

TÜRKİYE'DE GEOTEKNİK DEPREM MÜHENDİSLİĞİNDE GELİŞMELER*

Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN

Giriş

Dünyada ve Türkiye'de geoteknik deprem mühendisliği, depremler sırasında meydana gelen hasarların şiddeti ve dağılımının yerel zemin koşulları ile ilişkili olduğunun fark edilmesine paralel olarak gelişmiştir. Bu bağlamda, Geoteknik Deprem Mühendisliği kısaca “zeminlerin ve yapıların temel zemininin deprem yükleri altında davranışını ve yapılar üzerinde etkilerini inceleyen mühendislik dalı” olarak tanımlanabilir.

Geoteknik deprem mühendisliğinin başlıca çalışma alanları ise aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Arazi zemin modelinin ve dinamik tasarım parametrelerinin belirlenmesi,
- Analiz yöntemi ve zemin bünye modelinin seçimi,
- Deprem etkisinde arazi davranış analizleri
- Yapı-temel-zemin etkileşimi analizleri,
- Göçme ve aşırı yer değiştirme risklerinin belirlenmesi (taşıma gücü kaybı, aşırı oturmalar, sıvılaşma, yanıl akmalar, vb.),
- Riskleri ortadan kaldırmak için alınacak önlemlerin tasarımı ve uygulanması.

Yerel zemin koşullarının depremin yol açtığı hasara etkisinin açıklığa kavuşturulmasında, dünyanın değişik bölgelerinde ve ülkemizde büyük depremler sonrası meydana gelen hasar dağılımı gözlemleri yanında, son 60-70 yılda önemli gelişmeler kaydedilen aletsel ölçümler, zeminlerin dinamik davranışını modelleyen bünye modelleri ve analiz yöntemlerinde sağlanan gelişmeler ile yazılımlar önemli rol oynamıştır. Örneğin, 1957 San Francisco, 1965 Osaka, 1985 Mexico City, 1989 Loma Prieta depremlerinde deprem kaynağına eşit uzaklıktaki bölgelerde, çok farklı büyüklükte maksimum ivme değerleri ölçülmesi yanında, yapısal hasar dağılımının zayıf zemin koşullarına sahip alanlarda yoğunlaştığı görülmüştür. Ülkemizde de özellikle 1995 Dinar ile 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde kaydedilen maksimum ivmeler ve bina hasarı dağılımları yerel zemin koşullarının etkisini açık bir şekilde gözler önüne sermiştir.

Depremlerde oluşan yapısal hasarlar üzerinde yerel zemin koşullarının etkileri aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir:

- Temel zemininde mukavemet ve rijitlik kaybı,
- Taşıma gücü kaybı ve temel zemininde aşırı yer değiştirmeler,
- Sarsıntı şiddetinde artış (amplifikasyon) ve atalet kuvvetlerinde artış,
- Zemin-yapı etkileşiminden kaynaklanabilecek tesirler.

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışının analizi için gerekli dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi için deneysel yöntemler ve kuramsal bünye modelleri geliştirilmiş, bunları ileri nümerik analiz yöntemleri ve yazılımların geliştirilmesi takip etmiştir.

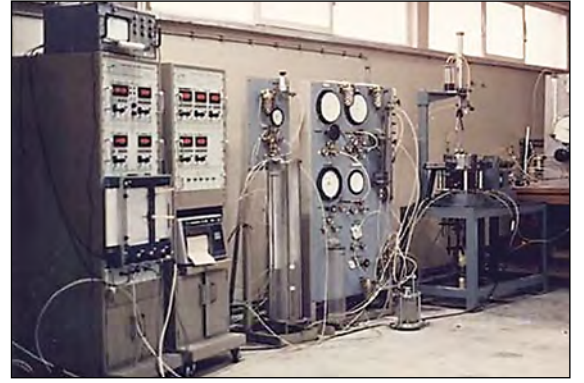
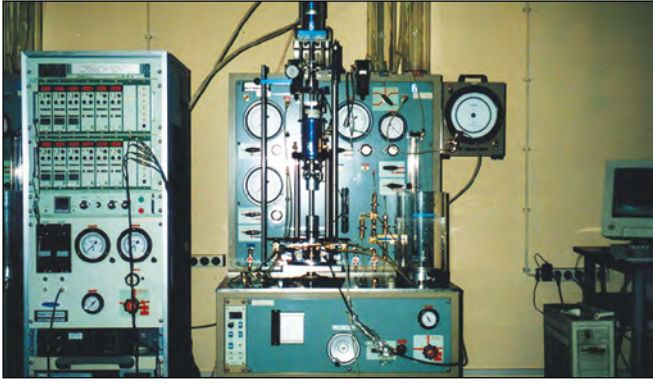
Türkiye'de Laboratuvar Olanaklarının Gelişimi

Depremler sırasında etkiyen tekrarlı ve yön değiştiren gerilmeler altında zeminlerin davranış özelliklerinin (dinamik zemin parametrelerinin) belirlenmesi için geliştirilen değişik laboratuvar deney sistemleri 1970'lerden itibaren üniversitemizin laboratuvarlarında kurulmaya başlamıştır. Ayrıca, zemin kütleleri ve yapıların deprem kuvvetleri etkisinde incelenmesine yönelik olarak fiziksel model deney sistemleri (sarsma tablası vb.) geliştirilmiştir.

Depremlerde etkiyen tekrarlı (çevrimli) gerilmeler etkisinde, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özelliklerini ve mukavemetinin belirlenmesi gerekmektedir. Tekrarlı gerilmeler zeminlerde boşluk suyu basıncı artışlarına ve artık boşluk suyu basıncı birikimlerine yol açabilmekte ve bunun sonucu olarak, killi zeminlerde drenajsız kayma mukavemeti ve rijitlik azalmaları, kumlu zeminlerde sıvılaşma gibi durumlar durumu ortaya çıkabilmektedir. Dolayısıyla, deprem yükleri etkisinde zemin davranışının analiz edilebilmesi için dinamik zemin parametrelerinin deneysel olarak belirlenebilmesi gerekmektedir.

Ülkemizde dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesine yönelik olarak, ilk dinamik üç eksenli deney sistemi İTÜ Maçka İnşaat Fakültesinde kurulmuş, bunu İTÜ İnşaat Fakültesi ve diğer üniversitemizde kurulan daha gelişmiş sistemler takip etmiştir. Üniversitemizde ayrıca fiziksel model deneyleri için değişik tip ve büyüklüklerde

* 9. Türkiye Deprem Mühendisliği Konferansı'nda sunulmuştur.



Şekil 1. İTÜ Zemin Dinamiği Laboratuvarından bazı dinamik deney sistemleri

sarsma tablası ve dinamik yükleme deney sistemleri tesis edilmiştir. **Şekil 1**'de İTÜ Zemin Dinamiği Laboratuvarından bazı dinamik deney sistemlerinin fotoğrafları görülmektedir.

Akademik Çalışmalar

1970'lerden itibaren üniversitelerimizde geoteknik deprem mühendisliği alanında araştırmalar ve tez çalışmaları yürütülmeye başlamıştır. Bu konuda tamamlanan ilk doktora tezi, İTÜ MMF İnşaat Mühendisliği Bölümünde M. A. Erguvanlı tarafından hazırlanan *Kohezyonlu Zeminlerin Dinamik Özellikleri* (1975) başlığını taşımaktadır. Aynı bölümde N. Aydınoğlu tarafından hazırlanan *Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Hesabı* (1977) başlıklı doktora tezi de zemin-yapı etkileşimi alanında bir ilki oluşturmuştur. Bugüne kadar geoteknik deprem mühendisliği ve ilgili disiplinlerde hazırlanan Y. Lisans tez sayısı 278 ve Doktora tez sayısı 72 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 1'de Geoteknik Deprem Mühendisliği alanında hazırlanan tezlerin anahtar kelime alanlarına göre dağılımı görülmektedir.

Tablo 1. Geoteknik Deprem Mühendisliği alanında hazırlanan tezlerin konulara göre dağılımı

Anahtar Kelime	Y.Lisans	Doktora	Adet
Baraj (Toprak veya Kaya Dolgu)	8	1	9
Geoteknik Deprem Müh.	76	14	90
Gömülü Yapılar	7	2	9
İstinat Yapıları	27	12	39
Sıvılaşma	73	11	84
Şevler	10	1	11
Temeller	18	8	26
Zemin Dinamiği	30	9	39
Zemin İyileştirme	10	3	13
Zemin Yapı Etkileşimi	19	11	30
TOPLAM	278	72	350

Analiz Yöntemleri ve Yazılımlar

Zeminlerin statik ve dinamik yükler altında doğrusal olmayan (non-lineer) davranış gösterdiği bilinmektedir. Deprem yükleri gibi şiddeti ve yönü gelişigüzel değişen tekrarlı yüklemeler altında, zeminin şekil değiştirme parametrelerinde yumuşama ve enerji kayıpları (sönümlenme) meydana gelmesi yanında, adımsal olarak biriken boşluk suyu basınçları oluşmakta ve zeminin karşı koyabileceği kayma gerilmeleri (kayma mukavemeti) bu değişken ve hızlı yükleme koşullarından etkilenmektedir. Dolayısıyla, deprem yükleri etkisinde zemin davranışını analiz edebilmek için öncelikli olarak bu koşulları modelleme kapasitesine sahip bünye denklemleri ve bunları kullanabilen hesap yöntemleri gerekmektedir.

Son yıllarda çok karmaşık dinamik yükleme koşullarında zemin davranışını modellemeye yönelik zemin bünye denklemleri (dinamik boşluk suyu basıncı, sıvılaşma vb.) ve arazide yer alan zemin çökellerinin depremler sırasında davranışının analizine yönelik nümerik hesap yöntemlerinde önemli gelişmeler (lineer, eşdeğer lineer, non-lineer analiz) meydana gelmiştir. Nümerik analiz yöntemleri (1D, 2D ve 3D) ve zemin bünye denklemlerinin gelişmesine paralel olarak, sismik tepki analizlerini gerçekleştirmek için birçok yazılım kullanıma sunulmuştur. Birçoğu ülkemizde de kullanılan bu yazılımlara ilişkin özet bilgiler aşağıda sunulmaktadır.

Bir boyutlu analiz yazılımlarının bazıları ile lineer ve eşdeğer analiz yapılabilirken (**Shake2000**, **ProShake 2.0**, vb.) diğer bazıları ile non-lineer zemin davranışı dikkate alınabilmekte, dinamik boşluk suyu basıncı ve efektif gerilme hesabı, sıvılaşma hesabı yapılabilir (DEEPSOIL, CYCLIC 1D, vb.). İki boyutlu analizler genellikle sonlu elemanlar yöntemi (**PLAXIS 2D,QUAKE/W vb.**) veya sonlu

farklar yöntemi (**FLAC**) kullanılarak, non-lineer zemin davranışı, dinamik boşluk suyu basıncı ve efektif gerilme hesabı, sıvılaşma hesabı yapılmasına imkan sağlamaktadır. Bu yazılımların üç boyutlu analiz yapan sürümleri de mevcut olup (**PLAXIS 3D, FLAC 3D**) ayrıca, statik ve dinamik adımsal analiz, frekans ve zaman tanım alanında non-lineer analiz, ileri düzey malzeme ve zemin bünye modelleri, sıvılaşma için bünye modeli, zemin-yapı etkileşimi, zemin-su-yapı etkileşimi, bütünsel zemin modelleme özellikleri barındıran yazılımlar (**ABAQUS, 2D-3D, DIANA FEA: 2D-3D,vb.**) bulunmaktadır.

Özet olarak, ileri zemin modeller de içeren, lineer, eşdeğer lineer ve non-lineer analiz yapabilen birçok yazılım mevcut olmakla birlikte, arazi zemin modeli ve sınır koşullarının doğru tanımlanması yanında, uygun zemin parametreleri seçerek (modeller karmaşıklıklaştıkça parametre sayısı artıyor!) analiz yapılmasının ve sonuçlarının doğru mühendislik yorumları ile değerlendirilmesinin önemli olduğuna inanıyorum.

Deprem Yönetmelikleri

Depreme dayanıklı yapı tasarımına yönelik kuralları içeren yönetmelikler, depremlerden sonra yapılan hasar dağılımı incelemelerinden çıkarılan dersler ışığında ve deprem mühendisliği bilgileri geliştikçe sürekli olarak yenilenmekte/güncellenmektedir. Türkiye’de konuya ilişkin yönetmelikler, 1968, 1975, 1997/98, 2007 yıllarında yayımlanmış ve en son 2018 yılında güncellenmiştir. Yönetmeliklerimizde zemin özelliklerinin yapısal davranış üzerinde etkilerinin sistematik bir şekilde dikkate alınması 1975 yönetmeliği ile başlamış, ancak 2018’e kadar bu konuda önemli bir güncelleme yapılmamıştır.

Deprem yönetmeliklerinde yerel zemin koşullarının etkisini dikkate alabilmek için, geçmişteki kuvvetli deprem kayıtları ve yapısal hasar dağılımları ile yerel zemin koşulları arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak değerlendiren “**zemin sınıflandırma sistemleri**” geliştirilmiştir. Farklı zemin sınıfları için spektral davranış bağıntıları (veya eğrileri) öngörülmekte ve bağıntıları tanımlamak için bazı “**arazi katsayıları**” kullanılmaktadır. Ülkemizde değişik tarihlerde yayımlanan deprem yönetmeliklerinde benimsenen yaklaşımlar aşağıda özetlenmektedir.

1968 Yönetmeliğinde: **3 adet deprem bölgesi, 3 adet zemin sınıfı** ve bunlara karşılık gelen **3 adet deprem zemin katsayısı** yer almakta, ancak yapı doğal periyodu ve spektral parametreler dikkate alınmamaktadır.

1975 Yönetmeliğinde: **4 adet deprem bölgesi, 4 adet zemin sınıfı**, yapı doğal periyodu ve zemin hâkim periyodu cinsinden **yapı dinamik (spektrum) katsayısı** ve **4 adet zemin hâkim periyoduna** yer verilmiştir.

1997 Yönetmeliğinde: **4 adet deprem bölgesi, 4 adet yerel zemin sınıfı**, yapı doğal periyodu ve zemin hâkim periyodu cinsinden tasarım ivme spektrumu ve **spektrum karakteristik periyotlarına** yer verilmiştir.

2007 Yönetmeliğinde: **4 adet deprem bölgesi, 4 adet zemin cinsine** ve tabaka kalınlıklarına bağlı **4 adet yerel zemin sınıfı**, yapı doğal periyodu ve zemin hâkim periyodu cinsinden elastik **spektral ivme spektrumu** ve **spektrum karakteristik periyotlarına** yer verilmiştir.

2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY)

Son güncellenmiş deprem yönetmeliğimizde geoteknik deprem mühendisliği kapsamındaki konulara daha geniş yer verilmiştir. Bu bağlamda, zemin araştırmalarının kapsamı, zemin koşullarının, sınıf ve parametrelerinin belirlenmesi, bina temellerinin ve bodrum perdelerinin deprem etkisi altında tasarımı, yapı-zemin etkileşimi analizleri, zemin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, zemin dayanma (istinat) yapılarının ve şevlerin deprem etkisi altında tasarım ilkeleri başlıkları altında ayrıntılı kurallara, ayrıca ekler bölümünde arazi zemin özelliklerinin yerinde iyileştirilmesine ilişkin genel kurallara yer verilmiştir. Aşağıda yönetmeliğin önemli bölümlerine kısaca değinilmektedir.

Deprem Tehlike Haritaları ve Yatay Elastik Tasarım Spektrumu

Deprem bölgeleri yaklaşımı terk edilmiş, bölgesel deprem tehlikesinin tanımlanmasında, dört farklı deprem yer hareketi düzeyi için hazırlanan *Deprem Tehlike Haritaları* kapsamında, iki adet boyutsuz spektral ivme değerini: kısa periyod harita spektral ivme katsayısı, S_s ve 1.0 s periyod için harita spektral ivme katsayısı, S_1 değerlerini veren *Spektral İvme Haritaları* düzenlenmiştir. Harita spektral ivme katsayıları, yerel zemin sınıfına göre seçilen *yerel etki katsayıları* kullanılarak, *Tasarım Spektral İvme Katsayılarına* (S_{DS} ve S_{D1}) dönüştürülmekte ve *Yatay Elastik Tasarım Spektrumu* elde edilmektedir.

Deprem Etkisi Altında Sahaya Özel Zemin Davranış Analizleri

Zemin davranış analizlerinin, yatay tabakalı serbest *zemin modeli* çerçevesinde taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketi altında *doğrusal*

olmayan dinamik zemin parametreleri esas alınarak yapılması öngörülmektedir. ZF sınıfı olarak tanımlanan zeminlerin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek üzere sahaya özel zemin davranış analizinin yapılması zorunluluğu getirilmektedir. Sivilaşma potansiyeli olan zeminlerde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılacaktır. Sahaya özel serbest zemin analizleri sonuçları, kazıklı temeller için kinematik etkileşim analizlerinde de deprem verisi olarak kullanılacaktır.

Zemin Sıvılaşma Riskinin Değerlendirilmesi

Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1, DTS=1a, DTS=2 ve DTS=2a olan binalar için, ZD, ZE veya ZF grubuna giren ve sürekli bir tabaka veya kalın mercerler halinde bulunan sıvılaşabilir zeminlerde, sıvılaşma potansiyelinin arazi ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve analiz sonuçlarının ayrıntılı olarak rapor edilmesi zorunludur.

Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu zeminlerin deprem sarsıntısı altında, boşluk suyu basıncındaki artışa paralel kayma mukavemeti ve rijitliğindeki önemli oranda azalış olarak tanımlanacaktır.

Zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesine yönelik olarak yapılacak zemin araştırma çalışmaları en az, standart penetrasyon deneyi, (SPT) ve/veya koni penetrasyon deneyinin (CPT)'nin yapımına ek olarak, dane çapı dağılımı, su muhtevası ve Atterberg limit değerlerinin belirlenmesini içerecektir. Zemin sıvılaşma değerlendirmesinin SPT deney sonuçları kullanılarak yapılmasına dayanan yöntem **EK 16B**'de verilmektedir.

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının ≥ 1.10 olması öngörülmektedir. Zemin sıvılaşması değerlendirmesinde, sıvılaşma sonrası zeminin mukavemet ve rijitlik kaybı ile temel zemininde oluşabilecek yer değiştirmelerin de dikkate alınması gerekmektedir.

Temellerin Tasarımı

Yüzeysel ve derin temellerin geoteknik tasarımı için taşıma gücü ilkesi esas alınmıştır. Olası göçme mekanizmalarına karşı gelen tasarım taşıma gücünün yeterliliği için, statik ve depremi içeren yükleme durumlarına ilişkin tasarım etkilerinin ilgili göçme mekanizmasına karşı gelen tasarım dayanımı ile karşılanacağı gösterilecektir. Tasarım dayanımı karakteristik dayanım değerinin dayanım

katsayısına bölünmesi ile bulunacaktır. Dayanım katsayısı değerleri temel türüne ve hesaplanan dayanım bileşenine göre **Tablo 16.2** (Yüzeysel Temeller) ve **Tablo 16.4**'de (Kazıklı Temeller) verilmiştir.

Kazıklı Temellerin Deprem Hesabı

Görelî yumuşak zeminlerde kazıklı olarak inşa edilen binalarda yapı - kazık - zemin etkileşimi, özellikle kazıkların deprem davranışını önemli derecede etkilemektedir. Bu nedenle, zayıf zeminlerde temeli kazıklı olan binalarda yapı - kazık - zemin etkileşiminin göz alınması gerekmektedir.

Dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi çerçevesinde iki farklı yaklaşım benimsenebilecektir:

- (a) Ortak sistem yaklaşımı: Üstyapı, bina temeli, kazıklar ve zemin bir arada modellenerek, analizde tüm kısımların doğrusal olmayan davranışlarının göz önüne alındığı sistem
- (b) Alt sistem yaklaşımı: Üstyapı-temel alt sistemi ile temel-kazık-zemin alt sistemi ayrı ayrı modellenip birbirleri ile etkileşiminin de dikkate alındığı sistem

Alt sistem yaklaşımı çerçevesinde yapı-kazık-zemin etkileşimi hesabında, kinematik ve eylemsizlik etkileşimi aşamaları için kullanılabilecek hesap yöntemleri ile tasarım kurallarının ayrıntıları **EK 16C**'de verilmiştir. Yöntem I, Yöntem II ve Yöntem III olarak adlandırılan bu yöntemlerin uygulama alanları Yerel Zemin Sınıfı'na, Deprem Tasarım Sınıfı'na ve Bina Yükseklik Sınıfı'na bağlı olarak **Tablo 16.5**'de tanımlanmış, kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimi analizlerinde kullanılacak bu üç yöntem **EK 16C**'de açıklanmıştır.

Bodrum Perdelerine Etkiyen Zemin Basınçları

Zeminin doğrusal olmayan davranışı ve boşluk suyu basınçlarının dikkate alındığı, bodrum perdelerini içeren duvar-zemin etkileşim modelleri ile hesap yapılmadığı durumlarda, binaların rijit bodrum çevre perdelerine etkiyen ek dinamik zemin basınçları, ve kohezyonsuz zeminlerde, statik su basıncına ek statik-eşdeğer dinamik su basıncının değişimi aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilecektir.

$$\Delta p = 0.4 S_{DS} \gamma H_b \quad \Delta p_{su}(z) = \frac{7}{8} (0.4 S_{DS}) \gamma_{su} \sqrt{z d_{su}}$$

Deprem Etkisi Altında Dayanma Yapılarının Tasarımı

Dayanma yapıları, deprem sonrasında işlevlerine zarar vermeyecek mertebelerde yer değiştirmelere izin verilecek şekilde tasarlanabilecektir. Toprak

basınçlarının hesabında kullanılacak yatay ve düşey statik-eşdeğer deprem katsayıları aşağıda verilmiştir. Burada r katsayısı izin verilebilir yer değiştirme miktarına bağlı olarak seçilebilecektir.

$$k_h = \frac{0.4S_{DS}}{r} ; k_v = 0.5k_h$$

Değeri izin verilebilir yer değiştirme miktarına bağlı olan r katsayısı için 1.0, 1.5 veya 2.0 değerinin kullanılabilmesi, yatay ve düşey statik eşdeğer deprem kuvvetlerinde %50'ye varan azaltıma izin verilebilmesi anlamına gelmektedir.

Deprem Etkisi Altında Şevlerin Duraylılığı

Deprem durumunda şevlerin duraylılığı, killi zeminlerde drenajsız kayma mukavemeti kullanılarak yapılacak toplam gerilme analizi ile, kumlu (kohezyonsuz) zeminlerde ise efektif gerilme analizi ile yapılacaktır. Özel riskler içeren durumlar hariç toptan göçmeye karşı güvenlik sayısının en az 1.10 olması yeterli kabul edilecektir.

İzin verilebilir yer değiştirme kriterlerinin geçerli olduğu durumlarda, Newmark kayan rijit blok yöntemi veya eşdeğer yöntemlerle, dinamik etkilerle uyumlu zemin mukavemet parametreleri kullanılarak kalıcı yer değiştirmeler hesaplanabilecektir.

Deprem Zararlarının Azaltılmasına Yönelik Çalışmalar

Özellikle 1999 depremlerinden sonra, deprem zararlarının azaltılmasına yönelik olarak depremden önce yapılması gereken çalışmalara ilişkin bilinçlenmede bir artışın ortaya çıktığı gözlenmektedir. Ancak, bu bilinçlemenin zamanla azaldığı gözlenirken, konunun tüm paydaşları tarafından gereğinin tam olarak yerine getirildiğini söylemek pek mümkün görünmemektedir. Aşağıdaki paragraflarda,

(i) kamu otoriteleri ve üniversiteler tarafından gerçekleştiren planlamaya yönelik bazı çalışmalara, (ii) sismik tepki analiz çalışmalarına ilişkin iki örneğe, (iii) yapı-kazık-zemin etkileşimine ilişkin bir örneğe ve (iv) zemin iyileştirme tasarımına ilişkin bir örneğe kısaca değinilecektir.

(i) Deprem hasarlar senaryoları ve hasarların azaltılmasına yönelik çalışmalar kapsamında yapılan çalışmalar aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir:

- Kentsel Jeoloji ve Zemin Haritaları Hazırlanması
- Durum Tespiti Çalışmaları

- Yapı Özelliklerinin Belirlenmesi ve Güçlendirme Çalışmaları
- Sismik Mikrobölgeleme Çalışmaları.
- Hasar Dağılımı ve Can Kaybı Senaryoları

Bu kapsamda, AFAD, Üniversiteler, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü ile Belediyeler tarafından birçok ilimizde çalışmalar yürütülmüş olup güncelleme çalışmaları devam etmektedir. Bunlar arasında birini özellikle hatırlatmak (ve unutulması önlemek) istiyorum.

İstanbul Deprem Master Planı (2002)

İTÜ, ODTÜ, YTÜ ve Boğaziçi Üniversitesi'ne İBB Başkanlığı tarafından hazırlanmıştır.

Bu çalışma ile durum tespiti yanında; yapı inceleme ve güçlendirme, imar uygulamaları, hukuki çalışmalar, mali kaynak çalışmaları, eğitim çalışmaları, sosyal faaliyetler, afet ve risk yönetiminin “temel ilke” ve “esasları” belirlenmiştir.

Çok geniş bir kadro tarafından aylar süren çalışmalar onucunda hazırlanan bu planın genel ilkelerinin hala geçerli olduğuna ve yürütülmekte olan veya ileride gerçekleştirilecek güncelleme çalışmalarına altlık teşkil edebileceğine inanıyorum.

Seismic Microzonation and Earthquake Damage Scenarios For Urban Areas

A. ANSAL, A. KURTULUŞ, G. TÖNÜK

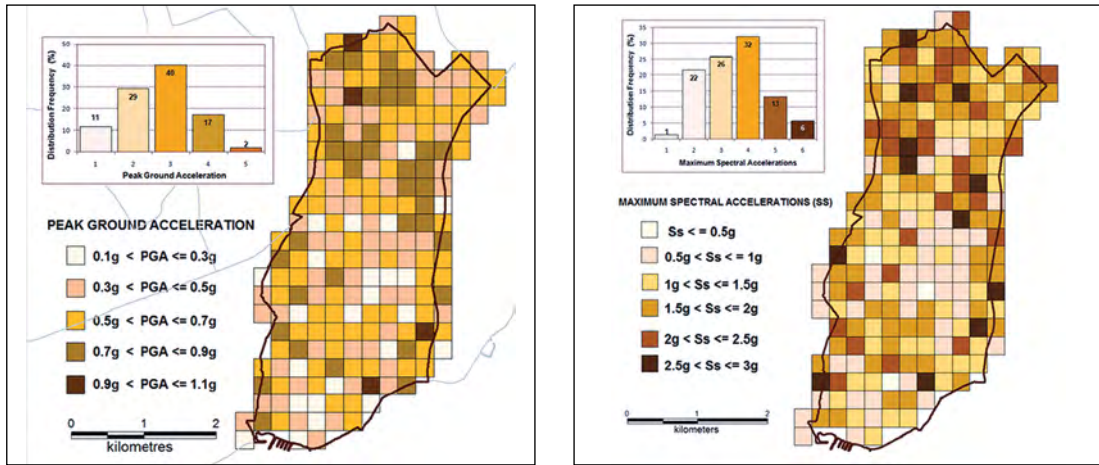
Bu çalışmada İstanbul Zeytinburnu ilçesi için gerçekleştirilen bir sismik mikrobölgeleme ve deprem kayıpları senaryo çalışmasının sonuçları sunulmaktadır (**Şekil 2 ve Şekil 3**).

Fatih Camii Arazisi Deprem Davranış Analizi

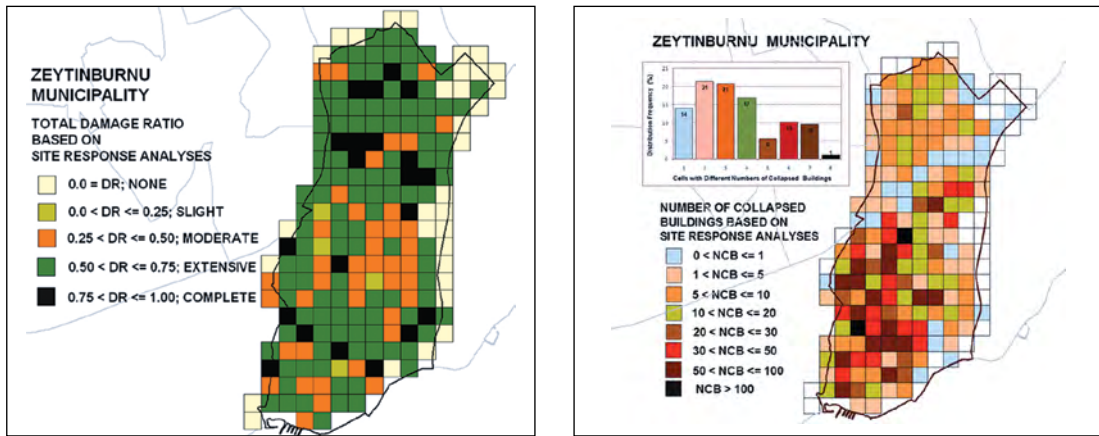
K. ÖZAYDIN, A. ANSAL, M. YILDIRIM ve M. BERİNGEN

Fatih Camii ve Külliyesi temel zemininin olası bir deprem sırasında davranışı, inceleme alanına özel deprem kayıtları kullanılarak, tek boyutlu ve iki boyutlu saha davranış analizleri ile araştırılmış ve yapısal davranış analizi için gerekli parametreler belirlenmiştir (**Şekil 4**).

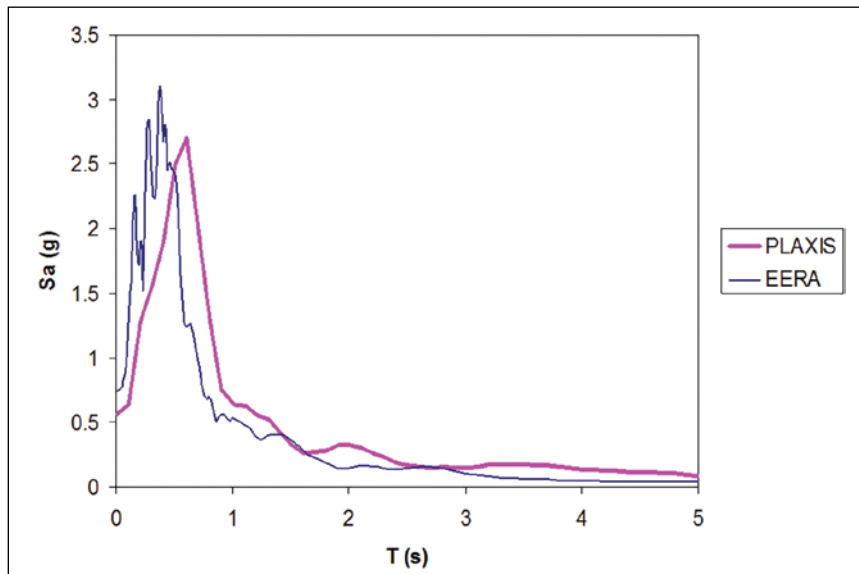
Zemin profili içinde sıvılaşma veya benzeri büyük mukavemet kaybına neden olacak tabakalar bulunmadığı tespit edilmiştir. Beklenilebilecek sismik büyütme ve yapılara etkiyecek kuvvetlerin hesabında dikkate alınabilecek ivme spektrumları hesaplanmış, topoğrafik etkilerin fazla belirgin olmayacağı sonucuna varılmıştır.



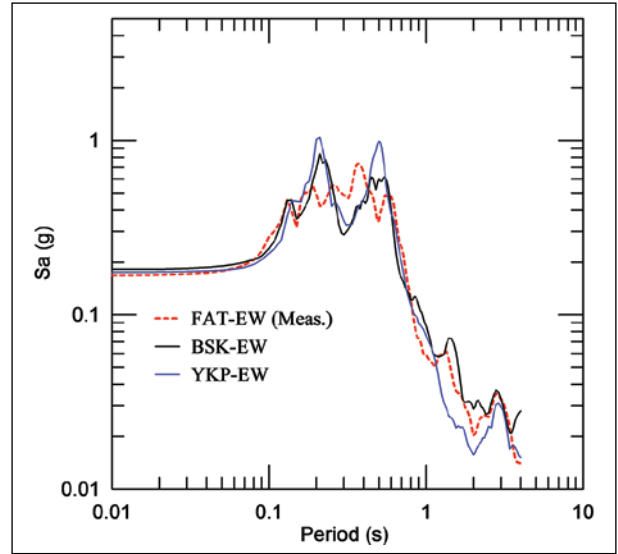
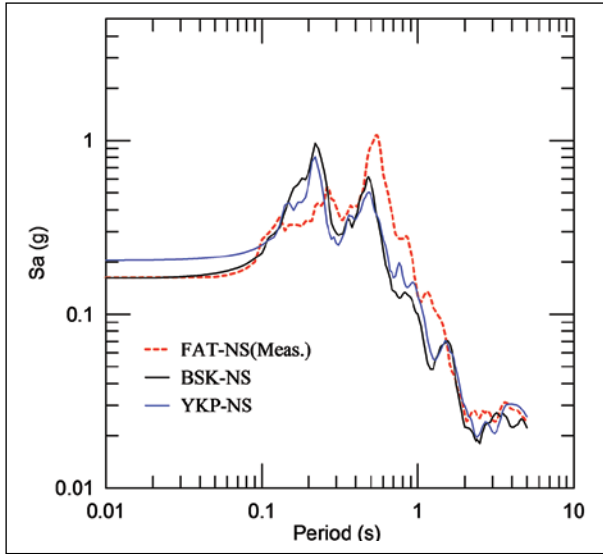
Şekil 2. Pik Yer İvmesi Dağılımı (solda) ve Maksimum Spektral İvme Dağılımı (sağda) Öngörülleri



Şekil 3. Toplam Hasar Oranı Dağılımı (solda) ve Toptan Göçme Dağılımı (sağda) Öngörülleri



Şekil 4. Sahaya özel deprem yer hareketi etkisinde 1D ve 2D analiz ile belirlenen ivme spektrumları



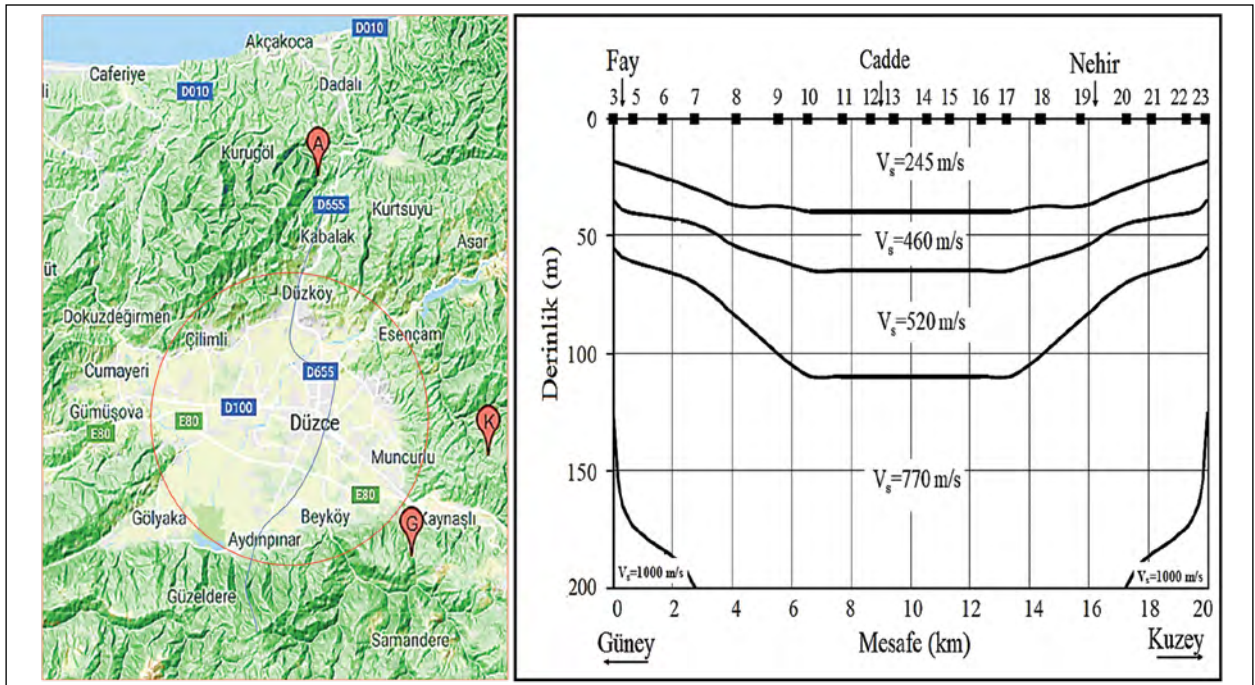
Şekil 5. 1999 Kocaeli Depreminde Üç İstasyonda Kaydedilen Yer Hareketi Etkisinde İvme Spektrumları Karşılaştırması (N-S ve E-W)

1999 Kocaeli depreminde İstanbul'da taban kayasının yüzeylendiği iki ayrı bölgede (Levent ve Beşiktaş) kaydedilen deprem hareketleri girdi olarak kullanılarak elde edilen ivme spektrumlarının Fatih kaydı spektrumu ile karşılaştırması ise **Şekil 5**'de görülmektedir. İki boyutlu analiz ile elde edilen sonuçların oldukça uyumlu olması, kullanılan analiz modelinin geçerli olduğunu göstermektedir.

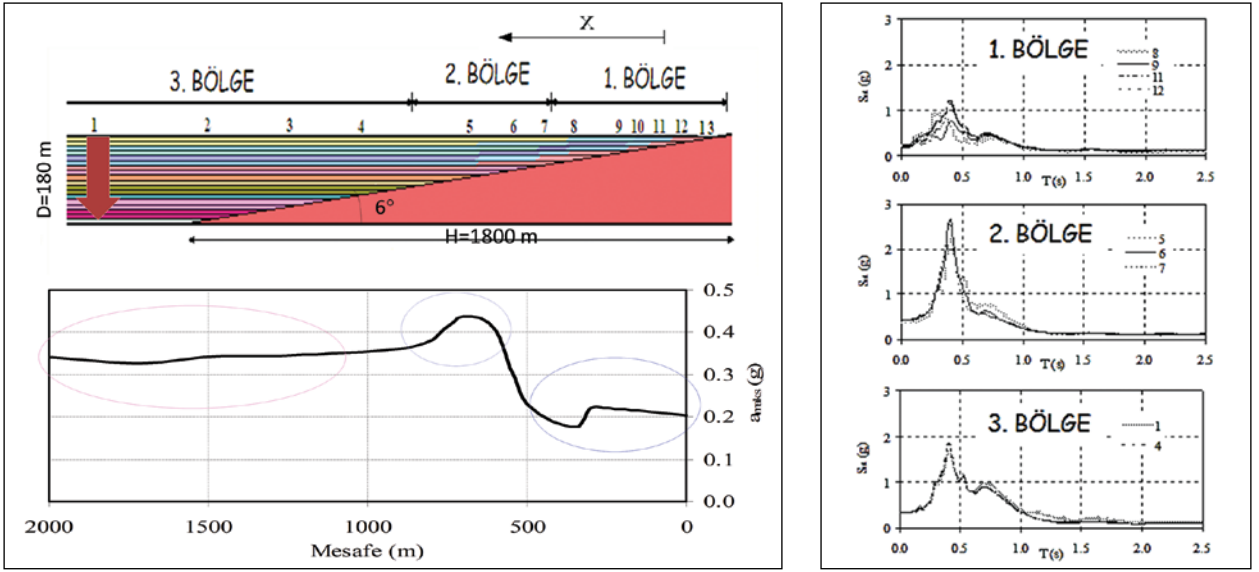
**Zemin Büyütmesinde Anakaya Eğimi Etkisi:
Bir ve İki Boyutlu Davranış**

Recep İYİSAN, Bilal ÖZASLAN, Murat Emre HAŞAL

Bir boyutlu büyütme analizleri yatay tabakalanma için geliştirilmiş olup, analiz sonuçlarının taban kayasının eğimli ve iki boyutlu tesirlerin öne çıktığı vadi kenarlarında geçerliliği sorgulanmaktadır.



(a) Analizlerde kullanılan Düzce Vadi Modeli



(b)Şevin üç bölgesine oluşacağı hesaplanan maksimum ivmeler ve ivme spektrumları

Şekil 6. Vadi Kenarını Oluşturan Şevin Üç Ayrı Bölgesinde Oluşacağı Hesaplanan Maksimum İvme Değerlerinin Değişimi ve İvme Spektrumları

Bu çalışmada Düzce Havza Modeli örnek alınarak, şev üstünde, ortasında ve ovada oluşacak maksimum ivmeler ve ivme spektrumları hesaplanmıştır.

Şekil 6'da gösterilen hesap sonuçlarından, yüzey ivmesi ve spektral ivmede en fazla büyütme etkisinin şev ortasında beklenilebileceği görülmektedir.

Depremde Yapı - Kazık - Zemin Etkileşimi İçin Pratik Bir Yöntem

M. Nuray AYDINOĞLU, U. Utku CELEP,
Göktürk ÖNEM

Yapı-zemin etkileşimi genel olarak iki yöntem ile analiz edilebilir:

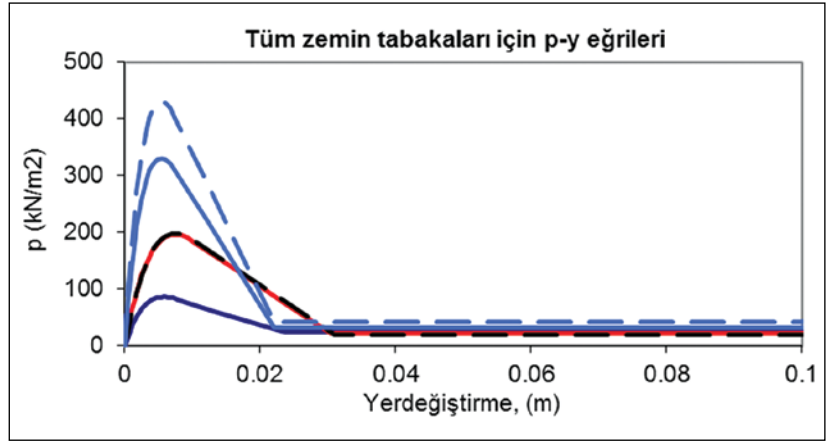
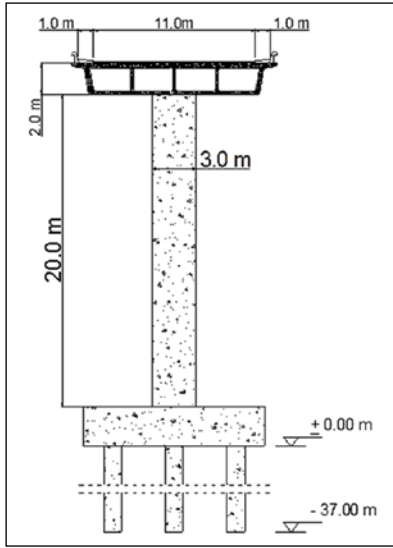
1. Ortak Sistem Yöntemi- Üstyapı ile zeminin tek bir ortak sistem olarak sonlu eleman modeli ile idealleştirildiği ve taban kayasında tanımlanan depremin etkisi altında analiz edildiği yöntem. Bu yöntemde, zemin ve üstyapıdaki tüm geometrik ve mekanik özellikler ile non-lineer davranış uygun bir biçimde göz önüne alınabilir. Zemin ortamının sonsuzluğunu ifade edebilmek için bu ortamın dış sınırlarına “geçirgen sınırlar” adı verilen yapay sınır koşulları uygulanır. Böylece temelden yansıyarak ve üst yapıdan geri dönerek zemin ortamı içinde dış doğru yayılan deprem dalgalarının, sonlu eleman modelinin sınırlarından tekrar yansıyarak zemin ortamına geri dönmesi önlenmiş olur.

2. Alt sistem Yöntemi: kazıklarla birlikte zemin ortamı ve üstyapı ayrı ayrı birer alt sistem olarak modellenir. Zemin-kazık alt sisteminde, eğer varsa zemin iyileştirmesi de (taş kolon, jet grout, vb) göz önüne alınarak, tabakalı zeminin non-lineer dinamik özellikleri, temel geometrisi ve sınır koşulları ve eğer varsa kazıkların da non-lineer dinamik özellikleri dikkate alınır. Temelin kütlesi göz önüne alınmaz ve modelin dış sınırları olarak geçirgen sınırlar kullanılır.

Bu çalışmada, ortak sistem yaklaşımı ile zemin-kazık-yapı etkileşimi analizi için aşağıdaki üç aşamadan oluşan bir non-lineer dinamik etkileşim analizi yöntemi önerilmektedir:

- Kazık-zemin etkileşiminin non-lineer p-y, t-z ve Q-Z yayları ile modellenmesi.
- Taban kayasında tanımlanan depremin etkisi altında tabakalı serbest zeminin non-lineer deprem davranış analizi.
- Serbest zemin analizinden elde edilen yatay toplam yer yer değiştirmelerin sadece basınca çalışan p-y yayları aracılığı ile kazıklara aktarılması ve non-lineer olarak modellenilebilecek üstyapı ile birlikte ortak sistemin zaman tanım alanında analizi (dinamik yer değiştirme yüklemesi analizi).

Önerilen yöntemin ortak sistem yaklaşımı ile uygulanmasına tipik bir örnek sunmak üzere bir köprü ayağı ve 80 cm çaplı kazıklı temelin

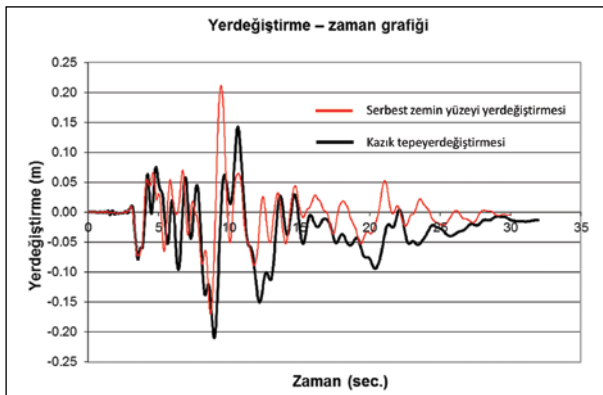
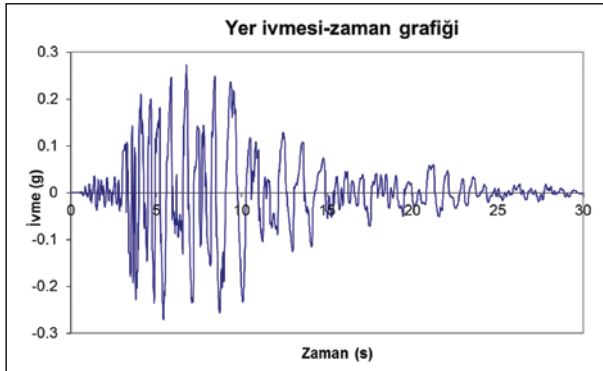


Şekil 7. Köprü ayağı ve kazıklı temelinden oluşan üstyapı-kazık-zemin ortak sistemi ve tüm zemin tabakaları için tanımlanan non-lineer p-y eğrileri

oluşturduğu yapı-kazık zemin ortak sisteminin deprem analizi SAP 2000 programı ile yapılmıştır.

Köprü ayağı ve kazıklı temelinden oluşan üstyapı-kazık-zemin ortak sistemi ve tüm zemin tabakaları

için tanımlanan non-lineer p-y eğrileri **Şekil 7**'de gösterilmiştir. Sadece basınca çalışan nonlineer zemin yaylarının histeretik davranışı için, kazık ile zemin arasında boşluk oluşmasına imkân veren Takeda modeli kullanılmıştır.



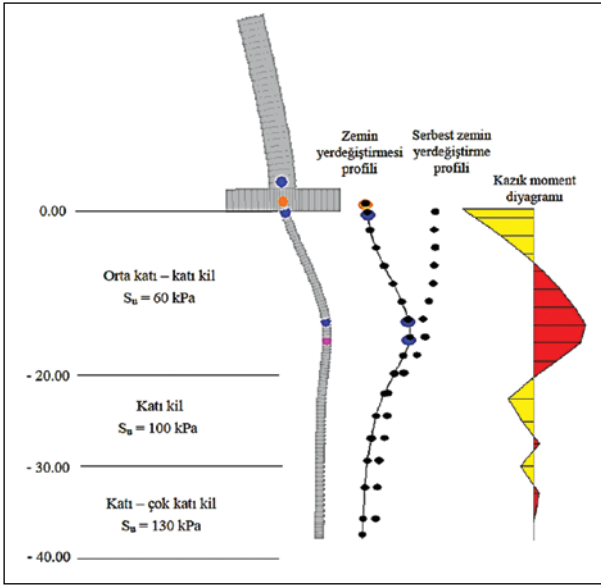
Şekil 8. Serbest zemin tabanına uygulanan deprem yer ivmesinin zamana karşı değişimi ile kazık tepe yer değiştirilmesi ve serbest zemin tepe yer değiştirilmesinin zamana göre değişimi

Non-lineer serbest zemin analizinde -40.00m kotunda serbest zemin tabanına uygulanan deprem yer ivmesinin zamana karşı değişimi ile kazık tepe yer değiştirilmesi ve serbest zemin tepe yer değiştirilmesinin zamana göre değişimi **Şekil 8**'de gösterilmiştir.

Ortak sistemin toplam yer değiştirme profili, kazıkla temastaki zemin ile serbest zeminin toplam yer değiştirme profilleri ve tipik bir kazığın moment diyagramı **Şekil 9**'da toplu biçimde gösterilmiştir.

Yer değiştirmelerde etkileşim nedeni ile dikkat çekici farklılıklar olduğu gözlenmektedir. İlk 20 m derinlik boyunca göreceli olarak zayıf bir zemin tabakasının varlığı ve killerin p-y eğrilerinde görülen dayanım kayıpları nedeni ile kazıklarda kesinlikle istenmeyen zemin içi plastik mafsallaşmalar oluşabilmektedir.

Sonuç olarak, deprem etkisi altında dayanım kaybına uğrayabilen zayıf zeminlerde inşa edilecek kazıklı temellerin üstyapı ile birlikte bir yapı-kazık-zemin etkileşimi modeli çerçevesine zaman tanım alanında nonlineer zemin, kazık ve üstyapı davranışı dikkate alınarak nispeten kolayca analiz edilebileceği pratik bir yöntem önerilmiştir. Yöntemin belki de tek önemli eksiği, eylemsizlik etkileşimi bağlamında üstyapı ve kazıklardan zemine geri dönen titreşimlerle ilgili radyasyon



Şekil 9. Kazıklı temastaki zemin ile serbest zeminin toplam yer değiştirme profilleri ve tipik bir kazığın moment diyagramı

sönümü etkisini ihmal etmesidir. Ancak bu varsayım kazık davranışı bakımından güvenli yöndedir. Kazıklı temele sahip tipik bir köprü ayağı modeli ile yapılan uygulama örneği, zayıf zeminlerde inşa edilecek kazıklı temellerde nonlineer yapı-kazık-zemin etkileşimi analizlerinin mutlaka yapılması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Zemin İyileştirmesi Derinliğinin ve Etkinliğinin İncelenmesi

U. Utku CELEP

Ülkemizde zayıf/sıvılaştırılabilir temel zemini tabakalarının iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan rijit kolonlarla iyileştirme hesaplarına

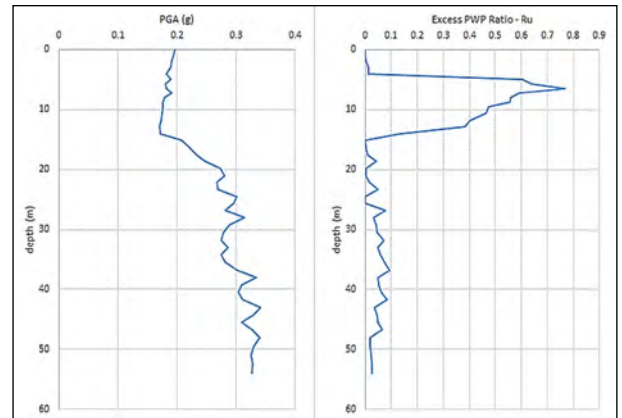
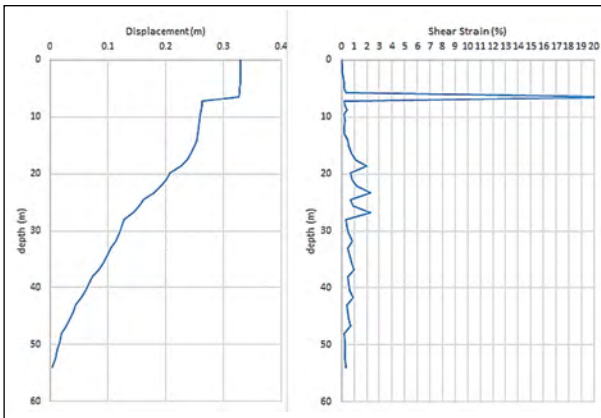
ilişkin bu çalışmada aşağıdaki analiz adımları izlenmiştir.

- Deprem etkisinin tanımlanması ve zemin davranış analizine esas deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi gerçekleştirilmiştir.
- İyileştirilmemiş zemin modeli üzerinde gerçekleştirilen 1D non-linear zemin davranış analizi sonuçları ışığında iyileştirme derinliğinin optimum aralığının seçimi- efektif gerilme yöntemi ile zaman tanım alanında yapılan 1D analizlerde tüm zemin birimlerinde boşluk suyu basıncının artışı ve sönümlenmesi modellenmiş ve olası sıvılaştırılabilir katmanlar belirlenmiştir.
- İyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş zeminde 2D non-linear zemin davranış analiz ile temel zemininde oturma ve yatay deformasyonlar hesaplanmış ve proje kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Hesap sonuçları **Şekil 10**'da gösterilmiştir.

Arazi davranış analizleri sonuçları, iyileştirme derinliğinin 15-20m arasında olmasının yeterli olabileceğini göstermiştir. Hesap sonuçlarına göre iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin modelinde

	Temel Ortası'nda Oturma	Temel Kenarı'nda Oturma	Oturma Açısı
	u_{y-ort} (m)	u_{y-ort} (m)	θ_{ort} (m)
İyileştirilmemiş Durum	0.3	1.39	-0.0104
İyileştirilmiş Durum	0.2	0.29	-0.0009



Şekil 10. 1D Zemin davranış analizi ortalama sonuçları, soldan sağa: yanal yer değiştirme(m), kayma şekil değiştirme (%), pik zemin ivmesi (g) ve artık boşluk suyu basıncı oranının derinlikle değişimi

temel ortası ve temel kenarında hesaplanan kalıcı oturmaların ortalamaları, zemin iyileştirmesinin uygulanması durumunda toplam ve özellikle farklı oturmalarda büyük oranda azalmalar beklenilebileceğini göstermiştir.

Sonuçlar

Depremde oluşan yapısal hasar dağılımları ile yerel zemin koşulları arasında yakından ilişki olduğu gözlenmiştir. Yerel zemin koşullarının deprem etkisinde oluşan hasarlar üzerinde etkisi esas olarak ya deprem yükleri altında temel zemininde ortaya çıkabilecek taşıma gücü kaybı, aşırı oturmalar ve yer değiştirmelerden veya deprem hareketi özelliklerinde ve buna bağlı olarak yapının maruz kaldığı sarsıntı şiddeti ve atalet kuvvetlerinde meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır.

Deprem hasarlarının azaltılmasına yönelik çalışmalarda deprem yükleri etkisinde zeminlerin davranışının incelenmesi (dinamik zemin özelliklerinin belirlenmesi) için laboratuvar deney yöntemlerinde önemli gelişmeler yaşanırken, zemin davranışını modellemeye yönelik bünye denklemleri ve analiz yöntemleri de geliştirilmiştir. Binaların depreme dayanıklı tasarımı için kuralları içeren yönetmeliklerde yerel zemin koşullarının etkilerini dikkate alabilmek için zemin sınıflandırma sistemleri ve yapısal tasarıma yönelik ivme spektrumunu tanımlamak için kullanılan bazı arazi katsayılarına yer verilmektedir. Bunların yanında, depremde zemin tabakalarının davranışının analizi, zemin-temel-yapı etkileşimi analizi, dinamik toprak basınçları, deprem etkisinde şevlerin stabilite tahkiki gibi konularda kurallara yer verilmektedir. Şiddetli depremler sonrası yapılan hasar dağılımı ve zemin incelemeleri ile birlikte dinamik davranış analiz yöntemlerinde sağlanan gelişmeler ışığında deprem yönetmelikleri belirli aralıklarla yenilenmektedir.

Türkiye’de de dünyadaki gelişmelere paralel olarak, 1970’li yılların başlarından itibaren geoteknik deprem mühendisliği alanında üniversitemizde dinamik deney sistemleri kurulmaya, akademik çalışmalar ve araştırmalar yapılmaya başlanmış ve ilk defa 1975 deprem yönetmeliğinde, yapısal tasarımda yerel zemin koşullarının etkisinin dikkate alınmasında daha modern yaklaşımlar benimsenmiştir. 1992 Erzincan ve 1995 Dinar depremlerinden sonra, Türkiye Deprem Yönetmeliğinde 1997/98 ve daha sonra 2007’de önemli değişiklikler yapılmış ancak 2018 yılına kadar geoteknik konularında güncellemeler çok sınırlı kalmıştır. 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri

yapısal hasar üzerinde yerel zemin koşullarının daha belirgin olarak ortaya koymuştur. 2019 yılı başında yürürlüğe giren 2018 deprem yönetmeliğimizde konu daha kapsamlı olarak ele alınmış, güncel bilimsel bilgiler ve mühendislik deneyimleri ışığında yenilenmiştir.

Türkiye’de son yıllarda deprem hasarlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar kapsamında deprem senaryoları, mevcut yapıların özelliklerinin belirlenmesi, güçlendirme çalışmaları gibi çalışmalar yapılmakla birlikte, devasa boyutlu bu sorunsalda depreme dayanıklı kentler oluşturmada istenilen düzeye ulaştığımızı söylemek pek mümkün görünmemektedir.

Ülkemizde, geoteknik deprem mühendisliği bağlamında değerli akademik çalışmalar yapılmakta, 2018 yönetmeliğinin getirdiği yeni modern yaklaşımlar doğrultusunda, deprem mühendisliğinde gelişmiş ülkeler düzeyinde uygulamaya yönelik tasarımlar yapılabilmektedir. İleri analiz yöntemlerini kullanıldığı yazılımların yardımı ile birlikte sahaya özel sismik tepki analizleri yanında, depreme dayanıklı tasarım çalışmalarında zemin-temel-yapı etkileşimi etkileri dikkate alınmaya başlanılmıştır. Zemin iyileştirmesi tasarımlarında, non lineer analiz yöntemleri yapılan ile arazi davranış analizleri çıktılarına göre iyileştirme derinliği ve derecesi belirlenebilmektedir.

Kaynaklar

1. Ansal, A., Kurtuluş, A., and Tönük, G., (2010), “Seismic Microzonation and Earthquake Damage Scenarios for Urban Areas”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 30, Issue 11, Pages 1319-1328.
2. Özaydın, K., Ansal, A., Yıldırım, M., Berilgen, M., (2005), Fatih Camii ve Külliyesi Restorasyon ve Güçlendirme Projesi, Geoteknik Raporu, Yıldız Teknik Üniversitesi
3. İyisan, R., Özaslan, B. ve Haşal, M.E., (2018), “Zemin Büyütmesinde Anakaya Eğimi Etkisi: Bir ve İki Boyutlu Davranış”, Prof. Dr. Feyza Çinicioğlu Onuruna Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu, 10 Mayıs, İstanbul Üniversitesi, Beyazıt, İstanbul
4. Aydınoglu M.N., Celep, U. U., Önem, G. (2014), “Depremde Yapı- Kazık- Zemin Etkileşimi İçin Pratik Bir Yöntem” Prof. Dr. Kutay Özaydın Geoteknikte Gelişmeler ve Deneyimler Sempozyumu, 2 Haziran, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
5. Celep, U.U. (2020), “Zemin İyileştirmesi Derinliğinin ve Etkinliğinin İncelenmesi” Kişisel İletişim.