

CHRISTCHURCH, YENİ ZELANDA DEPREMİNİN AVONSİDE BÖLGESİNDEKİ GÖMÜLÜ BORULAR ÜZERİNE ETKİSİ

CHRISTCHURCH, NEW ZEALAND EARTHQUAKE EFFECTS ON BURIED PIPELINES IN AVONSIDE AREA

Selçuk TOPRAK¹, Engin NACAROĞLU², Abdullah Cem KOÇ³, Murat SARI⁴, Ümüt Sakine YILDIRIM⁵ ve Volkan HELVA⁶

ÖZET

Depremlerin altyapı sistemlerine verdiği hasarlar en az üstyapılara verdiği hasarlar kadar önemlidir. Geçmişte yaşanan büyük depremler (Örneğin Northridge 1994, Kobe 1995, Chi-Chi 1999, Kocaeli 1999, Şili 2010, Japonya (Tohoku) 2011, Emilia 2012) altyapıya büyük zarar vermiştir. Aynı şekilde Yeni Zelanda'da 2010 yılında başlayan ve arka arkaya gerçekleşen depremlerde (Mw=7.1 4 Ekim 2010 Darfield, Mw=6.2 22 Şubat 2011 Christchurch, Mw=6.0 13 Haziran 2011 ve Mw=5.9 23 Aralık 2011 depremleri) içme ve atık su sistemleri çok ciddi hasarlar görmüştür. Bu depremler Canterbury deprem dizisi adını almıştır. Canterbury deprem dizisi sırasında gömülü boru hatlarının performansı, yüksek seviyede yer hareketi ile tekrarlayan depremlere eşlik eden yanal yayılma ve oturmalar, ciddi sivilaşma etkisinde olan altyapı sistemlerinin kritik davranışlarının değerlendirilmesi için eşsiz bir çalışma alanı sağlamaktadır.

Bu çalışmada 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin gömülü borular üzerinde etkisi araştırılmaktadır. Bu etkiler araştırılırken depremden önceki ve sonraki LiDAR (Light Detection And Ranging) ve hava fotoğrafları ölçümlerinden elde edilen yatay ve düşey yer hareketleri kullanılmaktadır. Sivilaşmanın etkidiği alanlardaki farklı yüzey oturmaları ve yanal şekil değiştirmeleri, boru hasarlarını belirtmek için yaygın olarak kullanılan onarım oranı (RR) ile ilişkilendirilerek hasar ilişkileri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada mevcut veri açıklanıp analiz yöntemleri gösterildikten sonra çalışma bölgesi, Avonside alanındaki farklı ölçekteki LiDAR ölçümlerinin, hasar ilişkileri üzerindeki etkisi ve farklı yüzey oturmalarına bağlı olarak hasarların değişimi sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Christchurch depremi, LiDAR ölçümleri, Boru hasarları, Şekil değiştirmeler

ABSTRACT

Damages caused by earthquakes to underground structures can be as important as the ones to above ground structures. Recent big earthquakes (Northridge 1994, Kobe 1995, Chi-Chi 1999, Kocaeli 1999, Chile 2010, Japan (Tohoku) 2011, Emilia 2012) caused large damages on infrastructure systems. Likewise, several big and repeated earthquakes in 2010 and afterwards (Mw=7.1 4 Sept. 2010 Darfield, Mw=6.2 22 Feb. 2011 Christchurch, Mw=6.0 13 June 2011, and Mw=5.9 23 December 2011) had serious damage on water and waste water systems. These earthquakes, termed the Canterbury earthquake sequence are unprecedented in terms of repeated earthquake shocks with substantial levels of ground motion affecting a major city

¹ Prof. Dr, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, stoprak@pau.edu.tr

² Araş. Gör., Pamukkale Üniversitesi, Denizli, enacaroglu@pau.edu.tr

³ Doç. Dr., Pamukkale Üniversitesi, Denizli, a_c_koc@pau.edu.tr

⁴ Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, sarim@yildiz.edu.tr

⁵ Y.L. Öğrencisi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, uyildirim092@posta.pau.edu.tr

⁶ Y.L. Öğrencisi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, vhelva09@posta.pau.edu.tr

with modern infrastructure. Furthermore, the earthquakes were accompanied by multiple episodes of widespread and severe liquefaction on underground lifelines during each event.

This paper investigates 22 Feb. 2011 Christchurch earthquake effects on buried pipeline system. In this study before-after LiDAR (High Resolution Light Detection and Ranging) and air photo measurements for horizontal and vertical ground deformations are used to determine damage relationships. Repair rate (RR) which a widely used and good parameter for pipeline damage relationships, is correlated with different surface settlements and lateral strains in liquefied areas.

In this study, after the existing database is described, and the analysis methods are explained, the pipeline damage correlations developed using Avonside area LiDAR measurements at different scales are compared. Furthermore pipeline damage correlations with respect to differential ground settlements in the same area are presented.

Keywords: Christchurch earthquake, LiDAR measurements, Pipeline damages, Strains

GİRİŞ

Yeni Zelanda 2010 yılında 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 bazı büyük depremler, Tablo 1’de verilmiştir (Tonkin ve Taylor Ltd., 2013). Canterbury deprem dizisi, yüksek seviyede yer hareketi ile tekrarlayan depremlere eşlik eden yanal yayılma ve ciddi sıvılaşma etkisinde olan altyapı sistemlerinin kritik davranışlarının değerlendirilmesi için eşsiz bir deprem verisi olarak görülmektedir. Christchurch şehri için derlenmiş bu benzersiz büyüklük ve detaya sahip veri seti: sismograf istasyonları tarafından kaydedilen kuvvetli yer hareketi kayıtlarını; her bir olaydan sonraki düşey ve yatay hareketlerin LiDAR (high resolution light detection and ranging) ölçümlerini; binlerce kilometrelik gömülü boru hatları bilgisini; ve borular üzerindeki her hasarın konumlarıyla detaylandırılmış hasar kayıtlarını içermektedir. Aynı zamanda Christchurch şehrinin, Avonside bölgesi için depremlerden önce ve sonra çekilen stereo hava fotoğrafları ile elde edilen yatay ve düşey yer hareketi verileri de mevcuttur. Verilerin çeşitliliği çok kapsamlı analizlerin yapılabilmesini sağlasa da, bu bildirinin sınırları kapsamında, Yeni Zelanda’da 22 Şubat 2011 tarihinde büyüklüğü $M_w=6.2$ olarak kayıtlara geçen Christchurch depreminin gömülü borular üzerindeki etkisi, Avonside bölgesi için araştırılmıştır. Şekil 1’de Yeni Zelanda, Christchurch şehri ve $M_w=6.2$ 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin dış merkezi ile Avonside bölgesi görülmektedir.

Şekil 2’de Christchurch depremi için sıvılaşma ve LiDAR ölçüm bölgesi, boru hatları ve hasarları gösterilmektedir (O’Rourke vd., 2014). Bu çalışmada yer hareketlerinin boru hattı hasarlarına etkilerini belirlemek için LiDAR ölçümleri kullanılacaktır. Yüksek çözünürlükteki LiDAR verisine Canterbury Deprem Kurtarma Kurumu (CERA) aracılığıyla ulaşılmıştır. Çalışma bölgesi olan, Avonside, Christchurch, Yeni Zelanda’da LiDAR ölçümlerinin yanı sıra depremlerden önce ve sonra çekilen stereo hava fotoğrafları ile elde edilen yatay yer hareketi verilerinin ve boru hasarlarının değerlendirilmesi üzerinde etkilerinin karşılaştırılması Toprak vd. (2014) çalışmasında yapılmıştır. Avonside bölgesi tamamen sıvılaşma bölgesi içinde yer almaktadır.

MATERYAL

Christchurch su ve atık su dağıtım sistemleri, kuvvetli yer hareketi haritaları, boru hasarlarının yerleri ve sıvılaşma etkilerinin gözlemlendiği alanların mekânsal veriler halindeki coğrafi bilgi sistemi (CBS) haritaları birleştirilerek ana bir CBS veri tabanı oluşturulmuştur. Su temini sistemi için bu çalışmada 75 ve 600 mm arasında çapa sahip, en büyük akışı taşıyan borular üzerindeki hasarlar ele alınmıştır. Daha küçük çapa sahip ana borular ve branşmanlar sisteme dâhil edilmemiştir. Bu veri tabanı O’Rourke vd. (2012) tarafından detaylı bir şekilde sunulmuş ve tartışılmıştır.

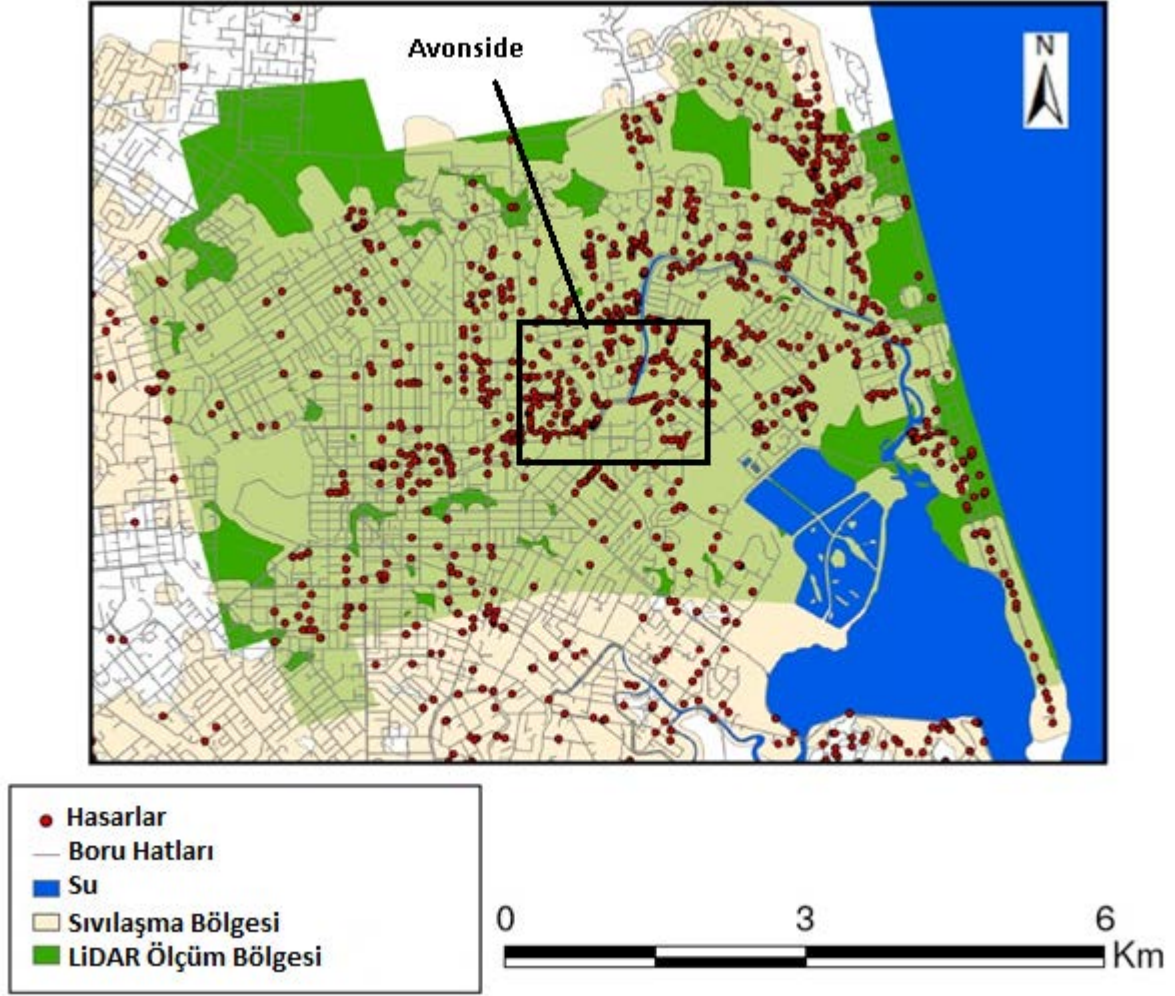
Tablo 1. Yeni Zelanda Deprem Dizisindeki Bazı Büyük Depremler (Tonkin ve Taylor Ltd, 2013)

Deprem	Tarih	Büyüklik (M_w)	Derinliği ve Yeri
Darfield Depremi	04.10.2010	7.1	10 km derinlik, Christchurch'e 35 km batı
22 Şubat Depremi	22.02.2011	6.2	5 km derinlik, Christchurch'e 10 km güneydoğu
Artçı Deprem	16.05.2011	5.3	11 km derinlik, Christchurch'e 20 km güneydoğu
13 Haziran Depremi	13.06.2011	6.2	9 km derinlik, Christchurch'e 10 km güneydoğu
23 Aralık Depremi	23.12.2011	6.1	8 km derinlik Christchurch'e 10 km doğu



Şekil 1. Yeni Zelanda, Christchurch şehri ve $M_w=6,2$ 22 Şubat 2011 Christchurch depremi dış merkezi ve Avonside bölgesi

Şekil 3'de Avonside bölgesinde boru hatları ve hasarların yerleriyle hava fotoğrafları ve LiDAR ölçümlerinin yatay deplasmanları gösterilmektedir (Toprak vd., 2014). LiDAR incelemelerinden elde edilen yanal hareket ölçümleri doğu-batı (DB) ve kuzey-güney (KG) yönlerde 56 m aralıklı deplasman değerleri olarak mevcuttur. LiDAR verisinin yatay ölçümlerinin doğruluğu ± 400 mm ile ± 500 mm'dir (CERA, 2012). Bu çalışmada veriler CERA tarafından sağlanan tektonik hareketler için düzeltilmiştir. Buna ek olarak LiDAR hareketleri sırasıyla 4 m ve 5 m aralıklı, tutarlı yüksek çözünürlükte yanal ve düşey hareketleri değerlendirmek için elde edilmiştir. 4x4 m ve 5x5 m boyutlara sahip gridlerin elde edilmesindeki amaç tipik boru boyutu olan 6 m boru uzunluğuna benzer bir ölçekte hareket çözünürlüğü sağlamaktır.



Şekil 2. Christchurch depremi için sıvılaşma ve LiDAR ölçüm bölgesi, boru hatları ve hasarlar (O'Rourke vd., 2014)

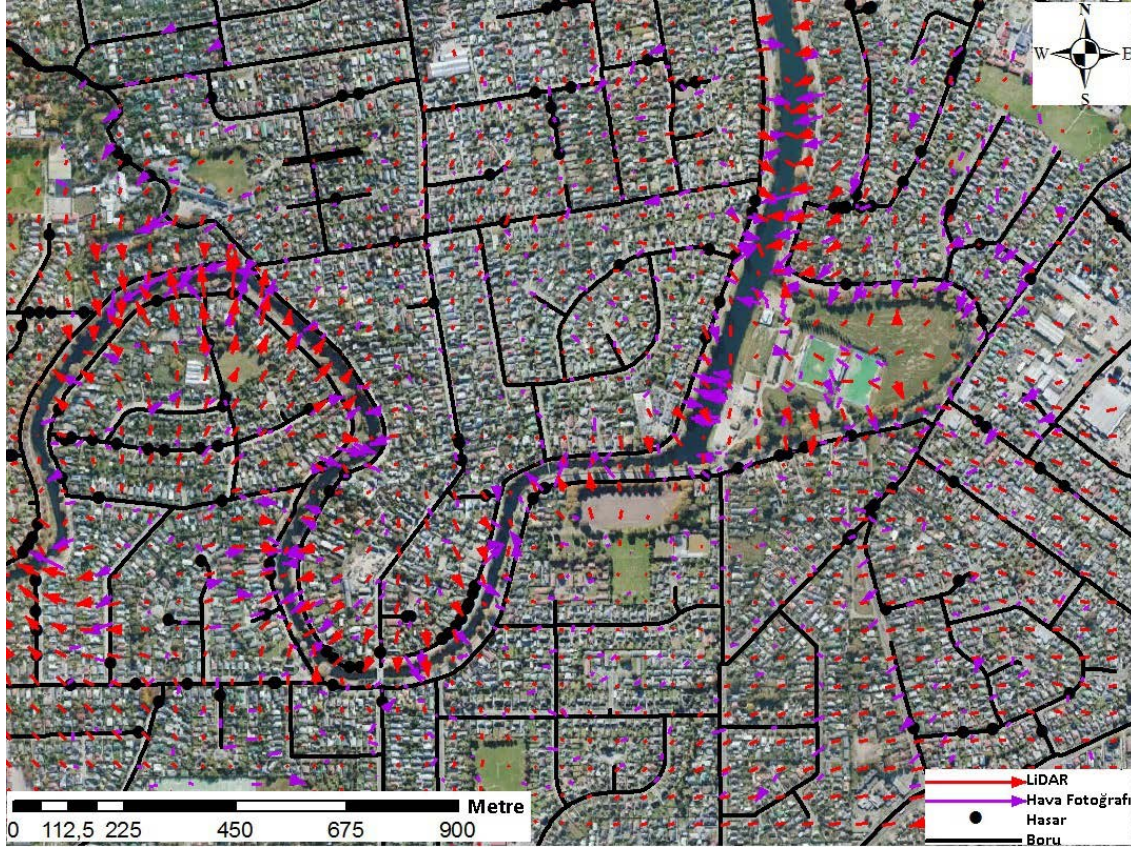
Hava fotoğraflarında ise 680 farklı yerde yatay ve düşey yer hareketleri mevcuttur. Depremlerden önce ve sonra çekilen stereo hava fotoğrafları ile elde edilen yatay ve düşey deplasmanlarla, büyük yer deformasyonlarının fotogrametrik analizinin kullanılması ile ilgili araştırmalar arasında, Hamada ve çalışma arkadaşlarının (Hamada vd., 1986; Hamada ve O'Rourke, 1992) yaptığı araştırmalar bu konuda son yıllarda yapılan en önemli ve başarılı çalışmalar arasında gösterilmektedir. Bu ilerleme, deformasyona global bir bakış açısı sağlayarak, bozunma modellerinin ölçülebilir olarak jeolojik ve topografik özelliklerle ilişkilendirerek, mühendislerin zemin deplasmanlarını değerlendirmesine etki etmiştir. Avonside Bölgesindeki hava fotoğraflarının yatay ve düşey ölçümlerinin doğruluğu ± 673 mm ile ± 246 mm'dir.

Christchurch Bölgesi için LiDAR ve hava fotoğrafları ölçümlerinin yanı sıra referans noktaları (benchmarks) adı verilen ve güvenilir deplasman ölçüm noktalarından oluşan veri seti de mevcuttur. Canterbury Geoteknik Veritabanı (CGD) tarafından 403 referans noktası ölçümü sağlanmaktadır. Bu veri seti Yeni Zelanda Arazi Bilgisi (LINZ), Christchurch Şehir Konseyi, Deprem Komisyonu (EQC) ve CERA tarafından hazırlanan bilgileri içermektedir. Toprak vd. (2014) çalışmasında söz konusu referans nokta ölçümlerinin, LiDAR ve hava fotoğrafları ölçümleri karşılaştırması yapılmıştır.

Bu çalışmada LiDAR deplasmanlarından sırasıyla yatay yer hareketleri için şekil değiştirmeler, düşey yer hareketleri için ise oturmaya bağlı açısız değişimlerin, onarım oranı (RR) ile ilişkileri hesaplanmıştır. Onarım oranı (RR) gömülü boru hatları üzerinde oluşan boru hasar sayılarına ve boru uzunluğuna bağlı olarak bulunmaktadır. Örneğin 50 km boru üzerinde toplam 100 hasar var ise, $RR=(100/50 \text{ km})=2/\text{km}$ olarak bulunmaktadır. Onarım oranı (RR), hasarı boru

uzunluğuyla normalize ederek sunmaktadır ve göreceli kırılma için iyi bir gösterge parametresidir (Toprak vd., 2009; Toprak vd., 2011).

Geçmiş depremlerdeki gözlemler farklı malzemeden yapılmış boruların deprem esnasındaki davranışlarının aynı olmadığını göstermiştir (Toprak 1998; Toprak vd., 2015; Toprak ve Yoshizaki 2003). Christchurch altyapı sisteminde birçok farklı malzemeden yapılmış boru mevcuttur. Bunlar arasında asbestli çimento (AC), dökme demir (CI), polivinil klorür (PVC) vb. tipi borular bulunmaktadır. Özellikle AC tipi borular daha kırılma ve boru birleşimleri geçmeli olduğu için yüksek hasar oranına sahip olduğu bilinmektedir. Bu bildiride AC boru cinsi üzerindeki çalışmalar sunulmuştur. Bunun nedeni Avonside bölgesinde toplam AC boru uzunluğunun ve borular üzerindeki hasar sayısının, yaklaşık olarak diğer tip boruların uzunluğu ve borular üzerindeki hasar sayılarının toplamına neredeyse eşit olmasıdır.



Şekil 3. Avonside bölgesi LiDAR ve hava fotoğraflarının, boru hatları ve hasarlar ile birlikte haritası (Toprak vd., 2014)

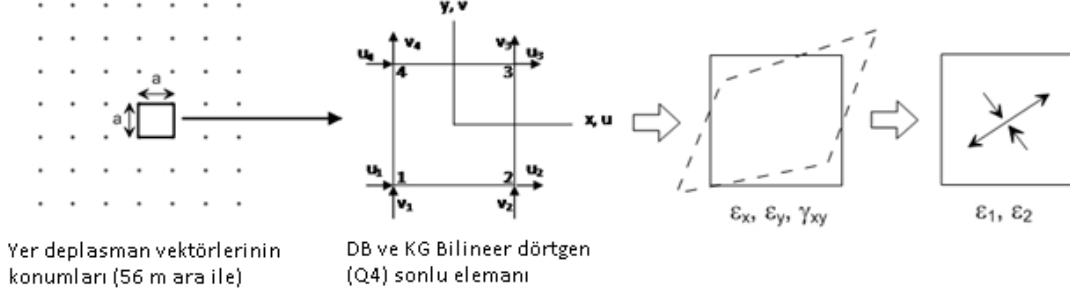
YÖNTEM

Gömülü borularda hasarlar yatay ve düşey yer hareketleri sonucunda gerçekleşmektedir. Bu yer hareketleri borularda çekme, basınç ve eğilme gibi yüklemelere neden olmakta, bunun sonucunda borularda farklı şekillerde kırılmalar (dairesel veya boru boyunca gibi), buruşmalar ve ek yerinden ayrılma gibi hasarlar oluşturmaktadır. Aşağıda Avonside bölgesinin yatay ve düşey yer hareketleri ile boru hasarları arasındaki ilişkiler sunulmaktadır.

Yatay Yer Hareketleri

Şekil 4'de gösterildiği gibi LiDAR deplasmanlarından yatay şekil değiştirmeleri hesaplamak amacıyla, yatay deplasman veri noktaları kare elemanların birer köşesi olarak düşünülmüştür. Kare elemanlar ile oluşturulan grid, bilineer dörtgen elemanlardan oluşan sonlu elemanlar ağı olarak kabul edilebilir. Her bir noktanın yerini ve buna karşılık gelen deplasmanlarını bildikten sonra Doğu-Batı (DB) ve Kuzey-Güney (KG) yönlerindeki şekil değiştirmeler (ϵ_x ve ϵ_y) ve kayma şekil

değiştirmesi (γ_{xy}), doğrusal enterpolasyon kullanılarak, deplasmanların türevleri olarak hesaplanabilmektedir. Cook (1995) çalışmasında anlatıldığı gibi, eleman merkezlerindeki yatay yer şekil değiştirmelerini belirlemek için sonlu elemanlar formülleri kullanılmıştır. Şekil değiştirme matrisi, 56x56 m hücre deplasmanlarından Formül 1'deki gibi hesaplanmıştır.



Şekil 4. Yatay yer deplasmanlarından yer şekil değiştirmeleri hesaplama süreci

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{4a^2} \begin{bmatrix} -(a-y) & 0 & (a-y) & 0 & \dots \\ 0 & -(a-x) & 0 & -(a+x) & \dots \\ -(a-x) & -(a-y) & -(a+x) & (a-y) & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$u_1, v_1, u_2, \dots, v_4$, Şekil 4'te belirtilen köşe deplasmanları, x ve y iki boyutlu uzaydaki koordinatları, a ise kare hücrenin kenar uzunluğu olmakla birlikte, burada 56 m'dir. Formül 1'den elde edilen şekil değiştirmelerden, asal şekil değiştirmeler (ϵ_1 ve ϵ_2) elde etmek için literatürde çok yaygın olan Formül 2'de verilen şekil değiştirme dönüşüm formülü kullanılmıştır.

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (2)$$

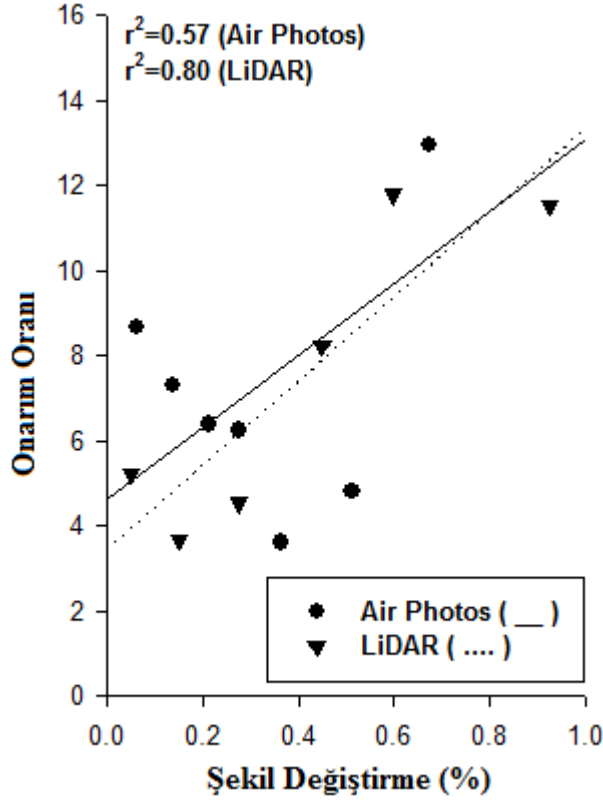
Farklı tipte borular için RR ve yanal şekil değiştirme ilişkileri geliştirilirken, her bir hücre içine düşen hasar sayıları ve boru km uzunlukları her farklı boru tipi için toplanır ve daha sonra belirli şekil değiştirme aralıklarına karşılık gelen RR'ler hesaplanır. Şekil 5'de (AC) tipi su boru hatları için LiDAR ve hava fotoğrafları kullanılarak RR ve yanal yer şekil değiştirmeleri arasındaki ilişki görülmektedir (Toprak vd., 2014). En büyük yanal yer değiştirme (ϵ_{HP}), Formül (2) ile hesaplanan yanal yer şekil değiştirmelerinin mutlak değerce büyüğü olarak alınmıştır. RR'ler O'Rourke vd. (2014) çalışmasında anlatıldığı gibi bir elenme sürecine maruz bırakılmıştır ve şekil değiştirme ilişkileri, aşağıda anlatılan elenme kriteri olarak adlandırılan bir parametre yardımıyla çıkarılmıştır. RR istatistiklerinin doğruluğu örnek uzaydaki boruların uzunluğuna ve hasar sayılarına bağlıdır. Bu çalışmada O'Rourke vd. (2014) tarafından uyarlanan, anlamlı korelasyonlar üretmek için yeterli uzunluklar, aşağıdaki formülle bulunmuştur.

$$x \geq [\phi^{-1}(\beta_c)]^2 / \alpha^2 (RR) \quad (3)$$

Formülde x örnek uzunluğunu; $\phi^{-1}(\beta_c)$, β_c 'nin güvenli aralığını ve standart normal sapmayı; α gerçek değer yüzdesini ve RR onarım oranını göstermektedir. Formül 3'de verilen örnek kriteri, örnek aralığından bağımsız olup herhangi bir RR değerine uyarlanabilmektedir. Böylece geçici yer deformasyonlarının (GYD) etkisindeki küçük RR değerleri için veya kalıcı yer deformasyonlarının (KYD) etkisindeki büyük RR değerleri için de kullanılabilir. Örneğin güvenli aralığı %90, $\alpha = 0.5$ ve $RR=2$ hasar/km, olarak alınırsa, $\phi^{-1}(90\%) = 1.645$ bulunduktan sonra Formül (3) kullanılarak 5.41 km boru uzunluğu elde edilir. Bu demektir ki, belirli bir şekil değiştirme aralığında $RR=2$ ise o şekil değiştirme aralığındaki toplam boru uzunluğu en az 5.41 km olmalıdır.

Bu çalışmada LiDAR ölçümlerinden RR-şekil değiştirme ilişkilerini hesaplarken %90 güvenlik aralığı ve $\alpha = 0.5$ kullanılmıştır.

Toprak vd. (2014), Avonside bölgesi için LiDAR ve hava fotoğraflarından elde edilen ölçümler kullanılarak bulunan RR-yanal şekil değiştirme ilişkilerinde, LiDAR ve hava fotoğrafı ilişkilerinin birbirinden çok farklı olmadığını ancak LiDAR ilişkilerinin daha güçlü olduğunu Şekil 5’de göstermiştir. Bu çalışmada ise 56 m aralığa sahip LiDAR ölçümleri yardımıyla hesaplanan şekil değiştirmelerin yanı sıra, 4 m aralığa sahip LiDAR ölçümleri yardımıyla şekil değiştirmeler de hesaplanmıştır. Bu şekil değiştirmeler hesaplanırken izlenen yol, yukarıda anlatılan 56 m aralığa sahip LiDAR ölçümleri için izlenen yolla boyut farkı dışında bir farklılık göstermemektedir. LiDAR 4 m için şekil değiştirmeleri hesaplamadaki amaç, grid boyut farkının boru ilişkileri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Avonside Bölgesi için LiDAR 56 m ve LiDAR 4 m kullanılarak elde edilen RR-şekil değiştirme ilişkileri Şekil 6’da gösterilmektedir. Avonside bölgesi için LiDAR 56m ve 4m boyutlarına sahip grid sisteminin RR-yanal şekil değiştirmeler regresyon doğrusunun hemen hemen üst üste çakıştığı görülmektedir. Her iki ilişkinin de r^2 değerlerinin yüksek olması (0.80 ve 0.90), RR-yanal şekil değiştirmeler arasındaki ilişkilerin kuvvetli olduğuna işaret etmektedir.



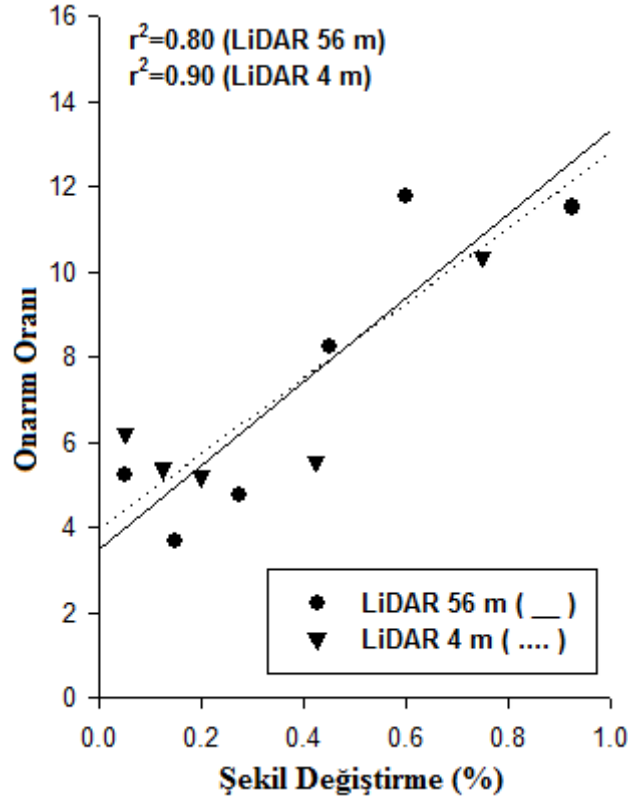
Şekil 5. AC tipi borular için, LiDAR ve hava fotoğrafları ölçümlerinden elde edilen onarım oranı (RR)-yatay yer şekil değiştirme ilişkisi (Toprak vd, 2014)

Düşey Yer Hareketleri

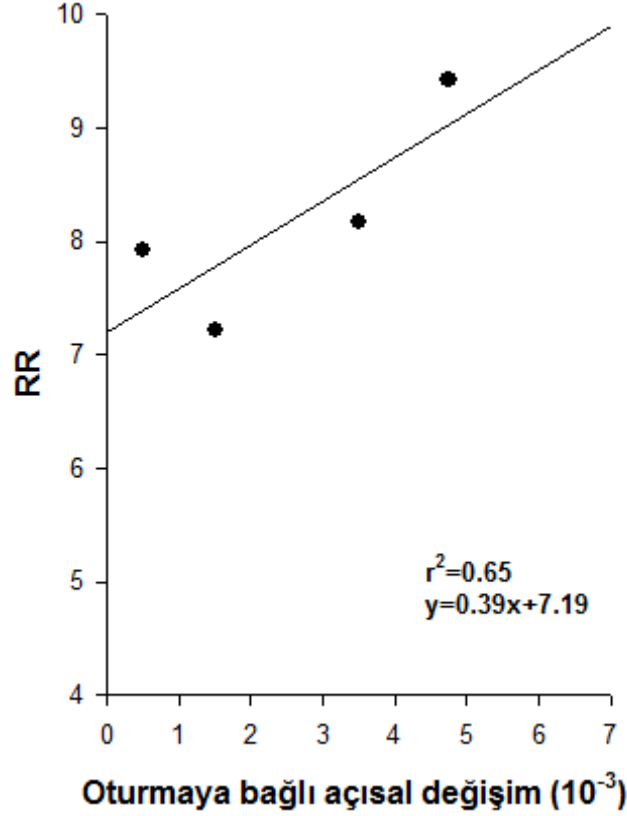
Oturmaya bağlı açısal değişim, β , iki bitişik LiDAR noktasının ($d_{v1} - d_{v2}$), onları ayıran yatay uzaklığa (l) bölünmesi olarak ($\beta = (d_{v1} - d_{v2})/l$) ifade edilmektedir. Bu çalışmada farklı düşey hareketlerin boru hatları üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu parametrenin kullanılmasının birkaç avantajı bulunmaktadır. Birincisi parametrenin boyutsuz olması ve bu sayede gelecek uygulamaların boyutlarına uyarlanabilir olmasıdır. İkinci olarak, iki bitişik noktanın düşey hareketlerini çıkartarak, LiDAR yükseklik yüzeyleri ile ilgili sistematik hatalar ortadan kaldırılmaktadır. Son olarak ise oturmaya bağlı açısal değişim parametresi, yer deformasyonlarının binalar üzerindeki etkilerini değerlendirmek için geoteknik mühendisliğinde geniş ve başarılı bir

şekilde kullanılan parametrelerden biri olmasıdır (Boscardin ve Cording, 1989; Clough ve O'Rourke, 1990).

Oturmaya bağlı açısız değişim, boyutu 5x5 m olan her bir hücre için LiDAR ölçümlerinin, üçüncü dereceden sonlu farklar yöntemiyle (Horn 1981), bir coğrafî bilgi sistemi programı olan ArcMap ile hesaplanmıştır. Bu yöntem, 8 yakın x (DB) ve y (KG) yönlerindeki grid noktalarının, düşey yer yüzeyi hareketinin üçüncü dereceden sonlu farklar algoritmasıyla, Burrough ve Mcdonnell (1998) çalışmasında anlatıldığı gibi her bir LiDAR noktasındaki β 'yı hesaplamak için kullanılmaktadır. RR ve β ilişkileri, sıfırdan başlayan ve 1×10^{-3} β değeriyle artan, birbirine eşit aralıklara düşen boruların uzunluklarının ve hasar sayılarının toplandıktan sonra o aralığa ait RR değerinin hesaplanmasıyla geliştirilmektedir. Bu ilişkiler çıkartılırken her farklı tipteki boru ayrı gruplanmıştır. Formül 3'deki eleme kriteri %90 güven aralığı ve $\alpha = 0.5$ alınarak RR ve β arasında lineer regresyon yapılarak geliştirilmiştir. Şekil 7'de Christchurch Avonside Bölgesinde hesaplanan RR-oturmaya bağlı açısız değişim ilişkisi görülmektedir. Şekil 7, düşey yer hareketleri sonucunda oluşan oturmaya bağlı açısız değişimin artmasıyla, boruların km başına düşen hasar sayısının artmasına yol açacağını göstermektedir. RR- β ilişkisinde $r^2=0.65$ bulunmuştur.



Şekil 6. AC tipi borular için, LiDAR 56 m ve LiDAR 4 m ölçümlerinden elde edilen onarım oranı (RR)-şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 7. Avonside bölgesi, AC tipi borular için, RR-oturmaya bağlı açısal değişim ilişkisi

SONUÇ

Bu çalışma Canterbury deprem dizisinin en büyük depremlerinden olan 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin, Avonside bölgesinde gömülü borular üzerindeki etkisini LiDAR ölçümlerinden faydalanarak araştırmıştır. LiDAR ölçümleri olarak 56 m ve 4 m aralıkta deplasman noktaları kullanılmış ve RR-şekil değiştirme ilişkileri çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar RR-şekil değiştirmeler arasında güçlü bir ilişki olduğunu gösterse de Avonside bölgesi için grid boyutunun farklılığı ilişkilerde bir farklılık göstermemektedir. Ayrıca yine Avonside bölgesi 5 m aralıkta düşey deplasman noktaları kullanılarak düşey yer hareketleri için RR-oturmaya bağlı açısal değişim ilişkisi çıkarılmıştır. Bu ilişki ise oturmaya bağlı açısal değişimin artmasıyla, boruların km başına düşen hasar sayısının artmasına yol açacağını göstermektedir. Gelecek çalışmalarda şekil değiştirme ve oturmaya bağlı açısal değişimlerin, RR ile ayrı ilişkilerini birleştirerek, üç parametreyi de birleştiren ilişkiler çıkarılması düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 114M258 numaralı TÜBİTAK projesiyle ve CZ/13/LLP-LdV-TOI/134014 numaralı Leonardo Da Vinci Projesi ile desteklenmiştir. Christchurch Earthquake Recovery Authority (CERA), Stronger Christchurch Infrastructure Rebuild Team (SCIRT), Christchurch City Council (CCC), Earthquake Commission (EQC), Contact Energy ve Tonkin&Taylor Ltd. ve özellikle John Noonan (SCIRT)'e yardımlarından dolayı ve tüm LiDAR ölçümlerini ve sıvılaşma gözlem verilerini sağlayan CERA (2012) kurumuna teşekkür ederiz. İlaveten çalışma esnasında çeşitli katkılar veren Prof. Thomas O'Rourke, Prof. Misko Cubrinovski, Prof. Masanori Hamada, Prof. Sang Soo Jeon ve Dr. Dimitra Bouziou'ya da teşekkür ederiz. Ayrıca PAÜ BAP kongre katılımı desteği için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Boscardin MD and Cording EJ (1989) "Building response to excavation-induced settlement", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 115(1), 1-21
- Burrough PA and McDonnell RA (1998) Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, Oxford, U.K.
- Canterbury Earthquake Recovery Authority (CERA) (2012) "Geotechnical database for Canterbury earthquake sequence" <https://canterburygeotechnicaldatabase.projectorbit.com>
- Clough, GW and O'Rourke TD (1990) "Construction induced movements of in-situ walls", in *Proceedings, Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE, 439-470
- Cook RD (1995) Finite Element Modeling for Stress Analysis, John Wiley and Sons
- Hamada M and O'Rourke TD (1992) Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes Technical Report NCEER-92-0001, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY, February
- Hamada M, Yasuda S, Isoyama R, Emoto K (1986) "Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacement." Association for the Development of Earthquake Prediction, Tokyo, Japan, November
- Horn, BKP (1981) "Hill shading and the reflectance map", in *Proceedings, IEEE* 69(1), 14-47
- 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", Volume 30 (1): 183–204, February 2014, *Earthquake Engineering Research Institute, EERI*
- O'Rourke TD, Jeon SS, Toprak S, Cubrinovski M, Jung JK (2012) "Underground Lifeline System Performance during the Canterbury Earthquake Sequence", *15th World Conference in Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, September
- Tonkin ve Taylor Ltd, (2013) Liquefaction Vulnerability Study, T&T Ref:52020.0200/v1.0
- Toprak S (1998) Earthquake Effects on Buried Lifeline Systems, Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY
- Toprak S ve Yoshizaki K (2003) "Boru hatlarına deprem yüklerinin etkisi", *5. Ulusal Deprem Mühendisliği Kongresi*, 26-30 Mayıs, İstanbul. Bildiri No: 025. CDROM.
- Toprak S, Nacaroglu E, Koç AC (2011) "Seismic Damage Probabilities for Segmented Buried Pipelines", *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering – Faber, Köhler & Nishijima (eds)*, ETH Zurich, Switzerland, 2-4 August, 2199-2203
- Toprak S, Nacaroglu E, Koç AC (2015) "Seismic Response of Underground Lifeline Systems", Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology Vol. 2 Editors: Ansal, Atilla (Ed.)
- Toprak S, Nacaroglu E, O'Rourke TD, Koc AC, Hamada M, Cubrinovski M, Jeon SS (2014) "Pipeline Damage Assesment Using Horizontal Displacements from Air Photo and LiDAR Measurements in Avonside Area, Christchurch, NZ", *Second European Conference On Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey, 25-29 Aug.*
- Toprak S, Taskin F, Koc AC (2009) "Prediction Of Earthquake Damage To Urban Water Distribution Systems: A Case Study For Denizli, Turkey", *The Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68:499-510.