SIĞ YER ALTI YAPILARINDA SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ İÇİN OLASILIKSAL YAKLAŞIMLAR

Ş. Çağlar Tuna[1] , Selim Altun[2]

[1] *İnş Y. Müh., Ege Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü, Bornova, İzmir, e-mail: tunasahincaglar@hotmail.com*
[2] *Doç. Dr., Ege Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü, Bornova, İzmir.*

ÖZET:

Genel hatlarıyla yapıların dinamik analizleri sismik çevrenin belirlenmesinden, zemin davranışları ve yapı sistem analizine kadar farklı süreçler içermektedir. Bütün bu aşamalar deprem dalgalarının kaynaktan yayılmasından başlayarak kendi içerisinde birçok belirsizlikler içermektedir. Örneğin, zaman alanında tanımlı yer hareketlerinin ihtiyaç duyulduğu sismik risk analizlerinde uygun yer hareketinin seçilmesi, çalışmanın en önemli aşamalarından birisini oluşturmaktadır. Diğer bir belirsizlik olarak ise modellerde kullanılan zemin parametrelerinin seçimi gösterilebilir.
Olasılıksal yaklaşımlardan birisi olarak kabul edilen Monte-Carlo çözüm yöntemi, değişken olarak nitelendirilen bazı parametrelerin tekrarlı simülasyonlar ile sisteme etkitilmesi ve sonuçlarının olasılıksal bir çerçevede incelenmesini içerir. Böyle bir çalışma ile, dikdörtgen kesitli sığ tünellerin sismik analizinde önemli sayılan bazı tasarım parametreleri ve sistem çıktıları, önceden belirlenen bazı dayanım ve yükleme parametrelerin rastgele olarak sisteme etkitilmesi sonucunda meydana gelen değişimler incelenebilecektir.

ANAHTAR KELİMELER: Belirsizlikler, Sismik Risk Analizi, Monte-Carlo Çözümü, Simülasyonlar

1. GİRİŞ

Geoteknik deprem mühendisliği, kapsadığı konular dahilinde birçok olasılıksal ve tahmini yaklaşımlar içermektedir. Bu konuların başında dinamik analizlerde kullanılan ve sahaya özel olarak elde edilecek deprem girdileri yer almaktadır. Ayrıca jeolojik formasyonlarla ilgili yeterli veri sağlamanın zor olması ve çeşitli deneysel hatalara açık olması, analizlerin tutarlılığını etkilemektedir. Sonuç olarak, güvenilir bir tasarım elde etmek için gerek zemin profilleri ve gerekse de yer hareketi parametreleri olasılıksal yöntemler kullanılarak değerlendirilmelidir. Bu çalışmada yer hareketleri ve zemin parametrelerindeki belirsizliklerin sığ yeraltı yapılarının sismik davranışına etkilerini tespit edebilmek amacıyla geliştirilen bir yöntem tarif edilecektir.

2. YER ALTI YAPILARINDA SİSMİK TASARIM YAKLAŞIMLARI

Yer altı yapıları, yer üstü yapılarına (köprüler, binalar vb.) kıyasla farklı sismik tasarım felsefesi gerektirmektedir. Yer üstündeki yapıların zemin içerisinde kalan kısımları, zeminde meydana gelen deformasyonlara üst yapının atalet etkisiyle karşı koymakta ve dolayısıyla, üst yapıda kütlesiyle orantılı olarak iç kuvvetler ortaya çıkmaktadır. Yeraltı yapıları ise zemin ile çevrelendikleri için, atalet etkileri önemsiz kalmakta ve sismik tepkiler zemin tepkisi ile domine edilmektedir. Tünel ve metrolar gibi uzun yer altı yapıları, özellikle enkesitin değişiklik gösterdiği farklı lokasyonlarda (İstasyon veya çıkış şaftları gibi bölümler) önemli diferansiyel kuvvetlere maruz kalmaktadır.
Günümüzdeki sismik tasarım felsefesi ikili bir tasarım mantığıyla yürütülmektedir (Wang, 1993). Üst tasarım yaşam güvenliğini, alt tasarım ise sürdürülebilirliği esas almaktadır.

- ODE (Sürdürülebilir Tasarım Kriteri): Yapının ekonomik ömrü boyunca en az bir kere karşılaşabileceği depremi esas almakla beraber sistemin sürdürülebilir olması hedeflenmektedir (Hasarın az yada hiç olmaması kriteri).

ODE tasarım için yükleme kriteri (Aç-Kapa Tüneller) aşağıda verilmiştir:

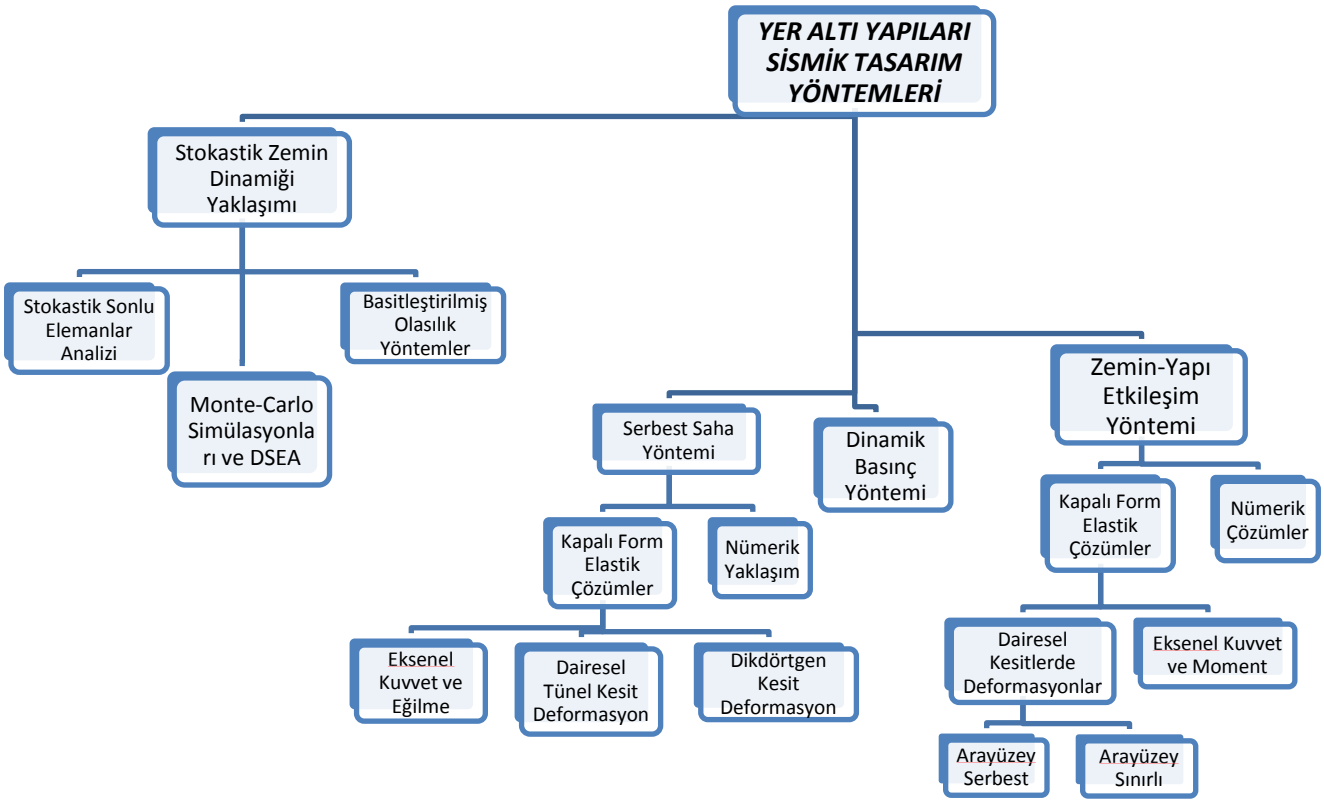
$$U=1.05D+1.3L+b1E1+E2+1.3EQ \quad (1)$$

- MDE (Maksimum Tasarım Kriteri): Bu kriter içerisinde yapı ömrü boyunca çok az bir ihtimalle bile olsa (5%) aşılabilecek bir yer hareketi karşısında yaşam kaybı olmaması hedef alınmıştır.

Örneğin MDE tasarım için aşağıdaki yükleme kriterinin (Aç-Kapa Tüneller) uygunluğu araştırılmalıdır:

$$U=D+L+E1+E2+EQ \quad (2)$$

Deprem oluşmasını takiben kaynaktan yayılan sismik dalgalar, yayılma hızına ve doğrultusuna göre çeşitli isimler almakta ve yer altı yapıları üzerinde çeşitli etkilerde bulunmaktadır. Neticede gözlenen deformasyonlar eksenel sıkışma ve uzama; boyuna eğilme ve enkesit üzerinde ovalleşme yada eğilme tipi davranışlardır (Hashash v.d., 2001). Farklı yaklaşımlarla geliştirilen çeşitli sismik tasarım metodları Şekil 1'de verilmiştir. Bu konudaki en basit yaklaşım yer altı yapısı ile çevreleyen zemin arasındaki etkileşimin önemsenmediği durumlardır. Bu durumda, birçok dinamik analizin temelinde yer alan serbest saha tepki analizleri gerçekleştirilerek yer altı yapısı oluşan deformasyonlara uygun tepki verebilecek şekilde tasarlanır. Bu amaçla geliştirilen çeşitli yaklaşımlarda, bu deformasyonlar sebebiyle yapıda oluşacak iç kuvvetlerin (eksenel kuvvetler, eğilme ve kesme kuvvetler) nasıl bulunacağı belirtilmiştir.



Şekil1. Yer altı Yapıları Sismik Tasarım Yöntemleri

Bu çalışmalar içerisinde, gerek akademide ve gerekse de uygulamada aç-kapa tipi dikdörtgen tünellerin analizlerindeen çok kullanılan yöntem Wang(1993) tarafından geliştirilen çalışmalardır. Wang(1993) zemin-yapı etkileşimi analizlerinde önem kazanan bazı parametreleri (zemin-yapı rijitlik farkı- esnekli oranı (F), yapı geometrisi, deprem girdisi ve tünel derinliği) kullanarak (1975) 25 adet FLUSH sonlu elamanlar analizi gerçekleştirmiştir. Herbir analiz neticesinde eğilme katsayısı (R) elde edilmiş ve girdi olarak kullanılan esneklik oranı (F) ile arasındaki ilişki grafiksel olarak göstermiştir. Daha sonra geliştirdiği "Basitleştirilmiş Çerçeve Yönteminde" ise, deprem parametreleri ve zemin profili belirli olan bir hedef bölgede, yapılması düşünülen tünel yapısının geometrik sınırları belirlendikten sonra, dinamik sonlu elemanlar analizleri neticesinde elde ettiği R-F grafikleri kullanılarak R (Raking Katsayısı) değeri bulunur. $R=\Delta_{s} / \Delta_{(serbest-saha)}$ ilişkisinden hareketle, SHAKE ve benzeri saha tepki analizleri sonucu bulunan $\Delta_{(serbest-saha)}$ verisi ile beraber gerçek raking deformasyonu (Δ_{s}) bulunur. Bulunan deformasyon tünel dış duvarlarına üçgensel eşdeğer dağılıma sahip yükleme olarak etkitilerek tünel elemanları içerisinde oluşacak içsel kuvvetler tespit edilir. Bu kuvvetlere, tasarım şartnamesinde yer alan diğer yüklemeler de eklenerek (MDE yada ODE), kriterlere uygunluk araştırılır.

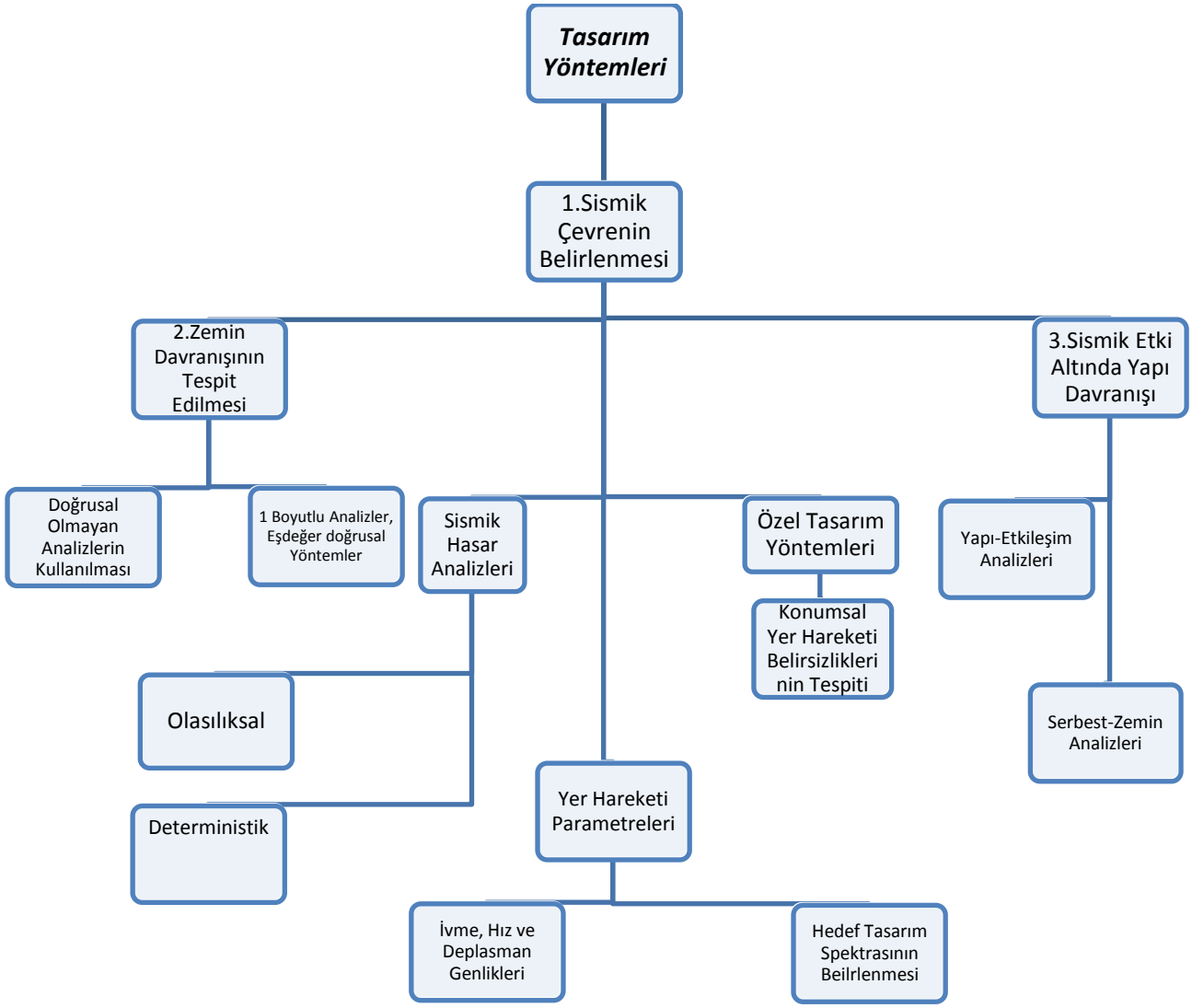
3. YER ALTI YAPILARI SİSMİK ANALİZLERİNDE OLASILIKSAL YÖNTEMLERİN KULLANILMASI

Mühendislik tasarımının temel amacı sürdürülebilir, güvenilir ve aynı zamanda ekonomik yapılar inşa etmektir. Tasarım metodları bu amaçla geliştirilmiş iki tip limit durumu sınar. Bunlar nihai limit durum ve servis sınır limit durumdur. Bu amaçla yapılan tahkiklerde yükleme ve buna karşın dayanım parametreleri belirlenen bir fiziksel model içerisindeki etkileştirilmektedir. Olasılıksal analizler genel olarak 3 farklı şekilde yapılmaktadır (Orr ve Breysse, 2008). Bu yöntemler kısaca basitleştirilmiş güvenlik katsayısının uygulandığı yöntemler, yükleme ve dayanım parametrelerinin olasılıksal olarak ifade edildiği yarı-olasılık yöntemleri (FORM ve FOSM metodları gibi) ve tüm parametrelerin rasgele alanlar olarak ifade edildiği tam olasılık yöntemleridir.

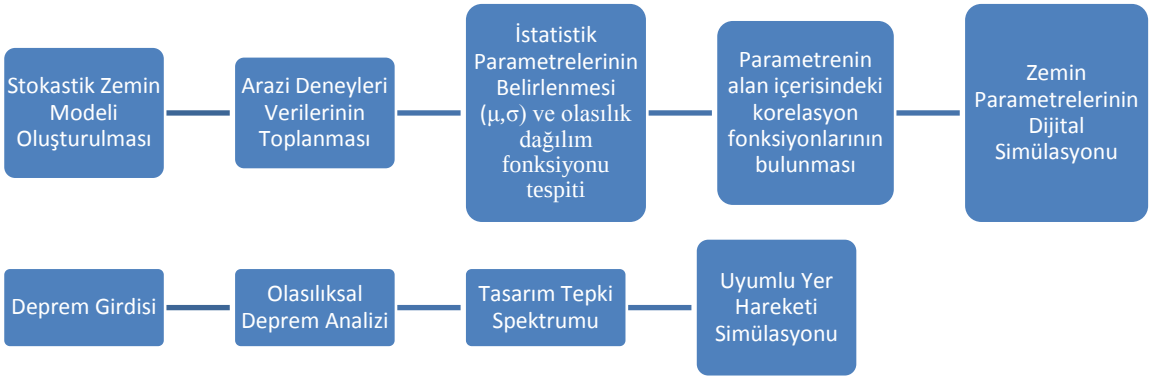
Yer altı yapılarının sismik analizlerinde olasılık yöntemleri de son yıllarda sıkça kullanılmaya başlanılmıştır. Örneğin, Schweiger ve Thurner (2007) yaptıkları çalışmada sığ tünelleri Zhou ve Nowak tarafından geliştirilen Nokta Tahmin Metoduyla incelemişlerdir. Tünel kazısı analizlerinde zemin ve yapıya ait 12 adet değişken ve bunların nokta değerlerinin belirleyip, belirledikleri performans fonksiyonlarını sonlu elemanlar programı kullanarak hesaplamışlardır. Nasekhian ve Schweiger(2010) ise rasgele parametre değerleri ile tünel kaplamasının deformasyonunu sonlu elemanlar analizleri yardımıyla incelemiş, seçmiş oldukları performans değerlerine (kaplamanın dayanabileceği maksimum normal yük ve tünel tepe deformasyonu) ait kümülatif olasılık dağılım grafiklerini elde etmişlerdir. Karakostas ve Manolis (2002) çalışmasında sınırlı elemanlar yöntemini uygulayarak rasgele olarak tasarladığı birçok parametrenin etkisini irdelemiştir. Fellin v.d. (2010) sığ tünellerdeki en önemli tasarım kuvveti olan ayna basıncının tahkiki için FOSM metodu ve Monte-Carlo simülasyonlarından yararlanarak kullanılan hesaplama modellerinin ve analitik yöntemlerin geçerliliğini sınamışlardır. Li ve Low (2010) hidrostatik yük altında bulunan dairesel geometrideki tünellerin performans fonksiyonlarını FORM algoritması kullanarak olasılıksal çerçevede incelemiştir.

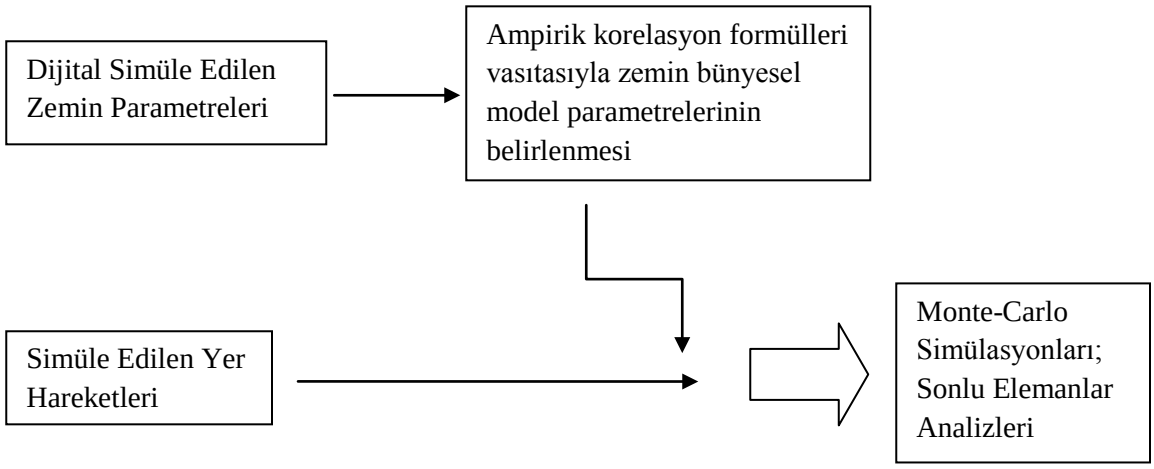
Tam olasılık yöntemler içerisinde, en çok kullanılan yöntem ise Monte-Carlo simülasyonlarıdır. Yöntemin genel esasları kısaca aşağıdaki gibidir:
Monte Carlo Simülasyonunda rasgele alanın istatistiki verilerini temsil eden birden çok simülasyon gerçekleştirilerek, herbir realizasyon deterministik bir yaklaşım ile sonlu elemanlar analizi ile çözülür. Özellikle dinamik zemin analizleri, deprem mühendisliği ve sismoloji konularında, belirsizliklerin fazla olması sebebiyle, sıkça kullanılmaya başlanılmıştır. Simülasyonların gelişen bilgisayar teknolojisi ile hızlanması ve sonuçların değerlendirilmesi aşamasında birçok yöntemin geliştirilmesi 3. Yöntem analizlerin güvenilir temelli tasarımlarda daha fazla tercih edilmelerine sebep olmuştur.

Şekil 2 ve Şekil 3'de Monte-Carlo simülasyonlarına dayalı bir fay-zemin-yapı etkileşimi probleminin çözüm yöntemin ana hatları ile göstermiştir. Zemin parametreleri ve yer hareketi rasgele alanlar teorisi kullanılarak simüle edildikten sonra her bir simülasyonda elde edilen değer kullanılarak dinamik sonlu elemanlar yöntemi ile sığ tünel problemi çözülecektir. Önceden belirlenecek bir performans fonksiyonun (limit durumları belirleyecek olan parametreler) değişken zemin ve yer hareketi etkisi altındaki davranışı incelenebilecek, sonuçlar Wang'ın oluşturduğu çalışmayı tamamlayıcı nitelikte geliştirilecektir.



Şekil 2. Sismik Yeraltı Yapılarının Tasarımında Yer Alan Aşamalar





Şekil 3. Olasılık Analizin Akış Şeması

Yukarıdaki şekillerde belirtilen yöntem içerisinde yer alan önemli kısımların kısa açıklamaları takip eden bölümde verilmiştir.

3.1. Stokastik Zemin Modeli Oluşturulması

Tüneller ve köprüler gibi boyuna devam eden yapılar için yapılacak analizlerde kullanılan zemin parametreleri belirli aralıklarla yapılan arazi deneyleri yardımıyla belirlenmektedir. Dolayısıyla, analizleri etkileyecek en önemli aşama arazi deneylerinden çıkartılan verilerin uygun bir şekilde modellenebilmesidir. Bu durumda örneğin SPT değerleri değişken bir trend değeri [t(z)] ve onun etrafında dalgalanan bir fonksiyon [w(z)] olarak (stokastik olarak modellenecek vektör) basitçe modellenebilir.

$$x(z) = t(z) + w(z) \tag{3}$$

Burada w(z) dalgalanan fonksiyonu homojen bir rasgele fonksiyon yada alan olarak düşünülür (Vanmarcke, 1988). Zemin parametresinin stokastik belirleyicileri standart sapma ($\sigma_{x(z)}$) , dalgalanma katsayısı veya otokorelasyon mesafesidir (θ_x). Stokastik bir alanın simülasyonu ile ilgili olarak birçok teknik bulunmaktadır. Bunlar arasında Spektral Temsil Yöntemi, Lokal Ortalama Yöntemi gibi yöntemler olarak sayılabilir (Fenton ve Griffiths, 2008). Örneğin, $w_0(z)$, ortalaması 0 olan tek boyutlu bir rasgele alan olarak kabul edilirse bu stokastik alanın önemli parametreleri yukarıdaki bölümde tanımlanan otokorelasyon fonksiyonu ve spektral yoğunluk fonksiyonudur. Bu stokastik süreç aşağıdaki spektral formülasyon ile simüle edilebilir. Burada f(t) gerçek süreç $f_0(t)$'nin simülasyonudur (Phoon, 2008).

$$f(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{2s(w_i)\Delta w}\, \cos(w_i t + \phi_i) \tag{4}$$

$$\Delta w = \frac{w_u}{N};\ w_i = i\Delta w; i = 0,2,\ldots.,N-1 \tag{5}$$

w_u, spektral yoğunluğun daha büyük frekans değerlerinde önemsenmeyecek kadar küçük olacağı üst kesme frekans değeridir. $\varphi_i$açıları $[0,2\pi)$ arası üniform olarak değişkenlik gösteren ve rasgele seçilerek işleme konulan faz açılarıdır. Sonuçta elde edilen süreç değerleri f(t), N-simülasyon sayısı sonsuza yaklaştıkca "Merkez Limit Teorisi" gereği (Popescu v.d., 1998) Normal dağılıma sahiptir.

3.2. Yer Hareketinin Stokastik Simülasyonlarla Belirlenmesi

Depreme dayanıklı yapıların tasarımlarıyla ilgili şartnamelerde, zaman tanım alanında yapılacak analizler için seçilen deprem kayıtlarıyla ilgili bazı kıstaslar yer almaktadır. Örneğin İYBDY'de (2008) zaman tanım alanında yapılacak analizler için en az yedi deprem yer hareketi takımı (yatay doğrultuda birbirine dik iki yatay bileşen için ivme kayıtları) aşağıdaki bazı faktörler çerçevesinde seçilmesi istenilmektedir.

- Her bir deprem yer hareketi için senaryo depremi parametreleri ile uyumlu gerçek ivme kayıtları kullanılacaktır.
- Yeterli sayıda gerçek deprem ivme kaydı bulunmadığı durumlarda ise, deprem yer hareketi simülasyonları ve tasarım spektrumu ile uyumlu olarak üretilmiş yapay yer hareketleri kullanılabilecektir.
- Yapılacak deprem yer hareketi simülasyonları faylanma mekanizması, yırtılma özellikleri, deprem kaynağı ve kayıt istasyonu arasındaki ortamın jeolojik yapısını göz önüne alan fiziksel bir modele dayalı olmalıdır.

Yine benzer şartlar Eurocode 8 kıstaslarında da belirtilmiştir (Eurocode 8 Bölüm 3.2.5). Yeterli kuvvetli yer hareketi verisinin bulunduğu bölgelerde basit ölçekleme yada direkt verinin kullanılması gibi avantajlar bulunmaktadır. Öte yandan, yeterli sayıda kuvvetli yer hareketinin bulunmadığı pek çok bölge bulunmaktadır. Bu bölgelerde yapılacak analizler için ya benzer sismolojik yapıdaki bölgelerde meydana gelen deprem kayıtları kullanılmakta yada deprem simülasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Simülasyon yöntemlerinden gerçekçi sonuçlar elde edebilmek amacıyla, analizi yapılacak bölgeye ait bir tasarım spektrumu yada spektral yoğunluk fonksiyonu gibi benzeştirme amaçlı kullanılacak bilgilere ihtiyaç vardır.

Bu amaçla yapılacak olasılıksal deprem risk analizleri kaynak ve güzergah özellikleri, hedef bölgedeki yerel zemin ve arazi koşulları kullanılarak sismolojik ve jeolojik veriler ışığında yapılacaktır. Deprem riski deterministik veya olasılıksal yöntemlerle belirlenebilir (Kramer, 1996). Deterministik yöntemlere nazaran, probabilistik deprem tehlikesi analizleri jeolojik, jeofizik, sismolojik ve tarihsel verilerin daha gerçekçi ve uyumlu bir şekilde ele alınmasını sağlar.

Yapılması planlanan çalışmada zaman tanım alanındaki yer hareketleri "zemin süreç modellenmesinde" kullanılan spektral temsil yöntemi ile durağan olmayan vektörel bir süreç olarak modellenecektir. Bu yöntem ile

istenilirse yer hareketinin konumsal olarak değişkenliği de simüle edilebilir (Shinozuka ve Deodatis, 1998). Deprem simülasyonları, yine zemin simülasyonlarının yapıldığı algoritmaya benzer olarak düzenlenecektir. Zemin simülasyonlarından farklı olarak hedef alanda kullanılacak özellik spektral yoğunluk fonksiyonu değil, tepki spektrumu olacaktır. Yapılacak çalışma şu şekilde özetlenebilir:

$$g(t) = \sqrt{2}\sum_{n=0}^{N-1} A_n \cos\left(w_n t + \varphi_n\right);\ A_n = (2S(w_n)\Delta w)^{1/2};\ w_n = n\Delta w \text{ ve } \Delta w = w_u/N. \quad (7)$$

Yukarıdaki gibi formulize edilen realizasyonlarda S(w)-spektral yoğunluk fonksiyonu- sabit bir değer olarak girilir. Daha sonraki aşamalarda, elde edilen f(t) simülasyonunun tepki spektrumu hedef tepki spektrumu ile kıyaslanarak S(w) güncellenir.

- Deprem zaman kayıtları, başlangıcı ve bir sonu olan, dolayısıyla durağan olarak modellenemeyecek simülasyonlardır. Elde edilecek simülasyonun gerçekçi olması amacıyla durağan olarak modellenen g(t) simülasyonu literatürde çeşitli şekillerde ifade edilen uygun şekil fonksiyonu ile çarpılır.

$$f(t) = g(t) \times A(t)\ ; \qquad \{A(t)\text{şekil fonksiyonudur}\} \quad (8)$$

- Daha sonra elde edilen simülasyon alanın f(t) tepki spektrumu elde edilir. ($RS_{f(w)}$) ve bir önceki bölümde anlatılan hedef tepki spektumu ($RS_{f0(w)}$) ile kıyaslanır. Yeterli yakınsama elde edilemezse , spektral yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi güncellenerek işleme devam edilir:

$$S^0(w) = S(w)\left[\frac{RS^0(w)}{RS^f(w)}\right]^{\beta} \quad (9)$$

Yer altı yapılarının sismik analizlerinde, saha tepki analizleri stokastik verilere dayalı olarak ve tekrarlı simülasyonların sonlu elemanlar analizleri ile beraber sisteme etkitilmesiyle gerçekleştirilecektir. Yukarıda anlatılan, realize edilmiş yer hareketleri ve zemin profilleri analizlerde kullanılarak serbest saha deformasyon değerleri (Δ_{diff}) olasılıksal yöntemlerle elde edilecektir.

4.SONUÇ

Yöntemleri ve hedefleri belirlenen yukarıdaki çalışma prosedürü, şu anda Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde yürütülen doktora tez çalışmasının bir taslağı niteliğindedir. Yapılması düşünülen çalışma ile beraber belirlenen hedefler aşağıda sıralanmıştır:

- Zemin parametresindeki belirsizliklerin tünel davranışı üzerindeki etkilerini gözlemlemek ve güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla 100 adet stokastik zemin simülasyonu yapılması düşünülmektedir. Bu şekilde oluşturulacak stokastik süreçler, üniform olarak rasgele seçilerek sonlu elemanlara aktarılacaktır.
- Seçilen 4 farklı tepki spektrumu ile uyumlu 120 farklı seçenekte toplamda 480 adet zaman tanım alanında yer hareketi simülasyonu yapılacaktır.
- Seçilen 480 farklı yer hareketi, herbirisi 3 adet stokastik alana etkitilmek üzere toplamda 1440 adet analiz yapılması öngörülmektedir.
- Analiz sonuçları "Güvenilirlik Analizi" bakış açısı içerisinde çeşitli araçlar ile beraber incelenecek, mevcut kodlar ve daha önce yapılan çalışmalarla (Wang, 1993) karşılaştırılarak konu üzerinde farklı bir bakış açısı getirilmeye çalışılacaktır.

KAYNAKLAR

Wang, J.N.(1993). Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-art Approach. Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc., New York, NY.

Youssef M.A. Hashash, Jeffrey J. Hook, Birger Schmidt, John I-Chiang Yao.(2001). Seismic design and analysis of underground structures. ITA/AITES Accredited Material, *Tunnelling and Underground Space Technology* **16** 247-293.

Kok-Kwang Phoon. (2008) Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering, Taylor & Francis, New York, USA. Chapter 8. Trevor L. L. Orr and Denys Breysse, Eurocode 7 and reliability-based design.

D.V.Griffiths, Gordon A. Fenton.(2007)Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering,Springer,Udine,Italy. Chapter 3.H.F.Schweiger, R.Thurner. Basic Concepts and Applications of Point Estimate Methods in Geotechnical Engineering.

A. Nasekhian, H.F. Schweiger. (2010). Random Set Finite Element Method Application to Tunnelling, 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing (REC 2010).

Christos Z. Karakostas, George D. Manolis. (2002). Dynamic response of tunnels in stochastic soils by the boundary element method, *Engineering Analysis With Boundary Elements* **26,** 667–680.

Wolfgang Fellin, Julian King, Ansgar Kirsch, Michael Oberguggenberger. (2010). Uncertainty modelling and sensitivity analysis of tunnel face stability, *Structural Safety* **32** ,402–410.

Hang-Zhou Li, Bak Kong Low. (2010). Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field. *Computers and Geotechnics* **37,** 50–58.

Eric Vanmarcke. (1988). Random Fields: Analysis and Synthesis, MIT Press, London, England.

Gordon A. Fenton, D.V.Griffiths. (2008). Risk Assessment in Geotechnical Engineering,JohnWiley and Sons,Inc.,New Jersey, USA.

Kok-Kwang Phoon (2008). Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering, Taylor & Francis, New York, USA. Chapter 6, Kok-Kwang Phoon, Numerical recipes for reliability analysis – a primer.

R. Popescu, G. Deodatis ve J. H. Prevost.(1998). Simulation of homogeneous nonGaussian stochastic vector fields, *Probabilistic Engineering Mechanics.* **13:1**, 1-13.

İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği (İYBDY)-Mayıs 2008

S.L. Kramer. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey, USA.

M. Shinozuka and G. Deodatis. (1998). Stochastic process models for earthquake ground motion. Review Paper: *Probabilistic Engineering Mechanics*, **3:3,**114-123.