DEPREM BÜYÜKLÜĞÜ ÖLÇEKLEME KATSAYILARININ PERFORMANS ESASLI OLARAK BELİRLENMESİ

H.T. Bilge[1] ve K.Ö. Çetin[2]

[1] *Doktor İnşaat Mühendisi, GeoDestek Zemar Zemin Araştırma Proje Ltd. Şti., Ankara*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: htbilge@geodestek.com

ÖZET:

Deprem büyüklüğünün (ya da çevrimsel yükleme süresinin) sıvılaşma tetiklenmesi üzerindeki etkileri elli yılı aşkın süredir dikkat çeken araştırma konularından biri olmuştur. Mevcut çalışmalarda, her ne kadar nitelik bazında uyum görülse de, nicelik olarak bir görüş birliğine varılamadığı saptanmaktadır. Özellikle küçük deprem büyüklükleri için 2 kat mertebesine varan farklılıklar tasarımı güvenlik ve ekonomi boyutlarında etkileyen sonuçlar üretebilmektedir. Bu bildiri kapsamında, literatürdeki mevcut görüş ayrılıklarının sebeplerinin araştırılması ve kullanıcının seçeceği performans kriterleri ile uyumlu olacak yeni büyüklük düzeltme faktörlerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, yazarların yakın zamanda geliştirdikleri çevrimsel boşluk suyu basıncı gelişim ve kayma birim deformasyon birikim modellerinden yararlanılmıştır. Düzeltme faktörlerinin nicelik olarak yükleme süresinin yanı sıra seçilen performans kriteri, gerilme ve bağıl sıkılık gibi koşullardan da önemli ölçüde etkilendiği gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Deprem büyüklüğü, sıvılaşma, performans esaslı tasarım.

1. GİRİŞ

Sismik zemin sıvılaşmasının mühendislik yöntemleriyle değerlendirilmeye başlamasının ardından, yükleme çevrim sayısının (ya da yükleme süresinin) davranışa olan etkileri dikkat çekmiş ve farklı araştırmacılar konu üzerine eğilmişlerdir. Seed ve Lee (1966) öncü çalışmalarında, bugün büyüklük (süre) ölçekleme katsayısı (magnitude scaling factor, MSF; makalede de genel literatürle tutarlı olmak adına bu kısaltma ile anılacaktır) olarak bilinen düzeltme katsayısını tanıtmış, tekrarlı gerilmenin (ya da birim deformasyonun) mertebe olarak artması durumunda, yenilme (ya da sıvılaşma tetiklenmesi) için gereken çevrim sayısının daha az olacağını ifade etmişlerdir. Seed (1976) yılında sunduğu derleme çalışmasında tekrarlı kayma gerilme (ya da mukavemet) oranının süre etkileri dikkate alınarak düzeltilmesinin gerekli olduğunun altını çizmiş ve hatta bunun için de öncü bir abak çözümü önermiştir.

Seed ve Idriss (1982) çalışmasında mevcut vaka örneklerinden hareketle, örtü düzeltmesi yapılmış SPT-N darbe sayısı ile 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için sıvılaşmayı tetikleyecek tekrarlı kayma gerilme oranı (CSR) arasındaki ilişkiyi ifade etmek üzere bir abak çözümü sunmuştur. Seed vd. (1984) ise, sıvılaşma tetiklenmesinin 7.5'tan farklı büyüklüklerdeki depremler için de değerlendirilebilmesi amacıyla büyüklük ölçekleme katsayılarının (MSF) hesabı için aşağıda verilen ifadeyi tariflemiştir.

$$MSF = \frac{CSR_{M_w} \cdot GK_{\sigma}}{CRR_{M_w=7.5}} \tag{1}$$

Bu ifade de $CRR_{Mw=7.5}$ 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için geçerli tekrarlı mukavemet oranını (CRR), GK_{SIV} ise sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısını temsil etmektedir. Verilen bu genel tanım uyarınca farklı araştırmacılar tarafından laboratuvar deney verisi veya vaka örneklerinden derlenen veri ışığında farklı MSF ilişkileri geliştirilmiştir.

Laboratuvar tabanlı çalışmaların öncü örneği Seed ve Idriss (1982) çalışmasında verilmiş olup, ilerleyen yıllarda ise Idriss (1990, 1999) ve Liu vd. (2001) tarafından da benzer örnekler sunulmuştur. Bu tarz çalışmalar genel olarak, tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR) ve sıvılaşma tetiklenmesi için gerekli çevrim sayısı (N) arasındaki, logaritmik ölçekteki "neredeyse" doğrusal ilişkiden faydalanılmıştır. Benzer nitelikteki bir başka doğrusal (yine logaritmik ölçekte geçerli olmak üzere) ilişki ise Seed vd. (1975) çalışmasında altı çizildiği üzere CSR ile deprem büyüklüğü (M_w) arasında olup, MSF aşağıda tariflendiği üzere belirlenebilmektedir.

$$log\left[\frac{CSR}{CSR_{M_w=7.5}}\right] = log[MSF] = m \cdot log\left[\frac{N}{N_{M_w=7.5}}\right] = c \cdot log\left[\frac{M_w}{7.5}\right] \quad (2)$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus, birim deformasyon (γ_{maks}) ya da boşluk suyu basıncı oranına (r_u) bağlı verilen her farklı yenilme (ya da sıvılaşma) tanımı için farklı bir CSR-N ilişkisi (ve buna istinaden farklı "m" değeri) elde edilecek olmasıdır. Bunun doğal sonucu ise her farklı "m" değeri için geçerli olacak farklı ölçekleme değerleridir.

Büyüklük ölçekleme katsayılarının belirlenmesine yönelik bir diğer yaklaşım ise vaka örneklerinden derlenen verilerin istatistiki olarak değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşıma dayanan çalışmaların en bilinenleri ise, Andrus ve Stokoe (1997), Youd ve Noble (1997), Liu vd. (2001) ve Çetin vd. (2004) tarafından sunulmuştur.

Tablo 1'de, günümüzde yaygın kullanımı olan MSF - M_w ilişkileri özetlenmiştir. Görüleceği üzere -görece küçük deprem büyüklüklerinde daha da belirgin hale gelmek üzere- önerilen değerler arasında 2.0 kat mertebesinde farklara rastlanmaktadır. NCEER (1997) çalışma grubu söz konusu ayrışmayı belli bir sınır içinde tutmak adına, Idriss (1995) ile Andrus ve Stokoe (1997) önerilerini sırası ile alt ve üst sınır olarak tariflemiştir; fakat sıvılaşma tetiklenmesinin değerlendirilmesine yönelik yöntemlerin hesap hassasiyetleri dikkate alındığında bu mertebedeki farkların çok ciddi belirsizlikler yaratacağı düşünülmektedir. Bu nedenle, konuya ilişkin ilave araştırmaların yapılması gerekli görülmüştür.

Literatürdeki bu belirsizliklere ışık tutarak, farklı yenilme (ya da sıvılaşma) tanımları için geçerli olacak büyüklük (süre) ölçekleme katsayılarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, detaylarına ilerleyen kısımlarda değinileceği üzere laboratuvar tabanlı yaklaşım bir yaklaşım benimsenmiştir.

2. BÜYÜKLÜK (SÜRE) ÖLÇEKLEME KATSAYILARININ TANIMLANMASI

Tekrarlı kayma mukavemet oranı (CRR) ile çevrim sayısı (N) arasındaki ilişkilerin belirlenmesi için gerekli ilk adım CRR tanımının yapılmasıdır. Bu tanım temel olarak verilen sıvılaşma ya da yenilme tanımına bağlı olarak verilir. Literatür incelendiğinde, sıvılaşma tetiklenmesini tanımlamak üzere %3 ile 7.5 arasında değişen birim deformasyon ya da 0.8 ile 1.0 arasında değişen r_u değerlerinin kullanıldığı görülmektedir (Seed ve Lee, 1966; Wu vd., 2004 gibi). Bunların haricinde bir yenilme tarifi aranmaksızın, performans temelli değerlendirmelere esas olmak üzere daha farklı hedef birim deformasyon ya da r_u değerlerinin de CRR değerini tanımlamak üzere kullanılması mümkündür ($CRR_{\gamma_{maks}=\gamma_{maks,hedef}}$ veya $CRR_{r_u=r_{u,hedef}}$). Buna göre büyüklük ölçekleme katsayıları aşağıda verildiği gibi tanımlanabilecektir.

$$MSF_{\gamma} = \frac{CRR_{M_w,\gamma_{maks}=\gamma_{maks,hedef}}}{CRR_{M_w=7.5,\gamma_{maks}=\gamma_{maks,hedef}}} \quad (3)$$

$$MSF_{r_u} = \frac{CRR_{\mathbf{M_w},\mathbf{r_u}=\mathbf{r_{u,hedef}}}}{CRR_{\mathbf{M_w}=7.5,\mathbf{r_u}=\mathbf{r_{u,hedef}}}} \quad (4)$$

Tablo 1. Literatürdeki MSF Bağıntıları

M_w	Seed & Idriss	Idriss 1995	Idriss 1999	Ambraseys	Arango		Andrus & Stokoe	Youd & Noble		Liu vd.			Cetin vd.
					Mesafe	Enerji		<20	<50	Saha	Lab.	Ort.	
5.5	1.43	2.2	1.69	2.86	3	2.2	2.78	2.86	4.44	1.84	1.72	1.77	1.99
6	1.32	1.76	1.48	2.2	2	1.65	2.09	1.93	2.92	1.6	1.52	1.57	1.64
6.5	1.19	1.44	1.3	1.69	1.6	1.4	1.6	1.34	1.99	1.38	1.36	1.37	1.37
7	1.08	1.19	1.14	1.3	1.25	1.1	1.26	0.94	1.39	1.18	1.18	1.18	1.17
7.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8	0.94	0.84	0.88	0.67	0.75	0.85	0.81	-	0.73	0.83	0.83	0.83	0.87
8.5	0.89	0.72	0.77	0.44	-	-	0.66	-	0.56	0.76	0.76	0.76	0.76

Söz konusu bağıntıların kullanılabilmesi için, tekrarlı yükleme koşulları altında birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı gelişim davranışlarının pratik, doğru ve hassas şekilde modellenebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla yazarların (Çetin ve Bilge, 2012a) yakın zamanda geliştirdikleri olasılık teorisi tabanlı yarı-ampirik dinamik zemin davranış modellerinin kullanılması uygun görülmüştür. Bahsi geçen bu modeller, bir sonraki bölümde hatırlatma ve bütünlük açısından özetlenecektir.

3. YARI-AMPİRİK DİNAMİK ZEMİN DAVRANIŞ MODELLERİ

Çetin ve Bilge (2012a) çalışmasında oldukça detaylı bir deney programı takip edilmiş ve literatür dikkatlice taranarak benzer nitelikteki veriler derlenmiş, oldukça kapsamlı bir veri tabanı oluşturulmuştur. Derlenen veri, olasılıksal yöntemlerle değerlendirilmiş ve suya doygun temiz kumların tekrarlı yükler altındaki birim deformasyon biriktirme ve boşluk suyu basıncı oluşturma davranışlarını modellemek üzere yarı-ampirik ilişkiler geliştirilmiştir.

Boşluk suyu basıncının uygulanan her bir çevrimde, çift yönlü maksimum kayma birim deformasyon (γ_{maks}), bağıl sıkılık (D_R) ve düşey efektif gerilmenin ($\sigma'_{v,0}$) bir fonksiyonu olarak nasıl değiştiğini modellemek üzere Denklem 5'teki ifade verilmiştir.

$$r_{u,N} = 1 - \exp\left(-\frac{-0.407 \cdot \gamma_{\mathbf{maks},N}}{-0.486 + 0.025 \cdot \ln \sigma'_{v,0} - (D_R/100)} \cdot \left(\frac{0.620}{1+\gamma_{\mathbf{maks},N}} + 1 \right) \right) \quad (5)$$

Görüldüğü üzere bu model, girdi parametresi olarak (γ_{maks}) değerine ihtiyaç duymaktadır. Çetin ve Bilge (2012a) çalışmasında 20 çevrim sayısı boyunca (γ_{maks}) değerinin değişimini modellemek üzere Denklem 6'daki ifadenin kullanılması önerilmiştir.

$$\gamma_{\mathbf{maks},N} = \gamma_{\mathbf{maks},20} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \left\{ 2 \left(\frac{N}{20} \right)^{1.285^{\left(\frac{\gamma_{\mathbf{maks},20}}{\gamma_{kritik}} \right)^{0.125 \cdot \ln(D_R)}}} - 1 \right\} \right) \cdot \left(\frac{N}{20} \right)^{-0.088} \tag{6}$$

Denklem 6'daki γ_{kritik} değeri ise malzeme genleşme ("dilation") özellikleri olan D_R ve $\sigma'_{v,0}$ cinsinden aşağıda verildiği şekilde tariflenmiştir.

$$\gamma_{kritik} = \frac{0.943 \cdot D_R}{(\sigma'_{v,0})^{0.295}} - 7.65 \tag{7}$$

Öte yandan, Denklem 6'da yer alan ve 20 çevrim sonunda oluşacak maksimum makaslama birim deformasyonu temsil eden $\gamma_{maks,20}$ ise Çetin vd. (2009) tarafından verildiği üzere Denklem 8'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\gamma_{maks,20} = \frac{-0.025 \cdot N_{1,60,CS} + \ln(CSR_{SS,20,1-D,1atm}) + 2.613}{0.004 \cdot N_{1,60,CS} + 0.001} \tag{8}$$

$$\text{limit: } 5 \le N_{1,60,CS} \le 40,\ 0.05 \le CSR_{SS,20,1-D,1atm} \le 0.60 \text{ ve } 0\% \le \gamma_{maks} \le 50\%$$

Çetin ve Bilge (2012a) çalışmasında gösterildiği gibi söz konusu ifadeler, suya doygun temiz kumların dinamik davranışlarını oldukça tarafsız ve muadilleriyle kıyaslandığında daha başarılı tahminler üreterek modelleyebilmektedir.

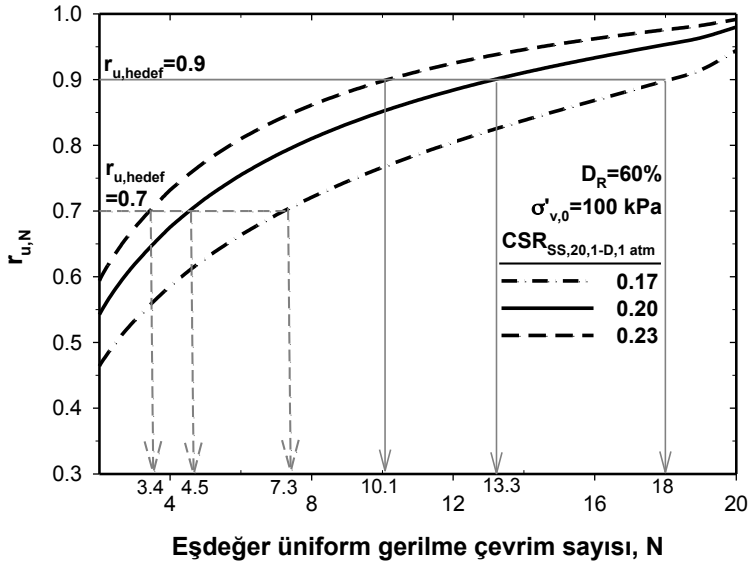
4. BÜYÜKLÜK (SÜRE) ÖLÇEKLEME KATSAYILARININ (MSF) BELİRLENMESİ

Denklem 5-8 arasında verilen ifadeler, seçilen farklı hedef γ_{maks} ve r_u seviyeleri için MSF değerlerini elde etmek üzere kullanılacaktır. Önerilen yöntemi tarif etmek üzere, %60 bağıl sıkılığa sahip,100 kPa efektif gerilme altında K_0 koşullarında konsolide edilmiş suya doygun temiz bir kum örneğinin üç farklı CSR seviyesi (0.17, 0.20 ve 0.23) altındaki dinamik davranışı modellenecektir. Yapılan simülasyon, r_u-çevrim sayısı ve γ_{maks}-çevrim sayısı cinsinden sırasıyla Şekil 1 ve 2'de gösterilmiştir. Performans kriterleri olarak r_u=0.8 ve 0.9 değerleri ile γ_{maks}= %4 ve 6 seviyeleri seçilmiş, bu doğrultuda CSR - N ilişkileri oluşturularak Şekil 3'te sunulmuştur. Aynı şekil üzerinde her bir CSR - N ilişkisine ait "m" değeri de rapor edilmiştir. Daha önceki kısımlarda değinildiği üzere her farklı performans kriteri için farklı bir "m" değeri elde edilmektedir.

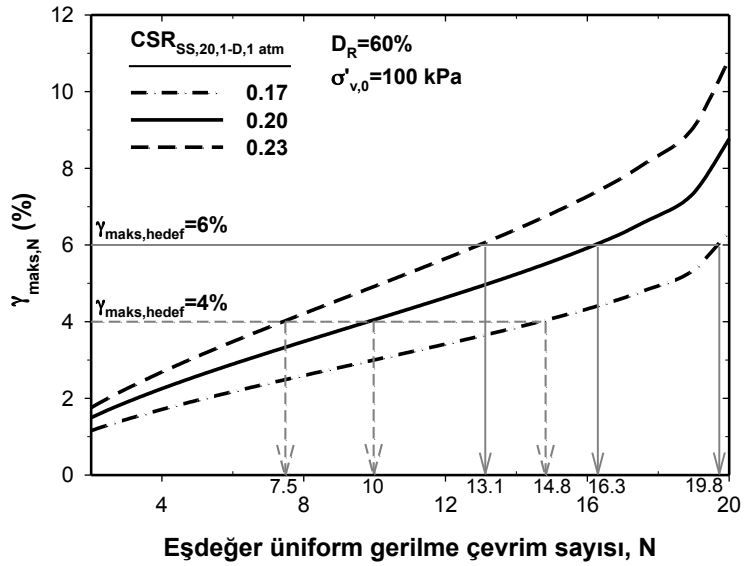
Seçilen performans seviyelerine benzer şekilde zemin bağıl sıkılığı (D_R) ve düşey efektif gerilme de ($\sigma'_{v,0}$), "m" değerini etkilemektedir (DeAlba vd., 1975; Tatsuoka ve Silver, 1981 çalışmalarında değinildiği gibi). Bahsi geçen yarı-ampirik modeller uyarınca bir duyarlılık çalışması gerçekleştirilmiş ve "m" değerinin farklı değişkenlerden ne şekilde etkilendiği ortaya koyulmuştur (Şekil 4). Gözlenen davranış trendleri uyarınca, "m" değeri hedef performans kriteri (γ_{maks} ve r_u), D_R ve $\sigma'_{v,0}$ değerlerinin bir fonksiyonu olarak aşağıda belirtildiği şekilde ifade edilmiştir. Söz konusu ifadeler maksimum olabilirlik yöntemi kullanılarak geliştirilmiş olup, model geliştirilmesine ilişkin detaylara sayfa kısıtlamaları nedeniyle değinilmemiştir.

$$\ln(m_{\gamma_{max}}) = \ln\left[-\left\{\begin{matrix}\gamma_{max}^{1.308}\cdot(1.952\cdot\ln D_R - 6.719)+\\ \gamma_{max}^{1.687}\cdot(0.529\cdot\ln\sigma'_{v,0} - 1.538)+0.231\end{matrix}\right\}\cdot 0.03\right] \pm 0.055 \quad (9)$$

$$\ln(m_{r_u}) = \ln\left[-\left\{\begin{matrix}r_u^{4.803}\cdot(2.506\cdot\ln D_R - 19.134)+\\ r_u^{5.549}\cdot(0.645\cdot\ln\sigma'_{v,0} + 7.798)+0.621\end{matrix}\right\}\cdot 0.612\right] \pm 0.107 \quad (10)$$

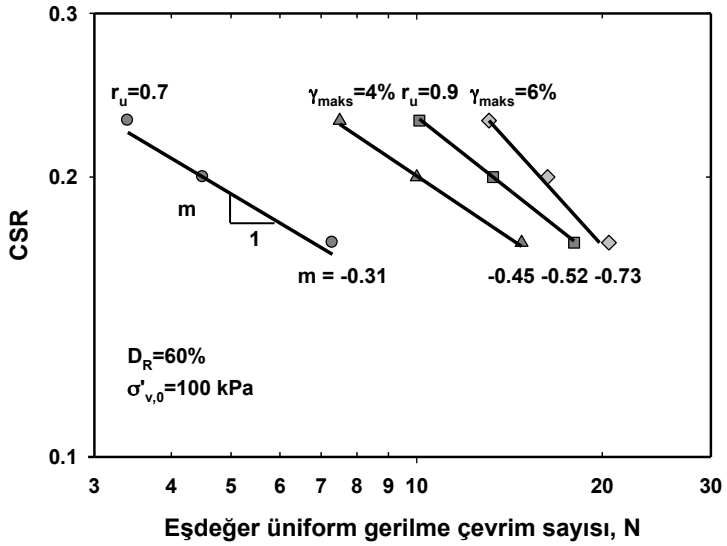


Şekil 1. Temsili suya doygun kum örneğinin r_u davranışı



Şekil 2. Temsili suya doygun kum örneğinin γ_{maks} davranışı

Denklem 9 ve 10'da verilen "m" ifadeleri ile MSF bağıntılarının çevrim sayısı (N) cinsinden belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Öte yandan, MSF bağıntıları geleneksel olarak M_w cinsinden tariflenmektedir (Denklem 2) ve bu nedenle "m" ile "c" (log(CSR)-log(M_w) ilişkisinin eğimi) değerleri arasında bir ilişki kurulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, Liu vd. (2001) çalışmasında verilen eşdeğer üniform çevrim sayısı (N) tahmin yönteminden faydalanılmıştır. Söz konusu çalışmada Liu vd., N - M_w ilişkisini fay kırığına olan mesafe (R), saha tipi (S: kaya(0)/ zemin(1)) gibi bileşenler cinsinden 3 farklı "m" değeri için (-0.37, -0.41 ve -0.50) sunmuştur. Liu vd. önerilerini farklı "m" değerleri için kullanmak üzere iç ve dışkestirim yapılmış, Şekil 3'te verilen CSR-m ilişkilerinin karşılık geldikleri MSF değerleri Denklem 2'den faydalanılmak üzere belirlenmiştir.



Şekil 3. m değerlerinin farklı r_u ve γ_{maks} seviyelerine göre değişimi

Çalışmanın temel amacı olan farklı performans seviyeleri ile uyumlu MSF bağıntıları üretebilmek adına, detayları Çetin ve Bilge (2012b) çalışmasında sunulduğu üzere PEER veri tabanında rastgele seçilen deprem kayıtlarıyla 112 ivme-zaman kaydının bulunduğu bir veri tabanı oluşturulmuş; Liu vd. (2001) çalışmasından esinlenerek "c" ve "m" değerleri arasında Denklem 11'de sunulan yarı-ampirik ilişki geliştirilmiştir.

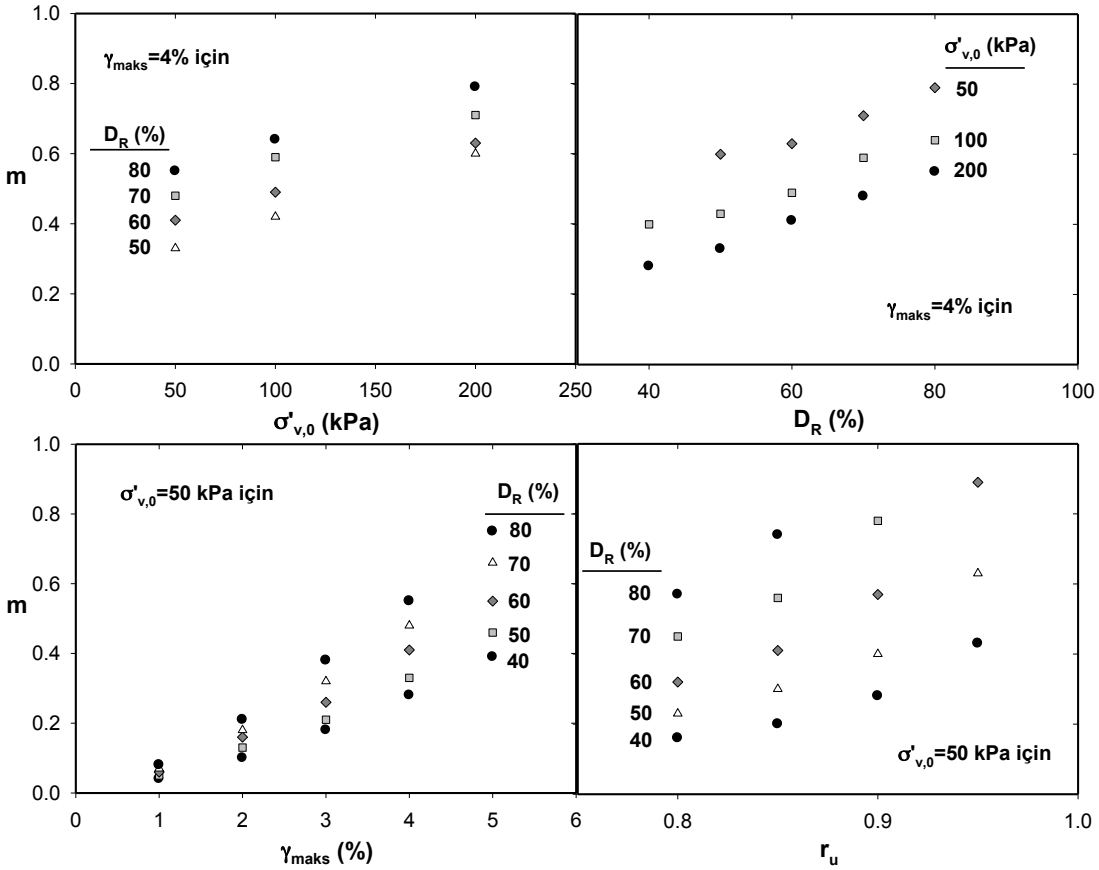
$$ln(c) = ln\left[(-6.6479 + 0.3096 \cdot S + 0.2924 \cdot ln\,R) \cdot (-m)^{1.4391}\right] \pm 0.022 \tag{11}$$

Denklem 11'de verilen ifadeye göre c tahmini, m değerine (bu değerin performans kriteri ile D_R ve $\sigma'_{v,0}$ cinsinden tariflendiği unutulmamalıdır) bağlı şekilde yapıldıktan sonra Denklem 12 uyarınca MSF değerleri hesaplanabilecektir.

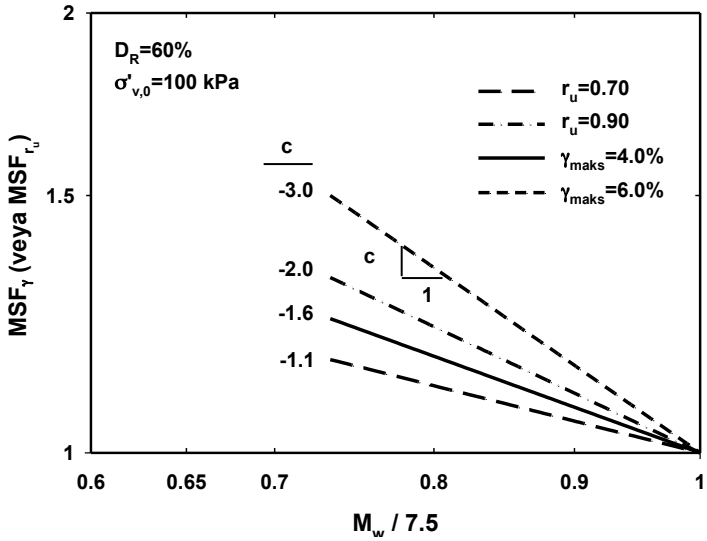
$$MSF = \left(\frac{N}{N_{M_w=7.5}}\right)^m = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^c \tag{12}$$

Sismik kaynağa 5 km mesafede (R) olan suya doygun, kumlu bir zemin profilinin (S=1) bağıl sıkılığının (D_R) %53, temsili düşey efektif gerilmesinin ise 56 kPa olması kabulü ile (bu değerler Çetin vd. (2004) çalışması kapsamında derlenen sıvılaşmış/sıvılaşmamış vaka örneklerine ait veri tabanının medyan değerleri olup rastgele seçilmemiştir) farklı γ_{maks} ve r_u seviyeleri için MSF değerleri hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 6 ve 7'de

sunulmuştur. Aynı şekillerin üzerinde kıyaslama yapılmasına olanak tanımak üzere NCEER (1997) önerileri, Seed ve Idriss (1982), Youd ve Noble (1997, P_L=%50 ilişkisi), Liu vd. (2001, ortalama değerleri) ve Çetin vd. (2004) tarafından önerilen büyüklük ölçekleme katsayıları da sunulmuştur. İlgili şekillerden takip edilebileceği üzere, NCEER önerileri %5 - 6 mertebelerindeki γ_{maks} ile r_u değerinin 0.9'dan büyük olduğu koşullar için geliştirilen MSF değerleri ile uyumludur; fakat seçilen performans kriterinin farklı olması durumunda ciddi farklılıklara rastlanmaktadır. Bahsi geçen birim deformasyon veya r_u değerleri ile mevcut sıvılaşma tanımlarında kullanılan değerler arasında parallellik bulunmaktadır; fakat sıvılaşmanın tetiklenmeyeceği sahalarda bu mertebelerdeki birim deformasyonlara ya da r_u değerlerine ulaşılamayacağı dolayısı ile mevcut bağıntıların taraflı sonuçlar üreteceği unutulmamalıdır.

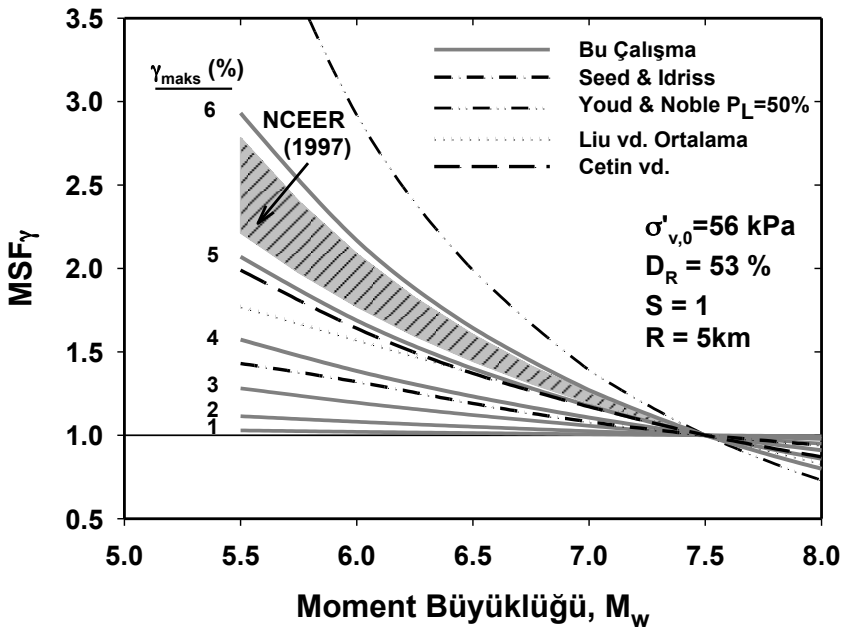


Şekil 4. m değerine yönelik duyarlılık çalışması sonuçları

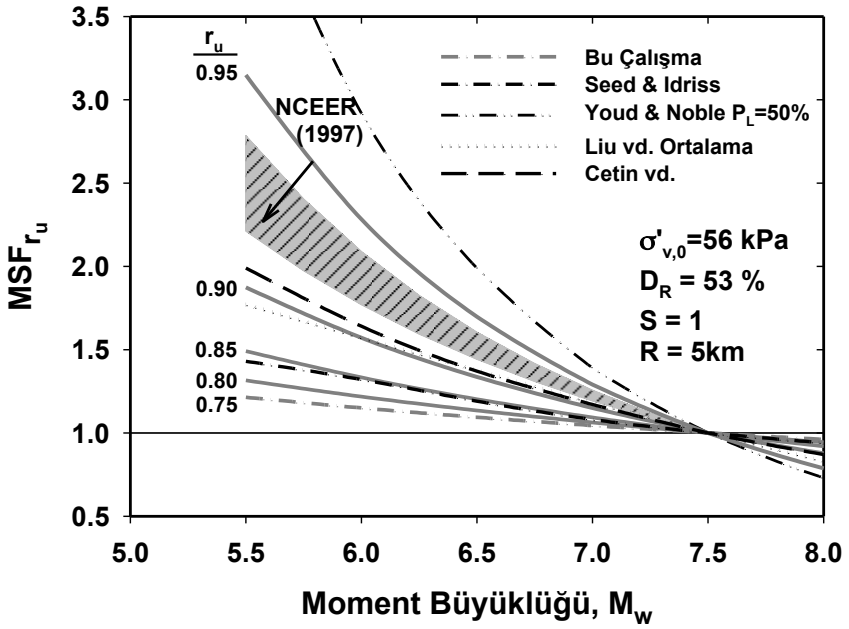


Şekil 5. c değerlerinin farklı r_u ve γ_{maks} seviyelerine göre değişimi

Burada, Youd ve Noble (1997) çalışması ayrı bir ilgiyi haketmektedir; zira bu çalışmada MSF değeri sıvılaşma olasılığının (P_L) bir fonksiyonu olarak tariflenmiştir ve P_L değeri dolaylı şekilde de olsa maksimum kayma birim deformasyon potansiyeli ile ilişkilidir. Her ne kadar nicelik olarak Youd ve Noble tarafından önerilen MSF tahminleri mevcut bağıntılardan (ve bu çalışmada önerilen değerlerden) ayrışsa da, farklı P_L değerleri için hesaplanan MSF değerlerinin bu çalışmadan sunulanlara benzer bir eğilim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6. Farklı γ_{maks} seviyeleri için önerilen ölçekleme katsayılarının mevcut bağıntılarla kıyaslanması



Şekil 7. Farklı r_u seviyeleri için önerilen ölçekleme katsayılarının mevcut bağıntılarla kıyaslanması

5. ÖZET VE SONUÇLAR

Sıvılaşma tetiklenme analiz yöntemlerinin önemli bir bileşeni, 7.5'tan farklı deprem büyüklükleri için yapılacak büyüklük (süre) düzeltmeleridir. Geride kalan 30 yılı aşkın sürede, gerek laboratuvar (Idriss, 1990 ve 1995; Liu vd., 2001 gibi) gerekse de vaka örneklerine (Andrus ve Stokoe, 1997; Çetin vd. 2004 gibi) dayanan çok sayıda büyüklük (süre) ölçekleme bağıntısı geliştirilmiştir. Küçük deprem büyüklükleri için daha da belirgin hale gelmek üzere, önerilen bağıntılar arasında 2 kat mertebesinde farklılıklara rastlamak mümkündür. NCEER çalışma grubunun da (1997) altını çizdiği üzere, bu mertebelerdeki farklılıklar ciddi belirsizliklere neden olmaktadır ve bu ölçekleme katsayısının daha doğru ve hassas şekilde hesaplanması için ilave çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürdeki bu ihtiyaçtan hareketle, hem bu ayrışmanın nedenleri araştırılmış hem de performans esaslı, pratik olarak kullanılabilen yeni ölçekleme bağıntıları geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında yapılan temel çıkarımlar ise aşağıda özetlenmiştir.

Seçilen hedef birim deformasyon ya da r_u seviyesi ile ilgilenilen malzemenin genleşme özelliklerine (D_R ve $s'_{v,0}$) göre oldukça farklı CSR - N ilişkileri elde edilebilir. Buna bağlı olarak MSF bağıntıları da ciddi şekilde ayrışabilecektir.

Performans kriteri olarak %4-6 birim deformasyonlardan çok daha düşük değerlerin tercih edileceği kritik yapılar (nükleer enerji santralleri gibi) için sıvılaşma tetiklenme analizleri yapılırken mevcut bağıntıların kullanılması, olması beklenenden çok daha yüksek MSF değerleri ile analiz yapılmasına ve bu nedenle güvensiz tarafta kalan tahminlerde bulunulmasına neden olabilir. Bu nedenle, kritik yapılar için daha da önemli olmak üzere yeni geliştirilen performans esaslı büyüklük ölçekleme katsayılarının kullanılmasının daha doğru olacağına inanılmaktadır.

KAYNAKLAR

Ambraseys, N. N. (1988). "Engineering seismology." *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, 17, 1-105.

Andrus, R. D., and Stokoe, K. H., II (1997). "Liquefaction resistance based on shear wave velocity." *Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, State Univ. of New York, Buffalo, 89-128.

Arango, I. (1996). "Magnitude scaling factors for soil liquefaction evaluations." *J. Geotech. Eng.*, 126(11), 1015-1025.

Cetin, K. O., Bilge, H. T. (2012). Cyclic large strain and induced pore pressure models for saturated clean sands. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental. Engineering.*, 138(3), 309-323.

Cetin, K. O., Bilge, H. T. (2012). Performance-based assessment of magnitude (duration) scaling factors. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental. Engineering.*, 138(3), 324-334.

Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., and Seed, R. B. (2009). "Probabilistic models for cyclic straining of saturated clean sands." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(3), 371-386.

Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder Jr., L. F., Kayen, R. E., Moss, R. E. S. (2004). "SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(12), 1314-1340.

DeAlba, P., Chan, C., and Seed, H. B. (1975). "Determination of soil liquefaction characteristics by large-scale tests." *Rep. No. EERC 75-14*, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif.

Idriss, I. M. (1990). "Response of soft soils sites during earthquakes." *Proc. H. Bolton Seed Memorial Symp.*, Vol.2, BiTech Publishers, Ltd., Vancouver, 273-290.

Idriss, I. M. (1995). *H. B. Seed Memorial Lecture*, University of California, Berkeley.

Idriss, I. M. (1999). "An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential." *Proc., TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction*, *Pub. No. FHWA-RD-99-165*, FHA.

Liu, A. H., Stewart, J. P., Abrahamson, N. A., and Moriwaki, Y. (2001). "Equivalent number of uniform stress cycles for soil liquefaction analysis." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(12), 1017-1026.

Seed, H. B. (1976). "Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes." *Liquefaction problems in geotechnical engineering, Preprint 2752, Proc.*, ASCE Ann. Conv. and Expo., Phi., 1-104.

Seed, H. B, Idriss, I. M. (1982). "Ground motion and soil liquefaction during earthquakes." Earthquake Engineering Research Institute Monograph, Oakland, Calif.

Seed, H. B., Idriss, I. M., Makdisi, F., Banerjee, N. (1975). "Representation of, irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analysis." *Rep. No.EERC 75-29*, Univ. of California, Berkeley.

Seed, H. B., Lee, K. L. (1966). "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading." *J. Soil Mech. Found. Div.*, 92(6), 105–134.

Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Chung, R. M. (1984). "The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations." *EERC Report No. UCB/EERC-84/15*, University of California at Berkeley.

Tatsuoka, F., and Silver, M.L. (1981). "Undrained stress-strain behavior of sand under irregular loading." *Soils and Foundations*, 21(1), 51-66.

Youd, T. L., and Noble, S. K. (1997a). "Magnitude scaling factors." *Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Nat. Ctr. For Earthquake Engrg. Res., St. Unv. of New York, Buffalo, 149-165.

Wu, J., Kammerer, A. M., Riemer, M. F., Seed, R. B., Pestana, J. M. (2004). "Laboratory study of liquefaction triggering criteria." *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Van., BC, Canada, Paper No. 2580.