



İsale hatlarında deprem riskinin olasılıksal hesabı ve bir örnek uygulama

Gökhan ÇALIM

Istanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
gcalim@iski.gov.tr ORCID: 0000-0002-2763-1975

İhsan Engin BAL*

Hanze Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Groningen, Hollanda
i.e.bal@pl.hanze.nl ORCID: 0000-0003-0919-9573, +31 (0)50-5952101

Gülten GÜLAY

Istanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul
gulayg@itu.edu.tr ORCID: 0000-0003-3358-6450

Geliş: 20.05.2017, Kabul Tarihi: 11.06.2018

Öz

Yeryüzünde oluşabilecek depremlerden dolayı üstyapı kadar hayat yolları dediğimiz kanalizasyon, içmesuyu, elektrik hatları vb. gibi altyapılarda oluşabilecek hasarların önceden hesaplanması da depremin olumsuz etkilerini azaltabilmek için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, literatürde bulunan gömülü boru hatları için hasar bağıntıları araştırılarak, İstanbul'da meydana gelmesi beklenen depreme göre Ø2200mm çapındaki örnek bir isale hattı için borularda meydana gelebilecek hasar sayıları ve yerleri belirlenmiştir.

Dünya üzerinde yapılan çalışmalarda altyapı sistemlerinin deprem riskinin belirlenmesinde kırılma eğrileri, istenen noktadaki En Büyük Yer Hızı - PGV (Peak Ground Velocity), Kalıcı Yer Deformasyonu - PGD (Permanent Ground Deformation) gibi deprem parametrelerine karşın hasar sayısını veren bağıntılar olarak ifade edilmektedir. Bu kapsamda kırılma eğrilerini kullanarak hasar sayıları ve yerleri ile beraber isale hatlarında deprem riski ve haritası elde edilmiştir. Hesaplamalarda Gömülü boru hatlarında iyi korelasyon gösteren PGV parametresi kullanılmıştır. PGV hesabında ise literatürde zemin cinsi, fay tipi, uzaklığı, depremin aletsel büyüklüğünü dikkate alan Yer Hareketi Tahmin Bağıntılarından (YHTB, veya İngilizce'de GMPE-Ground Motion Prediction Equations) faydalanılmıştır. Deprem tehlikesinin analizinde SHARE projesinde kaydı tutulan depremler arasında İstanbul'a yakın depremler seçilerek etkin bir deprem kataloğu oluşturulmuştur. Ayrıca çalışılan bölgedeki boru hattının düğüm noktalarıyla belirli alt parçalarının hangi zemin cinsinde kaldığını belirlemek amacıyla yaklaşık 400×600 metrelik hücreler ile V_s kayma hızlarını bildiğimiz hücreler kullanılmıştır. Yukarıda bahsi geçen hesapları ve haritaları oluşturmak için bir yazılım hazırlanmış ve burada sunulan sonuçlar bu şekilde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İsale hatları; Deprem riski; Gömülü boru hattı

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI: 10.24012/dumf.538436

Giriş

Dünya üzerinde insanların içmesuyu kaynaklarına ulaşımı büyük önem arz etmektedir. Yaşamın devam etmesi ve medeniyetin gelişmesi için su alternatifi olmayan bir doğal kaynaktır. Büyük çoğunluğu şehirlerde yaşayan topluma suyu ulaştırmak yoğun nüfusa sahip yerlerde daha karmaşık bir hal almaktadır. Türkiye'nin en büyük kenti olan İstanbul'da konutlara su temini ana isale hatları ile yapılmakta olup olağan şartlarda bile zorluklar içermektedir. Olağanüstü bir durum olan deprem halinde her ne kadar ilk etapta can kaybının önlenmesi birinci derecede önemli olmakla birlikte hayat yolları dediğimiz karayolları, elektrik, doğalgaz, su vb. Hatların da deprem sonrası kullanılması hayati önem arz etmektedir. Özellikle deprem sonrasında şehre su verilmesi hayatın devamı, temizlik, salgın hastalıkların önlenmesi ve endüstrinin üretime devam etmesi için vazgeçilmez bir unsurdur.

Bu çalışmada İstanbul'daki içmesuyu isale hatları için deprem riski gerçeğe yakın bir biçimde belirlenmesi öngörülmektedir. Bunun için literatürde bulunan hasar-yer hareketi bağıntıları incelenmiş ve İstanbul'da meydana gelmesi beklenen depremin verilerine ve senaryolarına göre Alibeyköy içmesuyu isale hattı üzerinde uygulama yapılmıştır.

Daha önce meydana gelmiş depremler dikkate alındığında ve incelendiğinde gömülü boruların uğradığı sismik hasarlarla ilgili birçok bilgiye ulaşmak mümkündür. Bu incelemeler bize kullanışlı bilgiler sunar. Geçmiş olaylardan edinilen bu tip bilgiler istatistiksel olarak hasar tahmini yapmayı sağlar, olası deprem ve hasarları tahmininde bu bilgiler kullanılabilir. Bu tahminler kullanılarak hasar sayılarını veren ampirik formüller elde edilmektedir. Boru hasar sayıları genellikle hasar oranları ile ifade edilmektedir. Hasar oranları bir bölgedeki boru hasar sayısının aynı bölgedeki boru hattı uzunluğuna bölünmesiyle elde edilir. Literatürde verilen bağıntılarda hasar oranı km başına oluşan hasar sayısı olarak verilmiştir.

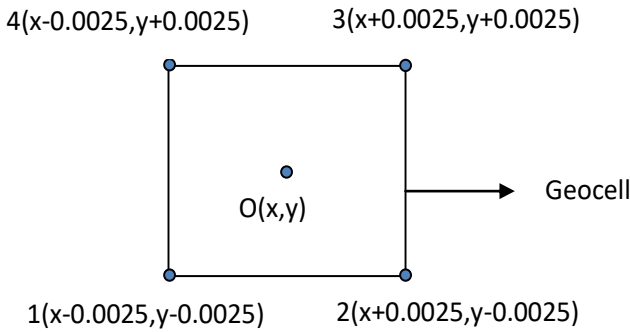
Bunlar En Büyük Yer Hızı - PGV (Peak Ground Velocity), Kalıcı Yer Deformasyonu - PGD (Permanent Ground Deformation) vb. gibi deprem parametrelerine karşın hasar oranını sayısını veren bağıntılar olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada hasar oranlarının belirlenmesinde iyi korelasyon veren PGV yer hareketi parametresi kullanılmıştır. Boru hasar hesabında PGV en önemli parametredir. PGV değerinin bulunmasında Yer Hareketi Tahmin Bağıntıları (YHTB) kullanılmaktadır. YHTB'da çalışılan boru hattını olduğu yerdeki zemin cinsi, uzaklık, fay tipi ve depremin aletsel büyüklüğü sonucu etkilemektedir. Ayrıca hasar hesabında PGV haricinde gömülü boru hatlarında boru cinsi, boru çapı, ek türleri, korozyon ve boru yaşı gibi faktörler önemli rol oynamaktadır. Su dağıtım sistemlerinde çeşitli boru tipleri kullanılmaktadır. Bunların günümüze kadar kullanılan en yaygın türleri; düktil demir ve dökme demir (font) borular, çelik borular, plastik borular (PVC) ve asbest (AÇB) borulardır. Boru hatlarının yapıldığı malzeme ve boruların ekleniş şekli deprem esnasındaki performanslarını etkilemektedir. En genel manasıyla boru hatları düktil ve kırılman olma üzere iki gruba ayrılmaktadır. Örneğin düktil demir ve günümüzdeki çelik borular düktil borular grubuna dahilken, font ve asbestli çimento (AÇB) borular kırılman borular grubuna girmektedir. Böylece onarım çalışmalarını hızlı ve etkin bir biçimde yapabilmek için, İstanbul için hayati öneme sahip içmesuyu hatlarının deprem sırasında olası hasar sayıları ve yerleri belirlenecektir.

Mevcut Verilerin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada İstanbul genelinde isale hatlarında kullanılan boru envanteri incelenmiştir. Kullanılan boru tipleri; asbest beton, çelik gömleklili betonarme boru, font, düktil font , beton/betonarme, çelik , PE (Polietilen), CTP (Cam Takviyeli Plastik), MBB (Muflu Betonarme Boru), öngermeli betonarme boru, pik boru, tipleridir. Ana isale hatlarında

kullanılan boruların %82'si çelik malzemeden imal edilmiştir.

Bu çalışma için ayrıca İstanbul'a ait mikrobölgeleme verileri toplanmıştır. 24144 noktaya ait koordinat ve zemin cinsleri elde edilmiştir. +0.005/2 ve -0.005/2 derecelik kaymalarla (400×600 metre uzunluğunda) zemin tipi hücrelerine ait tablolar oluşturulmuştur. Ayrıca her bir noktaya ait kayma hızı V_s değerleri verildiğinden ilgili hücredeki zemin cinsi hakkında bilgi sahibi oluruz. Bir kere isale hattının parçasının hangi hücre içinde kaldığı belirlendikten sonra söz konusu isale hattının hangi zemin sınıfının veya sınıflarının içinden geçtiği kolayca tespit edilir.

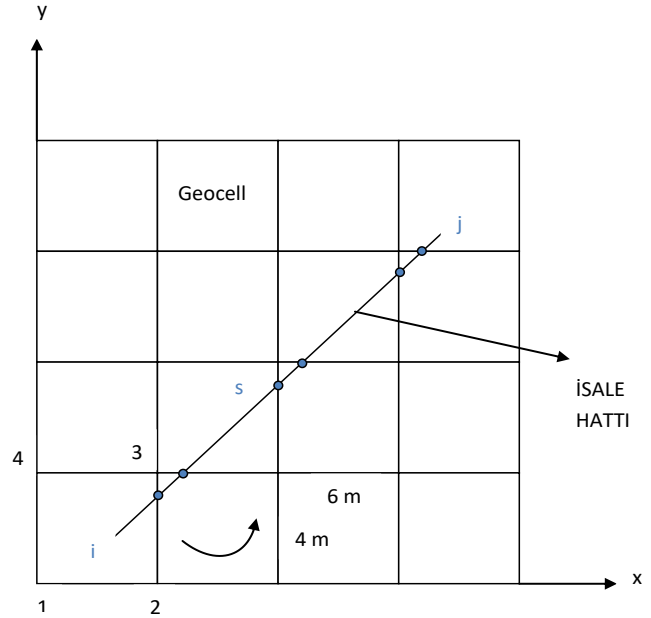


Şekil 2. Harita Hücrelerinin Oluşturulması

Yukarıdaki işlemler yapıldıktan sonra tüm isale hatlarının hangi hücrenin içine denk düştüğünün bulunması gerekmektedir. Bunun için ilk önce tüm isale hatlarının hücrelerin hangi noktada kesiştiklerinin bulunması gerekmektedir. Bu işlem için tarafımızca bir algoritma geliştirilmiştir. İsale hattını oluşturan çubukların her iki düğüm noktasının hangi noktada hangi hücreyi kestiği hesaplanarak yeni düğüm noktaları oluşturulmuştur. Böylece isale hattındaki iki düğüm noktasını oluşturan çubuğun bir hücreye atanmasına olanak sağlanmıştır.

Bundan sonra işleme hazırlanan yazılım ile devam edilmiştir. Düğüm noktalarının orta noktaları bulunarak bu noktaların hangi hücre içinde olduğu tespit edilerek düğüm noktalarını oluşturan çubuğun hangi hücreye ait olduğu belirlenerek isale hattının ilgili kısmının hangi

zemin tipinde olduğu belirlenir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, örnek sistem üzerinde algoritma oluşturularak İstanbul'da baraj, terfi istasyonu ve arıtma tesisini birleştiren kritik iki hat için örnek bir uygulama yapılmıştır.



Şekil 3. Örnek Sistem

Literatür Araştırması

Dünya üzerinde yapılan çalışmalarda altyapı sistemlerinin deprem riskinin belirlenmesinde kırılma eğrileri, istenen noktadaki Mercalli Şiddeti (MMI), (PGV), en büyük yer ivmesi (PGA), (PGD), spektral ivme S_a , spektral hız (S_v), şiddet spektrumu (SI), Arias şiddeti (AI), maksimum yer şekil değiştirilmesi (ϵ_g), bileşik parametre (PGV^2/PGA) gibi deprem parametrelerine karşın hasar sayısını veren bağıntılar olarak ifade edilmektedir.

Gömülü boru hatları ve yer hareketi parametreleri arasındaki ampirik bağıntılar 1970'li yılların ortalarından beri çalışılmaya başlanmıştır. Font ve asbest beton boruların PGA cinsinden hasar bağıntılarını araştıran çalışma Katayama v.d. (1975) çalışmasıdır. Bu çalışmada Japonya'daki altı ve ABD den bir depremin senaryoları kullanılmıştır. Bundan sonra birçok araştırmacı boru hatları için farklı deprem parametreleriyle hasar bağıntılarını çalışmış ve bunların bir tarihçesi Porras ve

Najafi tarafından (2010) Tablo1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Porras ve Najafi (2010) tarafından verilen hasar ilişkileri tarihçesi

Sismik Şiddet Parametresi	Referans
PGA	Katayama et al. (1975) Isoyama ve Katayama (1982) ASCE-TLCEE (1991) T.D.O’Rourke et al. (1991) Hamada (1991) Hwang and Lin (1991) T.D.O’Rourke et al. (1998) Isoyama et al. (2000)
MMI	Eguchi (1983) Ballantyne et al (1990) Eguchi (1991) T.D.O’Rourke et al. (1998)
PGV	Barenberg (1983) M.J.O’Rourke ve Ayala(1993) Eidinger et al. (1995) Eidinger (1998) T.D.O’Rourke et al. (1998) T.D.O’Rourke ve Jeon (1999) Isoyama et al. (2000) ALA(2001) Pineda ve Ordaz (2003) M.J.O’Rourke ve Deyoe (2004) Jeon ve O’Rourke T.D. (2005)
PGD, AI ,SA ve SI	T.D.O’Rourke et al. (1998)
ϵ_g	M.J.O’Rourke ve Deyoe (2004)
PGV^2/PGA	Pineda ve Ordaz (2007) Pineda ve Ordaz (2010)

Literatürde boru hatları için sismik hasar bağıntıları açısından 1993 yılından itibaren dikkate değer bir değişim olmuştur. Bu yıldan itibaren PGV hasar bağıntılarında tercih edilen parametre olamaya başlamış ve PGA ve MMI birkaç istisna dışında kullanılmamaya başlamıştır. Bu çalışmalar arasından O’Rourke ve Ayala (1993) Barenberg ve üç farklı depremin veri noktalarını kullanarak PGV cinsinden boru hatları için yeni bir bağıntı önermiştir.

Hasar Fonksiyonları

Gömülü boru hatlarının hasar bağıntılarının oluşturulmasında birçok deprem parametresi

kullanılmaktadır. Bu çalışmada son yıllarda da tercih edilen boru hatları için hasar hesaplamalarında daha iyi korelasyon gösteren PGV kullanılmıştır. PGV değeri olarak birkaç adet farklı yaklaşım yapılabilmektedir. Birincisi ölçülen en büyük iki yatay hız bileşeninden en büyüğü alınabilir. İkinci olarak en büyük iki yatay hız bileşenin geometrik ortalaması alınır veya üçüncü bir yaklaşım olarak da yatay hızların en büyük vektörel değerleri alınabilir.

Bu çalışmada Akkar ve Bommer (2007) tarafından önerilen YHTB kullanılmış ve PGV hesabında geometrik ortalama seçilmiştir.

Akkar ve Bommer (2007) çalışmasında Avrupa

ve Ortadoğu'daki sismik olarak aktif bölgelerdeki kuvvetli yer hareketi veritabanını kullanarak PGV'nin hesaplanması için denklemler elde edilmiştir. Toplam 532 kuvvetli yer hareketinin 100 km'ye kadar uzaklıkta ve moment büyüklüğü 5.5 ile 7.6 arasında değişen 131 depremin değerleri kullanılarak hem maksimum hem de geometrik ortalama için yatay bileşenleri veren denklemler elde edilmiştir.

Akkar ve Bommer (2007) tarafından önerilen formül şu şekildedir:

$$\text{Log (PGV)} = b_1 + b_2 \times \text{Magn} + b_3 \times \text{Magn}^2 + (b_4 + b_5 \times \text{Magn}) \times \log(R_{jb}^2 + b_6^2)^{0.5} + b_7 \times S_s + b_8 \times S_A + b_9 \times F_N + b_{10} \times F_R$$

PGV : Pik yer hızı cm/sn

Magn : Depremin aletsel büyüklüğü

R_{jb} : deprem odağına olan uzaklık km

F_N, F_R : Fay tipi katsayısı

S_s, S_A : Zemin tipi katsayısı

Geometrik ortalama PGV değerine göre katsayılar:

$$b_1 = -1.36$$

$$b_2 = 1.63$$

$$b_3 = -0.079$$

$$b_4 = -2.948$$

$$b_5 = 0.306$$

$$b_6 = 5.508$$

$$b_7 = 0.243$$

$$b_8 = 0.087$$

$$b_9 = -0.057$$

$$b_{10} = 0.0245$$

Yukarıda verilen denklemlerle elde edilen PGV değerleri aşağıda verilen hasar sayıları hesabında kullanılmıştır.

Hasar sayılarının hesabında kullanılan bağıntılarının en yaygınlarından birisi HAZUS (1999) tarafından önerilen denklemdir.

$$HS = 0.0001 \times (PGV)^{2.25}$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

Bu bağıntıda kırılğan borular için hasar sayıları 1 esnek borular için 0.3 ile çarpılması öngörülmüştür.

ALA2001(2001) (Amerikan Lifelines Alliance 2001) projesinde; ABD, Japonya ve Meksika'da meydana gelen toplam 12 adet depremden elde edilen veriler kullanılarak geçici yer deformasyonları meydana gelebilecek hasarları tahmin etmek için hasar ilişkileri geliştirilmiştir.

$$HS = K_1 \times 0.00241 \times PGV$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

K_1 : Malzeme tipi, çap ve birleşime bağlı katsayı

Eidinger ve Avila (1999) tarafından önerilen hasar bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$HS = K_1 \times 0.001 \times (PGV)^{1.98}$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

K_1 : Malzeme tipi, çap ve birleşime bağlı katsayı

Pineda ve Ordaz (2003) gelecekte olması muhtemel depremler sonrası su dağıtım sisteminde meydana gelebilecek ortalama hasar sayısını elde etmek için, kümülatif dağılım gösteren normal bir fonksiyon geliştirmiştir.

$$0 < PGV < 5.35 ;$$

$$HS = 0$$

$$5.35 \leq PGV < 95 ;$$

$$HS = 0.1172 + 0.7281 \times \int_{-\infty}^{PGV} \frac{1}{\sqrt{2\pi \times 19.7811}} \times e^{-1/2[(PGV-51.8964)/19.7811]^2} d PGV]$$

$$PGV \geq 95 ;$$

$$HS = 0.00137 \times (PGV) \times 0.70458$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

O'Rourke ve Deyoe (2004) tarafından yapılan çalışmada PGV'yi kullanarak R ve S dalgalarına göre hasar bağıntısı vermiştir.

$$HS = 0.0035 \times PGV^{0.92} \quad S \text{ dalgası}$$

$$HS = 0.034 \times PGV^{0.92} \quad R \text{ dalgası}$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

Yoo, Kang ve Kim (2013) tarafından yapılan çalışmada ALA2001 ve Isoyama tarafından önerilen formül kombine edilerek yeni bir hasar bağıntısı önerilmiştir.

$$HS = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times 0.00241 \times (PGV)$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

C₁ : Boru çapı katsayısı

C₂ : Malzeme tipi katsayısı

C₃ : Topoğrafya katsayısı

C₄ : Sıvılaşma katsayısı

O'Rourke ve Jeon (1999) 600 mm den küçük borular için font ve düktil font borular için hasar bağıntıları verilmiştir.

$$HS = e^{(1.84 \times \ln(PGV) - 9.40)} \quad \text{Düktil font}$$

$$HS = e^{(1.21 \times \ln(PGV) - 6.78)} \quad \text{Font}$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

O'Rourke ve Jeon (2000) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise ölçekli boru çapları için font ve düktil font borular için hasar bağıntıları elde edilmiştir.

$$HS = 0.004 \times (PGV/D_p^{0.468})^{1.378} \quad \text{Düktil font}$$

$$HS = 0.036 \times (PGV/D_p^{1.021})^{0.989} \quad \text{Font}$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

Toprak(1998) tez çalışmasında font borular için aşağıdaki hasar ilişkisini vermiştir.

$$HS = 10^{(1.62 \times \log(PGV) - 3.64)}$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

Son olarak da bu çalışmada kullanılan hasar bağıntısı Eidinger (1998) tarafından verilmiştir.

$$HS = 1.2 \times 10^{-3} \times PGV^{0.7677} \quad \text{Asbest Beton}$$

$$HS = 6 \times 10^{-4} \times PGV^{1.5542} \quad \text{Font}$$

$$HS = 6 \times 10^{-5} \times PGV^{2.2949} \quad \text{Düktil Font}$$

HS : Hasar sayısı (Onarım sayısı/km)

PGV : Pik yer hızı (cm/sn)

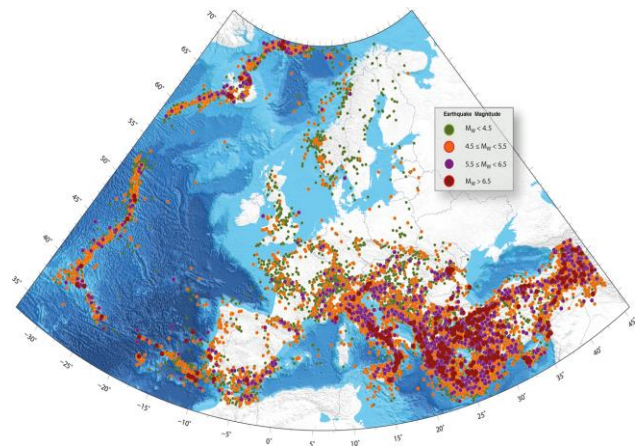
Deprem kataloglarının elde edilmesi

Sismik tehlike değerlendirmesi "Avrupa'daki Sismik Tehlike Uyumluluğu (SHARE)" projesi sonuçlarından ortaya çıkan 2013 Avrupa Sismik Tehlike Modeli (ESHM13), belirsizlikleri sayılara döken ve ulusal sınır kısıtlamasını ortadan kaldıran Avrupa ve Türkiye için tutarlı bir sismik tehlike modelidir (Woessner J.vd. 2015). Aynı zamanda Küresel Deprem Modeli(GEM) inisiyatifine katkı sağlayan ilk bitirilmiş bölgesel çalışmadır. Küresel Deprem Modeli(GEM) kapsamında geliştirilen OpenQuake yazılımı SHARE projesi kapsamında da etkin bir şekilde kullanılmıştır(Silva, V. vd. 2013).

Bu projede Orta Atlantik Sırtlarından Doğu Avrupa platformuna, Akdeniz'deki dalma zonlarından ve Türkiye deki geniş dönüşüm faylarından Baltık kalkanına kadar uzanan geniş bir alan çalışılmıştır. SHARE projesi kapsamında yeni homojen bir deprem kataloğu bir araya getirilmiştir. Bu katalog iki bölümden oluşmaktadır.

- 1000-1899 yılları arasındaki tarihsel arşivlerden elde edilen deprem veri ve bilgileri
- 1900-2006 mevcut ulusal kodlardan harmonize edilmiş ve çok sayıda özel çalışmadan alınmış veriler

Katalog daha homojen bir tehlike analizi için Orta ve Doğu Türkiye ye kadar uzatılmıştır.



Şekil3.1000-2006 tarihleri arasında Avrupa'daki depremlerden derlenen SHARE Avrupa Deprem

Katalogu (SHEEC) ve Orta ve Doğu Türkiye Uzantısı(SHEEC-CET); bu katalog 32-44 boylam, 35-72 enlem ile sınırlıdır

Bu çalışmada yukarıda bahsi geçen deprem katalogu İstanbul civarındaki veriler alınarak faydalanılmıştır.

Tablo 2. Hasar Bağlantıları

Referans	Boru Cinsi	Hasar Sayısı (Onarım sayısı/km)
HAZUS(1999)	Karışık	$0.0001 \times PGV^{2.25}$
ALA2001(2001)	Karışık	$K_1 \times 0.00241 \times PGV$
Eidinger ve Avila(1999)	Karışık	$K_1 \times 0.001 \times (PGV)^{1.98}$
Pineda ve Ordaz(2003)	Karışık	$0.1172 + 0.7281 \times \int_{-\infty}^{PGV} \frac{1}{\sqrt{2\pi \times 19.7811}} \times e^{-1/2[(PGV-51.8964)/19.7811]^2} d PGV]$
O'Rourke ve Deyoe(2004)	Karışık	$0.0035 \times PGV^{0.92}$ S dalgası $0.034 \times PGV^{0.92}$ R dalgası
Yoo,Kang ve Kim(2013)	Karışık	$C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times 0.00241 \times (PGV)$
O'Rourke ve Jeon (1999)	Font Düktül Font	$e^{(1.21 \times \ln(PGV) - 6.78)}$ $e^{(1.84 \times \ln(PGV) - 9.40)}$
O'Rourke ve Jeon(2000) (Ölçekli)	Font Düktül Font	$0.036 \times (PGV/D_p)^{1.021} \times 0.989$ $0.004 \times (PGV/D_p)^{0.468} \times 1.378$
Toprak(1998)	Font	$10^{1.62 \times \log(PGV) - 3.64}$
Eidinger (1998)	Asbest Beton Font Düktül Font	$1.2 \times 10^{-3} \times PGV^{0.7677}$ $6 \times 10^{-4} \times PGV^{1.5542}$ $6 \times 10^{-5} \times PGV^{2.2949}$

Önerilen Olasılıksal Değerlendirme Yöntemi

Bu çalışmada gerek envanter bilgileri ve gerekse depremsellik bilgileri, olasılıksal tabanda bir araya getirilerek risk değerlendirme yöntemi oluşturulmuştur. Burada PEER (Pasific Earthquake Engineering Research Center) yaklaşımı (Cornell ve Krawinkler, 2000; Krawinkler, 2002) isale hatları problemine uyarlanmıştır. Bu olasılıksal çerçeve dünyada risk değerlendirme çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

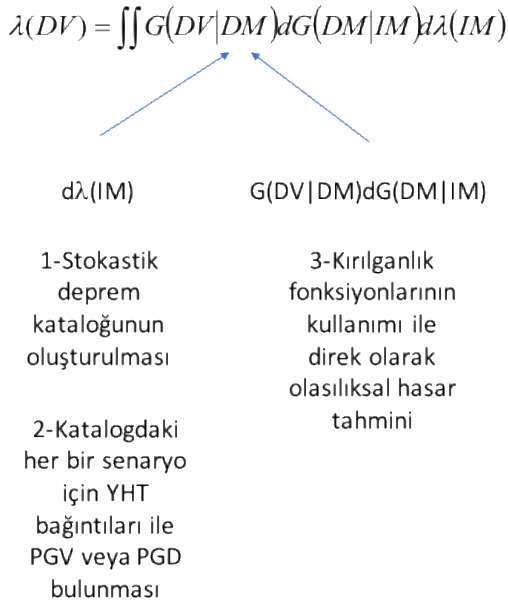
Risk

PEER yaklaşımı kısaca iç içe integraller ile temsil edilen bir denklemden ibarettir:

$$\lambda(DV) = \iint G(DV|DM) dG(DM|IM) d\lambda(IM)$$

Burada $G(DV|DM)$ belirli bir karar değişkeninin (Desicion Variable - DV) belirli bir hasar ölçeği (Damage Measure – DM) için aşılma olasılığını, örneğin isale hatlarında hasar oluşturan boru deformasyonlarından daha fazla deformasyonların oluşma olasılığın verir. $G(DM|IM)$ ise, belirli bir yer hareketi ölçeği için (Intensity Measure - IM) için hasar ölçeğinin (DM) aşılma olasılığıdır. Bu yayındaki örnekte,

örneğin belirli bir PGV değeri için hasar oluşma olasılığını tarif eden bağıntıdır. Son olarak, $\lambda(IM)$ ise yıllık olarak belirli yer hareketi şiddetinin (örneğin PGV değerinin) beklenen oluşma frekansıdır. Buna benzer şekilde $\lambda(DV)$ parametresi de beklenen yıllık hasar olasılığıdır. İsale hatlarının olasılıksal deprem risk hesabında, genel deprem risk çalışmalarından farklı olarak, yer hareketi parametresi (IM) ile hasar parametresi (DM) arasında doğrudan bir ilişki vardır zira mevcut gömülü boru hattı kırılma bağıntılarının tamamı bu doğrudan ilişkiye dayalı ampirik yaklaşımlardır. Bu durumu PEER olasılıksal çerçevesine uygulayabilmek için, Şekil 4'te verilen akış izlenmiştir.



Şekil 4. PEER olasılıksal çerçevesinin bu çalışmaya uyarlanması

Örnek Uygulama

Bu çalışmada, İstanbul'da bulunan ve baraj, terfi istasyonu ve arıtma tesisi arasında önemli bir rol oynayan Ø1000 ve Ø2200mm çapındaki örnek iki isale hattı için hasar tahminleri, bu makalede belirtilen olasılıksal yaklaşım izlenerek hesaplanmıştır. Yukarıda da verilen bağıntılar ile, olası bir depremde İstanbul'a yakın çevresinde deprem üretebilecek noktaları içeren katalog deprem verilerine göre

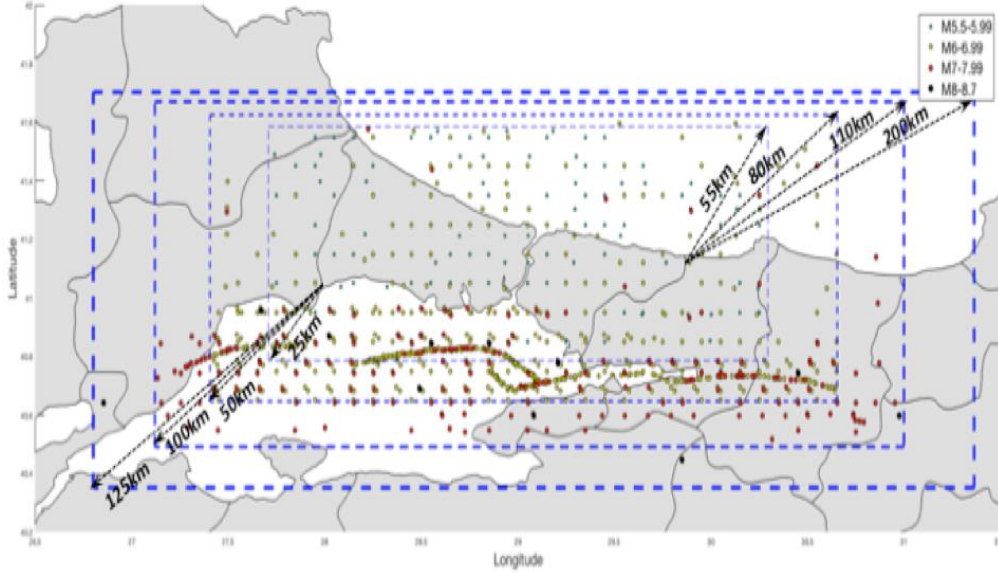
hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiğe yansıtılarak hasar sayıları renklendirilmiş ve boru çapları da kalınlığa göre ifade edilmiştir. Böylece boru hatları üzerinde az hasarlı ve çok hasarlı yerler görsel olarak kolayca görülebilmektedir.

Örnek uygulama çalışmasının yapılabilmesi için öncelikle katalog depremleri seçilmiştir. Bu depremler stokastik olarak üretilen 10,000 yıllık sentetik katalogdan alınmıştır (SHARE projesi kapsamında üretilen kataloglar). Katalog depremlerinin seçiminde, toplam analiz süresini azaltacak ancak sonuçları etkilemeyecek bir yöntem izlenerek katalogun optimizasyonu yapılmıştır. Buna göre, Şekil 5'te verildiği gibi, birbirinin içerisine geçen 4 farklı çalışma alanı seçilmiştir. Bu alanlardan en içeride bulunan ve en küçük olan alanda 5 ve üzeri büyüklüğe sahip tüm depremler, bir dıştaki alanda 6 ve üzeri, bir dıştakinde 7 ve üzeri, ve en son olarak da en dıştaki en büyük çalışma alanında ise 8 ve üzeri depremler dikkate alınmıştır. Bu alanlar seçilirken İstanbul'un sınırlarına uzaklıklar ölçülmüş ve YHT bağıntılarında kayda değer sonuç verebilecek mesafeler çalışma alanına dahil edilmiştir.

Burada örnek uygulaması yapılan yöntem, tam olarak olasılıksal bir yöntemdir. Daha önce bölgesel ölçekte gömülü isale hatlarının deprem riskine yönelik yapılan iki çalışma olan JICA'nın İstanbul için yaptığı çalışma (JICA, 2002) ile HAZUS yöntemi kapsamında yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu makalede verilen çalışmanın temel farkı birden fazla hasar fonksiyonunu kullanabilmesi ve ayrıca deterministik değil olasılıksal senaryolar ile çalışabilmesidir. Örneğin JICA çalışması, büyük oranda HAZUS yöntemine ve onun içerisinde kullanılan, bu makalede de verilen hasar görülebilirlik fonksiyonlarına bağlıdır. JICA çalışmasında, deterministik senaryo depremleri için hasar dağılımları bulunmuş, bu yapılırken de sadece bir hasar fonksiyonundan faydalanılmıştır. Burada sunulan çalışmada JICA çalışmasından farklı olarak, hem birden fazla hasar fonksiyonunun içerisine yerleştirilebileceği bir mantık ağacı yaklaşımı

verilmiştir, hem de katalog depremler kullanılarak deterministik değil olasılıksal olarak deprem hasar dağılımını elde etmek mümkün olmuştur.

Bunların yanında tüm yaklaşımın PEER olasılıksak yaklaşımı üzerine oturtulması da, diğer yöntemlerden en temel farkıdır.



Şekil 5. İstanbul isale hatlarının olasılıksal risk değerlendirmesinde kullanılan çalışma alanları (işlem adedini ve bilgisayar hafıza kullanımını optimize edebilmek için uzak küçük depremlerin daha az dikkate alındığı dereceli 4 farklı çalışma alanı boyutu seçilmiştir)



Şekil 6. Örnek uygulama sonucunda bulunan, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem sırasında örnek çalışma alanında oluşması beklenen medyan kilometre başına onarım oranları

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, çok farklı malzemelerden inşa edilmiş olan karmaşık isale hatlarında, karar

verici mekanizmaların farklı deprem seviyeleri için toplam deprem riskini görmelerine yarayacak olasılıksal bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde boru hattı üzerinde oluşması beklenen hasar (kilometre boru uzunluğunda

oluşacak hasar adedi), sadece belirli bir senaryo depremi için değil, servis, tasarım ve en büyük deprem durumlarını temsil eden farklı deprem seviyeleri için de tespit edilebilmektedir.

Yöntem çalışma alanı için 10,000 yıl uzunlukta stokastik bir deprem kataloğunu, tüm çalışma alanına ait 0.005x0.005 derece boyutlu hücreleri ve bu hücrelerin zemin özelliklerini, son olarak da her bir hücreye düşen boru parçalarının çap, tip gibi özelliklerini bir araya getirerek deprem risk hesabı yapmaya yaramaktadır. Bu hesabın yapılmasında, PEER tarafından önerilen ve son yıllarda deprem risk çalışmalarında bel kemiğini oluşturan yaklaşım kullanılarak yukarıda sayılan tüm bu bileşenler bir araya getirilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen risk grafiği, Şekil 6'da görülebilir. Burada deprem kaynaklarına uzaklık senaryodan senaryoya çok fazla değişmemektedir zira iki hattın kapladığı alan, deprem kaynağına uzaklığı çok fazla değiştirecek kadar büyük değildir. Analizlerde özellikle zemin durumuna bağlı olarak yüksek PGV değerinin elde edildiği bölgelerde, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem seviyesi için olasılıksal risk değerleri kilometre boru uzunluğu başına 0.12 ila 0.24 arasında değişmektedir. Bu değerler, 4 ila 8km uzunlukta kesin olarak bir hasar gerçekleşeceği düşünüldüğünde, yüksek değerlerdir ve su kaynağı ile su pompa istasyonu arasındaki bağın kesin olarak kopması anlamına gelir.

Risk çalışması katalog kullanılarak ve olasılıksal olarak gerçekleştirildiği için, istendiğinde aynı verilerden başka deprem seviyeleri için de kilometre boru uzunluğu başına beklenen hasar adedi tespit edilebilir. Örneğin Şekil 6'da verilen grafiğin bir benzeri, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan çok büyük ve çok nadir depremler veya 50 yılda aşılma olasılığı %50 olan küçük ve sık depremler için de üretilebilir. Yine aynı şekilde, kritik noktalar (barajlar, terfi istasyonları, depolar, arıtma tesisleri, gibi...) için de farklı deprem seviyeleri için risk değerleri elde edilebilir. Önerilen yöntem, daha önce İstanbul için JICA tarafından yapılan çalışmanın aksine, belirli bir senaryo depremi için değil, farklı seviyeler için risk

hesabı yapmayı mümkün kılmaktadır. Bu durum, karar vericilerin işini kolaylaştırabilir.

Daha önce bölgesel ölçekte gömülü isale hatlarının deprem riskine yönelik en önemli iki çalışma, JICA'nın İstanbul için yaptığı çalışma (JICA, 2002) ile HAZUS yöntemi kapsamında yapılan çalışmalardır. Esasen JICA çalışması da, büyük oranda HAZUS yöntemine ve onun içerisinde kullanılan, bu makalede de verilen hasar görülebilirlik fonksiyonlarına bağlıdır. JICA çalışmasında, deterministik senaryo depremleri için hasar dağılımları bulunmuş, bu yapılırken de sadece bir hasar fonksiyonundan faydalanılmıştır. Burada sunulan çalışmada JICA çalışmasından farklı olarak, hem birden fazla hasar fonksiyonunun içerisine yerleştirilebileceği bir mantık ağacı yaklaşımı verilmiştir, hem de katalog depremler kullanılarak deterministik değil olasılıksal olarak deprem hasar dağılımını elde etmek mümkün olmuştur. Mantık ağacı ile birçok farklı hasar fonksiyonunun dahil edilebilmesi zaten burada sunulan yöntemin HAZUS yönteminden de en temel farkıdır zira burada sunulan olasılıksal yöntem PEER olasılıksal yaklaşımı üzerine bina edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan katalog deprem verilerinin sağlanmasındaki yardımları için EUCENTRE OpenQuake ekibine, özellikle Sevgi Aktaş Özcebe ve Vitor Silva'ya teşekkür ederler.

Kaynaklar

- ALA., (2001). Seismic fragility formulations for water systems, American Society of Civil Engineers ASCE and Federal Emergency Management Agency FEMA, www.americanylifelines.org, Jan.2002
- Barenberg, M. E., (1988). Correlation of pipeline damage with groundmotions, *J. Geotech. Engrg.*, 114(6), 706–711.
- Eguchi, R. T., (1983). Seismic vulnerability models for underground pipes, *Proc., Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment*, ASME, New York, 368–373.
- Eguchi, R. T., (1991). Seismic hazard input for lifeline systems, *Struct. Safety*, 10, 193–198.

- Eidinger, J., (1998). Water distribution system, *The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989—Lifelines*, A. J. Schiff, ed., U.S. GPO, Washington, D.C., A63–A78.
- FEMA, (1999). *Earthquake loss estimation methodology HAZUS-MH—Technical manual*, <http://www.fema.gov/hazus>, 2001.
- Hwang, H., Lin, H., (1997). GIS-based evaluation of seismic performance of water delivery systems, *Technical Rep. Prepared for CERI*, Univ. of Memphis, Memphis, Tenn.
- Isoyama, R., Ishida, E., Yune, K., Shirozu, T., (2000). Seismic damage estimation procedure for water supply pipelines, *Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, CD-ROM, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 8.
- Jeon, S. S., O'Rourke, T. D., (2005). Northridge earthquake effects on pipelines and residential buildings, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(1), 294–318.
- Katayama, T., Kubo, K., Sato, N., (1975). Earthquake damage to water and gas distribution systems, *Proc., U.S. National Conf. On Earthquake Engineering*, EERI, Oakland, Calif., 396–405.
- Newmark, N.M., (1967). Problems in wave propagation in soil and rocks, *Proc., Int. Symp. on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*, University of New Mexico Press, Albuquerque, N.M.
- O'Rourke, M. J., Ayala, G., (1993). Pipeline damage due to wave propagation, *J. Geotech. Engrg.*, 119(9), 1490–1498.
- O'Rourke, M. J., Deyoe, E., (2004). Seismic damage to segmented buried pipe, *Earthquake Spectra*, 20(4), 1167–1183.
- O'Rourke, T. D., Jeon, S.S., (1999). Factors affecting the earthquake damage of water distribution systems, *Proc., 5th U.S. Conf. on Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, Reston, Va., 379–388.
- Pineda, O., and Ordaz, M., (2003). Seismic vulnerability function for high-diameter buried pipelines: Mexico City's primary water system Case, *Proc., 2003 ASCE Int. Conf. on Pipeline Engineering and Construction*, ASCE, Reston, Va.
- Toprak S., Taşkın F., (2007). Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking, *Natural Hazards*, Vol.40, pp 1-24.
- Toprak, S., (1998). Earthquake Effects on Buried Lifeline Systems, Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY.
- Akenori, S., (2006). Estimation of earthquake damage to urban systems, *Structural Control and Health Monitoring*, 13 454-471.
- Adachi, T., Elingwood, B.R., (2010). Comparative assessment of civil infrastructure network performance under probabilistic and scenario earthquakes, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.16,1-10.
- Yoo, D.G., Kang, D. S., Kim, J. H., (2013). Seismic Reliability Assessment Model of Water Supply Networks, 'World Environmental and Water Congress 2013', Showcasing the future ASCE 2013, 955-966.
- Kameda, H., (2000). Engineering management of lifeline systems under earthquake risk, *12. WCEE Conference*, 248-264.
- Fragiadakis, M., Christodolou, S.E., (2014). 'Seismic reliability assessment of urban water networks', *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, (43) 357-374.
- Porras, O.P., Schroeder, M.O., (2003). Seismic vulnerability function for high diameter buried pipelines Mexico City's primary water system, *New Pipeline Technologies, Security and Safety*, 1145-1154
- Pineda-Porras, O., Najafi M., (2010). Seismic damage estimation for buried pipelines: challenges after three decades of progress, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Vol.1 no. 1, 19-24.
- Akkar, S., Bommer, J.J., (2007). Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and Middle East, *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol.97 no.2, 511-530.
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli, D., Pinho, R., (2013). Development of the Openquake Engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment, *Natural Hazards*, DOI: 10.1007/s11069-013-0618-x.
- Woessner J., Danciu L., Giardini D., Crowley H., Grunthal G., Valensise G., Arvidsson R., Basili R., Demircioğlu M., Hiemar S., Meletti C., Muson R., Rovida A., Sesetyan K., Stucchi M., (2015). The 2013 European Seismic Hazard Model – Key Components and Results, *Bulletin of Earthquake Engineering* 13, no.12, 3553-3596.
- (www.ibb.gov.tr/tr-TR/SubSites/DepremSite/PublishingImages/JICA-TUR.pdf).

Probabilistic seismic damage estimation in water mains and an example application

Extended abstract

Strong seismic events damage the built environment that includes also the lifeline systems. One of the most important infrastructures needed in the complex aftermath of a strong earthquake is the water mains that supply potable water to the citizens. Even if the houses are inhabitable after the event, lack of water jeopardizes the recovery process.

Water main networks are complex structures since they consist of several pipeline systems interconnected to each other and to critical facilities such as dams, water treatment facilities or to water storages. Furthermore, the pipelines may be built by using various material types and connection methods. One of the most important challenges, of course, stems from the fact that these structures are mostly underground and not maintained several decades in most of the cases.

Damage and seismic risk estimation of such complex systems is quite difficult due to the main reasons listed above. In this paper, a probabilistic approach is proposed for estimating the seismic risk on water main networks. The method is based on the PEER probabilistic framework and involves the use of a stochastic earthquake catalogue, an inventory of pipelines, and high resolution GIS data.

The first step of the approach is to place the layer of pipelines over the layer of geocells in GIS environment. The geocells contain soil data for a high-resolution field, such as 0.005x0.005 degrees as used in this study. This process results in a very high number of pipeline pieces. The second step is to define a stochastic earthquake catalogue, preferably of 10K or 20K years long. The analyses then continue running pipeline damage vulnerability functions for every single event in the catalogue as well as for every pipeline piece. This analysis is challenging not only in terms of time of analysis but also in terms of the available memory usage in the computers. In the software prepared for this study, several optimizations and a parallel computation approach had to be developed. The analyses conducted in 4 computers in parallel and resulted in 4 to 5 days of process for whole Istanbul.

After the analyses are completed, an annual seismic risk curve is created for every pipeline piece. This curve presents the damage per kilometer versus the

probability of exceedance annually. It should be noted that this is a Poisson process which means that the results are time-independent (i.e. a recent major seismic event would not affect the annual probability of exceedance). Obtaining annual seismic risk curves allows the user to then translate the curve into expected damages for a given return period or for a level of probability of exceedance in certain years. For instance, once the proposed analyses are completed, the user can extract the damage per kilometer for an earthquake level of 475 years return period, or for 2475 etc. As opposed to most of the existing studies, this approach allows the decision maker to be able to check the spatial distribution of the expected damages for varying seismic levels.

The proposed method is finally applied to two pipelines in the European side of Istanbul. These are $\phi 2200\text{mm}$ and $\phi 1000\text{mm}$ steel pipelines that connect an important water reservoir to a pumping station and to a water treatment facility.

The risk on the buried pipelines is often given with the risk metric of repair-per-km. The risk assessment on the two critical pipelines for an earthquake scenario of 10% probability of exceedance in 50 years shows repair-per-km between 0.12 and 0.24. These values are quite high considering that at least one significant damage is expected for a 4 to 8km length. In this case, the studied connection between the water source and the pumping station is expected to fail with a certainty. By using the holistic approach presented here, it was possible to present the expected damage levels graphically for the selected seismic level. The method can successfully be applied to the entire water system of Istanbul or to similar complex water main networks under seismic threat.

The main difference of the approach proposed in this paper from the previous JICA study for Istanbul is the probabilistic representation of the seismic risk, as opposed to deterministic one, as well as the ability of the method to allocate various vulnerability functions within logic trees. The HAZUS approach, for example, similar to the JICA approach, uses a single set of pipeline vulnerability functions reducing the method to a deterministic one in the vulnerability part.

Keywords: Water mains; seismic risk; buried pipelines