

Alt Yapı Sistemlerinin Deprem Güvenliğinin Değerlendirilmesi

Selçuk TOPRAK & A. Cem KOÇ

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli

Filiz TAŞKIN

TSKB Gayrimenkul Değerlendirme A.Ş., İzmir

ÖZ: Son yıllarda gerçekleşen depremlerde altyapı sistemlerinde meydana gelen büyük hasarlar bu sistemlerin genel olarak deprem riski açısından ihmal edildiğini göstermiştir. Bu çalışmada depremin gömülü boru hatları üzerine etkileri ve borularda meydana gelen deprem zararlarının sebepleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca pek çok alanda günümüzün önemli ve gerekli araçlarından biri haline gelmiş olan coğrafi bilgi sistemlerinin (CBS) geniş alana yayılmış olan alt yapı sistemlerinin deprem performansını değerlendirmede kullanılışı gösterilmiştir. Geçmiş depremler sonrasında boru hatları sistemleriyle ilgili olarak toplanan verilerin değerlendirilmesiyle elde edilen hasar ilişkileri tartışılmış ve bunların gelecekteki depremler için yapılacak hazırlıklar açısından önemi açıklanmıştır. Denizli örneği ile geçmiş depremlerden kazanılan tecrübelerin bir bölgede gelecekte olabilecek depremlerin alt yapı sistemlerinde oluşturabileceği hasarların belirlenmesi amacıyla nasıl kullanılabilirliği gösterilmiştir. Geçmiş depremler sonrasında yapılan değerlendirmelerin ve gelecek depremlere hazırlık açısından yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçların alt yapıların deprem güvenliğini arttırmak açısından önemi tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Alt Yapı Sistemleri, Boru Hatları, Boru hasarları, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Denizli, Sıvılaşma, Su Şebekesi*

1 GİRİŞ

Altyapı sistemleri içinde yer alan boru hatları petrol, doğal gaz, su ve atık su gibi insan hayatında önemli yer tutan malzemelerin iletiminde temel rol oynamaktadır. Depremi izleyen günlerde de gerek insanların yaşamı gerekse endüstri için petrol, doğal gaz, su ve atık su sistemlerinin işlevselliğini sürdürmesi ya da çok kısa zamanda işlevselliğini kazanması önemlidir. Bunun için ise sistemlerin bir parçası olan boru hatlarının da deprem öncesinde olduğu kadar deprem sonrasında da fonksiyonunu devam ettirebilmesi gerekir.

Depremin gömülü boru hatları üzerine olan zararı, geçici yer deformasyonlarıyla (GYD) veya kalıcı yer deformasyonlarıyla (KYD) olmaktadır. GYD deprem dalgalarının geçişi esnasında oluşan, zeminin dinamik tepkisi iken, KYD deprem sonrasında zeminde oluşan ve geri dönmeyen son yer değiştirmelerdir. GYD bazen küçük miktarda kalıcı deformasyonlar oluşturabilir fakat bunlar genelde yüzeysel etkilerdir. KYD genellikle büyük olmakta, örneğin fay hatlarının hareketlerini, şev kaymalarını, sıvılaşma sonucu oluşan yer değiştirmeleri ve kohezyonsuz topraklar-

da oluşan farklı oturmaları içine almaktadır [1, 2]. GYD ve KYD değerlerinin rölatif büyüklükleri hantısının boru hattının üzerinde etkisinin hakim olduğunu belirler. Eğer KYD değeri GYD'den daha büyükse o zaman KYD gömülü boru hatlarına daha çok zarar verir ya da tersi durum gerçekleşir. Boru hatları üzerinde GYD genellikle KYD'e göre daha küçük uzama oranlarına ve deformasyonlara sebep olur. Bununla birlikte GYD'nin etkilediği alan KYD'nin etkilediği alandan çok daha büyüktür. Bu sebeple zayıf kısımların bulunduğu yada paslanma gibi sebeplerle parçaların zayıfladığı boru hattı sistemleri üzerinde GYD oldukça yaygın etkiler gösterebilir. KYD ise daha yerel bölgelerde gerçekleşmesine rağmen, etkilediği bölgede çok büyük zararlara sebep olur.

Bu çalışmada GYD ve KYD etkisiyle gömülü boru hatlarında oluşabilecek hasar tahminlerinde kullanılan hasar ilişkileri sunulmuş ve bu ilişkiler yardımıyla Denizli su şebekesinin gelecekte olması muhtemel bir depremde performansı değerlendirilmiştir. Veri girişlerinde ve analizlerinde yoğun olarak CBS kullanılmıştır.

2 BORU HATLARININ DEPREM PERFORMANSINI ETKİLEYEN SEBEPLER

Gömülü boru hattı sistemlerinde oluşabilecek hasarlarda; boru cinsi, boru çapı, ek türleri, zemin korozyonu 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 kırılğan olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Örneğin düktil demir ve günümüzdeki çelik borular düktil borular grubuna dahilken, font ve asbestli çimento (AÇB) borular kırılğan borular grubuna girmektedir. HAZUS [3] düktil borular için onarım oranı değerlerinin kırılğan borular için olanların üçte biri olarak alınmasını önermektedir.

Boruların ekleniş şekli deprem esnasındaki dayanımlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Geçmiş depremlerde rijit bağlantılı sürekli boruların (örneğin kaynaklı çelik borular) diğer metotlar kullanılarak yapılan bağlantılardan çok daha iyi performans sergilediği gözlenmiştir. Bununla birlikte örneğin vida eklemeli eski çelik borular paslanmadan dolayı kötü performans gösterebilmektedir. Bağlantıların ek parçalarla yapıldığı boru sistemlerinde ise, boru birleşimleri esnek yada güçsüz bağlantılar içermektedir. Bağlantıların olası bir depremde güçsüz kalmalarının ise üç farklı sebebi vardır. Bunlar; borulara gelen gerilme ve eğilme deformasyonlarının artması, düğüm noktalarındaki dönmelerin yada çekme gerilmelerinin artışıdır.

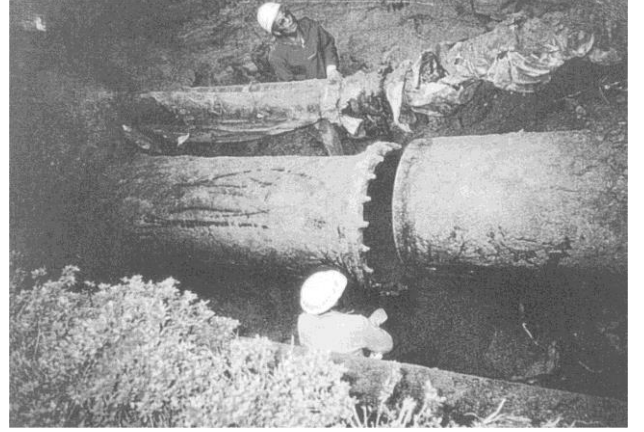
Deprem sonrası yapılan inceleme ve elde edilen verilere göre, kauçuk contalı ekli PVC boruların sismik performansının aynı ekli asbestli borudan daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak da plastik malzemenin gerilme kuvvetlerine karşı olan dayanımının daha iyi olması gösterilmiştir [4]. Portland çimentolu eklerle rijit bağlantısı yapılan parçalı borular deprem esnasında sızıntı oluşumundan evvel çok fazla boru hareketine izin vermezler, ancak kauçuk contalarla esnek bağlantı yapılan borular genel olarak daha fazla sismik deformasyona izin verebilirler. Şekil 1’de depremde vida eklemeli bir çelik gaz borusunun aldığı hasar görülmektedir. Bunlardan farklı olarak; boru hattının bitişik yapılara (su deposu, binalar, köprüler) olan bağlantılarında lokal olarak yüksek gerilmeler oluşabilir. Bu durum özellikle boru hattı ile yapı arasında rölatif yer değiştirmelere izin verecek yeterli esnekliğin olmadığı durumlarda gerçekleşmektedir. Bu durum; Los Angeles şehrinde 1971 San Fernando depremi sırasında su dağıtım şebekesinin servis bağlantılarında meydana

gelen hasarların büyük çoğunluğunun nedeni olarak rapor edilmiştir [4]. Japonya’da 1995 Kobe depreminden sonra bölgedeki gömülü boru hattı sistemleri hasar görmüştür. Özellikle eski borular, birleşim noktaları daha düktil ve esnek olan yeni borulara kıyasla daha çok zarar görmüştür [2].



Şekil 1. Vida eklemeli gaz boru hattındaki hasar [5, 6]

Şekil 2’de Kobe depreminde düktil ve font borularda meydana gelen hasar örnekleri görülmektedir. Burada düktil boruda birleşim noktasında ayrılma gözlenirken font boruda gövdede kırılma meydana gelmiştir.



(a) 0.8 m çaplı düktil boruda birleşim noktasında ayrılma



(b) 0.8 m çaplı font boru hasarı

Şekil 2. Su boru hatlarındaki hasarlar [5, 7]

Kırılğan boru grubuna dahil olan font boruların bağlantılarının yapıldığı ek parça türlerine göre sismik performansları değişmektedir. Bazı su dağıtım sistemlerinde olduğu gibi, font boruların birleşiminde kauçuk conta kullanılırsa tüm boru türleri için (as-

best ve düktil demir borular dahil) kauçuk contalı ekli boruların hasar oranları çimento veya kurşun bağlantılı font borulardan daha az olacaktır [4]. Asbestli çimento boruların (AÇB) da ek türleri sismik performansını etkilemektedir. Örneğin; kauçuk contalı asbest boru font borudan daha iyi performans gösterirken, çimento ekli asbest borunun performansı font borununkiyle benzerdir. Çimentolu eklerin boruların esnekliğini sınırladığı ise bilinen bir gerçektir.

Gömülü boru hattı sistemlerinde oluşabilecek hasarlarda boru çapının ve zemin korozyonunun önemli etkileri vardır. 20 yılı aşkın bir süredir yapılan çalışmalar boru çapının boruların sismik performansını etkilediği yönünde olmuştur. Geçmiş depremlerde boru hatlarının performansı değerlendirildiğinde boru çaplarıyla onarım oranları arasında bir ilişki gözlenmiştir. Toprak, 1998 [8] bu ilişkiyi boruları dağıtım (çapı 600 mm den küçük) ve iletim hatları (çapı 600 mm den büyük) olarak iki gruba ayırarak analiz etmiştir. Boru çapı büyüdükçe hasar oranı da düşmektedir. Bu konuyu irdeleyen O'Rourke ve Jeon, 1999, 2000 [9, 10], hem yatay yer hızını hem de boru çapını, boru hattı onarım oranı ile ilişkilendiren bir bağıntı geliştirmiştir [11].

Ayrıca Sato ve Myurata, 1990 [12] ile, O'Rourke ve Jeon, 1999 [9]; çalışmalarında büyük çaplı çelik borularda sismik hasarın küçük çaplı borulara oranla daha az olacağını belirtmişlerdir. Bunun sebebi olarak da çeşitli faktörler sunmuşlardır. Bunlar; büyük çaplı borularda inşaat kalitesinin küçük çaplı borulara oranla daha iyi olması, daha az yan bağlantı içermesi, büyük çaplı boruların döşenmesi sırasında zemin düzeltilmesi yapılmasıdır. Bu faktörlerin dikkate alınmasıyla büyük çaplı çelik boruların onarım oranlarının, küçük çaplı boruların onarım oranlarına göre %75 düştüğü görülmektedir [4]. Ancak boru çapının, su dağıtım şebekeleri içindeki tüm boru türlerinin sismik performansı üzerine olan etkisini ortaya koyacak yeterli düzeyde deneysel çalışma ve veri mevcut değildir. Bununla birlikte 300 mm üzerindeki büyük çaplı borulardaki hasar oranının, 100 ile 300 mm arasındaki daha küçük çaplı borulardaki hasar oranından daha az olduğu ALA, 2001'de [4] belirtilmektedir.

Yapılan çalışmalar korozyonlu zeminlerdeki küçük çaplı çelik boruların, korozyonsuz zeminlerdeki küçük çaplı çelik borulardan üç kat daha fazla hasar alabileceğini belirtmiştir [4]. Zemin korozyonunun etkisi büyük çaplı çelik borularda küçük çaplı borulara nispeten daha az olmakla birlikte, gerilme artışına bağlı kıvrılma ve bükülmeler büyük çaplı borularda daha az olmaktadır. Ayrıca artan basınç ve zemin yüküne karşı büyük çaplı çelik boruların dayanımı daha fazla olmaktadır.

Çelik boruların sismik performansı üzerinde; boru çapı ve bağlantılarda kullanılan kaynak eklerinin kalitesi doğrudan ilişkili olduğu gibi, zemin korozyonu da önemli rol oynamaktadır. Zeminde korozyonun varlığı ve boruların yaşı gibi faktörler özellikle parçalı ve civatalı çelik borular ile font boruların sismik performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Daha yaşlı borularda korozyonunda etkisiyle deprem sırasında meydana gelen hasar olayları genç borulara oranla daha fazladır. 1987 Whittier Narrows depreminden elde edilen veriler boru yaşına bağlı olarak boru kırılmalarında da artış olduğunu göstermektedir [13]. 1989 Loma Prieta depreminde de çelik borularda meydana gelen hasarlar bu eğilimi desteklemiştir [14].

Zemin korozyonu; gerek malzemelerin kalınlıklarını düşürerek, gerekse gerilme konsantrasyonları yaratarak gömülü boruların dayanımını düşürmektedir. Elde edilen tecrübeler font borularda da korozyona bağlı birçok hasarın oluştuğunu göstermektedir [14, 15, 16]. Alt yapı sistemleri için oluşturulacak veri tabanlarının, gömülü boru hattı sistemlerinde oluşabilecek hasarlarda rol oynayan faktörleri de kapsamı önemlidir.

3 GEÇİCİ VE KALICI YER DEFORMASYONLARI ETKİSİYLE OLUŞABİLECEK HASAR TAHMİNİNDE KULLANILAN HASAR İLİŞKİLERİ

Boru hatlarında oluşan zararlar ile farklı deprem parametreleri arasında coğrafi etkileşimi tespit edebilmek için değişik araştırmacılar tarafından hasar ilişkileri ve metodlar geliştirilmiştir. Bu ilişkiler temel olarak ampiriktir ve geçmiş depremlerden elde edilen veriler ışığında geliştirilmiştir. Son yıllarda gömülü boru sistemleri kuvvetli depremlerden önemli hasarlar almışlardır. Boru hasarları genellikle onarım oranları ile belirtilir. Boru onarım oranları bir bölgedeki boru onarım sayısının aynı bölgedeki boru hattı uzunluğuna bölünmesiyle elde edilir.

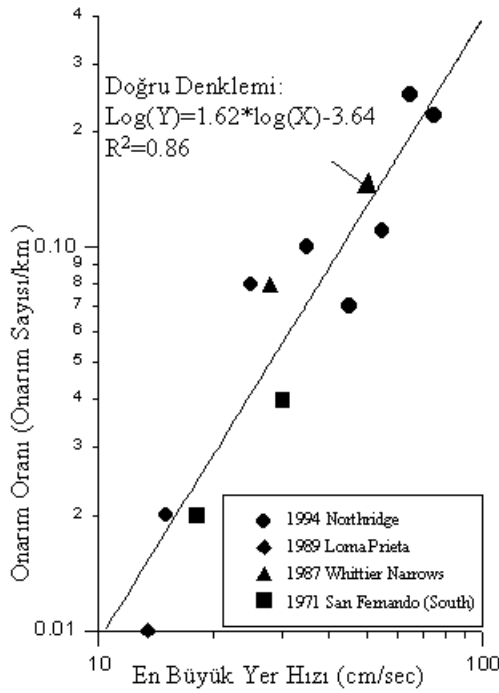
Geçmişte yapılan pek çok çalışma geçici yer deformasyonları etkisiyle meydana gelen boru hattı hasarları ile çeşitli sismik parametreler arasında ilişkilerin varlığını incelemiştir. Özellikle Northridge depreminden sonra elde edilen veriler boru hasarları ile sismik parametreler arasındaki ilişkilerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Örneğin Mercalli Şiddeti (MMI), pik yer hızı (PGV), pik yer ivmesi (PGA), pik yer deplasmanı, spektral ivme, spektral hız, şiddet spektrumu ve Arias şiddeti bu sismik parametrelerdendir.

Toprak, 1998 [8], O'Rourke vd, 1998 [18], O'Rourke ve Toprak, 1997 [19] bu veriler ışığında

araştırmalarına yön vermişlerdir ve ilk kez bu kadar kapsamlı veriyle su şebekelerinin deprem performansının CBS ile değerlendirilmesi yönünde çalışmalar ortaya koymuşlardır. Toprak, 1998 [8] kuvvetli yer hareketi verileri ile boru hasarları arasındaki ilişkileri incelerken en önemli istatistiksel ilişkiyi PGV için bulmuştur. PGV'nin gömülü borular üzerine olan etkileri için daha fazla doğrudan doğruya fiziksel açıklamalar mevcuttur.

Sismik dalga yayılmalarına bağlı olarak zemin içindeki boyuna gerilmeler PGV ile ilişkilendirilmiştir. Bu ilişki denklem 1'de verilmiştir [20].

$$\varepsilon_g = V_{\max} / C \quad (1)$$



Şekil 3. En büyük yer hızı (PGV) ile boru hattı hasar onarım oranı arasındaki ilişki [8, 11]

Burada ε_g maksimum sismik yer uzama oranı, V_{\max} maksimum yer hızı ve C ise sismik dalga yayılma hızıdır. Deprem dalgalarının geçişi esnasında boru hattını çevreleyen zemin ile boru hattı arasındaki ilişkiden yola çıkarak zemin gerilmelerinin önemli bir oranı boru hattına transfer olmaktadır. Bu ilişkiye dayanarak PGV ile boru hasarları arasında iyi bir korelasyon beklenmektedir.

Toprak, 1998 [8] tarafından geliştirilen boru hasar ilişkisi aşağıda verilmiştir.

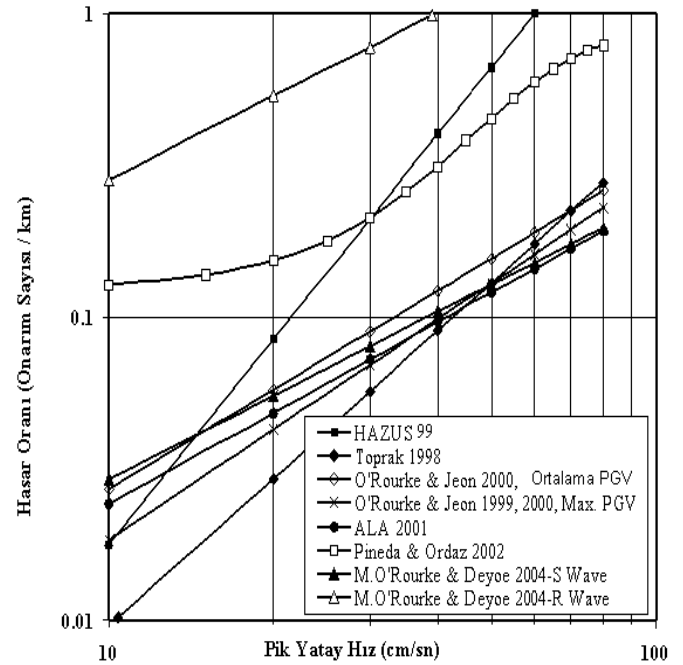
$$RR=10^{(1.62*\text{Log}(PGV)-3.64)} \quad (2)$$

Burada RR onarım oranı (onarım sayısı/km) ve PGV (cm/s) maksimum yer hızıdır. Bu ilişki; çoğunluğu 1994 Northridge depreminde olmak üzere, bazı geçmiş depremlerden elde edilen güvenilir veriler ışığında geliştirilmiştir. Bu verilerden hesaplanan

onarım oranları ile PGV arasında geliştirilen bu korelasyon Şekil 3'te verilmiştir.

Kullanılan eleme kriterinin sonucu olarak korelasyon 75 cm/sn yer hızına kadar geçerlidir. Bu ilişki temelde font borular için geliştirilmiştir. Toprak, 1998 [8] aynı zamanda boru çaplarıyla hasar oranları arasında bir ilişki gözlemlemiş ve bu ilişkiyi boruları dağıtım (boru çapı < 600 mm) ve iletim hatları (boru çapı \geq 600 mm) olarak iki gruba ayırarak analiz etmiştir. Şekil 3'teki ilişki 600 mm den küçük çaplı borular için geçerlidir.

Şekil 4'te bu bölümde sunulan ve çalışma kapsamında kullanılan hasar ilişkileri ve bu hasar ilişkilerinin birbirleriyle olan korelasyonu görülmektedir. Ayrıca Çizelge 1'de de bu hasar ilişkilerine ait formüller verilmiştir.



Şekil 4. Gömülü boru hattı sistemleri için hasar ilişkileri [21]

KYD etkisiyle gömülü boru hattı sistemlerinde meydana gelebilecek hasarların tahmininde iki yaygın hasar tahmin ilişkisinden bahsedilebilir: HAZUS 99 [3] ve ALA 2001 [4]. HAZUS 99 metodolojisinde, kalıcı yer hareketleri (KYD) sonucunda meydana gelen gömülü boru hattı hasarları yanal hareketler (deplasmanlar) ile karakterize edilmektedir. Denklem 3'te bu hasar ilişkisi verilmiştir.

$$RR = 0.594 (KYD)^{0.56} \quad (3)$$

Çizelge 1. Geçici yer deformasyonları için boru hasar ilişkileri [21]

Boru Hasar İlişkileri	PGV	Boru Cinsi	Boru Çapı	Hasar Oranı (Onarım Sayısı/km) Formülü
HAZUS,1999 [3]	Maksimum	Kırılgan Karışık	Karışık	$0.0001*(PGV)^{2.25}$
Toprak, 1998 [8]	Maksimum	Font(CI)	$D_p \leq 600$ mm	$10^{(1.62*\text{log}(PGV) - 3.64)}$
O'Rourke ve Jeon, 2000 [10]	Geometrik Ortalama	Font(CI)	$D_p \leq 600$ mm	$e^{(1.09*\text{ln}(PGV) - 6.12)}$
O'Rourke ve		Font(CI)	$D_p \leq 600$	$e^{(1.21*\text{ln}(PGV) - 6.78)}$

kuyuları servis alanının hem içinde hem de dışında bulunmaktadır. Su, kaynaklardan su depolarına iletilmekte, orada depolanmakta ve su dağıtım sistemine bu depolardan iletilmektedir. Bazı belediyeler aynı kaynaktan getirilen suyu paylaşmaktadırlar. Denizli su şebekesi birbirinden bağımsız 7 ana basınç bölgesinden oluşmaktadır. Bu basınç bölgeleri 28 alt bölgeye bölünmüştür. Şebekede birbirinden bağımsız basınç bölgeleri olması, muhtemel hasarların basınç bölgeleri içinde sınırlanmasını sağlayacaktır.

Denizli şehrinin su dağıtım sistemi projesinin paftalarının tamamı Denizli Belediyesi tarafından sağlanmıştır. Bunlar arasında 1993'de yapılan projenin paftaları ve daha eski paftalar bulunmaktadır. 1993 yılında yapılan paftalar tüm Denizli şehrinin su temini sisteminin bir bölümü olarak hazırlanmıştır. Daha eski tarihlere ait paftalar font boruları gösterir. Ayrıca 2005 yılına kadar Denizli Belediyesi Su İşleri Müdürlüğü tarafından yapılan boru döşemelerini ve yenilemelerini gösteren çok sayıda çizim ve belge de Denizli Belediyesi'nden temin edilmiştir. İlaveten diğer pek çok belediyeden de su şebekelerini gösteren harita ve sayısal veriler toplanmıştır. Tüm bu veriler Denizli şehri su dağıtım sisteminin sayısal haritalarının ve veri tabanının hazırlanmasında kullanılmıştır. Veri giriş ve analiz safhalarında ESRI tarafından üretilen ArcGIS ve ArcView CBS programları kullanılmıştır. Denizli su iletim ve dağıtım şebekesi ve oluşturulan CBS veri tabanı ayrıntılıyla Toprak, vd. 2005 [24], Toprak vd. 2004 [25], ve Toprak, 2004'te [11] anlatılmıştır. Burada yalnızca ana özelliklerine değinilecektir. Şekil 5 Denizli şehri su şebekesini ve şebekeye ait ana hatlar, iletim ve bağlantı hatları ile su depolarını göstermektedir.

4.2 Su şebekesinde boru hasar tahmin analizleri

Bu çalışmada Denizli su şebekesinin performansını değerlendirmek için Pamukkale ve Karakova-Akhan fayları üzerinde oluşabilecek M_w 6.5 senaryo depremleri kullanılmıştır. Daha önce anlatılan CBS veri tabanı kullanılarak ve azalım ilişkilerinden yararlanılarak [26, 27] inceleme alanındaki en büyük yatay yer hızları (PGV) ve ivmeleri (PGA)

Burada; RR, hasar oranını (onarım/km) yani her bir km boruda meydana gelebilecek hasar sayısını, KYD (cm), kalıcı yer deformasyonunu (yanal deplasman) ifade etmektedir. Geliştirilen bu hasar ilişkisi kırılğan boru hattı hasar oranlarının tahmininde geçerlidir, ancak HAZUS'da belirtildiği üzere düktül boru hattı hasar oranları kırılğan için olanların üçte biri olarak kullanılmaktadır. ALA 2001'de önerilen hasar ilişkisi ise Denklem 4'te verilmiştir.

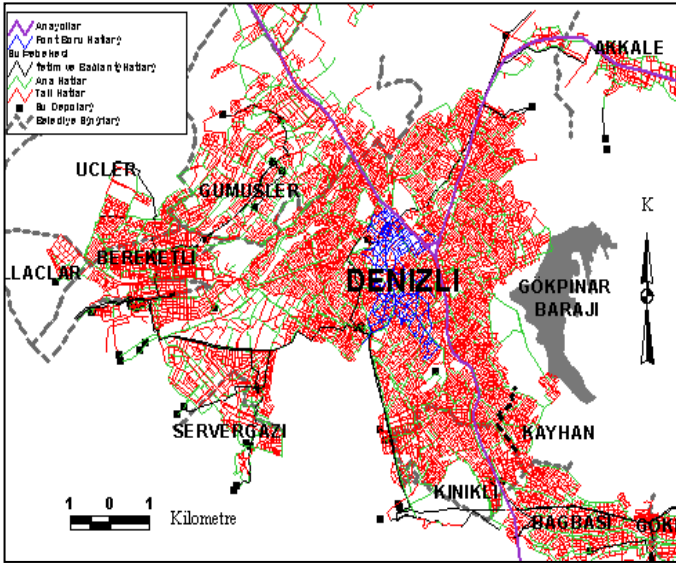
$$RR = K_2 * 2.582 * KYD^{0.319} \quad (4)$$

Burada; KYD (cm), kalıcı yer deformasyonunu (yanal deplasman) ve K_2 ise farklı boru türlerine ait katsayıları ifade etmektedir. Geliştirilen bu hasar ilişkisi kırılğan boru hattı hasar oranlarının tahmininde kullanılmaktadır. Burada belirleyici faktör K_2 katsayısıdır. Düktül boru sınıfına giren çelik ve PVC borular için K_2 , 0.15 ve 0.8; kırılğan boru sınıfına giren font ve AÇB borular için K_2 , 1 değerini almaktadır

4 DENİZLİ ŞEHİRİ SU ŞEBEKESİNİN GEÇİCİ VE KALICI YER HAREKETLERİ ETKİSİ ALTINDA PERFORMANSI

4.1 Denizli şehri su iletim ve dağıtım şebekesi

Denizli'de su şebekesi 1953 yılında servise başlamış ve nüfusunun 1960 yıllarında 48.925'ten 2000 yıllarında 275.480'e ulaşmasına bağlı olarak büyümüştür. Uygun topoğrafyaya bağlı olarak birkaç yüksek bölge dışında şebeke cazibeden istifade etmektedir. Denizli şehrine su 5 farklı kaynaktan sağlanmaktadır. Bunlar; Derindere kaynağı (250 litre/sn), Gökpınar kaynağı (700 litre/sn), Kozlupınar kaynağı (70 litre/sn), Benlipınar kaynağı (20 litre/sn) ve bir çok su kuyularıdır (400 litre/sn). Yüksek kapasiteli kaynaklar servis alanının dışında yer almaktadır, ancak su



Şekil 5. Denizli su şebekesi CBS veri tabanı

hesaplanmıştır. Daha sonra CBS yardımıyla, örneğin geçici yer deformasyonları etkisiyle oluşabilecek hasarları tespit için PGV eğrileri ve bu eğrilerle sınırlı PGV zonları çizilmiştir. Her zonun orta noktasındaki ortalama PGV değeri o zonun temsil etmesi üzere hasar ilişkilerinde kullanılmıştır. Şekil 6 Pamukkale fayı üzerinde M_w 6.5 depremi sonucu oluşabilecek PGV zonlarının Denizli su dağıtım şebekesiyle üst üste çakıştırılmış halini göstermektedir. Boru sistemi hasar tahminleri için; Denizli şebekesi boruları CBS analizleriyle kırılabilir ve duktal olarak sınıflandırılıp, her PGV zonu için boru türlerine göre boru uzunluk ve çapları CBS analizleriyle belirlenmiştir. Sonrasında her PGV zonu için boru hasar oranları; önceki bölümde bahsedilen değişik araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olan boru hasar ilişkileri kullanılarak hesaplanmıştır. Hasar ilişkisinin belirli bir boru cinsi için verilmediği durumlarda aynı hız bölgesindeki duktal boruların onarım oranının, kırılabilir boruların onarım oranının %30'u kadar olduğu kabul edilmiştir [3]. Daha sonra her PGV zonu için hesaplanan onarım oranlarıyla her zon içerisinde kalan toplam boru uzunluğu çarpılmak suretiyle her PGV zonu için hasar sayıları elde edilmiştir.

Bu çalışmada KYD etkisi incelenirken sınırlama etkisiyle oluşabilecek yanal yer hareketleri gözönüne alınmıştır. İnceleme alanının sınırlama duyarlılığının belirlenmesinde Youd vd, 2001'in [28] önerdiği arazide elde edilen SPT darbe sayılarının kullanıldığı yöntem kullanılmıştır. Sınırlama analizi yapılırken; Denizli il merkezinde Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü tarafından hazırlanan "Denizli Belediyesi Yerleşim Alanlarının Jeolojik, Jeoteknik ve Hidrojeolojik Özellikleri" adlı proje [29] çalışmasında incelenen 144 adet sondaj kuyusu (SK) ve 100 adet gözlem çukurundan (GÇ) alınan örselenmemiş toprak numuneleri üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik laboratuvar deneyleri ve arazide gerçekleştirilen SPT deney sonuçları değerlendirilmiştir.

Değerlendirilen temel sondajları ve gözlem çukurlarının büyük bir kısmı Kuvaterner alüvyon ve Neojen yaşlı çakıltı, kumtaşı, siltaşı, kiltası birimlerinde açılmıştır. Sondajların derinlikleri 5-15 m, gözlem çukurlarının derinlikleri ise 1-5 m arasındadır [29]. Denizli Belediyesi yerleşim alanındaki sondajların bir kısmı burğu ile açıldığından bu kuyulardan (SK 33-49, SK 117-144) numune alınamamıştır. İncelenen 144 adet sondaj kuyusundan 56 tanesi Denizli Belediyesi yerleşim alanlarının sınırlama analizinde kullanılmıştır.

Ayrıca; Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü tarafından hazırlanan Gümüşler Belediyesi (Denizli) Yerleşim Alanlarının Jeolojik ve Jeoteknik Özelliklerinin İncelenmesi" adlı proje [30] çalışmasında incelenen 26 adet sondaj kuyusu (SK) ve 27 adet gözlem çukurundan (GÇ) alınan örselenmemiş toprak numuneleri üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik laboratuvar deneyleri ve arazide gerçekleştirilen SPT deney sonuçları değerlendirilmiştir. Sondajların derinlikleri 8.5-11 m arasında değişmektedir. İncelenen 26 adet sondaj kuyusunun 21 adetinde SPT deneyi yapılabilmemiş ve Gümüşler Belediyesi yerleşim alanlarının sınırlama analizinde bu sondaj kuyularından yararlanılmıştır. Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü tarafından hazırlanan Bağbaşı Belediyesi (Denizli) Yerleşim Alanlarının Jeolojik ve Jeoteknik Özelliklerinin İncelenmesi" adlı proje [31] raporundan ve Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinin tecrübelerinden de yararlanılmıştır. Ancak Bağbaşı, Gökpınar, Akkale,



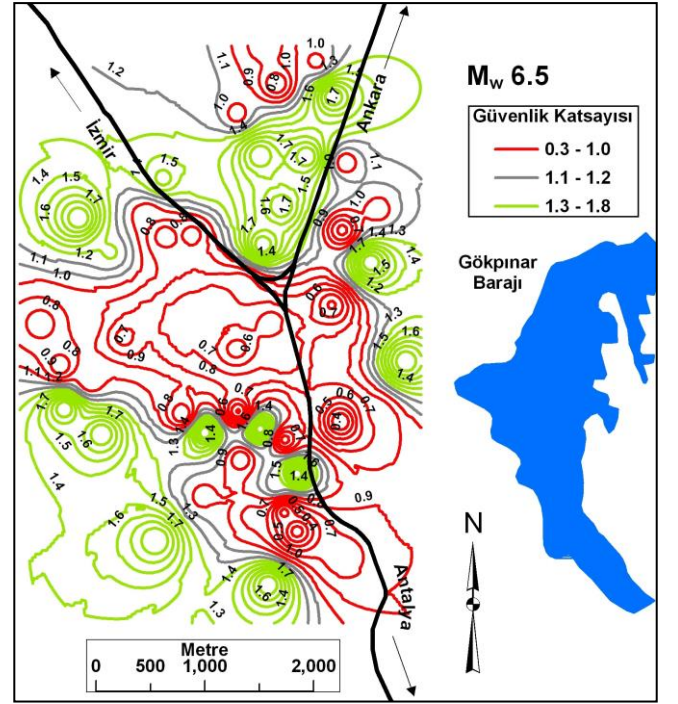
Şekil 6. Pamukkale fayı kaynaklı M_w 6.5 senaryo Depremi için PGV zonlarıyla Denizli su dağıtım şebekesinin üst üste çakıştırılması

Servergazi, Bereketli, Üçler ve Hallaçlar belediyeleri sınırları içinde kalan bölgelerde geoteknik etüt yapılmadığı için elimizde yeterli geoteknik veri bulunmamaktadır. Ancak jeolojik bilgiler ışığında şu

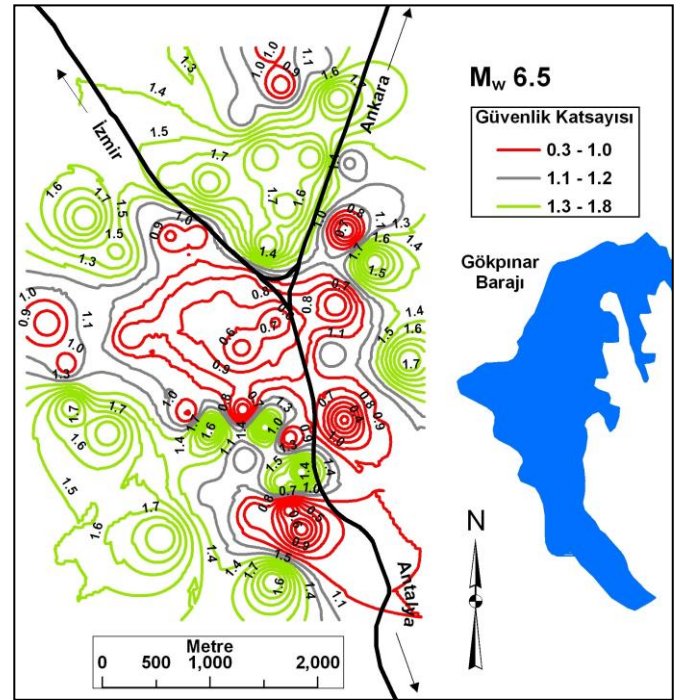
sonuçlara ulaşılabilmektedir. Bağbaşı ve Gökpınar Belediyeleri sınırları içinde kalan alanların kuzey kısımlarında (bu bölgede yerleşim yoğunluğu çok azdır) yeraltı su seviyesi yüzeye yakın olmakla birlikte, güney kısımlarda yeraltı su seviyesi çok düşüktür, zemin yapısı kaba-iri taneli ve çakıl blok yoğunluktur ve genel olarak sıvılaşma beklenmemektedir. Akkale, Servergazi, Bereketli, Üçler ve Hallaçlar da yeraltı su seviyesi çok düşük olduğu için (Y.S.S. >15 m) ve zemin yapısı iri taneli ve çakıl blok yoğunluğu olduğu için bu bölgelerde de sıvılaşma beklenmemektedir. Akkale belediyesi sınırları içinde kalan alanların kuzeyinde (Ankara yolunun kuzeyinde) yeraltı su seviyesi bazı bölgelerde yüzeye yakındır, güney kısımlarında ise yeraltı su seviyesi çok düşüktür ve sıvılaşma beklenmemektedir.

Bu çalışma kapsamında inceleme alanının sıvılaşma duyarlılığının belirlenmesinde toplam 77 adet sondaj kuyusundan alınan SPT deneyi sonuçları kullanılmıştır. Deprem esnasında oluşan en büyük yatay yer ivmesi (PGA) sıvılaşma analizinde kullanılan en önemli parametrelerden biridir. HAZUS 1999'da yapılan öneriye uygun olarak bu tez çalışmasında 77 adet sondaj kuyusu için önce Campbell ve Bozorgnia, 2003 [27] azalım ilişkisi kullanılarak yumuşak kaya zeminlere karşılık gelen ivme (PGA) değerleri elde edilmiştir. Daha sonra inceleme alanın jeolojik yapısı ve zemin türü dikkate alınarak; sondaj kuyularında beklenen değerler için HAZUS 99'daki ivme büyütme faktörleri dikkate alınarak yeni ivmeler elde edilmiş ve sıvılaşma analizlerinde kullanılmıştır. Her sondajın değişik derinliklerdeki SPT değerleri ile tane boyu dağılımları ayrı ayrı incelenmiştir. Sıvılaşma analizinde kullanılan her sondajın ince tane oranları ve tane boyu dağılımları sondajlara ait elek analizi grafiklerinden belirlenmiştir. İncelenen sondajların değişik seviyelerdeki ince tane oranları belirlendikten sonra SPT darbe sayılarının olduğu her seviyede sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (FS) hesaplanmıştır. Her sondaj boyunca bulunan sıvılaşmaya karşı en küçük olan güvenlik katsayısı (FS) o sondajı temsil eden sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı olarak değerlendirilmiştir. İnceleme alanının Gümüşler Belediyesi sınırları içinde yapılan sondajlardan elde edilen veriler ışığında bu bölgede mevcut yeraltı su seviyesinin 20 m den fazla olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle Gümüşler Belediyesi sınırları içinde kalan bölgeye ait sıvılaşma analizi yapılırken iki farklı durum göz önüne alınmıştır. İlk durumda PAÜ, 2003'de [30] kullanılan durumlardan biri olarak yeraltı su derinliği yüzeyden itibaren 1.5 m derinlikte kabul edilmiştir (Durum-I). İkinci durumda ise su seviyesinin çok derinde olduğu ve bu yüzden sıvılaşma oluşmadığı düşünülmüştür (Durum-II). Yapılan sıvılaşma analizi sonucu her bir sondaj kuyusu için elde edilen sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayılarından yararlanılarak, ArcGIS programı kullanılarak inceleme alanı için eş sıvılaşma eğrileri

çizilmiştir. Şekil 7'de, Pamukkale Fayı ve Karakova-Akhan Fayı kaynaklı $M_w6.5$ senaryo depremleri için elde edilen sıvılaşma konturları gösterilmiştir. Sıvılaşma konturları elde edildikten



a) Pamukkale Fayı



b) Karakova-Akhan Fayı Fa-

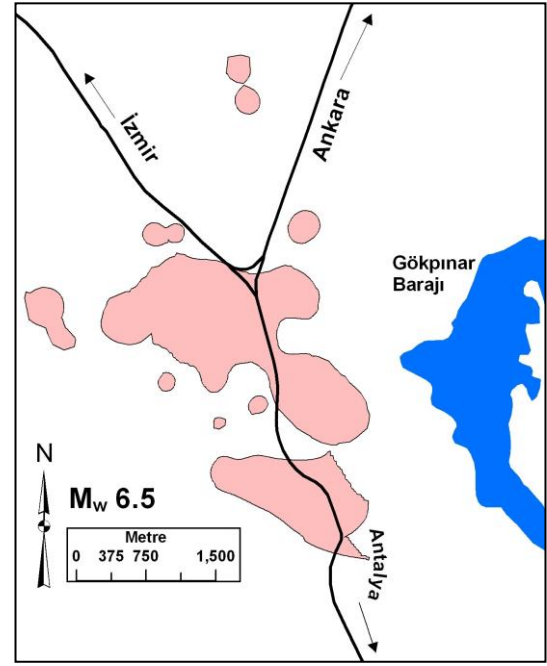
Şekil 7. $M_w6.5$ senaryo depremi için inceleme alanının sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı değişim haritası [32]

sonra inceleme alanında sıvılaşma riski olan ($FS \leq 1$) bölgeler belirlenmiş ve ArcGIS programı yardımıyla bu bölgeler kapalı alanlar haline getirilmiştir. Şekil 8, Pamukkale Fayı ve Karakova-Akhan Fayı kaynaklı $M_w6.5$ senaryo depremleri için elde edilen sıvılaşma bölgelerini göstermektedir. Denizli şehri yerleşim alanlarının sıvılaşma riskinin belirlenmesi için

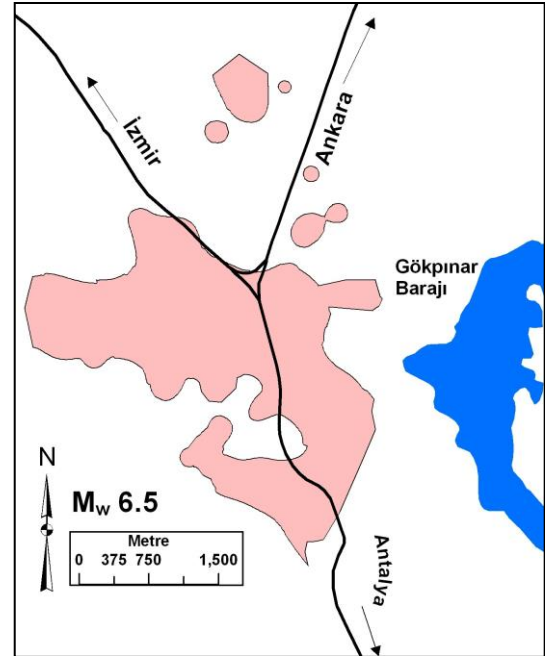
geçmiş yıllarda da çeşitli çalışmalar yapılmıştır [29]. Ancak PAÜ, 2002 [23] sıvılaşma haritası bu çalışmada doğrudan kullanılamamıştır. Çünkü PAÜ, 2002'de sıvılaşma haritaları oluşturulurken yalnız $M_w6.3$ senaryo depremi ve Denizli Belediyesi yerleşim alanları göz önüne alınmıştır. Bu çalışma kapsamında ise $M_w6.5$ büyüklüğündeki deprem değerlendirilmiş ve Denizli Belediyesi ile komşu belediyelerin yerleşim alanları göz önüne alınmıştır. Ayrıca sıvılaşma analizinde kullanılmak üzere gerekli olan parametreleri hesaplarken farklı azalım ilişkilerinden yararlanılmıştır. Ancak kıyaslama yapıldığında Denizli Belediyesi yerleşim alanları için PAÜ, 2002'de ve bu projede ($M_w6.3$ için) elde edilen sıvılaşma haritalarında kuzeyde bir bölge hariç genel olarak bir uyum görülmektedir.

İnceleme alanındaki sıvılaşabilir zeminlerde meydana gelebilecek yanıl yer değiştirmelerin belirlenmesinde Youd vd, 2002'nin [33] önerdiği yöntem kullanılmıştır. Yanıl yer değiştirmeler elde edilirken; metodun uygulanacağı inceleme alanının sıvılaşma potansiyeli, arazi eğimi (%), zeminin ince tane oranı (%), dane çapı (mm), inceleme alanının faylara olan mesafeleri (yatay mesafe) ve depremin büyüklüğü (M_w) önemli rol oynamaktadır. İlk olarak Bartlett ve Youd'un [34] geliştirdikleri bu model (MLR), hafif eğimli zemin şartları ve serbest yüzey şartları için ayrı deplasman hesabını gerektirmektedir. Bu çalışmada inceleme alanının jeolojik yapısı ve arazi eğimi dikkate alınarak hafif eğimli zemin şartları için önerilen model, yanıl deplasman hesabında kullanılmıştır. Ayrıca Youd vd, 2002'de [33] belirtildiği üzere, sıvılaşma gözlenmeyen sondaj kuyuları için yanıl hareketin oluşmayacağı kabul edilmiştir. Sondaj civarındaki yüzey eğimi Denizli ve çevresini gösteren 1/25000'lik topoğrafya haritasından sayısallaştırılmış eş yükselti eğrileri kullanılarak [35] hesaplanmıştır. Yapılan deplasman analizi sonucu toplam 47 sondaj kuyusunda yanıl yer değiştirme hesaplanmıştır. Her bir sondaj kuyusu için elde edilen yer değiştirme değerlerinden yararlanılarak, ArcGIS programı kullanılarak inceleme alanında $M_w6.5$ senaryo depremi için yatay deplasman konturları çizilmiştir. Deplasman konturları elde edildikten sonra ArcGIS programı yardımıyla deplasman konturlarıyla sınırlı kapalı alanlar (deplasman poligonları) oluşturulmuştur. Şekil 9 elde edilen yanıl deplasman haritalarını göstermektedir. Bu deplasmanlar etkisiyle Denizli su şebekesini oluşturan gömülü boru hattı sistemlerinde meydana gelebilecek hasarların tahmininde HAZUS 99 [3] ve ALA 2001 hasar ilişkileri kullanılmıştır.

Çizelge 2, GYD ve KYD etkisiyle Denizli su şebekesi borularında $M_w6.5$ depremi sonucunda oluşması beklenen hasar sayılarını değişik boru hasar ilişkilerine göre göstermektedir. Bu hasarlar sonucunda



a) Pamukkale Fayı

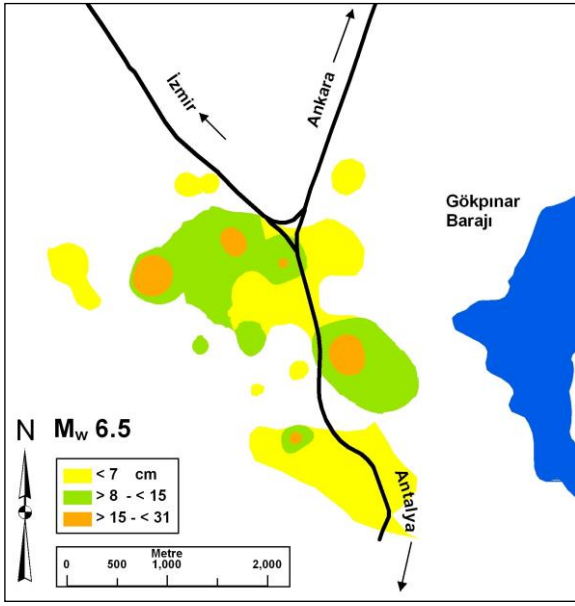


a) Karakova-Akhan Fayı Fa-

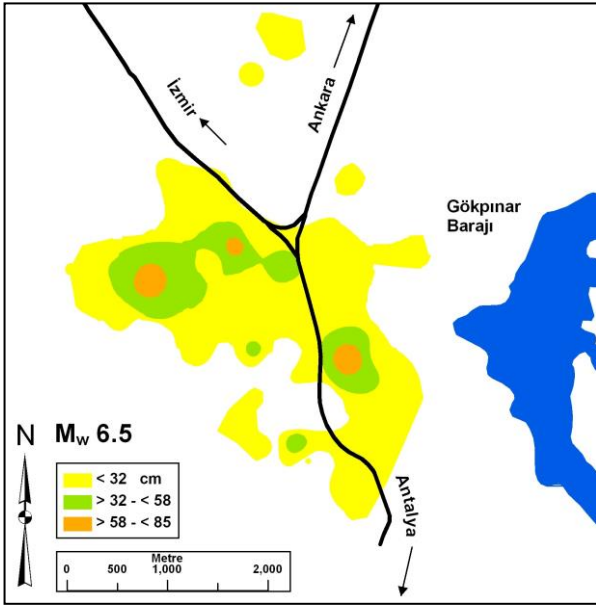
Şekil 9. $M_w6.5$ senaryo depremi için Denizli'nin sıvılaşabilir alanlar haritası

Denizli su iletim ve dağıtım sisteminin performansını belirlemek için HAZUS metodolojisinde belirtilen sistem performans ilişkilerinden AWSS (ortalama) ilişkisi kullanılmıştır. Çizelge 2 tahmin edilen performans değerlerini sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; her iki durum içinde Karakova-Akhan fayı kaynaklı hasarların Pamukkale fayı kaynaklı hasarlardan daha fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuca bakılarak Denizli şehrinde, inceleme alanına Pamukkale fayından daha yakın bir kaynağın yaratabileceği hasarın çok daha büyük olacağı öngörülmektedir. Diğer önemli bir sonuçta en iyi durumda dahi su şebekesinin performansının deprem sonrasında üçte bir seviyelerine ineceğinin tahmin

edilmesidir. Gerçekte $M_w 6.5$ büyüklüğünde bir deprem sonrası su şebekesinin performansının tamamıyla durma ile şu andaki performansının %30'ları arasında olması beklenmektedir.



a) Pamukkale Fayı



a) Karakova-Akhan Fayı Fa-

Şekil 9. $M_w 6.5$ senaryo depreminde sıvılaşma sonrası zeminde oluşabilecek yanıl yer değıştirmeler [32]

5 SONUÇLAR

Bu çalışmada depremin gömülü boru hatları üzerine etkileri ve borularda meydana gelen deprem zararlarının sebepleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca pek çok alanda günümüzün önemli ve gerekli araçlarından biri haline gelmiş olan coğrafi bilgi sistemlerinin (CBS) geniş alana yayılmış olan alt yapı sistemlerinin deprem performansını değerlendirmede kullanılışı gösterilmiştir. Denizli örneği ile geçmiş depremlerden kazanılan tecrübelerin bir bölgede gelecekte

olabilecek depremlerin alt yapı sistemlerinde oluşturabileceği hasarların belirlenmesi amacıyla nasıl kullanılabilceği gösterilmiştir.

Çizelge 2. Denizli su şebekesi borularında $M_w 6.5$ depremi sonucunda oluşması beklenen hasar sayısı ve sistemin servis performansı

		GYD Yöntemleri		Onarım Oranı	
I. DURUM	Pamukkale	Toprak (1998)	916 + 82	327+ 82	4 26
		O'Rourke ve Jeon (1999, 2000)-Çap Ölçekli PGV	916 + 181	327+ 181	4 26
		ALA (2001)	916 + 89	327+ 89	4 26
	Karakova-Akhan	M.O'Rourke ve Deyoe S-Dalgası			
		M.O'Rourke ve Deyoe S-Dalgası			
II. DURUM	Pamukkale				
		M.O'Rourke ve Deyoe S-Dalgası			
	Karakova-Akhan				
M.O'Rourke ve Deyoe S-Dalgası					

Alt yapı sistemlerinin önemli bir parçası olan gömülü boru sistemlerinin deprem sonrasında da işlevselliğini sürdürmesi yada çok kısa zamanda işlevselliğini kazanması önemlidir. Bunun başarılabilmesi ancak bu sistemlerin deprem öncesinde deprem güvenliği açısından değerlendirilmesi ve gerek görüldüğünde sistemde iyileştirmeler yapılmasıyla mümkündür. İyileştirmenin yeterli görülmediği durumlarda alternatif sistemlerin oluşturulması da düşünülmelidir. Yine geçmiş depremlerden alınan önemli bir derste deprem güvenliği çalışmalarının öngörülerine göre belli miktarda boru ve eklerinin depolanmasıdır.

Deprem güvenliği değerlendirmeleri için izlenebilecek yöntemler geçmiş depremlerden kazanılan tecrübelerle önemli bir noktaya gelmiştir. Bu yöntemlerin geliştirilmesi konusunda daha ileriye gidilmesi için yapılacaklar deprem öncesi ve sonrası olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Deprem öncesinde, daha önce böyle bir çalışma yapılmamış yerleşim bölgelerinde mevcut alt yapı sistemlerinin özelliklerinin belirlenmesi ve veri tabanları oluşturulması gerekmektedir. Bu veri tabanları yalnızca alt yapı sistemlerinin değil, alt yapı sistemlerinin içinde bulunduğu çevreyi de (örneğin, jeolojik ortamı, geoteknik bilgileri) mümkün olduğunca kapsmalıdır. Deprem öncesi oluşturulabilecek bu tür veri tabanlarının deprem

güvenliği çalışmalarında kullanılması yanında deprem sonrası çalışmalara da önemli katkıları olacaktır. Deprem sonrası çalışmalar ise öncelikle hasar verilerinin ve ilgili bilgilerin (örneğin, sismik veriler) sağlıklı ve hızlı bir şekilde toplanmasını kapsamaktadır. Deprem sonrası, alt yapı sistemlerini bir an önce işlevsel hale getirme gayretleri ve diğer problemler etkisiyle veri toplanması geri plana kalmaktadır. Bu sorunlar veri toplama ve hazırlıkları planının deprem olmadan önce yapılmasıyla aşılabılır gözükmektedir. Gerek deprem öncesi gerek deprem sonrası veri tabanları oluşturulmasında ve deprem güvenliği değerlendirmelerinde coğrafi bilgi sistemleri (CBS) önemli ve gerekli bir araç haline gelmiştir.

6 TEŞEKKÜR

Buradaki çalışmaların bir kısmı TÜBİTAK Proje No.106M252, bir kısmı da Pamukkale Üniversitesi BAP No.2003MHF006 ile desteklenmektedir. Çalışmaların gerçekleştirilmesinde katkı ve yardımları için Denizli'deki belediyelere ve Su İşleri Müdürlüğü çalışanlarına, özellikle de Denizli Belediyesi Su İşlerinden Orhan Kaygın (eski Su İşleri Müdürü), Şule Vardar (Müdür), Sibel Çukurluoğlu ve Yusuf Örnek'e teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca Afet İşleri Denizli Şubesi'nden Mehmet Genç'e sağladığı Denizli altlığı, PAÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine Denizli jeolojisi ve tektoniği üzerine bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaştığı, özellikle Prof. Halil Kumsar'a tecrübelerinin yanında bizimle paylaştığı CBS verileri için teşekkür ederiz.

7 KAYNAKLAR

[1] O'Rourke, T. D. 1998. An overview of geotechnical and lifeline earthquake engineering. In Geotechnical Special Publication. ASCE. Pakoulis, P., Yegian, M., Holtz, D. (eds.), No: 75, Reston, VA, II, S. 1392-1426.

[2] Toprak, S. & Yoshizaki, K. 2003. Boru hatlarına deprem yüklerinin etkisi. 5. Ulusal deprem mühendisliği kongresi. İstanbul. No:025. CDROM.

[3] Federal Emergency Management Agency (FEMA). 1999. Earthquake loss estimation methodology, HAZUS 99: technical manual. Prepared by the National Institute of Building Sciences.

[4] American Lifelines Alliance (ALA). 2001. Seismic fragility formulations for water systems, Part I - Guideline. www.americanlifelinesalliance.org

[5] Editorial committee for the report on the Hanshin-Awaji earthquake disaster. 1997. *Report on the Hanshin-Awaji earthquake disaster*, Vol. 9.

[6] Oka, S. 1996. Damage of gas facilities by great Hanshin earthquake and restoration proceedings. 6th Japan-US workshop on earthquake resistant design of lifeline and countermeasures against soil liquefaction, MCEER 96-0012, Buffalo, NY., s. 111-124.

[7] Matsushita, M. 1995. Damage to Kobe water system by the Hanshin Awaji great earthquake and restoration plan, Technical memorandum of PWRI, No: 3415, s. 109-127.

[8] Toprak, S. 1998. Earthquake effects on buried lifeline systems. *PhD Thesis, Cornell University, Ithaca, NY.*

[9] O'Rourke, T. D. & Jeon, S. S. 1999. Factors affecting the earthquake damage of water distribution systems, Optimizing post-earthquake lifeline system reliability, *Proceedings fifth US conference on lifeline earthquake engineering*. Elliott, W. M. & McDonough, P. (Eds.), Seattle, WA, ASCE. s. 379-388.

[10] O'Rourke, T. D. & Jeon, S. S. 2000. Seismic zonation for lifelines and utilities, *Invited keynote paper on lifelines, Proceedings sixth international conference on seismic zonation*, Palm Springs, CA, EERI. CD ROM.

[11] Toprak, S. 2004. Gömülü boru sistemlerinde deprem zararlarının tahmini, *Altıncı uluslararası inşaat mühendisliğinde gelişmeler kongresi*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, s. 823-832.

[12] Sato, R. & Myurata, M. 1990. *GIS-based interactive and graphic computer system to evaluate seismic risks on water delivery networks*, Dept. of civil engineering and operations research, Princeton University.

[13] Wang, L. 1990. A new look into the performance of water pipeline systems from 1987 Whittier Narrows, California earthquake, Department of civil engineering. Old Dominion University.

[14] Eidinger, J. 1998. Lifelines, water distribution systems in the Loma Prieta, California, earthquake of October 17, 1989, performance of the built environment-lifelines. *US Geological Survey Professional Paper 1552-A*. Schiff, A. (Ed.) s. 63-80.

[15] Isenberg, J. 1978. Seismic performance of underground water pipelines in the Southeast San Fernando Valley in the San Fernando earthquake, *Grant Report No. 8, Weidlinger Associates*, New York.

[16] Isenberg, J. 1979. Role of corrosion in water pipeline performance in three US earthquakes, *Proceedings, 2nd US national conference on earthquake engineering*, Stanford, California.

[17] Isenberg, J. & Taylor, C. E. 1984. Performance of water and sewer lifelines in the May 2, 1983, Coalinga, California earthquake, *Lifeline earthquake engineering design and construction*, ASCE, New York.

[18] O'Rourke, T. D., Toprak, S., Sano, Y. 1998. Factors affecting water supply damage cause by the Northridge earthquake, *Proceedings, Sixth US national conference on earthquake engineering*, Seattle, WA, s. 1-12.

[19] O'Rourke, T. D. & Toprak, S. 1997. GIS assessment of water supply damage from the Northridge earthquake, Frost, J. D. (Ed.) Geotechnical Special Publication, ASCE, New York, s. 117-131.

[20] Committee on gas and liquid fuel lifelines. 1984. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems, ASCE, New York.

[21] Toprak, S. & Taşkın, F. 2006. Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking. *Natural Hazards*. Springer. The Netherlands, (DOI 10.1007/s11069-006-0002-1).

[22] Pineda, O. & Ordaz, M. 2003. Seismic vulnerability function for high-diameter buried pipelines: Mexico City's primary water system case, *ASCE international conference on pipeline engineering and construction*, s. 1145-1154.

[23] O'Rourke, M. & Deyoe, E. 2004. Seismic damage to segmented buried pipe. *Earthquake Spectra*. 20:1167-1183.

[24] Toprak, S., Taşkın, F., Koç, A. C., Vardar, Ş. 2005. Alt yapı sistemlerinin deprem performansının coğrafi bilgi sistemleri ile değerlendirilmesi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli. s. 1042-1049.

[25] Toprak, S., Koç, A. C. Taşkın, F. 2004. Seismic vulnerability assessment of Denizli city, Turkey water supply system, *13th World conference on earthquake engineering*, Vancouver, B. C. Canada, Paper No: 812.

- [26] Campbell, K. W. 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismological Research Letters*, 68 (1): 154-179.
- [27] Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y. 2003. Updated near source ground-motion (Attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the seismological society of America*, 93(1): 314-331.
- [28] Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Liam Finn, W. D., Harder, L. F. Jr., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S.C., Marcuson, W. F. III, Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., Stokoe, K. H. II. 2001. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127, Issue 10, 817-833.
- [29] PAÜ. 2002. Denizli Belediyesi (Denizli) yerleşim alanlarının jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin incelenmesi raporu, PAÜ, Denizli, 763 s.
- [30] PAÜ. 2003. Gümüşler Belediyesi (Denizli) yerleşim alanlarının jeolojik ve jeoteknik incelenmesi raporu, PAÜ, Denizli, 247 s.
- [31] PAÜ. 2001. Bağbaşı Belediyesi (Denizli) yerleşim alanlarının jeolojik ve jeoteknik incelenmesi raporu, PAÜ, Denizli, 57 s.
- [32] Toprak, S., Koç, A. C., Taşkın, F. 2007. Evaluation of water distribution pipeline performance against earthquakes. 4th International conference on earthquake geotechnical engineering, June 25-28, 2007, Paper No: 1748 (Submitted).
- [33] Youd, T. L., Hansen, C. M., Bartlett, S. F. 2002. Revised Multilinear Regression equations for prediction of lateral spread displacement, ASCE, *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 128: 1007-1017.
- [34] Bartlett, S. F. & Youd, T. L. 1995. empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread. *Geotechnical engineering*. ASCE. 121, 4: 316-329.
- [35] Kumsar, H., Çelik, S., Kaya, M. 2004. Denizli il merkezi yerleşim alanlarının jeolojik, jeoteknik kent bilgi sistemi (JEO-KBS), *Bilgi teknolojileri kongresi*, Denizli, s. 25-31.