

Geoteknik bakış açısı ile özgün bir deprem hasar görebilirlik yönteminin geliştirilmesi

S. Feyza ÇİNİCİOĞLU*, İlknur BOZBEY, Sadık ÖZTOPRAK, M. Kubilay KELEŞOĞLU

İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar, İstanbul

Özet

Gerek kentleşmiş, gerekse kentleşmeye açılacak olan bölgelerde olası bir depremin sebep olacağı zararın en aza indirilebilmesi için deprem tehdidinin boyutlarının mevcut yerel ve yapısal koşullarla birlikte oldukça gerçekçi bir seviyede tanımlanması ve alınması gereken önlemlerin buna göre belirlenmesi gerekmektedir. Deprem gibi afetlere karşı hazırlıklı olma, can ve mal kaybını en aza indirme gayretleri insani boyutları sebebiyle küresel niteliktedir. Bu makalede bu kapsamda yapılmış olan detaylı ve özgün bir çalışma tanıtılmaktadır. Şehirleşmiş alanlarda hasar görülebilirlik seviyesinin tanımlanmasına yönelik olarak ve/veya yerleşime yeni açılacak alanlar ile ilgili çalışmalara yön göstermek üzere bir deprem hasar görebilirlik yöntemi geliştirilmiştir. Birincil hasar etkeni olarak yer sarsıntısı, ikincil etkenler olarak sıvılaşma, dinamik yükler altında taşıma gücü kaybı ve heyelan tetiklenmesi göz önüne alınmıştır. Tüm bu etkenler için performans bazlı değerlendirme yapılmıştır. Dinamik yükler altında taşıma gücü kaybına bağlı oluşabilecek oturmalar literatürde ilk kez bu çalışma kapsamında hasar görebilirlik çalışmalarına dâhil edilmiştir. Her bir hasar verici etkenin yaratacağı hasar seviyesi önemsiz hasar seviyesi-çok yüksek hasar seviyesi aralığında puanlamıştır. Bu puanların oluşturulmasında literatürde yer alan önemli veritabanları ve yayınlar kullanılmıştır. Her bir hasar puanı için elde edilen puanlar uygun bir şekilde birleştirilmiş ve böylece her bir nokta için tek bir hasar puanı elde edilmiştir. Makalenin son kısmında geliştirilmiş olan yöntem Bakırköy İlçesi için uygulanmıştır. İlçe için yapılmış olan detaylı arazi çalışmalarına dayanan analizler neticesinde farklı tipteki yapılar için yer sarsıntısı sıvılaşma, taşıma gücü ve sıvılaşmaya bağlı hasar potansiyeli ve toplam hasar görebilirlik incelenmiştir. İlçede tasarım depremi için oluşması beklenen bu hasar seviyeleri CBS ortamında haritalanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Deprem hasar görebilirlik çalışmaları, yer sarsıntısı, sıvılaşma, taşıma gücü kaybı, heyelan, toplam hasar görebilirlik.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: S. Feyza Çinicioğlu, feyzac@istanbul.edu.tr Tel: (212) 590 07 38.

Makale metni 14.06.2010 tarihinde dergiye ulaşmış, 14.09.2011 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 29.02.2012 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Çinicioğlu, S. F., Bozbey, İ., Öztoprak, S., Keleşoğlu M. K., (2011) 'Geoteknik bakış açısı ile özgün bir deprem hasar görebilirlik yönteminin geliştirilmesi', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 4, 23-34" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Development of a novel earthquake assessment methodology based on geotechnical point of view

Extended abstract

Earthquake damage assessment methodologies are applied mainly for two purposes; as a damage assessment methodology in urban areas and as a land use study in undeveloped areas for the purpose of city planning. Satisfactory earthquake damage assessment methodologies should incorporate the information from geological and geophysical investigations, quantitative, qualitative analyses and expert interpretations. In today's state-of-the-art, despite the existence of numerous applications in this context, there is still a need for comprehensive and quantitative methodologies to ensure that all the damage-causing phenomena are well understood and included. Regarding these studies, data collection and quality are of primary importance because once spatial database is implemented; it is rarely scrutinized for its correctness, completeness or accuracy leaving behind serious data quality issues. In Turkey devastating earthquakes, which hit Kocaeli and Düzce area in 1999 have created an increasing awareness about the damaging potential of earthquakes. In the context of earthquake preparedness efforts, microzonation projects have been prepared for various districts in Istanbul and Marmara region.

In this paper, an integrated earthquake damage assessment methodology is presented to fulfill the need for standardized and quantitative approaches in this area. The approach inherently carries a soil-structure interaction concept by combining the site specific geotechnical and structural properties in a quantitative manner. The basic merit of the proposed methodology is to include all the damage making phenomenon systematically and to evaluate their effects both individually and in combination. Earthquake damage assessment analyses with respect to primary and collateral effects were conducted. The primary damage-causing effect was accepted to be ground shaking and the collateral effects were accepted as liquefaction, seismic bearing capacity degradation and landslides. At the present state of the art, existing spatial earthquake damage assessment studies acknowledge the collateral effects due to liquefaction and landslides but fail to

consider those due to seismic bearing capacity degradation of shallow foundations. This consideration is important, because while liquefaction is a threat for loose and granular soils, seismic bearing capacity degradation may occur in almost all types of foundation soils. In this paper, a damage grade was assigned for each individual event and also an integrated damage grade for their combined effects. Assigned damage grades were based on an interpretation of a probabilistic "damage-damage causing event" relationship available in the literature and applicable for the region. The damage grades given in this paper reflect a rough probabilistic evaluation but their function is to define a single decision made over a set of probabilities.

The proposed methodology was also applied to Bakirkoy district in Istanbul and the results indicate the effectiveness of the approach. In order to collect the necessary geological, geotechnical data for the spatial analysis 87 borings amounting to 2011 meters were made in an area of 6.1 km². The study was conducted by a multidisciplinary team of Istanbul University (Istanbul University Report, 2000). An extensive laboratory-testing program was conducted to determine physical and mechanical properties of soil and rock samples recovered from the boreholes. Seismic wave refraction surveys were conducted at 125 locations and electrical resistivity measurements were made at 210 points All the data related to the location of boring logs, geophysical measurement points, three dimensional topography and geology of the region were displayed via GIS maps. The analyses have shown that the district carries a considerable risk of being significantly affected by future earthquakes and therefore damage and consequent economic losses from a great magnitude earthquake centered near the district would be severe.

Although it has been applied in Turkey, the proposed methodology has the basic feature of being applicable to any earthquake-prone area. The methodology developed can be extended to add the effects of any other damage making phenomena that may affect the considered region.

Keywords: *Earthquake damage assessment, ground shaking, liquefaction, seismic bearing capacity degradation.*

Giriş

Gerek kentleşmiş, gerekse kentleşmeye açılacak olan bölgelerde olası bir depremin sebep olacağı zararın en aza indirilebilmesi için deprem tehdidinin boyutlarının mevcut yerel ve yapısal koşullarla birlikte oldukça gerçekçi bir seviyede tanımlanması ve alınması gereken önlemlerin buna göre belirlenmesi gerekmektedir. Deprem gibi afetlere karşı hazırlıklı olma, can ve mal kaybını en aza indirme gayretleri insani boyutları sebebiyle küresel niteliktedir. Bu çalışmaların ilk örnekleri son 15-20 yılda zengin ve çok gelişmiş ülkelerde gerçekleştirilmiş ve bu konularda uluslararası bilgi birikimi önemli bir düzeye ulaşmıştır. Ülkemizde yürütülmesi gereken çalışmalar ulusal zorunluluğumuz olmakla birlikte bu çalışmalarda belli bir sistematığın sağlanabilmesi ve denetim mekanizmasının oluşturulabilmesine ihtiyaç vardır. Bunun için uluslararası kabul edilmiş sistematik esas alınmakla birlikte yerel koşulları da dikkate alan metodolojilerin geliştirilmesi gereklidir.

Depreme hazırlık çalışmalarının ve deprem sonrası acil yardım çalışmalarının hukuki, tıbbi, sosyolojik, fiziksel, mali ve benzeri çok çeşitli boyutları olmakla birlikte, depremde can kaybı ve hasarın çoğu mühendislik hizmetlerinin yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. Depreme karşı zarar görülebilirliğin azaltılması konusunda gerekli mühendislik hizmetleri iki ana grupta tanımlanabilir. Bu gruplar şehirleşmiş alanlarda zarar görülebilirlik seviyesinin tanımlanması ve yerleşime yeni açılacak alanlar ve yeni yapılacak yapılarla ilgili çalışmaların tanımlanmasıdır.

Bu çalışmada yukarıda tanımlanmış olan her iki gruba da hizmet verecek şekilde bir deprem hasarı değerlendirme metodolojisi geliştirilmiştir (Çinicioğlu vd., 2007, Çinicioğlu vd., 2003). Birincil hasar etkeni olarak yer sarsıntısı tanımlanmıştır. Bu çalışmada sıvılaşma, dinamik yükler altında taşıma gücü kaybı ve heyelan tetiklenmesi gibi etkiler de ikincil etkiler olarak belirlenmiştir. Günümüz uygulamalarında sıvılaşma ve heyelana bağlı hasarlar gözönüne alınmakla beraber, yüzeysel temeller için dinamik yükler altında oluşan taşıma gücü kaybı hasar verici etken olarak tanımlanmamaktadır. Bu çalışmada dinamik yükler altında taşıma gücü kaybı sebepli oturmalar da ikincil hasar olarak

kabul edilmiş ve buna yönelik özgün bir metod geliştirilmiştir. Hasar verici etkiler “önemsiz hasar seviyesi-çok yüksek hasar seviyesi” aralığında puanlanmış ve böylece her etki için bir puan elde edilmiştir. Daha sonra bu puanlar uygun bir şekilde birleştirilmiş ve böylece tek bir nokta için tek bir hasar puanı elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında geliştirilmiş olan yöntem Bakırköy İlçesi için uygulanmıştır. İlçede tasarım depremi için oluşması beklenen hasar seviyeleri CBS ortamında haritalanmıştır.

Literatür ve metodoloji

Yapılarda hasara sebep olan deprem etkileri arasında kuvvetli yer sarsıntısı birincil etki olarak en büyük öneme sahip olmakla birlikte sıvılaşma, taşıma gücü kaybı ve heyelan tetiklenmesi gibi ikincil etkilerin de toplam zemin davranışını belirlemede büyük önemi vardır. Yer sarsıntısına paralel olarak sözü edilen ikincil etkilerin hepsinin bir arada oluşma olasılığı düşüktür. Çoğunlukla bir kaç bir arada oluşur veya birbirlerini tetikler. Günümüz uygulamalarında dinamik yükler altında oluşan sıvılaşma ve heyelan deprem hasarı belirleme çalışmalarında dikkate alınmaktadır (King ve Kremidjian, 1994; King, 1997), ancak dinamik yükler altında meydana gelen taşıma gücü kaybı henüz bu yöntemlerde yerini almamıştır. Son yıllarda depremler sonrasında yapılan gözlemlerde ve laboratuvarda yapılan büyük ölçekli deneylerde, doymun olmayan ve daha sıkı zeminler üzerindeki yapı temellerinde de oturmalar olduğu görülmektedir. Laboratuvar çalışmaları ve arazideki gözlemler dinamik yükler altında temellerdeki göçmenin sadece temel zemininin sıvılaşmasından değil, zeminin direncini kaybetmesiyle oluşan taşıma gücü kaybından da meydana gelebileceğini göstermektedir. Taşıma gücü kaybı Richards ve diğerleri (1990) tarafından “akışkanlaşma” (fluidization) kavramı ile açıklanmış ve daha sonra Richards vd., (1993) ve Budhu and Al-Karni (1993) gibi çalışmalarda da hesaplama esasları verilmiştir. Bu konu Sarma ve Iossifelis (1990), Shi ve Richards (1994), Maugeri ve diğerleri (2000), Kumar ve Rao (2002) ve Merlos ve Romo (2006) gibi birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Bu araştırma sonuçlarına dayanarak bu çalışmada sıvılaşmaya ek olarak taşıma gücü kaybı nedenli deplasmanlar da incelenmektedir.

Bu makalede sunulan çalışma kapsamında öncelikle birincil ve ikincil hasar etkenleri belirlenmiş ve her bir etken için bir hasar puanı atanmıştır. Hasar görebilirliğin veya arazi güvenliğinin toplam değerlendirilmesi birincil ve ikincil etkilerin hasara katkısının birleştirilerek ifadesini gerektirmektedir. Bu çalışmalar sonucunda hasar görebilirlik puanları elde edilmiş ve CBS ortamında hasar görebilirlik seviyesine göre bölgelendirilerek deprem riskini belirlemeye ve hasar azaltmaya yönelik çalışmalara bir baz oluşturulmuştur.

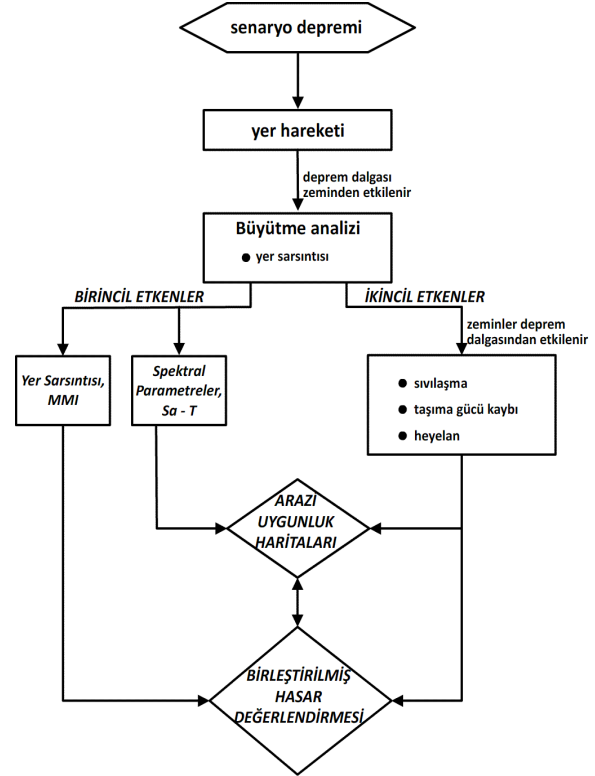
Metodoloji

Bu çalışmada geliştirilen yöntem Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir. Detaylar aşağıda verilecektir.

Zemin sarsıntısına bağlı hasarın tanımlanması: Birincil hasar verici etken zemin sarsıntısıdır. Mexico City, Loma Prieta ve Kocaeli depremlerinin ortaya çıkardığı gerçek deprem dalgalarının zemin yüzeyine nakledilmesi sırasında içinden geçtiği zemin profilinin özelliklerinden büyük ölçüde etkilendiğidir. Yüzey dalgaları ivme ve frekans içeriği bakımından anakayaya nazaran önemli değişim gösterebilmektedir ve dolayısıyla deprem tepki spektrumu tamamen değişmektedir. Zemin büyütme değerleri mikrobölgeleme çalışmalarında depremin hasar yaratıcı etkisini tanımlamak açısından birincil derecede önemlidir. Spektral ivme ve spektral periyot değerleri deprem sebebi ile yapılar aktarılabilecek yüklerin ve zemin-yapı etkileşiminin gerekli parametreleridir. Bu çalışmada zemin büyütme analizleri için NEHRP (1997) ve SHAKE91 kullanılmıştır. Her iki yöntemde de zemin özelliklerinin çok sağlıklı bir şekilde tanımlanmış olmaları esastır.

Bu çalışmada, zemin sarsıntısına bağlı hasarın tanımlanması amacıyla öncelikle yapı hasarı ve deprem hasarı arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için kullanılabilir parametreler incelenmiş ve deprem şiddetinin en uygun parametre olduğuna karar verilmiştir. Çünkü deprem şiddeti, depremin ivme, frekans içeriği ve süresini kapsamaktadır. Deprem şiddeti tanımlamasına yönelik olarak Modifiye Mercalli Şiddeti (MMI) değerleri kullanılmıştır. Literatürde yapı hasarı ve Modifiye Mercalli Şiddeti arasında

ilişkiler bulunmaktadır (ATC 13). Ancak, yerel yapı stokunun özelliklerini de içermesi bakımından, Türkiye’de yerel yapı stokuna ilişkin veriyi istatistiksel olarak değerlendirmiş olan Erdik ve diğerleri (2000)’e ait grafik (Şekil 2) bu çalışmada esas alınmıştır. Erdik ve diğerleri (2000) tarafından verilen grafikte yer alan Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK, 1981) ölçeği bu çalışmada kullanılan MMI ölçeği ile uyumludur.



Şekil 1. Geliştirilen yöntemin akış şeması

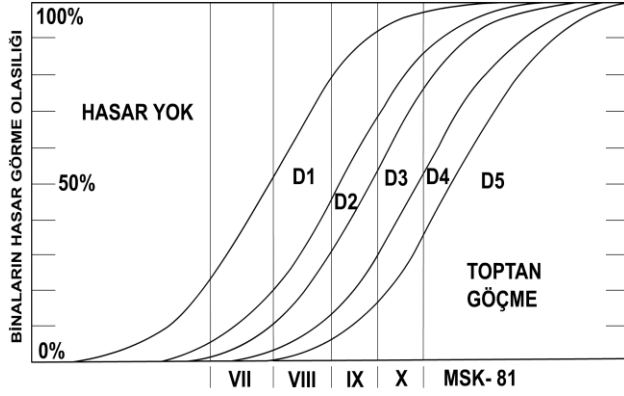
Bu makalede MMI değerleri ilk olarak tasarım depremi için her sondaj noktasına özel olarak, daha sonra yerel zemin koşullarını dikkate alacak şekilde değiştirilmiştir. Bunun için aşağıdaki formüller kullanılmış ve o noktaya yönelik MMI* değerleri elde edilmiştir. Bu formüller Crespellani ve diğerleri (1991) ve Borchardt (1997) tarafından verilmektedir.

$$MMI = 8.6 + 1.48M - 6.4 \log(d + 14) \quad (1)$$

$$\delta I_{MMI} = 3.48 \log(F_v) \quad (2)$$

$$MMI^* = MMI + \delta I_{MMI} \quad (3)$$

Bu formüllerde (M) deprem büyüklüğü, (d) faya olan uzaklık, F_v ise hız bandındaki zemin büyütmesidir.



Şekil 2. MMI-hasar ilişkisi (Erdik vd., (2000)'den uyarlanmıştır.) (D1: hafif hasar, D2: orta seviyede hasar, D3: ağır hasar, D4: kısmi göçme, D5: toptan göçme)

Olası yapı hasarı belirlenirken yapıya ait önemli özelliklerin de dikkate alınması gerekir. Bu amaçla yapı kalitesi ve kat sayısına yönelik olarak uyarlamalar yapılması gerektiği hususu literatürde de yer almaktadır (ATC-13, Erdik vd., 2003, Durukal vd., 2006). Erdik vd., (2000) tarafından verilen MMI*-Hasar ilişkisinin (Şekil 2) orta kalitedeki yapılar için geçerli olduğu düşünülmüştür. Bu çalışmada bu ilişkiye çok iyi ve çok kötü yapıları da katabilmek için MMI* değerlerine sırası ile -2 ve +2 eklenmiştir. Çok kötü ve çok iyi terimleri yapının yapıldığı yılda geçerli olan deprem yönetmeliğini ve var ise yapı ile ilgili gözlemleri hesaba katmaktadır. Aynı şekilde depremde daha az hasar gördükleri belirtilen 1-3 katlı ve 8'den yüksek katlı yapılar için de MMI* değerlerine (-1) eklenmiştir. Elde edilen MMI* değerleri MMI** olarak adlandırılmıştır. Bu durumda orta kalitede inşa edilmiş, 4-8 katlı yapılar için Şekil 2 doğrudan kullanılabilir.

Tablo 1'de yapı özelliğine bağlı olarak elde edilen MMI** değerleri verilmektedir. Her noktaya özel yerel zemin büyütme etkisi de formüle katılarak elde edilen ve Tablo 1'de verilen MMI** değerlerinin önemi yerel zemin özellikleri ve yapısal özellikleri bir arada değerlendirmesidir.

Tablo1. MMI** değerlerinin belirlenmesi

Yapı özelliği	MMI**
Çok düşük kalite, 1-3 kat	MMI* + 1
Orta kalite, 1-3 kat	MMI* - 1
Çok yüksek kalite, 1-3 kat	MMI* - 3
Çok düşük kalite, 4-8 kat	MMI* + 2
Orta kalite, 4-8 kat	MMI*
Çok yüksek kalite, 4-8 kat	MMI* - 2

Şekil 2'de verilen deprem şiddeti-hasar görülebilirlik ilişkisi olasılıksal bir ilişkidir. Ancak bu çalışmada sunulan yöntemin ihtiyacı, bu olasılıksal ilişkiyi olasılığın anlamını kaybetmeden tek bir sayıya dönüştürebilmektir. Bu yöntemde her MMI** değeri için geçerli olan olasılıksal dağılım "Hasar Puanı" adı verilen tek bir sayıya indirgenmektedir ve bu sayı hasar görülebilirlik konusunda karar verici araç görevi görmektedir. Bu sayı vasıtasıyla çalışılan noktadaki olası hasar seviyesi tanımlanmaktadır.

Yer sarsıntısının yaratacağı hasarın belirlenmesi için bir "Yapı Sarsıntısı Hasar Puanı, YSP" atanmıştır. Yapı sarsıntısı hasar puanının belli bir şiddet değeri için hesaplanması örneği Tablo 2'de verilmektedir. Tablo 2'de görüldüğü gibi belli bir MMI* şiddetindeki hasar seviyelerinin olasılıklarının ağırlıklı ortalaması yapısal hasar puanını oluşturmaktadır.

Son aşamada ise farklı MMI** değerleri için oluşması beklenen yapı hasarı seviyesi verilmektedir (Tablo 3).

Tablo 2. MMI=IX için "Yapı Sarsıntısı Hasar Puanı" belirlenmesi

Hasar durumu	Hasar puanı	Hasar olasılığı, %	Toplama etkisi
Hasar yok	0	10	0
D1	1	35	0,35
D2	1.5	5	0,075
D3	2	25	0,5
D4	2.5	5	0,125
D5	3	20	0,6
Yapı sarsıntısı hasar puanı			1.7 (2.0 olarak alınmıştır.)

Tablo3. MMI**-Yapı Sarsıntısı Hasar Puanı (YSP)

MMI**	Yapı Sarsıntısı Hasarı Puanı (YSP)
MMI**≤VI	0.0
MMI**=VII	1.0
MMI**=VIII	1.5
MMI**=IX	2.0
MMI**=X	2.5
MMM**>X	3.0

Dinamik yükler altında taşıma gücü kaybı: Temel zemini, üzerindeki yapıdan gelen gerilmeleri gerek statik, gerekse dinamik durumlarda göçmeden ve kabul edilebilecek oturma miktarını aşmadan taşıyabilmelidir. Depremlerden sonra yapılmış olan gözlemler dinamik yükleme sonucunda zeminin taşıma gücündeki azalmaların üst yapıda önemli hasarlara neden olabileceğini göstermiştir. Gözlemler bu tip oturmaların kısmi doygun ve hatta sert ve sıkı zeminlerde bile oluştuğunu göstermektedir. Bu tür zemin ortamı için sivilaşma açıklaması geçerli değildir, çünkü taşıma gücündeki azalma zemin mukavemetinin sismik etki ile azalmasının yanı sıra, depremin yatay yük etkisinin göçme mekanizmasını değiştirmesi ile gerçekleşir. Bu konu ile ilgili son yıllarda önemli bulgular ortaya konmuştur (Maugeri vd., 2000; Kumar ve Rao, 2002; Çinicioğlu vd., 2005; Çinicioğlu vd., 2006, Çinicioğlu vd., 2007).

Bu konuda Richards ve diğerleri (1990) tarafından yapılmış olan teorik ve deneysel bir araştırmanın sonuçları literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Yazarlar sismik yükleme sonucunda belirli ivmelerin aşılması durumunda zeminin genel plastikleşmeye kadar giden bir süreç içinde girebileceğini göstermektedir. Richards ve diğerleri (1990) bu olguyu akışkanlaşma olarak tanımlamış ve bu davranışın sivilaşmadan farklı olduğunu özellikle vurgulamışlardır. Richards ve diğerleri (1993) ve Budhu ve El-Karni (1993) tarafından yapılan çalışmalarda dinamik yükler altında gerçekleşen akışkanlaşma davranışının temellerin taşıma gücüne olan etkisi limit denge analizi ile incelenmiş ve sis-

mik yükleme ile temel altındaki aktif ve pasif kamaların geometrilerinin değiştiği ve buna bağlı olarak taşıma gücü değerinde azalmalar olduğu gösterilmiştir. Richards ve diğerleri (1993) ve Budhu ve El-Karni (1993) yöntemlerinde statik taşıma gücünü hesaplamak için kullanılan Coulomb göçme mekanizmasına dinamik deprem etkileri (yatay ve düşey deprem ivme etkileri) eklenerek deprem durumundaki taşıma gücü faktörleri bulunmaktadır. Richards ve diğerleri (1993) dinamik taşıma gücünün aşağıdaki formül ile hesaplanabileceğini göstermişlerdir:

$$q_{uE} = cN_{cE} + \gamma DN_{qE} + 0.5\gamma BN_{\gamma E} \quad (4)$$

Burada; c : zemine ait kohezyon değeri, γ : zeminin birim hacim ağırlık değeri, B ve D : yüzeysel temelin genişliği ve derinliğidir. N_{cE} , N_{qE} , $N_{\gamma E}$ dinamik yük altındaki taşıma gücü katsayıları olup, ivme artışı ile birlikte hızla azalmaktadır. Dinamik taşıma gücünün tasarım için kullanılan statik taşıma gücüne ulaştığı andaki ivme katsayısı yenilme veya eşik ivmesi katsayısı, k_y (yield acceleration) olarak adlandırılmaktadır.

Yatay ivme katsayısı, k_h yenilme (eşik) ivmesi katsayısı, k_y 'yi geçtikçe kritik denge bozulmaya devam eder ve temel zemininde oturmalar oluşur. Richards ve diğerleri (1993) Newmark'ın kayan blok yaklaşımını önermiş oldukları aktif-pasif kama mekanizmasına uygulamış ve belli bir deprem içeriğinde k_y 'yi geçen ivme değerlerinde oluşan oturmaları hesaplamıştır. Bu yaklaşıma göre yenilme ivmesini geçen yer hareketine ne kadar çok kere maruz kalınırsa, kamadaki deformasyonlar o kadar büyük olacaktır. Diğer taraftan, yenilme ivmesinin geçilmesi çok kısa bir süre için gerçekleşirse, oluşacak deplasmanlar çok sınırlı olacaktır. Newmark metodu ivme-zaman kaydına çok bağımlıdır ve toptan göçmeye ulaşılmadığı durumda da taşıma gücü azalması ile oluşan birikimli deformasyonlar hesaplanabilmektedir.

Richards ve diğerleri (1993)'e göre hareket kamının her iki yönünde oluşacağından toplam oturma, w

$$w = 2D \tan(\rho_{AE}) \quad (5)$$

ile ifade edilir. Bu denklemden ρ_{AE} dinamik yükler altında oluşan aktif kamanın yatayla yaptığı açı, D ise kama üzerindeki deplasman değeridir. D değeri uygun bir deprem içeriği için ayrı ayrı hesaplanabileceği gibi, amprik olarak geliştirilmiş formüllerle de hesaplanabilir. Bu çalışmada Yegian ve diğerleri (1991) tarafından verilen 6 nolu formül, D değerini bulmak için kullanılmıştır. Burada N_{eq} eşdeğer döngü sayısı (deprem büyüklüğüne bağlı olarak bir değer alınabilir), T kayan kütlelerin periyodu, k_y ve k_{maks} sırası ile yenilme ivmesi ve maksimum ivme değerleridir.

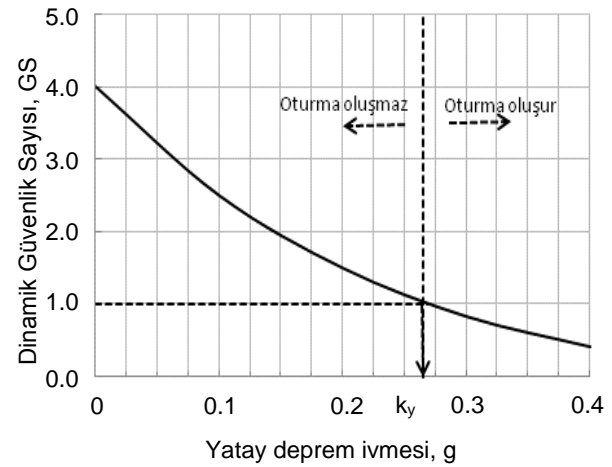
$$\log \frac{D}{k_{maks} N_{eq} T^2} = 0.22 - 10.12 \left(\frac{k_y}{k_{maks}} \right)^3 + 16.38 \left(\frac{k_y}{k_{maks}} \right)^2 - 11.48 \left(\frac{k_y}{k_{maks}} \right) \quad (6)$$

k_{maks} tasarım depremine bağlı olarak bulunabilir, ancak k_y 'nin bulunması için uygun bir yöntem geliştirilmesi gereklidir. Taşıma gücünün sadece zemine değil, temel özelliklerine de bağlı olduğu açıktır. Bu nedenle yenilme ivmesinin temel geometrisine de bağlı olarak bulunması gerekir. k_y değeri herhangi bir sistemi göçme durumuna getiren, dolayısıyla güvenlik sayısının 1.0 olduğu duruma karşılık gelen ivme değeridir. Bilindiği üzere temel sistemleri belli bir statik ve dinamik durum için güvenlik sayısını sağlayacak şekilde tasarlanır. Şekil 3'te belirli bir geometriye sahip bir temel için dinamik durumdaki taşıma gücü güvenlik sayısı ve ivme değeri arasındaki ilişki görülmektedir. İvme değeri k_y değerinden küçük olduğu sürece oturma oluşmayacağı, daha büyük ivme değerinde ise oturma oluşacağı kabul edilmektedir.

Bu çalışmada k_y değerini geniş alan çalışmalarında kullanılabilir üzere bir yöntem geliştirilmiştir. Bu amaçla her bölge için uygun ve temsili bir q_{em} değeri seçilmiş, taşıma gücünü bu değere düşüren ivme değeri k_y olarak alınmıştır. Böylece zemin ve temel özelliklerine göre her

nokta için farklı bir k_y değeri bulunabilmektedir. Bu değer Formül 6'da yerine konularak, öncelikle D bulunmakta, daha sonra Formül 5 ile temel altında beklenen oturma miktarı, w elde edilmektedir.

Bir sonraki aşamada Tablo 4'teki veriler kullanılarak "Dinamik Yükler altında Taşıma Gücü Kaybı Hasar Puanı (TGP)" elde edilmektedir. Bu tablonun geliştirilmesinde Bray ve diğerleri (2000) tarafından 1999 Kocaeli Depremi sonrasındaki veritabanına dayalı kalınmıştır.



Şekil 3. Dinamik taşıma gücü güvenlik sayısına bağlı olarak (k_y) değerinin bulunması ve oturma oluşma koşulunun şematik gösterimi

Tablo 4. Dinamik yükler altında "Taşıma Gücü Kaybı Hasar Puanı (TGP)

Dinamik yükler altında oluşan taşıma kaybı sebepli oturma miktarı, w	Tanım	Dinamik yükler altında taşıma gücü kaybı hasarı puanı (TGP)
$w=0$	Yok-çok düşük	0.0
$0 < w \leq 10$ cm	Düşük	1.0
10 cm $< w \leq 25$ cm	Orta	2.0
$w \geq 25$ cm	Yüksek-çok yüksek hasar	3.0

Sıvılaşmaya bağlı hasar: Zemin sıvılaşmasının doğurduğu, gevşek ve orta yoğunlukta oldukça üni-

form dane boyutu dağılımına sahip ve hakim dane boyutu siltli kum olan zeminlerde olduğu bilinmektedir. Sıvılaşma analizleri yapılırken sadece temelin oturduğu zemin tabakasının değil, temel altında belirli bir derinliğe kadar olan tüm zemin tabakalarının da sıvılaşma riski taşıyıp taşımadığı incelenmelidir. Sıvılaşma analizlerinde genellikle temel altındaki zeminler için sıvılaşmaya karşı bir güvenlik sayısı (F_L) bulunmaktadır. Iwasaki ve diğerleri (1978) ise bu değer tek başına temelde oluşabilecek hasarın tanımlanabilmesi için yeterli olmadığını, çünkü sıvılaşmanın etkisinin (i) sıvılaşan zemin tabakasının kalın olması (ii) yüzeye yakın olması ve (iii) güvenlik sayısının (F_L) 1.0'in çok altında olması durumunda değiştiğini vurgulamaktadır. Yazarlar tüm bu etkilerin bir arada değerlendirilmesi gereğinden yola çıkarak bir "Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)" hesaplamış ve böylelikle temel altındaki zemin kolonunun bütünsel davranışını yansıtabilmişlerdir. Yirmi metreden daha derinde olan zeminlerde sıvılaşma olduğuna yönelik veriler çok az sayıda olduğu için, analizlerde zemin yüzeyinden itibaren 20.0 metrelik zemin profili değerlendirilmektedir. Sıvılaşma potansiyeli indeksine bağlı sıvılaşma hasar riski seviyesi Tablo 1'de görülmektedir. Sıvılaşma potansiyel indeksinin sıvılaşmanın zeminde yarattığı hasarı yansıtabildiği Toprak ve Holzer (2003) tarafından gösterilmiştir.

$$LPI = \sum_{i=1}^n G_i W_i H_i \quad (7)$$

$$G_i = 1 - F_L \quad (8)$$

$$W_i = 10 - 0.5z \quad (9)$$

Burada G : Sıvılaşan tabakada sıvılaşmanın şiddeti, W : Ağırlık fonksiyonu; H : İlgili tabakanın kalınlığı, z : Zeminin derinliği (m.), i : Tabaka sayısıdır. F_L sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı olup; sıvılaşmaya engel olan etkilerin, sıvılaşmaya neden olan etkilere oranı olarak tanımlanır. Sıvılaşmaya bağlı oluşması beklenen yapı hasarı seviyesi ve "Sıvılaşma Hasarı Puanı, (SHP)" Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Sıvılaşma Hasarı Puanı (SHP)

LPI	Sıvılaşmaya yönelik hasar potansiyeli	Sıvılaşmaya bağlı hasar puanı (SHP)
LPI = 0	Yok-Çok düşük	0
0 < LPI < 5	Düşük	1.0
5 ≤ LPI ≤ 15	Orta	2.0
LPI > 15	Yüksek-çok yüksek	3.0

Heyelana bağlı hasar: Bu çalışmada deprem yükleri altında oluşabilecek olan heyelanların yaratacağı hasar da gözönüne alınmıştır. Hasarların performans dayalı olarak tanımlanmasının en uygun yöntem olacağı düşünülmüş ve bu amaçla yine Newmark yöntemi kullanılarak tasarım depremi için oluşması beklenen deplasmanlar hesaplanmıştır. Bunun için Formül 6 kullanılmıştır. Şevde hareketi başlatan yenilme ivmesinin (a_y) ise Formül 10'daki gibi tanımlanabileceği bilinmektedir (Kramer, 1996).

$$a_y = \tan(\phi' - \beta)g \quad (10)$$

Bu formülde ϕ , şev zemininin içsel sürtünme açısı, β , şev eğimidir. Literatürde yer alan az sayıda çalışmadan yola çıkılarak, yüksek seviyede hasarın 10 cm'den daha büyük şev deplasmanları için olduğu kabul edilmiştir (Wilson ve Keefer, 1985). Buradan hareketle heyelana bağlı hasar puanı (HHP) Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 6. Heyelan Hasarı Puanı (HHP)

Kalıcı deplasman miktarı, D	Tanım	Heyelana bağlı hasar puanı (HHP)
D=0	Yok-çok düşük	0.0
0 < D ≤ 5 cm	Düşük	1.0
5 cm < D ≤ 10 cm	Orta	2.0
D ≥ 10 cm	Yüksek-çok yüksek hasar	3.0

Toplam hasar görebilirliğin tayini: Her bir hasar verici etken için puanlar ayrı ayrı belirlendikten sonra, bu puanların uygun bir şekilde birleştirilmesi ve bu puanların beklenen hasar seviyeleri ile ilişkilendirilmesi gereklidir. Bu amaçla geliştirilmiş olan farklı yöntemler bulunmaktadır (ATC-13, 1985), King ve Kreidjian, 1994, ATC-36, 1997).

Bu çalışmada ATC-36’da önerilen “karelerin toplamının karekökü” yöntemi uygulanmıştır, bu şekilde daha büyük hasar yapıcı etkenler hasar görebilirliği daha fazla etkileyebilmektedir. “Toplam Hasar Görebilirlik Puanı (THP)” aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$THP = \sqrt{(YSP)^2 + (maks[SHP, TGP])^2 + (HHP)^2} \quad (11)$$

Bu denklemde görüldüğü gibi temel altı zemini için sıvılaşma ya da taşıma gücü kaybına bağlı hasar puanlarından maksimum olan değer kullanılmıştır. Son aşamada ise THP değerleri DeVall (2005) tarafından sunulan hasar durumlarına ilişkin bilgiler ile hasar seviyesine dönüştürülmüştür (Tablo 7).

Tablo 7. Toplam Hasar Görebilirlik Puanı (BHP) ve beklenen hasar seviyeleri

Birleştirilmiş Hasar Puanı (BHP)	Beklenen hasar seviyesi
THP= 0	Yok (N)
0 < THP ≤ 1.3	Düşük (L)
1.3 < THP ≤ 2.1	Orta (MD)
2.1 < THP ≤ 3.1	Ağır (H)
THP > 3.1	Çok ağır (HD)

Yöntemin uygulanması: Bakırköy örneği

Yukarıda ana noktaları tanımlanmış olan yöntem Bakırköy İlçesi için uygulanmıştır. Çalışma alanında 87 adet sondaj yapılmıştır. Ayrıca 125 noktada yapılan sismik kırılma deneyi ve 210 noktada yapılan elektrik resistivite deneyi sonuçlarından yararlanılmıştır. Çalışma alanında yapılmış olan sondajların yerleri ve jeolojik yapısı sırası ile Şekil 4 ve Şekil 5’te gösterilmektedir. İstanbul’un batı kesiminde yer alan Bakırköy ilçesi büyük ölçüde Miyosen ve daha genç kayalardan oluşmaktadır. Bakırköy’ün oldukça

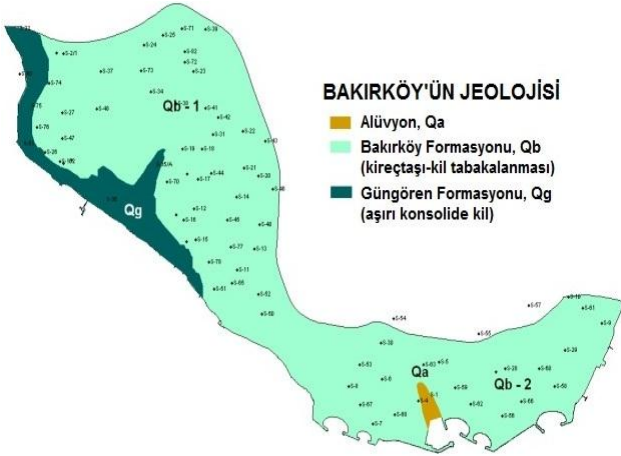
yalın bir stratigrafisi vardır. Bölgenin görülür en alt birimi yeşilimsi renkli plastik killer ve siltlerden oluşan Güngören formasyonudur. Bunun üzerinde uyumlu bir dokanakla kireçtaşı, marn ve killerden oluşan Bakırköy formasyonu bulunmaktadır. İstanbul’un Avrupa yakasında görülen diğer daha alt birimler Bakırköy’de yüzeyde görülmez. Arazi güvenlik değerlendirmesi analizlerinde kullanılan tasarım depremi %10 aşılma olasılığı ve 50 yıllık servis ömrü esas alınarak 7.3 büyüklüğündedir (İstanbul Üniversitesi, 2000). Yerel zemin koşullarını ve tasarım depremini dikkate alarak yere özel zemin büyütmesi analizleri yapılmış ve bu çalışmada geliştirilmiş olan yöntemin tasarım depremi için ilçeye uygulanması sonucunda aşağıdaki grafikler elde edilmiştir (Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9).

Sonuçlara göre tüm bölge için sıvılaşma sebebi ile hasar beklenmemektedir. Heyelana bağlı hasarın daha eğimli arazilerin bulunduğu batı bölgesinde olacağı görülmektedir. Deprem yükleri altında taşıma gücü kaybı sebebiyle beklenen hasarlar en çok bodrumu olmayan yapılar için ve 5 santimetreye yakın olarak beklenmektedir.

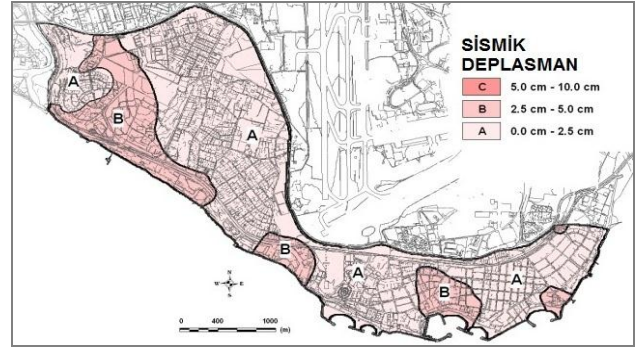
Örnek olarak verilmiş olan 1-3 katlı, yüksek kalite ve bodrumu olmayan yapı tipi (temel derinliğini belirlemektedir) hazırlanmış olan Toplam Hasar Görebilirlik Haritası (Şekil 9), bu tip yapılar için bölgede orta-çok yüksek arasında değişen hasar seviyesi göstermektedir. Bu harita farklı tipteki yapılar için çeşitlendirilebilir.



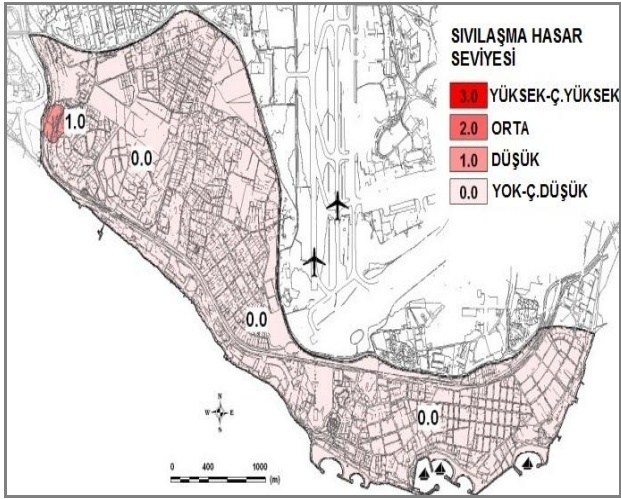
Şekil 4. Çalışma alanı ve yapılmış olan sondajlar



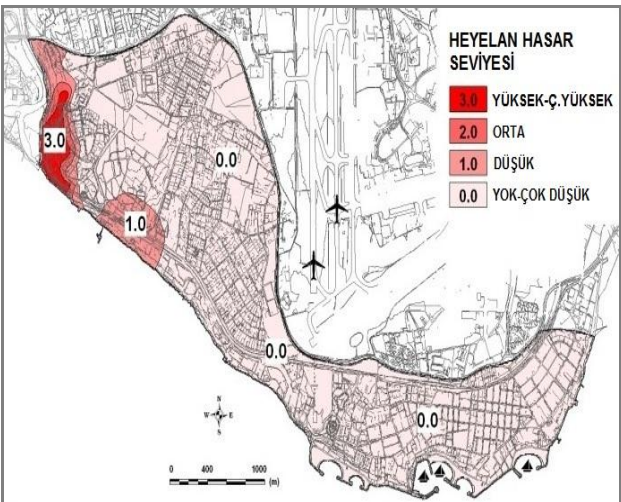
Şekil 5. Bakırköy İlçesinin jeolojisi



Şekil 8. Bakırköy İlçesi'nde bodrumu olmayan ve $q_{em}=150$ kPa seçilen binalar için taşıma gücü kaybına bağlı olarak beklenen hasar seviyelerinin dağılımı ($B=1$, $d=1.5$)



Şekil 6. Bakırköy İlçesinde sıvılaşmaya bağlı olarak beklenen hasar seviyelerinin dağılımı

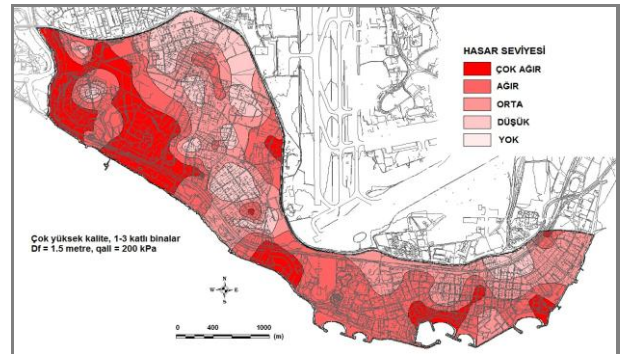


Şekil 7. Bakırköy İlçesinde heyelana bağlı olarak beklenen hasar seviyelerinin dağılımı

Sonuçlar

Bu çalışmada geoteknik bir bakışı içeren toplam hasar görebilirlik yöntemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda birincil ve ikincil hasar yapıcı etkenler için deprem dalgasının yaratacağı hasar seviyesi belirlenmiş ve sayısal bir değere dönüştürülmüştür. Yöntem yer sarsıntısı, sıvılaşma, taşıma gücü kaybı, heyelan kaynaklı hasarları içermektedir. Bu çalışmada geliştirilen metodoloji Bakırköy İlçesi için uygulanmış ve örnek olarak farklı haritalar geliştirilmiştir. Bu haritalar farklı parametreler için çoğaltılabilir; örneğin farklı kat sayısı, inşaat kalitesi, yapıda bodrum olması durumu, vb. için farklı incelemeler yapılabilir.

Bu yöntem başka bir bölgeye de rahatlıkla uygulanabilir. Ancak deprem sebebi ile o bölgeye has başka bir hasar verici etken var ise, o etken kaynaklanacak hasar uygun bir yöntem kullanılarak metoda dâhil edilmelidir.



Şekil 9. Bakırköy İlçesi'nde 1-3 katlı, iyi kalite, bodrumu olmayan ve $q_{em}=200$ kPa için toplam hasar görebilirlik durumu

Kaynaklar

- ATC-21, (1988). *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook*. Applied Technology Council, California.
- İstanbul Üniversitesi Raporu (2000). Bakırköy İlçesi Deprem Riski Analizi Final Raporu, İstanbul Ü. Müh. Fak.
- ATC-13, (1985). Earthquake damage evaluation data for California ATC-13 Report. Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- ATC-36 Report. Earthquake loss evaluation methodology and databases for UTAH, ATC-36 Report, Redwood City, CA.
- Borcherdt, R.D., (1997). Spatial ground motion amplification analysis. *Proceedings of Geologan'97*. 56-69, edited by D. Frost, 56-69.
- Bray ve diğerleri (2000). Ground failure and geotechnical effects. *Earthquake Spectra*, 1999 Kocaeli, Turkey, Earthquake Reconnaissance Report. Supplement to 16, 141-189.
- Budhu, M., Al-Karni, A., (1993). Seismic bearing capacity of soils, *Géotechnique*, **43**, 181-187.
- Çinicioğlu, S. F., Vardar, M., Çelik, T., Öztörün, N. K., Keleşoğlu, M. K., Bozbey, İ., Öztoprak, S., (2003). Bakırköy İlçesi Deprem Risk Analizi Raporu.
- Çinicioğlu, S.F., Bozbey, İ., Öztoprak, S., Keleşoğlu, M. K., (2005). An appraisal of seismic bearing capacity calculations, *Proceedings of International Conference on Problematic Soils*. 25-27 May 2005, E. Mediterranean University., TRNC., 3, 1019-1030.
- Çinicioğlu, S.F., Bozbey, İ., Öztoprak, S., (2006). Discussion to subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey by Jonathan D. Bray et al, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **1324**, 539-541.
- Çinicioglu, S. F., Bozbey, I., Oztoprak, S., Keleşoğlu, M. K., (2007). An integrated earthquake damage assessment methodology and its application on two districts in Istanbul, Turkey, *Engineering Geology*, **94**, 145-165, DOI: 10.1016/j.enggeo.2007.06.007.
- Crespellani T., G. Vannuchi, Zeng, X., (1991). Seismic hazard analysis, Seismic hazard and site effects in the Florence Area. Xth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 11-31.
- DeVall, R.H., (2005). Background information for some of the proposed earthquake design provisions for the 2005 edition of the National Building Code of Canada, *Canadian Journal of Civil Engineering*, **30**, 279-286.
- Durukal, E., M. Erdik, K. Sesetyan, Y. Fahjan (2006). Building Loss Estimation for Earthquake Insurance Pricing, *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, U.S.A.
- Erdik, M., Durukal, E., Biro, Y., Birgören, G., (2000). A sound proposal for mitigation of earthquake hazards in Istanbul. in Turkish, in Second Symposium on Istanbul and Earthquake. organized by Turkish Society of Civil Engineers, 131-149.
- Erdik, M., N. Aydinoglu, Y. Fahjan, K. Sesetyan, M. Demircioglu, B. Siyahi, E. Durukal, C. Ozbey, Y. A. Biro, H. Akman, O. Yuzugullu (2003). Earthquake risk assessment for Istanbul metropolitan area, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **2**, 1, 1-23.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, KI, Yasuda, S.A. (1978), A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. *Proceedings of the second International conference on Microzonation*, San Francisco, 885-896.
- King, S. A., (1997). Integration of earthquake hazards in GIS. *Spatial Analysis in Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. ASCE Geotechnical Special Publication 67.
- King, S. A. ve A. S. Kiremidjian (1994). *Regional Seismic Hazard and Risk Analysis through Geographic Information Systems*. Blume Center Reports, Report No. 111. Palo Alto, California, U.S.A., Stanford University: 185
- Kumar, J., Mohan Rao, V. B. K., (2002). Seismic bearing capacity factors for spread foundations, *Géotechnique*, **522**, 79-88.
- Maugeri, M., Musumeci, G., Novita, D., Taylor, C.A., (2000). Shaking table test of failure of a shallow foundation subjected to an eccentric load, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **20**, 435-444.
- Merlos, J. Romo, M. P. (2006). Fluctuant bearing capacity of shallow foundations during earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**, 103-114.
- MSK (1981). Revision of MSK 64 by European Macroseismic Scale.
- NEHRP, (1997). Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other Structures. FEMA 302/303. developed for the Federal Earthquake Management Agency, Washington, DC.

- Newmark, N.M., (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments, Fifth Rankine Lecture, *Geotechnique*, **15**, 2, 139-193.
- Pecker, A., (1996). Seismic bearing capacity of shallow foundation, State-of-the-Art: 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Richards, R., Elms, D.G., Budhu, M., (1990). Dynamic fluidization of soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, **116**, 5, 740-759.
- Richards, R., Elms, D. G., Budhu, M., (1993). Seismic bearing capacity and settlements of foundations, *Journal of Geotechnical Engineering*, **119**, 4, 662-674.
- Sarma, S. K., Iossifelis, I. S., (1990). Seismic bearing capacity factors for shallow strip footings, *Geotechnique*, **40**, 2, 265-273.
- SHAKE91: Equivalent Linear Seismic Response Analysis of Horizontally Layered Soil Deposits, 1972: Developer: P. B. Schnabel, J. Lysmer, H. B. Seed, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Shi, X, Richards, R. (1995). Seismic bearing capacity with variable shear transfer. Earthquake Induced Movements and Seismic Remediation of Existing Foundations and Abutments. edited by Steve Kramer and Raj Siddharthan, *GSP*, **55**, 17-32.
- Toprak, S., T. L. Holzer, (2003). Liquefaction potential index: field assessment, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**, 315-322.
- Wilson, R. C., Keefer, D. K., (1985). Predicting areal limits of earthquake induced landsliding. in Evaluating Earthquake Hazards in Los Angeles Region, Ziony, J. I. ed., U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, Professional Paper 1360, 317-345.
- Yegian, M. K., Marciano, E., Ghahraman, V. G., (1991). Earthquake induced permanent deformations: Probabilistic approach, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **117**, 1, 35-50.