



KUZEY-DOĞU BURSA İL MERKEZİ ZEMİNLERİNİN DİNAMİK ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ

(DYNAMIC SOIL BEHAVIOR ANALYSES OF NORTH-EAST BURSA CITY CENTER SOILS)

Ender BAŞARI*

ÖZET/ABSTRACT

Bursa il merkezi Uludağ'ın eteklerinden başlayarak ovaya doğru gelişim göstermiştir. Şehir merkezinde ve ovanın iç kısımlarında alüvyon kalınlığı 150 m'ye ulaşmaktadır. Bursa il merkezinin bulunduğu alüvyon zeminler deprem etkilerini büyütebilmektedir. Ayrıca şehrin bazı bölgelerinde yüzeye yakın suya doymuş kumlu zeminler bulunmaktadır. Suyu doymuş kumlu zeminlerin sıvılaşma risklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Bursa il merkezinin Kuzey-Doğu bölgesindeki zeminlerin zemin büyütmesi, sıvılaşma riskleri ve deprem sonrası oturma potansiyelleri açısından analizleri yapılmıştır. Büyütme analizlerinde taban kayası için kullanılan model ivme kaydı; 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi en büyük ivme değerinin, sönümlenme ilişkilerinden Bursa il merkezi taban kayası için elde edilen en büyük ivme değerine ölçeklenmesi ile elde edilmiştir. Dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum yüzey ivme değerleri aynı depremde şehir merkezinde bulunan bir sismograf kaydı ile karşılaştırılmıştır. Sıvılaşma ve deprem sonrası oturma analizleri sönümlenme ve büyütme analizlerle ilave olarak, magnitüdü $M_w=7.5$ ve maksimum yüzey ivmesi $a_{\max}=0.4g$ olan bir deprem için yapılmıştır.

Bursa city center was established on foot of The Uludağ Mountain through the Bursa plain. Alluvium thickness reaches 150 m in the plain at certain locations of the city center. The thick alluvium layers in the city are capable of amplifying earthquake effects. Also, there are saturated and near surface sand layers. Saturated sandy layers need to be investigated to determine liquefaction risk. In this paper, amplification characteristics of the alluvium layers, liquefaction risk and settlement potential of the saturated sandy soils due to earthquake loading were investigated for the North-East Bursa city soils. The 17 August 1999 Kocaeli Earthquake acceleration record scaled as necessary was used in the dynamic analyses. Maximum acceleration value for the base rock was estimated using attenuation relationships. Calculated maximum acceleration values for the soil surface in the analyses were compared with those of acceleration records acquired at the city center. Liquefaction and post earthquake settlements were also computed for a scenario earthquake with a magnitude of 7.5 generating 0.4g maximum surface acceleration.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Zemin büyütmesi, Sıvılaşma, Doymuş kumlu zeminlerin sıkışması, Azalım ilişkileri
Soil amplification, Liquefaction, Settlement of saturated sandy soils, Attenuation relationships

* Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnşaat Müh Bölümü, MANİSA

1. GİRİŞ

Bursa sanayisi, ekonomisi ve nüfusu ile ülkemizin büyük ve önemli kentlerinden biridir. Şehir ilk olarak Uludağ eteklerinde kurulmuş daha sonra Bursa Ovasında kalın alüvyon tabakası üzerinde gelişim göstermiştir (Tabban, 2000). Bursa il merkezindeki alüvyon tabakaları deprem etkisini büyütme özelliğine, sıvılaşma riskine ve deprem etkisi ile oturma potansiyellerine sahiptir (Akyol vd., 2002; Başarı, 2003, Uyanık, 2006).

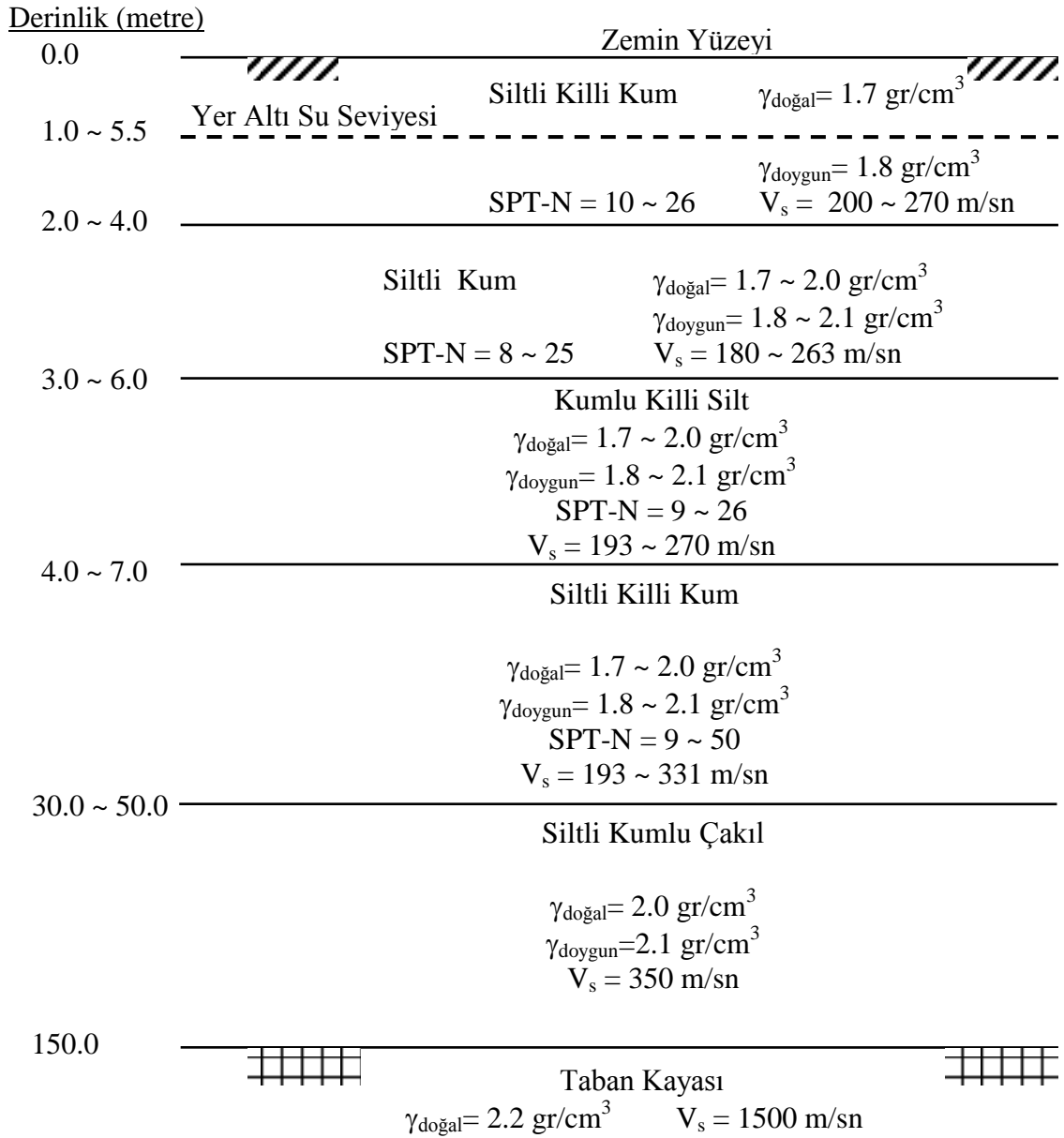
Zeminler belirli şartlar bir araya geldiğinde deprem etkisini büyütebilirler. Zeminin deprem hareketini hangi oranlarda büyütüğünü belirlemek için doğrusal modelleme, eğrisel modelleme ve arazinin topoğrafyasını dikkate alan üç boyutlu modellemeler mevcuttur. Dinamik davranış açısından, zeminler her ne kadar doğrusal bir davranış sergilemese de, eşdeğer doğrusal yaklaşım zemin tepki analizleri için kullanışlı ve gerçeğe yakın sonuçlar veren bir yöntemdir (Kramer, 1996). Bursa il merkezi alüvyon zeminlerinin kalın bir tabaka oluşturmasından ve geniş bir alanı kaplamasından dolayı zemin içinde yayılan kayma dalgalarının düşey yönde hareket edeceği kabul edilmiştir. Dinamik analizler eş değer doğrusal modellemeyi esas alan EERA (Bardet vd., 2000) bilgisayar programı ile tek boyutlu olarak yapılmıştır. Analizlerde kullanılan model ivme kaydı, 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi ivme kaydının Kuzey-Güney bileşeninin, Bursa il merkezi taban kayası için sönümleme ilişkilerinden elde edilen en büyük ivme değerine ölçeklenmesi ile elde edilmiştir.

Deprem etkisi ile zeminlerin sıvılaşma ve oturma analizleri için literatürde geliştirilmiş farklı yöntemler mevcuttur (Castro, 1995; Gilstrap vd., 1998, Kayen ve Mitchell, 1997; Seed ve Idriss, 1971; Youd ve Idriss, 2001; Tokimatsu ve Idriss, 1987; Tokimatsu ve Yoshimi, 1983; Ishihara ve Yoshimine, 1992). Bursa ve civarı I. Derece Riskli Deprem Bölgesinde bulunmasından dolayı (Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, 1998) sıvılaşma ve deprem sonrası oturma analizleri, sönümleme ve büyütme analizlerinden bağımsız olarak büyüklüğü 7.5 ve il merkezindeki en büyük yüzey ivme değeri 0.4g olan bir deprem için hesaplanmıştır. Sıvılaşma tahminleri esas olarak NCEER-1996/1998'in (Youd ve Idriss, 2001) önerdiği ve dünya'da kabul görmüş olan SPT-N (Standart Penetrasyon Testi Darbe Sayısı) korelasyonlarına dayanmaktadır. Doygun kumlu zeminlerin deprem sonrası oturma analizlerinde, SPT-N ve GF (sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü) değerlerine dayanan Ishihara ve Yoshimine geliştirdikleri grafiksel yöntem kullanılmıştır (Ishihara ve Yoshimine, 1992).

Dinamik analizler, zemin bilgileri Bursa Büyükşehir Belediyesi'nden temin edilen konumları ve kordinatları Şekil 1 ve Çizelge 1'de verilen on sondaj kuyusu için yapılmıştır.

2. İNCELEME ALANININ JEOLÖJİK VE GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

Bursa, Uludağ masifinin kuzey eteğinde Apolyont ve Manyas gölleri çukurluğunun güney kenarında kurulmuş ve yaklaşık D-B doğrultulu elipsoidal bir havzada yer almaktadır. Havza Kuzey Anadolu Fay zonunun etkinliğinde şekillenmiş olup, oluşumunu Neojen'de başlatıp Kuvaternar döneminde sürdürmüştür. Bursa havzası ve yakın çevresi büyük oranda Uludağ Masifi, Karakaya Karmaşığı ve bunların üzerinde Neojen karasal, ayrılmamış çökellerin oluşturduğu bir alanda yer alır. Bursa ovası akarsuların taşıdığı blok, çakıl, kum, silt ve kil gibi malzemeler ile kaplanmıştır. Ova genelinde alüvyon kalınlığı 80-200 m arasında değişmektedir. Bursa Ovasının orta ve Doğu kesiminde alüvyon ince elemanlı kil, silt, kum ve çakıl istiflenmesinden oluşmaktadır ve kalınlığı 140-200 m arasında değişmektedir. Ovanın Kuzeyinde ise alüvyon kalınlığı 100 m civarına çıkabilmekte ve silt, kil, kum tabakalarından oluşmaktadır (Tabban, 2000; Akyol vd., 2002; Başarı, 2003, Abacı, 2001, Yalçınkaya, 2005).



Şekil. 2. Dinamik analizleri yapılan sondaj kuyularına ait zemin parametreleri ve idealize zemin profilleri

3. KUZEY-DOĞU BURSA İL MERKEZİ ZEMİNLERİNİN BÜYÜTME ANALİZLERİ

Literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen ve korelasyonlara dayanan ivme azalım ilişkileri mevcuttur (Spudich vd., 1997; Abrahamson ve Silva, 1997; Boore vd., 1997; Campbell, 1997). Spudich vd. azalım ilişkilerinin geliştirilmesinde $5 < M_w < 7.7$ büyüklüğündeki, fay kırığı ile ölçüm noktası arasındaki mesafesi 105 km'den küçük olan ve aşağıda verilen bölgelerdeki deprem kayıtlarını kullanmışlardır (Spudich vd., 1997):

- 1- Avrupa, Yeni Zelanda ve Orta Amerika depremleri,
- 2- Türkiye Kuzey Anadolu Fay sistemindeki depremler,
- 3- Amerika Birleşik Devletleri'nin batı bölgesindeki depremler.

Spudich vd.'nin geliştirdikleri azalım ilişkileri, doğrultu atımlı ve ters atımlı fay sistemlerine uygulanabilmektedir (Spudich vd., 1997). Spudich vd.'nin azalım ilişkilerinin Bursa yöresindeki fay sistemlerine ve zemin koşullarına uygulanabilir olmasından dolayı, Bursa il merkezi taban kayası için en büyük ivme değerinin tahmin edilmesinde tercih edilmiştir (Spudich vd., 1997):.

Spudich vd. kurdukları azalım ilişkilerinde kaya ve zemin olarak iki temel jeolojik sınıflandırma yapmışlar ve korelasyonları bu sınıflandırmaya göre düzenlenmişlerdir. Önerdikleri azalım ilişkisi Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 ile verilmiştir (Spudich vd., 1997).

$$\log_{10} Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_4r + b_5 \log_{10} r + b_6\Gamma_Z \quad (2)$$

$$r = \sqrt{\left(r_{jb}^2 + h^2\right)} \quad (3)$$

Y : Yer çekim ivmesi (g) cinsinden enbüyük yatay ivme

M : Depremin büyüklüğü (Magnitüdü)

r_{jb} : Fayın kırıldığı ve hesap yapılan noktalar arasında, planda en yakın yatay mesafe (km)

r : Düzeltilmiş mesafe

h : Mesafe düzeltme katsayısı

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$: Denklem katsayıları

Γ_Z : Zemin türü katsayısı, (kaya için $\Gamma_Z = 0$, diğer zeminler için $\Gamma_Z = 1$)

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ ve h periyoda bağlı katsayılar (Spudich vd., 1997).

Sönümlenme ilişkisinde kullanılan 17 Ağustos Kocaeli depreminin magnitüdü 7.4 ve merkez üssünün kordinatları 40.76N-29.97E'dir. İnceleme alanının yaklaşık kordinatları ise 40.183N-29.131E'dir. İnceleme alanı taban kayası yüzeyi için denklem 2 katsayıları, yatay mesafe ve taban kayası için en büyük ivme değeri aşağıdaki gibi belirlenir.

$$r_{jb} = 95, \quad M = 7.4, \quad \Gamma = 0, \quad h = 5.57,$$

$$b_1 = 0.156, \quad b_2 = 0.229, \quad b_3 = 0, \quad b_4 = 0, \quad b_5 = -0.945, \quad b_6 = 0.077$$

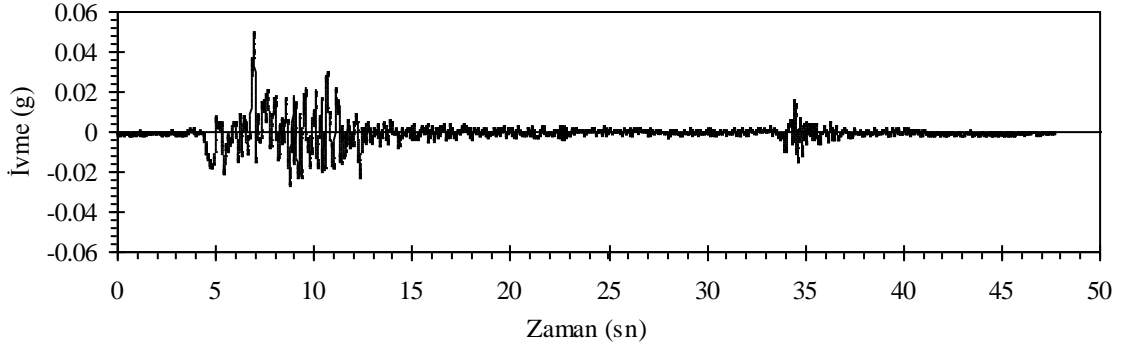
$$r = 95.163, \quad \log_{10} Y = -1.3931$$

$$Y = 0.0405g \Rightarrow Y = a_{maks} = 39.68cm/s^2$$

17 Ağustos 1999 Kocaeli deprem ivme kaydına ait en büyük ivme değeri sönümlenme ilişkisinden elde edilen $a_{maks}=0.0405g$ değerine eşit olacak şekilde ölçeklenerek Şekil 3'te verilen model ivme kaydı elde edilmiştir.

Taban kayası seviyesi için Şekil 3'te verilen model ivme kaydı ve Şekil 2'de verilen idealize zemin profilleri kullanılarak EERA programı ile tek boyutlu eşdeğer doğrusal zemin tepki analizleri yapıldığında Çizelge 3 ile verilen en büyük zemin yüzeyi ivme değerleri ve Şekil 4 ile verilen büyütme oranları elde edilmiştir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde Bursa İl Merkezinde bulunan BRS kodlu ve 40.184N-29.131E kordinatlarındaki sismograf tarafından Kuzey-Güney doğrultusu için zemin yüzeyinde kaydedilen enbüyük ivme $a_{maks-sismograf} = 0.0553g$ değerindedir (<http://angora.deprem.gov.tr/kocaeli.htm>). Hesaplanan en büyük zemin yüzeyi ivme değerleri ile 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde Bursa il

merkezi zemin yüzeyinde sismograf tarafından ölçülen en büyük yatay yüzey ivme değerleri oldukça yakın ve uyumlu çıkmıştır.



Şekil 3. Sönümlenme ilişkisinin kullanılması ile Bursa il merkezi taban kayası yüzeyi için elde edilen model ivme grafiği

Çizelge 3. Analizleri yapılan sondaj kuyuları için elde edilen maksimum yatay yüzey ivme değerleri ve büyütme oranları ($a_{\text{maks-sismograf}} = 0.040\text{g}$).

Sondaj Kuyusu	$a_{\text{Maks-ZY}}$ (g)	$a_{\text{Maks-ZY}}/a_{\text{Maks-TKY}}$
1(YS18)	0.044	1.10
2(YS30)	0.055	1.39
3(YS53)	0.056	1.39
4(YS60)	0.056	1.39
5(YS61)	0.058	1.44
6(YS62)	0.060	1.51
7(YS63)	0.056	1.39
8(YS64)	0.057	1.43
9(YS67)	0.057	1.44
10(YS70)	0.057	1.42
Ortalama	0.056	1.39
$a_{\text{Maks-TKY}}$ (g) :	0.040	
$a_{\text{Maks-Sismograf}}$ (g) :	0.055	

$a_{\text{Maks-TKY}}$: Taban kayası için en büyük yatay ivme

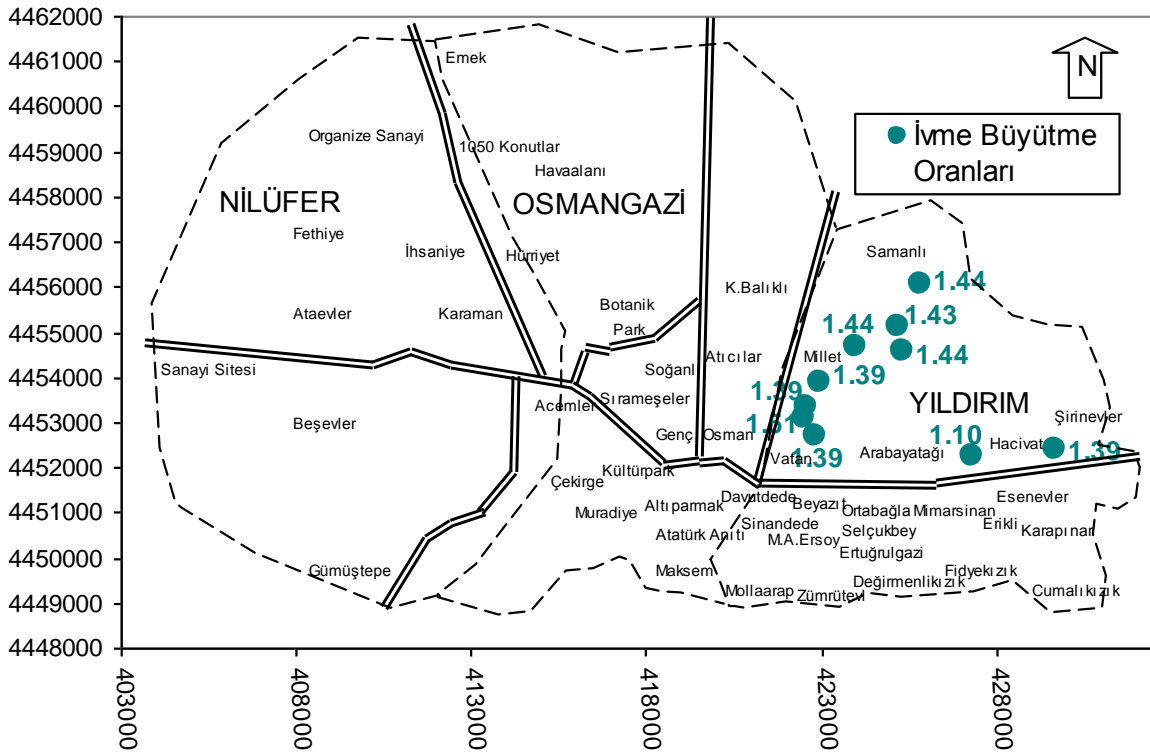
$a_{\text{Maks-ZY}}$: Zemin yüzeyi için en büyük yatay ivme

4. KUZEY-DOĞU BURSA İL MERKEZİ ZEMİNLERİNİN DEPREM SONRASI OTURMA VE SIVILAŞMA ANALİZLERİ

Zemin sıvılaşmaları deprem esnasında yapılarda meydana gelen hasarların ana nedenlerinden biridir. Suya doygun kumlu zeminlerde meydana gelen sıvılaşmayı etkileyen faktörlerin önemlileri şöyle sıralanabilir: Depremin büyüklüğü, tekrarlı hareketin devir sayısı, yatay yüzey ivme değeri, kum zeminin cinsine bağlı olarak mukavemet özellikleri, zeminin dane çapı dağılımı ve dane şekilleri, sıkılık oranı (D_r), ince malzeme (-No.200) oranı, ince malzemenin plastisite özelliği, derinlik (düşey gerilmenin büyüklüğü) etkenleri başlıca faktörler olarak sayılabilir.

Sıvılaşma analizleri için geliştirilen hesap metodların çoğu, depremlerden sonra arazide gözlenen sıvılaşmalardan, arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilere dayalı olarak

oluşturulan korelasyonlar şeklindedir. Geliştirilen bu korelasyonların doğruluğu, yukarıda sayılan faktörlerin en iyi şekilde hesaplara katılmalarına bağlıdır. Günümüzde son yıllarda geliştirilen hesap analizlerinden biri de, 1997 yılında Brigham Young ve California Üniversitelerinde oluşturulan NCEER Workshop grubu tarafından önerilen ve sivilaşmayı etkileyen faktörlerin daha doğru biçimde hesaba katılmasını temin eden yöntemdir. NCEER'nin önerdiği yöntem genel olarak Seed vd. sivilaşma üzerine yaptıkları çalışmalara dayanmaktadır (NCEER, 1997; Seed vd., 1985). Seed vd. ile NCEER gurubunun sivilaşma üzerine yaptıkları çalışmalarda, zemin için arazide elde edilen SPT-N değeri ile zeminin sivilaşma olasılığı arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmış ve gayet iyi sonuçlar veren ilişkiler oluşturulmuştur. Şekil 5 SPT-N ile sivilaşma arasındaki ilişkiyi göstermektedir (NCEER, 1997; Seed vd., 1985). NCEER önerdiği yöntem özetle şöyledir; Plastisite indeksi % 5 ve daha küçük olan zeminlerde, arazide elde edilen ham SPT-N değerinin standardize edilmesinden ve % 5 ince malzeme içeren aynı zeminin eşdeğer SPT-N değerine dönüştürülmesinden sonra korelasyonlarda bu eşdeğer SPT-N değerinin kullanılmasına dayanmaktadır (NCEER, 1997).

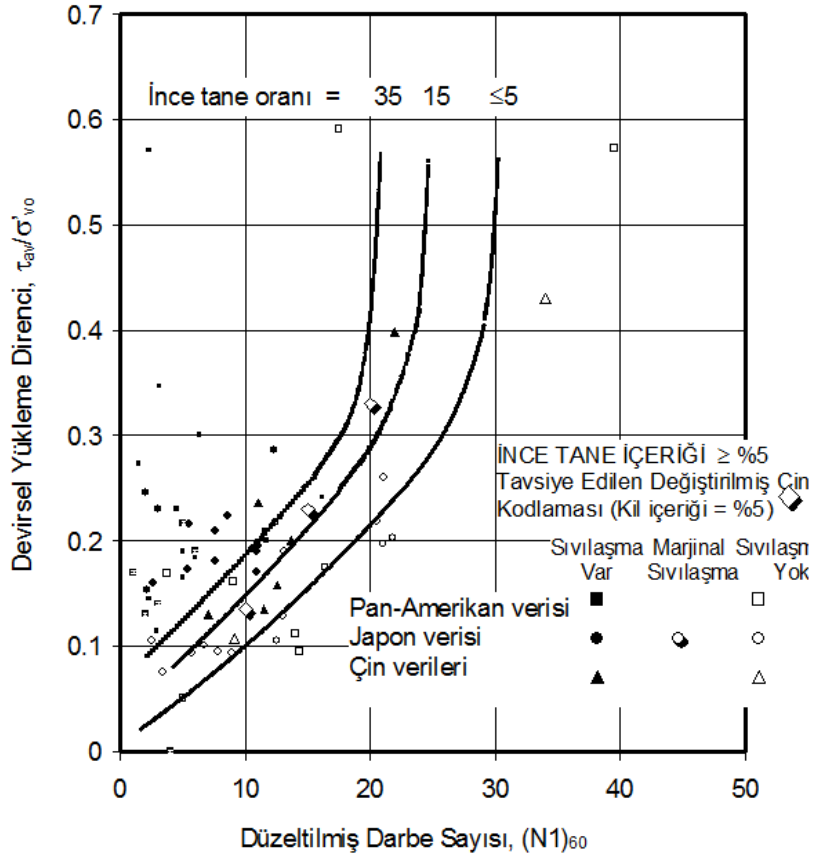


Şekil 4. Analizleri yapılan sondaj kuyuları için belirlenen büyüme oranları

Sivilaşma analizi yöntemlerinde önemli parametrelerden biride yüzey ivmesidir. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik-1998'de belirtildiği gibi Bursa ve yakın çevresi I. Derece Riskli Deprem Bölgesidir. Sivilaşma ve oturma analizleri için maksimum yatay yüzey ivme değeri 0.4g alınmıştır.

Zeminlerin tekrarlı yüklemeye karşı dirençleri literatürde CRR olarak ifade edilmektedir. CRR laboratuvarında bu amaca yönelik yapılan deneylerle veya arazi ve laboratuvar deneylerine bağlı olarak geliştirilen korelasyonlar ile hesaplanabilmektedir. Günümüzde arazideki zemin hakkında bilgi edinmek için yapılan deneylerin başında kumlu zeminler için SPT (Standart

Penetrasyon Testi), killi zeminler için CPT (Koni Penetrasyon Testi) gelmektedir. NCEER tarafından CRR'nin tahmini için SPT-N korelasyonuna dayanan bir yöntem geliştirilmiştir (NCEER, 1997). NCEER tarafından önerilen ilinti Eşitlik 4 ile verilmiştir (NCEER, 1997). Eşitlikteki x parametresi düzeltilmiş SPT-N değerini temsil etmektedir. SPT-N değerini düzeltmek için önerilen katsayılar ise Çizelge 4'te verilmiştir. Zeminde deprem esnasında oluşacak Tekrarlı Gerilme Oranı (CSR) için Seed ve Idriss Eşitlik 5'i önermişlerdir (Seed ve Idriss, 1971).



Şekil 5. Tekrarlı Gerilme Direnci ile kumlu zeminlerde SPT-N arasındaki ilişki (Seed,1985)

$$CRR = \frac{a + cx + ex^2 + gx^3}{1 + bx + dx^2 + fx^3 + hx^4} \quad (4)$$

x = Düzeltilmiş SPT-N değeri

$$\begin{aligned} a &= 4,844E-02, & b &= -1,248E-01, & c &= -4,721E-03, & d &= 9,578E-03 \\ e &= 6,136E-04, & f &= -3,285E-04, & g &= -1,673E-05, & h &= 3,714E-06 \end{aligned}$$

Eşitlik 7'de gösterildiği gibi zeminin Tekrarlı Yüklemeye Karşı Direncinin (CRR), deprem esnasında zeminde oluşacak Tekrarlı Gerilme Oranı (CSR) ile oranı zeminin sıvılaşmaya karşı Güvenlik Faktörü (GF) olarak tanımlanır.

$$GF = CRR/CSR \quad (7)$$

GF ≤ 1.0 için zeminin sıvılaşma riski vardır. GF > 1.0 için zeminin sıvılaşma riski yoktur.

Kumların deprem sarsıntısının etkisi ile sıkılaşıma eğilimleri yüzeyde kendini oturmalar şeklinde gösterir. Deprem etkisi ile oluşan oturmalar sıklıkla sığ temelli yapılar için tehlikeye sebep olur, boru hatlarında hasarlar oluşturur, zemin yüzeyine yakın bulunan alt yapı tesislerine hasar verir. Suyu doymuş kumlu zeminlerdeki oturmalar deprem etkisi ile oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile oluşur. Bu tür oturmalar için gerekli süre zeminin geçirgenliğine, sıklığına ve drenaj mesafesine bağlıdır. Kumların deprem etkisi ile oturmalarını tahmin etmek oldukça zordur. Yapılan hesaplarda yanılma payı %25-%50 arasında olabilir. Sismik hareketin karmaşık olması durumunda doğruluk payı daha da azalabilir. Oturma hesaplarındaki bazı belirsizliklere rağmen literatürde makul sonuçlar veren yöntemler mevcuttur (Kramer, 1996).

Çizelge 4. SPT-N için düzeltme katsayıları (NCEER, 1997)

Etki	Ekipmanlar ve Yöntemler	Terim	Katsayı
Efektif Gerilme Düzeltmesi		C_N	$(P_v/\sigma'_{vo})^2 \leq 2 \Rightarrow (P_v/\sigma'_{vo})^2$ $(P_v/\sigma'_{vo})^2 > 2 \Rightarrow 2$
Enerji Oranı	Donut Çekici Safety Çekici Otomatik Çekiç	C_E	0,5 – 1,0 0,7 – 1,2 0,8 – 1,5
Sondaj Çapı	65-115 mm 150 mm 200 mm	C_B	1,0 1,05 1,15
Çubuk Uzunluğu	3-4 m 4-6 m 6-10 m 10-30 m >30 m	C_R	0,75 0,85 0,95 1,0 <1,0
Deney Yöntemi	Standart Deney Doğrusal Olmayan Deney	C_S	1,0 1,1 – 1,3
K_s : ince malzeme oranı düzeltme katsayısı, F_c : ince malzeme oranı $F_c \leq \%5$ için $K_s = 1.00$, $\%5 \leq F_c \leq \%35$ için $K_s = 1 + (0.75/30)(F_c - 5)$			

$$CSR = \tau_o / \sigma'_v = 0.65(a_{\text{mak}} / g) \left(\sigma'_v / \sigma'_v \right) r_d \quad (5)$$

$$r_d = 1 - 0.00765z \quad z < 9.15 \quad (6)$$

$$= 1.174 - 0.0267z \quad 9.15m < z < 23m$$

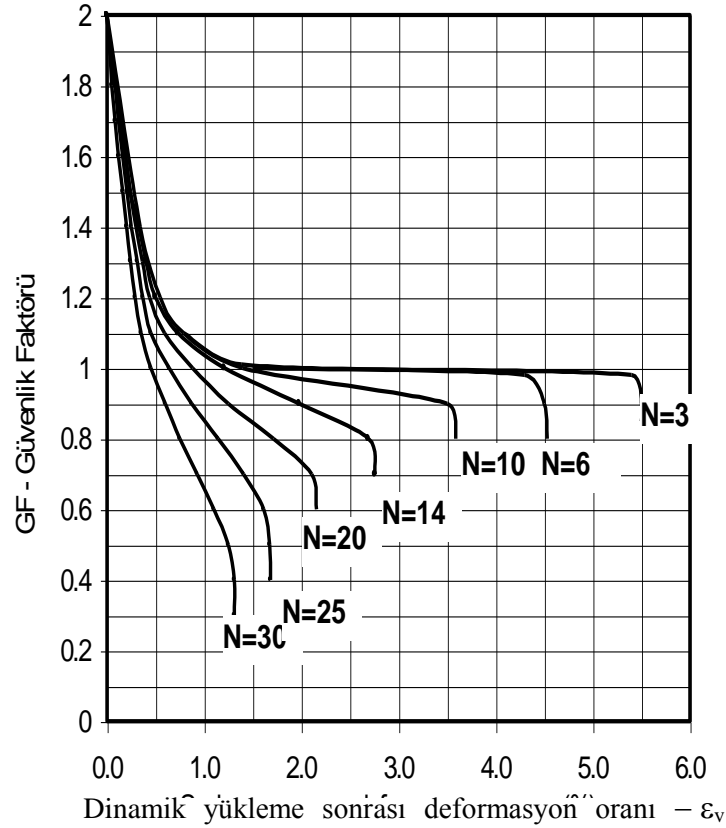
$$= 0.744 - 0.088z \quad 23m < z < 30m$$

$$= 0.5 \quad 30m < z$$

r_d : Derinlik düzeltme katsayısı z : Derinlik σ'_v : Toplam düşey gerilme
 σ'_v : Efektif düşey gerilme a_{mak} : Deprem esnasındaki en büyük yüzey ivmesi

Ishihara ve Yoshimine'nin geliştirdikleri yöntemde kumlu zeminlerin sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü ($GF = CRR/CSR$) ile birlikte, zemine ait SPT-N, CPT veya rölatif sıklık (D_r) değerlerinden birinin bilinmesi ile kum tabakasının oturma miktarı Şekil 6 yardımıyla tahmin edilebilmektedir (Ishihara ve Yoshimine, 1992). Bu çalışmada sıvılaşma analizi için GF değerleri hesaplandığından ve analiz yapılan zeminlere ait SPT-N değerleri elde mevcut

olduğundan Ishihara ve Yoshimine'nin geliştirdikleri grafiksel yöntem kullanılmıştır (Ishihara ve Yoshimine, 1992).



Şekil 6. SPT-N değeri ile kumlu zeminlerde sıvılaşma sonrası deformasyon oranı ilişkisi (Ishihara ve Yoshimine, 1992)

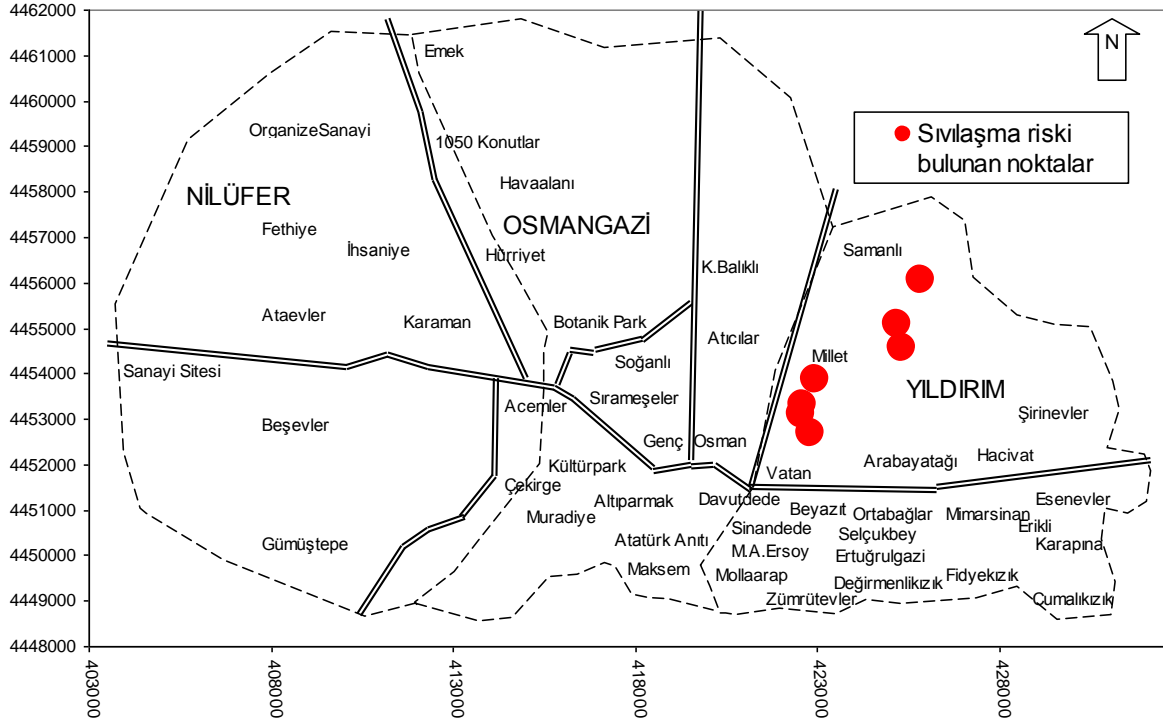
Şekil 2'de zemin profilleri ve özellikleri verilen sondaj kuyularında suya doymuş kumlu tabakaların sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörleri (GF), genliği 7.5 ve 0.4 g değerinde yüzey ivmesi oluşturacak bir deprem için hesaplanmıştır. Daha sonra hesaplanan GF ve SPT-N değerleri kullanılarak kumlu tabakaların deformasyon oranları Ishihara ve Yoshimine'nin geliştirdikleri yöntem yardımı ile belirlenmiştir (Ishihara ve Yoshimine, 1992). Deformasyon oranları belirlenen tabakaların Eşitlik 8'de gösterildiği gibi oturma değerlerinin toplanması ile deprem etkisi ile suya doymuş kumlu zemin tabakalarından kaynaklanabilecek zemin yüzeyi oturmaları tahmin edilmiştir.

$$\sum \Delta H_{deprem} = \sum GF_i \times \varepsilon_{v-i} \quad (8)$$

Sıvılaşma analiz sonuçları Çizelge 5 ve Şekil 7 ile verilmiştir. Genliği 7.5 ve 0.4g değerinde yüzey ivmesi oluşturacak bir depremin olması durumunda analizi yapılan on nokta için oturma miktarları Çizelge 6 ve Şekil 8 ile verilmiştir.

Çizelge 5. Analizi yapılan sondaj kuyuları için sıvılaşma riski ($a=0.4g$ ve $M=7.5$ için)

Kuyu No	Sıvılaşma Riski
1-(YS-18)	YOK
2-(YS-30)	YOK
3-(YS-53)	VAR
4-(YS-60)	VAR
5-(YS-61)	VAR
6-(YS-62)	VAR
7-(YS-63)	VAR
8-(YS-64)	VAR
9-(YS-67)	VAR
10-(YS-70)	YOK



Şekil 7. Yüzey ivmesi 0.4g ve magnitüdü 7.5 olan bir deprem için sıvılaşma riski tespit edilen noktalar

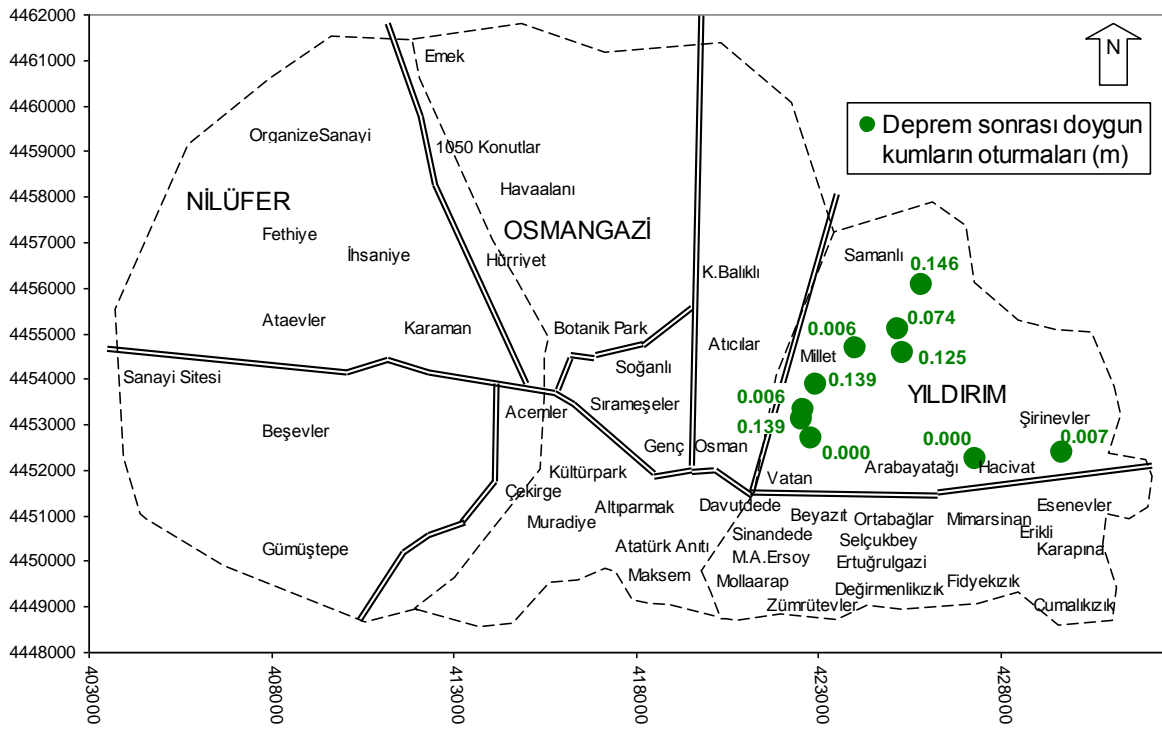
5. SONUÇLAR

Bursa geçmiş yıllarda tarihi büyük depremler yaşamıştır. Ancak geçtiğimiz son asırda Bursa ili Bursa merkezli depremlerden ziyade Kuzey Anadolu Fay sistemi kaynaklı depremlere maruz kalmıştır. Bu çalışmada, Bursa'ya yakın bir bölgede ve Kuzey Anadolu Fay sisteminde meydana gelebilecek bir depremin, Bursa şehir merkezine muhtemel etkisini göstermek için 19 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sönümlenme ilişkileri ile birlikte kullanılmıştır. Kullanılan sönümlenme ilişkisinin geliştirilmesinde Türkiye Kuzey Anadolu Fay

Sistemi'ndeki depremler de kullanmıştır (Spudich vd., 1997). Kuzey Anadolu Fay sisteminin Bursa'ya olan uzaklığı, bu fay sisteminde oluşacak depremlerin muhtemel büyüklükleri (genlikleri) ve fayların kırılma mekanizması bakımından, Spudich vd.'nin ortaya koyduğu sönümlenme ilişkisinin kullanılması uyumlu sonuçlar vermiştir (Spudich vd. (1997). Nitekim taban kayası için elde edilen ivme grafiği modeli (Şekil 3), büyütme analizlerinde girdi olarak kullanılmış ve zemin yüzeyi için hesaplanan en büyük yatay ivme değerleri Bursa şehir merkezinde sismograf tarafından kaydedilen en büyük yatay ivme değerine oldukça yakın çıkmıştır. Hesaplanan ve ölçülen sayısal değerlerin birbirine yakın olması, sönümlenme ve zemin büyütmesi analizleri için seçilen yöntemlerin Bursa-Kuzeydoğu il merkezi zeminleri için uygun olduğunu ve tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Çizelge 6. Sondaj kuyularında deprem sonrası oluşabilecek oturma miktarları ($a=0.4g$ ve $M=7.5$)

Kuyu No	Oturma Miktarı (m)
1 (YS-18)	0.000
2 (YS-30)	0.007
3 (YS-53)	0.000
4 (YS-60)	0.139
5 (YS-61)	0.146
6 (YS-62)	0.139
7 (YS-63)	0.008
8 (YS-64)	0.074
9 (YS-67)	0.125
10 (YS-70)	0.006



Sıvılaşma ve oturma analizleri, sönümlenme ve büyütme analizlerinden bağımsız olarak yapılmıştır. Bursa vilayeti ülkemizin sanayi, ticaret ve ekonomik açıdan önemli bir merkezi ve I. Derece Riskli Deprem Bölgesinde yer almasından dolayı suya doymuş kumların sıvılaşma ve deprem sonrası oturma analizlerinin uygunsuz bir durumu temsil etmesi amaçlanmıştır. Bundan dolayı analizler, büyüklüğü (magnitüdü) $M=7.5$ ve en büyük zemin yüzeyi yatay ivme değeri (a_{maks}) $0.4g$ olan bir deprem için yapılmıştır. Analiz kapsamında öngörülen bu durumun ortaya çıkması için deprem merkezinin Bursa il merkezinde veya Bursa il merkezine çok yakın bir noktada meydana gelmesi gerekmektedir. Bursa şehir merkezi doğrudan büyük bir deprem tehlikesine son asır içinde maruz kalmamış olsa da bu durum ihtimal dahilindedir. Ayrıca Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Bölgesi'nde çatallanan kollarından Yenişehir–Gemlik kolu Bursa şehir merkezine çok yakın bir konumdan geçmektedir. Şehir merkezine yakın bir noktada olabilecek büyük ölçekli bir depremde şehir merkezinin Kuzey–Doğu bölgesindeki suya doymuş kumlu zeminlerde sıvılaşma meydana gelebileceği bu çalışma ile ortaya konmuştur (Şekil 7).

Sıvılaşma analizlerinin yanı sıra büyük ölçekli bir deprem için suya doymuş kumlu zeminlerin deprem sonrası oturma tahminleri de yapılmıştır. Analizi yapılan sondaj kuyuları yerleşim alanlarında yer aldığından, elde edilen oturma değerleri önem kazanmaktadır. Çizelge 6. ve Şekil 8'de görüldüğü gibi bazı noktalarda 7 cm - 14 cm aralığında oturmalar oluşabilmektedir (YS-60, YS-61, YS-62, YS-64, YS-67 sondaj kuyularında). Bu noktalar yukarıda da belirtildiği gibi yerleşim alanlarında bulduklarından meydana gelecek oturmalar alt yapı tesislerine ve yapılara zarar verebilir mertebelindedir. Şunu da belirtmek gerekir ki, bu çalışmada elde edilen oturma değerlerine kuru kum ve kil tabakalarından kaynaklanacak uzun dönemli oturmalar dahil değildir. Bu durum göz önüne alındığında, oturma değerlerinin daha da artacağı ve daha ciddi sorunlar yaratacağı açıktır.

Sonuç olarak yapılan tek boyutlu eşdeğer doğrusal dinamik zemin analizlerinden, iskan edilmiş olan Bursa kentinin Kuzey-Doğu bölgesindeki zeminlerin deprem etkisini büyütebileceği, sıvılaşma ve deprem sonrası oturma potansiyeli açısından risk taşıdığı görülmüştür.

Deprem ivme kaydının frekans içeriğinin, süresinin, ivme büyüklüklerinin zeminlerin dinamik davranışları üzerinde önemli etkileri vardır. Ayrıca dinamik analizlerde kullanılan zemin parametreleri (kayma modülü, sönüm oranı, kayma dalgası hızı gibi) zemin davranışlarını belirleyici özelliktedir. Bütün bunlara ilave olarak taban kayasının topoğrafyası, zemin tabakalarının yatay olarak istiflenip istiflenmediği gibi unsurlar da zeminlerin dinamik davranışını etkilemektedir. Bu çalışmada zemin büyütme analizlerinde taban kayası için kullanılan model ivme kaydının en büyük ivme değeri nispeten küçük bir değer olup sönümlenme ilişkilerinden elde edilmiştir. Analizler 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nin Gebze istasyonundaki sismogafın ivme kaydı model alınarak yapılmıştır. Bursa şehir merkezindeki zeminlerin dinamik davranışlarının daha gerçekçi modellenebilmesi için taban kayasının topoğrafyasının, zemin istiflenme özelliklerinin ve dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesine yönelik detaylı zemin etüdüleri, derin ve sığ sondajlar yapılmalı, zemin tabakalarından örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmalıdır. Bilhassa örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde laboratuvarında bender elemanı, dinamik torsiyonel ve üç eksenli basınç deneyleri yapılarak kayma modülü, sönüm oranı gibi dinamik zemin parametreleri deneysel olarak belirlenmelidir. Taban kayasının topoğrafyası, zemin tabakalarının istiflenme durumu ve dinamik zemin parametreleri belirlendikten sonra, tek boyutlu eşdeğer doğrusal dinamik zemin analizlerine ilave olarak doğrusal olmayan modeller ve bölgenin geometrisine uygun olarak iki ve üç boyutlu dinamik yer tepki analizleri, farklı büyüklük ve frekans

içeriklerindeki model ivme kayıtları ile yapılarak, bölge zeminlerinin dinamik davranışları hakkında makro ve mikro ölçekte daha detaylı bilgilere ulaşılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abacı N. (2001): “Bursa Yöresi’nin Depremselliği ve Deprem Tarihi”, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa, Türkiye.
- Abrahamson N. A., Silva W. J. (1997): “Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes”, Journal of Seismological Research Letters, v.68, s. 94–127.
- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1998): Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Türkiye.
- Akyol N., Akıncı A., Eyidoğan H. (2002): “Site Amplification of S-Waves in Bursa City and its Vicinity, Northwestern Turkey: Comparison of Different Approaches”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v:22, s. 579-587.
- Bardet J. P., Ichii K., Lin C. H. (2000): “EERA, A Computer Program For Equivalent-linear Earthquake Site Response Analyses Of Layers Soil Deposits”, University Of Southern Colifornia Department Of Civil Engineering, s. 1-40.
- Başarı E. (2003): “Bursa İl Merkezi Zeminlerinde Dinamik Zemin Davranış Analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Türkiye.
- Bursa Büyükşehir Belediyesi Yıldırım İlçesi Zemin Araştırma Raporu (2000): Bursa.
- Boore D. M., Joyner W. B., Fumal T. E. (1997): “Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work 128”.
- Castro G. (1995): “Empirical Methods in Liquefaction Evaluation”, Primer Ciclo d Conferencias Internacionales, Leonardo Zeevaert, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico City, Mexico.
- Das B. M. (1993): “Principles of Soils Dynamics”, Pws-Kent Publusing, Boston, US.
- Gilstrap S. D., Youd T. L. (1998): “CPT Based Liquefaction Resistance Analyses Using Case Histories” Tech. Rep. CEG-90-01, Dept. Of Civ. And Envir. Engrg., Brigham Young University, Provo, Utah, US.
- Ishihara K., Yoshimine M. (1992): “Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes”, Soils and Foundations, v:32 (1), s. 173-188.
- Kayen R. E., Mitchell J. K. (1997): “Assessment of Liquefaciton Potential During Earthquakes by Arias Intensity”, J. Geotech. And Geoenvir. Engrg., ASCE, v:123 (12), s. 1162-1174.
- Kramer S. L. (1996): “Geotechnical Eearthquake Engineering”, Prentice Hall, Upper Seddle River, New Jersey, US.
- Youd T. L., Idriss I. M. (1997): “Proceeding of the NCEER Worksop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils”, Technical Report, No.NCEER-97-0022, December 31, US.
- Seed H. B., Idriss I. M. (1971): “ Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential”, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 97 (9), s. 1249-1273.
- Spudich P. J. B., Fletcher M., Hellweg J., Boatwright C., Sullivan W. B., Joyner T. C., Hanks D. M., Boore A., McGarr L. M., Baker A., Lindh G (1997): “SEA96–A New Predictive Relation For Earthquake Ground Motions in Extensional Tectonic Regimes”, Journal Of Seismological Research Letters, v.68, s. 190–198.

- Tabban A. (2000): “Kentlerin Jeolojisi ve Deprem Durumu”, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.
- Tokimatsu K., Seed H. B. (1987): “Evaluation of Settlements in Sand Due to Earthquake Shaking”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCEE, v:113 (8), s. 861-878.
- Tokimatsu K., Yoshimi Y. (1983): “Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-Value and Fines Content”, Soils and Foundations, v:23 (4), s. 56-74.
- Tonouchi K., Sakayama T., Imai T. (1983): “S Wave Velocity In The Ground and The Damping Factor”, Bulletin Of International Association Of Engineering Geology, v. 46, s. 331-347.
- Uyanık O. (2006): “Sıvılaşır yada Sıvılaşmaz Zeminlerin Yinelemeli Gerilme Oranına bir Seçenek”, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, s:8 (2), s. 79-91.
- Yalçınkaya E. (2005): “Bytnet (Bursa-Yalova-Türkiye İvme Ölçer Ağı) İstasyonlarında Yerel Zemin Etkilerinin İncelenmesi”, DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, s:7 (2), s. 75-85.
- Youd T. L., Idriss I. M. (2001): “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils”, J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, v:127 (4), s. 297-311.
- Youd T. L., Idriss I. M., Andrus R. D., Arango I., Castro G., Christian J. T., Dobry R., Finn W. D. L., Harder L. F., Jr. Hynes M. E., Ishihara K., Koester J. P., Liao S. S. C., Marcusan W. F., Iii Martin G. R., Mitchell J. K., Moriwaki Y., Power M. S., Robertson P. K., Seed R. B., Stokoe K. H. (1997): “Summary Report of the 1996 NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance Soils”, NCEER-97-0022, Salt Lake City, Utah.