

## DEPREM RİSK BELİRLEMESİ\*

Prof. Dr. Mustafa ERDİK

Dr. Mine B. DEMİRCİOĞLU, Dr. Karin ŞEŞETİYAN, Dr. Ufuk HANCILAR

### ÖZET

*Deprem riski olasılıksal veya deterministik olarak belirlenebilir. Olasılıksal anlamda deprem riski oluşacak hasarın belirli düzeyleri aşmasının yıllık olasılığını belirler. Deprem riskinin belirlenmesi: olası deprem zararlarının azaltılmasına yönelik tedbirlerin ve önceliklerin belirlenmesinden bu riskin sigorta mekanizmaları kullanılarak rensürans piyasalarına transferine kadar bir dizi stratejik kararlara girdi teşkil eder. Deprem riski belirlemeleri ile ilgili en son gelişmeler, İstanbul ve Türkiye'den örneklerle beraber, özetlenerek sunulmuştur.*

**Anahtar Kelimeler:** Deprem Riski, Deprem Tehlikesi, Hasagörebilirlik.

### GİRİŞ

Deprem riski olarak genelde bir deprem sonucunda oluşması beklenen hasarların nicelendirilmesi anlıyoruz. Burada “hasar” bir sigortacılık terimi olarak herhangi bir fiziksel, sosyal veya ekonomik unsurda meydana gelen değer kaybı veya doğrudan veya dolaylı zararı tanımlamaktadır. Bu çalışmada deprem riski belirlemesi kapsamında sadece bina tipi yapılarda oluşan yapısal hasar göz önüne alınacaktır. Deprem riski olasılıksal veya deterministik olarak belirlenebilir. Olasılıksal anlamda deprem riski oluşacak hasarın belirli düzeyleri aşmasının yıllık olasılığını belirler (McGuire, 2007). Deprem riskinin belirlenmesi: olası deprem zararlarının azaltılmasına yönelik tedbirlerin ve önceliklerin belirlenmesinden bu riskin sigorta mekanizmaları kullanılarak rensürans piyasalarına transferine kadar bir dizi stratejik kararlara girdi teşkil eder.

Deprem riskinin belirlenmesi konusundaki araştırma ve uygulamalar 1997 yılında HAZUS metodolojisinin hazırlanması ile yoğunluk kazandı. En son sürümü 2010 yılında yayınlanmış olan Hazus-MH MR5 (<http://www.hazus.org>) yazılımı ile ABD kapsamında deprem risk analizlerinin yapılması rutin bir uygulama haline gelmiştir.

Verilen bir bina envanteri için deprem risk belirlemesinin iki temel ögesi: deprem tehlikesi ve hasargörebilirlik ilişkisidir.

### DEPREM TEHLİKESİ

Deprem tehlikesi analizlerinin temel sonuçları, belirlenmiş bir bölge için mevcut jeoloji ve depremsellik bilgilerine dayalı olarak, verilen bir dönüş periyodu (veya aşılma olasılığı) için hesaplanan maksimum yer hareketi parametrelerine (maksimum ivme, spektral ivme, şiddet gibi) tekabül eden münhanilerdir. Deterministik yöntemlere nazaran, probabilistik (ihtimal hesaplarına dayalı) deprem tehlikesi analizleri jeolojik, jeofizik, sismolojik ve tarihsel verilerin daha uyumlu ve akılcı bir şekilde göz önüne alınmasını sağlar. Genelde, ihtimal hesaplarına dayalı deprem tehlikesi belirlemelerinde kullanılan kuramsal modeller: **(1)** jeolojik ve sismolojik verilerden hareketle potansiyel deprem kaynaklarının tanımlanması, **(2)** deprem büyüklükleri için ihtimal dağılımının tayini, **(3)** stokastik işlem modellenmesi ve **(4)** yer hareketi tahmin modellerinin belirlenmesi aşamalarını ihtiva eder.

Olasılıksal yaklaşımla deprem tehlikesini verilen bir konumda belirli bir yer hareketi parametresinin (Y) verilen bir “y” düzeyini aşmasının yıllık frekansı olarak tanımlayabiliriz. Yıllık aşılma frekansının tersi “α” düzeyi için ortalama dönüş periyodudur. Bu yıllık aşılma frekansı aşağıdaki ifade ile verilebilir (McGuire, 2007; Abrahamson, 2006):

(1)

$$\lambda[Y > y] = \sum_{k=1}^{N_S} v_k \left\{ \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} f_M(m) \times f_R(r|m) \times f_E(\varepsilon) \times P[Y > y|m, r, \varepsilon] \times dm \times dr \times d\varepsilon \right\}_k$$

\* Odamız adına Şubemizin ve Türkiye Deprem Vakfı Deprem Mühendisliği Komitesi'nin 30 Mayıs - 3 Haziran 2011 tarihlerinde düzenlemiş olduğu 7. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı'nda sunulmuştur.

Burada  $N_s$  toplam deprem kaynağı adedini,  $v_k$  k kaynağında büyüklüğü  $m$  in değerinin üzerinde olan depremlerin yıllık oluşum frekansını,  $r_{min}$ ,  $r_{max}$  ve  $m_{min}$ ,  $m_{max}$ :  $R$  mesafesinin ve  $M$  deprem büyüklüğünü sınırlandırmaktadır. Log-normal bir dağılımı olan  $Y$  yer hareketi parametresinin belirsizliğini niteleyen terim  $\varepsilon$  ile gösterilmiştir.  $f_E(\varepsilon)$  belirsizlik teriminin olasılık yoğunluk fonksiyonu.  $f_M(m)$  k kaynağındaki deprem büyüklüğü olasılık yoğunluk fonksiyonu.  $f_R(r/m)$  k kaynağındaki verilen bir deprem büyüklüğü için mesafenin olasılık yoğunluk fonksiyonu.

$P[Y > y | m, r, \varepsilon]$  verilen bir deprem büyüklüğü, mesafe ve belirsizlik terimi için belirli bir yer hareketi parametresinin ( $Y$ ) verilen bir “ $y$ ” düzeyini aşmasının olasılığıdır ve tahmin ilişkisi tarafından belirlenir.

Deprem tehlikesi belirlemesi uygulamasında interdisipliner olarak çalışılması gerekli temel araştırma adımları: İlgili bütün jeolojik, sismolojik ve tarihsel verilerin derlenmesi, deprem kaynaklarının ayrılarak bölgelendirilmesi, deprem kaynaklarındaki deprem oluşumlarının modellenmesi, deprem kaynakları için uygun olabilecek deprem yer hareketi parametreleri tahmin ilişkilerinin derlenmesi, belirli aşılma olasılıklarına (veya dönüş periyotlarına) tekabül eden deprem yer hareketi parametre dağılımlarının elde edilmesi şeklinde sıralanabilir. Deprem tehlikesi haritalarının Türkiye için gerçekleştirilmiş uygulamaları Demircioğlu vd., (2011) tarafından incelenmiştir. Deprem tehlikesi analizine girdi teşkil edecek bu bilgiler toplandıktan sonra analizi gerçekleştirmek üzere hazırlanmış çok sayıda yazılım mevcuttur. Bu

yazılımlardan yaygın olarak kullanılanlar **Tablo 1**'de sunulmuştur (Danciu et al., 2010).

## YER HAREKETİ TAHMİN MODELLERİ

Deprem tehlikesi ve riski belirlemelerinin önemli bir girdisini teşkil eden yer hareketi tahmin modelleri genelde bir konumda oluşacak deprem yer hareketi parametresinin depremin kaynak, yayılma hattı ve konunun zemin özelliklerine dayalı olarak tahmini için kullanılır.

Deprem yer hareketi parametresini spektral ivme ( $SA(T)$ ) olarak kabul edersek, verilen bir deprem büyüklüğü ( $M$ ), mesafe ( $R$ ) ve diğer regresyon parametrelerine ( $\alpha$ ) tekabül eden spectral ivme aşağıda genel ifadesi yazılmış olan tahmin ilişkisi ile belirlenir.

$$\ln SA(T) = f(M, R, \alpha) + \varepsilon\sigma \quad (2)$$

Burada  $f(M, R, \alpha)$  spektral ivmenin medyan değerini ( $\mu$ ),  $\sigma$  ise toplam standart sapmasını göstermektedir. Diğer bir deyişle spektral ivmenin logaritmasının medyan değeri ( $\mu$ ) ve standart sapması  $\sigma$  ile verilen normal bir dağılımı vardır. Toplam Epsilon  $\varepsilon$  terimi ise spektral ivmenin medyan değerinden hangi miktarda saptığını göstermektedir.

Bugünkü anlayış kapsamında deprem yer hareketi tahmin ilişkileri değişik tektonik bölgeler (Aktif Tektonik Bölgelerdeki Sığ Kabuk Depremleri, Duraylı Kıtasal Bölgelerdeki Kabuk Depremleri, Dalma-Batma Zonu Arayüz Depremleri ve Dalma-Batma Zonu Kitle-içi

Yazılımın Adı	Referans Kaynak	Temin Durumu	Program Lisansı
CRISIS	M. Ordaz	Ücretsiz	Visual Basic
EQR	Robinson	Açık Kaynak	Python
FRISK88M	R. McGuire	Ücretli	Fortran
MoCaHAZ	S. Wiemer	Ücretsiz	Matlab
MRS	R. Laforge	Ücretsiz	C
NSHM	Frankel et al	Ücretsiz	Fortran, C
OHAZ	B. Zabikovic	Ücretsiz	Java
OpenSHA	E. Field	Açık Kaynak	Java
SeisRisk IIIM	Bender, Perkins R. LaForge	Ücretsiz	Fortran
SeisHaz	M. Stirling	Ücretli	Fortran

**Tablo 1. Deprem Tehlikesi analizleri için yaygın olarak kullanılan bazı yazılımlar**

Depremleri için üretilmektedir. Vrancea ve Hindukuş gibi çok özel konumlar dışında bu bölgeler tüm yerküreyi kapsamakta ve, doğal olarak, belirli bir politik sınır içinde kalan bölgeler (ülkeler) için elde edilmiş tahmin modellerinin halen bir önemi bulunmamaktadır. Campbell ve Bozorgnia (2006) ve Stafford vd., (2008) tarafından, tüm dünya kuvvetli yer hareketi verilerinin katkısı ile hazırlanmış, NGA yer hareketi tahmin modellerinin Avrupa için de tamamen geçerli olduğu gösterilmiştir. Ayrıca SHARE (www.share-eu.org) ve gerekse EMME (www.emme-gem.org) projeleri kapsamında yapılan çalışmalarda da bu bulgu doğrulanmaktadır.

Bommer vd., (2010) tarafından ülke topraklarımızında çoğunlukla dahil olduğu Aktif Tektonik Bölgelerdeki Sığ Kabuk Depremleri için Abrahamson ve Silva (2008), Akkar ve Bommer (2010), Boore ve Atkinson (2008), Campbell ve Bozorgnia (2008) ve Chiou ve Youngs (2008) yer hareketi tahmin ilişkilerinin kullanılması önerilmektedir.

### DEPREM YER HAREKETİNİN MEKANSAL BAĞIMLILIĞI

Daha genel bir tanımla deprem yer hareketi parametresi ( $a_i$ )

$$\ln a_i = \overline{\ln(a_i)} + \varepsilon_i \sigma_i \quad (2)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $a_i$  :  $M_i$  büyüklüğünde bir depremin  $R_i$  uzaklığında ve  $\alpha_i$  zemin sınıfına haiz bir konumda yaratacağı deprem yer hareketi seviyesi  $\bar{a}_i$ , ise bu seviyenin medyan değeridir.

$$a_i = f(M_i, D_i, \alpha_i) \quad (3)$$

$\varepsilon_i$  ise ortalama değeri 0 ve standart sapması  $\sigma_i$  olan normal dağılımlı rassal belirsizlik terimidir. Toplam belirsizlik deprem-içi ve depremler-arası olmak üzere ikiye ayrılır.

$$\varepsilon_i \sigma_i = \varepsilon_{intra} \sigma_{intra} + \varepsilon_{inter} \sigma_{inter} \quad (4)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{inter}^2 + \sigma_{intra}^2} \quad (5)$$

Burada “intra” terimi, tek bir deprem için mekansal (konumlar arası) belirsizliği, “inter” terimi ise verilen bir mekan (konum) için depremler arası belirsizliği göstermektedir. Probabilistik risk değerlendirmelerinde genellikle  $\varepsilon_{intra}$  sabit alınmakta,  $\varepsilon_{inter}$  ise değişken olarak göz önüne alınmaktadır. Deterministik risk değerlendirmelerinde ise  $\varepsilon_{inter}$  sabit alınmakta,  $\varepsilon_{intra}$

ise değişken olarak göz önüne Deterministik (senaryo esaslı) deprem riski belirlemelerinde  $\varepsilon_{inter}$  sabit alınmakta, ancak deprem yer hareketinin mekansal değişiminin ( $\varepsilon_{intra} \sigma_{intra}$ ) göz önüne alınması gerekmektedir.

( $\varepsilon_i$ ) terimi aşağıdaki ifade ile yeniden düzenlenerek yazılabilir.

$$(\varepsilon_i) = \frac{(\varepsilon_{inter})_i \sigma_{inter} + (\varepsilon_{intra})_{i,j} \sigma_{intra}}{\sigma_i} \quad (6)$$

Verilen bir  $i$  depremi için  $j$  ve  $k$  gibi iki farklı konumdaki ( $\varepsilon_{intra})_{i,j}$  ve ( $\varepsilon_{intra})_{i,k}$  terimleri arasındaki korelasyonun belirlenmesi hususu deprem yer hareketinin ve deprem riskinin gerçekçi bir şekilde tayininde önem taşımaktadır (Jayaram ve Baker, 2009). Verilen bir deprem için  $\varepsilon_{inter}$  sabit olduğundan ( $\varepsilon_i$ ) veya ( $\varepsilon_{intra})_{i,j}$  korelasyonu birbiri ile ilişkili olacaktır.

İzotropik olarak alınan bir “ $h$ ” mesafesindeki iki konumdaki  $\varepsilon_i$  ve  $\varepsilon_{intra}$  değişkenleri arasındaki korelasyon katsayısı sırası ile  $\rho_i(h)$  ve  $\rho(h)$  ile gösterilirse:

$$\rho_i(h) = \frac{\sigma_{inter}^2 + \sigma_{intra}^2 \rho(h)}{\sigma_i^2} \quad (7)$$

$h \rightarrow 0$ 'a giderse  $\rho(h) \rightarrow 1$  ve  $\rho_i(h) \rightarrow 1$  değerine gidecektir (tam korelasyon)

$h \rightarrow \infty$ 'a giderse  $\rho(h) \rightarrow 0$  ve  $\rho_i(h) \rightarrow \frac{\sigma_{inter}^2}{\sigma_i^2}$

değerine gidecektir (korelasyon yok)  
Pratik uygulamalarda korelasyon katsayısı “semivariogram”  $\gamma(h)$  kullanılarak bulunabilir.

$$\rho(h) = 1 - \gamma(h) \quad (8)$$

Jayaram ve Baker (2009) tarafından yapılan regresyonlar kapsamında semivariogram

$$\gamma(h) = 1 - e^{-\left(\frac{3h}{b}\right)} \quad (9)$$

denklemleri ile verilmektedir. Bu denklemdeki “ $b$ ” katsayısı spectral ivme periyoduna ( $T$ ) bağlı olarak:

$$T \geq 1 \text{ için } b = 22.0 - 3.7T \quad (10)$$

ifadesi ile verilir.  $T$ 'nin 1s değerinin altında kaldığı durumlarda “ $b$ ” katsayısı zemin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu durumda korelasyon katsayısı

$$\rho(h) = 1 - e^{-\left(\frac{3h}{b}\right)} \quad (11)$$

olacaktır.

Boore (1983) tarafından yer ivmesi için korelasyon katsayısı aşağıdaki ifade ile belirlenmiştir:

$$\rho(h) = 1 - \left[ 1 - e^{-\sqrt{0.6h}} \right]^2 \quad (12)$$

### MONTE CARLO YÖNTEMİ

Denklem (1) ile verilen konvansiyonel toplam entrgrasyon metoduna dayalı olasılıksal deprem tehlikesi belirlemesinin Monte Carlo benzeşim tekniklerinin kullanılması ile de yapılması mümkündür (Musson, 1998, 1999, 2000). Deprem tehlikesi belirlemeleri kapsamında deprem kaynakları ve bu kaynaklardaki deprem oluşumlarının mekan ve zaman tanım alanındaki özellikleri tamamen bilindiği için stokastik metodların kullanımı ile bu özellikleri aynen sağlayacak sentetik deprem katalogları verilen bir zaman periyodu için de üretilebilir. Üretilen her bir deprem (merkez ve büyüklük) için, yer hareketi tahmin denklemleri kullanılarak, her bir konumdaki yer hareketi parametresi, belirsizliklerde göz önüne alınarak, bulunabilir. Her bir konumda tüm depremlerden kaynaklanan yer hareketi parametrelerin istatistiksel analizi ile olasılıksal deprem tehlikesi (değişik dönüş periyotlarına tekabül eden enbüyük yer hareketi parametreleri) belirlenir. Örneğin 100 yıllık periyot içinde oluşan 100,000 depremin 100 kere benzeşimi ile  $1 \times 10^7$  yıla tekabül edecek bir deprem verisi sağlanabilir. Herhangi bir konumda elde edilen yıllık enbüyük yer hareketi parametrelerinin büyüklüklerine göre dizilimini yapılsa, 1001. veri bize 10,000 yıllık ve 10001. veri ise 1,000 yıllık ortalama dönüş süresine tekabül eden enbüyük yer hareketi parametrelerini sağlayacaktır. Deprem tehlikesini belirlediğimiz konumda bu tehlikeye maruz fiziksel ve sosyo-ekonomik envanterin ve ilgili hasargörebilirliklerin bilinmesi durumunda Monte Carlo yönteminin bir aşama ileri taşınarak deprem riskinin de belirlenmesi mümkündür. Sigortacılık sektöründe portföy deprem riski belirlemelerinde bu yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır.

Crowley ve Bommer (2006) ve Jayaram ve Baker (2010) stokastik deprem veri setinin ve deprem yer hareketinin üretilmesi için kullanılan yöntemi ayrıntılı olarak sunmuştur. Bu yöntemde,

1. İlgili deprem büyüklüğü-oluşum frekansı ilişkisine bağlı kalınarak stokastik deprem veri takımının üretilmesi
2. Her bir konum için medyan yer hareketi

parametresinin ve inter- ve intra-deprem artıklarının standart sapmasının belirlenmesi

3. Normalleştirilmiş inter- deprem (depremler arası) artıklarının (residual) normal dağılımının örneklenmesi ile üretilmesi
4. Normalleştirilmiş intra-deprem (deprem içi) artıklarının (residual) mekansal korelasyon modeline dayalı olarak üretilmesi
5. Medyan yer hareketi parametresinin normalleştirilmiş inter- ve intra-deprem artıkları ile birleştirilmesi adımları yer almaktadır.

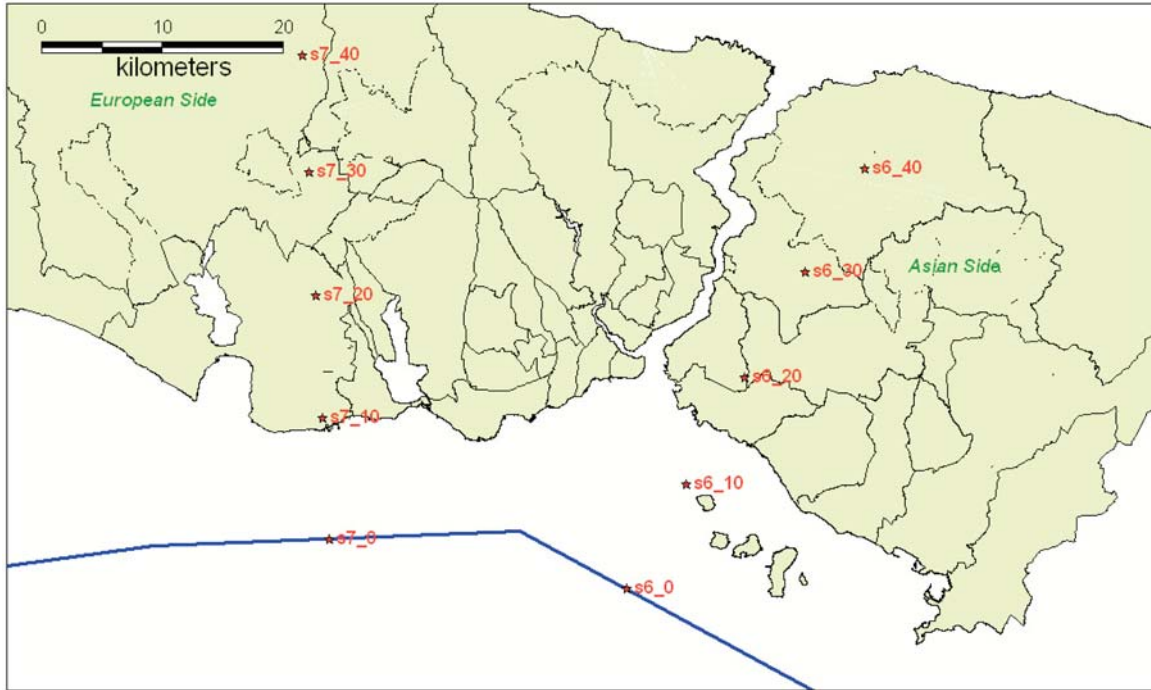
Monte Carlo yönteminde deprem yer hareketinin mekansal dağılımını belirlerken intra-deprem artıklarının rasyonel bir şekilde dağıtılması gerekir. Bilgisayar zamanının optimizasyonu için, rassal örneklemelerden ziyade büyük depremleri (ve büyük yer hareketlerini) ortaya çıkartabilecek şekilde düzenlenmiş deprem oluşumu örneklemelerine (Kiremidjian vd., 2007) önem verilmelidir.

### DEPREM TEHLİKESİNİN AYRIŞTIRILMASI

Olasılıksal deprem tehlikesinin belirlenmesi için tüm kaynak bölgelerinden gelen deprem oluşumları katkı sağlar. Verilen bir yıllık aşılma olasılığı (veya ortalama dönüş periyodu), verilen bir konum ve verilen bir deprem yer hareketi parametresi için hangi deprem deprem senaryosunun (veya hangi deprem büyüklüğü,  $M$ , ve uzaklık,  $R$ , ikilisinin) hangi belirsizlik terimi,  $\epsilon$ , ile bu deprem hareketi parametresine katkı sağladığı “deprem tehlikesi ayırımı analizi” ile belirlenir (McGuire, 1995; Bazurro ve Luca, 2005; McGuire vd., 2001, 2002). Bu analiz neticesinde belirli dönüş periyotlarına tekabül eden deterministik tasarım depremlerinin bulunması mümkün olur.

Verilen bir  $M$  ve  $R$  ikilisi için belirsizlik terimi,  $\epsilon$  kullanılan yer hareketi tahmin modelinin, dönüş periyodunun, deprem yer hareketi parametresinin ve olasılık bazlı deprem tehlikesi modelinin bir fonksiyonu olmaktadır. Deprem tehlikesi ayırımı analizi ile elde edilen ( $M$ ,  $R$  ve  $\epsilon$  üçlü değerleri ortalama veya modal olarak verilebilir.

Erdik vd., (2004) tarafından Marmara Bölgesi için yapılmış olan deprem tehlikesinin İstanbul’da değişik konumlar için gerçekleştirilmiş ayırımı örnek olarak verilebilir. Deprem tehlikesi ayırımının da deprem büyüklüğünü  $M_w=7.3$  olarak vermektedir. Ayırım sonuçları Şekil 1’de gösterilen Ana Marmara Fay hattından 10, 20, 30 ve 40km mesafede yer alan konumlardaki deprem tehlikesi ayırımı sonuçları



Şekil 1. Ayırım analizinde kullanılan noktaların konumları.

Ortalama Geri dönüş süresi (yıl)	Yer Hareketi Parametresi	Faya Mesafe			
		10 km	20 km	30 km	40 km
72	PGA	-0.5	-0.1	0.3	-0.1
	SA (T=1.0 sn)	-0.3	-0.1	0.5	0.5
475	PGA	1.1	1.2	1.4	1.2
	SA (T=1.0 sn)	1.4	1.3	1.5	1.5
2475	PGA	1.9	2.0	1.9	1.9
	SA (T=1.0 sn)	1.9	2.1	2.1	2.2

Tablo 2. Mw 7.3 senaryo depremi sonucunda 72, 475 ve 2475 yıllık ortalama geri dönüşüm periyodu için PGA ve Sa(T=1.0sn) yer hareketi parametrelerinde modal epsilon değerler

enbüyük yatay ivme (PGA) ve 1s'lik spektral ivme SA (T=1.0s) için **Tablo 2**'de sunulmuştur.

Bu ayırım için kullanılan olasılıksal deprem tehlikesi hafızalı bir stokastik modele dayalı olduğu için, epsilon değerleri poisson tipi hafızasız stokastik modellere dayalı olanlara nazaran 72 ve 475 yıllık dönüş süreleri için sırasıyla yaklaşık 1 ve 0.5 birim daha fazladır (Erdik vd., 2008).

### DEPREM YER HAREKETİ HARİTALARI

Oluşmuş veya senaryo bazlı bir depremden kaynaklanan (veya kaynaklanacak) yer hareketi dağılımları, tahmini deprem yer hareketi haritaları (ShakeMap) vasıtası ile belirlenmektedir. Bugün için

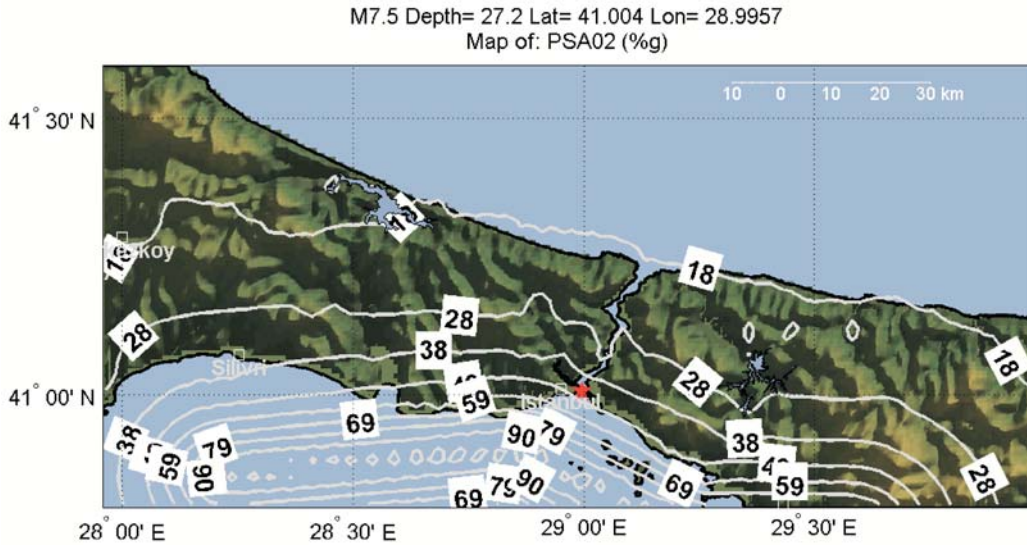
ABD, İtalya, İsviçre, Türkiye ve YeniZelanda'da deprem sonrası bilgi üretiminde rutin olarak kullanılan bu tip haritaların başlangıcı USGS çalışmalarına dayanmaktadır (Wald vd. 2005, <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/shakemap/>). Avrupa-Akdeniz bölgesi için benzer çalışma ve uygulamalar A.B. 6. ÇP, NERIES projesi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir (<http://www.neries-eu.org/>). Bu proje kapsamında hazırlanmış olan ELER yazılımı ile gerek deprem yer hareketi haritalarının ve gerekse deprem riskinin belirlenmesi mümkündür (Erdik vd., 2010; [http://www.neries-eu.org/main.php/JRA3\\_D3\\_v2.pdf?fileitem=9502731](http://www.neries-eu.org/main.php/JRA3_D3_v2.pdf?fileitem=9502731)).

ELER yazılımı kapsamında, gerçek (veya modellenen) bir deprem için:

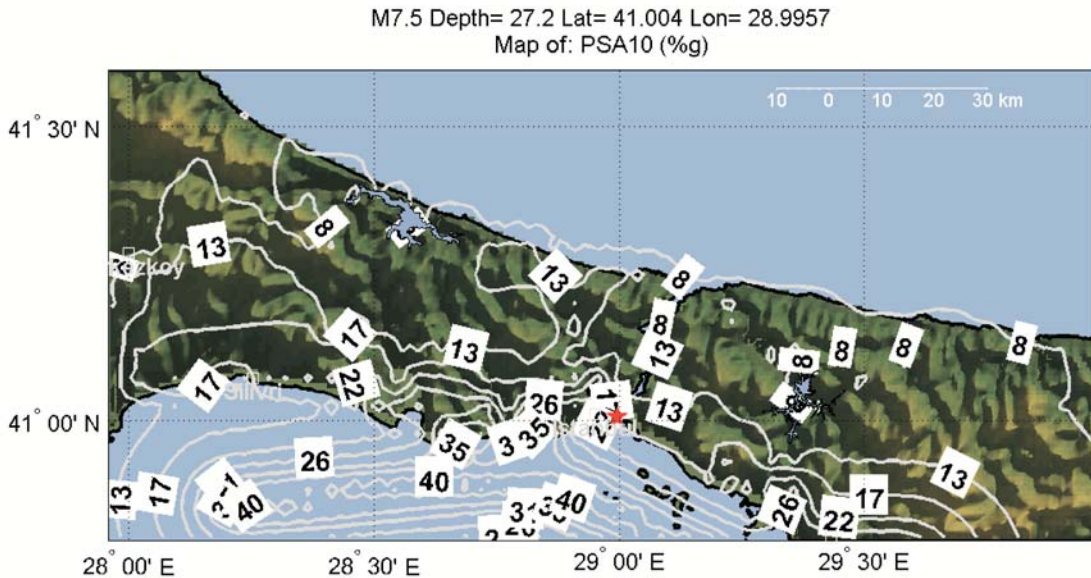
- Deprem yer hareketi parametrelerinin (maksimum yer hızı, yer ivmesi, spektral ivme, spektral deplasman vs) dağılımları, yer hareketi tahmin modelleri kullanılarak mühendislik anakaya tabakasında elde edilir.
- Bölgesel jeolojik veri tabanı veya kayma dalgası yayılım hızları ( $V_{s30}$ ) dağılımı kullanılarak mühendislik anakaya tabakası için elde edilen yer hareketi dağılımları lokal zemin koşullarına göre modifiye edilir.
- Deprem oluşumu sırasında kaydedilen kuvvetli yer

hareketi verileri kullanılarak yer hareketi dağılımı ayarlaması yapılır (Bu ayarlama hakkında ayrıntılı bilgi Harmandar vd., 2011 tarafından verilmiştir).

Örnek olarak,  $M_w=7.5$  ve  $Epsilon=0$  (medyan değer) için belirlenmiş zemin bağımlı  $SA(T=0.2sn)$  ve  $SA(T=1sn)$  haritaları sırası ile **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ve **Şekil 2** ve **3**'de verilmiştir. Bu haritalarda deprem-ichi yer hareketi mekansal bağımlılığı göz önüne alınmamıştır.



Şekil 2.  $M_w=7.5$  ve  $Epsilon=0$  (medyan değer) için belirlenmiş zemin bağımlı  $SA(T=0.2sn)$



Şekil 3.  $M_w=7.5$  ve  $Epsilon=0$  (medyan değer) için belirlenmiş zemin bağımlı  $SA(T=1.0sn)$

## DEPREM HASARGÖREBİLİRLİK İLİŞKİLERİ (Binalarda deprem kaynaklı yapısal hasar)

Hasargörebilirlik, öngörülen bir deprem tehlikesinin oluşması durumunda, bir risk unsurunda ya da risk unsuru grubunda (mesela bina sınıflarında) meydana gelebilecek kayıp derecesi olarak tanımlanır. GEM (Küresel Deprem Modelleme) Projesi (<http://www.globalquakemodel.org/>) tanımlamalarında “*fragility-kırılmalık*” fonksiyonları tanımı, bir bina sınıfının deprem hareketine verdiği tepkinin değişik performans sınır durumlarını aşma olasılığını belirtmek için kullanılmaktadır. Verilen bir deprem yer hareketi için bir bina sınıfında meydana gelen ortalama kayıp oranı (ortalama hasarın yeniden inşa maliyetine oranı) ve varyasyon katsayılarını veren ayrık veya sürekli eğriler ise “*vulnerability-hasargörebilirlik*” fonksiyonları olarak tanımlanmaktadır.

Hasargörebilirlik ilişkilerinin kapsamlı bir değerlendirmesi NERIES Projesi kapsamında hazırlanan “ELER Methodology for earthquake vulnerabilities of physical and social urban elements at risk” raporunda sunulmaktadır. ([http://www.neries-eu.org/main.php/JRA3\\_D3\\_v2.pdf?fileitem=9502731](http://www.neries-eu.org/main.php/JRA3_D3_v2.pdf?fileitem=9502731)).

Kentsel bölgelerde yapılacak deprem riski tahminlerinde binaların gerek morfolojilerine ve gerekse kırılmalıklarına göre sınıflandırılması gerekir. ABD (FEMA 366, 2003 ve AB ülkeleri (RISK-UE, 2004) için hazırlanmış bina sınıflandırmaları mevcuttur. İstanbul deprem riski güncelleme projesi (IBB-OYO-BU, 2009) kapsamında yapı tipi (yığma, prekast, çelik, betonarme çerçeve, betonarme perde duvar ve diğer), kat adedi (1-4, 5-8 ve 9-) ve yapım yılına (-1979, 1980-2000 ve 2000-) göre farklılandırılmış toplam 57 bina sınıfı kullanılmıştır.

### AMPİRİK KIRILMALIK

Giovinazzi ve Lagomarsino (2004; 2005); Giovinazzi (2005); Lagomarsino ve Giovinazzi (2006) tarafından geliştirilen yöntem gözleme dayalı (makrosismik) hasar tahmin yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılanıdır. Bu yöntem Avrupa Makrosismik Ölçeği (EMS-98, Grünthal, 1998) ile klasik olasılık ve bulanık mantık teorileri kullanılarak geliştirilmiştir. Bu çalışma, benzer hasargörebilirlik özelliklerine sahip binalarda, maruz kalınan (gözlemlenen ya da hesaplanan) deprem şiddeti ile gözlemlenen hasar arasındaki ilişkinin belirlenmesi prensibine dayanır.

EMS-98 ölçeği, belirli hasargörebilirlik sınıfına ait binaların farklı şiddet seviyeleri altında belirli hasar seviyelerine ulaşma olasılığını içeren bir hasar

matrisidir. Ancak bu hasar matrisleri sadece tanımsal olarak muğlak (az, çok, en çok - few, many, most) ve eksik bir hasargörebilirlik (incomplete vulnerability) bilgisini içerir. Hasar matrisleri sadece gözlemlenebilir ve en genel durumları içerdiğinden tamamlanmamış (incomplete) durumdadır. Bu durum (incompleteness matter), hasar sınıfları modelinde beta dağılımı kullanılarak çözülmüştür. Hasar olasılıkları, üç adet dar ve birbiri üzerine geçen yüzde aralıkları ile bulanık mantık (fuzzy logic) yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Ortalama hasar sınıfı ( $\mu_D$ ), şiddet ( $I$ ), hasargörebilirlik indisi ( $V$ ) ve süneklik indisi ( $Q$ ) arasındaki ilişki analitik tanımlamalarla geliştirmiştir. Denklemde bina hasar dağılım tahmini hasargörebilirlik ve süneklik indislerine ( $V$ ,  $Q$ ) bağlı olarak verilmiştir.

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.5V - 13.1}{Q} \right) \right] \quad (13)$$

Rossetto ve Elnashai (2003) tarafından geliştirilmiş ampirik kırılmalık çalışmasında 19 depremden elde edilmiş çok sayıda gözlemsel veri kullanılmıştır. Kat arası göreceli enbüyük deplasman ile kalibre edilmiş bir hasar ölçeği kullanılmıştır.

### ANALİTİK KIRILMALIK

HAZUS (<http://www.hazus.org>) projesi kapsamında geliştirilmiş “spektral kapasite bazlı hasar tahmin yöntemi” kapsamında (Kircher vd.,1997 ve NIBS-FEMA, 2003), bina taşıyıcı sistemlerinin deprem etkileri altında doğrusal olmayan (non-linear) muhtemel davranışları esas alınarak, her bina sınıfı için birer “*Kapasite Spektrumu*” ve binanın bulunduğu yer için tanımlanan ivme spektrumundan elde edilen “*Deprem Talep Spektrumu*” tanımlanmaktadır. “*Kapasite Spektrumu*” ve “*Deprem Talep Spektrumu*” eğrileri matematiksel olarak kesitirilerek, binanın taşıma kapasitesine karşı gelen ve “*performans noktası*” olarak isimlendirilen spektral yerdeğiştirme değeri saptanmaktadır. Performans noktasının hesaplanmasında yaygın olarak aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır.

- 1- Kapasite Spektrumu Yöntemi - CSM (ATC 40, 1996)
- 2- Değiştirilmiş İvme-Deplasman Tepki Spektrumu Yöntemi - MADRS (FEMA 440, 2005)
- 3- Katsayı Yöntemi - CM (FEMA-356, 2000; ASCE 41-06, 2006)

“*Bina Hasarı Olasılık Fonksiyonları (Eğrileri)*”, binanın depremden tahmin edilen davranışını nitel olarak ifade eden bir “deprem davranış parametresi”ne bağlı

olarak, yapısal veya yapısal olmayan hasarların belirli hasar düzeylerine (hafif, orta, ağır, çok ağır) erişmesinin veya o düzeyleri aşmasının birikimli (kümülatif) olasılığını ifade eden analitik fonksiyonlardır.

*Bina Hasarı Olasılık Eğrileri*'nin yatay eksenindeki değişken "deprem davranış parametresi", düşey eksen ise yapısal hasarın yukarıda tanımlanan hasar düzeylerine erişmesinin veya onları aşmasının birikimli olasılığını göstermektedir. Spektral kapasite bazlı hasar tahmin çalışmalarında, bina hasarlarının tahmini için sunulan bina hasar olasılık fonksiyonlarının (eğrileri) yatay eksenlerinde, deprem davranış parametresi olarak spektral yerdeğiştirme parametresi (deplasman) kullanılabilir.

Depremde hasar olasılık dağılımının lognormal dağılıma uyduğu varsayımı ile her bir hasar olasılık eğrisinin analitik ifadesi aşağıdaki biçimde yazılabilir (NIBS 1997, Kircher vd. 1997):

$$P\left[Damage \geq D_k \mid S_{dp}\right] \quad (14)$$

$$= \Phi\left[\left(1/\beta_k\right) \ln\left(S_{dp} / \bar{S}_{d,k}\right)\right]$$

Burada  $S_{dp}$  performans noktasını,  $S_{d,k}$  bina hasarının ilgili hasar düzeyine (hafif, orta, ağır veya çok ağır) eriştiği duruma karşı gelen medyan spektral yerdeğiştirme değerini,  $\beta_k$  ilgili hasar düzeyi için spektral yerdeğiştirme değerlerinin doğal logaritmalarına ait standart sapmayı,  $\Phi$  ise birikimli (kümülatif) standart normal dağılım fonksiyonunu göstermektedir. Her bir hasar düzeyine karşı gelen medyan spektral yerdeğiştirme değerleri,  $S_{d,k}$ , her bir bina türü için tahmin edilen göreceli kat ötelemesi oranlarına bağlı olarak tahmin edilmektedir. Standart sapma  $\beta_k$  ise, ilgili hasar düzeyinin tanımında, binanın deprem yükü taşıma kapasitesinde ve deprem yer hareketinin belirlenmesindeki belirsizlikleri, diğer deyişle bunlarda mevcut olan değişkenlikleri (variance) ifade etmek üzere ampirik yollarla tahmin edilmektedir. Porter (2009) tarafından yapılan çalışma kapsamında HAZUS kırılma fonksiyonları, ABD için üretilmiş senaryo depremleri kullanılarak bina-bağımsız deprem yer hareketi parametreleri (talebi) cinsinden belirlenmiştir.

Diğer önemli bir analitik kırılma yöntemi Pinho vd. (2002), Crowley vd., (2004) ve Bal vd., (2008) tarafından geliştirilmiş deplasman bazlı deprem hasar belirleme yöntemidir. Yöntem esasen Priestley (1997) tarafından önerilmiş ve çok serbestlik dereceli yapısal sistemlerin eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemlere dönüştürülerek analizini içeren "deplasman bazlı tasarım" yaklaşımının, hasar belirleme uygulamalarına uyarlanmış halidir.

## DEPREM RİSK ANALİZİ

Deprem risk analizi vasıtasıyla, oluşacak hasarın belirli düzeyleri aşmasının yıllık olasılığını belirlenir. Bir tek deprem tehlikesine maruz eleman (bina) için Risk aşağıdaki ifade ile verilebilir:

$$P[L > l] = \int_a P[L > l|a] \gamma(a) da \quad (15)$$

Burada  $P[L > l]$  hasarın ( $L$ ), " $l$ " miktarından daha büyük olmasının yıllık ihtimali (Risk)  $P[L > l|a]$  verilen bir yer hareketi seviyesi " $a$ " için hasarın " $l$ " miktarını aşma olasılığı (Hasargörebilirlik) ve  $\gamma(a)$  yer hareketi seviyesinin " $a$ " değeri olmasının yıllık frekansını (Deprem Tehlikesi) göstermektedir. Yer hareketi seviyesinin " $a$ " değerini aşmasının yıllık frekansı  $\gamma[A > a]$  (Deprem Tehlikesi) ise aşağıdaki ifade tarafından verilir.

$$\gamma[A > a] = \int_i P[A > a|Deprem = i] \quad (16)$$

Burada  $P[A > a | Deprem = i]$  verilen bir " $i$ " depremi için (büyüklük  $M$  ve uzaklık  $D$ ) yer hareketi seviyesinin " $a$ " değerini aşmasının olasılığını (yer hareketi tahmin modeli) ve  $\gamma[Deprem = i]$  ifadesi ise " $i$ " depreminin yıllık oluşma frekansını göstermektedir. Bu denklemler, bina hasarlarının (yer hareketi ve hasargörebilirlik) birbirlerinden tamamen bağımsız olmaması nedeni ile birçok bina için ancak yaklaşık olarak doğrudur. Verilen bir bina ve " $i$ " depremi için deprem riski aşağıdaki denklemle verilir:

$$P[L_1 > l|Deprem = i] \quad (17)$$

$$= \sum_a P[L_1 > l|A = a] P[A = a|Deprem = i]$$

Verilen iki bina ve " $i$ " depremi için deprem riski, herbir bina için bulunan risklerin konvolüsyonu ile bulunur.

$$P[(L_1 + L_2 > l|Deprem = i] \quad (18)$$

$$= \sum_a P[L_1 > l|Deprem = i] * P[L_2 > l|Deprem = i]$$

Tüm depremler için ise deprem riski

$$P[(L_1 + L_2 > l] \quad (19)$$

$$= \sum_i P[(L_1 + L_2 > l|Deprem = i] \gamma[Deprem = i]$$

olacaktır.

$M$  büyüklüğü ile verilen bir depremin  $D_i$  mesafesindeki bir konumda yaratacağı hasarın ( $l_i$ ) ihtimal yoğunluk fonksiyonu  $f_{l_i}$  aşağıdaki denklem ile verilir:

$$f_{l_i} = f(l_i|M, D_i, \epsilon_{inter}) \quad (20)$$

$$= \int_0^\infty f_l(l|a) f_a(a|M, D_i, \epsilon_{inter}) da$$



Burada:  $f_i(l|a)^h$  hasar ihtimal yoğunluk fonksiyonu,  $f_i(a|M, D_i, \epsilon_{inter})$  ise deprem yer hareketi ihtimal yoğunluk fonksiyonu olmaktadır.

Hasar ihtimal yoğunluk fonksiyonunun integrasyonu ile hasar olasılık eğrisi elde edilebilir. Verilen bir deprem büyüklüğü  $M$ ,  $\epsilon_{inter}$  ve değişik mesafeler takımı ( $D_i$ ) için toplam hasarın ( $L$ ) ihtimal yoğunluk fonksiyonu her bir  $D_i$  mesafesi için bulunan hasarların konvölüsyonu ile elde edilecektir.

$$f(L|M, \epsilon_{inter}) = f_{l_1} * f_{l_2} * \dots * f_{l_n} \quad (21)$$

Denklem (20)'nin integrasyonu ile verilen bir deprem oluşumu için tüm  $D_i$  mesafelerinde oluşacak toplam hasarın ( $L$ ) "I" değerini aşmasının yıllık olasılığı elde edilebilir.

$$P[L > l|M, \epsilon_{inter}] = \int_0^{\infty} f(L|M, \epsilon_{inter}) dl \quad (22)$$

Tüm deprem oluşumları için hasarın belirli bir "I" miktarını aşmasının yıllık frekansı ifadesi ile verilebilir (Wesson et al., 2009)

$$\gamma(L > l) = \sum_{\text{kaynaklar}} \int_{M_{\max}}^{M_{\min}} g_k(M) \int_{\epsilon_{inter}}^{+\infty} P[L > l|M, \epsilon_{inter}] dM d\epsilon_{inter} \quad (23)$$

Burada:

$g_k(M):k$ . kaynaktaki frekans-büyükölük ilişkisi

$f_{\epsilon_{inter}}(\epsilon_{inter})$ :  $\epsilon_{inter}$  için ihtimal yoğunluk fonksiyonu ve,  $P[L > l|M, \epsilon_{inter}]$  verilen bir  $M$  ve  $\epsilon_{inter}$  için hasarın "I" değerini aşmasının yıllık ihtimali olmaktadır.

Bir senaryo depreminden başlayarak veya verilen bir deprem yer hareketi için deprem riskinin hesaplanmasını gerçekleştiren çok sayıda yazılım mevcuttur. Bunların karşılaştırması Stafford vd., (2007) ve Erdik vd., (2010) tarafından yapılmıştır.

**Tablo 3'** de bu yazılımların bir listesi verilmektedir.

ELER, CEDİM ve SELENA risk yazılımları Los Angeles, Zeytinburnu ve Marmara Bölgesi için Colombi et al.(2009) tarafından karşılaştırılmıştır.

AGORA Open-Risk internet platformu (<http://www.risk-agera.org/>) deprem risk analizleri ile ilgili çalışma, etkinlik ve yazılımları herkese açık bir şekilde yaymaya çalışan paydaşların kurmuş olduğu bir portal vazifesi görmektedir. Halen aktif olarak çalışmalarına devam eden GEM (Küresel Deprem Modeli - [www.globalquakemodel.org/](http://www.globalquakemodel.org/)), EMME (Orta Doğu Deprem Modeli - [www.emme-gem.org/](http://www.emme-gem.org/)) ve SHARE (Avrupa'da Deprem Tehlikesinin Harmonizasyonu - [www.share-eu.org/](http://www.share-eu.org/)) projelerinde deprem tehlikesi ve

Bölge	Yazılımın Adı	Hazırlayan Kurum veya Hazırlandığı Proje
US	HAZUS-MH	FEMA/NIBS
US	EPEDAT	EQE International, Inc. for California Governor's Office of Emergency Services
US	REDARS	MCEER/FHWA
US	MAEviz	Mid-America Earthquake Center, Univ.of Illinois
Europe	SES 2002	Spanish Civil Protection
Europe	SIGE/ ESPAS	Italian Civil Protection Department
Europe	KOERILOSS	KOERI for LESSLOSS Project (Bogazici Un.)
Europe	LNECLOSS	LNEC for LESSLOSS Project
Europe	CEDIM	Karlsruhe Institute of Technology
Europe	SELENA	NORSAR
Europe	DBELA	ROSE School/EU-Centre
Europe	EQSIM	Karlsruhe University
Europe	ELER	E.U. F.P.6 Project NERIES
World	RADIUS	OYO Corporation for United Nations ISDR Secretariat
World	QLARM (QUAKELOSS)	ESRC/WAPMERR
World	NHEMATIS	Canadian Civil Protection
World	EQRM	Geoscience Australia

**Tablo 3. Deprem risk tahmin analizinde kullanılan bazı programlar**

riskin sırasıyla Dünyada, Orta Doğu ve Kafkasyada ve Avrupa'da homojen bir şekilde belirlenmesini amaçlanmaktadır. Bu projeler kapsamında geliştirilecek internet temelli yazılımlar kullanılarak ve "Google Earth" üzerinde belirlenecek bir noktadaki deprem tehlikesi ve riskinin, seçilen model ve parametrelere göre belirlenmesi mümkün olacaktır.

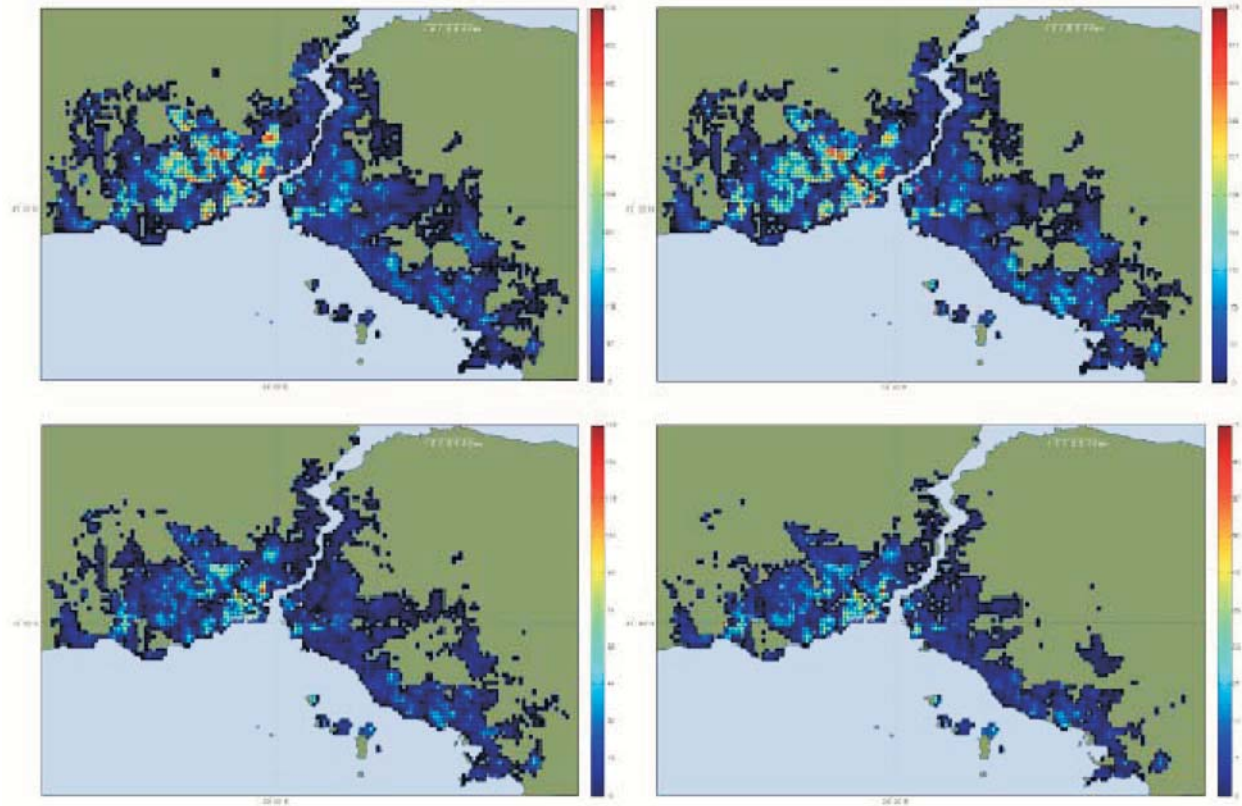
### İSTANBUL DEPREM RİSKİ (ÖRNEKLER)

Deprem risk belirlemelerine örnek olarak İstanbul Deprem Riski Belirlemesinin Güncellenmesi (İBB-OYO-BU, 2009) projesi kapsamında ELER yazılımı ile elde edilmiş ortalama hasar **Şekil 2**'de sunulmuştur (İBB-OYO-BU, 2009, Hancılar vd., 2010). Bu şekilde gösterilen tahmini hasar dağılımı, deprem yer hareketi parametreleri etkisi altında analitik yöntemlerin ortalaması alınarak elde edilen az, orta, ağır ve çok ağır (yıkık) hasar dağılımlarıdır. Şekildeki renk kodları ise hücre başına hasarlı bina sayısı gösterilmektedir. Bu risk belirlemesinde deprem tehlikesi ayırımı sonucuna dayalı (72 yıllık ortalama dönüş süresi) zemin bağımlı deprem yer hareketleri (**Şekil 2** ve **3**) kullanılmış, ancak yer hareketinin mekansal

korelasyonu göz önüne alınmamıştır. İstanbul için bulunmuş olan bu sonuçların SELENA, ESCENARIS, SIGE-DPC ve DBELA yazılımlarından elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu Strasser et al. (2008) tarafından belirtilmiştir. Crowley et al.(2008) ve Pinho et al.(2008) tarafından deprem yer hareketinin mekansal korelasyonunun da göz önüne alındığı tek senaryo depremine bağlı (Mw=7.5) Monte Carlo bazlı risk belirlemeleri kapsamında İstanbul için ortalama hasar oranı %31 olarak bulunmuştur (Durukal et al. (2006) tarafından bu oran %28 olarak verilmektedir). Yer hareketin mekansal korelasyonunun göz önüne alınmadığı durumlarda ortalama hasar oranındaki varyasyon %11, korelasyon mesafesinin 5km ve 10km alındığı durumlarda ise varyasyon sırası ile %19 ve %27 olarak bulunmuştur.

### TÜRKİYE DEPREM RİSKİ (ÖRNEKLER)

Türkiye için deprem risk belirleme çalışmaları, özellikle sigorta sektöründe depreme karşı riskin belirlenmesi konusunda önem kazanmaktadır (DEE-KOERI, 2003; Durukal vd., 2006; Bommer vd., 2002). Ortalama

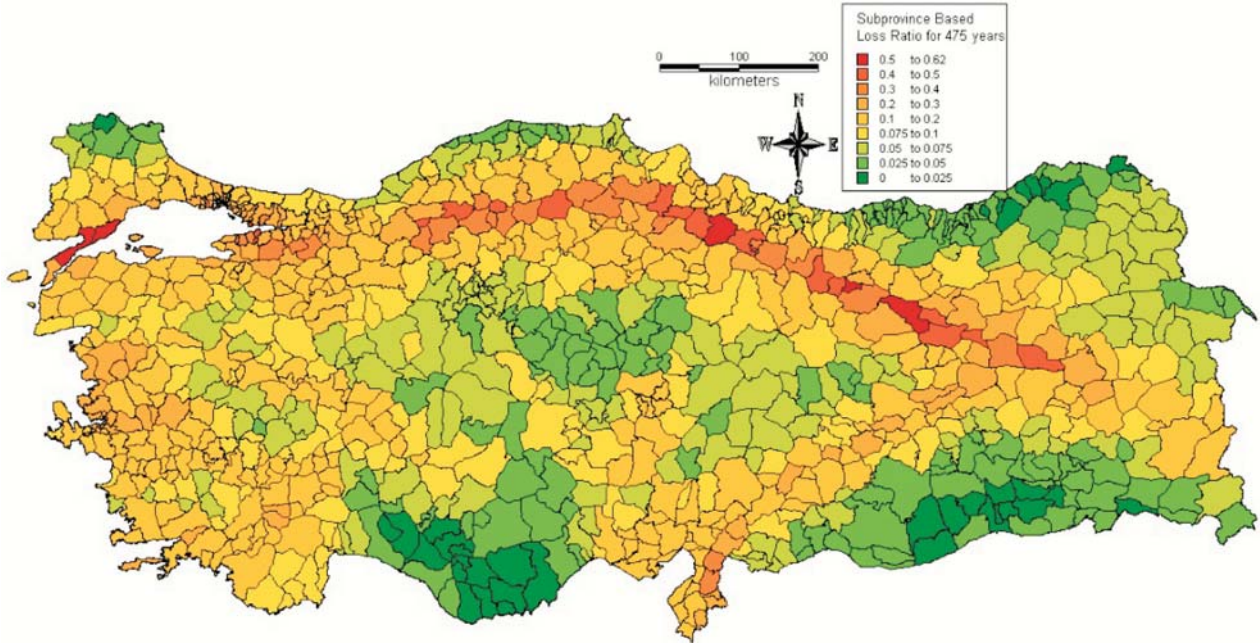


**Şekil 2.** Analitik hasar belirleme yöntemlerinin ortalaması ile elde edilen az, orta, ağır ve çok ağır (yıkık) hasar dağılımları (renk kodları ile hücre başına hasarlı bina sayısı gösterilmektedir)

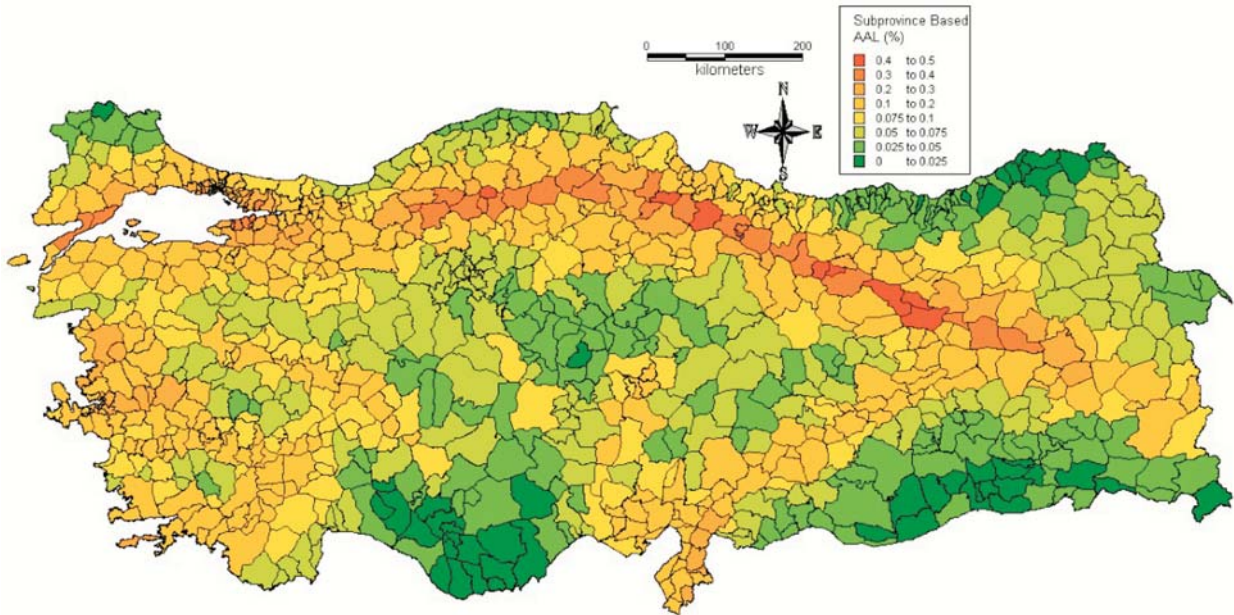
hasar oranları (ALR) ve yıllık ortalama kayıp oranı (AAL) bu sektörde riskin belirlenmesinde kullanılan önemli parametrelerdir.

Ortalama hasar oranı, belirli bir bölge (hücre bazlı, yada il / ilçe bazlı) için olasılıksal olarak istenilen geri dönüşüm periyoduna karşılık gelen yer hareketi dağılımlarından yada senaryo bazlı elde edilen yer

hareketi dağılımı sonucunda her seviye hasar sınıflandırmasına göre tahmin edilen hasarlı bina sayısının toplam bina sayısına oranının ilgili hasar seviyesine karşılık gelen onarım maliyet oranları (repair cost ratios) ile çarpılması ile elde edilir. Tüm bina envanteri içerisindeki hasar oranı bize seçilen geri dönüşüm periyoduna karşılık gelen potansiyel yer hareketi tehlikesi için ortalama kayıplar hakkında bilgi



**Şekil 3. 475 yıllık ortalama dönüş süresi için ilçe bazlı hasar oranı dağılımı (ilçelerdeki ortalama hasar oranları renk koduna bağlı olarak 0.01-0.56 arasında değişmektedir).**



**Şekil 4. İlçe bazlı yıllık ortalama kayıp oranı dağılımı (ilçelerdeki yıllık ortalama kayıp oranları renk koduna bağlı olarak 0.0002-0.0050 arasında değişmektedir)**

verir ve ulusal ölçekte sismik tehlike içerisinde önceliklerin belirlenmesinde de parametre olarak kullanılabilir. Hasar oranlarınına karşılık gelen aşılma oranları (1/geri dönüşüm periyodu) şelik üzerinde gösterildiğinde hasar eğrileri olarak tanımlanır. Hasar eğrilenin altındaki alan ise ortalama yıllık hasar oranlarını verir.

Türkiye için yapılmış olan bir çalışma (Demircioğlu, 2010) kapsamında ilçe bazında hasar oranı ve yıllık ortalama hasar oranı cinsinden belirlenmiş olan deprem riski dağılımları **Şekil 3** ve **Şekil 4**'de belirlenmiştir. Benzer deprem risk belirleme haritaları ABD için FEMA 366 (2002; 2008) tarafından hazırlanmıştır.

## KAYNAKLAR

Abrahamson, N., (2006), Seismic Hazard Assessment: Problems with Current Practice and Future Developments, Keynote Paper, Proc. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC) Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006

Abrahamson, N. ve W. Silva (2008) "Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations" Earthquake Spectra, Volume 24, No. 1, pp. 67-97.

Akkar S ve Bommer JJ (2010) "Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region", and the Middle East. Seismological Research Letters 81 (2): 195-206.

ATC 40, 1996, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", Applied Technology Council, Redwood City, California.

Bal, I.E., H. Crowley, H., R. Pinho, and F.G. Gulay, 2008. Detailed assessment of structural characteristics of Turkish RC building stock for loss assessment models. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 28, 914-932.

Bazzurro, P. ve Luco, N. (2005) Accounting for uncertainty and correlation in earthquake loss estimation. Proceedings of 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '05), Rome, Italy.

Bommer J, Douglas J, Scherbaum F., Cotton F, Bungum H, and Fäh D., 2010, "On the selection of ground motion prediction equations for Seismic Hazard Analysis" Seismological Research Letters; September/October 2010; v. 81; no. 5; p. 783-793; DOI: 10.1785/gssrl.81.5.783

Bommer, J.J. and Crowley, H. (2006) The influence of ground motion variability in earthquake loss modelling. Bulletin of

Earthquake Engineering Bommer, J.J., Spence, R., Erdik, M., Tabuchi, S., Aydinoglu, N., Booth, E., del Re, D. and Peterken, O. (2002) Development of an earthquake loss model for Turkish catastrophe insurance. Journal of Seismology 6(3), 431-446.

Boore, D.M. ve Atkinson G. M. (2008), "Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s" Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pp: 99-138.

Boore, D.M. (1983) "Strong-motion seismology" Reviews of Geophysics and Space Physics 21 (6), 1308-1318.

Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia (2008) "NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s" Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pp: 139-171.

Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y., 2006. "Next generation attenuation (NGA) ground motion models: Can they be used in Europe?" Proceedings of the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, September 3-8, 2006, Paper 458.

Chiou, B.S.J. and R.R. Youngs (2008) "An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra" Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pp: 173-215.

Colombi, M., Crempien, J., Crowley, H., Erduran, E., Lopez, M., Liu, H., Mayfield, M., Milanesi, M (2010), Evaluation of seismic risk software, GEM Technical Report 9. GEM Foundation, Pavia, Italy.

Crowley H, ve Bommer JJ. 2006, "Modelling seismic hazard in earthquake loss models with spatially distributed exposure" ..

Bulletin of Earthquake Engineering; 4(3):249-273.

Crowley, H., R. Pinho and J. J. Bommer (2004). "A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation." Bulletin of Earthquake Engineering 2(2): 173-219.

Crowley, H., Stafford, P.J. and Bommer, J.J. (2008). Can earthquake loss models be validated using field observations?. Journal of Earthquake Engineering.

Danciu, L., Pagani, M. Monelli, D. and S. Wiemer (2010). Evaluation of Seismic Hazard Codes: GEM1 perspective, GEM Technical Report, no 1, GEM Foundation, Pavia, Italy.

Demircioğlu, M. B., Erdik, M., Hancılar, U., Sesetyan, K., Tuzun, C., Yenidoğan, Zulfikar, A.C., 2009, Technical Manual - Earthquake Loss Estimation Routine ELER v2.0, Bogazici University, Department of Earthquake Engineering, Istanbul, December 2009.

Demircioğlu, M. B., 2010, "Earthquake Hazards and Risk Assessment for Turkey", PhD Thesis, Bogazici University.

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, 18 - 22 April, U.S.A.

Erdik M., M.B.Demircioğlu, K.Şeşetyan, E.Durukal, A.Edinçiler, 2008, "Assessment of Site-Specific Earthquake Hazard at Selected Hospitals (WB-ISMEP CB 1.3C Project), prepared by Bogazici University.

Erdik M., Sesetyan K., Demircioğlu M., Hancılar U., Zulfikar C., Çaktı E., Kamer Y., Yenidoğan C., Tüzün C., Çağnan Z., and Harmandar E, (2010), "Rapid Earthquake Hazard and Loss

Assessment for Euro-Mediterranean Region”, *Acta Geophysica*, vol. 58, no. 5, pp. 855-892

Erdik, M., Demircioğlu, M., Sesetyan, K., Durukal, E. and Siyahi, B. (2004) Earthquake hazard in Marmara region, Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, 605–631.

Erdik, K.Şeşetyan, M.B.Demircioğlu, U.Hancılar, C.Zülfikar (2010), Rapid Earthquake Loss Assessment After Damaging Earthquakes, Proc. 14ECEE, Ohrid, Makedonia.

FEMA 366, 2002, “HAZUS Estimated Earthquake losses for the United States”.Federal Emergency Management Agency. Washington, DC.

FEMA 366 (2008), Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States FEMA, April 2008.

Giovinazzi S. and S. Lagomarsino, 2005, “Fuzzy - Random Approach for a Seismic Vulnerability Model”, Proceeding of the 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), Rome, Italy, June 19-23 2005, Millpress, Rotterdam.

Giovinazzi S. and S. Lagomarsino, 2004, “A Macroseismic Model for the Vulnerability Assessment of Buildings”, Proceeding of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada

Giovinazzi S., 2005, “Vulnerability Assessment and the Damage Scenario in Seismic Risk Analysis”, PhD Thesis, University of Florence.

Grünthal, G. (editor), 1998, European Macroseismic Scale 1998, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Conseil de l'Europe. Luxembourg.

Jayaram, N., and Baker, J. W. (2010). “Considering spatial correlation in mixed-effects regression, and impact on ground-motion models.” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 3295-3303.

Jayaram N. and Baker J.W. (2009). "Correlation model for spatially-distributed ground-motion intensities," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(15), 1687-1708.

Kircher, C. A., Nassar, A. A., Kustu, O., and Holmes, W. T., 1997. Development of building damage functions for earthquake loss estimation, *Earthquake Spectra* 13, 663-682.

Kiremidjian AS, Stergiou E, Lee R. Issues in seismic risk assessment of transportation networks. *Earthquake Geotechnical Engineering*, Chapter 19. Springer: Berlin, 2007; 939-964.

Harmandar, E., E.Çaktı ve M.Erdik (2011), Kentsel Deprem Ağı Verilerinin yer İvmesi Dağılım Haritalarının Hazırlanmasında Kullanılması, 7.UDMK, İstanbul

Hancılar, U., C.Tuzun, C. Yenidoğan and M. Erdik (2010), ELER software - a new tool for urban earthquake loss assessment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 2677–2696.

İBB-OYO-BU, 2009, “İstanbul İli Sismik Mikrobölgeleme dahil Afet Önleme/Zarar azaltma Temel Planı Çalışması ”, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, Anadolu yakası mikrobölgeleme rapor ve haritalarının yapılması güncelleme işi, İstanbul olası deprem kayıpları tahminlerinin güncellenmesi raporu.

McGuire RK, 2007, “Seismic Hazard and Risk Analysis”, *Earthquake Engineering Research Institute*.

McGuire, R.K. (1995) Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. *Bulletin of the Seismological Society of America* 85(5), 1275–1284.

Musson, R.M.W. (1998) On the use of Monte Carlo simulations for seismic hazard assessment. *Proceedings of 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Seattle, Washington.

Musson, R.M.W. (1999) Determination of design earthquakes in seismic hazard analysis through Monte Carlo simulation. *Journal of Earthquake Engineering* 3(4), 463-474.

Musson, R.M.W. (2000). The use of Monte Carlo simulations for seismic hazard assessment in the UK, *Annal. Geofis.*, v. 43, p. 1-9.

NIBS and FEMA, 2003. Multi-hazard Loss Estimation Methodology, *Earthquake*

Model, HAZUS@MH Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 690 pp.

Pinho, R., J. J. Bommer and S. Glaister (2002). A simplified approach to displacement-based earthquake loss estimation analysis. *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, London.

Pinho,R., H.Crowley and J.J. Bommer (2008), Open-Source Software and Treatment of Epistemic Uncertainties in Earthquake Loss Modeling, Proc. 14th WCEE, Beijing, China.

Porter, K.A., 2009. Cracking an open safe: HAZUS vulnerability functions in terms of structure independent spectral acceleration. *Earthquake Spectra* 25 (2), 361-378

Priestley, M. J. N. (1997). "Displacement-Based Seismic Assessment of Reinforced Concrete Buildings." *Journal of Earthquake Engineering* 1(1): 157-192.

RISK-UE, The European Risk-UE Project (2001-2004): An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios, www.risk-ue.net, 2004.

Rossetto, T. ve A. Elnashai (2003), “Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data”, *Engineering Structures* 25 (2003) 1241–1263

Stafford, P.J., Strasser, F.O., and Bommer, J.J., 2008. “An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region”., *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6.

Stafford,P.J., F.O.Strasser and J.J.Bommer, 2007, Preliminary Report on the Evaluation of Existing Loss Estimation Methodologies, Report prepared for EU FP6 NERIES Project, Department of Civil & Environmental Engineering, Imperial College, London

Strasser, F.O., P.J. Stafford, J.J. Bommer and M. Erdik (2008), State-of-the-art of European Loss Estimation Software, Proc. 14th WCEE, Beijing, China.

Wald, D.J., B.C. Worden, V. Quitoriano, and K.L. Pankow (2005), “ShakeMap manual:technical manual, user’s guide, and software guide”, U.S. Geological Survey, 132 pp.