

2011 Christchurch, Yeni Zelanda Depreminde Oluşan Boru Hasarları ve Modellerle Karşılaştırılması*

Prof. Dr. Selçuk TOPRAK (Gebze Teknik Üni), Dr. Öğr. Üye. Engin NACAROĞLU (Pamukkale Üni.), Öğr. Gör. Muhammet CEYLAN (Gelişim Üni.), İnş. Yük. Müh. Gizem DÜNDAR

Özet

22 Şubat 2011 Christchurch depremi, 2010 yılında Yeni Zelanda'da başlayan Canterbury Deprem Dizisi (CES) adı verilen deprem serisinin en büyük depremlerinden biri olmuş ve bu deprem Christchurch şehri genelinde gerçekleşen sivilaşma nedeniyle meydana gelen hasarlarıyla öne çıkmıştır. Deprem dizisi sonucu oluşan doğrudan ve dolaylı kaybın Yeni Zelanda'nın gayri safi milli hasılasının yüzde yirmilerine karşılık gelmesi oluşan hasarların boyutunu daha açık ortaya koymaktadır. Bu depremde alt yapı sistemlerinde de ciddi hasarlar olmuş ve yaklaşık 1730 km ana boru hatlarından oluşan su şebekesinde 1500 civarı boru hasarı meydana gelmiştir. Deprem sonrasında toplanan veriler detaylı analizleri mümkün kılmış ve yeni hasar ilişkilerinin geliştirilmesine ve var olanların da güncellenmesine imkân vermiştir (Toprak ve diğ., 2019 ve O'Rourke ve diğ., 2014). Christchurch şehrinde sivilaşmanın yaklaşık 90 km² gibi geniş bir alanı kaplaması sonucu geçici yer hareketleri sonucu oluşan hasarlar kalıcı yer deformasyonları sonucu oluşan hasarlardan az olmuştur. Bu sebeple bu bildirinin konusu olan araştırmalarda kalıcı yer hareketleri sonucu oluşan hasarlar öne çıkmıştır. Uzaktan algılama yöntemleriyle yaklaşık bir boru uzunluğuna karşılık gelen mesafe aralıklarıyla (4-5 m) tespit edilen depreme bağlı yatay ve düşey yer değiştirmeler, gerek yatay ve düşey yönde ayrı ayrı gerekse her iki yönde birlikte değerlendirilen yer değiştirmelere boruların verdiği tepkilerin belirlenmesini sağlamıştır. Bir depremde yer hareketlerinin bu sıklıkla tespiti ve deprem sonucu oluşan boru hasarlarının analizinde kullanılması daha önce hiç mümkün olmamıştı. Boruların tepkileri göz önüne alınırken yatay yönde meydana gelen yer değiştirmeler birim şekil değiştirmeler (uzama oranları), düşey yöndeki yer hareketleri ise dönmeler olarak değerlendirilmektedir. Fiziksel olarak boru zemin etkileşimini tarif eden bu parametreler (birim şekil değiştirme ve dönmeler) kullanılarak geliştirilen boru hasar ilişkileri gelecek depremler için çalıştırılacak deprem senaryoları ve hasar tahminleri için özel önem arz etmektedir. Bununla birlikte, bu parametreler fiziksel olarak

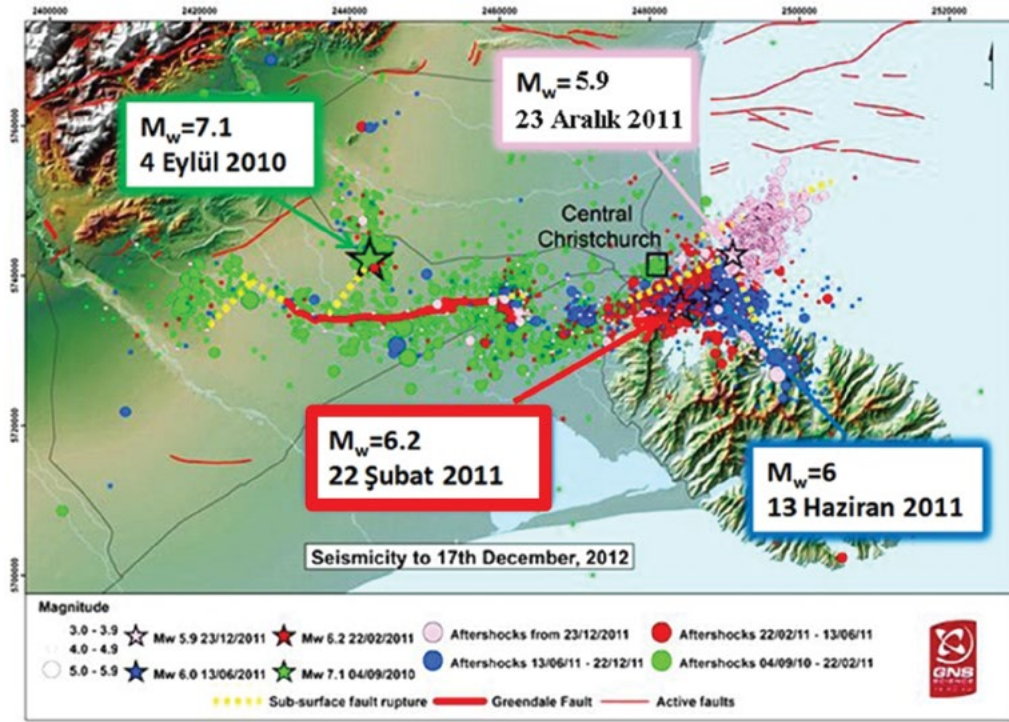
bir gerçekliğe işaret etmelerine rağmen gelecek deprem senaryoları kullanılarak elde edilmesi bazı durumlarda zor olabilmektedir. Böyle durumlar için özellikle bölgesel sivilaşma çalışmalarında elde edilmiş olması muhtemel sivilaşma potansiyel indeksi (LPI) veya sivilaşma şiddeti sayısı (LSN) gibi parametrelere başvurulması daha müsait olabileceğinden boru hasar ilişkileri bu ve benzeri parametreler kullanılarak da geliştirilmiştir. Bu çalışmalara ilaveten boru malzemesinin, zemin şartlarının ve deprem hareketinin göz önüne alındığı kümeleme analizleri ile gözlemlenen davranış arasında karşılaştırmalar önem kazanmaktadır. Bu çalışma ile sismik etkiler nedeniyle boru davranışı hakkında önemli kazanımlar elde edilirken gelecek olası depremlere hazırlıklı olmak için öneriler sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Boru hasarları, Christchurch, LPI, LSN, sivilaşma.

Giriş

Yeni Zelanda, 04.10.2010 tarihinde büyüklüğü Mw=7.1 olan ve Darfield depremi olarak bilinen depremle başlayan ve arka arkaya gerçekleşen birçok büyük deprem ve binlerce artçı şok etkisinde kalmış, Christchurch civarında farklı bölgelerde alt ve üst yapılar ciddi hasarlar görmüştür. Bu depremler literatürde Canterbury deprem dizisi adını almaktadırlar. Canterbury deprem dizisindeki ikinci büyük deprem büyüklüğü Mw=6.2 olan ve 22 Şubat 2011 tarihinde gerçekleşen Christchurch depremidir. **Şekil 1**'de Darfield depremi ile başlayan deprem serisinde bulunan depremlerin merkez üsleri ve büyükleri görülmektedir (GNS 2013). Canterbury deprem dizisi, yüksek seviyede yer hareketi ile tekrarlayan depremlere eşlik eden yanal yayılma ve ciddi sivilaşma etkisinde olan altyapı sistemlerinin kritik davranışlarının değerlendirilmesi için eşsiz bir deprem verisi olarak görülmektedir. Sivilaşma etkisiyle yaklaşık 60000 yerleşim yapısı zarar görürken şehir bölgesindeki altyapı sisteminin üçte biri etkilenmiştir. **Şekil 2** şehrin içerisinde oluşan sivilaşma büyüklüğünü örnek olarak göstermektedir (Van Ballegooy ve diğ., 2014).

* 9. Türkiye Deprem Mühendisliği Konferansı'nda sunulmuştur.



Şekil 1. Canterbury Deprem Dizisindeki depremlerin merkez üsleri (GNS 2013)

30 milyar dolarlık (Yeni Zelanda Doları) toplam ekonomik kaybın yarısı doğrudan sivilaşmanın verdiği hasardan kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada Canterbury deprem dizisi içinde yer alan, altyapı sistemlerine en büyük hasarı veren ve bu hasarlarla ilgili güvenilir veri tabanına ulaşabildiğimiz 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin gömülü boru hatlarına etkisi araştırılmıştır. Christchurch depreminin seçilmesindeki diğer önemli bir etken meydana getirdiği hasarların net olarak toplanabilmesidir. Hazırlıksız bir şekilde Darfield depremine yakalanan Yeni Zelanda, bu depremle bir tecrübe edinmiş

ve onun sonrasında meydana gelen Christchurch depreminde çok daha etkili ve doğru bir şekilde Christchurch depreminin verdiği hasarları toplayabilmiştir. Christchurch depreminin içme suyuna verdiği etkiler araştırılırken Yeni Zelanda geoteknik veri tabanı (NZGD), SCIRT tarafından sağlanan boru hattı ve hasarları veri tabanı ile deplasman ve sivilaşma parametreleri veri tabanlarından yararlanılmıştır. Bu veri tabanları hakkında özet bilgiler bu çalışma içerisinde sunulmuştur, ayrıntılı bilgiye Toprak ve diğ. (2020, 2019; 2018), Nacaroğlu (2017), Bouziou (2015) ve O'Rourke ve diğ. (2014) kaynaklarından ulaşılabilir.



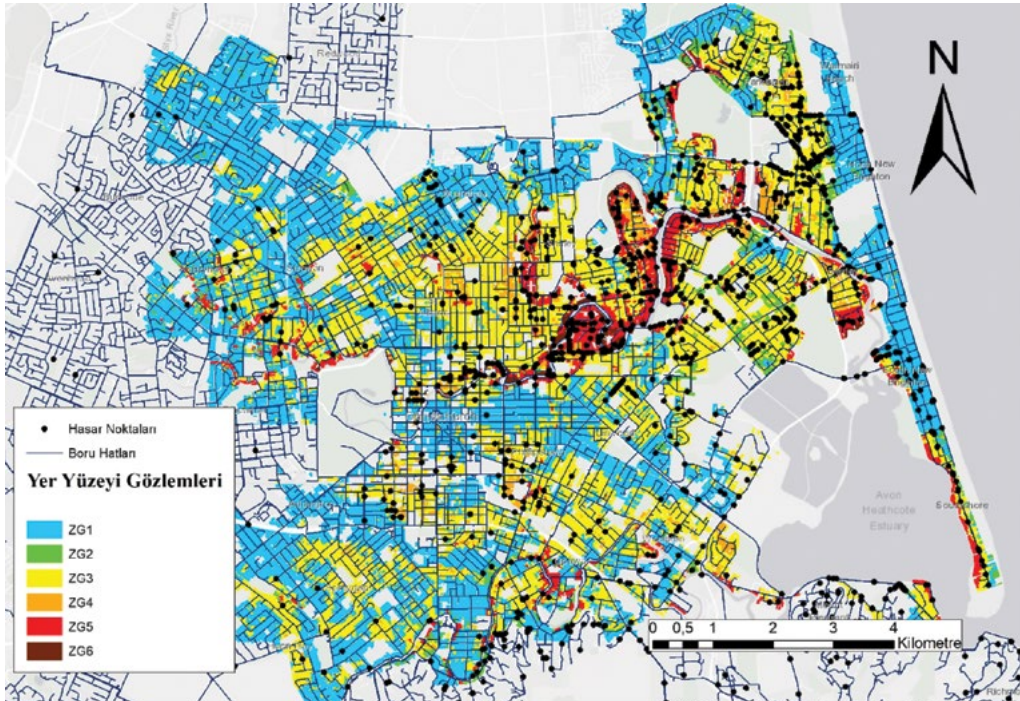
Şekil 2. Christchurch şehri içinden sivilaşma örnekleri (Van Ballegooy ve diğ., 2014)

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Veri Tabanı

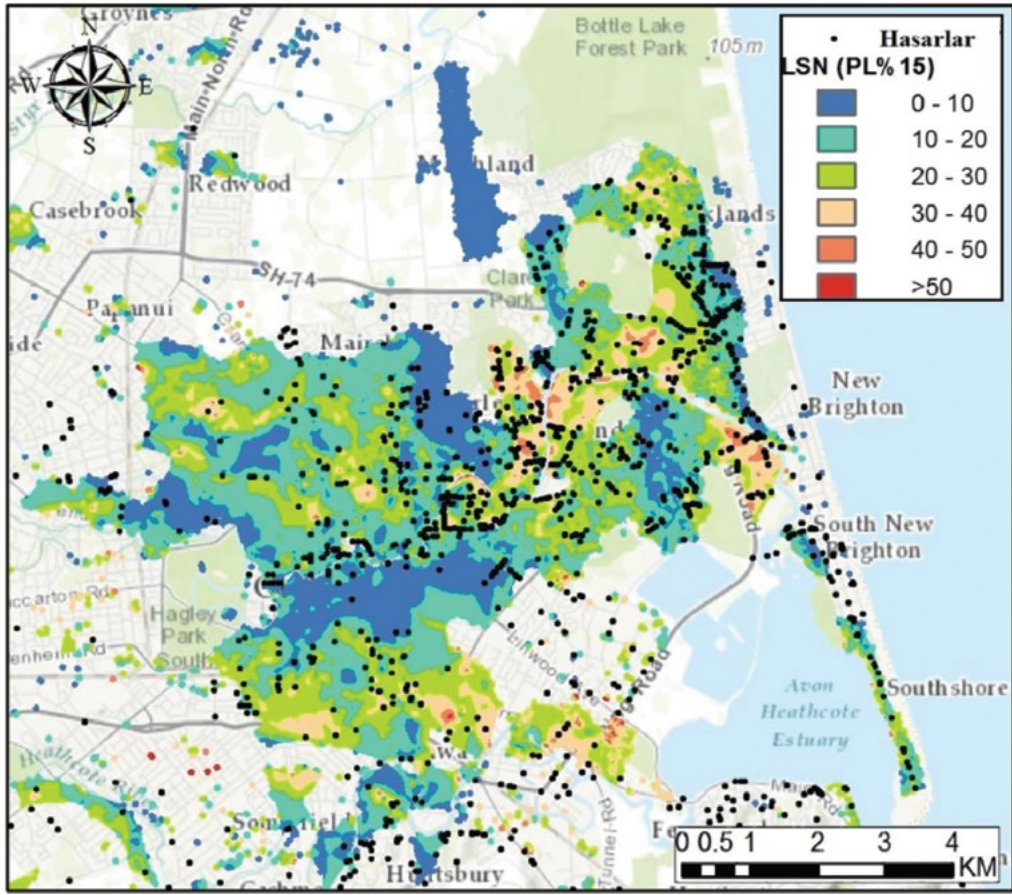
Christchurch şehri su şebekesi 1730 km su boru hattından oluşmaktadır. Su dağıtım sisteminde, çapları 75 ile 600 mm arasında değişen ana hat su boruları bulunmaktadır. Christchurch su şebekesi veri tabanı her bir borunun tipini, çapını, yapıldığı malzemeyi, uzunluğunu ve döşendiği yılı içermektedir. 75 mm'den küçük çapa sahip dağıtım boruları sistemde bulunmamaktadır. Şekil 3 Christchurch şehri için su dağıtım borularını ve hasarlarını zemin yüzeyinde gözlemlenen sıvılaşma etkileriyle (Tonkin & Taylor, 2015) çakıştırılmış olarak göstermektedir. Veri tabanları coğrafi bilgi sistemleri içerisinde işlenmiş ve analizlerde temel olarak bu sistem ile diğer yazılımların entegrasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Hasar veri tabanında hasarın tipi (hangi tür malzemeye sahip boruda olduğu), yeri ve zamanı olmasına rağmen hasarların kırık mı yoksa sızıntı tipinde mi oldukları hakkında bilgi her nokta için mevcut değildir. Christchurch altyapı sisteminde birçok farklı malzemeden yapılmış boru mevcuttur. Bunlar arasında asbestli çimento (AC), dökme demir (CI), polivinil klorür (PVC), çelik (steel), plastik olmayan polivinil klorür (UPVC), beton kaplamalı çelik (CLS), düktil dökme demir (DI) vb. tipi borular bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında daha geniş bir bölgeyi kapsayan ve istatistiksel olarak ilişkilerin geliştirilmesi mümkün olan AC, CI

ve PVC tipi boruları üstünde durulmuştur.

Christchurch şehrinde sıvılaşmanın yaklaşık 90 km² gibi geniş bir alanı kaplaması sonucu, deprem dalgalarının geçişi esnasında oluşan geçici yer hareketlerinin neden olduğu hasarlar kalıcı yer deformasyonları sonucu oluşan hasarlardan az olmuştur. Bu sebeple bu bildirinin konusu olan araştırmalarda kalıcı yer hareketleri sonucu oluşan hasarlar öne çıkmıştır ve özellikle kalıcı yer hareketlerinde bir faktör olması açısından sıvılaşma gerçekleşen bölgeler öne çıkmaktadır. Tonkin & Taylor (2015) tarafından sağlanan sıvılaşma gerçekleşen bölgelerde zemin yüzeyinde meydana gelen etkileri gösteren haritada altı gözlem türü ifade edilmiştir. Bunlar, ZG1: zemin çatlağı veya yüzeye sıvılaşmış malzeme çıkışı gözlemlenmemiş; ZG2: küçük zemin çatlakları var ancak yüzeye sıvılaşmış malzeme çıkışı gözlemlenmemiş; ZG3: yanal yayılma yok ancak yüzeye çıkan sıvılaşmış malzeme küçük ya da orta miktarda; ZG4: yanal yayılma yok ancak çok fazla miktarda yüzeye çıkan sıvılaşmış malzeme mevcut; ZG5: orta-büyük miktarda yanal yayılma ve yüzeye çıkan sıvılaşmış malzeme sıklıkla gözlenir; ZG6: şiddetli miktarda yanal yayılma ve yüzeye çıkan sıvılaşmış malzeme sıklıkla gözlenir olarak belirlenmiştir. Bu veri tabanı boru hasarlarının yüzeyde gözlemlenen sıvılaşma etkileri ile karşılaştırma imkânını vermektedir.



Şekil 3. Christchurch şehri boruları, oluşan hasarlar ve zemin yüzeyindeki sıvılaşma gözlemleri



Şekil 4. Christchurch şehri boru hasarları ve LSN dağılımı

Sıvılaşma ile ilgili diğer göstergeler bir inşaat sahasında sıvılaşma tehlikesinin belirlenmesinde ve özellikle bölgesel sıvılaşma tehlikesi haritalarında yaygın olarak kullanılan sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) ve son zamanlarda kullanımı gittikçe artan sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) gibi sıvılaşma parametreleridir (örneğin, Toprak ve Holzer, 2003; Tonkin & Taylor 2013; Jinguuji ve Toprak, 2017). Boru hasarlarının değerlendirilmesinde ve gelecek depremlerden oluşabilecek boru hasarlarının tahmininde kullanılan boru hasar ilişkilerinin bu parametreler kullanılarak elde edilmesi önemli bir katkı olmuştur (Toprak ve diğ., 2019). Bu çalışmada kullanılan ve **Şekil 4**'te bir örneği gösterilen Christchurch şehri LPI ve LSN haritalarının tamamına Toprak ve diğ. (2019) çalışmasından ulaşılabilir.

Analizler

Boru hattı kırılmağını göstermek için hesaplanan hasar ilişkileri sağlamlık ve güvenilirlik analizleri için önemli olmasının yanında bütün ileriye dönük

deprem zarar tahmini çalışmalarının tamamında kullanılmaktadır (Toprak ve Taskin, 2007; Bray ve diğ., 2013). Hasar ilişkileri hesaplanırken onarım oranı (RR) parametresi literatürde sıklıkla kullanılan, hasarı boru uzunluğuyla normalize ederek sunan ve kırılma için iyi bir gösterge parametresidir. Onarım oranı (RR) belli bir alandaki toplam boru onarım sayısının aynı bölge içerisindeki boru uzunluğuna (km) bölünmesi ile elde edilir. Onarım oranının istatistiksel olarak anlamlı olması amacıyla ve RR değerinin incelenen boru hattı uzunluğuna ve boru hasarlarının sayısına bağlı olmasından dolayı RR hesaplamaları için boru hasar ilişkileri için sunulan çeşitli çalışmalarda eleme kriteri kullanılmıştır. Bu çalışmada O'Rourke ve diğ. (2014) tarafından geliştirilen eleme kriteri kullanılmıştır. Bu kriter boru hattı hasarlarının poisson dağılımına uyduğunu varsaymaktadır.

Boru hattı hasarı ve sıvılaşma parametreleri arasındaki ilişkileri geliştirmek için, Christchurch şehrinin içme suyu boru hattı sistemi ve hasar veri tabanı, **Şekil 3** ve **4**'te gösterildiği gibi ilgili

Tablo 1. Christchurch şehrinde sivilaşma bölgesi içinde ve dışında boru onarım oranları

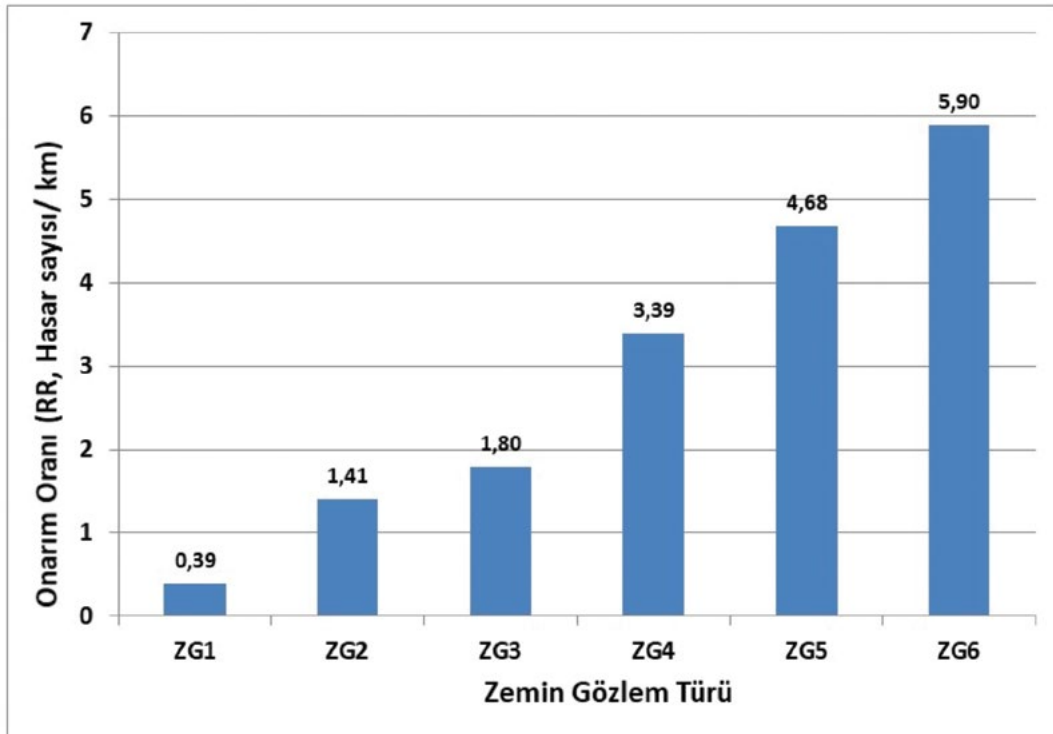
Malzeme Cinsi	Tüm Christchurch			Sivilaşma Dışı Bölge			Sivilaşma İçi Bölge		
	Uzunluk (km)	Onarım Sayısı	Hasar Oranı	Uzunluk (km)	Onarım Sayısı	Hasar Oranı	Uzunluk (km)	Onarım Sayısı	Hasar Oranı
CI	194.4	255	1.31	101.31	78	0.77	93.09	177	1.90
AC	867.2	1024	1.18	618.5	271	0.44	248.7	753	3.03
PVC	213.6	68	0.32	124.69	11	0.09	88.91	57	0.64
MPVC	149.7	13	0.09	116.42	1	0.01	33.28	12	0.36
Diğer	305.4	142	0.46	198.59	36	0.18	106.81	106	0.99
Toplam	1730.3	1502	0.87	1158.7	397	0.34	571.6	1105	1.93

haritalar ile karşılaştırılmış ve konumsal analizler ArcMap ortamında CBS kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 1 Christchurch şehrinde sivilaşma bölgesi içinde ve dışında boru onarım oranlarının dağılımını göstermektedir. Aynı boru cinsi için sivilaşma bölgesi içerisindeki onarım oranları sivilaşma bölgesi dışındaki oranlara göre çok yüksek çıkmaktadır. Boru malzemeleri açısından ise en büyük hasar oranlarının AC ve CI borularda gerçekleştiği görülmektedir. Bütün boru cinslerini tek bir grup olarak değerlendirip ortalama değerler olarak bakarsak sivilaşma içi bölgede 1.93 hasar

oranı ortaya çıkarken sivilaşma dışı bölgede 0.34 oranı görülmektedir.

Boru onarım oranlarının sivilaşma gerçekleşen bölgelerde zemin yüzeyinde meydana gelen etkilere göre değişimini **Şekil 5** göstermektedir. Sivilaşma bölgesi içerisinde kalan ama yüzeyde belirgin sivilaşma etkileri gözlemlenmemiş ZG1 alanlarındaki ortalama boru onarım oranı değeri (RR = 0.39) sivilaşma dışı bölgedeki oranla (RR = 0.34) benzer çıkmıştır. Yüzeyde sivilaşma etkileri gözlemlenmesiyle birlikte boru onarım oranı


Şekil 5. Christchurch şehrinde zemin yüzeyindeki sivilaşma gözlemlerine göre onarım oranları

değerlerinde ciddi bir artış gerçekleşmiştir. Yüzeyde gözlemlenen sivilaşma etkileri arttıkça da ortalama onarım oranı değerleri hızla yükselmiştir. Bu etkiler boruların hem yatay hem düşey düzlemde ciddi etkilere maruz kaldığının bir göstergesidir. O'Rourke ve diğ. (2014) ve Toprak ve diğ. (2018) çalışmaları bu etkileri ve boru etkileşimini ayrıntılı olarak sunmuşlardır. Bu çalışmalar kapsamında uzaktan algılama yöntemleriyle yaklaşık bir boru uzunluğuna karşılık gelen mesafe aralıklarıyla (4-5 m) tespit edilen depreme bağlı yatay ve düşey yer değiştirmeler, gerek yatay ve düşey yönde ayrı ayrı gerekse her iki yönde birlikte değerlendirilen yer değiştirmelere boruların verdiği tepkilerin belirlenmesini sağlamıştır. Bir depremde yer hareketlerinin bu sıklıkla tespiti ve deprem sonucu oluşan boru hasarlarının analizinde kullanılması daha önce hiç mümkün olmamıştı. Boruların tepkileri göz önüne alınırken yatay yönde meydana gelen yer değiştirmeler birim şekil değiştirmeler (uzama oranları), düşey yöndeki yer hareketleri ise dönmeler olarak değerlendirilmektedir. Fiziksel olarak boru zemin etkileşimini tarif eden bu parametreler (birim şekil değiştirme ve dönmeler) kullanılarak geliştirilen boru hasar ilişkileri gelecek depremler için çalıştırılacak deprem senaryoları ve hasar tahminleri için özel önem arz etmektedir.

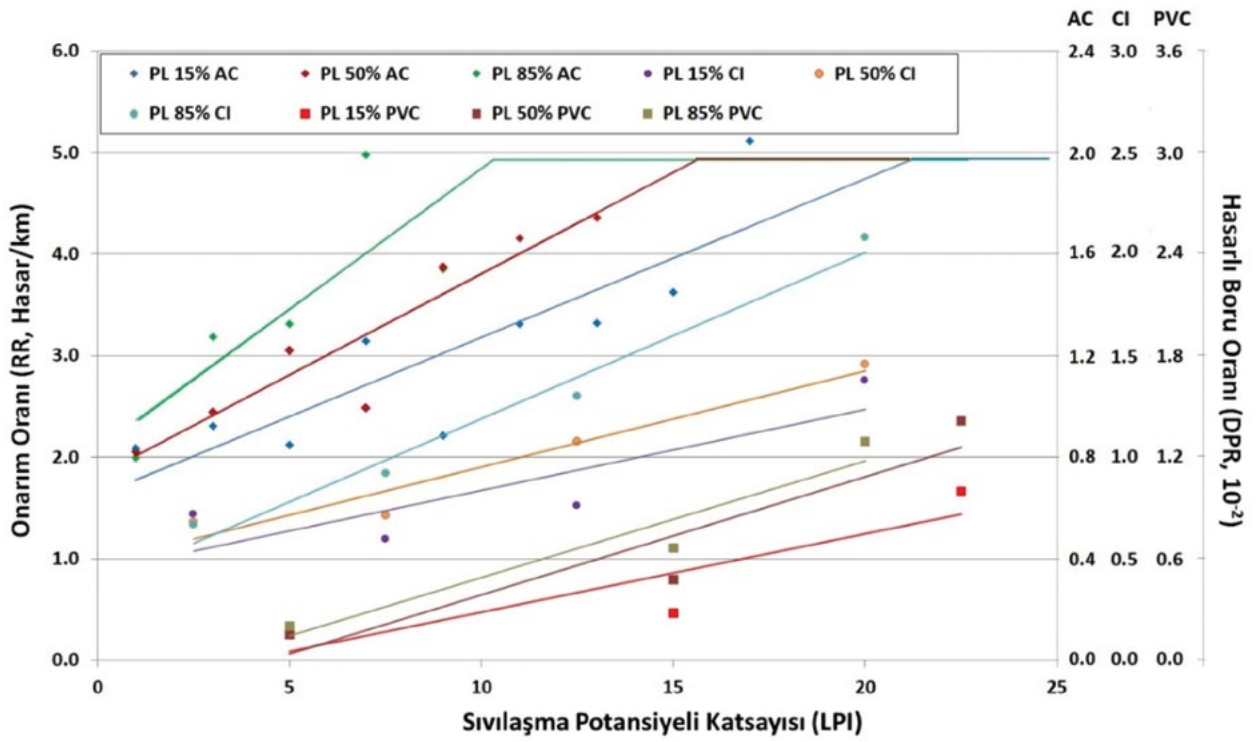
Şekil 6, CBS analizlerini ve eleme kriterlerini kullanarak AC, CI ve PVC tipi borularda farklı sivilaşma olasılığı (PL) değerlerine (%15, %50 ve %85) karşılık hesaplanmış RR değerleri ile elde edilen doğrusal regresyon ilişkilerini sunmaktadır. Sivilaşma olasılığı (PL) %15 değerleri aynı zamanda deterministik yaklaşım değerine karşılık gelmektedir. Boru onarım oranlarına ek olarak boru hasarları, hasarlı boru oranı (DPR) olarak adlandırılan yeni bir parametreyle ilişkilendirilmiştir. DPR, ilk defa Toprak ve diğ., (2017; 2019) çalışmalarında tanıtilen ve kullanılan bir parametredir ve boyutsuzdur. Her bir boru tipi için elde edilen DPR, her bir LSN (ya da LPI) aralığındaki onarım gerektiren boru sayısının, o aralıktaki toplam boru sayısına bölünmesiyle elde edilmiştir. Herhangi bir LSN (ya da LPI) aralığı içindeki toplam boru sayısı, o LSN (ya da LPI) aralığındaki toplam boru uzunluğunun boru tipine özgü döşenme uzunluğuna bölünmesi ile elde edilmiştir. Saha ve boru üretim süreçlerinden elde edilen bilgiler, farklı boru tiplerinin döşeme uzunluklarının farklı olduğunu göstermektedir. AC ve PVC boruların tipik döşeme uzunlukları sırasıyla 4 ve 6 m'dir. 1940'tan önce ve sonra döşenen CI boruları için döşenme uzunlukları, sırasıyla 3.7 m ve 6 m'dir. CI tip borular için bu koşullar göz önüne alındığında

eşdeğer boru uzunluğu 5 m olarak hesaplanmıştır. Her hasarın ayrı borularda olduğu herhangi bir boruda birden fazla hasar olmadığı kabul edilmiştir. Bu kabul CBS kullanılarak onaylanmıştır. Kısaca, DPR hasarlı boru sayısının aynı bölgedeki toplam boru sayısına oranıdır. RR ve DPR için geliştirilen regresyon çizgileri, Şekil 6'de görüldüğü üzere sadece farklı sabit katsayılar ile aynıdır. Sol ve sağ düşey eksenler sırasıyla RR ve DPR'ye karşılık gelmektedir. AC, CI ve PVC borularının döşenme uzunlukları farklı olduğu için DPR eksen değerleri her tip boru için ayrı olarak verilmiştir.

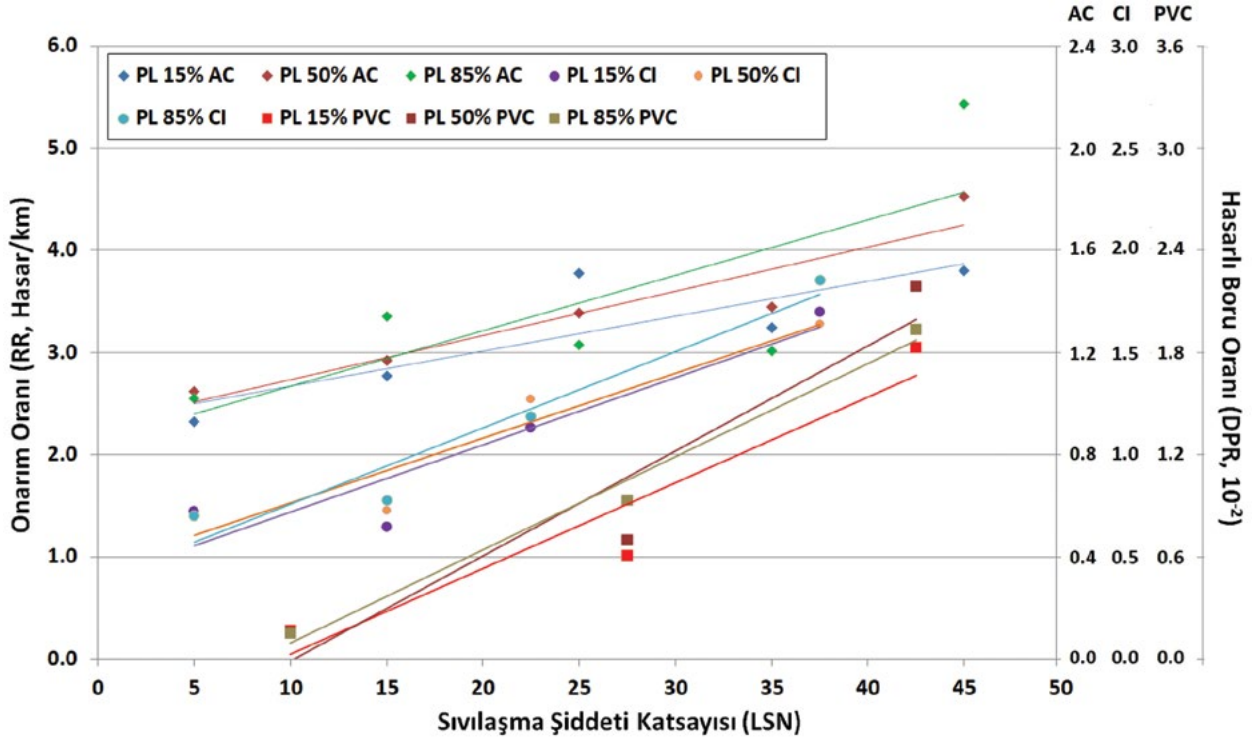
Şekil 6 açık olarak göstermektedir ki PVC boru hatları en düşük, AC boru hatları ise geliştirilen tüm hasar ilişkilerinde en yüksek onarım oranı değerine sahiptir. CI hasar ilişkileri, AC ve PVC boru hattı ilişkilerinin yaklaşık ortalaması olarak elde edilmiştir. Ayrıca, daha yüksek sivilaşma kırılma parametre değerlerinde, AC, CI ve PVC boru hatları için regresyon çizgileri yakınsamaktadır. Burada dikkate alınan parçalı boru tipleri arasında PVC borunun en iyi performans vermesinin, daha fazla sünek ve PVC bağlantılarındaki nispeten büyük ekleme uzunluklarına sahip olmasına bağlanabilmektedir. Şekilde geliştirilen boru hasar ilişkilerinde PVC boru hattının nispeten iyi performansını yansıtmaktadır. PVC boru hatları için regresyonlar, bir eşik değeri aşıldığında PVC boru hatlarına zarar geldiği anlamına gelmektedir.

Sonuçlar

Gelecek depremlerde sivilaşma olması beklenen bölgelerde yer alan boru hatları özel bir değerlendirmeye tabi tutulmalıdır. Bu boruların değerlendirilmesi, yalnızca boru hattının özelliklerini değil aynı zamanda boruların içinde yer aldıkları zemin ve zemin profili ile bölgenin maruz kalabileceği kuvvetli yer hareketlerinin özelliklerine de bağlıdır. Bu açıdan şehir genelinde gerçekleşen sivilaşma nedeniyle meydana gelen boru hasarlarıyla öne çıkan 22 Şubat 2011 Christchurch depremi çok önemli bir test olmuştur ve çok önemli veriler sağlamıştır. Böylece boruların maruz kaldığı yatay yönde meydana gelen yer değiştirmeler ile oluşan birim şekil değiştirmeler (uzama oranları), düşey yöndeki yer hareketleri ile oluşan dönmeler altında davranışları belirlenebilmiştir (örneğin, O'Rourke ve diğ., 2014; Toprak ve diğ. (2018)). Fiziksel olarak boru zemin etkileşimini tarif eden bu parametreler (birim şekil değiştirme ve dönmeler) kullanılarak geliştirilen boru hasar ilişkileri gelecek depremler için çalıştırılacak deprem senaryoları ve hasar tahminleri için özel önem arz etmektedir.



(a) LPI ve boru hasar ilişkileri



(b) LSN ve boru hasar ilişkileri

Şekil 6. Sıvılaşma olasılığı %15, %50, %85 ve AC, CI, PVC boru hatları için RR ve DPR'ye karşılık LSN ve LPI ilişkileri (Toprak ve diğ., 2019)

Bununla birlikte, bu parametreler fiziksel olarak bir gerçekliğe işaret etmelerine rağmen gelecek deprem senaryoları kullanılarak elde edilmesi bazı durumlarda zor olabilmektedir. Böyle durumlar için özellikle bölgesel sıvılaşma çalışmalarında elde edilmiş olması muhtemel sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) veya sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) gibi parametrelere başvurulması daha müsait olabileceğinden boru hasar ilişkileri bu ve benzeri parametreler kullanılarak ta geliştirilmiştir. Bu çalışmalara ilaveten boru malzemesinin, zemin şartlarının ve deprem hareketinin göz önüne alındığı kümeleme analizleri (örneğin, Nacaroglu ve diğ., 2019; Dündar, 2019) ile gözlemlenen davranış arasında karşılaştırmalar yapay zekâ uygulamaları açısından önem kazanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma 114M258 nolu TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir. Çalışmada verilerin elde edilmesinde yardımları bulunan şu kurumlara teşekkür ederiz: the Christchurch Earthquake Recovery Authority (CERA), Stronger Christchurch Infrastructure Rebuild Team (SCIRT), Christchurch City Council (CCC), Earthquake Commission (EQC), Contact Energy, the NZ Geotechnical Database.

Kaynaklar

- Bouziou D (2015) Earthquake induced ground deformation effects on buried pipelines, Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca New York
- Bray, JD, O'Rourke, TD, Cubrinovski, M, Zupan, JD, Jeon, SS, Taylor, M, Toprak, S, Hughes, M, van Ballegooy, S, Bouziou, D (2013) Liquefaction impact on critical infrastructure in Christchurch. Final Report, U.S. Geological Survey, National Earthquake Hazards Reduction Program.
- Dündar G (2019) Sismik etkiler altında boru hasarlarının kümeleme analizi ile değerlendirilmesi, Yüksek Lisans, PAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli
- GNS Science (2013), The most recent aftershock map, available at <http://www.gns.cri.nz/Home/OurScience/NaturalHazards/RecentEvents/Canterburyquake/Recentaftershockmap>
- Jinguiji M, Toprak S, (2017) "A case study of liquefaction risk analysis based on the thickness and depth of the liquefaction layer using CPT and electric resistivity data in the Hinode area, Itako City, Ibaraki Prefecture, Japan". Exploration Geophysics, 48(1), 28-36
- Nacaroglu E (2017) Sismik etkiler altında gömülü boru hatlarında hasar analizleri, Doktora, PAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli
- Nacaroglu E, Toprak S, Dündar G, Ceylan M (2019)

- "K-Ortalamlar Kümeleme Analizi Yöntemiyle Deprem Kaynaklı Boru Hasarlarının İncelenmesi", MÜHJEO'2019: Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, PAÜ, Denizli, 03-05 Ekim
- New Zealand Geotechnical Database (NZGD), <https://www.nzgd.org.nz>
- O'Rourke TD, Jeon SS, Toprak S, Cubrinovski M, Hughes M, Ballegooy S, Bouziou D (2014) "Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ", Earthquake Spectra, 30(1):183-204
- Tonkin & Taylor Ltd (2013) Liquefaction Vulnerability Study, Report Number: 52020.0200/v1.0
- Tonkin & Taylor Ltd (2015) Canterbury Earthquake Sequence: Increased Liquefaction Vulnerability Assessment Methodology, Report Number: 52010.140.v1.0
- Toprak S, Holzer, TL (2003), "Liquefaction potential index: field assessment" *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 129(4), 315-322
- Toprak S, Nacaroglu E, Ceylan M, Dündar G, Cirmiktili OY (2020) "Pipe type and seismic performance in Christchurch, New Zealand" *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 800, No. 1, p. 012042), IOP Publishing, March
- Toprak S, Nacaroglu E, Koc AC, O'Rourke TD, Hamada M, Cubrinovski M, Van Ballegooy S (2018) "Comparison of horizontal ground displacements in Avonside area, Christchurch from air photo, LiDAR and satellite measurements regarding pipeline damage assessment", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(10):4497-4514
- Toprak S, Nacaroglu E, Koc AC, Van Ballegooy S, Jacka M, Torvelainen E, O'Rourke TD (2017) "Pipeline damage predictions in liquefaction zones using LSN", *16th World Conference on Earthquake*, Santiago, Chile, 9-13 January
- Toprak S, Nacaroglu E, Van Ballegooy S, Koc AC, Jacka M, Manav Y, Torvelainen E, O'Rourke, TD (2019) "Segmented pipeline damage predictions using liquefaction vulnerability parameters", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105758, ISSN 0267-7261
- Toprak S, Taskin F (2007) "Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking", *Natural Hazards*, 40(1):1-24
- Van Ballegooy S, Cox SC, Thurlow C, Rutter HK, Reynolds T, Harrington G, Fraser J, Smith T (2014) Median water table elevation in Christchurch and surrounding areas after the 4 September 2010 Darfield earthquake version 2, GNS Science Report 2014/18, Institute of Geological and Nuclear Sciences, Lower Hutt