan hasarlar [1], 21 Eylül 1999 Chi Chi depreminde bölgedeki bir tünelde fayın içinden geçmesi sonucu çökmesi [2] ve son olarak 12 Kasım 1999 Düzce depreminde Bolu tünellinin bir kısmının çökmesi [3] tünel tasarımının önemini gözler önüne sermiştir.

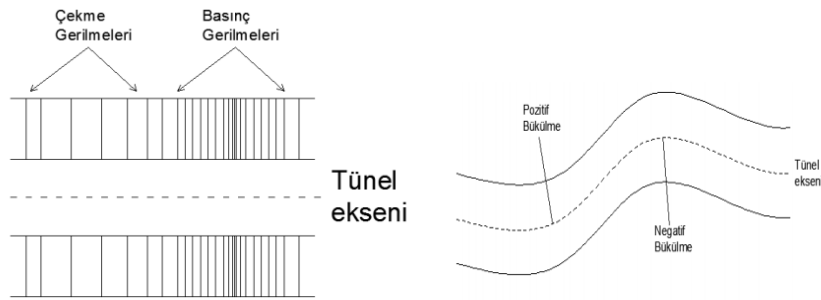
Deprem süresince suya doydun tabakalarda tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının artışı zeminin katı fazdan sıvı faza dönüşümü olarak sıvılaşma durumu açıklanmaktadır [4]. Sıvılaşmaya bağlı yapısal hasarlar oluşmaktadır ve tünellerde bu riskli yapılar arasındadır. 1964

yılında Alaska ve aynı yıl Japonya’da meydana gelen depremlerin ardından 1965 yılında ilk kez Arthur Cassagrande sıvılaşmayı tanımlanmıştır. Bu depremlerde birçok bina taşıma gücü kaybından dolayı yan yatmış, devrilmiş veya batmıştır. İstinat duvarları aşırı boşluk suyu basınçları nedeniyle ötelenmiş veya devrilmiştir [5]. Kurulan modelin sıvılaşma analizlerinde Finn-Byrne model kullanılmıştır. Finn-Byrne model ile hacimsel birim deformasyon değerlerinden boşluk suyu basınçları hesaplanabilmekte, böylelikle deprem sırasında boşluk suyu basıncı ve sıvılaşma problemleri kolaylıkla modellenebilmektedir [6].

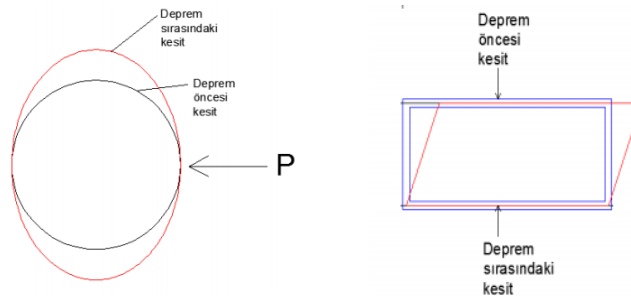
Yeraltı yapıları için sismik tasarım yükleri genellikle zemin-yapı arasındaki etkileşime bağlı olarak, yapıya çevresindeki zeminden uygulanan deformasyonlar ve gerilmelerle karakterize edilir [3]. Dinamik analizlerde, sonlu elemanlar ve sonlu fark yöntemleri gibi nümerik modelleme programları kullanılarak dinamik bir yapı-zemin etkileşimi oluşturulmuştur. Zemin-yapı etkileşimi yeraltı yapıları için yapının boyutuna, etrafındaki mevcut zemin özelliklerine ve uygulanan dinamik ve statik yüklerle ilişkilidir [7].

Sismik dalgaların zemin içerisindeki bir yapıdan dolayı yansımaları dalganın zeminin içerisindeki yayılma hızından farklılık gösterebilmektedir [8]. Bu olay deformasyonlara yol açabilir. Depremler sırasında tünellerde şu üç deformasyon yaşanabilir [9]:

- ✓ Eksenel
- ✓ Boylamsal
- ✓ Ovalleşme (Dairesel tünellerde) ve kırılma ( Dikdörtgen tünellerde)



a) Tünel ekseninde çekme ve basınç deformasyonları b) Bükülme deformasyonları



c) Ovalleşme deformasyonları d) Kırılma deformasyonları

Şekil 1. Tünel deformasyonları a) Tünel ekseninde çekme ve basınç deformasyonları b) Bükülme deformasyonları c) Ovalleşme deformasyonları d) Kırılma deformasyonları [10]

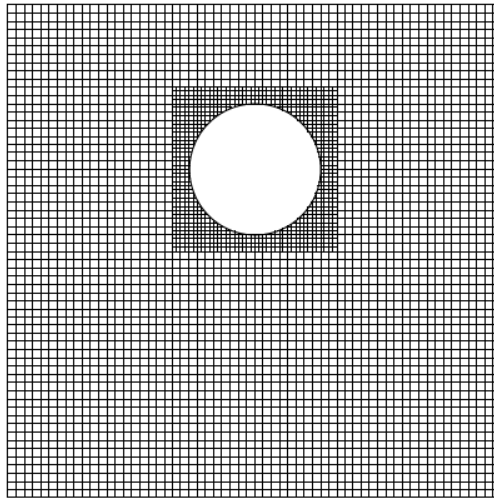
Şekil 1’ de a eksenel yük altında oluşan basınç ve çekme deformasyonları, b bükülme deformasyonları, c ve d ovalleşme ve kırılma deformasyonlarını göstermektedir [3]. Tünel kaplamalarında deformasyonlar genellikle tünel boyunca uzanan yönde oluşmaktadır [11].

## 2. MATERYAL ve METOT

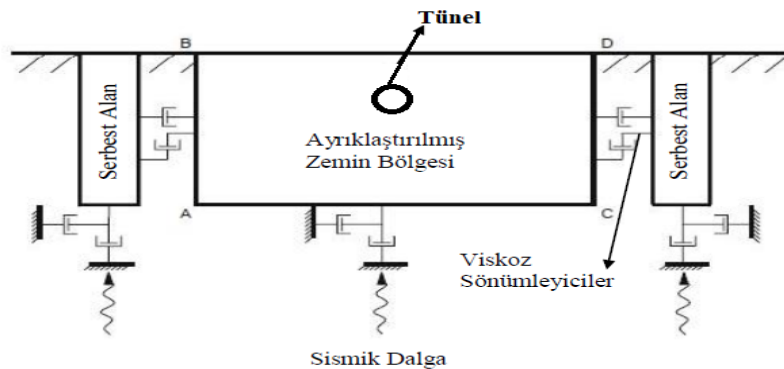
Bu çalışmada alüvyal ve sıvılaştırılabilir zeminlerde tünellerin deprem performanslarının değerlendirilmesi için sonlu fark analizleri yapan FLAC 2D kullanılmıştır.

Vural yaptığı çalışmada modelin boyutlarını belirlemek için boyutları farklı olan modellere 0.3 g genliğinde harmonik yük uygulanmış ve bu harmonik yük altında modelin yatay ve düşey uzunlukları belirlenmiştir. Kurulan matematik modelin yatay uzunluğu sabit olarak alındığında düşey uzunluğun değişiminde ivme değerlerinde değişim olduğunun gözlemlenmiştir. Modelin düşey uzunluğu sabit olarak alındığında ise yatay uzunluğunda ki ivme değerlerinde değişimler gözlemlenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda yatay ve düşey uzunluklarda 30 m' den sonra değişim gözlemlenmemiştir [12].

Çalışmalar sonucunda model boyutları 30 x 30 m olarak tercih edilmiştir. Nümerik modeller tünelsiz, tünel 10 m ve 15 m derinlikte, 4 m, 5m ve 6 m çaplarda oluşturulmuştur. Kurulan modeller için sıvılaştırma analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarında oluşan deplasmanlar değerlendirilmiştir. Unutmaz yaptığı çalışmada, sıvılaştırılan zeminlerde tünel boyutlarını belirlemiştir, tünel çapının sıvılaştırma üzerine etkisinin olmadığını [13] ve tünellerin etrafındaki zeminlerin deprem sonrası hareketini incelediği çalışmasında ise kalınlığın ivme değerleri üzerinde fazla etkisinin olmadığını [14] söylemiştir.



Şekil 2. Çalışmada kurulan nümerik model



Şekil 3. Sınır şartları

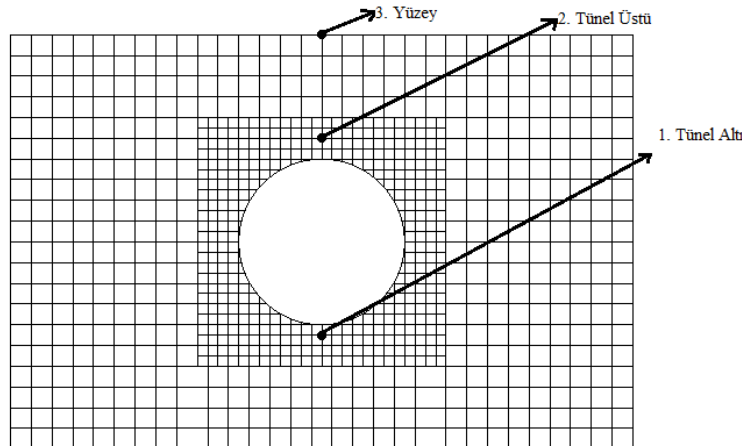
Şekil 2' de yer alan modelde tünel 100 cm kalınlığında ve beton özellikleri  $24 \text{ kN/m}^3$  yoğunluklu, elastisite modülü  $3800 \text{ N/mm}^2$  ve Poisson oranı 0.25 olarak kullanılmıştır. Zeminin özellikleri ise Tablo 1' de verilmiştir. Şekil 3' de dinamik modeller için kullanılan serbest alan sınır şartları verilmiştir. Çalışmada 17 Ağustos 1999 Sakarya depremi kaydı kullanılmış olup, depremin ivme kayıtları  $0.3 \text{ g}$  ve depremin magnitüt büyüklüğü 7.4 olarak kaydedilmiştir.

Tablo 1. Zemin özellikleri

Zemin Sınıfı	Tabaka kalınlığı (m)	SPT	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\nu$	E ( $\text{kN/m}^2$ )	K ( $\text{kN/m}^2$ )	G ( $\text{kN/m}^2$ )	c ( $\text{kN/m}^2$ )	$\phi$	
CH	10	15	18	0.35	8100	9000	4200	40	1	1. Tabaka
SC	10	18	18	0.33	5600	5500	2600	1	30	2. Tabaka
SM	10	50	19	0.30	84000	70000	14800	1	39	3. Tabaka

### 3. ANALİZ SONUÇLARI

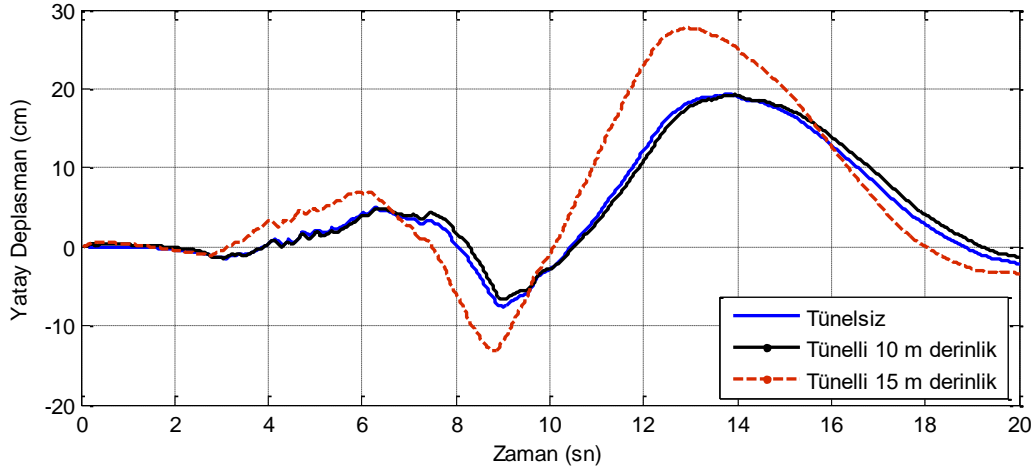
Analiz sonuçlarının da incelenen noktalar deformasyonların en fazla görüldüğü noktalar olup Şekil 4' de verilmiştir. 1 Nolu nokta tünel altındaki deformasyonları, 2 Nolu nokta tünel üstündeki deformasyonları ve 3 Nolu nokta ise yüzeyde oluşan deformasyonların incelenmesi için seçilmiştir.



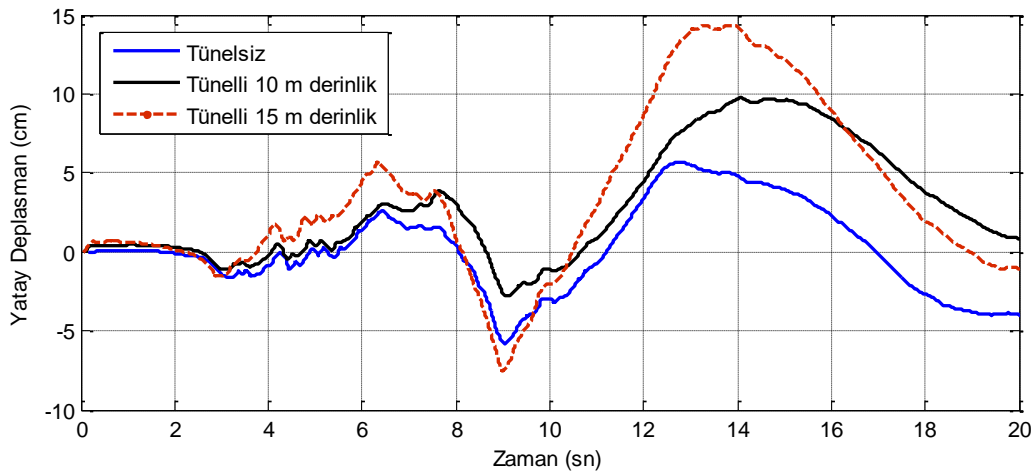
Şekil 4. Modelde incelenen noktalar

#### 3.1.Sıvılaşma analizlerinde derinliğin etkisi

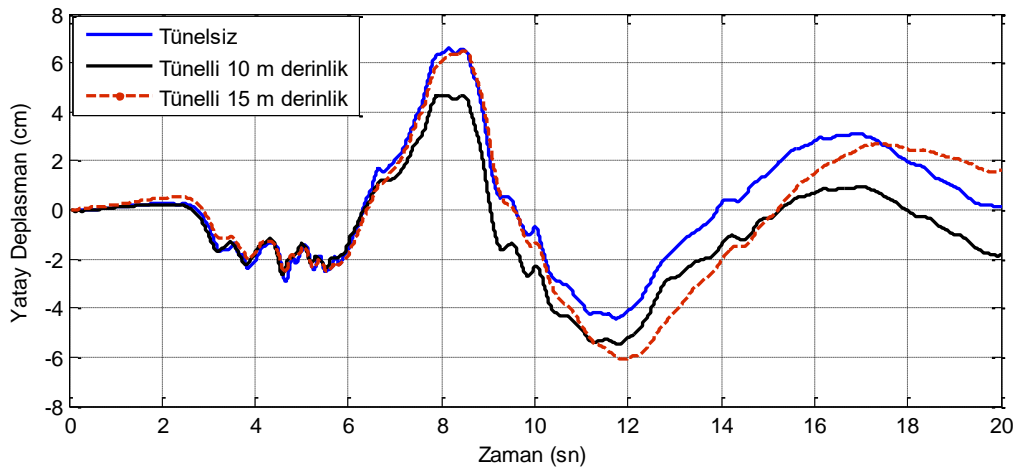
Nümerik modeller sırasıyla tünelsiz, tünelli 10 m derinlikte ve tünelli 15 m derinlikte oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin sıvılaşma analizleri yapılarak oluşan yatay ve düşey deplasmanlar incelenmiştir.



a)



b)

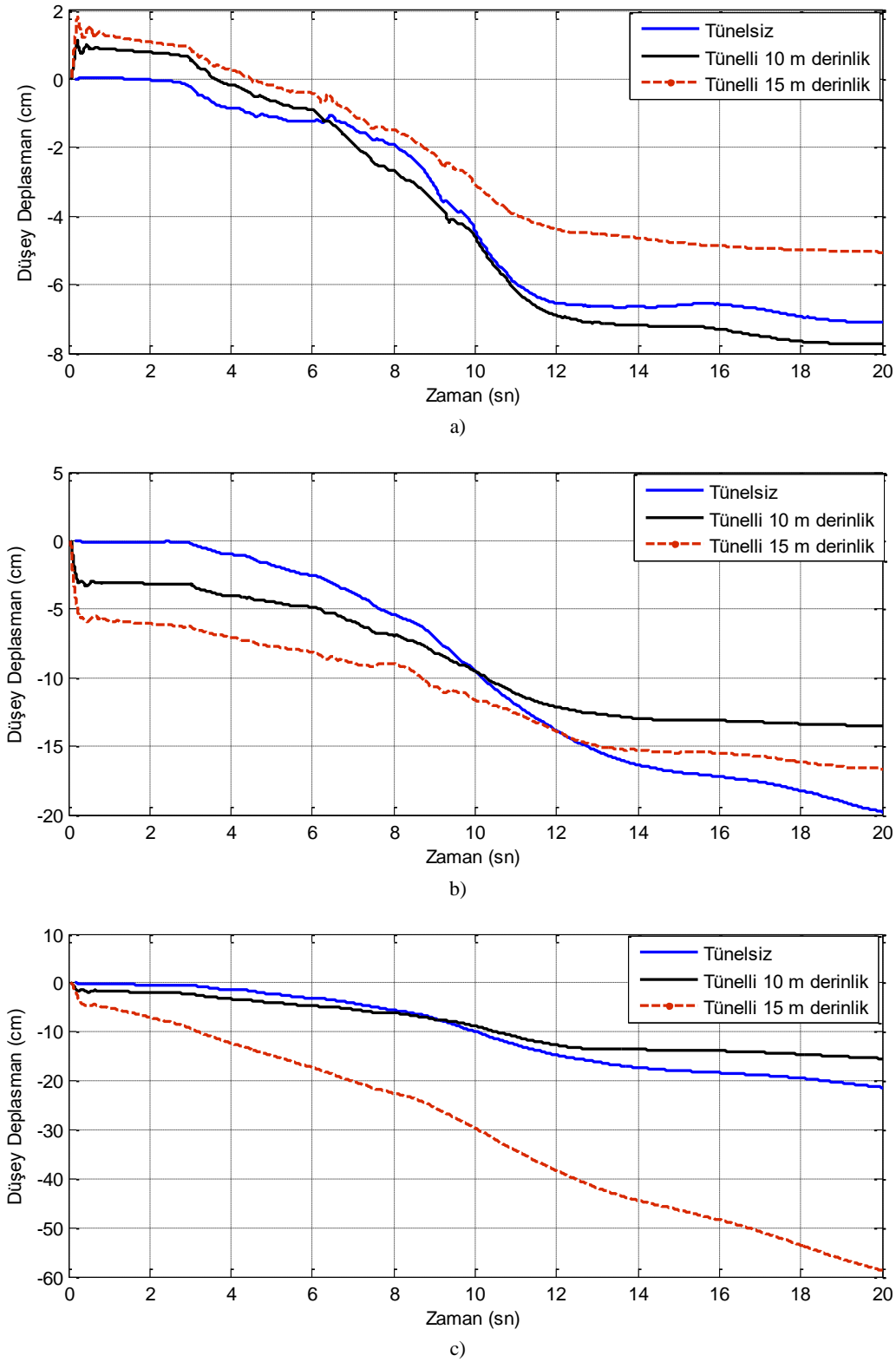


c)

Şekil 5. Yatay deplasman sonuçları a) tünel altı nokta b) tünel üstü nokta c) yüzey

Analiz sonuçlarına göre tünel altı noktada oluşan yatay deplasman 15 m derinlikte yaklaşık 50 cm iken 10 m derinlikteki tünelde ve tünelsiz modelde yaklaşık 30 cm'lik bir yatay deplasman oluşmuştur (Şekil 5.a.). Tünel üstü noktada oluşan yatay deplasmanlarda ise 15 m derinlikteki tünelde 20 cm, 10 m derinlikteki tünelde yaklaşık 12 cm ve tünelsiz modelde ise 10 cm olmuştur (Şekil 5.b.). Yüzeyde oluşan yatay deplasman ise 15 m derinlikteki tünel için yaklaşık 12 cm,

10 m derinlikteki tünel ve tünelsiz modeller için yaklaşık 10 cm' lik bir yatay deplasman oluşmuştur (Şekil 5.c.).



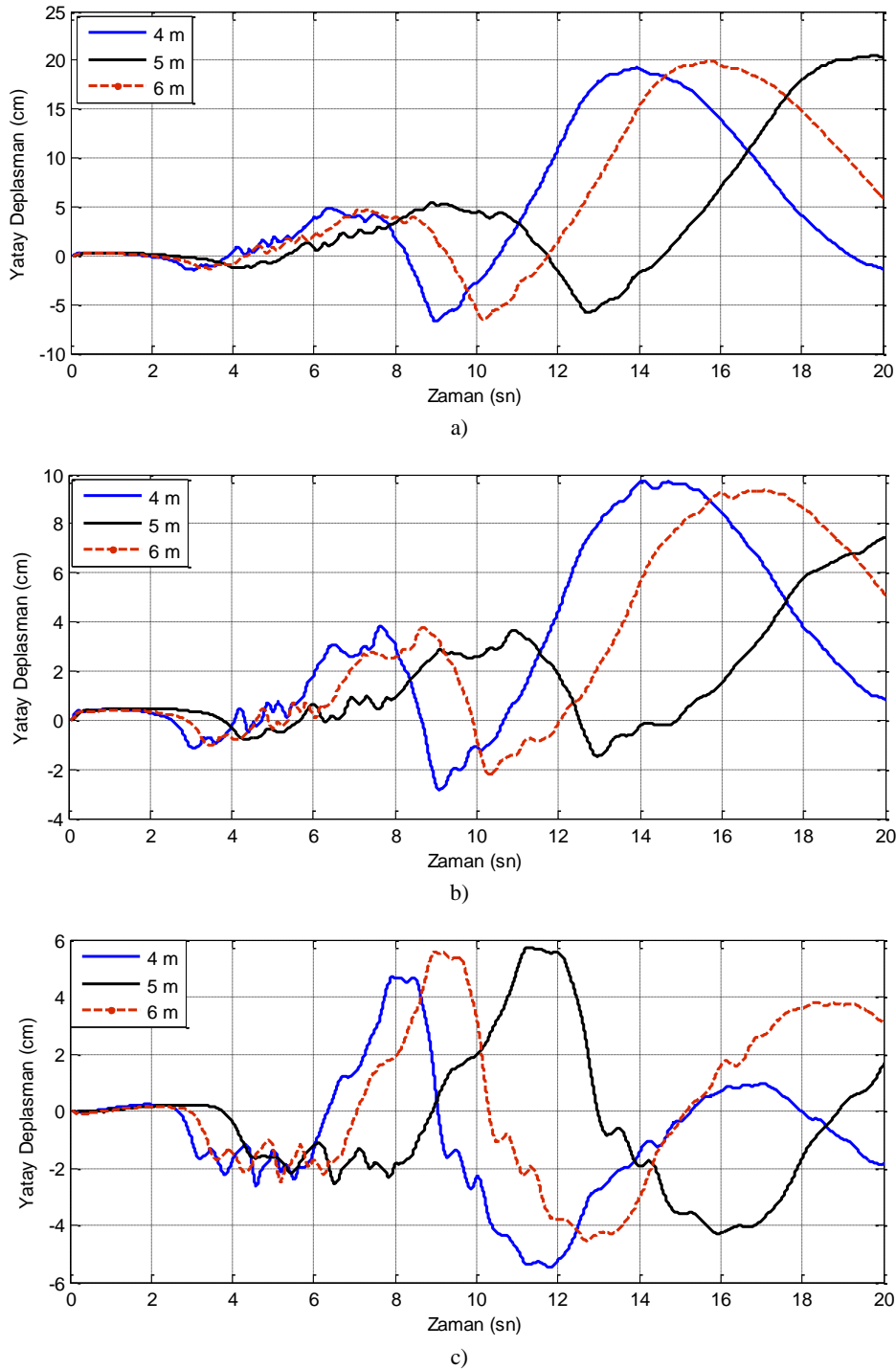
Şekil 6. Düşey deplasman a) tünel altı nokta b) tünel üstü nokta c) yüzey

Tünel altı nokrada oluşan düşey deplasmanlara bakıldığında 15 m derinlikteki tünelde 5 cm, 10 m derinlikteki tünelde 7 cm ve tünelsiz modelde yaklaşık 8 cm' lik deplasmanlar oluşmuştur

(Şekil 6.a.). Tünel üstü noktada tünel altı noktaya göre düşey deplasman 15 m derinlikteki tünelde 3 katına, 10 m derinlikteki tünelde ve tünelsiz modelde ise 2 katına çıkmıştır (Şekil 6.b.). Yüzeyde en fazla düşey deplasman 15 m derinlikteki tünelde 60 cm' dir, 10 m derinlikteki tünelde ve tünelsiz modelde yaklaşık 20 cm' lik düşey deplasman oluşmuştur (Şekil 6.c.).

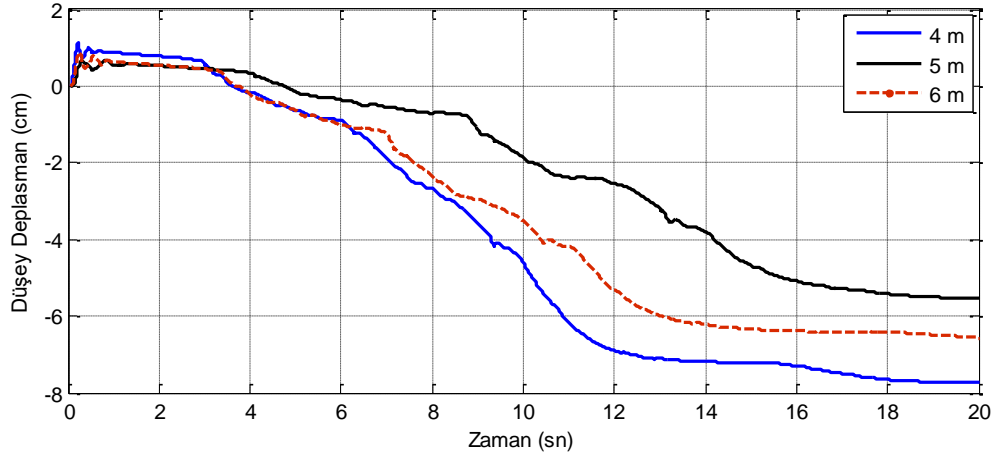
### 3.2.Sıvılaşma analizlerinde çapın etkisi

Nümerik analizlerde seçilen çaplar 4 m, 5 m ve 6 m' dir. Bu çaplardaki tünellerde depremin etkisiyle sıvılaşma durumunda meydana gelen yatay deplasmanlar ve düşey deplasmanlar bu bölümde yer almaktadır.

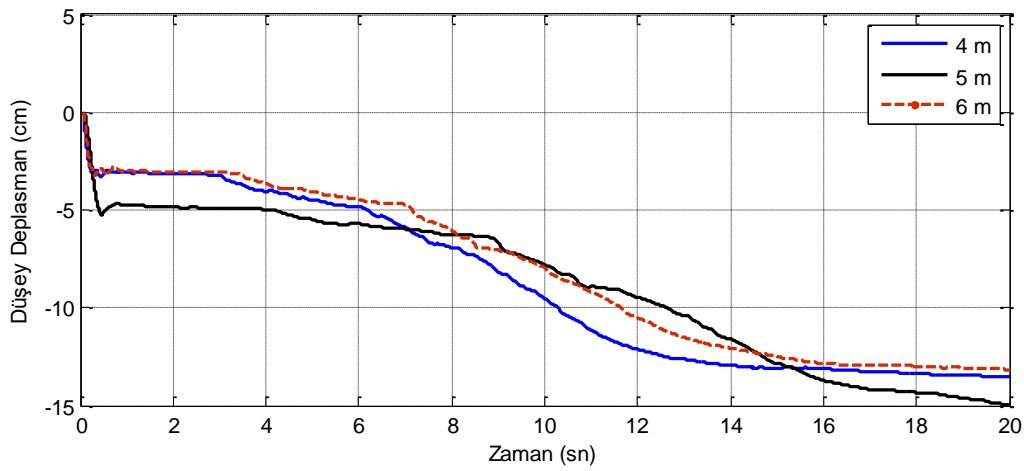


Şekil 7. Farklı çaplarda oluşan yatay deplasmanlar a) tünel altı nokta b) tünel üstü nokta c) yüzey

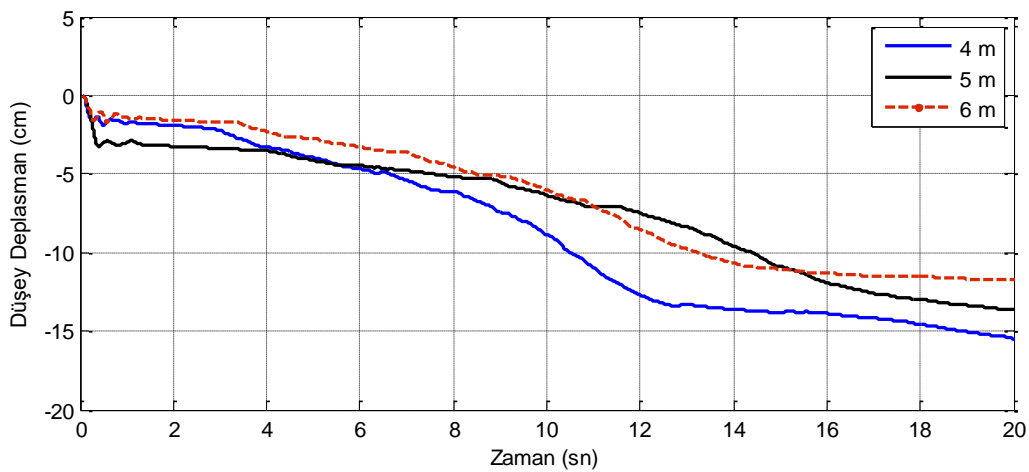
Farklı çaplardaki tünellerde oluşan yatay deplasmanlar zemin içerisinde en fazla tünel altı noktada ve çapın artış sırasıyla 25 cm, 26 cm ve 27 cm olmuştur (Şekil 7.a.). Tünel üstü noktada düşey deplasman çapın artışıyla azalmış ve sırasıyla 10 cm, 9 cm ve 8 cm olmuştur (Şekil 7.b.). Yüzeyde ise bütün çaplar için oluşan yatay deplasman eşittir ve bu değer 10 cm olmuştur (Şekil 7.c.).



a)



b)



c)

Şekil 8. Farklı çaplarda oluşan düşey deplasmanlar a) tünel altı nokta b) tünel üstü nokta c) yüzey



Düsey deplasmanların tünel altı nokta, tünel üstü nokta ve yüzeyde oluşan grafikleri Şekil 7’ de verilmiştir. Bu grafiklerde tünel altı noktada düşey deplasman çapın artışıyla azalmıştır (Şekil 8.a.). Tünel üstü noktada ise düşey deplasman bütün çaplar için yaklaşık 15 cm’ dir (Şekil 8.b.). Yüzeyde ise 4 m çaplı tünelde tünel üstü noktaya göre 2 cm artışken, 5m çapındaki tünelde yaklaşık 2 cm’ lik bir azalma ve 6 m çaplı tünelde 0.5 cm’ lik bir azalma görülmüştür (Şekil 8.c.).

#### 4. SONUÇLAR

Gelişen dünyada endüstriyel faaliyetlerin giderek atması sonucu insan nüfusu şehirlerde giderek atmaktadır. Bu durum mevcut yerüstü alanlarını daha kıymetli kılmaktadır ve yeraltı alanlarının daha aktif kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmada modeller sırasıyla tünelsiz, 10 m derinlikte tünelli ve 15 m derinlikte tünelli olarak ve daha sonra 4 m, 5 m ve 6 m çap olarak modellenip dinamik analizler yapılmıştır. Analizlerde 17 Ağustos 1999 Sakarya deprem kayırları kullanılmıştır. Analizlerin sonucunda alüvyal ve sıvılaştıran zeminlerde inşa edilecek tüneller için;

- Derinlere inşa edilen tünellerde daha fazla düşey deplasmanlar oluşmuşken,
- Yatay deplasmanlarda derinlikle birlikte genel bir artışı olmuştur,
- Çapın artışı düşey deplasmanları fazla etkilememektedir,
- En fazla yatay deplasman 6 m çaptaki tünelde olmuştur,
- En fazla düşey deplasman ise 15 m derinlikteki tünelde olmuştur,

Adapazarı zeminlerinde inşa edilecek tünel 15 m derinlikte, 4 m çapta ve 1 m kalınlıkta olabilir. Bölgeye inşa edilecek bir tünel için modelleme kadar maliyet kısmı da incelenmelidir.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] Iida H., Hiroto T., Yoshida N., Iwafuji (1996) Damage to Daikai subway Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of Hyogoken-Naambu Earthquake, Japanese Geotechnical Society, V36, pp 280-300, January 17.
- [2] Ueng T.S., Lin M.L., Chen M.H., (2001), Some geotechnical aspects of 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, Proceeding of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, SPL-10, pp 1-5.
- [3] Hashash Y.M.A., Hook J.J., Schmidt B., Yao J.I., (2001), Seismic Design and Analysis of Underground Structures, Tunnelling and Underground Space Technology, vol16 , 247-293.
- [4]Özaydın K. (2007), Zeminlerde sıvılaşma, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 16-20 Ekim 2007
- [5] Mollamahmutoğlu M. Ve Babuçcu F., Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Gazi Yayınevi, 2006
- [6] Byrne, P. M., (1991), “A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand,” Proceedings: *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (St. Louis, Missouri, March 1991), Paper No. 1.24, 47-55.

- [7] Unutmaz B., Çetin K.Ö., Gökyay M.C., (2008), Gömülü Yapıların Zemin-Yapı-Deprem Etkileşiminde Basitleştirilmiş Çerçeve Yöntemi ,Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi, Selçuk Üniversitesi, Konya , 16-17 Ekim.
- [8] Hadjian A. H., Hadley D. M., (1981), Studies of Apparent Seismic Wave Velocity, Proceedings of International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis.
- [9] Owen, G. N., and Scholl, R. E., Earthquake Engineering of Large Underground Structures, Prepared for the Federal Highway Administration, FHWA/RD-80/195, 1981.
- [10] Keskin C.B., Deprem Etkisindeki Yeraltı Yapılarının Zaman Tanım Alanında Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Çözümlemesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 2014.
- [11] Wang J., (1993) Seismic Design of Tunnels , Professional Associate Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc. ,June.
- [12] Vural İ., (2012), Alüvyal ve Sıvılaşılabilen Zeminlerde Altyapıların Deprem Risk Analizi: Adapazarı Örneği, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (Doktora tezi), Ekim.
- [13] Unutmaz B., (2014), 3D Liquefaction Assessment of Soils Surrounding Circular Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, vol 40, pp 85-94.
- [14] Unutmaz B., (2015), Tünel Çevresi Zeminlerinin Deprem Sonrası Davranışı, 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 26-27 Kasım.