

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**SİSMİK ETKİLER ALTINDAKİ GÖMÜLÜ BORU
HATLARINDA HASAR ANALİZLERİ**

DOKTORA TEZİ

ENGİN NACAROĞLU

DENİZLİ, MART – 2017

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



SİSMİK ETKİLER ALTINDAKİ GÖMÜLÜ BORU
HATLARINDA HASAR ANALİZLERİ

DOKTORA TEZİ

ENGİN NACAROĞLU

DENİZLİ, MART - 2017

KABUL VE ONAY SAYFASI

ENGİN NACAROĞLU tarafından hazırlanan “SİSMİK ETKİLER ALTINDAKİ GÖMÜLÜ BORU HATLARINDA HASAR ANALİZLERİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 17.03.2017 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

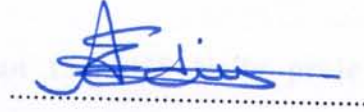
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Abdullah Cem KOÇ
Pamukkale Üniversitesi



Üye
Doç. Dr. Ayşe EDİNÇLİLER
Boğaziçi Üniversitesi



Üye
Doç. Dr. Devrim ALKAYA
Pamukkale Üniversitesi



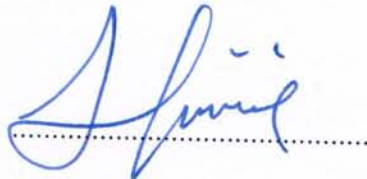
Üye
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Rıfat KAHYAOĞLU
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi



Üye
Yrd. Doç. Dr. Sefer Beran ÇELİK
Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29.03/2017 tarih ve 12/5 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



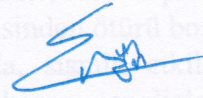
Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 114M258 No'lu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

YERLİ ETKİLER ALTINDAKİ GÖMÜLÜ BORU HATLARINDA HASAR ANALİZLERİ

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.



ENGİN NACAROĞLU

Deprem durumlarında görüldüğü gibi kalıcı yer deformasyonu (sivilaşma, yanal yayılma vb.) olan yerlerdeki boru hatları ciddi bir şekilde zarar görebilir. Aynı şekilde Yeni Zelanda'da gerçekleşen Canterbury deprem sonrasında oluşan yanal yayılmalar ve sivilaşma etkisinden dolayı boru hatları önemli miktarda zarar görmüştür. Bu çalışmada gömülü içme suyu boru hatlarında hasar araştırılmıştır. Canterbury deprem dizisi Yeni Zelanda'da 4 Eylül 2010 tarihinde depremiyle (7.1 Mw) başlayan ve birbiri ardına gerçekleşen birçok deprem ve binlerce arazi sokağı meydana gelen ve literatürde büyük önem taşıyan bir deprem dizisidir.

Bu çalışmada Canterbury deprem dizisinin en büyük depremlerinden olan 22 Şubat 2011 (6.2 Mw) Christchurch depreminin gömülü borular üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmalar hem yatay yer hareketleri hem de düşey yer hareketleri yardımıyla bulunan yatay şekil değişimi ve sivilaşma bağlı açılma değişim parametreleriyle hesaplanmıştır. Yatay yer hareketleri üç farklı uzaktan algılama metodu (Lazer görüntüleme algılama yöntemi (LiDAR), hava fotoğrafı ve uydu ölçümleri) ile dört farklı yatay yer hareketi veri seti (LiDAR 4 m, LiDAR 56 m, hava fotoğrafı ve uydu ölçümleri) ile elde edilmiştir. Bu dört farklı veri seti incelenmiş, sonuçları arasındaki farklar ortaya konmuştur. Daha sonra yatay yer hareketlerinden yatay yer değişimleri elde edilerek hasar ilişkileri araştırılmıştır. Düşey yer hareketleri ise sadece LiDAR yönteminden elde edilen veri setiyle oturmaya bağlı açılma değişim parametresi hesaplanıp hasar ilişkileri analizleri yapılmıştır.

Bu çalışmada ayrıca Christchurch depreminin yol açtığı sivilaşmanın gömülü borulara etkiyi, sivilaşma potansiyel indeksi (LPI), hesaplanmış tek boyutlu sivilaşma (Svp) ve sivilaşma şiddeti katsayısı (LSN) adı verilen üç farklı sivilaşma parametresi ile değerlendirilmiştir. Sivilaşma parametreleri ile elde edilen hasarları arasındaki hasar ilişkilerinin analizi literatürde ilk olması düşünülmektedir.

ANAHTAR KELİMELER:

Gömülü Boru Hatları, Hasar Analizleri, Deprem, Sivilaşma

ÖZET

**SİSMİK ETKİLER ALTINDAKİ GÖMÜLÜ BORU HATLARINDA
HASAR ANALİZLERİ
DOKTORA TEZİ
ENGİN NACAROĞLU
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ABDULLAH CEM KOÇ)
DENİZLİ, MART - 2017**

Geçmiş depremlerde görüldüğü gibi kalıcı yer deformasyonu (sıvılaşma, yanal yayılma vb.) olan yerlerdeki boru hatları ciddi bir şekilde zarar görmüştür. Aynı şekilde Yeni Zelanda’da gerçekleşen Canterbury deprem dizisi sonucunda oluşan yanal yayılmalar ve sıvılaşma etkisinden ötürü boru hatları yüksek miktarda zarar görmüştür. Bu çalışmada, sismik etkiler altındaki gömülü içme suyu boru hatlarında hasar analizleri değerlendirilmiştir. Canterbury deprem dizisi Yeni Zelanda’da 4 Ekim 2010 Darfield depremiyle (7.1 Mw) başlayan ve birbiri ardına gerçekleşen birçok büyük deprem ve binlerce artçı şoktan meydana gelen ve literatürde büyük bir önem taşıyan bir deprem dizisidir.

Tez kapsamında Canterbury deprem dizisinin en büyük depremlerinden olan 22 Şubat 2011 (6.2 Mw) Christchurch depreminin gömülü borular üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmalar hem yatay yer hareketleri hem de düşey yer hareketleri yardımıyla bulunan yatay şekil değiştirme ve oturmaya bağlı açısız değişim parametreleriyle hesaplanmıştır. Yatay yer hareketleri üç farklı uzaktan algılama metodu (Lazer görüntüleme algılama ve sınırlama (LiDAR), hava fotoğrafı ve uydu ölçümleri) ile dört farklı yatay yer hareketi veri seti (LiDAR 4 m, LiDAR 56 m, hava fotoğrafı ve uydu ölçümleri) ile elde edilmiştir. Bu dört farklı veri seti incelenmiş, yöntemler arasındaki farklar ortaya konmuştur. Daha sonra yatay yer hareketlerinden yatay yer değiştirmeler elde edilerek hasar ilişkileri hesaplanmıştır. Düşey yer hareketleri ise sadece LiDAR yönteminden elde edilen veri setiyle oturmaya bağlı açısız değişim parametresi hesaplanıp hasar ilişkileri analizleri yapılmıştır.

Çalışmada ayrıca Christchurch depreminin yol açtığı sıvılaşmanın gömülü borulara etkisi, sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI), hesaplanmış tek boyutlu oturma (S_{VID}) ve sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) adı verilen üç farklı sıvılaşma parametresi ile değerlendirilmiştir. Sıvılaşma parametreleri ile boru hasarları arasındaki hasar ilişkilerinin analizi literatürde ilk olma özelliği taşımaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER:

Gömülü Boru Hatları, Hasar Analizleri, Deprem, Sıvılaşma

ABSTRACT

DAMAGE ASSESMENT OF BURIED PIPELINE SYSTEMS UNDER SEISMIC EFFECTS

PH. D THESIS

ENGİN NACAROĞLU

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ABDULLAH CEM KOC)

DENİZLİ, FEBRUARY 2017

Pipelines in locations with permanent displacement (liquefaction, lateral spreading, etc.) were severely damaged as seen in past. Likewise, pipelines were damaged in high quantities due to lateral spreading and liquefaction caused by the Canterbury earthquake sequence in New Zealand. In this study damage analyzes of buried pipelines were evaluated under seismic effects. The Canterbury earthquake series is an earthquake sequence in New Zealand that began in the 4th of October 2010 Darfield earthquake (7.1 Mw) and has many repeated massive earthquakes and thousands of aftershocks.

In this thesis, the effect of Christchurch earthquake on the buried pipelines of 22 February 2011 (Mw 6.2), one of the biggest earthquakes of the Canterbury earthquake series, was investigated. These surveys were calculated with lateral ground strains and angular distortion parameters using with horizontal ground movements and vertical ground movements. Horizontal ground movements were obtained with three different remote sensing methods (Laser imaging detection and ranging (LiDAR), aerial photograph and satellite measurements) and four different horizontal ground motion data sets (LiDAR 4 m, LiDAR 56 m, aerial photographs and satellite measurements). These four different data sets were examined and the differences between the methods have been revealed. Lateral strains were obtained from the horizontal ground movements and the damage relationships were calculated. In the case of vertical ground movements, only the data set obtained from the LiDAR method was used to calculate the angular distortion parameter and then the damage relations were analyzed.

The study also assessed the impact of liquefaction caused by Christchurch earthquake on buried pipelines with three different liquefaction parameters called liquefaction potential index (LPI), calculated one-dimensional settlement (S_{VID}) and liquefaction severity number (LSN). Calculation of damage analyzes between liquefaction parameters and pipeline damage is the first in the literature.

KEYWORDS: Buried Pipeline, Damage Relationships, Earthquake, Liquefaction

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	x
SEMBOL LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	4
1.2 Literatür Özeti	5
1.3 Organizasyon	7
2. CHRISTCHURCH DEPREMİNİN (22 ŞUBAT 2011) İÇME SUYU BORULARINA ETKİSİ	9
2.1 Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD)	14
2.2 Boru Hattı ve Hasarları Veri Tabanı	19
2.3 Avonside Çalışma Bölgesi	25
3. YER DEPLASMANLARI ÖLÇÜM METODLARI	27
3.1 Lazer Görüntüleme Algılama ve Sınırlama (LiDAR) Ölçümleri Veri Tabanı	27
3.2 Hava Fotoğrafları	32
3.3 Uydu Ölçümleri.....	34
3.4 Referans Ölçümleri (Benchmarks).....	35
3.5 Yer Deplasman Ölçüm Metotlarının Farkları	37
3.5.1 LiDAR, Hava Fotoğrafı ve Uydu Ölçümleri Farkları	37
3.5.2 Belirli Hatlar Kullanarak Yer Deplasman Ölçüm Metotları Farkları	44
3.6 Yatay Şekil Değiştirmeler	51
3.7 Düşey Yer Hareketleri ve Oturmaya Bağlı Açısal Değişim	58
4. SIVILAŞMA PARAMETRELERİ	60
4.1 Hava Fotoğrafı ve Arazi Gözlemleri İle Oluşturulan Sıvılaşma Bölgesi	63
4.2 CPT Yardımıyla Oluşturulmuş Sıvılaşma Bölgeleri.....	65
4.2.1 Sıvılaşma Tetikleme Metotları	66
4.2.1.1 Robertson ve Wride (1998) Sıvılaşma Tetikleme Metodu	67
4.2.1.2 Moss ve Seed (2006) Sıvılaşma Tetikleme Metodu	68
4.2.1.3 Idriss ve Boulanger (2008) Sıvılaşma Tetikleme Metodu.....	68
4.2.1.4 Boulanger ve Idriss (2014) Sıvılaşma Tetikleme Metodu.....	68
4.2.2 Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI)	72
4.2.3 Hesaplanmış Bir Boyutlu Oturma (S _{VID})	75
4.2.4 Sıvılaşma Şiddeti Katsayısı (LSN)	78
5. HASAR İLİŞKİLERİ	83
5.1 Giriş.....	83

5.2 Yer Deplasman Ölçüm Metotları Kullanılarak Elde Edilen Hasar İlişkileri.....	85
5.2.1 Yatay Yer Hareketleri Ölçüm Metotları Kullanılarak Elde Edilen Hasar İlişkileri.....	85
5.2.2 Düşey Yer Hareketleri Kullanılarak Elde Edilen Hasar İlişkileri	94
5.3 Sıvılaşma Parametreleri Kullanılarak Elde Edilen Hasar İlişkileri	96
6. SONUÇLAR.....	108
7. KAYNAKLAR	113
8. ÖZGEÇMİŞ.....	122



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Depremi oluşturduğu KYD sonucunda zemin-boru etkileşimi (O'Rourke 1998).....	2
Şekil 1.2: Yeni Zelanda, Christchurch şehri ve Mw=6.2 22 Şubat 2011 Christchurch depremi dış merkezi ve Avonside bölgesi (Toprak ve diğ. 2015a).	3
Şekil 1.3: Avonside bölgesi için LiDAR ve hava fotoğraflarının, boru hatları ve hasarlar ile birlikte gösterilmesi (Toprak ve diğ. 2014).....	4
Şekil 2.1: Canterbury Deprem Dizisindeki depremlerin merkez üsleri (GNS 2013).	10
Şekil 2.2: Tekrarlı sıvılaşmanın aynı yerde farklı depremlere göre etkisi (Quigley ve diğ. 2013)	11
Şekil 2.3: Christchurch şehrinde örnek bir jeolojik kesit bölgesi (Tonkin ve Taylor 2011)	12
Şekil 2.4: Christchurch şehri jeolojik kesit örneği (Tonkin ve Taylor 2011)	13
Şekil 2.5: Christchurch Depreminden sonra Canterbury Televizyon Binası....	14
Şekil 2.6: NZGD ana sayfası	15
Şekil 2.7: Canterbury Haritaları ve alt bölümleri	16
Şekil 2.8: 22 Şubat 2011 Christchurch Depremi'nin tetiklediği sıvılaşma ve yanıl yayılmanın yer yüzeyindeki gözlemlerin dağılımı.....	17
Şekil 2.9: CPT yapılan noktalara örnek bir alan.....	18
Şekil 2.10: Örnek CPT verisi.....	18
Şekil 2.11: Örnek CPT verisi (zemin sınıflandırılması ve CPT sonuç grafikleri)	19
Şekil 2.12: Christchurch Boru Hattı ve Boru Hasarları	21
Şekil 2.13: Canterbury Deprem dizisi esnasında oluşan boru hasarları (Black 2013)	22
Şekil 2.14: AC tipi borularda kırılma (Black 2013, fotoğraf; F. O'Callaghan)	23
Şekil 2.15: Christchurch Depremi için boru hatları, farklı tipteki boru hasarları, sıvılaşma ve LiDAR ölçüm bölgesi ile çalışma bölgesi haritası....	23
Şekil 2.16: Avonside bölgesi farklı tipteki boru hattı ve boru hasarları	26
Şekil 3.1: Havadan (Airborne) tarama	28
Şekil 3.2: Yersel (terrestrial) tarama (Kertsen 2004)	28
Şekil 3.3: Mobil tarama (Kara ve deniz)	29
Şekil 3.4: Hava LiDAR sistemi çalışma prensibi	30
Şekil 3.5: LiDAR ölçüm bölgesi ve Avonside çalışma bölgesi.....	31
Şekil 3.6: Hava fotoğrafı ölçüm noktaları ve hava fotoğrafı ölçüm bölgesi.....	33
Şekil 3.7: Uydu Ölçümleri Bölgesi (Rathje ve Franke 2015).....	35
Şekil 3.8: Referans noktası ölçümü (http://apps.linz.govt.nz/gdb/index.aspx?nextform=image&image_id=108377&mode=&sessionid=115555239158881397733794&code=BDVB).	36
Şekil 3.9: Benchmark ölçümleri.	36

Şekil 3.10: Hava Fotoğrafi LiDAR 56 m deplasmanları.	37
Şekil 3.11: Hava Fotoğrafi LiDAR 4 m deplasmanları.	38
Şekil 3.12: Hava Fotoğrafi Uydu Ölçümleri deplasmanları.	39
Şekil 3.13: Uydu Ölçümleri LiDAR 56 m deplasmanları.	39
Şekil 3.14: Uydu Ölçümleri LiDAR 4 m deplasmanları.	40
Şekil 3.15: LiDAR 56 m LiDAR 4 m deplasmanları.	41
Şekil 3.16: LiDAR 56 m deplasman dağılımı.	42
Şekil 3.17: LiDAR 4m deplasman dağılımı.	42
Şekil 3.18: Hava fotoğrafı deplasman dağılımı.	43
Şekil 3.19: Uydu ölçümleri deplasman dağılımı.	43
Şekil 3.20: Çalışma bölgesinde belirlenen hatlar, uydu ölçüm bölgesi, Benchmarks, LiDAR 56 m ve hava fotoğraf ölçümleri.	45
Şekil 3.21: Hat 1 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları.....	46
Şekil 3.22: Hat 2 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları.....	46
Şekil 3.23: Hat 3 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları.....	47
Şekil 3.24: Hat 4 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları.....	47
Şekil 3.25: Hat 5 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları	48
Şekil 3.26: Hat 6 için Hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, Uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları.....	48
Şekil 3.27: Hat 7 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları.....	49
Şekil 3.28: Hat 8 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları	49
Şekil 3.29: Hat 9 için Hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, Uydu görüntüleri, LiDAR 4mx4m ve Referans (Benchmarks) deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları.....	50
Şekil 3.30: Hat 10 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri, LiDAR 4mx4m ve Referans (Benchmarks) deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları.....	50
Şekil 3.31: Yatay yer değiştirmeler yardımıyla yatay şekil değiştirmelerin ve asal şekil değiştirmelerin hesaplanma süreci	51
Şekil 3.32: Boru doğrultusunda ve bu doğrultuya dik şekil değiştirmelerin gösterimi.	52
Şekil 3.33: LiDAR 56 m yatay şekil değiştirme haritası	54
Şekil 3.34: LiDAR 4 m yatay şekil değiştirme haritası	54
Şekil 3.35: Hava fotoğrafı yatay şekil değiştirme haritası.....	55
Şekil 3.36: Uydu ölçümleri yatay şekil değiştirme haritası	55

Şekil 3.37: Veri setlerinin doğruluğu ve kesinliği.	56
Şekil 3.38: Veri setlerinin doğruluğu ve kesinliği.	57
Şekil 4.1: Niigata depremi sonrası sıvılaşma etkisiyle zarar gören yapılar (Japan National Committee on Earthquake Engineering 1965). ...	60
Şekil 4.2: Sıvılaşma Süreci	61
Şekil 4.3: Christchurch şehrinde Canterbury deprem dizisi sonrasında sıvılaşma ile ilgili arazi hasarları ve yerleşim yapılarındaki hasarlar (Van Ballegooy ve diğ. 2014 ^a).....	62
Şekil 4.4: Sıvılaşma sebebiyle meydana gelen boru hasarları (O'Callaghan 2014)	63
Şekil 4.5: 22 Şubat 2011 Depremi için Hava Fotoğraflarının Yorumlanmasıyla Oluşturulan Sıvılaşma Haritası (Canterbury Geotechnical Database 2013)	65
Şekil 4.6: CRR ve q_{1NCS} 'ye bağlı $P_L = \%15$, $\%50$ ve $\%85$ eğrileri (Boulanger ve Idriss 2014).	71
Şekil 4.7: Christchurch depremi için boru hasarları ve $P_L = \%15$ LPI haritası .	74
Şekil 4.8: Christchurch depremi için boru hasarları ve $P_L = \%50$ LPI haritası .	74
Şekil 4.9: Christchurch depremi için boru hatları, hasarları ve $P_L = \%85$ LPI haritası.....	75
Şekil 4.10: Çeşitli Sıvılaşma için faktörlerine karşılık gelen hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirme (Ishihara ve Yoshimine 1992) ..	76
Şekil 4.11: Christchurch depremi için boru hasarları ve $P_L = \%15$ S_{VID} haritası..	77
Şekil 4.12: Christchurch depremi için boru hasarları ve $P_L = \%50$ S_{VID} haritası..	77
Şekil 4.13: Christchurch depremi için boru hasarları ve $P_L = \%85$ S_{VID} haritası..	78
Şekil 4.14: Arazi hasar gözlemleriyle LSN arasındaki ilişkiler (Tonkin ve Taylor 2015, Van Ballegooy ve diğ. 2015 ^b)	80
Şekil 4.15: Christchurch depremi için boru hasarları ve $P_L = \%15$ LSN haritası..	81
Şekil 4.16: Christchurch depremi için boru hasarları ve $P_L = \%50$ LSN haritası..	81
Şekil 4.17: Christchurch depremi için boru hasarları ve $P_L = \%85$ LSN haritası..	82
Şekil 5.1: Yatay yer hareketleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri akış diyagramı	87
Şekil 5.2: AC tipi borular için Avonside Bölgesi ile Christchurch bölgesi hasar ilişkileri	88
Şekil 5.3: CI tipi borular için Avonside Bölgesi ile Christchurch bölgesi hasar ilişkileri	88
Şekil 5.4: AC tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m, LiDAR 56 m ve uydu ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri.....	89
Şekil 5.5: CI tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m, LiDAR 56 m ve uydu ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri.....	90
Şekil 5.6: AC tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri (en büyük asal yatay yer değiştirme, boruya paralel ve boruya dik)	91

Şekil 5.7: CI tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri (en büyük asal yatay yer değiştirme, boruya paralel ve boruya dik)	92
Şekil 5.8: AC tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 56m ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri (en büyük asal yatay yer değiştirme, boruya paralel ve boruya dik)	93
Şekil 5.9: CI tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 56m ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri (en büyük asal yatay yer değiştirme, boruya paralel ve boruya dik)	93
Şekil 5.10: Düşey yer hareketleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri akış diyagramı	95
Şekil 5.11: Avonside bölgesinde AC ve CI tipi borular için düşey yer hareketleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri.....	96
Şekil 5.12: Sıvılaşma parametreleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri akış diyagramı	98
Şekil 5.13: AC tipi borular için LPI %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	99
Şekil 5.14: CI tipi borular için LPI %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	100
Şekil 5.15: PVC tipi borular için LPI %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	101
Şekil 5.16: AC tipi borular için S_{VID} %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	102
Şekil 5.17: CI tipi borular için S_{VID} %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	102
Şekil 5.18: PVC tipi borular için S_{VID} %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	103
Şekil 5.19: AC tipi borular için LSN %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	104
Şekil 5.20: CI tipi borular için LSN %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	104
Şekil 5.21: PVC tipi borular için LSN %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	105
Şekil 5.22: LPI parametresi kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri.....	106
Şekil 5.23: S_{VID} parametresi kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	106
Şekil 5.24: LSN parametresi kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri	107

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Yeni Zelanda Deprem Dizisindeki bazı büyük depremler (Tonkin ve Taylor 2013)	9
Tablo 2.2: Canterbury Deprem Dizisi boyunca kaydedilmiş PGA değerleri (Bray ve diğ. 2013)	10
Tablo 2.3: Tüm Christchurch bölgesi için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları	24
Tablo 2.4: Yalnızca sivilaşma bölgesi için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları	24
Tablo 2.5: Sivilaşma bölgesi dışı bölge için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları.....	24
Tablo 2.6: Avonside bölgesi için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları	25
Tablo 4.1 : Sivilaşma haritasının sınıfları.....	64
Tablo 4.2 : Boulanger - Idriss (2014) metodu için giriş parametreleri (Tonkin ve Taylor 2015)	71
Tablo 4.3 : LPI sınırları	73

KISALTMALAR

AAM	: Avustralya Hava Haritacılığı
AC	: Asbestli Çimento
AI	: Arias Şiddeti
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
CCC	: Christchurch Şehir Komisyonu
CERA	: Canterbury Deprem İyileştirme Komisyonu
CES	: Canterbury Deprem Dizisi
CGD	: Canterbury Geoteknik Veri Tabanı
CI	: Dökme Demir
CLS	: Beton Kaplamalı Çelik
CPT	: Konik Penetrasyon Deneyi
CRR	: Çevrimsel Kayma Mukavemeti Oranı
CSR	: Çevrimsel Kayma Gerilmesi Oranı
DB	: Doğu-Batı
DI	: Düktil Dökme Demir
FC	: İnce Dane Oranı
GNS	: Jeolojik ve Nükleer Bilimler Enstitüsü
GYD	: Geçici Yer Deformasyonu
KG	: Kuzey-Güney
KYD	: Kalıcı Yer Deformasyonu
LADWP	: Los Angeles Su ve Elektrik İdaresi
LINZ	: Yeni Zelanda Arazi Bilgileri
LiDAR	: Light Detection and Ranging (Lazer Görüntüleme Algılama ve Sınırlama)
LPI	: Sıvılaşma potansiyeli indeksi (Liquefaction Potential Index)
LSN	: Sıvılaşma şiddeti katsayısı (Liquefaction Severity Number)
MMI	: Mercalli İndeksi
M_w	: Moment Büyüklüğü
MWD	: Metropolitan Su Kuruluşu
NZAM	: Yeni Zelanda Hava Haritacılığı
NZGD	: Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı
PGA	: En Büyük Yer İvmesi
PGD	: En Büyük Yer Deformasyonu
PGV	: En Büyük Yer Hızı
PVC	: Polivinil Klorür
SA	: Spektral İvme
SCIRT	: Daha Güçlü Christchurch Altyapı İnşa Takımı
SI	: Spektrum Şiddeti
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
S_{V1D}	: Hesaplanmış Bir Boyutlu Oturma (One-dimensional Volumetric Reconsolidation Settlement)
UPVC	: Plastik Olmayan Polivinil Klorür

SEMBOL LİSTESİ

s_d	: Eğim Atılım
s_s	: Yanal Atılım
s_v	: Düşey Yer Değiştirme
s_h	: Yatay Yer Değiştirme
ϵ_x	: Doğu-Batı yönündeki şekil değiştirme
ϵ_y	: Kuzey-Güney yönündeki şekil değiştirme
ϵ_ξ	: Boru doğrultusunda şekil değiştirme
ϵ_η	: Boruya dik doğrultudaki şekil değiştirme
$\epsilon_{1,2}$	: En büyük asal şekil değiştirmeler
ϵ_η	: Yatay şekil değiştirme
u	: Doğu-Batı yönündeki yer değiştirme
v	: Kuzey-Güney yönündeki yer değiştirme
β	: Oturmaya bağlı açısal değişim
d_v	: Düşey yer değiştirme
l	: İki ölçüm noktası arası yatay uzaklık
F	: Sıvılaşmaya karşı güvenliğe bağlı katsayı
FS	: Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı
$w(z)$	: Derinlik ağırlık faktörü
z	: Derinlik
ϵ_v	: Hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirme
RR	: Onarım Oranı
p_l	: Sıvılaşma tetikleme olasılığı
x	: Eleme kriteri

ÖNSÖZ

Bu çalışmada sismik etkiler altındaki gömülü boru hatlarında hasar analizleri değerlendirilmesi yapılmıştır. Boru hasarları üzerinde yeni hasar ilişkileri geliştirilmiştir. Ayrıca farklı uzaktan algılama metotları karşılaştırmaları yapılmıştır.

Doktora eğitimim boyunca öğrenimimde bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım tez danışmanım Doç. Dr. Abdullah Cem KOÇ'a ve Prof. Selçuk TOPRAK'a teşekkürlerimi sunmaktan mutluluk duyarım. Çalışmalarımdayken yardımlarını esirgemeyen jüri üyelerim Doç. Dr. Ayşe EDİNÇLİLER, Doç. Dr. Devrim ALKAYA, Yrd. Doç. Dr. Mehmet Rıfat KAHYAOĞLU ve Yrd. Doç. Dr. Sefer Beran ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca desteklerini her zaman yanımda hissettiğim Doç. Dr. Özgür BAŞKAN, Araş. Gör. Ali KALKAN, Öğr. Gör. Yasemin MANAV, Araş. Gör. Gökhan İMANÇLI ve diğer beraber çalıştığım arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tezde kullanılan verilerin elde edilmesinde ve çeşitli yardımlarından ötürü Prof. Dr. Thomas Dennis O'Rourke, Prof. Dr. Masanori Hamada, Dr. Sjoerd van Ballegooy, Prof. Dr. Ellen Rathje ve Dr. Dimitra Bouziou'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak hayatım boyunca bana her konuda her zaman destek olan başta annem Zerrin ERAYMAN olmak üzere aileme ve bana verdiği destek ile gösterdiği anlayıştan ötürü eşim Damla NACAROĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Mart 2017

Engin NACAROĞLU

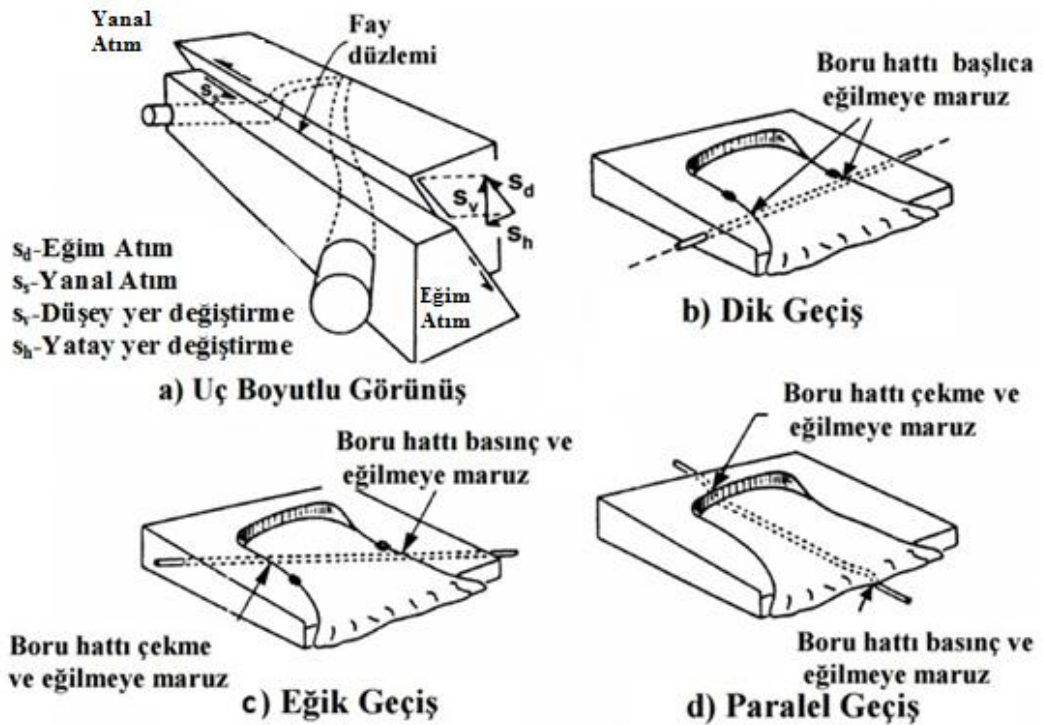
1. GİRİŞ

Depremlerin altyapı sistemlerine verdiği hasarlar en az üstyapılara verdiği hasarlar kadar önemlidir. Geçmişte yaşanan büyük depremler (Northridge 1994, Kobe 1995, Chi-Chi 1999, Kocaeli 1999, Şili 2010, Tohoku 2011, Emilia 2012) altyapıya büyük zarar vermiştir. Örneğin 1994 Northridge depremi, 1906 San Fransisco depreminden beri Amerika Birleşik Devletleri'nde bir su dağıtım şebekesinde meydana gelen en büyük zararı vermiştir. 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde Northridge depremine benzer şekilde altyapı çok büyük zarar görmüştür. Aynı şekilde Yeni Zelanda'da 2010 yılında başlayan ve arka arkaya gerçekleşen depremlerde içme ve atık su sistemleri çok ciddi hasarlar görmüştür. 7.1 Mw 4 Eylül 2010 Darfield, 6.2 Mw 22 Şubat 2011 Christchurch, 5.6 ve 6.0 Mw (80 dakika arayla) 13 Haziran 2011, 5.8 ve 5.9 Mw 23 Aralık 2011 (80 dakika arayla) gerçekleşen bu depremlere literatürde Canterbury deprem dizisi (CES) ismi verilmektedir. Canterbury deprem dizisi sırasında gömülü boru hatlarının performansı, yüksek seviyede yer hareketi ile tekrarlayan depremlere eşlik eden yanal yayılma, oturmalar ve ciddi sıvılaşma etkisinde olan altyapı sistemlerinin kritik davranışlarının değerlendirilmesi için eşsiz bir çalışma alanı sağlamaktadır.

Sismik etkiler altında gömülü boru hatlarında hasar analizleri; olası gelecek depremler için acil müdahale, risk yönetimi ve zarar hafifletme gibi çeşitli amaçları içeren hasar tahmin çalışmaları içerisinde yer almaktadır. Gelecek depremler hakkında depremlerin altyapıya verdiği zararların anlaşılması ve altyapının nasıl davranabileceği hakkında bize yol göstermesi açısından büyük önem arz etmektedir.

Depremler, gömülü boru hatlarına kalıcı yer deformasyonları (KYD), geçici yer deformasyonları (GYD) veya her iki şekilde zarar vermektedirler. Geçici yer deformasyonları, deprem dalgalarının geçişi esnasında oluşan zeminin dinamik tepkisi iken; kalıcı yer deformasyonları deprem sonrasında zeminde oluşan ve geri dönmeyen son yer değiştirmelerdir. Kalıcı yer deformasyonlarına örnek olarak fay hatlarının hareketleri, şev kaymaları, sıvılaşma sonucu oluşan yer değiştirmeler ve kohezyonsuz zeminlerde oluşan farklı oturmalar verilebilir. Şekil 1.1' de depremin oluşturduğu KYD etkisi altındaki bir boru hattının maruz kalabileceği belli başlı

yüklemeler şekilleri görülmektedir. Literatürde birçok hasar analizleri çalışmasında, geçici yer deformasyonları sonucu oluşan çeşitli sismik parametreler ile gömülü boru hatları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Aynı şekilde kalıcı yer deformasyonları etkisiyle oluşan farklı parametrelerle de hasar analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada, hasar analizleri; deprem sonrası oluşan yatay ve düşey yer deplasmanları yardımıyla hesaplanan yatay şekil değiştirme ve açısal dönme parametreleriyle, boru hasar ilişkilerinde kırılma oranı doğru bir şekilde ifade eden onarım oranı (RR) arasında hesaplanmıştır. Ayrıca bu çalışmayla ilk kez bazı sınıflama parametreleriyle onarım oranı (RR) arasında hasar ilişkisi geliştirilmiştir.



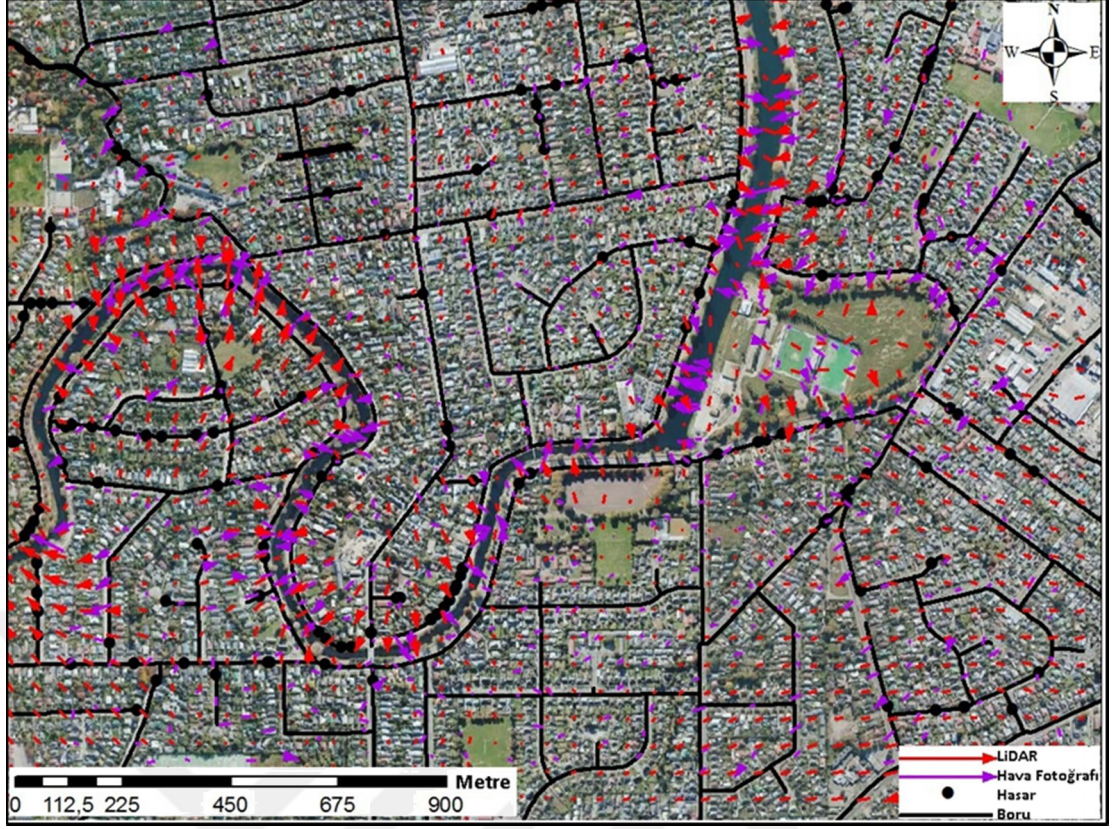
Şekil 1.1: Depremi oluşturduğu KYD sonucunda zemin-boru etkileşimi (O'Rourke 1998).

Deprem sonrası oluşan yatay ve düşey yer deformasyonlarını son yıllarda hızlı bir şekilde gelişen çeşitli uzaktan algılama metotları ile ölçmek mümkündür. Tez kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depremi için çeşitli uzaktan algılama metotları ile yatay yer deplasmanları elde edilmiştir. Bu metotlar LiDAR (Light Detection and Ranging), uydu ölçümleri ve hava fotoğrafı ölçümleridir. Bu ölçümler yardımıyla hem şekil değiştirmeler elde edilmiş hem de belirli bir çalışma bölgesinde metotlar arasında karşılaştırma yapma imkânı olmuştur. Şekil 1.2' de Yeni Zelanda, Christchurch şehri ve büyüklüğü Mw=6.2 olan 22 Şubat 2011 Christchurch

depreminin dış merkezi ile çalışma için önemli bir bölge olan Avonside çalışma bölgesi görülmektedir (Toprak ve diğ. 2015^a). O'Rourke ve diğ. (2012 ve 2014), Bouziou (2015), Christchurch depreminin boru hatlarına etkisini geniş bir bölgede incelemiştir. Tez kapsamında ise Avonside bölgesi olarak adlandırılan ve bu geniş bölgenin içinde yer alan bir bölgeye yoğunlaşmıştır. Avonside çalışma bölgesinin tercih edilme sebebi tez kapsamında kullanılan, çeşitli metotlar yardımı ile elde edilen yatay deplasman ölçümlerinin tümünün bu bölgede mevcut olmasıdır. Şekil 1.3'de ileriki kısımlarda daha detaylı şekilde açıklanacak olan Avonside çalışma bölgesi için LiDAR ve hava fotoğraflarının, boru hatları ve hasarları ile birlikte bulunduğu harita verilmiştir (Toprak ve diğ. 2014). Yaklaşık büyüklüğü 1.7x2.3 km² olan, yanal yayılma ve sıvılaşmanın çok yoğun yaşandığı Avonside bölgesi için ayrıca düşey deplasmanlar yardımıyla bulunan açısız oturumlar kullanılarak hasar ilişkileri elde edilmiştir.



Şekil 1.2: Yeni Zelanda, Christchurch şehri ve Mw=6.2 22 Şubat 2011 Christchurch depremi dış merkezi ve Avonside bölgesi (Toprak ve diğ. 2015^a).



Şekil 1.3: Avonside bölgesi için LiDAR ve hava fotoğraflarının, boru hatları ve hasarlar ile birlikte gösterilmesi (Toprak ve diğ. 2014).

O'Rourke ve diğ. (2012 ve 2014) ve Bouziou, 2015 çalışmalarında sıvılaşma bölgesi olarak hava fotoğraflarından elde edilen yorumlarla bir sıvılaşma alanını kullanmışlardır. Avonside bölgesi de tamamen bu sıvılaşma alanı içinde yer almaktadır. Avonside bölgesi dışında sıvılaşma parametrelerine bağlı olarak da farklı bir bölge için sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Bu sıvılaşma çalışma bölgesi, Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD) bünyesinde bulunan yaklaşık 18000 adet konik penetrasyon deney (CPT) verisi yardımıyla bulunan bazı sıvılaşma parametrelerinin hesaplanmasıyla oluşturulmuş bir bölgedir. Tez kapsamında bu sıvılaşma bölgesiyle ilgili çalışmalar tezin dördüncü kısmında ayrıntılı olarak değerlendirilip hasar ilişkileri incelenmiş ve analizleri yapılmıştır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Tezin birincil amacı, geliştirilecek boru hasar ilişkileri ile hem bilime katkıda bulunmak hem de altyapı sistemleri üzerinde gerçekleştirilecek uygulamalarla bir

ihtiyaca cevap vermektir. Hasar ilişkileri hesaplanırken hem literatürde boru hasarları için kullanılan bazı parametreler yardımıyla hem de bu tez kapsamında ilk kez kullanılacak olan ve depremlerin en ciddi sonuçlarından biri olan sıvılaşma parametreleriyle hasar ilişkilerinin analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tezin ikinci amacı, depremler sonucunda oluşan yer deplasmanlarını farklı ölçüm metotlarına göre karşılaştırmak ve hasar ilişkilerine etkisini göstermektir. Bu amaçla, belirli bir çalışma bölgesi için farklı yöntemlerle elde edilen yer deplasman verileri hem birbirleri ile karşılaştırılmış hem de belirli hatlar belirlenerek o hat boyunca ölçüm metotlarının verdiği sonuçlar ortaya konmuştur. Ayrıca belirli bir bölge için hesaplanmış hasar ilişkileriyle, yer ölçüm metotlarının hasar ilişkilerine etkisi araştırılmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Tezin diğer bölümlerinde o bölümle ilgili literatüre yer verilmiştir. Bu bölümde ise konuyla ilgili genel literatür özeti anlatılmıştır. Boru hattı kırılgenliğini göstermek için hesaplanan hasar ilişkileri sağlamlık ve güvenilirlik analizleri için önemli olmasının yanında bütün ileriye dönük deprem zarar tahmini çalışmalarının tamamında kullanılmaktadır (Toprak ve diğ. 2011). Hasar ilişkileri hesaplanırken onarım oranı (RR) parametresi literatürde sıklıkla kullanılan, hasarı boru uzunluğuyla normalize ederek sunan ve kırılgenlik için iyi bir gösterge parametresidir (Toprak ve diğ. 2009; Toprak ve diğ. 2011). Onarım oranı ile oluşturulan hasar ilişkileri ampirik ilişkilerdir. Literatürde boru hasarı ve bazı deprem parametrelerini kullanan çalışmalar Katayama ve diğ.'nin (1975) en büyük yer ivmesi (PGA) parametresini kullanmasıyla başlamaktadır. Katayama ve diğ. (1975), asbestli çimento (AC), ve dökme demir (CI) tipi boruların hasar ilişkilerini altı farklı deprem senaryosu için PGA parametresini kullanarak hesaplamıştır. Isoyama ve Katayama (1982) çalışmasında yine PGA parametresini kullanarak boru hasar ilişkileri analizleri yapmıştır. Eguchi (1983 ve 1991) çalışmalarında AC tipi boruların polivinil klorür (PVC) tipi borulara göre, PVC tipi boruların ise CI ve kaynaklı çelik borulara göre daha kırılgen olduğunu mercalli şiddetini (MMI) kullanarak onarım oranı yardımıyla ortaya koymuştur. Barenberg (1988) çalışmasında en büyük yer hızı

(PGV) parametresini boru hasar ilişkilerinde ilk kez kullanmıştır. Ballantyne ve diğ. (1990), Barenberg'in (1988) boru hattı hasar verisini genişletip MMI parametresini kullanarak yeni bir kırılabilirlik ilişkisi sunmuştur. O'Rourke ve Ayala (1993), Barenberg'in (1988) hasar veri noktalarını kullanarak PGV parametresiyle yeni bir hasar ilişkisi hesaplamıştır.

O'Rourke ve diğ. (1998) ve Toprak (1998), 1994 Northridge depremi sonrası coğrafi bilgi sistemine (CBS) dayanan metotlarla Los Angeles Su ve Elektrik İdare'sine (LADWP) ve Metropolitan Su Kuruluşu'na (MWD) ait suyu şehir içerisine ulaştıran iletim borularında MMI, PGA, PGV, en büyük yer deformasyonu (PGD), arias şiddeti (AI), spektral ivme (SA) ve spektrum şiddeti (SI) parametreleriyle hesaplanan hasar ilişkileri sonucunda PGV ve onarım oranı arasındaki korelasyonun en iyi sonucu verdiğini göstermişlerdir. Ayrıca Toprak ve diğ. (2007) ve Nacaroglu (2010) çalışmalarında boru hasar ilişkilerini detaylı bir şekilde incelemişlerdir.

Canterbury deprem dizisi sonrası ilk adı Canterbury Geoteknik Veri Tabanı (CGD, 2012) olan daha sonra Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD) olarak değiştirilen veri tabanı (<https://www.nzgd.org.nz>) literatürde Canterbury deprem dizisi olarak bilinen, birçok büyük ve sayısız artçı şoktan oluşan deprem dizisi verisini içermesi nedeniyle akademisyenler, mühendisler vb. kişiler tarafından eşsiz bir veri tabanı olarak tanınmaktadır. Canterbury deprem dizisiyle ilgili literatürde birçok çalışma bulunmakla beraber gömülü boru hatlarına etkisi ile ilgili de önemli çalışmalar bulunmaktadır. O'Rourke ve diğ. (2012, 2014) ve Bouziou (2015) çalışmalarında, 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin boru hasarlarına etkisini yatay ve düşey yer hareketleri yardımıyla incelemişlerdir. Toprak ve diğ. (2014, 2015^a, 2015^c, 2015^d, 2016) çalışmalarında, Avonside bölgesinde 2011 Christchurch depreminin gömülü borulara etkisini incelemişlerdir ve bu çalışmalar tezin temellerini oluşturmaktadır.

Literatürde yaygın olarak kullanılan dört farklı sınıflama tetikleme metodu bulunmaktadır. Bunlar, Robertson ve Wride (1998), Moss ve diğ. (2006), Idriss ve Boulanger (2008) ve Boulanger ve Idriss (2014) metotlarıdır. Tonkin ve Taylor (2013 ve 2015), Van Ballegooy ve diğ. (2015^a) sözü geçen dört farklı sınıflama tetikleme metodu ile hesaplanan sınıflama parametreleriyle analizler yapmış sonuç

olarak Boulanger ve Idriss (2014) metodunun en iyi sonuçları verdiğini ortaya koymuşlardır. Bu tez kapsamında Boulanger ve Idriss (2014) metodu, sıvılaşma tetikleme metodu olarak kullanılacaktır.

Tonkin ve Taylor (2013 ve 2015) çalışmalarında Canterbury deprem dizisini çok kapsamlı bir şekilde inceleyip değerlendirmişlerdir. Farklı sıvılaşma parametrelerini kullanarak Canterbury deprem dizisinin tetiklediği sıvılaşma olayını hem arazi hem de bina temelleri ile ilişkilendirip araştırmışlardır. Sıvılaşma parametreleri olarak sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI), modifiye sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI_{Ish}), hesaplanmış tek boyutlu oturma (S_{VID}) parametrelerini kullanmışlar ayrıca sıvılaşma şiddeti katsayısını (LSN) literatüre katarak LSN'nin Canterbury deprem dizisi için kullanılabilecek en uygun sıvılaşma parametresi olduğunu ortaya koymuşlardır.

Toprak ve diğ. (2017), sıvılaşma parametrelerinden sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) ile depremlerden hasar gören boru hatları arasındaki ilişkiyi literatürde ilk defa ortaya koymuşlardır. Bu ilişkiyi geliştirirken sıvılaşma tetikleme olasılığı olarak %15 kullanılmıştır.

1.3 Organizasyon

Tez çalışmasının 1. bölümünde teze ait genel bilgiler, tezin amacı, kapsamı ve literatürde yer alan çalışmaların özeti verilmiştir.

2. bölümde Christchurch depreminin (22 Şubat 2011) içme suyu dağıtım sistemi borularına etkisi araştırılmıştır. Christchurch depremiyle, Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD), boru hattı ve hasarlar ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

3. bölümde yer deplasman ölçüm metotları anlatılmış ve birbirleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

4. bölümde kullanılan sıvılaşma parametreleri hakkında bilgiler verilmiştir.

5. bölümde yer deplasmanları ve sıvılaşma parametreleri kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri sunulmuştur.

6. bölümde elde edilen sonuçların genel değerlendirilmesi yapılarak gelecek çalışmalar hakkında önerilerde bulunulmuştur.



2. CHRISTCHURCH DEPREMİNİN (22 ŞUBAT 2011) İÇME SUYU BORULARINA ETKİSİ

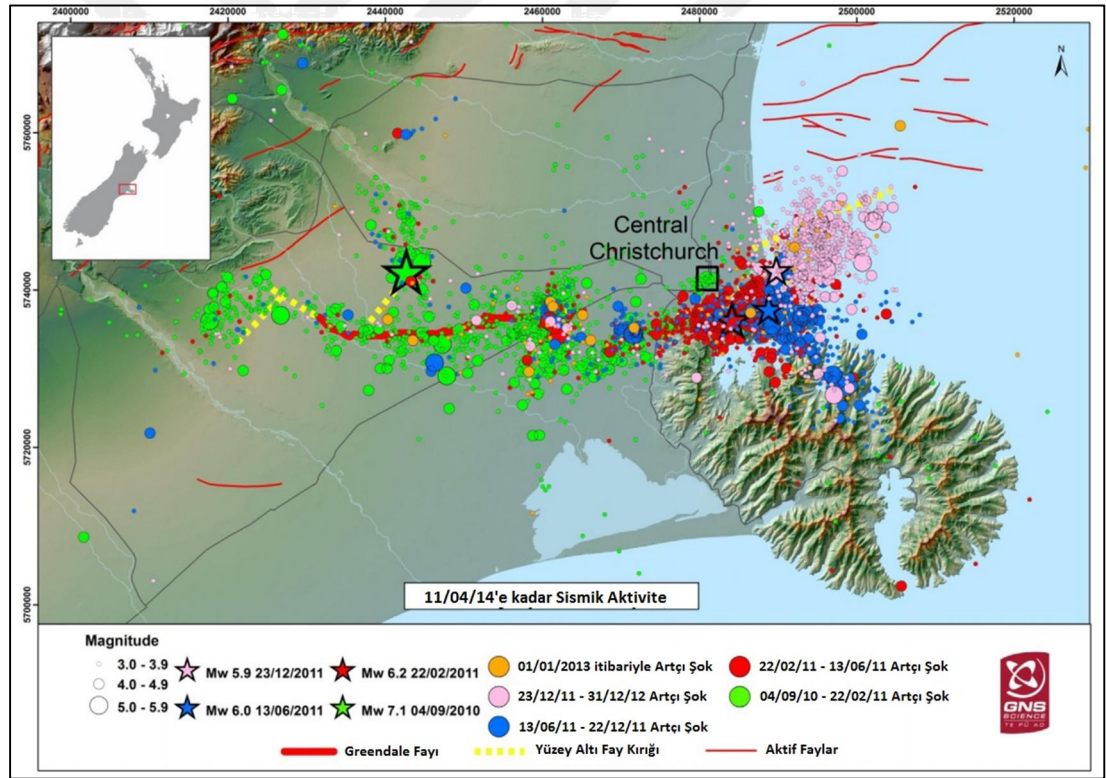
Yeni Zelanda, 04.10.2010 tarihinde büyüklüğü Mw 7.1 olan ve Darfield depremi olarak bilinen depremle başlayan ve arka arkaya gerçekleşen birçok büyük deprem ve binlerce artçı şok etkisinde kalmış, Christchurch civarında farklı bölgelerde alt ve üst yapılar ciddi hasarlar görmüştür. Bu depremler literatürde Canterbury deprem dizisi adını almaktadırlar. Canterbury deprem dizisindeki bazı büyük depremler, Tablo 2.1’de (Tonkin ve Taylor 2013) verilmiştir. Tablo 2.2’de ise Canterbury deprem dizisindeki bazı büyük depremlerin medyan PGA değerleri verilmiştir (Bray ve diğ. 2013). Ayrıca Şekil 2.1’de Darfield depremi ile başlayan deprem serisinde bulunan depremlerin merkez üsleri ve büyüklükleri görülmektedir (GNS 2013).

Tablo 2.1: Yeni Zelanda Deprem Dizisindeki bazı büyük depremler (Tonkin ve Taylor 2013)

Deprem	Tarih	Büyüklük (Mw)	Derinliği ve Yeri
Darfield Depremi (Grenndale)	04.10.2010	7.1	10 km derinliğinde, Christchurch’ün 35 km batısında
22 Şubat Christchurch Depremi (Lyttelton)	22.02.2011	6.2	5 km derinliğinde, Christchurch’ün 10 km güneydoğusunda
Artçı Deprem	16.04.2011	5.3	11 km derinliğinde, Christchurch’ün 20 km güneydoğusunda
13 Haziran Depremi	13.06.2011	5.6 ve 6 (80 dakika arayla)	9 km derinliğinde, Christchurch’ün 10 km güneydoğusunda; 6 km derinliğinde, Christchurch’ün 10 km güneydoğusunda
23 Aralık Depremi	23.12.2011	5.8 ve 5.9 (80 dakika arayla)	8 km derinliğinde, Christchurch’ün 20 km doğusunda; 6 km derinliğinde, Christchurch’ün 10 km doğusunda

Tablo 2.2: Canterbury Deprem Dizisi boyunca kaydedilmiş PGA değerleri (Bray ve diğ. 2013)

Deprem	Tarih	Büyükölük (Mw)	Medyan PGA (g)
Darfield Depremi (Grenndale)	04.10.2010	7.1	0.20
22 Şubat Christchurch Depremi (Lyttelton)	22.02.2011	6.2	0.45
Artçı Deprem	16. 4.2011	5.3	0.10
13 Haziran Depremi	13.06.2011	5.6 ve 6 (80 dakika arayla)	0.18 ve 0.21
23 Aralık Depremi	23.12.2011	5.8 ve 5.9 (80 dakika arayla)	0.17 ve 0.21



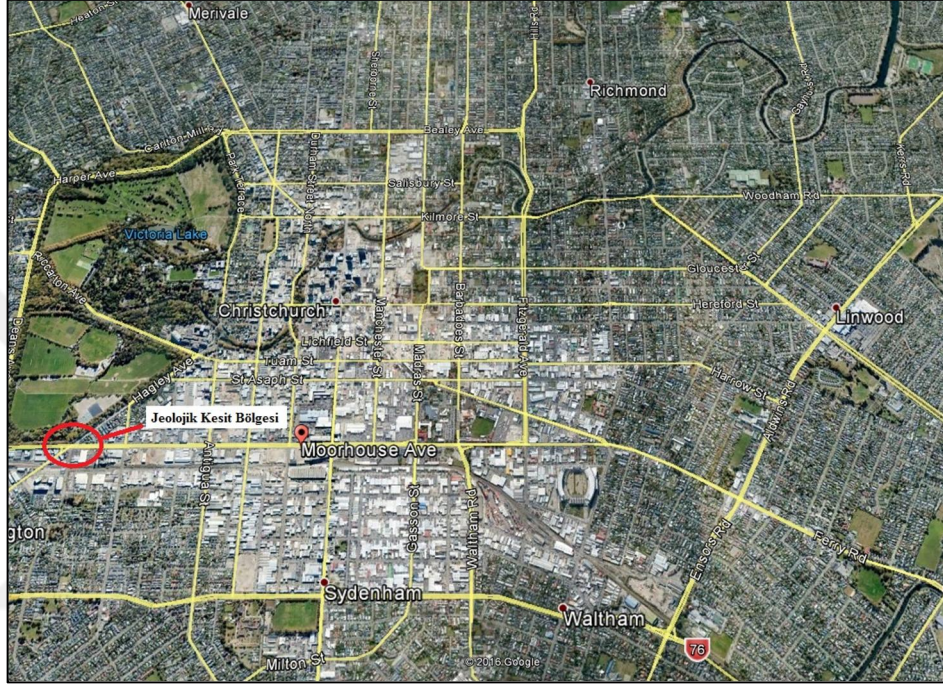
Şekil 2.1: Canterbury Deprem Dizisindeki depremlerin merkez üsleri (GNS 2013).

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. Sıvılaşma etkisiyle yaklaşık 60000 yerleşim yapısı zarar görürken şehir bölgesindeki altyapı sisteminin üçte biri etkilenmiştir. 30 milyar dolarlık (Yeni Zelanda Doları) toplam ekonomik kaybın yarısı doğrudan sıvılaşmanın verdiği hasardan kaynaklanmaktadır. Şekil 2.2’ de Canterbury deprem dizisinin neden olduğu tekrarlı sıvılaşmanın aynı yerde depremlere göre etkisi görülmektedir (Quigley ve diğ. 2013).



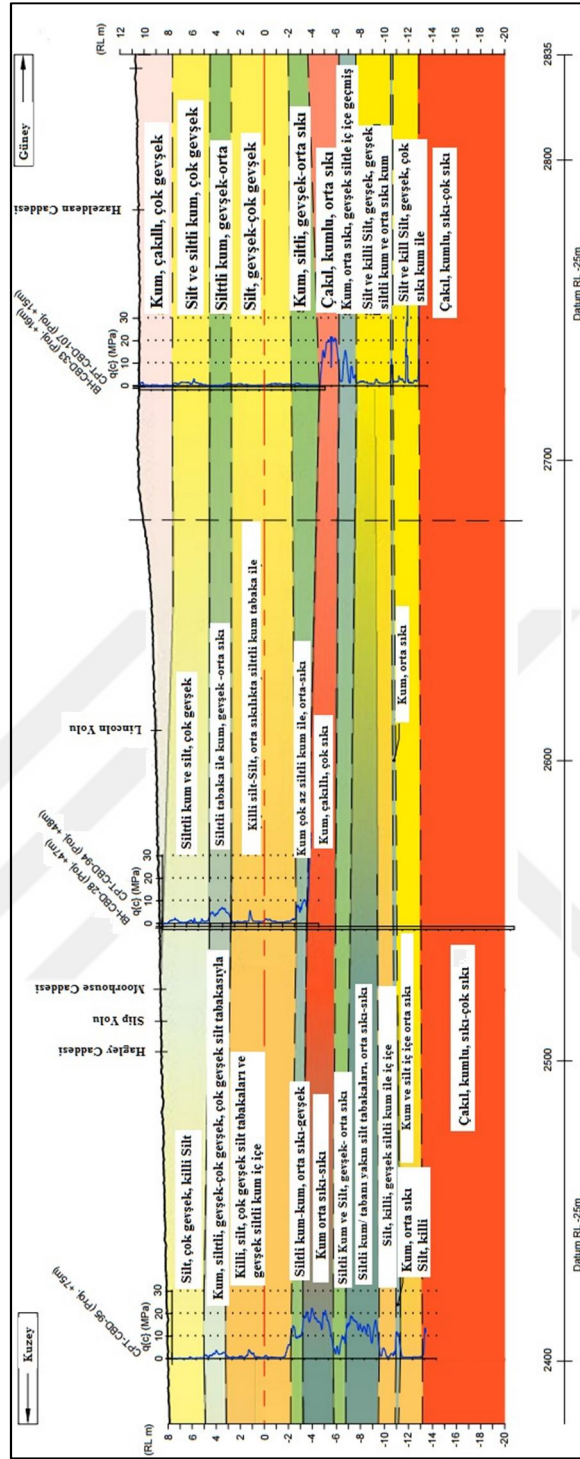
Şekil 2.2: Tekrarlı sıvılaşmanın aynı yerde farklı depremlere göre etkisi (Quigley ve diğ. 2013)

Canterbury deprem dizisi için birçok çalışma yapılmış ve halen devam etmektedir. Her bir deprem için çok sayıda veri toplanmıştır ve konu ile ilgili araştırmacılar için son yıllardaki en gözde konu olmaktadır. Sıvılaşmanın sıklıkla görüldüğü Christchurch şehri için hazırlanmış birçok jeolojik kesit örnekleri bulunmaktadır. Şekil 2.3’de, Şekil 2.4’de (Tonkin ve Taylor 2011) verilen jeolojik kesit örneğinin yapıldığı konum gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Christchurch şehrinde örnek bir jeolojik kesit bölgesi (Tonkin ve Taylor 2011)

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi Christchurch, bünyesinde sıvılaşabilir zemin diye tabir edilen kum-çakıl zemin sınıfından oluşmaktadır. Verilen jeolojik kesitin Christchurch şehri için tipik bir kesit olduğu ve Avonside bölgesini de temsil ettiği söylenebilir.



Şekil 2.4: Christchurch şehri jeojik kesit örneği (Tonkin ve Taylor 2011)

Bu çalışmada Canterbury deprem dizisi içinde yer alan, altyapı sistemlerine en büyük hasarı veren ve bu hasarlarla ilgili veri tabanına ulaşabildiğimiz için 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin gömülü boru hatlarına etkisi araştırılmıştır. Christchurch depreminin seçilmesindeki diğer önemli bir etken meydana getirdiği hasarların net olarak toplanabilmesidir. Bu konuyu daha da açıklığa kavuşturmak

istersek, 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 depremi, 22 Şubat 2011 salı günü Yeni Zelanda saatiyle 12:51'de büyüklüğü $M_w=6.2$ olan, Yeni Zelanda'nın güneydoğusunda meydana gelen bir depremdir. Depremden sonra tsunami de yaşanmış ve 185 kişi hayatını kaybetmiştir. Şekil 2.5' de Christchurch depreminin verdiği en büyük can kaybının yaşandığı (115 kişi) Canterbury Televizyon Binası görülmektedir. Christchurch depreminin içme suyuna verdiği etkiler araştırılırken bu bölümde açıklanan Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD), boru hattı ve hasarları veri tabanı ile gelecek bölümlerde açıklanan deplasman ve sıvılaşma parametreleri veri tabanlarından yararlanılmıştır.

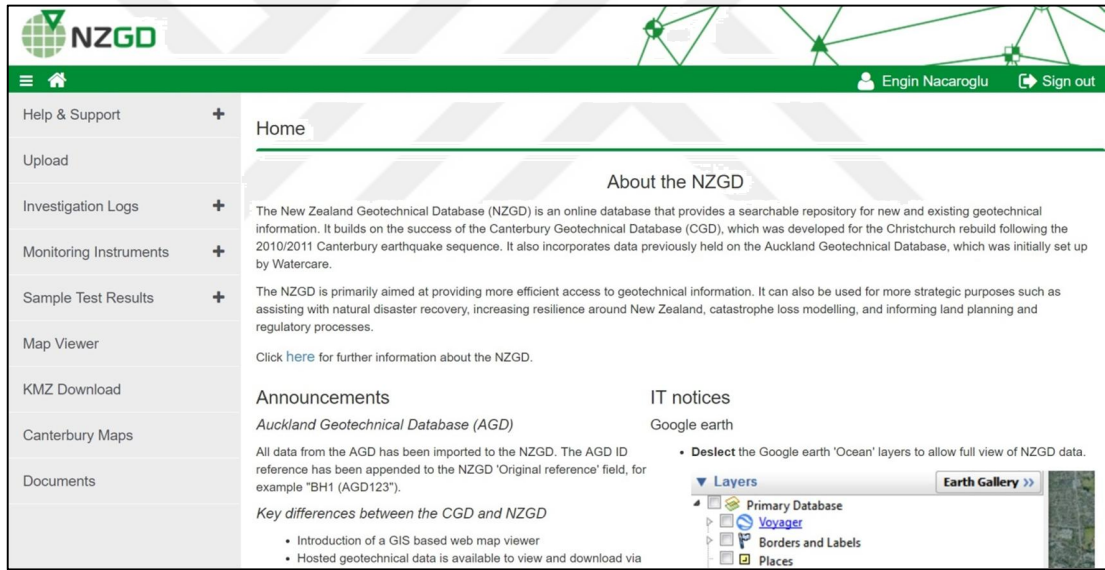


Şekil 2.5: Christchurch Depreminden sonra Canterbury Televizyon Binası

2.1 Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD)

Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD), çevrimiçi bir veri tabanı olarak geliştirilmiş olup yeni veya hâlihazırda bulunan geoteknik bilgi için seçilebilir zengin bir kaynak veri tabanına ulaşmayı sağlamaktadır. 2010/2011 Canterbury

deprem dizisinden sonra Christchurch'ün yeniden inşası için geliştirilen Canterbury Geoteknik Veri Tabanı (CGD)'nin başarısı üzerine kurulmuş olan bu veri tabanı aynı zamanda Auckland Geoteknik Veri Tabanı bilgilerini de bünyesinde tutarak birleştirmiştir. NZGD'nin öncelikli amacı daha etkili geoteknik bilgiye ulaşmayı sağlamaktır. Ayrıca Yeni Zelanda çevresinde doğal felaket iyileştirme, afet-kayıp modelleme, arazi planı bilgilendirmesi vb. daha farklı stratejik amaçlar için kullanılabilmektedir. NZGD, dünyadaki diğer veri tabanlarının aksine kamu ve özel sektörler arasında geoteknik bilgiyi paylaşmaktadır. Ocak 2016 itibariyle yaklaşık olarak 25000 Konik Penetrasyon Testi (CPT), 12000 sondaj logu, yer altı su gözlem kayıtlarını içeren 1000 piyezometre ve 6000 laboratuvar deney sonucu barındırmaktadır. Şekil 2.6'da NZGD'nin ana sayfası görülmektedir. Bu veri tabanı vasıtasıyla istenilen verilere kolaylıkla ulaşılabilmektedir. Aynı zamanda kullanıcı, veri tabanına NZGD'nin onayından geçtikten sonra veri de yükleyebilmektedir.



Şekil 2.6: NZGD ana sayfası

NZGD ana sayfasının sol tarafında Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bazı araçlar yardımıyla alt bölümlere ayrılmıştır. Tez kapsamında en çok kullanılan kısım Canterbury Maps adı verilen ve çeşitli haritalara ulaşımı sağlayan kısımdır. İçerik özeti raporları, geoteknik araştırma analizleri, toplanmış araştırma verileri ile yayınlanmış haritalar ve raporlar olmak üzere dört ana grupta harita katmanları ve tanımlarından oluşmaktadır. Şekil 2.7'de her bir katmana giriş sağlayan veri tabanı ekran çıktısı verilmiştir. Google Earth programıyla etkileşimli olarak çalışan veri

tabanı seçilen haritayı “.kmz” uzantısıyla Google Earth programıyla açarak istenilen haritaya bilgileriyle birlikte ulaşma imkânı sağlamaktadır. Dünya’da, NZGD’nin bu eşsiz ve çok kapsamlı veri tabanına, geoteknik alanında rastlanan başka bir örneği bulunmamaktadır.

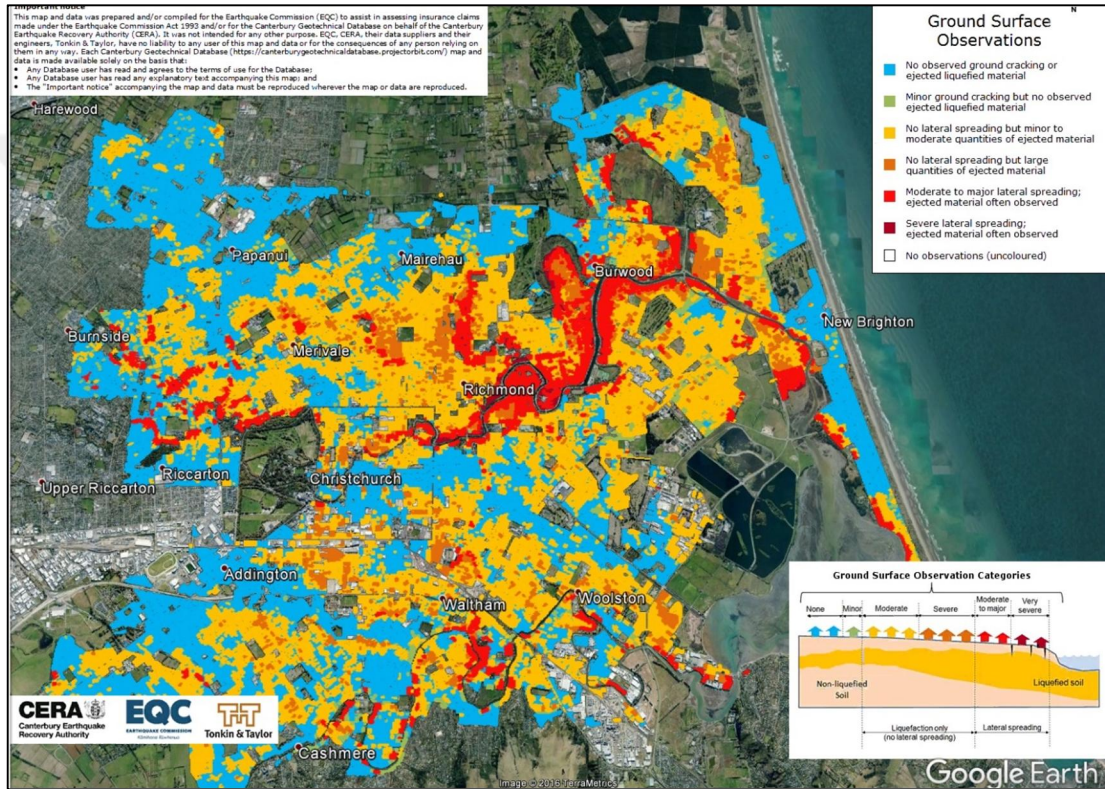
Canterbury Maps			
Map Layers and Descriptions	KMZ	Source	
Property Summary Reports			
Map Download of Property Summary Reports	View		
Geotechnical Investigation Analysis			
Liquefaction Evaluation of CPT Investigations	View		
CPT Layer Analysis and Depth of Refusal	View		
Soil Behaviour Type Index (Ic)	View		
Collated Investigation Data			
Aerial Photography	View		Earthquake Commission
Liquefaction Interpreted from Aerial Photography	View		Earthquake Commission
Liquefaction and Lateral Spreading Observations	View		Earthquake Commission
Observed Ground Crack Locations	View		Earthquake Commission
LIDAR and digital elevation models	View		Earthquake Commission
Vertical Ground Movements	View		Earthquake Commission
Horizontal Ground Movements	View		Earthquake Commission
Event Specific Groundwater Surface Elevations	View		Earthquake Commission
Borehole Logs (pre Sept 2010)	View		Environment Canterbury
CBD MASW Investigations	View		Christchurch City Council
Suburban MASW Investigations	View		Earthquake Commission
Published Maps and Reports			
CERA Residential Zoning Maps	View		Canterbury Earthquake Recovery Authority
MBIE Residential Foundation Technical Categories	View		Ministry of Business, Innovation & Employment
CCC CBD Geological Sections	View		Christchurch City Council
EQC Geological Sections (Outlying Suburbs)	View		Earthquake Commission
CCC CBD Investigative Report Areas	View		Christchurch City Council
EQC Suburban Investigative Areas (post Feb 2011)	View		Earthquake Commission
EQC Suburban Investigative Areas (pre Feb 2011)	View		Earthquake Commission
Black Maps	View		Archives New Zealand & CCC
Cadastral Boundaries (2010)	View		Territorial Authorities
Cadastral Maps (Historical)	View		Alexander Turnbull Library
Conditional PGA for Liquefaction Assessment	View		University of Canterbury
Geological Maps	View		National Library & GNS Science
Geotechnical Maps	View		Various Sources
Hazard Maps	View		Environment Canterbury
Topographic Maps	View		Various Sources
GNS Science Median Water Table Elevations (Version 2)	View		GNS Science
Ground Motion	View		Cornell University
Port Hills Mass Movements and Surface Deformations	View		GNS Science

Şekil 2.7: Canterbury Haritaları ve alt bölümleri

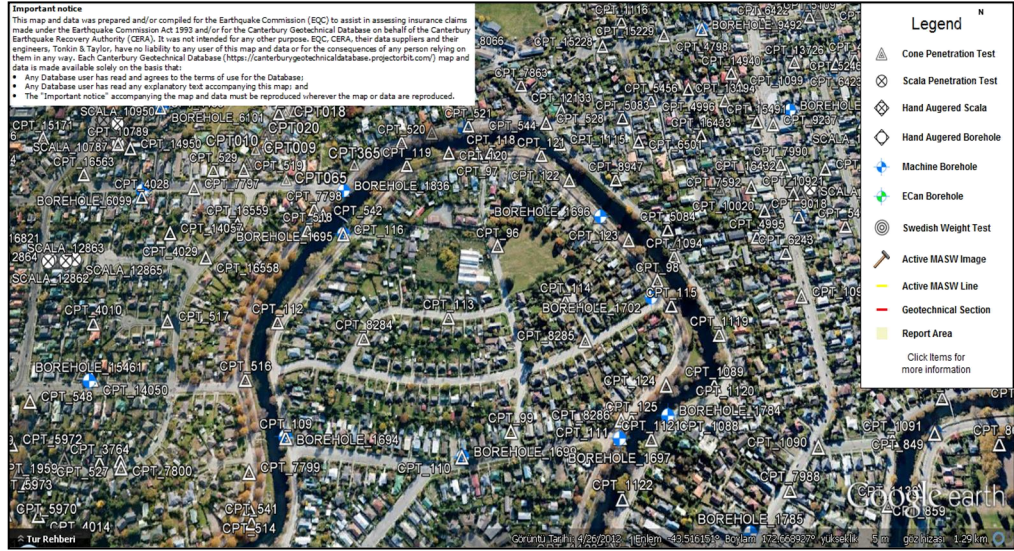
Şekil 2.8’de NZGD veri tabanına örnek olması bakımından 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin tetiklediği sıvılaşma ve yanal yayılmanın yer yüzeyindeki gözlemlerini gösteren harita verilmiştir. Bu haritaya Canterbury haritalarının alt bölümlerinden olan toplanmış araştırma verileri bölümü yardımıyla ulaşılmıştır. Hiçbir gözlem elde edilmeyen yerlerden, ciddi yanal yayılma ve yer yüzeyinden çıkan malzeme gözlemlerine kadar farklı renklerde kategorilendirilmiş olarak verilmiştir.

NZGD veri tabanının diğer bir üstün özelliği ise birçok farklı zemin sondajı yapılan yerlerin ve çeşitli geoteknik deneylerin içeriğinin kapsamlı olarak

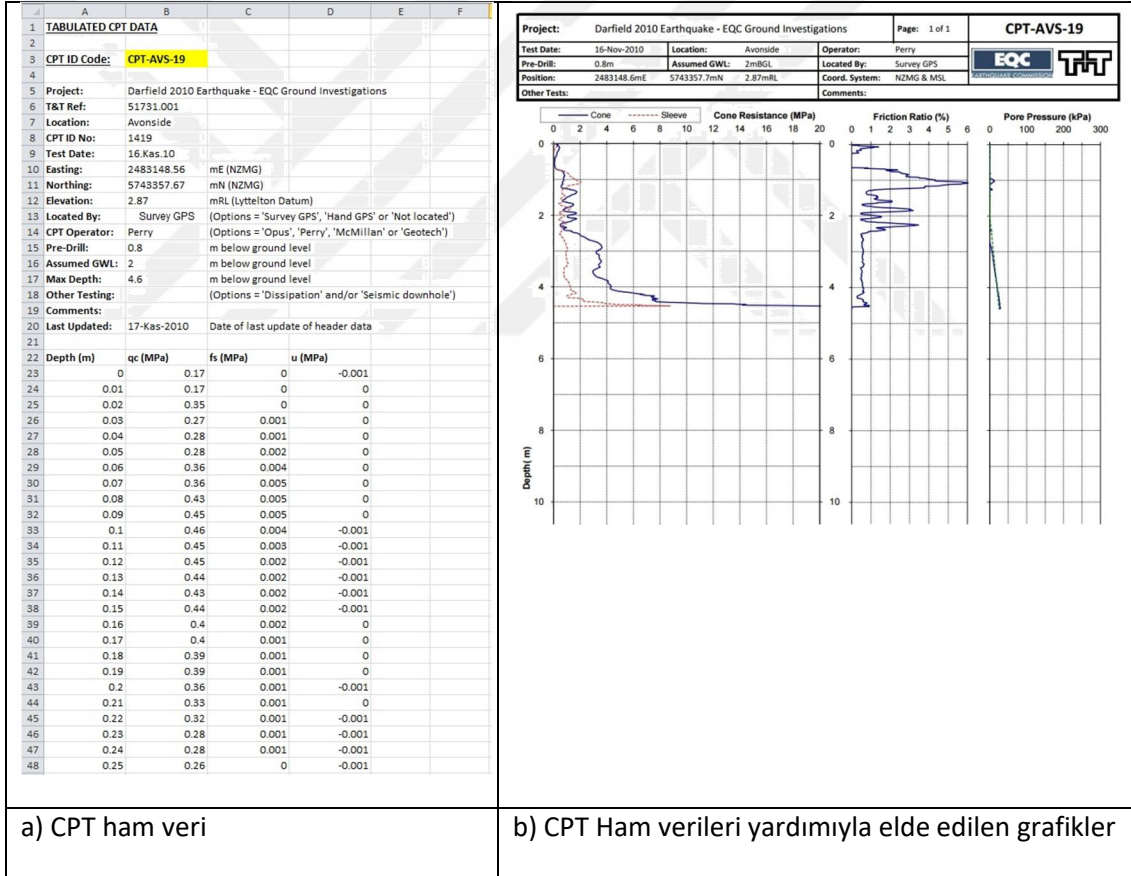
verilmesidir. Tez kapsamında bu deneylerden en çok CPT deneyi verileri yardımıyla bulunan sıvılaşma parametrelerinden yararlanılacaktır. CPT yapılan noktalarda CPT verisini ayrıntılı olarak (hem ham veriyi hem de sonuçları) kullanıcıya sunulmaktadır. Böylece CPT deneyi yardımıyla istenilen geoteknik veriler hesaplanabilmektedir. Şekil 2.9'da CPT yapılan noktalara örnek bir alan, Şekil 2.10'da ise herhangi bir CPT noktasından ulaşabilecek veriler (ham veriler ve grafikler) gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.11'de CPT yardımıyla zemin profili ve sınıfları gösterilmektedir.



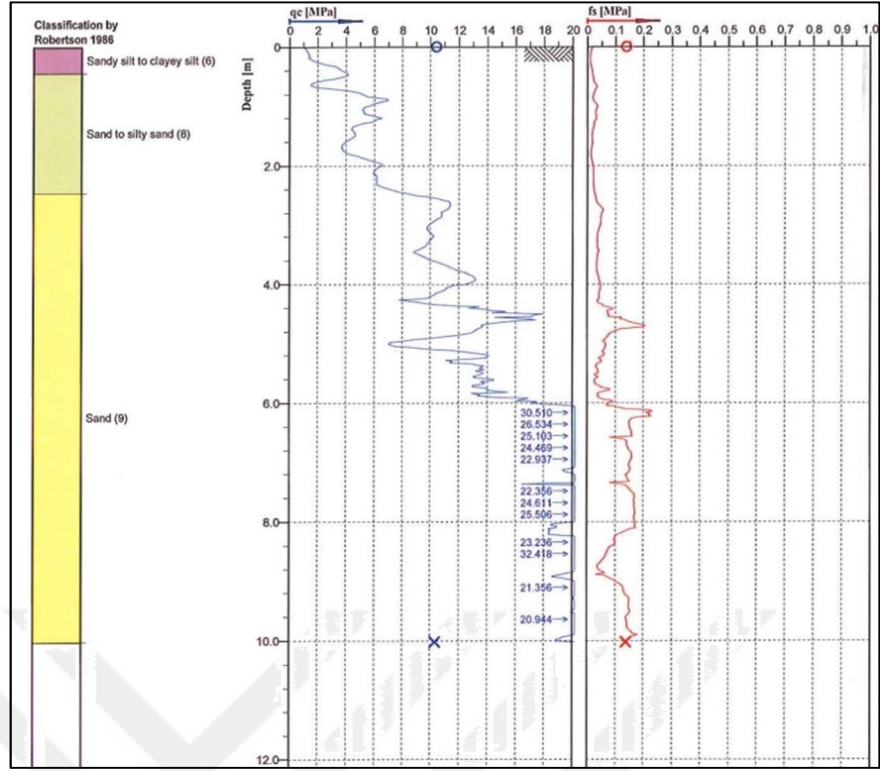
Şekil 2.8: 22 Şubat 2011 Christchurch Depreminin tetiklediği sıvılaşma ve yanal yayılmanın yer yüzeyindeki gözlemlerin dağılımı



Şekil 2.9: CPT yapılan noktalara örnek bir alan



Şekil 2.10: Örnek CPT verisi



Şekil 2.11: Örnek CPT verisi (zemin sınıflandırılması ve CPT sonuç grafikleri)

NZGD, CPT vb. geoteknik verilerin yanında bazı geçmiş büyük Canterbury deprem dizisi depremlerini (4 Eylül 2010 Darfield Depremi, 22 Şubat 2011 Christchurch depremi, 13 Haziran 2011 depremleri ve 23 Aralık 2011 depremleri) ve olası gelecek dizayn depremlerini (0.13g -Mw 7.5, 0.19g- Mw 6.2) kullanarak CPT'ye dayalı sivilaşma parametrelerini bünyesinde bulundurmaktadır. Bu kısım, 4. bölümde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

NZGD'nin bir başka önemli bölümünü ise yayınlanmış haritalar ve raporlar oluşturmaktadır. Bu bölümde geçmiş çalışmalardan derlenen raporlar ışığında oluşturulan haritalar bulunmaktadır. Bu haritalara örnek olarak Christchurch'ün 1992 ve 2008 jeolojik haritaları, geoteknik haritalar, topoğrafik haritalar ve yer hareketi haritaları vb. örnek verilebilir.

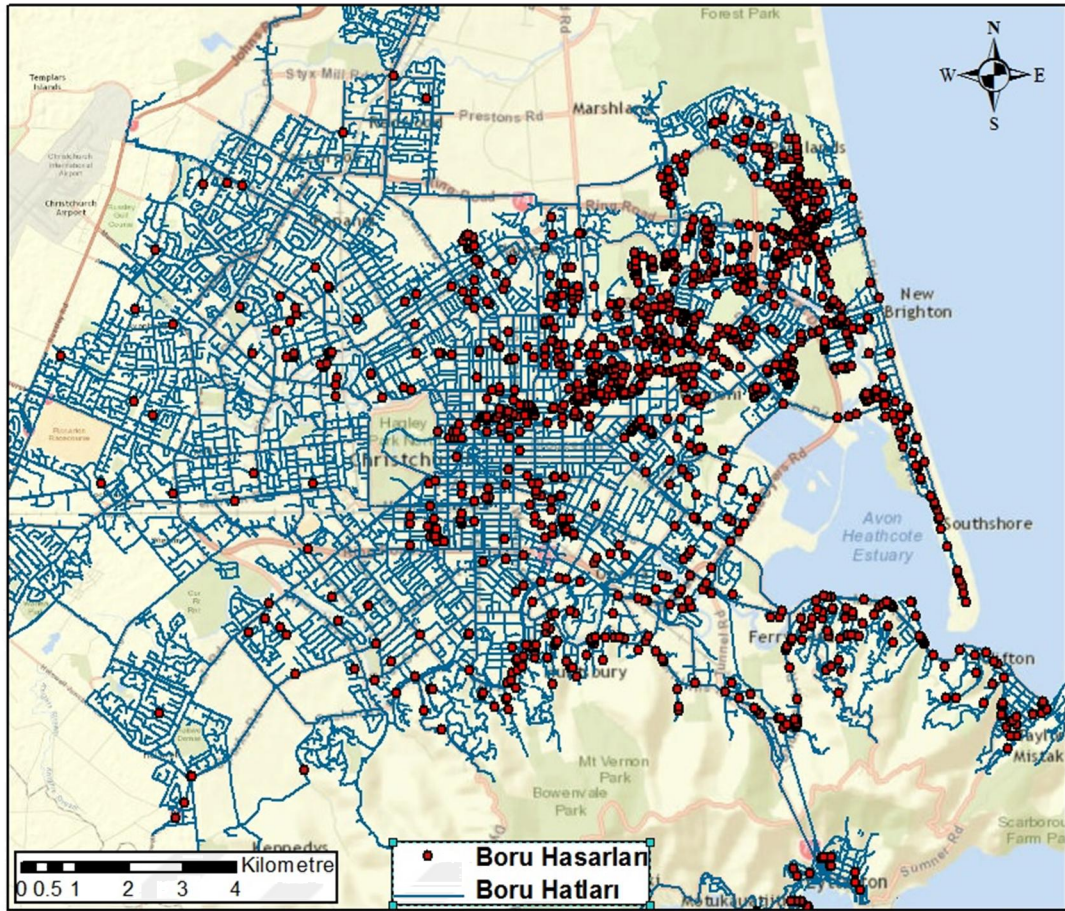
2.2 Boru Hattı ve Hasarları Veri Tabanı

Tez kapsamında boru hattı ve boru hasarları veri seti olarak dünyada çok az kişinin elinde bulunan 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sonrasında meydana

gelen boru hasar verileri ve gömülü boru sistemleri bulunmaktadır. 22 Şubat 2011 depremi öncesinde Christchurch Şehir Komisyonu (CCC) ve Daha Güçlü Christchurch Altyapı İnşa Takımı (SCIRT) tarafından coğrafi olarak konumlandırılmış toplam uzunluğu yaklaşık 1730 km olan su boru hattı verisi çalışma kapsamında kullanılmıştır. Orijinal kaynağı CCC olan ve SCIRT tarafından konumsal veri seti olarak geliştirilen su dağıtım sistemi, her bir borunun tipini, çapını, yapıldığı malzemeyi, uzunluğunu ve döşendiği yılı içermektedir. Su dağıtım sisteminde, çapları 75 ile 600 mm arasında değişen ana hat su boruları bulunmaktadır. 75 mm'den küçük çapa sahip dağıtım boruları sistemde bulunmamaktadır. Şekil 2.12'de Christchurch şehri için su dağıtım boruları görülmektedir.

Boru hattı hasar verileri SCIRT tarafından sağlanmış olup, O'Rourke ve diğ. (2012, 2014) çalışmalarında kullanılmıştır. Tez kapsamında bu çalışmalarda kullanılan veri seti güncellenerek son haline getirilmiş hasar verileri kullanılmıştır. Bu veri seti, Bouziou (2015) çalışmasındaki güncellenmiş Christchurch depreminden kaynaklı hasar veri setidir. 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 bulunmamaktadır. Toprak ve diğ. (2015^b), mevcut veri setinde bulunan bilgileri kullanarak hasarların kırık mı yoksa sızıntı mı oldukları hakkında çalışma yapmışlardır.

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. Şekil 2.13'de Canterbury deprem dizisi esnasında çeşitli boru tiplerinde gözlenen hasarlar görülmektedir (Black, 2013). Özellikle AC tipi borular daha kırılabilir ve boru birleşimleri geçmeli olduğu için yüksek hasar oranına sahip olduğu bilinmektedir. Şekil 2.14'de yenileme çalışmaları esnasında kırılan AC borulara örnek verilmiştir (Black 2013). Tez kapsamında AC, CI ve PVC tipi boruları üstünde durulmuştur.



Şekil 2.12: Christchurch Boru Hattı ve Boru Hasarları

O'Rourke ve diğ. (2012, 2014), Bouziou (2015) çalışmalarında Christchurch genelinde yatay ve düşey deplasmanlar yardımıyla hasar ilişkileri analizleri yapmışlardır. Bu yatay ve düşey deplasmanlar LİDAR ölçüm metodu yardımıyla bulunmuştur. Ayrıca NZGD bünyesinde de bulunan hava fotoğrafı ve arazi gözlemleri ile oluşturulan sınılaşma bölgesi için çalışmalar yapmışlardır. Tez kapsamında sözü geçen genel bölgeden çok Avonside bölgesi diye adlandırılan bir çalışma bölgesine yoğunlaşmıştır. Bunun sebebi bu bölgede farklı metotlarla ölçülen yer deplasman verilerinin bulunmasıdır. Bu konu ile ilgili kapsamlı çalışmalar gelecek bölümlerde anlatılacaktır. Sınılaşma analizi için ise hava fotoğrafı ve arazi gözlemleri ile oluşturulan sınılaşma bölgesi değil de CPT yardımıyla bulunan sınılaşma parametrelerinden bulunan sınılaşma bölgeleri için daha kapsamlı analizler yapılmıştır. Şekil 2.15'de boru hattı ve tiplerine göre hasarlarla LiDAR ölçüm bölgesi, hava fotoğrafı ve arazi gözlemleri ile oluşturulan sınılaşma bölgesi ve Avonside bölgesi gösterilmiştir.



a) Sarmal Perçinlenmiş Çelik Boru Hasarı



b) Beton Kaplamalı Çelik Boruda Ayrılma
(fotoğraf; P. Free)



c) Dökme Demir Boruda Kırılma

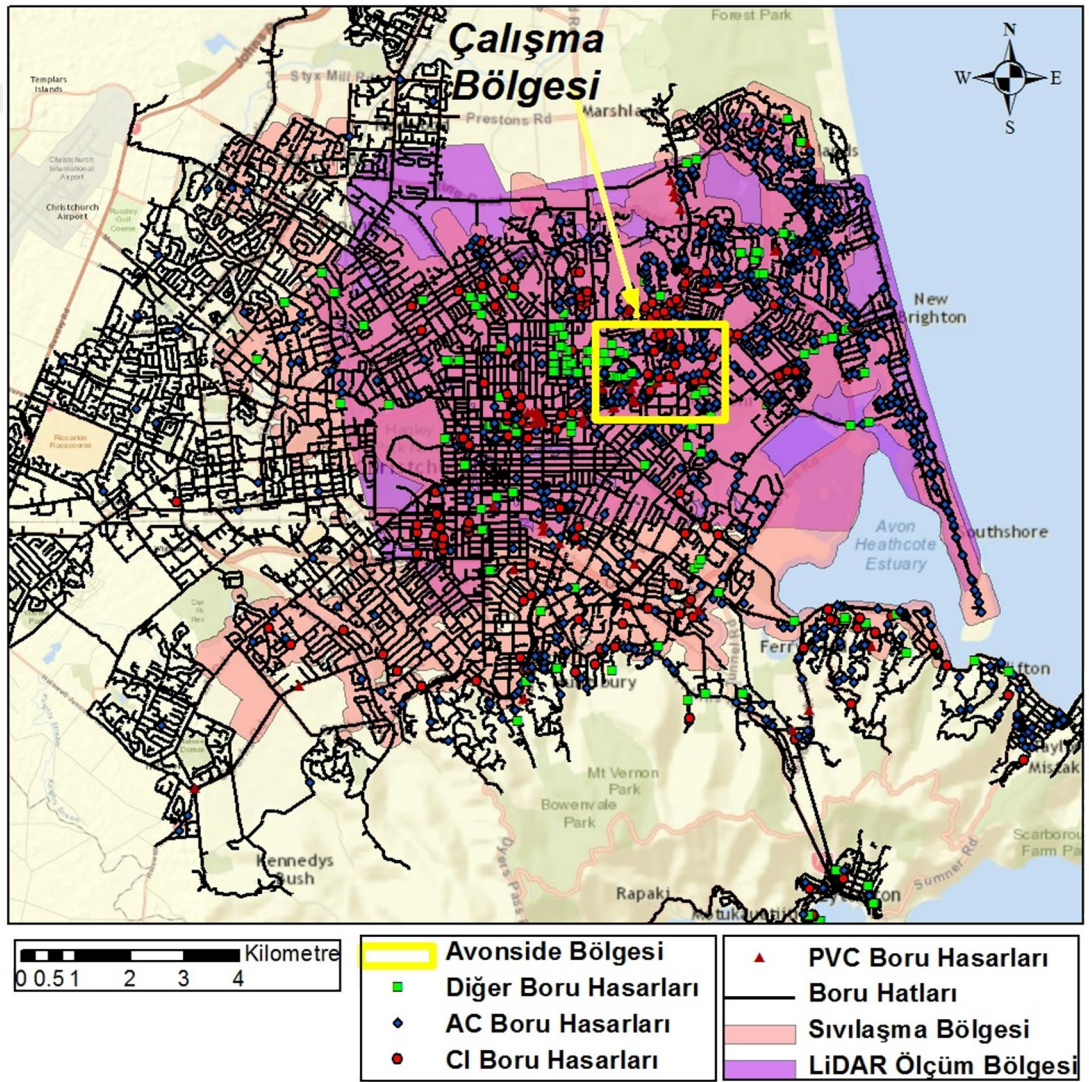


d) Dökme Demir Boruda Kırılma (temizlendikten sonraki durumu)

Şekil 2.13: Canterbury Deprem dizisi esnasında oluşan boru hasarları (Black 2013)



Şekil 2.14: AC tipi borularda kırılma (Black 2013, fotoğraf; F. O'Callaghan)



Şekil 2.15: Christchurch Depremi için boru hatları, farklı tipteki boru hasarları, sıvılaşma ve LiDAR ölçüm bölgesi ile çalışma bölgesi haritası

Hasar ilişkileri analizleri geliştirilirken onarım oranı (RR) kavramından yararlanılmıştır. RR, gömülü boru hatları üzerinde oluşan boru hasar sayılarına ve

boru uzunluğuna bağlı olarak bulunmaktadır. Hasarı boru uzunluğuyla normalize ederek sunmaktadır ve göreceli kırılgenlik için iyi bir gösterge parametresidir (Toprak ve diğ. 2009; 2011). Hasar ilişkileri beşinci bölümde anlatılacaktır. Bu bölümde ise onarım oranına sadece bölgeler hakkında genel bilgi vermesi açısından başvurulmuştur. Tablo 2.3, Tablo 2.4 ve Tablo 2.5’de tüm Christchurch bölgesi, yalnızca sivilaşma bölgesi ve sivilaşma bölgesi dışı için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları verilmektedir.

Tablo 2.3: Tüm Christchurch bölgesi için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları

Boru Malzemesi	Boru Uzunluğu (km)	Hasar Sayısı	Ortalama Onarım Oranı
AC	867.24	1024	1.18
CI	194.37	255	1.31
PVC	213.62	68	0.32
Diğer	455.06	155	0.34
Toplam	1730.29	1502	0.87

Tablo 2.4: Yalnızca sivilaşma bölgesi için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları

Boru Malzemesi	Boru Uzunluğu (km)	Hasar Sayısı	Ortalama Onarım Oranı
AC	407.60	870	2.13
CI	130.23	227	1.74
PVC	111.08	63	0.57
Diğer	302.71	132	0.44
Toplam	951.62	1292	1.36

Tablo 2.5: Sivilaşma bölgesi dışı bölge için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları

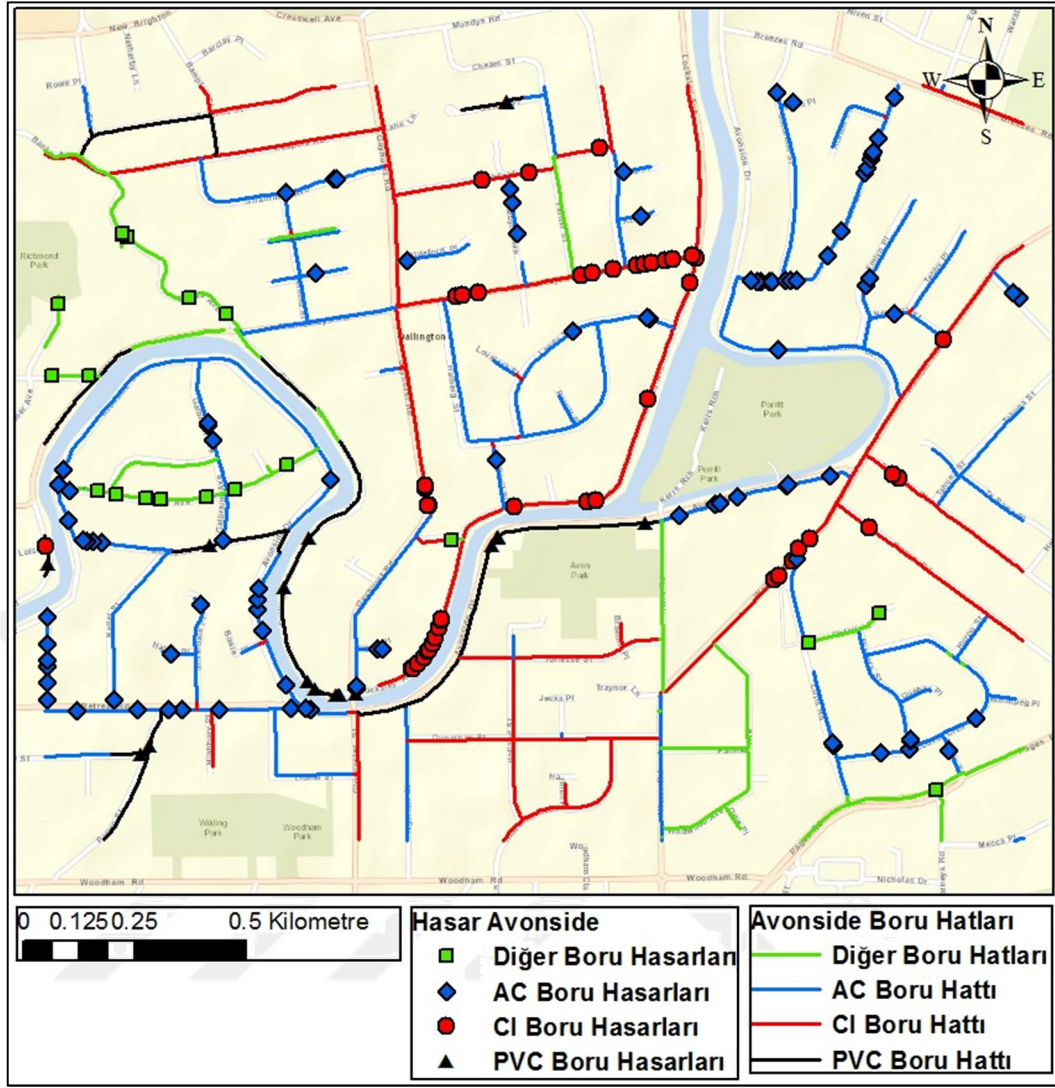
Boru Malzemesi	Boru Uzunluğu (km)	Hasar Sayısı	Ortalama Onarım Oranı
AC	459.64	154	0.34
CI	64.14	28	0.44
PVC	102.54	5	0.05
Diğer	152.36	23	0.15
Toplam	778.67	210	0.27

2.3 Avonside Çalışma Bölgesi

Avonside çalışma bölgesi Christchurch şehir merkezinin kuzey doğusunda yer alan yaklaşık boyutları $2.3 \times 1.7 \text{ km}^2$ olarak seçilen bir bölgedir. Tez kapsamında bu bölgenin üzerinde durulmasının nedeni hava fotoğrafları yardımıyla elde edilen deplasman ölçümlerinin bu bölgede olmasıdır. LiDAR ölçüm bölgesinin halihazırda içinde olan bu bölgenin bir kısmı için de daha sonraları uydu deplasman ölçümleri elde edilmiştir. Böylece bu bölge için hem deplasman ölçüm metodlarının farklılıkları hem de hasar ilişkileri analiz edilmiştir. Bölgenin içinden aynı zamanda Avonside nehri de geçmektedir ve deprem sırasında nehir etrafında önemli miktarda yer hareketi görülmüştür. Avonside bölgesi yanal yayılma ile birlikte yüksek sıvılaşmanın gerçekleştiği bölgeler arasında yerini almaktadır. Şekil 2.16'da Avonside bölgesindeki farklı tipteki boru hatları ve boru hasarları gösterilirken, Tablo 2.6'da Avonside çalışma bölgesi için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları verilmektedir. AC tipi borular için onarım oranı Christchurch genel sıvılaşma bölgesi için 2.13 iken Avonside bölgesinde bu oran 6.45'e çıkmaktadır. Aynı şekilde CI borular için onarım oranı 1.74'den 4.83'e çıkmıştır. Onarım oranından da anlaşılabacağı gibi bu bölge altyapılar için çok yüksek hasar seviyesine sahip bir bölgedir.

Tablo 2.6: Avonside bölgesi için boru hatları, boru hasarları ve onarım oranları

Boru Malzemesi	Boru Uzunluğu (km)	Hasar Sayısı	Ortalama Onarım Oranı
AC	15.51	100	6.45
CI	10.35	50	4.83
PVC	3.54	19	5.37
Diğer	4.92	20	4.07
Toplam	34.32	189	5.51



Şekil 2.16: Avonside bölgesi farklı tipteki boru hattı ve boru hasarları

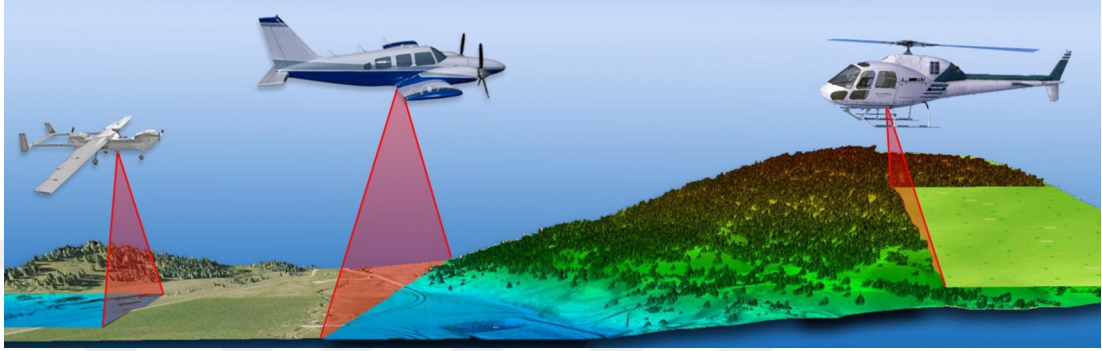
3. YER DEPLASMANLARI ÖLÇÜM METODLARI

Uzaktan algılama; bir cisim, bir arazi yapısı veya bir doğal olayın fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında arada herhangi bir fiziksel ilişki olmaksızın, çeşitli algılayıcı sistemler tarafından toplanan veriler yardımı ile bilgi edinme sanatı, yöntemi ya da bilimidir (Kavak 1998). Tez kapsamında kullanılan yer deplasman verileri son yıllarda gelişen uzaktan algılama metotlarına dayanan çeşitli yöntemler ile elde edilmiştir. Kullanılan uzaktan algılama metotları LiDAR, hava fotoğrafları ve uydu ölçümleri ile 22 Şubat 2011 Christchurch depremi için analizler yapılmıştır.

3.1 Lazer Görüntüleme Algılama ve Sınırlama (LiDAR) Ölçümleri Veri Tabanı

LiDAR kelimesi "Laser imaging detection and ranging" kelimelerinin baş harflerini içeren bir kısaltma olup "Lazer görüntüleme algılama ve sınırlama" veya kısaca lazer tarama olarak adlandırılabilir. 1960'lı yılların sonlarında geliştirilmiş olup 1990'lardan itibaren yoğun olarak kullanılmaya başlanmış mekânsal veri elde etme yöntemidir. Temel prensibi hedefe lazer demeti göndermek ve mesafeyi ölçmektir. Lazer darbeleri kullanılarak nesnelere olan uzaklık belirlenir. Radar teknolojisiyle benzerdir. Radarda kullanılan radyo dalgaları yerine ışık, yani lazer darbeleri kullanılır. Uçuş süresinden hedefin uzaklığı hesaplanıp bu birçok nokta için tekrarlanırsa belirli bir alan taranarak 3 boyutlu haritalama yapılabilir. Ölçme alanının 3 boyutlu nokta bilgileri saniyede yüz binlerce nokta diziler şeklinde yüksek doğrulukta ölçülür. Sonuç olarak tarayıcı alet merkezli lokal koordinatlı nokta bulutu oluşur. Bu nokta bulutları, plan, profil, üçgen model, yükseklik eğrilerine dönüştürülebilir. Hızlı ve doğru sayısal yükseklik modelleri üretmek için veri toplayan, üç teknolojinin (Lazer, GPS, IMU) birleştiği bir sistemdir. Kullanım şekilleri olarak havadan (airborne) tarama, yersel (terrestrial) tarama ve mobil tarama olarak üçe ayrılmaktadır. Havadan tarama (Şekil 3.1), uçak veya helikoptere monte edilen sistem yardımıyla geniş alanlar taranarak sayısal yükseklik modellerinin oluşturulmasıyla yapılmaktadır. Topoğrafik ve batimetrik (derinlik ölçümü) olarak

ikiye ayrılmaktadır. Yersel tarama (Şekil 3.2); tarama ünitesi (tarayıcı), kontrol ünitesi, güç kaynağı ve üç ayak-sehpa olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır. Arkeoloji, çevre düzenleme, bina röleve alımları, madencilik gibi kullanım alanları bulunmaktadır. Mobil tarama (Şekil 3.3) ise kara ve deniz araçları üzerine monte edilerek hareketli lazer taraması ile çevre düzenleme, bina alımı, tünel, nehir yatağı gibi alanlarda kullanılmaktadır (http://atlas.selcuk.edu.tr/1205734/Lidar_2.pdf).



Şekil 3.1: Havadan (Airborne) tarama

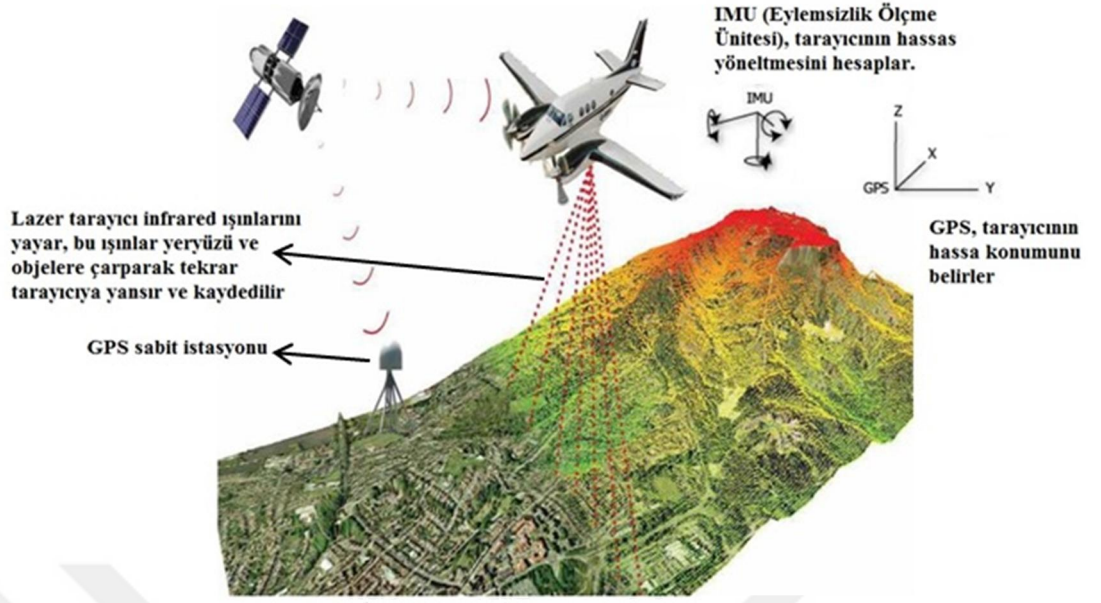


Şekil 3.2: Yersel (terrestrial) tarama (Kertsen 2004)



Şekil 3.3: Mobil tarama (Kara ve deniz)

En yaygın olarak kullanılan LiDAR hava tarama tekniğinin çalışma prensibi; uçak, helikopter vb. bir hava aracına monte edilen tarayıcı, lazer ışının yol ve gidiş-dönüş süresini kaydederek yer objeleri ve algılayıcı arasındaki mesafeyi hesaplar. Hesaplanan bu mesafe temel alınarak GPS ile platformun o anki konumu kaydedilirken ataletsel ölçü birimi (IMU) ile uçağın durumu kaydedilerek ölçülen objenin konumu hesaplanmaktadır (Şekil 3.4). Hava LiDAR sistemleri ile eğer istenirse tarama yapılan alanın sayısal fotoğrafı veya video görüntüsü çekilebilir. LiDAR ile toplanan veriler çeşitli formatlardaki dosyalarda depo edilip daha sonra düzenlenmektedirler. Farklı yüzeyler, kızıl ötesi ışınları farklı şekilde emdiklerinden, alıcının kaydettiği şiddet değerinden yüzeyin tipi veya kimyasal yapısı da belirlenebilmektedir. Pek çok uygulama için, geleneksel arazi çalışmaları ve klasik fotogrametrinin yerini alacak bir sistem olması beklenmektedir. LiDAR yöntemiyle elde edilen verilerin doğruluğuna çeşitli faktörler etki etmektedir. Bunlar arasında GPS, IMU ve lazerin doğası gereği bulunan doğruluk sınırlamaları, kullanılan sistemin doğruluğu, atmosferik etkiler, yer kontrol noktası sayısı ve dağılımı vb. sayılabilir. Artık günümüzde birçok alanda kullanılan LiDAR teknolojisi, Türkiye’de de aktif olarak kullanılmaktadır. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM), Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Enstitüsü’nün İstanbul Büyükşehir Belediyesi için 140 km² lik alanın olası heyelan alanlarının izlenmesi için uçaktan alınan LiDAR verileri ile yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli oluşturma projesi Türkiye’de LiDAR tekniğinin kullanılmasına iyi bir örnektir (TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) 2013).

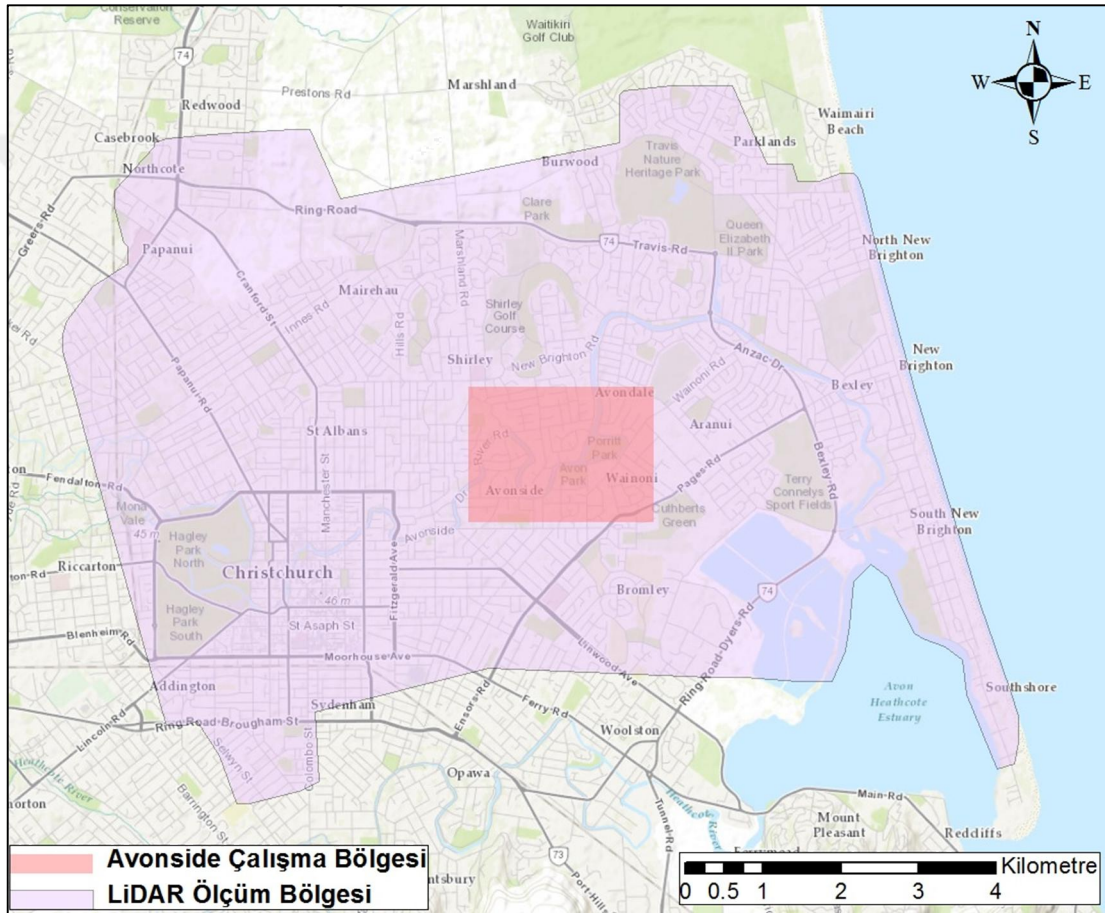


Şekil 3.4: Hava LiDAR sistemi çalışma prensibi

LiDAR uzaktan algılama metotlarının çeşitli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Avantajları; çok daha doğru ve detaylı sayısal yükseklik modeli elde edebilir, hızlı, verimli ve maliyet-etkin bir sistemdir. Kullanıcıya esneklik sağlar. LiDAR ile toplanan veri çok yönlüdür. Çok sayıda ve çeşitlikte kullanım alanı bulunmaktadır. Çekim esnasında çeşitli sensörlerle birlikte kullanılarak aynı anda farklı görüntüler (fotoğraf, video vb.) de elde edilebilmektedir, gölgeden etkilenmez. Bulutlu havalarda, eğer çekim bulutların altından yapılırsa bir sorun yaşanmaz. Dezavantajları ise; toplanan verinin boyutu çok büyüktür ve işleminden geçirme zorunluluğu vardır. Veri işleme için her ne kadar otomatik algoritmalar geliştirilse de, veriyi elle düzeltme (işgücü ve tecrübe gerektirir) zorunluluğu bulunmaktadır. Lazer sinyali doğadaki her şeyden geri yansıyacağı için, ham veri istenmeyen detaylardan (araba, kuş vb.) da geri yansıma değerleri içermektedir.

Havadan yapılan LiDAR araştırmaları, Canterbury deprem dizisindeki büyük depremler için deprem öncesi ve sonrası ölçümler olarak Christchurch bölgesinde Avustralya Hava Haritacılığı (AAM) ve Yeni Zelanda Hava Haritacılığı (NZAM) tarafından toplanmıştır. Daha sonra Canterbury deprem dizisi sırasında Christchurch, Yeni Zelanda'da oluşan yatay ve düşey yer hareketlerinin belirlenmesinde Jeolojik ve Nükleer Bilimler Enstitüsü (GNS) ve bu kurum ile anlaşmalı olarak Tonkin ve Taylor şirketi tarafından kullanılarak geliştirilmiştir. Beavan ve diğ. (2012)

çalışmasında CES için bulunan LiDAR veri setleri hakkında detaylı bilgi vermiştir. Bouziou (2015), 4 Eylül 2010 Darfield, 22 Şubat 2011 Christchurch, 13 Haziran 2011 ve 24 Aralık 2011 depremleri için NZAA ve AAM tarafından sağlanan LiDAR verilerini kullanarak CES için kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Tez kapsamında 22 Şubat 2011 Christchurch depremi için AAM tarafından sağlanan LiDAR ölçümleri kullanılmıştır. LiDAR veri tabanı, NZGD veri tabanının içinde bulunmakla beraber verilerin Christchurch şehrinde kapladığı alan ve çalışma bölgesi Şekil 3.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.5: LiDAR ölçüm bölgesi ve Avonside çalışma bölgesi

LiDAR yatay yer deplasmanları orijinal olarak 4 m ve 8 m aralıklarla hesaplanmıştır. Daha sonra ortalamaları alınarak 56 m aralıkla yatay yer hareketleri elde edilmiştir. Alt piksel korelasyon yöntemiyle Imagin’ Labs Şirketi (Pasadena, CA) ve Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir (Beavan ve diğ. 2012). Avustralya Hava Haritacılığı (AAM), LiDAR verilerinin yatay doğruluğunu CCC ve Yeni Zelanda Arazi Bilgileri (LINZ) tarafından sağlanan yer ölçümleriyle

karşılaştırmalarını yaparak 40 ile 55 cm arasında olduğunu belirtmiştir (Beavan ve diğ. 2012, CERA 2012). Tüm LiDAR ölçüm bölgesinde 4 m aralıklı yaklaşık olarak 4.7 milyon ölçüm noktası vardır. LiDAR 56 m aralıkta ise bu ölçüm noktaları sayısı yaklaşık 20400 dür. Tezde kapsamlı çalışmalar yapılan Avonside bölgesinde 4m ve 56 m aralığa sahip ölçüm noktaları sayısı sırasıyla 229320 ve 1170 ölçüm noktasıdır. Bu ölçüm noktaları kullanılarak hem yatay şekil değiştirmeleri elde edilmiş hem de diğer ölçüm metotlarıyla farkları hakkında çalışmalar yapılmıştır.

LiDAR düşey yer hareketleri 5m aralıkla Christchurch bölgesi için elde edilmiştir. LiDAR düşey yer hareketlerinin doğruluğu ise 7 ile 15 cm arasındadır (CERA 2012). Düşey yer hareketleri yardımıyla açısall dönmler elde edilerek hasar ilişki analizleri yapılmıştır.

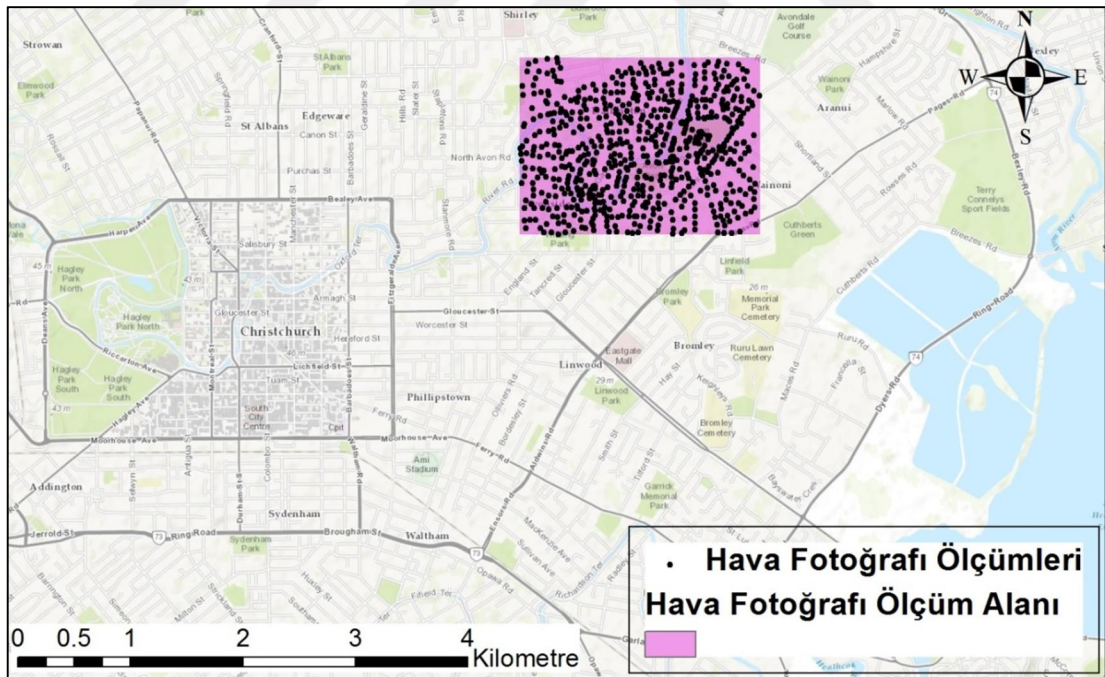
3.2 Hava Fotoğrafları

Uzaktan algılamanın başlangıcı olarak nitelendirilen hava fotoğrafları tekniğı, 1858 yılında Gaspard Felix Tournachon tarafından yaklaşık 215 m yükseklikten balonla çekilen Paris'in fotoğrafıdır. İlerleyen yıllarda Amerikan iç savaşında birleşik kuvvetlerin yine balondan hava fotoğrafı çektiğı bilinmektedir. 1908 yılında ise Wilbur Wright ve yolcusu L. P. Bonvillain uçaktan ilk hava fotoğrafını çekmişlerdir. II. Dünya savaşının sonlarında uçaklardan çekilen hava fotoğraflarının keşif amaçlı kullanımı büyük önem kazanmıştır. Askeri alanda hâlâ hava fotoğrafları istihbarat ve keşif amaçlı kullanılmaktadır. Günümüzde, hava kameraları dijital olma eğilimindedir ve çoğu hava fotoğrafçısı uçağın hareketine karşı koymak için bazı dengeleyiciler kullanmaktadır. Ortaya çıkan görüntüler üstün kaliteli, yüksek çözünürlüklü görüntülerdir. Hava fotoğrafları tekniğı çeşitli ticari, endüstriyel, tarımsal, resmi ve özel müşteriler için yaygın olarak kullanılmaktadır.

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 ve diğ. 1986; Hamada ve O'Rourke 1992) yaptığı araştırmalar bu konuda 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. Tez kapsamında Avonside bölgesinin çalışma bölgesi olarak seçilmesinin nedeni hava fotoğraf ölçümlerinin bu bölgede elde edilmiş olmasıdır. Hâlihazırda bulunan LiDAR verileri ve hava fotoğrafları arasında farkların göz önüne serilmesi bu çalışma için büyük önem arz etmektedir. Daha sonra elde edilen uydu ölçümleriyle birlikte kapsamlı bir çalışma yapılmıştır.

Hava fotoğrafı ölçümleri veri tabanı Christchurch şehrinin kuzeydoğusunda yer alan Avonside bölgesindeki bir alan içinde elde edilmiştir. Toplamda 680 farklı ölçüm noktasında 22 Şubat Christchurch depreminden önce ve sonra ölçülen yatay-düşey yer deplasmanları mevcut olmakla birlikte yatayda ve düşeyde ölçümlerin doğruluğu sırasıyla ± 0.673 m ve ± 0.246 m'dir. Bu 680 ölçüm noktasının arasında belirli bir aralık yoktur ve ölçüm yapılan noktalar dağınık bir şekilde konumlanmıştır. Şekil 3.6'da hava fotoğrafı ölçüm noktaları ve hava fotoğrafı ölçüm bölgesi görülmektedir.

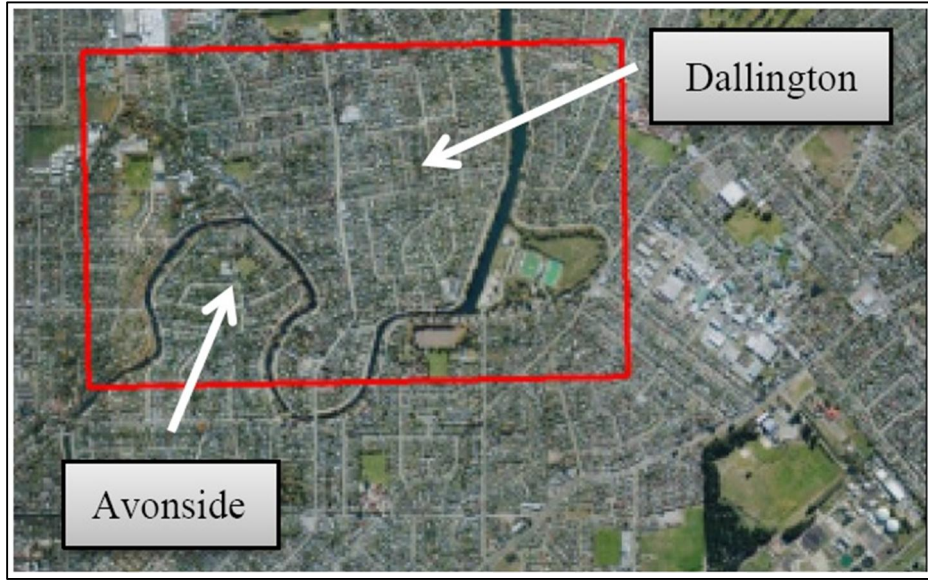


Şekil 3.6: Hava fotoğrafı ölçüm noktaları ve hava fotoğrafı ölçüm bölgesi

3.3 Uydu Ölçümleri

Son yıllarda yüksek çözünürlükte IKONOS (www.spaceimaging.com, 1999), Quickbird (www.digitalglobe.com, 2001), WorldView-1 (www.digitalglobe.com, 2007) ve WorldView-2 (www.digitalglobe.com, 2009) gibi ticari uyduların uzaya fırlatılmasıyla uzaktan algılamanın en önemli dallarından biri olan uydu ölçümleri önemli bir değere kavuşmuştur. Üzerindeki alıcılar sayesinde dijital görüntü toplayan bu uydular; dağlar, binalar, yollar hatta arabalar gibi yeryüzüne ait birçok özelliğin tanınmasına olanak sağlamaktadır. Eylül 1999'da "GeoEye" firması tarafından kullanılmaya başlayan IKONOS uydusu, 1 m yersel çözünürlüğe sahip görüntü sağlayan ilk uydu iken Quickbird uydusunun çözünürlüğü 0.6 m'dir. Quickbird uydusu gibi "DigitalGlobe" firması tarafından 18 Eylül 2007 yılında kullanımı başlanan WorldView-1 ve 8 Ekim 2009 yılında fırlatılan WorldView-2 uydularının çözünürlükleri ise 0.4-0.5 m'dir.

Tez kapsamında kullanılan uydu veri tabanı Prof. Ellen Rathje tarafından sağlanmıştır. Rathje ve diğ. (2005), Bam, İran depremi için deprem öncesi ve sonrası yüksek çözünürlükteki uydu görüntülerini değişiklik sezimi metoduyla (change-detection method) bir deprem hasarı belirleme yaklaşımı olarak kullanmıştır. Rathje ve diğ. (2006), Niigata Ken Chuetsu depreminden (2004) kaynaklı heyelan ve yer deformasyonlarını yüksek çözünürlükteki uydu görüntüsü ve LiDAR olmak üzere iki uzaktan algılama yöntemine odaklanarak sunmuştur. Martin (2014) ile Martin ve Rathje (2014) çalışmalarında 2011 Christchurch depreminden sivilaşma kaynaklı deplasmanları ölçmek için görüntü korelasyon tekniği kullanmıştır. Bu tekniği kullanırken dikkat edilmesi gereken önemli bir husus uydu görüntülerinin benzer geometriden elde edilmiş olmasıdır. Rathje ve Franke (2015) Christchurch Merkez İş Bölgesi doğusunun Avonside nehri boyunca korelasyon analizini uygulamıştır. Tez kapsamında kullanılan uydu verileri Rathje ve Franke (2015) çalışmasında kullanılan uydu verileridir. Şekil 3.7'de uydu verilerinin ölçüldüğü alan verilmiştir. Uydu ölçümleri 16m aralıklı şekilde elde edilmiştir.



Şekil 3.7: Uydu Ölçümleri Bölgesi (Rathje ve Franke 2015).

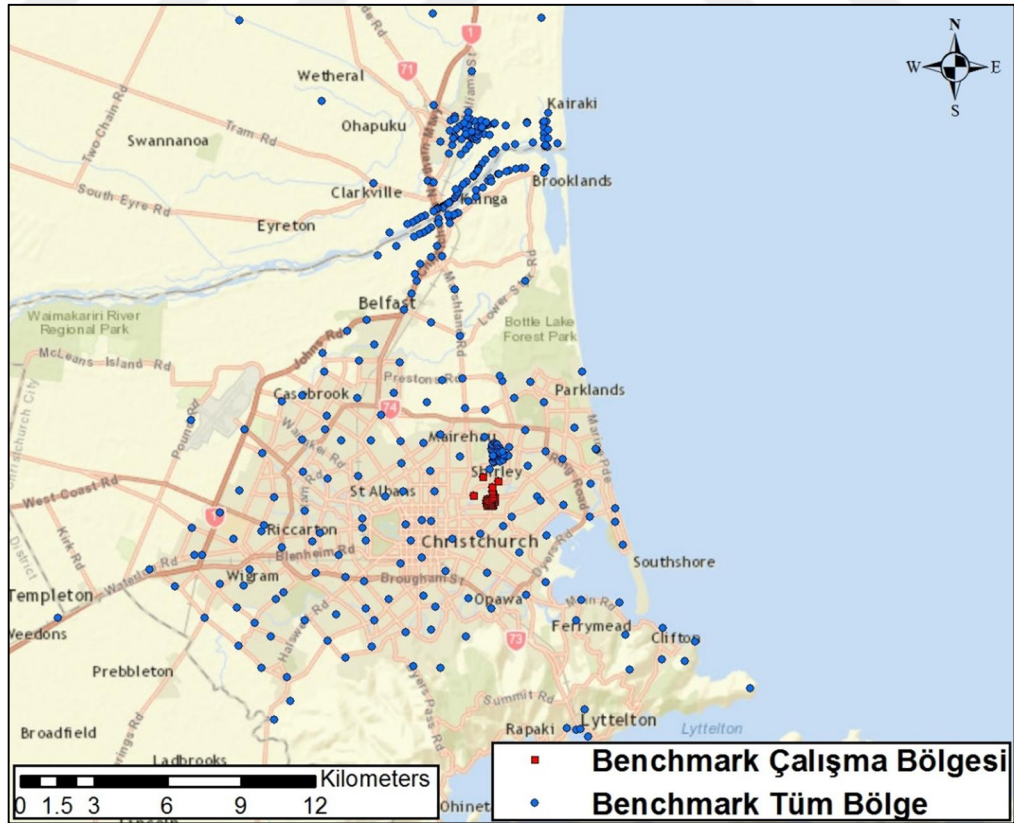
3.4 Referans Ölçümleri (Benchmarks)

Referans ölçümleri (Benchmarks), yere sabitlenen bir işaretçi yardımıyla yüzeyde oluşan yatay ve düşey hareketi yüksek doğrulukla ölçen ölçümler olarak tanımlanabilir. LINZ tarafından Şekil 3.12’de görünen düzenek yardımıyla büyük depremler için yatay ve düşey yer hareketler ölçülmüştür ve NZGD veri tabanında bu ölçümler bulunmaktadır. Toplam 403 noktada ölçüm verisi bulunan referans ölçümlerinin konumları Şekil 3.8’de verilmiştir. Tez kapsamında ise çalışma bölgesinde bulunan 25 referans ölçüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.9). Bu ölçümler yardımıyla yukarda anlatılan çeşitli deplasman ölçüm metotlarıyla karşılaştırma yapılacaktır.



Şekil 3.8: Referans noktası ölçümü

(http://apps.linz.govt.nz/gdb/index.aspx?nextform=image&image_id=108377&mode=&sessionid=11555239158881397733794&code=BDVB).



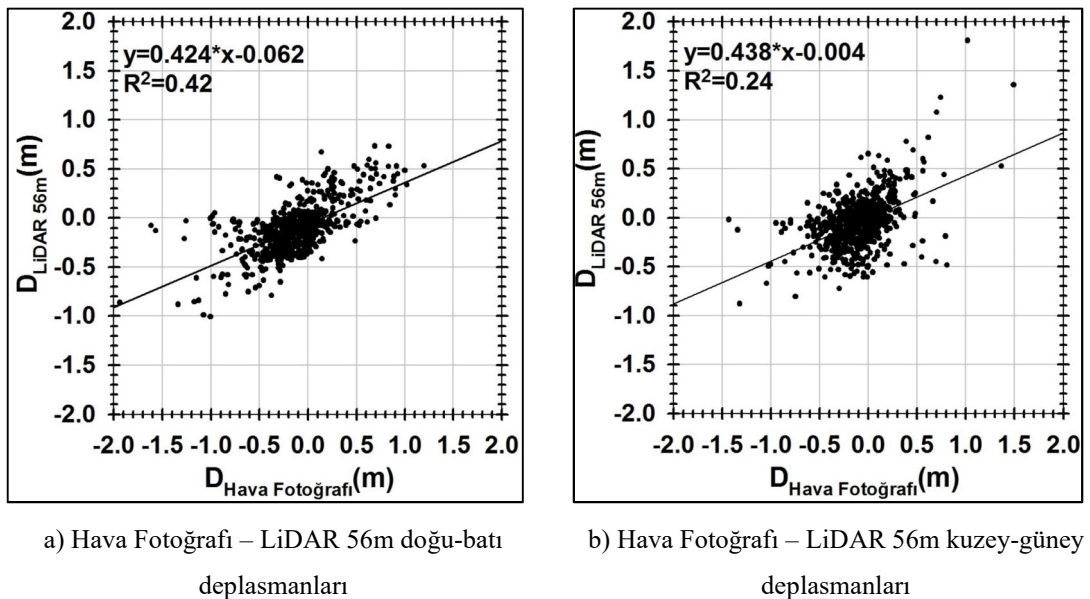
Şekil 3.9: Benchmark ölçümleri.

3.5 Yer Deplasman Ölçüm Metotlarının Farkları

Tez çalışmasında yer deplasman ölçüm metotlarının karşılaştırılmasında iki yol izlenilmiştir. İlkinde LiDAR (4m ve 56 m aralıklı), hava fotoğrafı ve uydu ölçümlerinin kuzey-güney ve doğu-batı bileşenleri kullanılarak çeşitli yaklaşımlarla çalışma bölgesindeki deplasman farkları ortaya konmuştur. İkincisinde ise belli hatlar belirlenerek bu hat yakınındaki deplasmanların hatta göre paralel ve dik bileşenlerini kullanarak çalışmalar yapılmıştır.

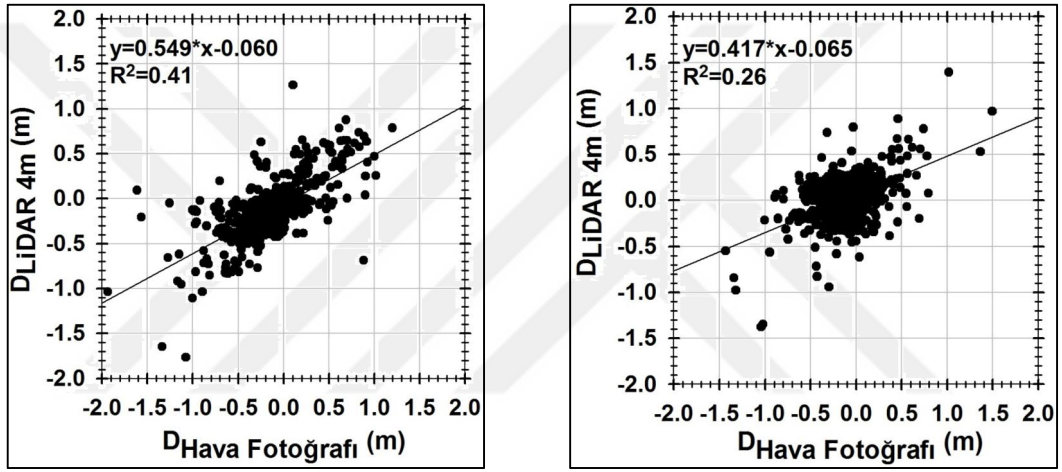
3.5.1 LiDAR, Hava Fotoğrafı ve Uydu Ölçümleri Farkları

Hava fotoğrafları ile 56m aralığa sahip LiDAR ölçüm noktalarını karşılaştırırken, hava fotoğrafı ölçüm noktasına en yakın LiDAR 56m ölçüm noktası karşılaştırmalar için kullanılmıştır. 680 LiDAR adet 56m ölçüm noktalarının doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Eğer hava fotoğrafı ölçüm noktasıyla LiDAR 56m ölçüm noktasının hem doğu-batı hem de kuzey-güney yönlerindeki deplasman verileri ters işaretli ise o nokta elenmiştir. Bu kriter sonucu 680 ölçüm noktasından 28 nokta elenerek 652 ölçüm noktası arasında karşılaştırma yapılmıştır. Şekilde 3.10'da hava fotoğrafları ile LiDAR 56m arasında doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasındaki karşılaştırmalar görülmektedir.



Şekil 3.10: Hava Fotoğrafı LiDAR 56 m deplasmanları.

Hava fotoğrafları ile 4m aralığa sahip LiDAR ölçüm noktalarını karşılaştırırken, hava fotoğrafı ölçüm noktasına en yakın LiDAR 4m ölçüm noktası karşılaştırmalar için kullanılmıştır. 680 hava fotoğrafı ölçüm noktasına en fazla 2 m uzaklıktaki 680 LiDAR 4m ölçüm noktalarının doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Eğer hava fotoğrafı ölçüm noktasıyla LiDAR 4m ölçüm noktasının hem doğu-batı hem de kuzey-güney yönlerindeki deplasman verileri ters işaretli ise o nokta elenmiştir. Bu kriter sonucu 680 ölçüm noktasından 67 nokta elenerek 613 ölçüm noktası arasında karşılaştırma yapılmıştır. Şekilde 3.11’de hava fotoğrafları ile LiDAR 4m arasında doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasındaki karşılaştırmalar görülmektedir.

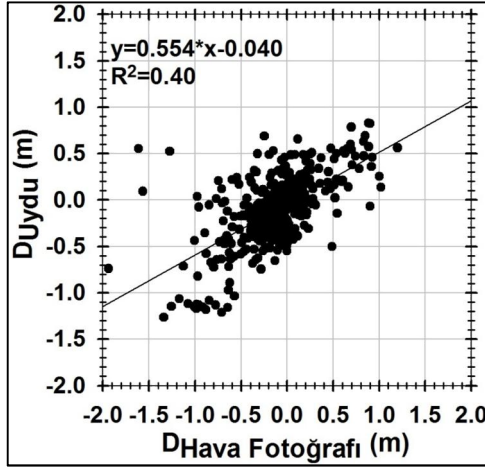


a) Hava Fotoğrafi – LiDAR 4m doğu-batı deplasmanları

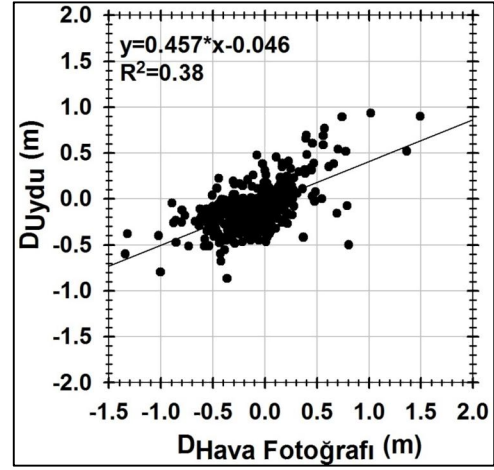
b) Hava Fotoğrafi – LiDAR 4m kuzey-güney deplasmanları

Şekil 3.11: Hava Fotoğrafi LiDAR 4 m deplasmanları.

Hava fotoğrafları ile uydu ölçümleri karşılaştırılırken hava fotoğrafları hangi 16mx16m’lik uydu raster verisinin içindeyse içine düştüğü raster değeriyle karşılaştırma yapılmıştır. Mutlak değeri 2 metreden büyük uydu ölçümleri atılmış ve hava fotoğraflarına en uzak uydu ölçümü olarak 22 m seçilmiştir. Daha sonra hem doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Eğer hava fotoğrafı ölçüm noktasıyla uydu ölçüm noktasının hem doğu-batı hem de kuzey-güney yönlerindeki deplasman verileri ters işaretli ise o nokta elenmiştir. Sonuç olarak 425 ölçüm noktası arasında karşılaştırma yapılmıştır. Şekilde 3.12’de hava fotoğrafları ile uydu ölçümleri arasında doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasındaki karşılaştırmalar görülmektedir.



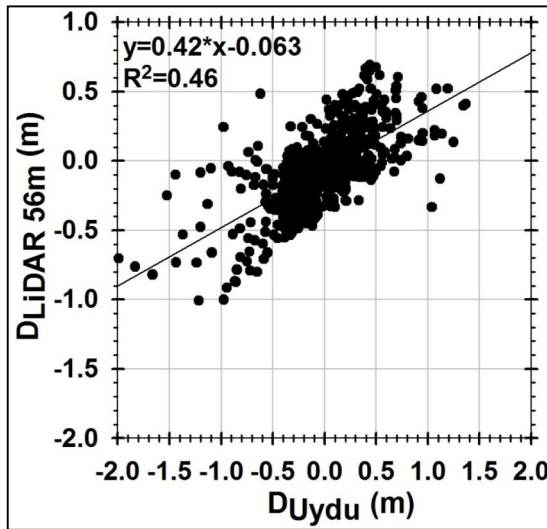
a) Hava Fotoğrafi – Uydu Ölçümleri doğu-batı deplasmanları



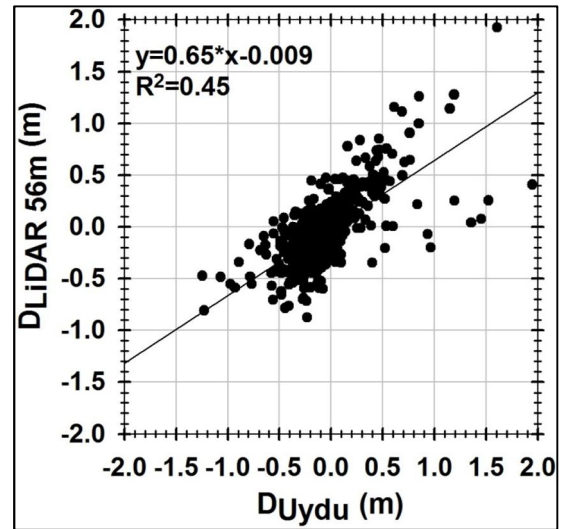
b) Hava Fotoğrafi – Uydu Ölçümleri kuzey-güney deplasmanları

Şekil 3.12: Hava Fotoğrafi Uydu Ölçümleri deplasmanları.

LiDAR 56m ile uydu ölçümleri karşılaştırılırken, her bir LiDAR 56m ölçüm noktasından 16m çapında alanlar oluşturulduktan sonra o alanların içinde kalan uydu ölçümlerinin ortalaması alınmıştır. Mutlak değeri 2 metreden büyük uydu ölçümleri atılmıştır. Daha sonra hem doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Eğer LiDAR 56m noktasıyla uydu ölçüm noktasının hem doğu-batı hem de kuzey-güney yönlerindeki deplasman verileri ters işaretli ise o nokta elenmiştir. Sonuç olarak 790 ölçüm noktası arasında karşılaştırma yapılmıştır. Şekilde 3.13’de LiDAR 56m ile uydu ölçümleri arasında doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasındaki karşılaştırmalar görülmektedir.



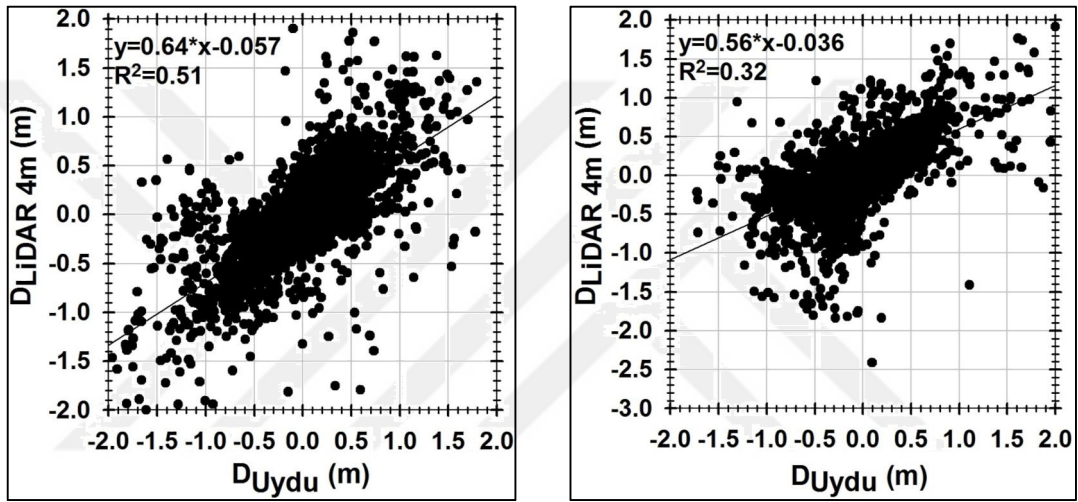
a) Uydu Ölçümleri-LiDAR 56 m doğu-batı deplasmanları



b) Uydu Ölçümleri-LiDAR 56m kuzey-güney deplasmanları

Şekil 3.13: Uydu Ölçümleri LiDAR 56 m deplasmanları.

LiDAR 4m ile uydu ölçümleri karşılaştırılırken, uydu ölçüm noktalarından 4m çapında alanlar oluşturulduktan sonra o alanların içinde kalan LiDAR 4m ölçümlerinin ortalaması alınmıştır. Mutlak değeri 2 metreden büyük uydu ölçümleri atılmıştır. Daha sonra hem doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Eğer LiDAR 4m noktasıyla uydu ölçüm noktasının hem doğu-batı hem de kuzey-güney yönlerindeki deplasman verileri ters işaretli ise o nokta elenmiştir. Sonuç olarak 8355 ölçüm noktası arasında karşılaştırma yapılmıştır. Şekilde 3.14'de LiDAR 4m ile uydu ölçümleri arasında doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasındaki karşılaştırmalar görülmektedir.

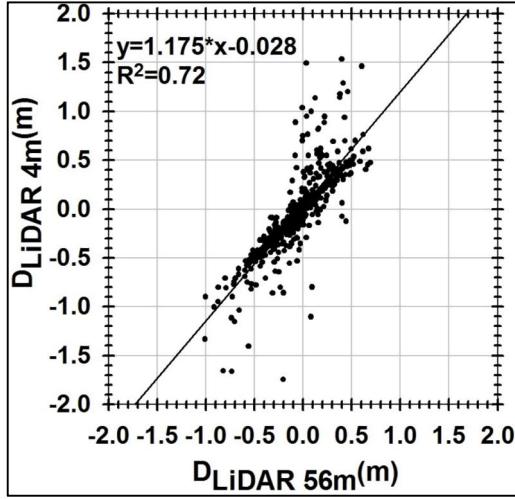


a) Uydu Ölçümleri-LiDAR 4 m doğu-batı deplasmanları

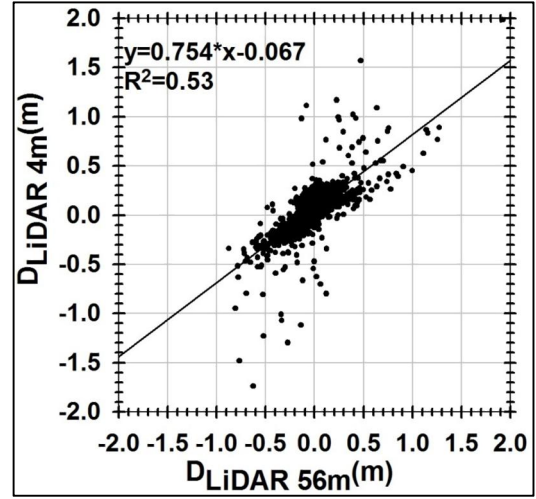
b) Uydu Ölçümleri-LiDAR 4 m kuzey-güney deplasmanları

Şekil 3.14: Uydu Ölçümleri LiDAR 4 m deplasmanları.

LiDAR 56m ile LiDAR 4m ölçümleri karşılaştırılırken, LiDAR 56m noktalarından 4m çapında alanlar oluşturulduktan sonra o alanların içinde kalan LiDAR 4m ölçümlerinin ortalaması alınmıştır. Daha sonra hem doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Eğer LiDAR 56m noktasıyla LiDAR 4m noktasının hem doğu-batı hem de kuzey-güney yönlerindeki deplasman verileri ters işaretli ise o nokta elenmiştir. Sonuç olarak 1144 ölçüm noktası arasında karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 3.5'de LiDAR 56m ile LiDAR 4m ölçümleri arasında doğu-batı ve kuzey-güney deplasman değerleri arasındaki karşılaştırmalar görülmektedir.



a) LiDAR 56 m -LiDAR 4 m doğu-batı
deplasmanları

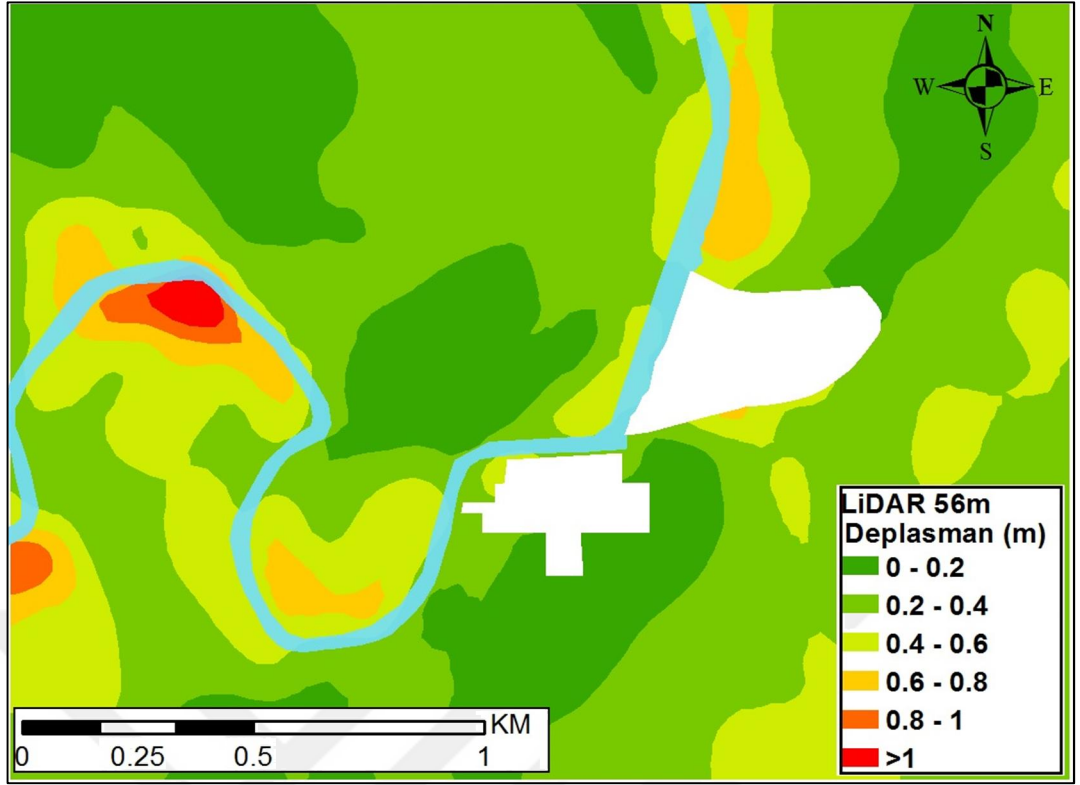


b) LiDAR 56 m -LiDAR 4 m kuzey-güney
deplasmanları

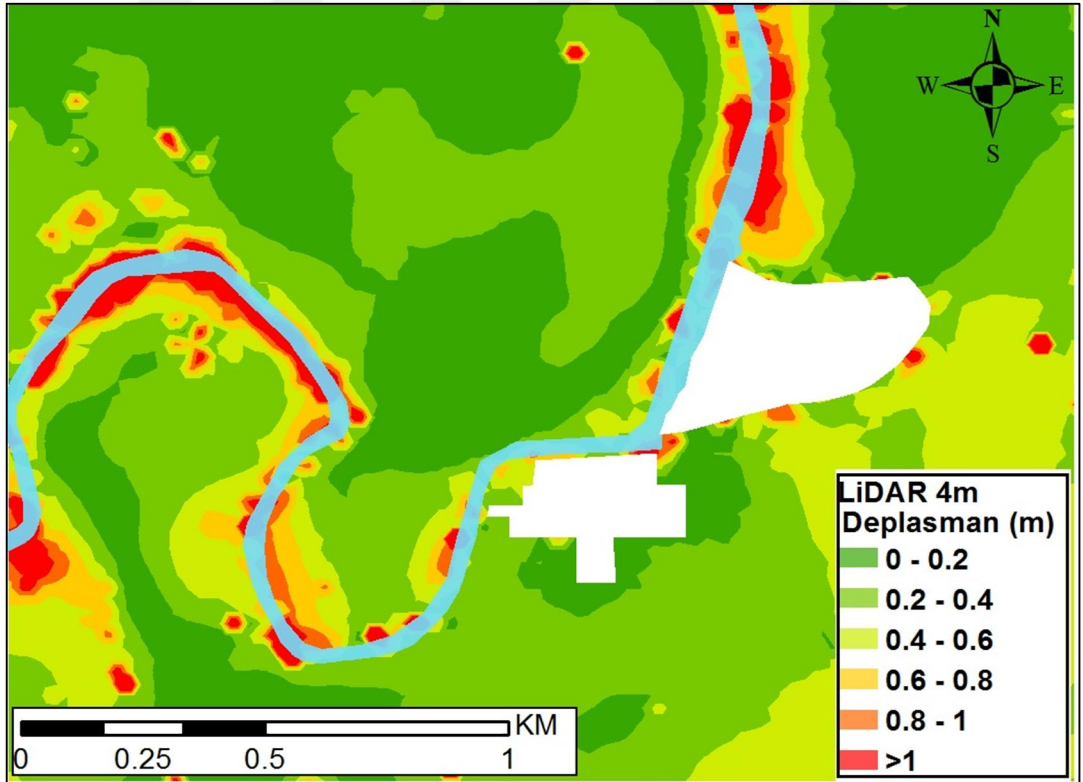
Şekil 3.15: LiDAR 56 m LiDAR 4 m deplasmanları.

Yukarıdaki karşılaştırmalardan herhangi ikili ölçüm metodu arasında bir üstünlüğün olmadığı görülmektedir. Aynı deplasman verilerinden türetildiği için beklenen şekilde LiDAR 56 m ile LiDAR 4m arasındaki doğu-batı ve kuzey-güney deplasman ilişkileri diğer ilişkilere göre daha güçlü çıkmıştır. Diğer çıkartılabilecek bir sonuç olarak LiDAR ölçümleri (56 m ve 4 m) ile uydu ölçümleri arasındaki korelasyonlar LiDAR ölçümleri (56 m ve 4 m) ile hava fotoğrafları ölçümleri arasındaki korelasyonlardan daha iyi çıkmıştır. Tüm ölçüm metodu karşılaştırmalarından görülmektedir ki doğu-batı deplasman karşılaştırmalarına ait R^2 değerleri kuzey-güney deplasman karşılaştırmalarına ait R^2 değerinden daha büyük çıkmıştır. Bu da açıkça yön etkisinin deplasman ölçümlerine etkisini göstermektedir.

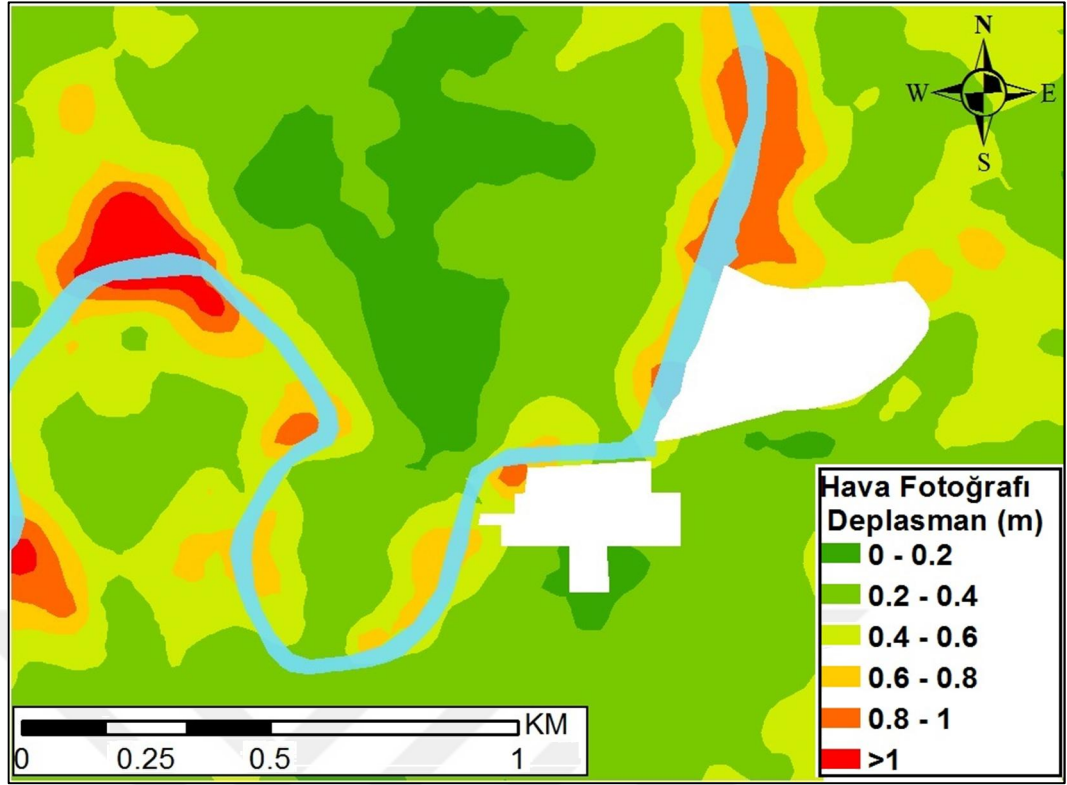
Doğu-batı ve kuzey-güney yönlü yatay hareketlerinin karşılaştırılmasının yanında Şekil 3.16-Şekil 3.19'da ölçüm metotlarına göre bileşke deplasman değerlerinin büyüklüklerine göre çıkartılmış haritaları görülmektedir. Bu haritalar bilinen deplasman değerlerinden çok yaygın olarak kullanılan kriging enterpolasyon yöntemiyle raster haritaları elde edilmesiyle hazırlanmıştır. Tüm haritalarda nehir etrafında yüksek deplasman değerlerinin çıktığı açıkça görülmektedir.



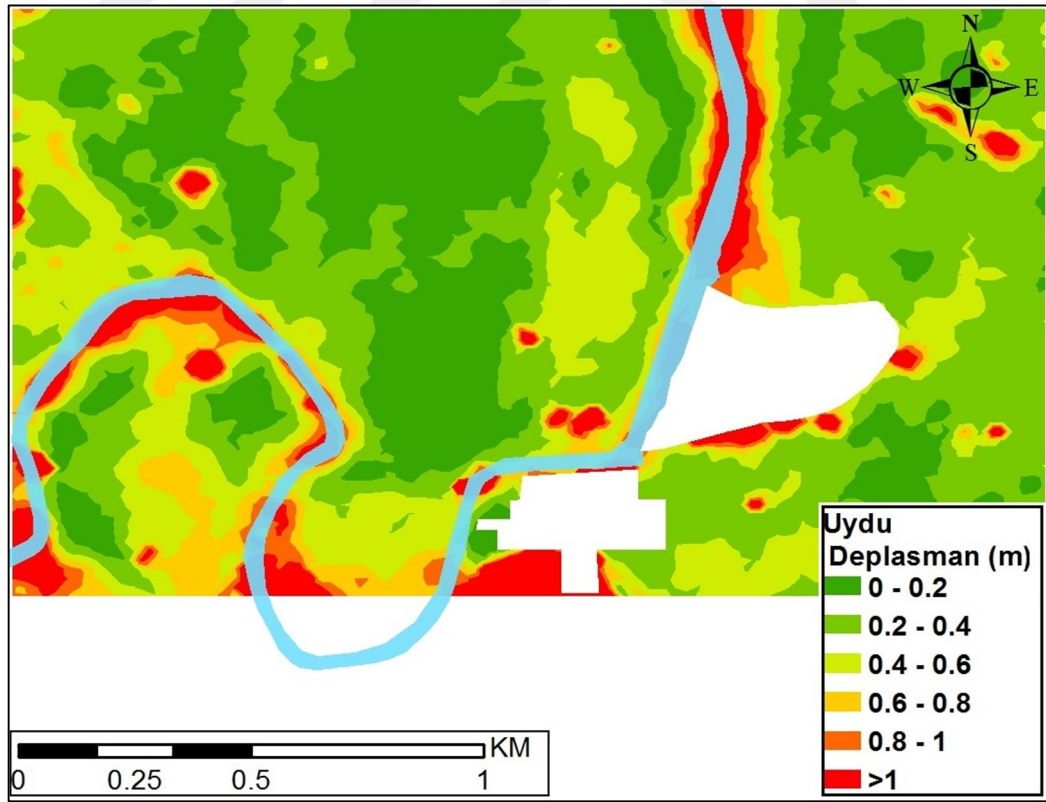
Şekil 3.16: LiDAR 56 m deplasman dağılımı.



Şekil 3.17: LiDAR 4m deplasman dağılımı.



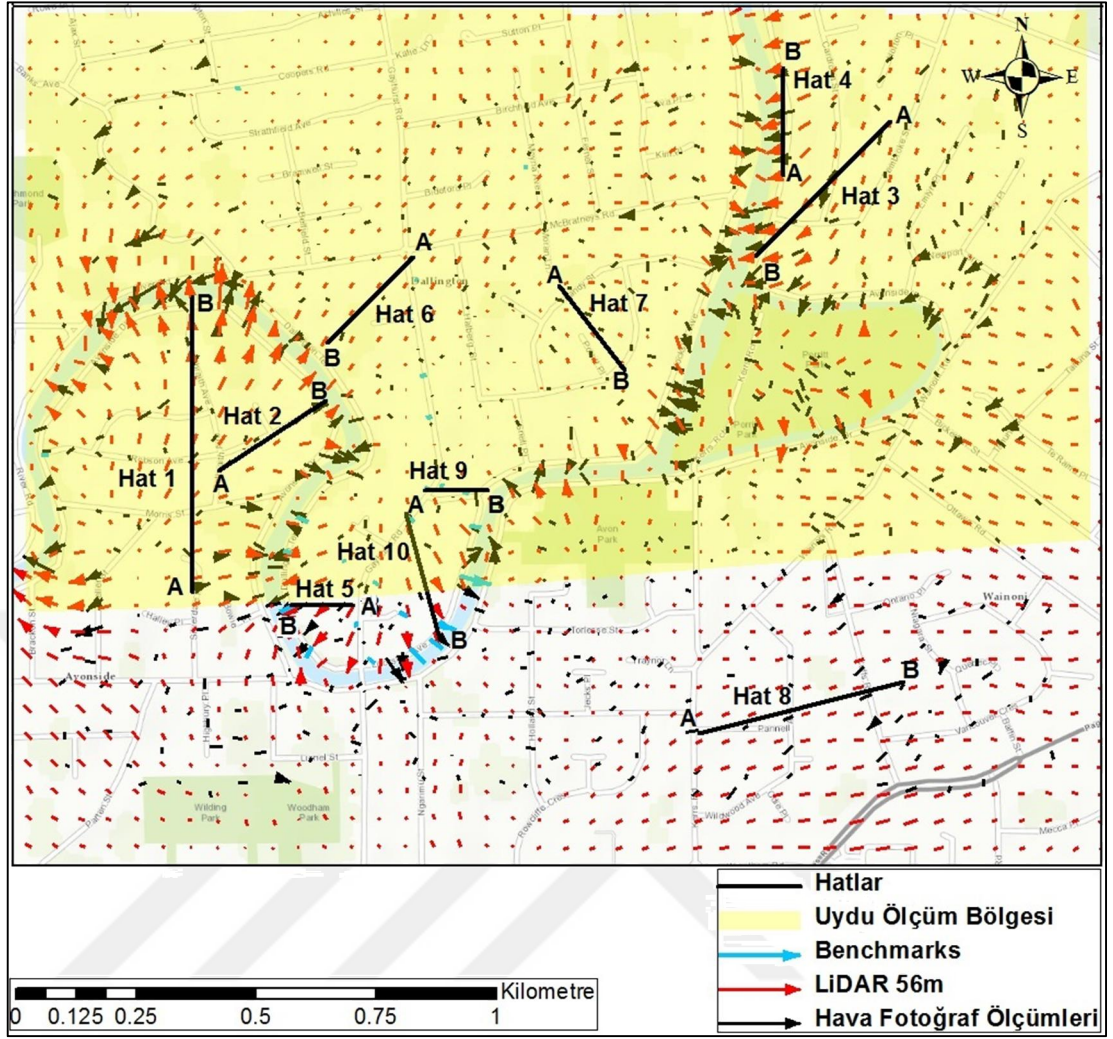
Şekil 3.18: Hava fotoğrafı deplasman dağılımı.



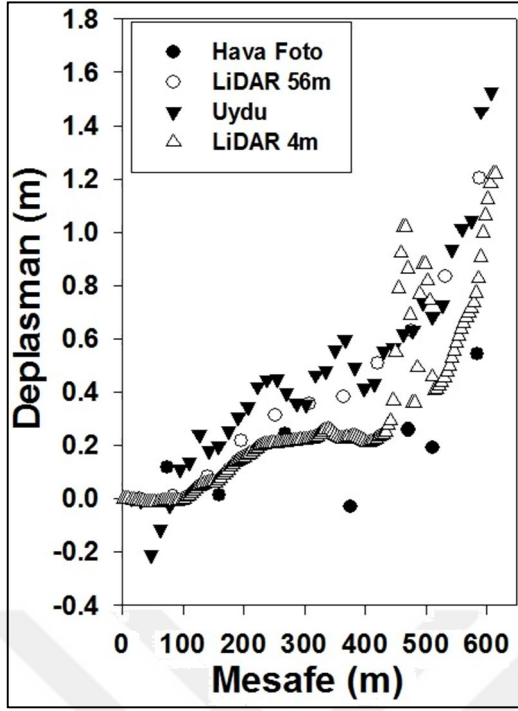
Şekil 3.19: Uydu ölçümleri deplasman dağılımı.

3.5.2 Belirli Hatlar Kullanarak Yer Deplasman Ölçüm Metotlarının Farkları

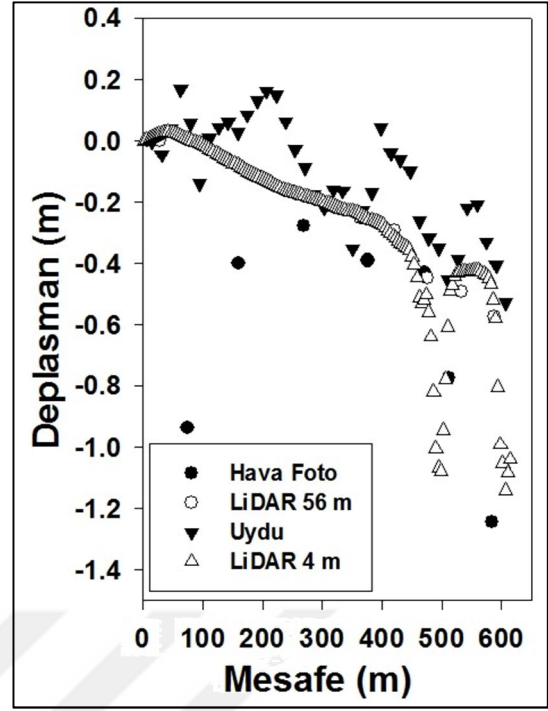
İkinci karşılaştırma yöntemi olarak çalışma bölgesinde belli doğrultularda 10 adet hat belirlenmiş ve bu hatların en yakınındaki deplasmanların paralel ve dik bileşenleri elde edilerek deplasman ölçüm çeşitlerine göre karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 3.20’de söz konusu hatlar, LiDAR 56m ve hava fotoğrafları deplasmanları, uydu ölçüm bölgesi ve referans ölçümleri (Benchmarks) gösterilmektedir. LiDAR 4m ölçüm verileri arasında mesafe çok az olduğundan ve veri noktası çok fazla olduğundan dolayı Şekil 3.20’de gösterilmemiştir. Şekil 3.21-Şekil 3.30 bu karşılaştırmaları göstermektedir. Her hat için “A” başlangıç noktası, “B” ise bitiş noktası olarak seçilmiştir. Her deplasman ölçümü için ilk değer sıfır olarak alınmış ve diğer değerlerden ilk değer çıkartılarak grafikler elde edilmiştir. Böylece hat başlangıçlarında göreceli olarak deplasman verileri birbirine yakın çıkmaktadır. Ölçüm çeşitlerine göre deplasmanlar karşılaştırıldığında iyi sonuçlar vermekle birlikte bazı hatlarda belirgin farklılıklar görülmektedir. Hava fotoğrafı ölçümlerindeki dağınıklık diğer ölçüm metotlarına göre daha fazla olmaktadır. Ayrıca Hat 9 ve Hat 10 için bu dört farklı veri seti dışında referans noktası (benchmark) olarak adlandırılan yer ölçümleriyle de karşılaştırmalar yapılmıştır. Dört veri setiyle referans noktaları karşılaştırıldığında herhangi bir veri setinin diğerine göre bir üstünlüğünün olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 3.20: Çalışma bölgesinde belirlenen hatlar, uydu ölçüm bölgesi, Benchmarks, LiDAR 56 m ve hava fotoğraf ölçümleri.

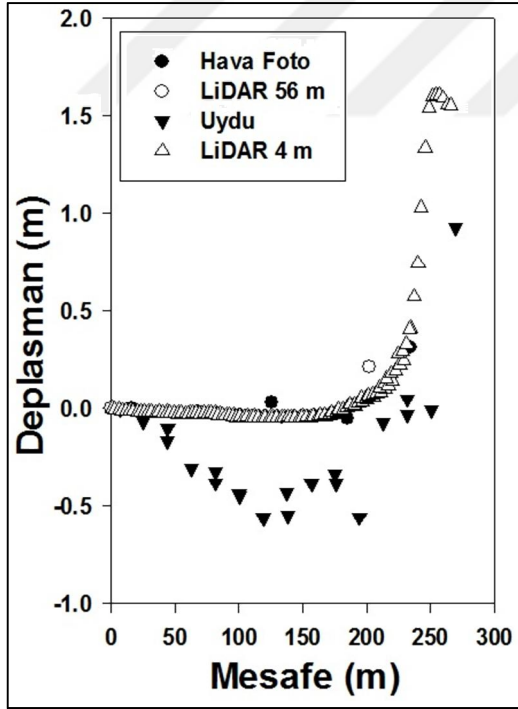


a) Hat 1 Paralel

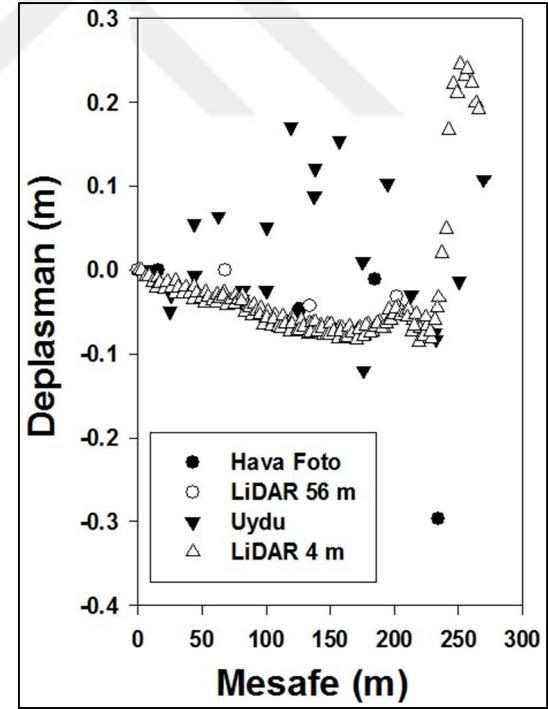


b) Hat 1 Dik

Şekil 3.21: Hat 1 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları.

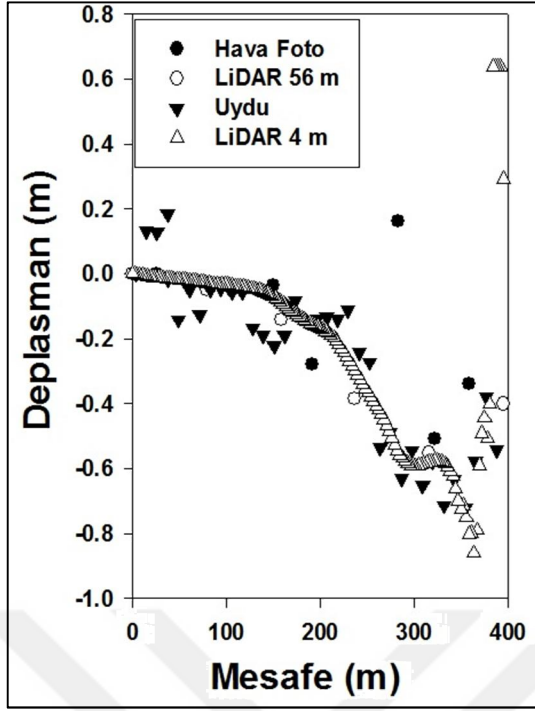


a) Hat 2 Paralel

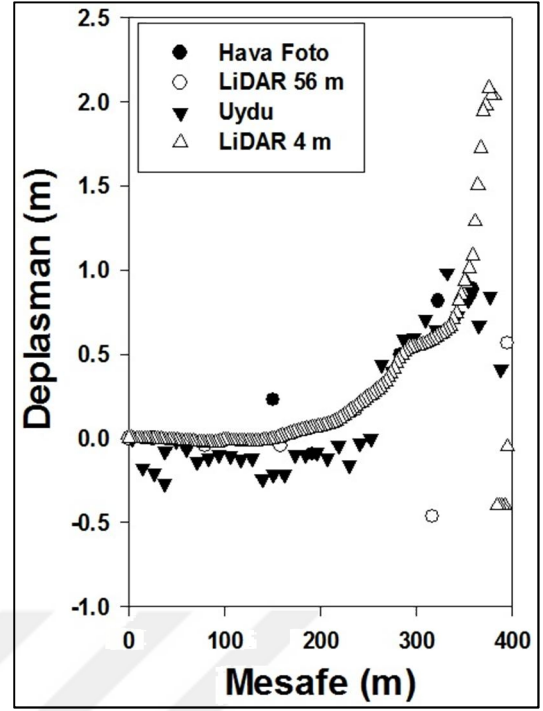


b) Hat 2 Dik

Şekil 3.22: Hat 2 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları

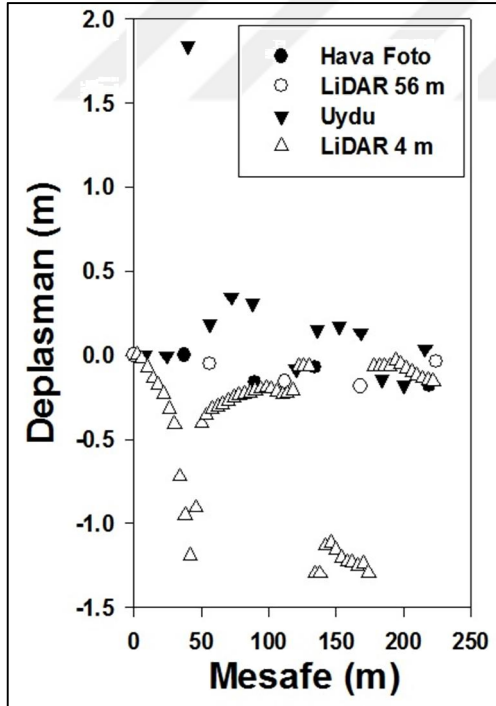


a) Hat 3 Paralel

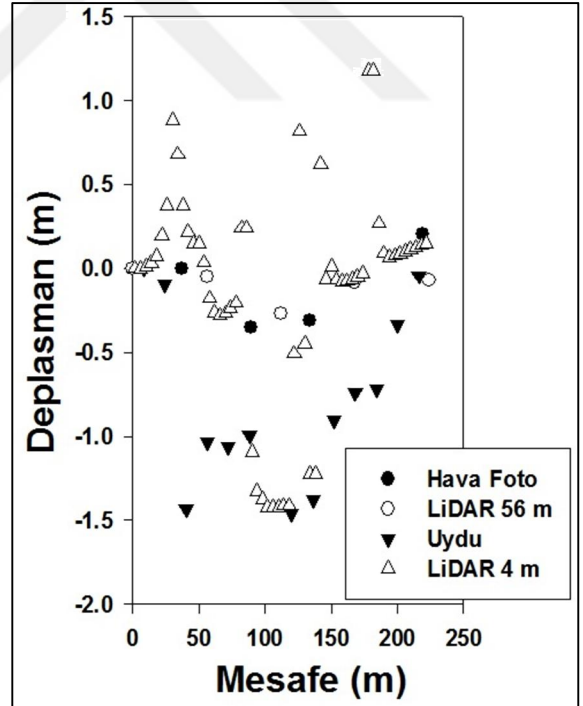


b) Hat 3 Dik

Şekil 3.23: Hat 3 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları

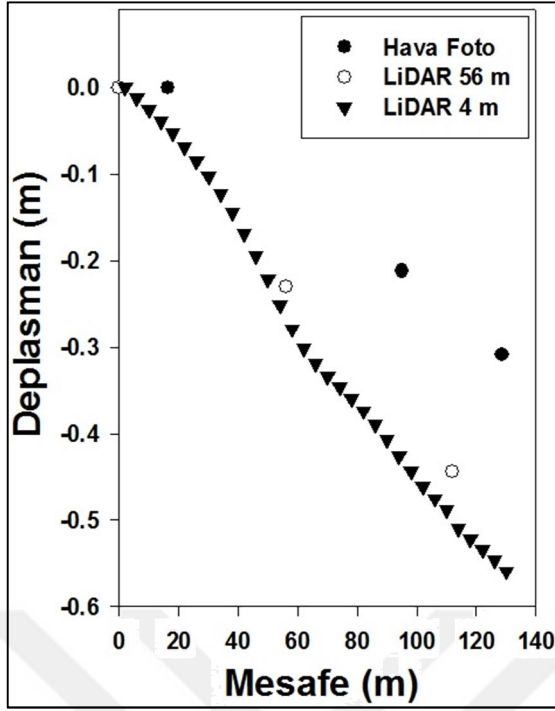


a) Hat 4 Paralel

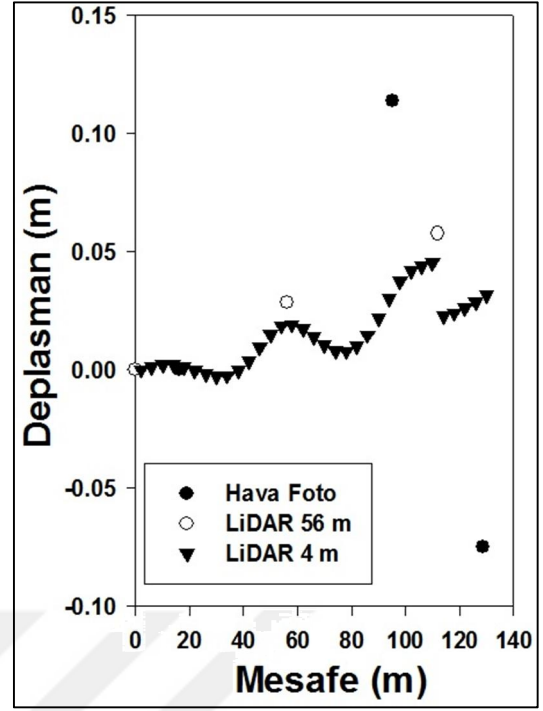


b) Hat 4 Dik

Şekil 3.24: Hat 4 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları

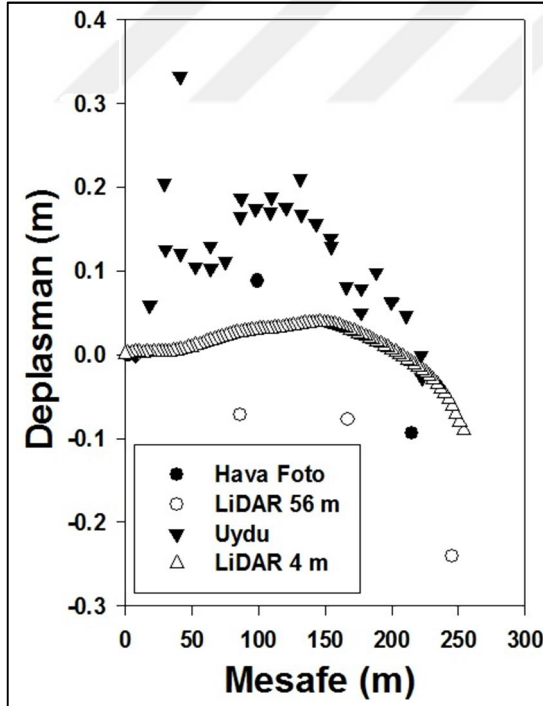


a) Hat 5 Paralel

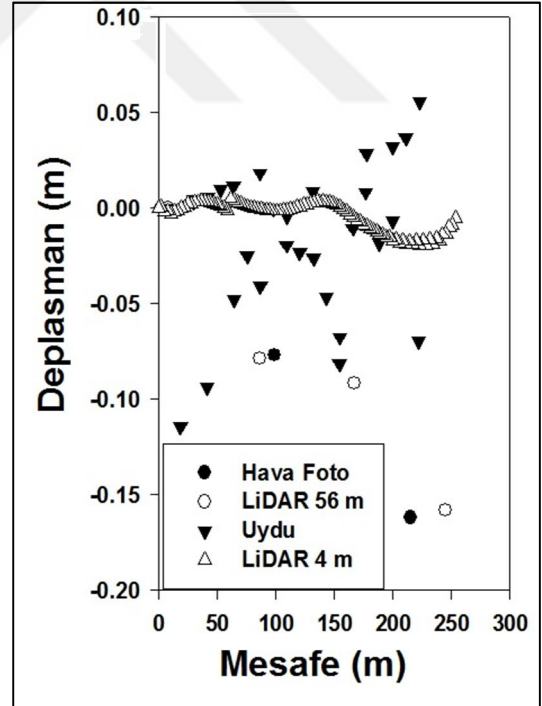


b) Hat 5 Dik

Şekil 3.25: Hat 5 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları

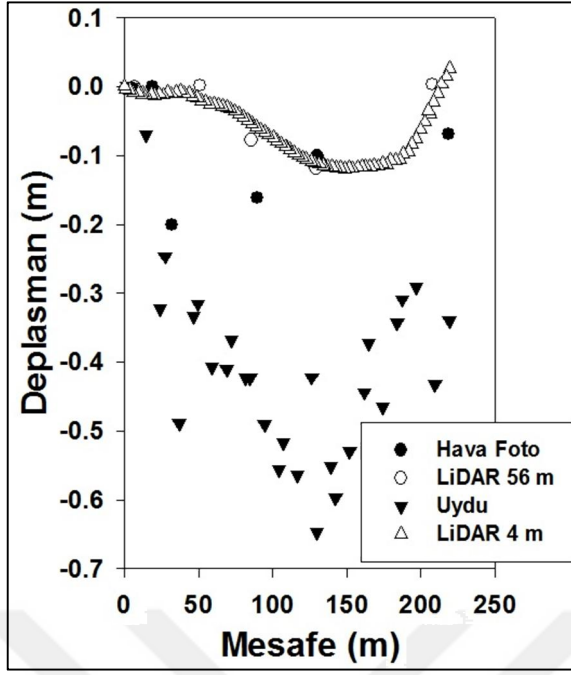


a) Hat 6 Paralel

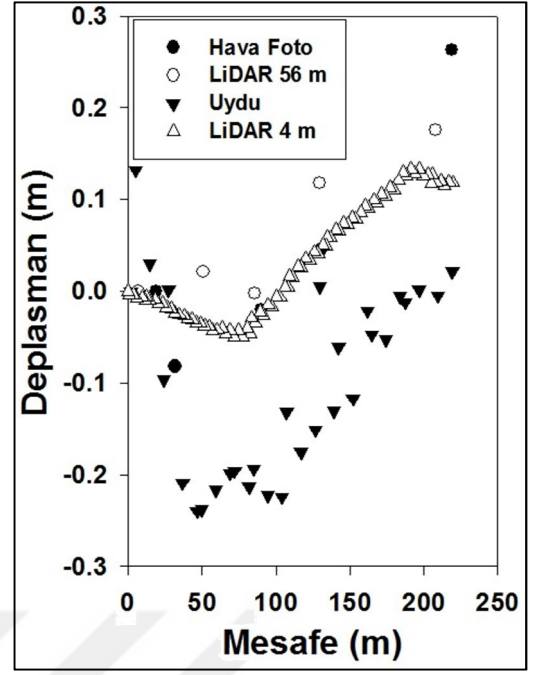


b) Hat 6 Dik

Şekil 3.26: Hat 6 için Hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, Uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları

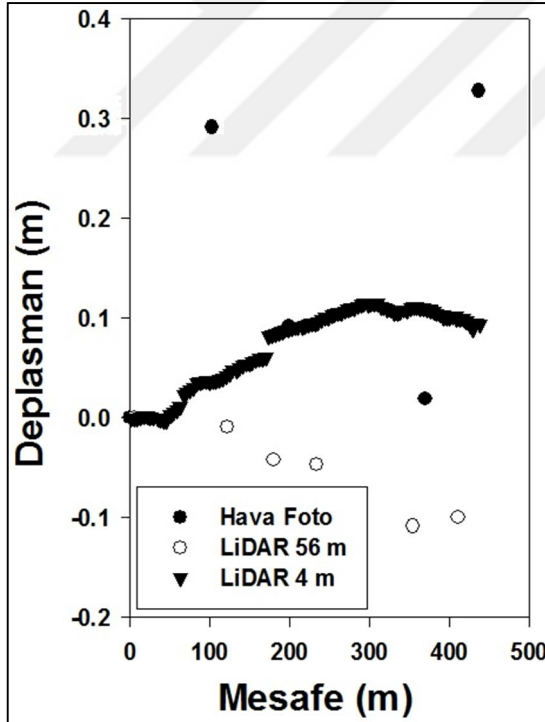


a) Hat 7 Paralel

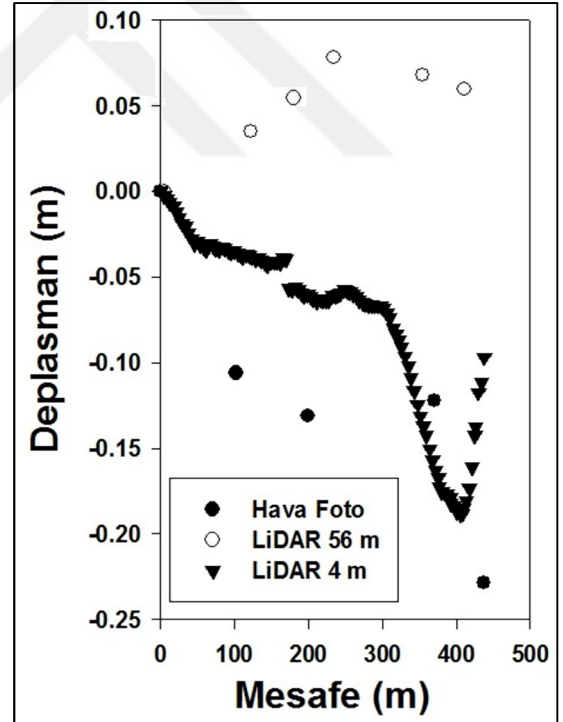


b) Hat 7 Dik

Şekil 3.27: Hat 7 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları

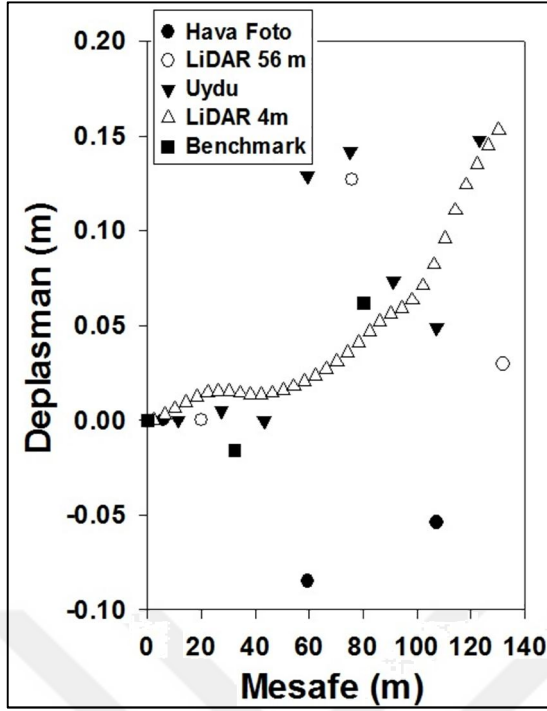


a) Hat 8 Paralel

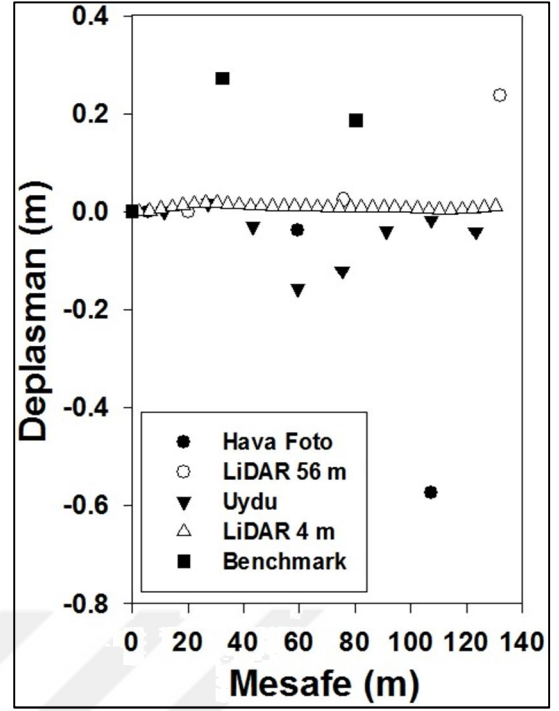


b) Hat 8 Dik

Şekil 3.28: Hat 8 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m ve LiDAR 4mx4m deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları

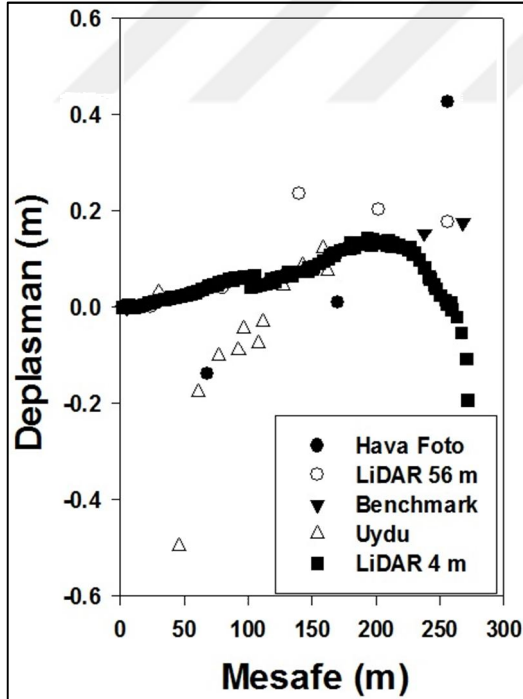


a) Hat 9 Paralel

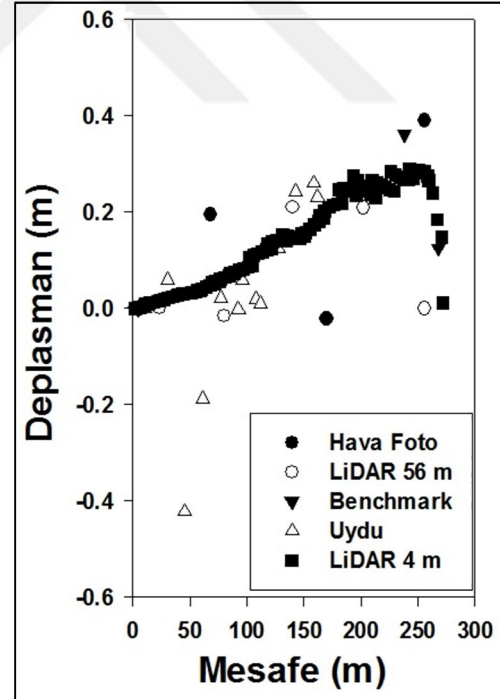


b) Hat 9 Dik

Şekil 3.29: Hat 9 için Hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, Uydu görüntüleri, LiDAR 4mx4m ve Referans (Benchmarks) deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları



a) Hat 10 Paralel

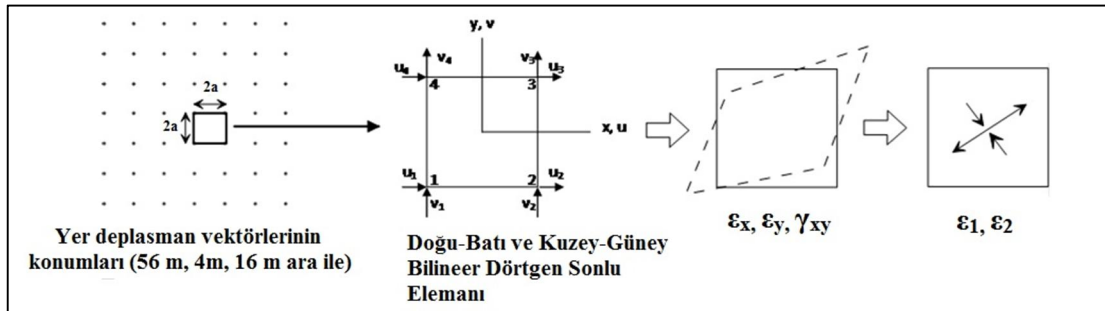


b) Hat 10 Dik

Şekil 3.30: Hat 10 için hava fotoğrafı, LiDAR 56mx56m, uydu görüntüleri, LiDAR 4mx4m ve Referans (Benchmarks) deplasman ölçümlerinin paralel ve dik bileşenlerinin karşılaştırmaları

3.6 Yatay Şekil Değiştirmeler

Tez kapsamında yatay şekil değiştirmeler çeşitli metotlarla bulunan yatay yer deplasmanları yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan şekil değiştirmeler daha sonra boru hattı ve hasarlarıyla birlikte hasar ilişkileri analizlerinde kullanılmıştır. LiDAR 56 m, LiDAR 4 m, hava fotoğrafı ölçümleri ve uydu ölçümleri kullanılarak bulunan deplasmanlar yardımıyla yatay şekil değiştirmelerinin hesaplanmasında aynı yol izlenmiştir. 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 (Şekil 3.31). Cook (1995) çalışmasında anlatıldığı gibi, eleman merkezlerindeki yatay yer şekil değiştirmelerini belirlemek için sonlu elemanlar formülleri kullanılmıştır. Şekil değiştirme matrisi, LiDAR 56 m aralıklı veri seti için 56x56 m, LiDAR 4 m aralıklı veri seti için 4x4 m, hava fotoğrafları veri seti için 56x56 m ve uydu ölçümleri veri seti için 16x16 m hücre deplasmanlarından Formül 3.1'deki gibi hesaplanmıştır.



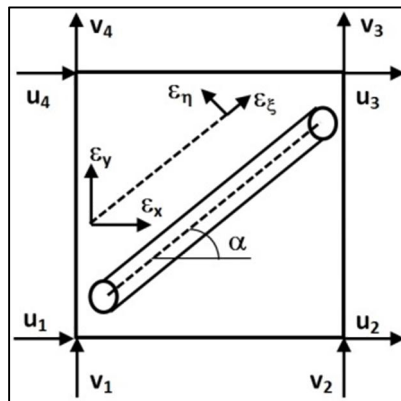
Şekil 3.31: Yatay yer değiştirmeler yardımıyla yatay şekil değiştirmelerin ve asal şekil değiştirmelerin hesaplanma süreci

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{4a^2} \begin{bmatrix} -(a-y) & 0 & (a-y) & 0 & \cdots \\ 0 & -(a-x) & 0 & -(a+x) & \cdots \\ -(a-x) & -(a-y) & -(a+x) & (a-y) & \cdots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

$u_1, v_1, u_2, \dots, v_4$, Şekil 3.35’de belirtilen köşe deplasmanları, x ve y iki boyutlu uzaydaki koordinatları, $2a$ ise kare hücrenin kenar uzunluğu olmakla birlikte, burada 56 m, 4 m veya 16 m’ dir. Çalışmada Formül 3.1’den elde edilen şekil değiştirmelerden, tüm ölçüm metotları için literatürde yaygın olarak kullanılan şekil değiştirme dönüşüm formülü (Formül 3.2) yardımıyla asal şekil değiştirmeler (ϵ_1 ve ϵ_2) elde edilmiştir. Hasar ilişkileri analizlerinde asal şekil değiştirmeler kullanılmıştır.

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (3.2)$$

Asal şekil değiştirmeler yanında çalışmada boru hatlarına paralel ve dik doğrultudaki şekil değiştirmelerin etkisinin ne olacağı hakkında analizler yapılmıştır. Şekil 3.36’da görüldüğü gibi her borunun doğrultusunda bir ϵ_ξ yatay şekil değiştirme bileşeni ve doğrultuya dik bir ϵ_η yatay şekil değiştirme bileşeni bulunmaktadır. Bu bileşenler, yukarıda nasıl bulunduğu anlatılan ϵ_x , ϵ_y ve γ_{xy} şekil değiştirmeleri yardımıyla Formül 3.3 ve Formül 3.4 ile bulunabilmektedir. Böylece boru doğrultusunda ve boruya dik bileşenler yardımıyla hasar analizleri hesaplanmıştır. Buradaki amaç ise literatürde yaygın olarak kullanılan asal şekil değiştirmeler (ϵ_1 ve ϵ_2) yanında boru doğrultusunda ve boruya dik şekil (ϵ_ξ , ϵ_η) değiştirmelerin etkisini incelemektir. Formül 3.3 ve Formül 3.4’de görüldüğü üzere bu şekil değiştirmeleri hesaplamak için boru doğrultusuna (α) ihtiyaç vardır. Şekil 3.32’de görünen bu α açısı değeri CBS sistemi programı (ArcMap) kullanılarak her bir boru için hesaplanmıştır.



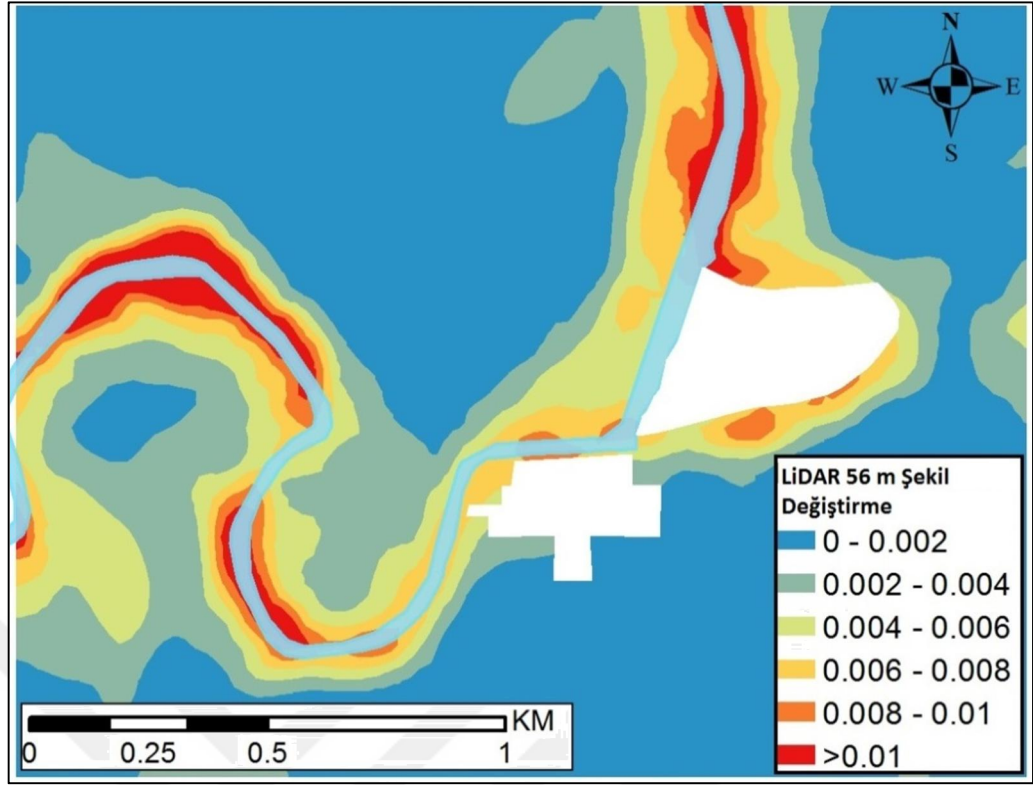
Şekil 3.32: Boru doğrultusunda ve bu doğrultuya dik şekil değiştirmelerin gösterimi.

$$\varepsilon_{\xi} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\alpha + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\alpha \quad (3.3)$$

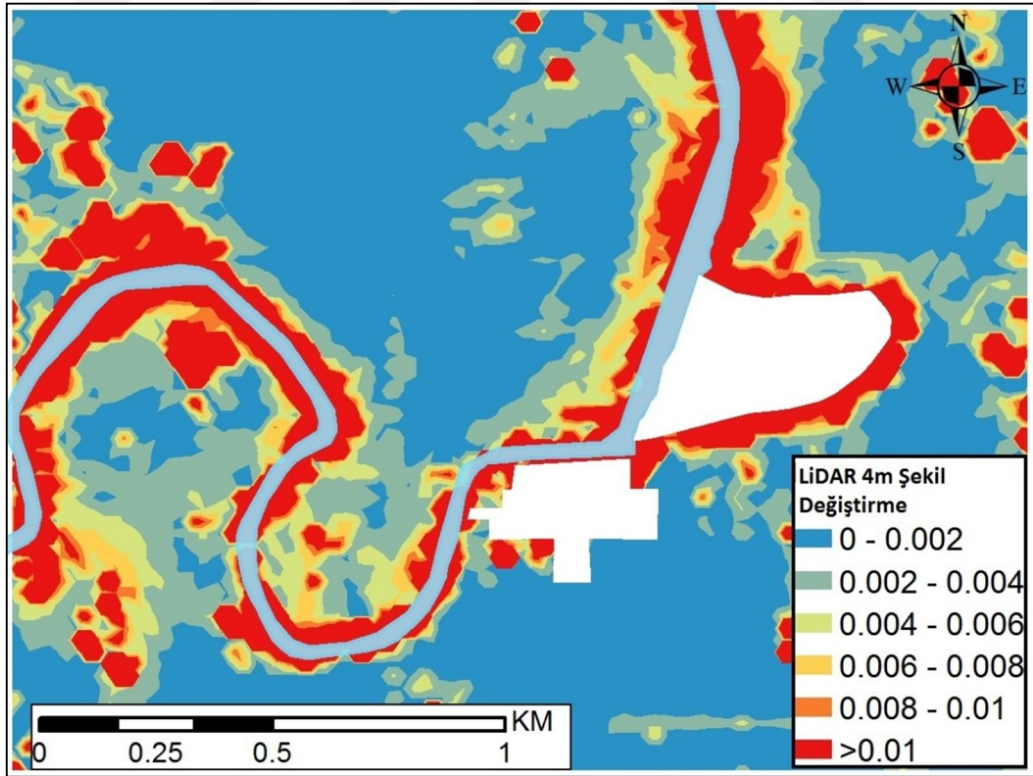
$$\varepsilon_{\eta} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\alpha - \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\alpha \quad (3.4)$$

Yukarıda anlatıldığı gibi yatay şekil değiştirmeler çeşitli deplasman ölçüm metotları yardımıyla hesaplanmıştır. Şekil 3.33-Şekil 3.36'da sırasıyla LiDAR 56 m, LiDAR 4m, hava fotoğrafı ve uydu ölçümlerinden hesaplanan mutlak değer olarak en büyük asal yatay şekil değiştirme haritaları görülmektedir.

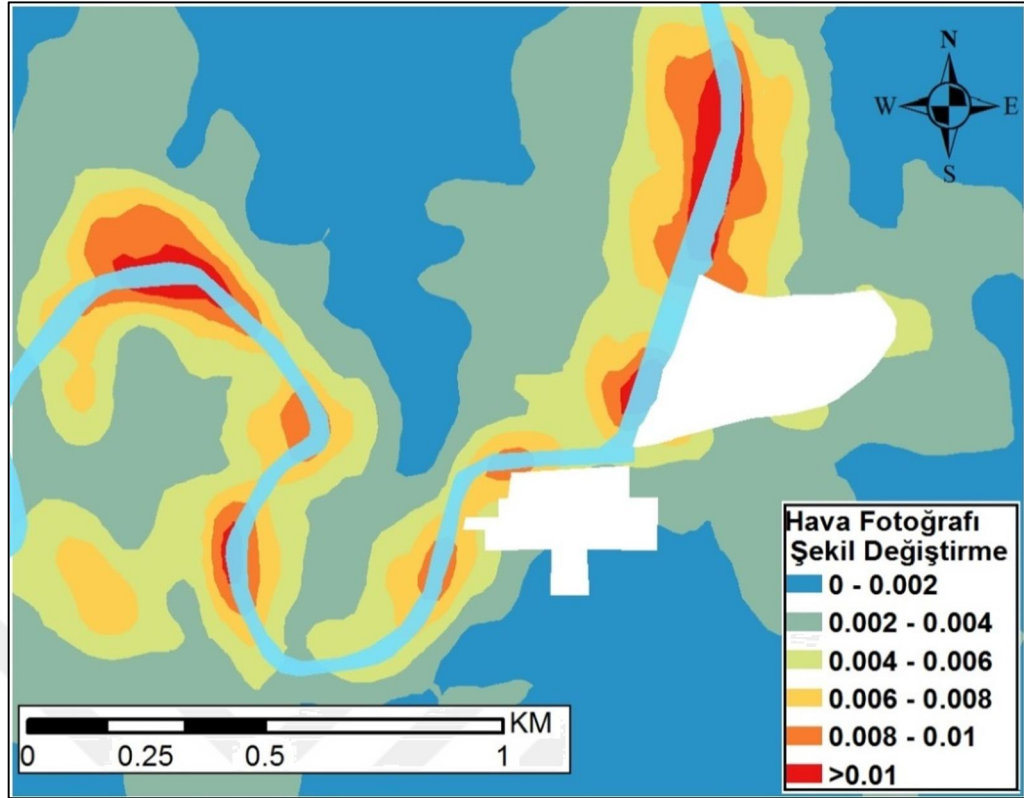
LiDAR 4m, LiDAR 56m ve uydu ölçümlerinin yatay yer hareketi verileri kuzey-güney ve doğu-batı yönlerinde aynı olmak koşuluyla sırasıyla 4m, 56 m ve 16 m'dir. Hava deplasman verilerinde aralarında düzenli bir mesafe bulunmamakla birlikte saçılmış şekildedirler. Çalışmada hava deplasman verileri yukarıda anlatılan eleme sürecinden geçirilmiş ve sonuç olarak 652 veri üstünde işlemler yapılmıştır. Bu 652 veri noktasından çalışma bölgesinde kriging enterpolasyon yöntemiyle hem kuzey-güney hem doğu-batı yönünde deplasman haritaları çıkartılmıştır. Daha sonra Bu haritalardan LiDAR 56m ölçüm noktalarının üstündeki yatay yer hareketi ölçümleri elde edilmiştir. Bundan sonra yatay şekil değiştirmeleri bulmak için LiDAR 56m verisinde izlenen yol ile analizler yapılmıştır.



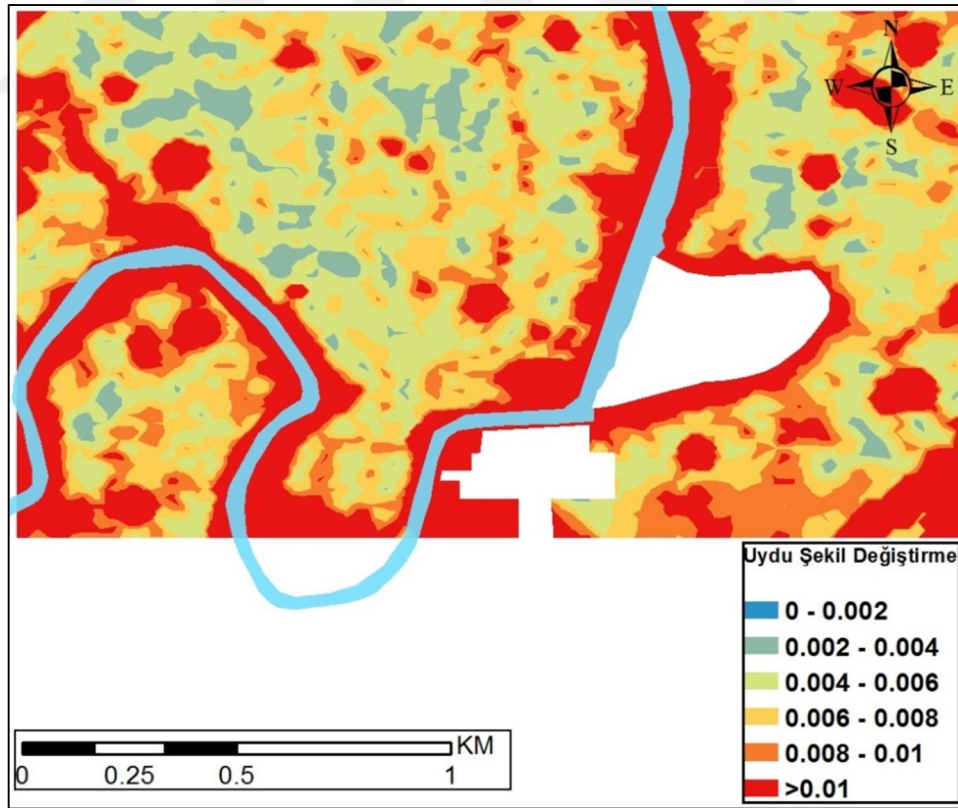
Şekil 3.33: LiDAR 56 m yatay şekil değiştirme haritası



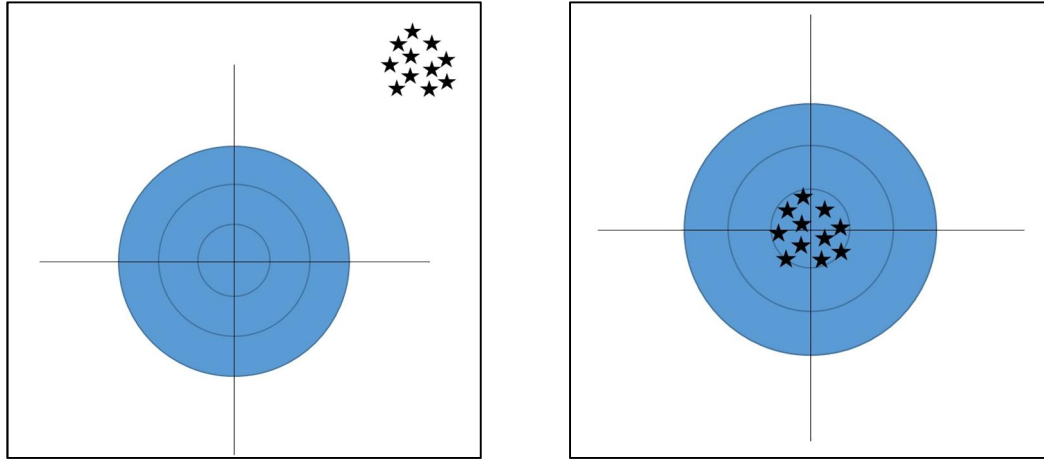
Şekil 3.34: LiDAR 4 m yatay şekil değiştirme haritası



Şekil 3.35: Hava fotoğrafı yatay şekil değıştirme haritası



Şekil 3.36: Uydu ölçümleri yatay şekil değıştirme haritası



a) Kesin ama doğru olmayan veri seti

b) Kesin ve doğru olan veri seti

Şekil 3.38: Veri setlerinin doğruluğu ve kesinliği.

LiDAR ölçümlerinin yatay şekil değiştirmede, uydu ölçümlerinin ise yatay yer hareketlerinin tahmininde ana etken olarak aşağıdaki iki maddeden dolayı daha iyi sonuçlar vermektedir.

- İki veri setinin ölçüm sapmaları (hataları) bakımından doğruluklarının ve kesinliklerinin farklılığı.
- Ölçüm sapmalarının (hataları) konumsal bağımsızlığı ve konumsal bağımlılığının farklılığı.

Ölçüm hataları, belirli bir konumdaki yatay yer değiştirmenin gerçek değeri ile belirli bir konumdaki yatay yer değiştirmenin türetilen değeri arasındaki fark ile tanımlanmaktadır. Uydu görüntü ölçümlerinin türetilmiş yatay yer hareketleri konumsal olarak bağımsızdır. Bunun nedeni, değerlendirilen alan boyunca tüm görüntü piksellerinin hepsinin birbirine göre konumlandırılmış olması ve ortalama ölçüm hatasının herhangi bir alt küme alanı için sıfır olmasıdır. Oluşan ölçüm hataları, piksel çözünürlüğünün sınırlandırılması ve uydu görüntüleri çiftleri arasındaki piksel kümelerinin eşlemesinin yanlış tanımlamalarından kaynaklanmaktadır. Bu ölçüm hatası genellikle konumsal olarak bağımsızdır. Başka bir deyişle, belirli bir hücrenin yatay hareketinin aşırı bir tahmini varsa, bu komşu hücreler üzerinde yatay hareketin fazla tahmininin (veya yatay hareketin tahmini altında olacağı) olasılığını etkilemez. Uydu görüntüsünün piksel çözünürlüğü 0.3-0.5 m olduğundan, mekânsal olarak bağımsız ölçüm hatası oranı daha yüksektir. Bu, uydu görüntülerinin türetildiği yatay hareketlerin doğru fakat kesin olmadığı anlamına gelmektedir. Yatay yer hareketlerini tahmin etmede (özellikle de bazı

konumsal düzeltmeler uygulandığında) bu iyi olur, ancak yatay şekil değiştirmelerin tahmininde o kadar iyi sonuçlar vermemektedir.

LiDAR ölçümlerinden türetilen yatay hareketlerin ölçüm hatası mekânsal olarak bağımlıdır. Bunun nedeni, LiDAR araştırma noktası bulut ölçümlerinde komşu cisimlerin (örneğin bitişik evler vb.) ölçüm noktalarının konumundaki ölçüm hatası (örneğin uçağın konumu) ile aynı göreceli ölçüm hatasına sahip olma olasılıklarının daha yüksek olmasıdır. Bir alanda, bir yönde bir ölçme sapması olabilir, ancak uçuş yolu boyunca diğer yönde de aynı şekilde bir ölçüm sapması olabilmektedir. Bununla birlikte, herhangi bir alt grup alanında, piksel grubu için ölçüm hatasının standart sapması çok daha düşüktür. Çünkü LiDAR lazerinin gerçek ölçüm hatası düşük (± 50 mm) olmakla birlikte, haritalama nesnesi hareketleri ile ölçümler arasındaki yanlış tanımlamalar uydu görüntüleme yöntemlerine kıyasla daha düşüktür. Bu, eğer belirli bir hücrenin yatay yer hareketi fazla tahmin edilmişse, komşu hücreler üzerinde de yatay hareketin fazla bir tahmini olacağı olasılığı anlamına gelmektedir. Fakat iki komşu hücrenin hareketleri arasındaki bağıl ölçülen farkı (örneğin şekil değiştirmeler) negatif olarak etkilememektedir. Yani lazer ölçümlerin kendi ölçümleri için daha düşük ölçme hatasına sahip olması nedeniyle şekil değiştirmeler gibi birbirine göreceli ölçümlerde daha doğru sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda LiDAR ölçümlerinden elde edilen yatay yer hareketlerinin doğruluğunun (accuracy) düşük, kesinliğinin (precise) ise yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır. Özetle LiDAR ölçümleri, yatay yer hareketlerinin tahmininde kötü sonuçlar verirken yatay şekil değiştirmelerinin tahmininde iyi sonuçlar vermektedir.

3.7 Düşey Yer Hareketleri ve Oturmaya Bağlı Açısal Değişim

22 Şubat 2011 Christchurch depreminden kaynaklanan düşey yer hareketleri deprem öncesi ve deprem sonrası LiDAR metoduyla ölçülüp sayısal yükseklik modeliyle (DEM) geliştirilmesi sonucunda elde edilmiştir (NZGD 2012). Tüm LiDAR ölçüm bölgesi için çok kapsamlı ve büyük olan düşey yer hareketi veri seti yaklaşık olarak üç milyon veri noktasından oluşmaktadır. Bu noktalar arası mesafe kuzey-güney ve doğu-batı yönlerinde 5 m'dir. Düşey yer hareketlerinden

kaynaklanan hasar ilişkileri, oturmaya bağlı açısal değişim (β) diye adlandırılan parametre yardımıyla hesaplanmıştır. Oturmaya bağlı açısal değişim, β , iki bitişik LiDAR noktası farkının ($d_{v1} - d_{v2}$), 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 açısal değişim, 5 m hücre için LiDAR ölçümlerinin, üçüncü dereceden sonlu farklar yöntemiyle (Horn 1981) CBS' de 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.

4. SIVILAŞMA PARAMETRELERİ

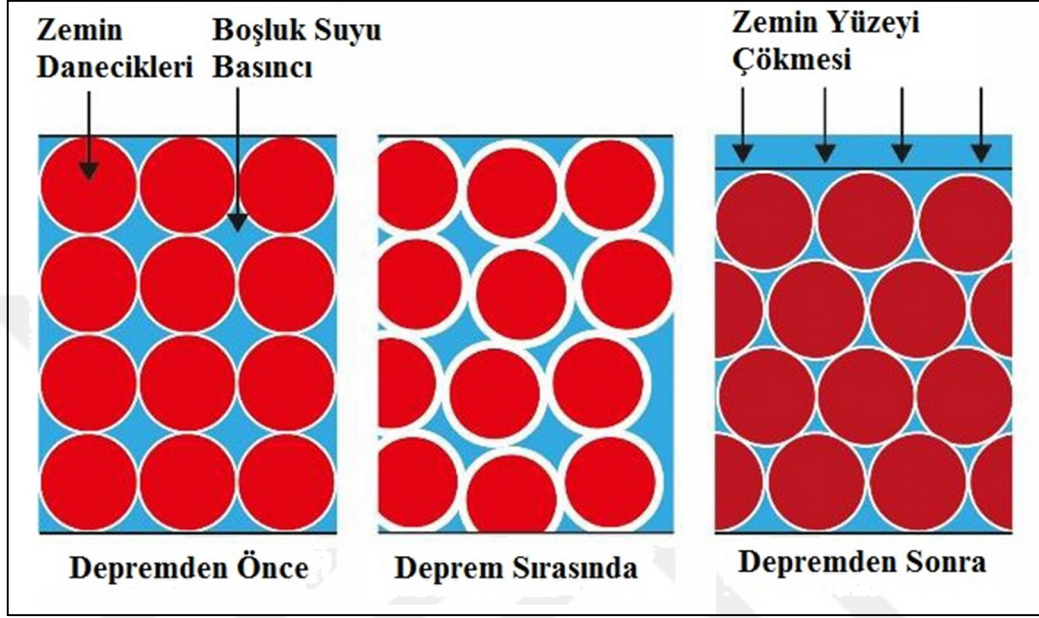
Sıvılaşma geoteknik deprem mühendisliğindeki en önemli, ilginç, karmaşık ve üzerinde en çok tartışılan konulardan biridir. Sıvılaşmanın yıkıcı etkilerinin geoteknik mühendislerinin dikkatini çekmesi 1964 yılında üç aylık dönem içinde peş peşe meydana gelen Alaska'daki Good Friday ($M_w=9.2$) depremi ile Japonya'daki Niigata ($M_s=7.5$) depremiyle olmuştur (Kramer, 1996). Niigata depremi, çoğunlukla yaygın zemin sıvılaşması nedeniyle bir milyar doların üstünde zarar vermiştir. Şekil 4.1'de sıvılaşmanın gösterimi açısından sembol fotoğraflardan biri olan Niigata depremi sonrası sıvılaşma etkisiyle zarar gören yapılar görülmektedir (Japan National Committee on Earthquake Engineering, 1965). Sıvılaşma konusu bu depremlerden sonra birçok araştırmacı tarafından dünyanın çeşitli yerlerinde ayrıntılı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.1: Niigata depremi sonrası sıvılaşma etkisiyle zarar gören yapılar (Japan National Committee on Earthquake Engineering 1965).

Sıvılaşma terimi basit olarak granüler bir zeminde artan boşluk suyu basıncı ve azalan efektif gerilme sonucunda zemin mukavemetinin azalması ve adeta sıvı bir davranış göstermesi şekliyle açıklanabilmektedir. İlk kez Mogami ve Kubo (1953)

tarafından kohezyonsuz zeminlerde drenajsız şartlardaki tekdüze, dengesiz ve tekrarlamalı örselenmeden kaynaklanan zemin deformasyonları ile ilgili değişik olayları nitelemek üzere kullanılmıştır. Kohezyonsuz, suya doygün kumlu ve siltli zeminlerde gerçekleşen sıvılaşma olayını tetikleyen en büyük etken depremlerdir. Şekil 4.2’de sıvılaşma süreci şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Sıvılaşma Süreci

Tez kapsamında sıvılaşmayı tetikleyen Canterbury deprem dizisinin en büyük depremlerinden olan 22 Şubat 2011 Christchurch depremi kullanılmıştır. Canterbury deprem dizisi, yüksek seviyede yer hareketi ile tekrarlayan depremlere eşlik eden yanal yayılma ve ciddi sıvılaşma etkisinde üst yapı ve altyapı sistemlerinin kritik davranışlarının değerlendirilmesi için eşsiz bir deprem verisi olarak görülmektedir. Sıvılaşma analizi, literatürde yer alan bazı tetikleme metotlarıyla hesaplanan sıvılaşma parametreleriyle kapsamlı bir şekilde yapılmıştır. Bu kapsamlı çalışmalar hem literatürdeki tetikleme metotlarının birbirinden farklarını hem de hesaplanan sıvılaşma parametrelerinin avantaj-dezavantajlarını ortaya koymuştur. Şekil 4.3’de Christchurch şehrinde Canterbury deprem dizisi sonrasında sıvılaşma ile ilgili arazi hasarları ve yerleşim yapılarındaki hasarlar görülmektedir (Van Ballegooy ve diğ. 2014^a).

Sıvılaşma, arazi ve yerleşim yapıları üzerinde verdiği hasarlara ek olarak Christchurch şehrinin su dağıtım sistemine de büyük hasar vermiştir. O’Callaghan

(2014), sıvılaşabilir zeminde boru hattı hasarlarını çekme ve basınç etkileri olarak ikiye ayırmaktadır. Şekil 4.4’ de AC tipi borunun bağlantı noktalarında çekme ve basınç etkileri görülmektedir (O’Callaghan 2014).



Şekil 4.3: Christchurch şehrinde Canterbury deprem dizisi sonrasında sıvılaşma ile ilgili arazi hasarları ve yerleşim yapılarındaki hasarlar (Van Ballegooy ve diğ. 2014^a)



a) AC tipi boru bağlantı bölgesinde çekme etkileri, Sewell Caddesi, Kaiapoi b) AC tipi boru bağlantı bölgesinde basınç etkileri, Sewell Caddesi, Kaiapoi

Şekil 4.4: Sıvılaşma sebebiyle meydana gelen boru hasarları (O'Callaghan 2014)

Tez kapsamında, sıvılaşma veri tabanı olarak iki çeşit veri tabanı kullanılmıştır. Bunlardan birincisi tez çalışmasının ilk yıllarında elde edilen hava fotoğrafı ve arazi gözlemleri sonucu oluşturulmuş sıvılaşma veri tabanıdır. İkincisi ise konik penetrasyon deneyi (CPT) verileri kullanılarak hesaplanan çeşitli sıvılaşma parametrelerini içeren sıvılaşma veri tabanıdır.

4.1 Hava Fotoğrafı ve Arazi Gözlemleri İle Oluşturulan Sıvılaşma Bölgesi

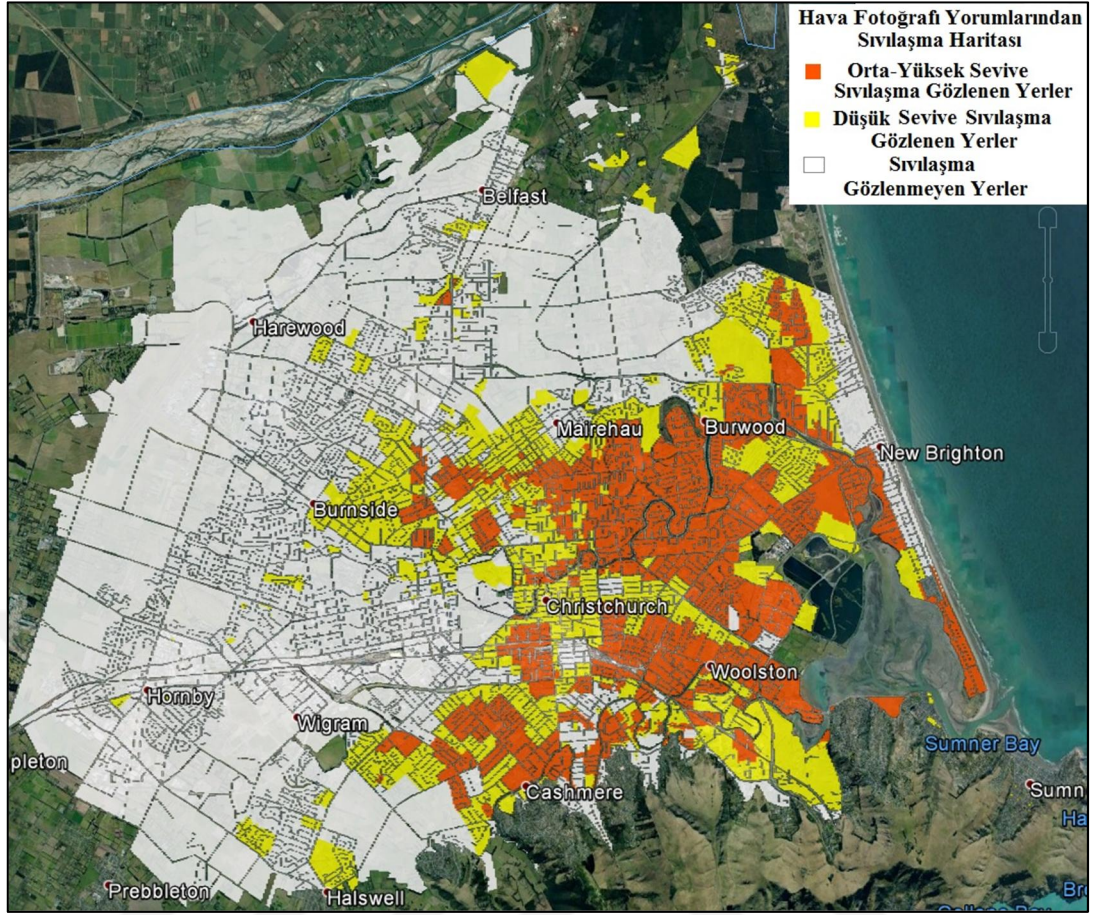
Canterbury Geoteknik Veri Tabanı (2013) tarafından hazırlanan, hava fotoğrafı ve arazi gözlemleri ile oluşturulan sıvılaşma bölgesi yeni adı Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı (NZGD) olan veri tabanında bulunmaktadır. Canterbury deprem dizisinin dört büyük depremi (4 Eylül 2010, 22 Şubat 2011, 13 Haziran 2011 ve 23 Aralık 2011) için hava fotoğraflarından sıvılaşmayla yüzeye çıkan maddelerin yorumlanmasıyla bölgesel ölçekli haritalar çıkartılmıştır. Bu haritalar, hava fotoğrafları kullanılarak sıvılaşmadan dolayı yüzeye çıkan malzemelerin, sokaklarda oluşturduğu yığınların miktarını görsel olarak tanımlamaktadır. Her büyük deprem sonrasında çekilen hava fotoğrafları Google Earth kullanılarak NZGD tarafından ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Çıkan malzemelerin görünür kanıtı olan şehrin bölümleri tanımlanmış ve sayısallaştırılmıştır. Bölge sınırları, bireysel yüzey özelliklerinin sınırları yerine yol merkezi hatları ve bireysel mülk sınırları ile aynı hizaya konulmuş ve içerdikleri özelliklere göre sınırlar belirlenip haritalandırılmıştır.

Sınırları oluşturan farklı üç çeşit sıvılaşma durumu bulunmaktadır. Bunlar Tablo 4.1’de açıklanmıştır.

Tablo 4.1: Sıvılaşma haritasının sınıfları.

Sıvılaşma Sınıfı	Görünen Özellikler
Orta-Yüksek Seviye	- Yollardan, tipik bir araç genişliğinden daha fazla malzeme veya ıslak toprak parçası çıkmıştır. - Araziden veya yoldan malzeme çıkmıştır. - 2-3 grup çıkan malzeme mülklerin veya parkların içerisinde sıvılaşmadan dolayı kaynama olayı gerçekleştirmiştir.
Düşük Seviye	- Yollardan, tipik bir araç genişliğinden daha az malzeme veya ıslak toprak parçası çıkmıştır. - Sadece 1 veya 2 grup çıkan malzeme mülklerin veya parkların içerisinde sıvılaşmadan dolayı kaynama olayı gerçekleştirmiştir.
Sıvılaşma Yok	- Yukarıdaki olaylardan hiçbirisi gerçekleşmemiştir.

Hava fotoğrafları çeşitli kalite ve ışık durumlarına sahiptirler. Düşük güneş açısından oluşan bazı bölgelerdeki gölgeler ve fotoğraf setleri yeryüzünden çıkan malzeme olarak yanlış tanımlanabilmektedir. Patlamış borulardan veya su kaynaklarından çıkan sular da aynı şekilde çıkan malzeme olarak yanlış değerlendirilebilmektedirler. Tam tersine çıkan malzemenin görünmesine bir engel olabilir veya fotoğraf çekilmeden önce kaldırılmış olabilmektedir. Şekil 4.5’de 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin tetiklediği sıvılaşma haritası gösterilmektedir (Canterbury Geotechnical Database 2013). O’Rourke ve diğ. (2012 ve 2014), Bouziou (2015) çalışmalarında bu sıvılaşma bölgesini göz önünde bulundurarak 22 Şubat 2011 Christchurch depreminin boru hatları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Tez çalışmasında üstünde kapsamlı çalışmalar yapılan Avonside bölgesi bu sıvılaşma haritasına göre yüksek sıvılaşma bölgesi içinde yer almaktadır.



Şekil 4.5: 22 Şubat 2011 Depremi için Hava Fotoğraflarının Yorumlanmasıyla Oluşturulan Sıvılaşma Haritası (Canterbury Geotechnical Database 2013)

4.2 CPT Yardımıyla Oluşturulmuş Sıvılaşma Bölgeleri

Literatürde sıvılaşma analizleri için sıklıkla kullanılan arazi deneylerinden sıvılaşma parametrelerinin elde edilmesiyle ilgili sayısız çalışma bulunmaktadır. Arazi deneylerinden en çok kullanılan deneyler ise Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) ile sıvılaşma parametrelerinin elde edilmesidir. Canterbury deprem dizisi boyunca Christchurch şehri ve yakınlarını çevreleyen alanlar ciddi seviyede sıvılaşmaya maruz kalmışlardır. Sonraki süreçte yapılan mühendislik çalışmalarıyla sıvılaşma hasar gözlemleri, yerinde arazi test verileri ve yaşam hattı sistemlerinin sınır performans verileri için eşsiz bir veri seti oluşturmuştur. Bölüm 2’de NZGD adı verilen veri seti tabanı ayrıntılı anlatılmıştır. Bu çalışmada ise Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanında (NZGD) bulunan yaklaşık

18000 CPT deney verisiyle yapılan hesaplamalar sonucunda bulunan bazı sıvılaşma parametreleri yardımıyla boru hasar ilişkileri analizleri yapılmıştır.

Tez kapsamında sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI), sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) ve hesaplanmış bir boyutlu oturma (S_{VID}) olmak üzere üç farklı sıvılaşma parametresi kullanılmıştır. Literatürde sıvılaşma indeksleri kullanarak boru hasar ilişkilerinin kullanılması açısından bu çalışmanın ilk olma özelliği bulunmaktadır. Sıvılaşma indeksleri hesaplanırken farklı sıvılaşma tetikleme olasılıklarıyla (%15, %50 ve %85) hesaplamalar yapılmıştır.

4.2.1 Sıvılaşma Tetikleme Metotları

Bir depremde sismik talep, zeminin talebe dayanma yeterliliğini aşarsa o zeminde sıvılaşma tetiklemesi meydana gelmektedir. Bir deprem tarafından sıvılaşmayı tetiklemek için dayatılan sismik talep, çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ile temsil edilmektedir. Çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) ise sismik sarsıntı ile zemin üzerinde uygulanan sıvılaşma talebine karşı zeminin yeterliliğinin bir göstergesi olup zeminin göreceli yoğunluğuna ve ince dane içeriği (FC)'ye bağlıdır. Zemin direnci sismik talebin altında olduğunda sıvılaşma tetiklemesi gerçekleşmektedir ($CRR < CSR$).

Bir zemin profili içinde yer alan sıvılaşma alanı tipik olarak, belirli bir basitleştirilmiş sıvılaşma tetikleme yöntemi kullanılarak CPT sonuçlarının analiz edilmesiyle değerlendirilebilir; bu yöntem mevcut sarsıntıda ve yer altı su seviyesinde tüm derinlik boyunca sıvılaşması muhtemel olan ve olmayan katmanların değerlendirilmesiyle yapılmaktadır. Belirli bir zemin profili için sıvılaşma tetiklenmesi sarsıntı seviyesine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Yaygın olarak kullanılan dört farklı sıvılaşma metodu bulunmaktadır. Bunlar Robertson ve Wride (1998), Moss ve diğ. (2006), Idriss ve Boulanger (2008) ve Boulanger ve Idriss (2014) metotlarıdır. Bu yöntemlerin her biri, geçmiş depremler kullanılarak sıvılaşma olaylarından geliştirilen ampirik ilişkilerdir. Bu yöntemleri geliştirmek için kullanılan adımlar genel olarak aşağıdaki sırayı takip etmektedir.

- CPT incelemeleriyle bir bölge içinde sıvılaşması, o bölgedeki diğer zemin profillerine göre daha muhtemel zemin katmanlarının vaka geçmişi belirlenir.
- Kritik zemin tabakası için CSR tahmin edilir. CSR, yer sarsıntısı seviyelerinin bir fonksiyonudur (Pik Yer İvmesi (PGA), Moment Büyüklüğü (M_w), ve yer altı su seviyesi yüksekliği).
- Normalleştirilmiş temiz kum eşdeğer CPT uç direnci hesaplanır (q_{CINCS}). q_{CINCS} ; CPT uç direnci (q_c), yer altı su seviyesi (YASS), laboratuarda belirlenen ince dane içeriği (FC) ve zemin yoğunluğunun bir fonksiyonudur.
- Vaka geçmişi bölgelerinin her birindeki kritik zemin katmanı için CSR ile q_{CINCS} grafiği çizilir.
- Sıvılaşmanın olduğu vaka geçmişi bölgelerini, sıvılaşmanın oluşmadığı vaka geçmişi bölgelerinden en iyi şekilde ayıran bir zarf eğrisi çizilir. Bu zarf eğrisine genel olarak CRR ampirik denklemi ismi verilmektedir.

Sıvılaşma tetikleme metotlarının geliştirilmesindeki adımlarda, verilerin toplanması ile ilgili bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Bu belirsizlikler arasında kritik zemin tabakasının seçimi, vaka geçmişi alanında sıvılaşmaya neden olan PGA ve M_w 'nin tahmini, sıvılaşmaya neden olan deprem sarsıntısı sırasındaki yer altı su seviyesi, CPT uç direnci (q_c) ölçüm hatası ve ince dane içeriğinin (FC) tahmini olarak sayılabilir. Dolayısıyla bu belirsizlikler, sıvılaşma tetikleme yöntemlerinin her birinde etkin rol oynamaktadır. Sıvılaşma tetikleme metotları, sıvılaşma parametrelerinin bulunmasının temelini oluşturmaktadır. Aşağıda literatürde kullanılan başlıca dört sıvılaşma metodu hakkında bilgi verilmiştir.

4.2.1.1 Robertson ve Wride (1998) Sıvılaşma Tetikleme Metodu

CPT arazi deneyinin, sıvılaşma tetiklemesi değerlendirilmesinde kullanılması 1990 yıllarında başlamıştır. Deprem mühendisliği araştırma ulusal merkezi (National Centre for Earthquake Engineering Research, NCEER) tarafından yapılan bir dizi çalışma konferansında sonuçlanan Robertson ve Wride (1998) çalışmasından uyarlanan ve Youd ve diğ. (2001) çalışmasında ilk kez tetikleme metodu olarak kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde ince dane içeriği, CPT'den türetilen zemin

davranış tipi indeksi (I_c) kullanarak tahmin edilmektedir. CPT verilerinin normalizasyonu ise deterministiktir.

4.2.1.2 Moss ve Seed (2006) Sıvılaşma Tetikleme Metodu

Seed ve diğ. (2003) çalışmasından uyarlanan bu yöntemde, tetikleme ilişkileri kapsamlı bir vaka analizi verilerinin gözden geçirilmesiyle geliştirilmiştir. Bu veri tabanından alınan kritik katmanlar Moss ve diğ. (2006) tarafından kullanılıp, CPT tabanlı ilişkiler geliştirilmiştir. Bu ilişkiler, kritik tabakaların olasılık değerlendirmelerini içermektedir. CPT verileri deterministik değil de yinelemeli (iterativ) bir prosedür kullanılarak normalleştirilmiştir.

4.2.1.3 Idriss ve Boulanger (2008) Sıvılaşma Tetikleme Metodu

Idriss ve Boulanger (2008) çalışmasında sıvılaşma tetikleme metodunu Deprem Mühendisliği Araştırma Enstitüsüne sunmuştur. Bu yöntemin önceki iki yönteme göre başlıca avantajı, spesifik laboratuvar test sonuçlarına göre FC'nin düzeltilmesine izin vermesidir. Bu FC- I_c profillerinin yalnızca sınırlı bir vaka geçmiş veri tabanından türetilen ampirik bir ilişkiye bağımlı olmak yerine belirli saha koşullarına uyacak şekilde uyarlanabileceği anlamına gelmektedir.

4.2.1.4 Boulanger ve Idriss (2014) Sıvılaşma Tetikleme Metodu

Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasında, Idriss ve Boulanger (2008) sıvılaşma etikleme metodu çalışmasını güncelleyerek yeni bir çalışma ortaya koymuştur. Bu çalışma, değerlendirme metodolojisinde üç ana değişiklik göze çarpmaktadır. Bunlar temiz kum eşdeğeri düzeltilmesi, çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) ve deprem büyüklüğü ölçeklendirme faktörüdür (MSF). Aşağıda kısaca bu değişikliklerden söz edilmiştir.

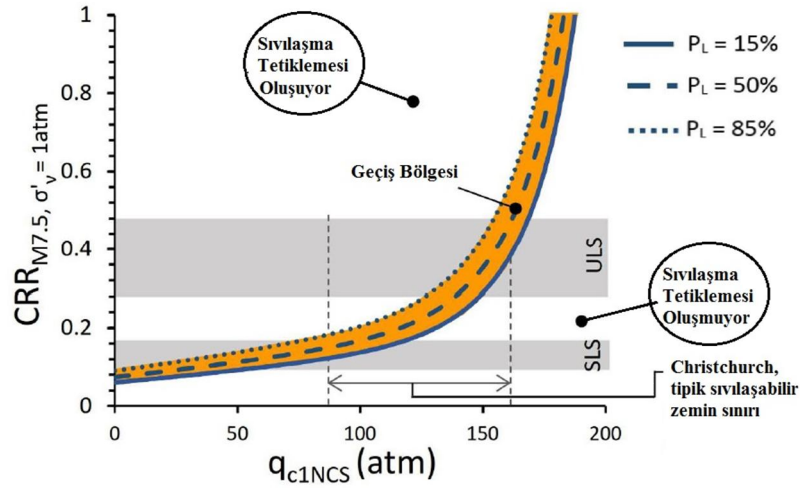
- **Temiz Kum Eşdeğeri Düzeltilmesi:** FC, zeminin içinde ne kadar silt-kil bulunduğunu karakterize eden bir orandır. Daha yüksek FC'ye sahip

zeminler, genellikle daha siltlidir ve sıvılaşmaya karşı daha düşük FC'ye ve eşdeğer uç direncine sahip olan zeminlere göre daha yüksek bir dirence sahiptirler. Bu nedenle sıvılaşmadan önce daha büyük sismik talep gerektirirler. IB-2008 için FC ve CRR arasındaki ilişki, sıvılaşan ve sıvılaşmayan zeminlerde vaka analizlerine dayanarak ampirik olarak türetilmiştir. CES'e dayanan 50 vaka analizi de dahil olmak üzere bu alandaki çalışmalar, BI-2014 için ampirik ilişkinin içine dahil edilmiştir. Bu nedenle, FC'nin bir fonksiyonu olarak revize edilmiş temiz kum eşdeğeri düzeltmesinin, Canterbury zeminleriyle gelişmiş bir korelasyon oluşturduğuna inanılmaktadır. Bu değişiklikler, kumlu zeminlerde üzerinde sıvılaşma tetiklemesi için küçük bir etkiye sahip iken IB-2008 yöntemiyle kıyaslandığında yüksek FC'ye sahip Siltli zeminlerde çok daha belirgin bir etkiye sahiptir.

- **Çevrimsel Kayma Mukavemeti Oranı (CRR):** CRR, sismik talebe karşı zemin direncinin bir ölçüsüdür. Daha yüksek CRR'ye sahip olan zeminler, sıvılaşmaya karşı daha büyük direnç gösterdiğinden, bu zeminlerin sıvılaşabilmesi için daha kuvvetli seviyelerde sarsıntıya maruz kalmaları gerekmektedir. BI-2014'te CRR'nin hesaplanma şeklindeki küçük değişiklikler ile CRR değeri için gevşek zeminlerde biraz daha yüksek değerleri, sıkı zeminler içinse biraz daha büyük değerleri öngörmektedir. Bu değişikliklerin yalnızca IB-2008 yöntemine kıyasla sıvılaştırma tetiklemesinin tahmini üzerinde küçük bir etkisi olduğu unutulmamalıdır.
- **Deprem Büyüklüğü Ölçeklendirme Faktörü (MSF):** MSF, sıvılaşma tetiklemesi üzerindeki deprem süresinin etkilerini açıklamak için kullanılmaktadır. IB-2008'de, MSF hesabında kohezyonsuz zeminler için tek bir formül geliştirilmiştir. Revize edilen MSF ilişkisinde ise gevşek ve sıkı zeminler farklı bir ilişkiye sahiptir. IB-2008'de, gevşek zeminler için MSF, daha kısa süreli küçük büyüklükteki depremlerin etkisini tahmin etmektedir (dolayısıyla daha küçük depremlerde sıvılaşmanın tetiklenmesi tahmin edilmektedir). Sıkı zeminlerde ise IB-2008 MSF ilişkisi, daha kısa süreli küçük büyüklükteki depremlerin etkisini tahmin etmektedir (ve dolayısıyla daha küçük büyüklükteki depremlerde sıvılaşmanın tetiklenmesi tahmin edilmektedir).

Metodolojideki bu ana değişikliklere ek olarak, Boulanger ve Idriss (2014), laboratuvar test verilerine dayalı alanlar için önerilen kalibre edilebilecek bir FC-I_c korelasyonunu sağlamıştır. Yukarıda bahsedilen dört farklı sıvılaşma tetikleme metodu için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Van Ballegooy ve diğ. (2015^a) çalışmasında dört basitleştirilmiş sıvılaşma tetikleme yöntemi Canterbury deprem serisindeki üç büyük deprem için (Eylül 2010, Şubat 2011 ve Haziran 2011) değerlendirmiş, arazi hasar gözlemleri ile sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) ile arasında makul korelasyonlar sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte sonuçların detaylı bir şekilde incelenmesiyle BI-2014 yöntemiyle hesaplanmış LSN değerlerinin, sıvılaşma gerçekleşmeyen ve az oranda sıvılaşma gerçekleşen bölgelerde sıvılaşmanın neden olduğu arazi hasarıyla en tutarlı dağılımı verdiği gözlenmiştir. Yine aynı şekilde orta seviyeden ciddi seviyeye kadar sıvılaşmadan kaynaklı arazi hasarlarının BI-2014 tetikleme metodunda en iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Aşağıda açıklanan çeşitli sıvılaşma parametrelerinin tümünde BI-2014 sıvılaşma tetikleme metodu kullanılmıştır. BI-2014 metodunda aynı zamanda sıvılaşma tetikleme olasılığı (p_L) adı verilen ve CRR tahminindeki belirsizlik sonucunda bir dizi olasılıkla sıvılaşma olasılığını tahmin etmeye imkân veren bir parametre bulunmaktadır. Standardize edilmiş 7.5 deprem büyüklüğü için CRR ve q_{c1NCS} 'ye bağlı olmak üzere Şekil 4.6'da üç farklı (%15, %50 ve %85) sıvılaşma olasılığı band genişliği gösterilmektedir. Sıvılaşma olasılığı (p_L), CRR tahminindeki belirsizlik sonucunda bir dizi olasılıkla sıvılaşma olasılığını tahmin etmeye imkân veren bir parametredir. ULS ve SLS ise sırasıyla nihai sınır durumu ve servisibilite sınır durum bölgelerini göstermektedir.



Şekil 4.6: CRR ve q_{1NCS} 'ye bağlı $P_L = 15\%$, 50% ve 85% eğrileri (Boulanger ve Idriss 2014).

Tonkin ve Taylor (2015) çalışmasında BI-2014 metodunu kullanarak sıvılaşma tetiklemesinin bir değerlendirilmesini yapmak için giriş parametrelerinin kabul edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Tablo 4.2'de Christchurch'de sıvılaşma tetiklemesinin değerlendirilmesi için kabul edilen parametreler ve bunlarla ilişkili değerler listelenmiştir (Tonkin ve Taylor 2015). Tablo 4.2'de listelenen giriş parametrelerinin her biri ile ilişkili değerlerin neden aşağıdaki değerler olarak kabul edildiğine ilişkin gerekçeler Tonkin ve Taylor (2015) çalışmasının ek A'sında açıklanmıştır ve Tonkin ve Taylor (2015) çalışmasında aksi belirtilmedikçe sıvılaşma tetikleme analizleri için varsayılan parametreler kullanılmıştır.

Tablo 4.2: Boulanger - Idriss (2014) metodu için giriş parametreleri (Tonkin ve Taylor 2015).

Giriş Parametresi	Kabul edilen Değer	Yorumlar
Zemin Birim Hacim Ağırlığı	18 kN/m ³	Christchurch'de yapılan çalışmalarda zemin birim hacim ağırlığının değişimi ihmal edilebilir (Tonkin ve Taylor 2013)
FC- I_c korelasyonu	$C_{FC}=0$	Christchurch zemini için uygun üst sınır değeri (Lees ve diğ. 2015)
I_c kesme değeri	I_c kesme değeri=2.6	Christchurch zemini için uygun değer (Lees ve diğ. 2015)
Deprem Sarsma Düzeyi	$M_w = 6.0$, $PGA = 0.3g$	BI-2014 metodolojisini kullanarak deprem sarsıntısının 100 yıllık geri dönüş periyodu

		için kritik durum
Sıvılaşma Olasılığı (P _L)	P _L = %15	Standart mühendislik tasarım pratiğine dayanılarak
Yer Altı Su Seviyesi (YASS)		GNS yer altı suyu modeline dayanılarak (van Ballegooy ve diğ. 2014 ^b). YASS ile ilgili iki temel varsayım şu şekildedir: 1. Yer altı suyu profili, yer altı suyu yüzeyinin altında hidrostatiktir. 2. YASS altındaki zemin tamamen suya doygunudur.

Lacrosse ve diğ. (2015) çalışmasında Eylül 2010, Şubat 2011 ve Haziran 2011 depremleri için gözlenen sıvılaşma haritası yanında PL=%15, %50 ve %85'e olasılık değerlerini kullanarak LSN haritalarını vermiştir. Tez kapsamında kullanılan sıvılaşma parametreleri haritalarından LSN haritaları bu çalışmayla aynı harita olmakla birlikte diğer sıvılaşma parametreleri ile beraber Dr. Sjoerd Van Ballegooy tarafından verilmiştir. Aşağıda tez kapsamında kullanılan üç sıvılaşma parametresinin açıklaması ve değişik olasılıklarda hesaplanıp çeşitli enterpolasyonlar sonucunda oluşturulan haritalar verilmiştir. Bu parametrelerle borular arasındaki hasar ilişkileri ise Bölüm 5'de anlatılmıştır.

4.2.2 Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI)

Iwasaki ve diğ. (1978, 1982) tarafından geliştirilen LPI, dünyada en yaygın olarak kullanılan metottur. LPI ile sıvılaşma potansiyeli çok düşükten çok yükseğe kadar değişik derecelerle ifade edilebilmektedir (Tablo 4.3). Sıvılaşmanın yapısal bir hasar meydana getirip getiremeyeceğinin tahmini için geliştirilen LPI sıvılaşma etkilerinden dolayı bölgelerin kırılabilirliğinin ölçüsüdür. LPI değerleri 0'dan 100'e kadar bir değer alabilir.

Tablo 4.3: LPI sınırları

Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)	Sıvılaşma Potansiyel Derecesi
0	Çok Düşük
$0 < LPI \leq 5$	Düşük
$5 < LPI \leq 15$	Orta
$15 < LPI$	Yüksek-Çok Yüksek

Literatürde LPI üzerine yapılmış çok sayıda çalışma vardır. Juang ve diğ. (2005^a ve 2005^b) LPI değeri 5’den büyük olan bölgelerin yüksek sıvılaşma riski altında bulunduğunu, Iwasaki ve diğ. (1982) ise LPI değeri 15’den büyük bölgelerin çok yüksek sıvılaşma riskinde olduğunu sunmuştur. Toprak ve Holzer (2003) çalışmasında, 1989 Loma Prieta depreminden elde edilen gözlemler ile benzer LPI değerlerini göstermiş ve LPI değerinin 5 ve 15 olduğu durumlarda sıvılaşmanın yüzeyde görülebilme olasılığının sırasıyla %58 ve %93 olduğunu göstermiştir. Potansiyel sıvılaşabilir tabakalar sadece F_s ’nin 1’in altında hesaplandığı zaman LPI’nin hesaplanmasında göz önüne alınmaktadırlar. F_s azaldıkça LPI’nin hesaplanmasında daha fazla katkıda bulunmaktadır.

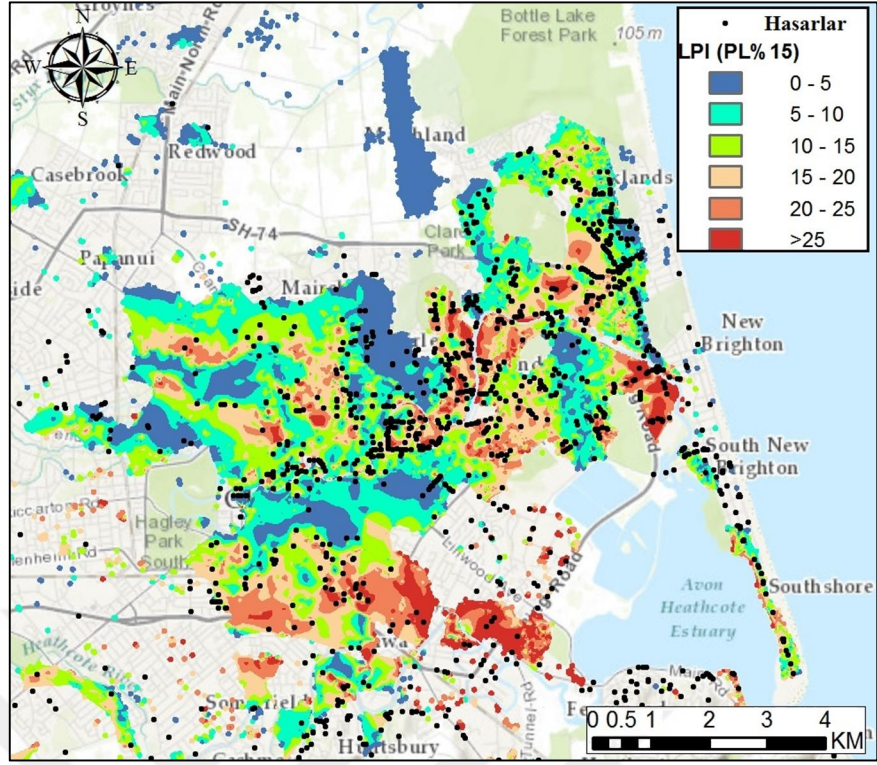
Iwasaki ve diğ. (1978, 1982) tarafından çoklu tabakaları oluşturan düşey zemin kolonunun yüzeyden 20 metreye kadar ki sıvılaşma potansiyelini hesaplamak için geliştirilen LPI, aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$LPI = \int_0^{20} Fw(z) dz \quad (4.1)$$

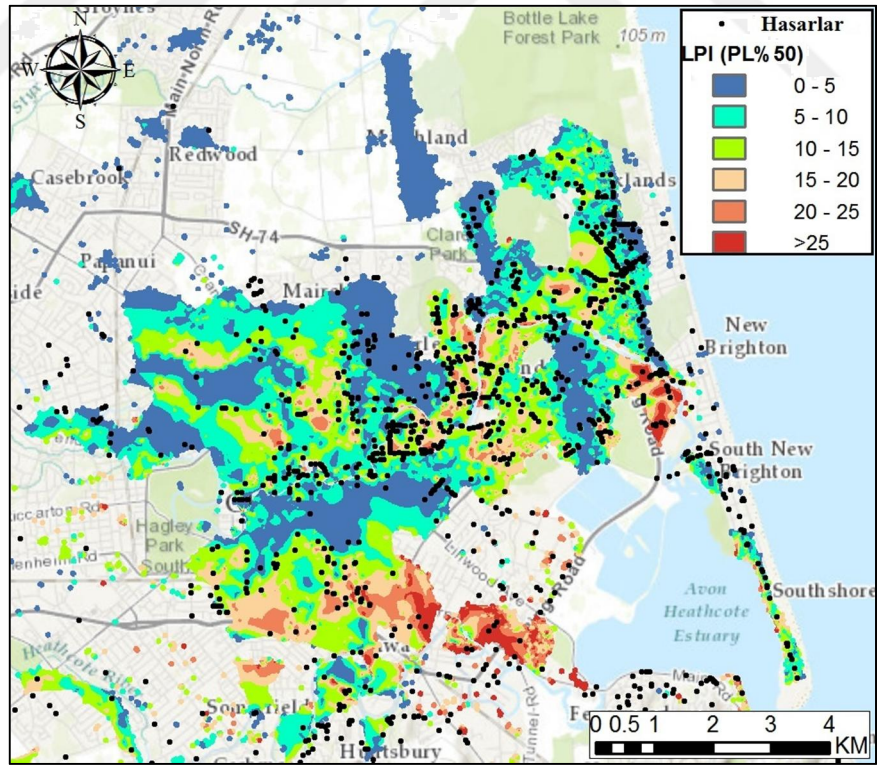
Eşitlikte; $F=1-F_s$ $F_s \leq 1$ için, $F=0$ $F_s > 1$ için

Burada, derinlik ağırlık faktörü $w(z)=10-0.5z$, z ise derinliği ifade etmektedir.

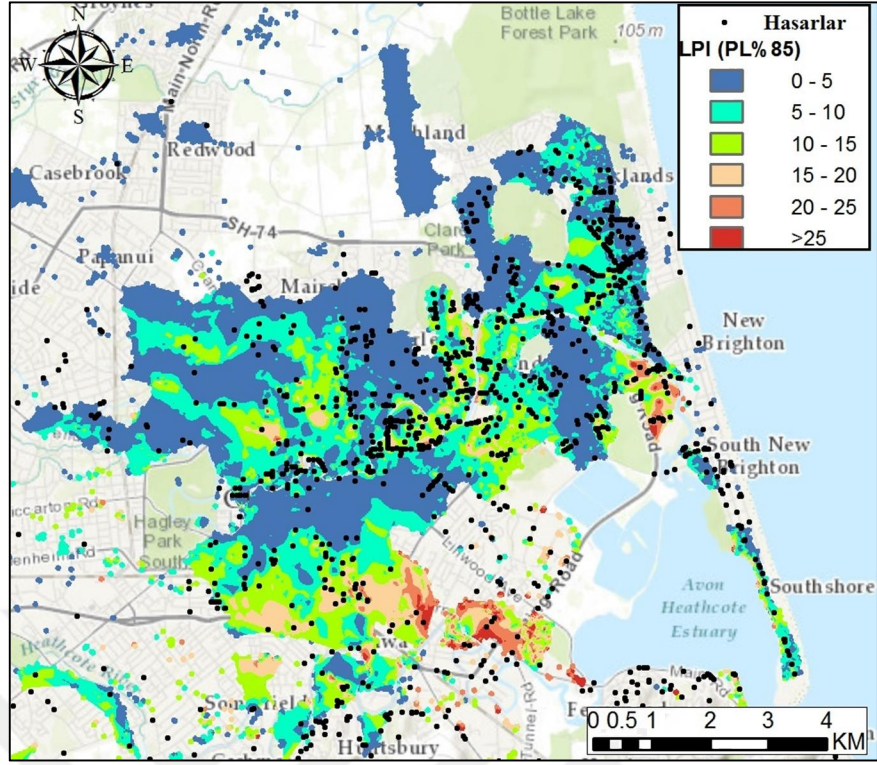
Christchurch veya başka bir yerde verilmiş kabuk kalınlığının gözlenen önemi ve LPI’nin yüzey saha bölgelerindeki sıvılaşmayla tetiklenen arazi hasarının ayırt edilmesindeki göreceli eksikliğinden dolayı Tonkin & Taylor (2013) Sıvılaşma Şiddeti Katsayısı (LSN) geliştirilmiştir. Şekil 4.7-Şekil 4.9’da sırasıyla $PL=\%15$, $\%50$ ve $\%85$ sıvılaşma olasılığına sahip LPI değerlerinden hazırlanan haritalar görülmektedir.



Şekil 4.7: Christchurch depremi için boru hasarları ve PL=%15 LPI haritası



Şekil 4.8: Christchurch depremi için boru hasarları ve PL=%50 LPI haritası



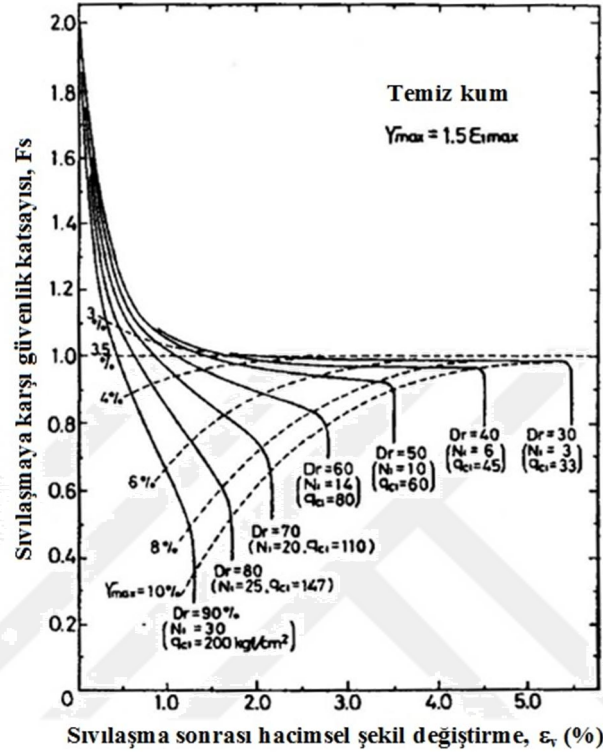
Şekil 4.9: Christchurch depremi için boru hatları, hasarları ve PL=%85 LPI haritası

4.2.3 Hesaplanmış Bir Boyutlu Oturma (S_{VID})

Hesaplanmış bir boyutlu oturma (S_{VID}), literatürdeki metotlara dayanarak hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirmelerini tahmin etmek için kullanılan bir parametredir. Bu şekil değiştirmeler yerin oturma miktarının hesaplanmasında işleme katılır. Yeni Zelanda Yapım, Yenilik ve İstihdam Bakanlığı (MBIE 2012), Idriss ve Boulanger'ın tetikleme metodu ile normalize edilmiş uç direnci ve güvenlik katsayısını kullanan hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirmenin, Zhang ve diğ. (2002) çalışmasındaki gibi hesaplanmasını önermiştir. Zhang ve diğ. (2002) metodu, sıvılaşma güvenlik katsayısının 2'den küçük olduğu tabakalarda şekil değiştirmeyi tahmin etmektedir. Hesaplanmış oturma göstergesi, güvenlik faktörü düşüşlerinde ve sıvılaşmış durum malzeme yaklaşımlarında artmaktadır. Bu nedenle sıvılaşma tetiklemesinin gerçekleşmediği halde güvenlik katsayısı 1'den fazla olduğu zamanlarda oturma hesaplanabilmektedir. Hesaplanmış oturma göstergesi (S_{VID}) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

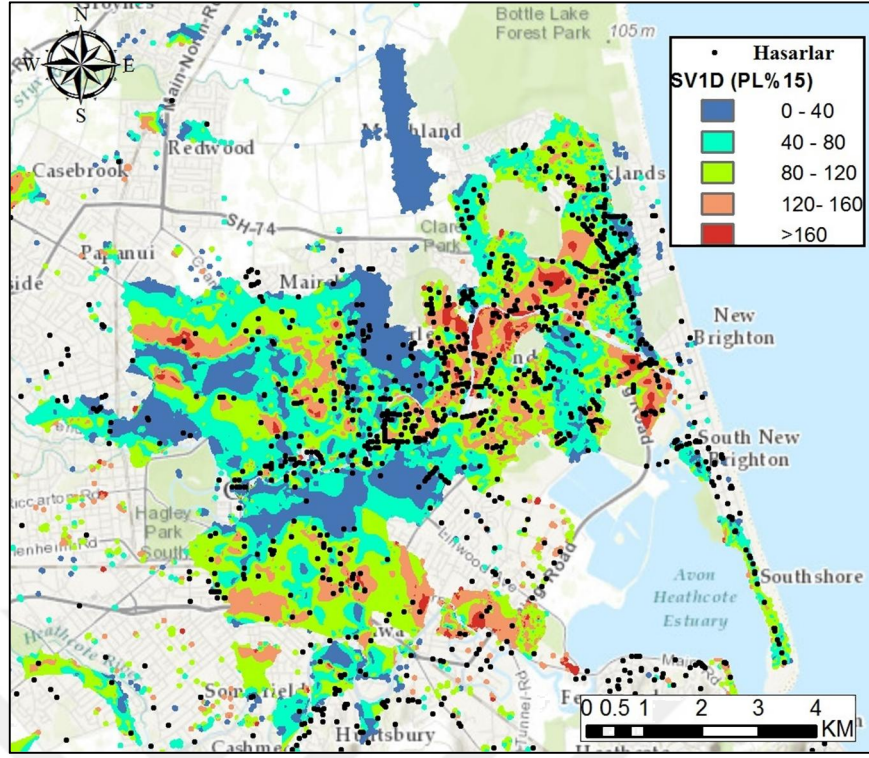
$$S_{VID} = \int \varepsilon_v dz \quad (4.2)$$

Eşitlikte ε_v , söz konusu tabaka için hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirmeyi göstermektedir. Şekil 4.10'da Zhang ve diğ. (2002) tarafından Ishihara ve Yoshimine (1992) yardımıyla hesaplanmış ε_v grafiği verilmiştir. “z” ise derinliği göstermektedir.

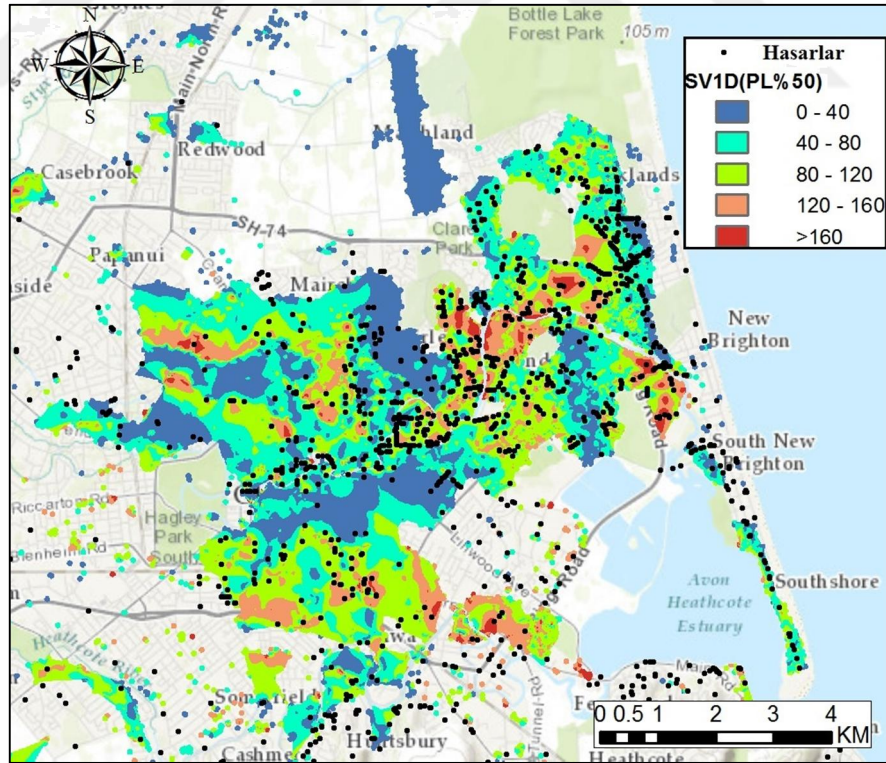


Şekil 4.10: Çeşitli Sıvılaşma için faktörlerine karşılık gelen hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirme (Ishihara ve Yoshimine 1992)

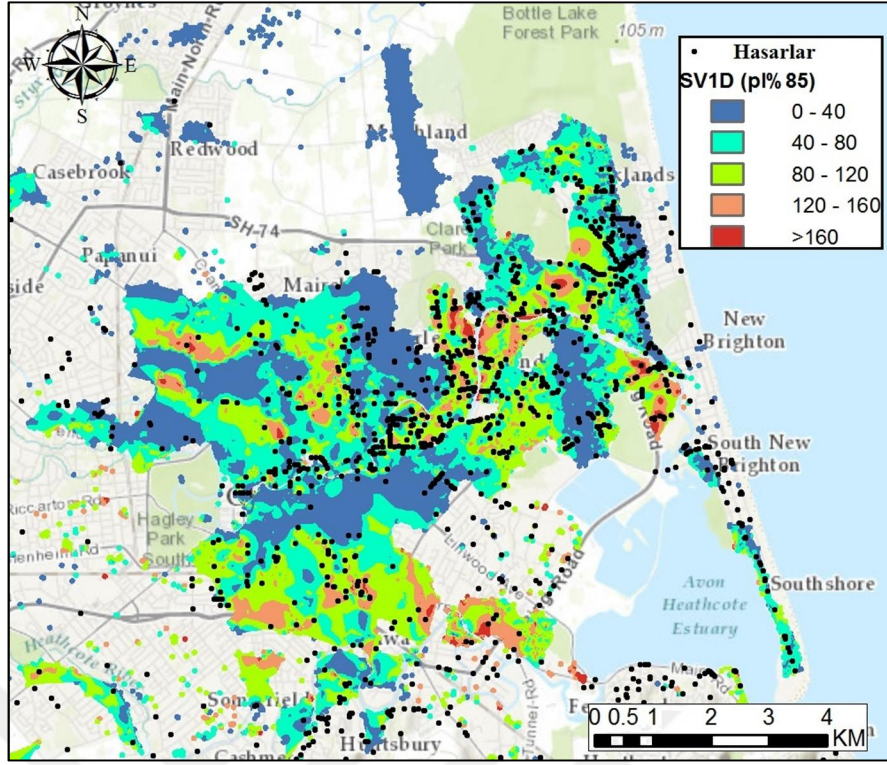
Şekil 4.11-Şekil 4.13'de sırasıyla PL=%15, %50 ve %85 sıvılaşma olasılığına sahip S_{VID} değerlerinden çıkarılan haritalar görülmektedir. Tonkin ve Taylor (2013, 2015) çalışmalarında sıvılaşmayla ilgili yüzey oturumlarıyla LiDAR ölçümlerinden tahmin edilen oturumlar arasında zayıf ilişkiler olduğunu göstermiştir. Bunun muhtemel sebepleri arasında, dikkate alınmayan sıvılaşmadan dolayı yeryüzüne çıkan kumlar, yanal yayılma ve topoğrafik tekrarlamalar ile LiDAR doğruluğundaki sınırlamalar, bölgesel tektonik hareketteki belirsizlikler ve PGA'daki belirsizlikler bulunmaktadır (Tonkin ve Taylor 2013). Ayrıca S_{VID} parametresinin kabuk kalınlığını hesaba katmadığı ve yeraltı suyu seviyesine karşı düşük hassasiyeti olduğunu belirtmek gerekmektedir.



Şekil 4.11: Christchurch depremi için boru hasarları ve PL=%15 S_{VID} haritası



Şekil 4.12: Christchurch depremi için boru hasarları ve PL=%50 S_{VID} haritası



Şekil 4.13: Christchurch depremi için boru hasarları ve PL=%85 SV_{1D} haritası

4.2.4 Sıvılaşma Şiddeti Katsayısı (LSN)

Sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN), Tonkin & Taylor (2013) tarafından geliştirilmiş olup, denklemi aşağıdaki gibidir.

$$LSN = 1000 \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz \quad (4.3)$$

Eşitlikte ε_v , söz konusu tabaka için hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirmeyi göstermekte ve Zhang ve diğ. (2002) tarafından hesaplanmıştır. “z” ise derinliği göstermektedir.

Van Ballegooy ve diğ. (2014^b) çalışmasında yerleşim yerleri için sıvılaşmanın sebep olduğu yer hasarlarının değerlendirmesini yaparken, LPI ve LSN arasındaki temel farklılıkları aşağıdaki gibi sunmuştur.

- LSN, hacimsel şekil değiştirme ampirik formüllerine dayandığından, FS’nin birden büyük değerleri için bile LSN değerleri sürekli olarak hesaplanabilmektedir. Böylece LSN değerleri, Zhang ve diğ. (2002)’de anlatıldığı üzere hacimsel şekil

değiştirme fonksiyonu olarak, $FS < 2$ olduğu zaman aşırı boşluk suyu basıncı yükselişi gibi artmaya başlamaktadır ve $FS < 1$ olduğunda sürekli yumuşak bir geçiş içermektedir.

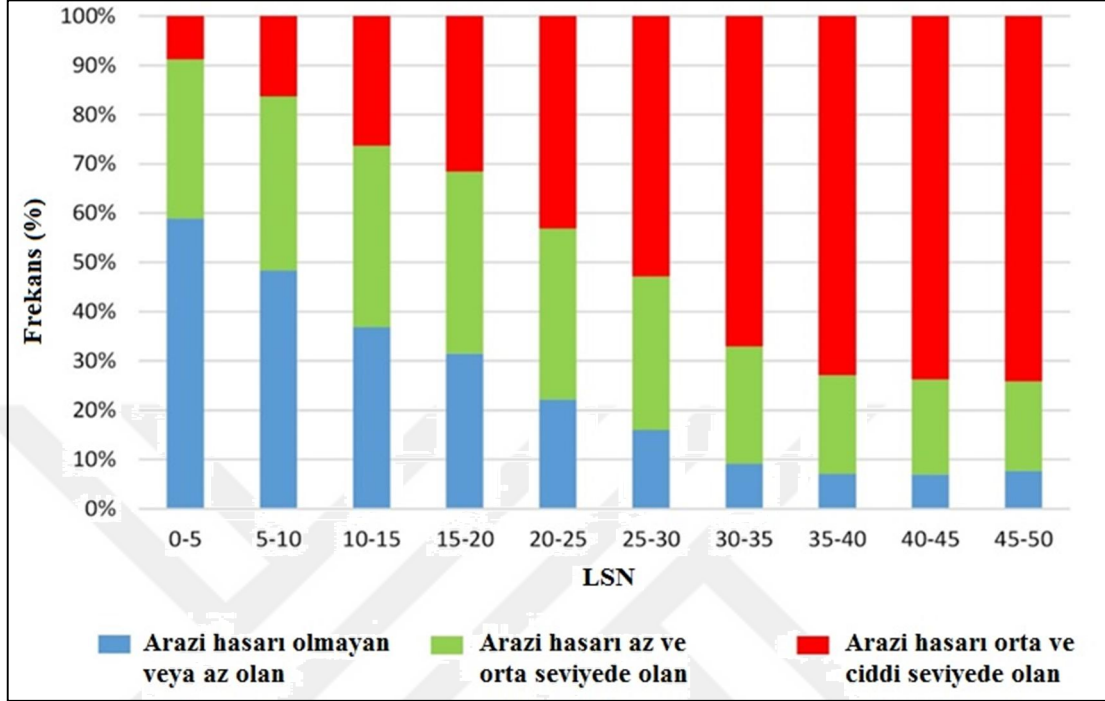
- Zhang ve diğ. (2002) ile Ishihara ve Yoshimine (1992) çalışmalarında LSN formülündeki hacimsel şekil değiştirme ilişkileri, sismik talebin fonksiyonu değil de zemin göreceli yoğunluk fonksiyonu olarak sınırlayıcı bir hacimsel şekil değiştirmeye ulaşır. Tersine, LPI parametresinin artışı PGA'nın artmasıyla devam etmektedir. Çünkü LPI, FS'nin direk fonksiyonudur ve sismik talep arttıkça azalmaktadır. LPI'nin göreceli yoğunluk ile FS arasındaki ilişkiyi tam olarak belirtmediğinden, farklı yoğunluktaki zemin bölgelerinin hasar potansiyellerini LSN'ye göre belirlemede zayıf kalmıştır.

- Düşük göreceli yoğunluğa sahip sıvılaşabilen tabakalar, yüksek göreceli yoğunluğa sahip tabakalara göre yer yüzeyinde daha fazla şekil değiştirme geliştirmeleri beklenmektedir. LSN ile hesaplanmış şekil değiştirme değeri hasar indeksi olarak kullanıldığında sadece oturmaya göre hesaplanmış indekse göre kuvvet kaybının ve zemin püskürme potansiyelinin etkilerini daha fazla içermektedir. Buna karşılık hesaplanan FS değeri için, LPI aynı değeri zeminin göreceli yoğunluğunu dikkate almaksızın sağlamaktadır. Bu yaklaşım sıvılaşan zeminlerin göreceli yoğunluğunun verilen FS'i için sıvılaşma sonuçlarıyla ilişkili olmadığı yanlışı göstermektedir.

- LSN, hiperbolik derinlik ağırlıklı fonksiyonu kullanarak yer altı su tabakası yüzeye yakın olduğunda sıvılaşmayan kabuk kalınlığına daha çok önem vermektedir. LPI'deki sığ ve derin tabakaların katkısıyla karşılaştırıldığında LSN, sığ sıvılaşmanın yer ve yüzey yapılarına derin sıvılaşmaya göre çok daha büyük zarar verdiğini önermektedir. Böylece LSN, kabuğun ince olduğu ve ciddi püskürme sonucunu, kabuğun kalın ve çok daha az miktarda püskürme meydana geldiği zamanla ayırt etme kabiliyetine sahiptir.

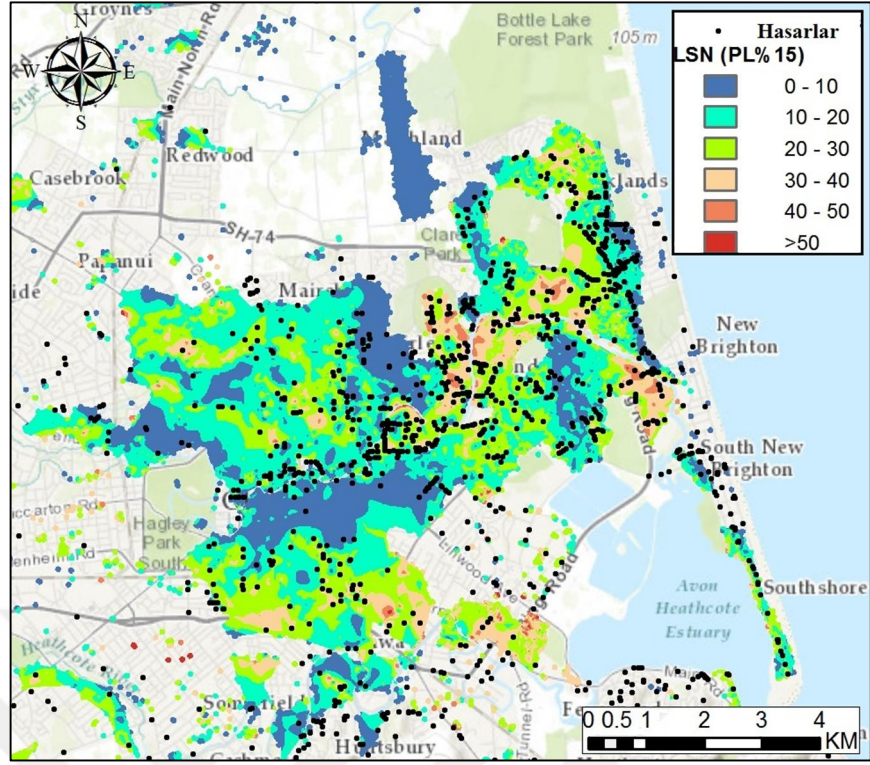
Tonkin ve Taylor (2015) ve Van Ballegooy ve diğ. (2015^b) çalışmalarında Ekim 2010, Şubat 2011 ve Haziran 2011 depremlerinden sonra gözlenen arazi hasarlarıyla LSN arasında güçlü ilişkiler bulmuşlardır. Düşük LSN değerlerine sahip bölgelerde arazi hasarlarının gözlenmediğini ya da çok az gözlemlendiği bölge çok

fazla iken yüksek LSN değerlerinde yüksek arazi hasarı gözlenen bölgeler çok fazladır. Şekil 4.14’de gösterildiği gibi LSN değerleriyle arazi hasarları arasında doğru orantı bulunmaktadır (Tonkin ve Taylor 2015, Van Ballegooy ve diğ. 2015^b).

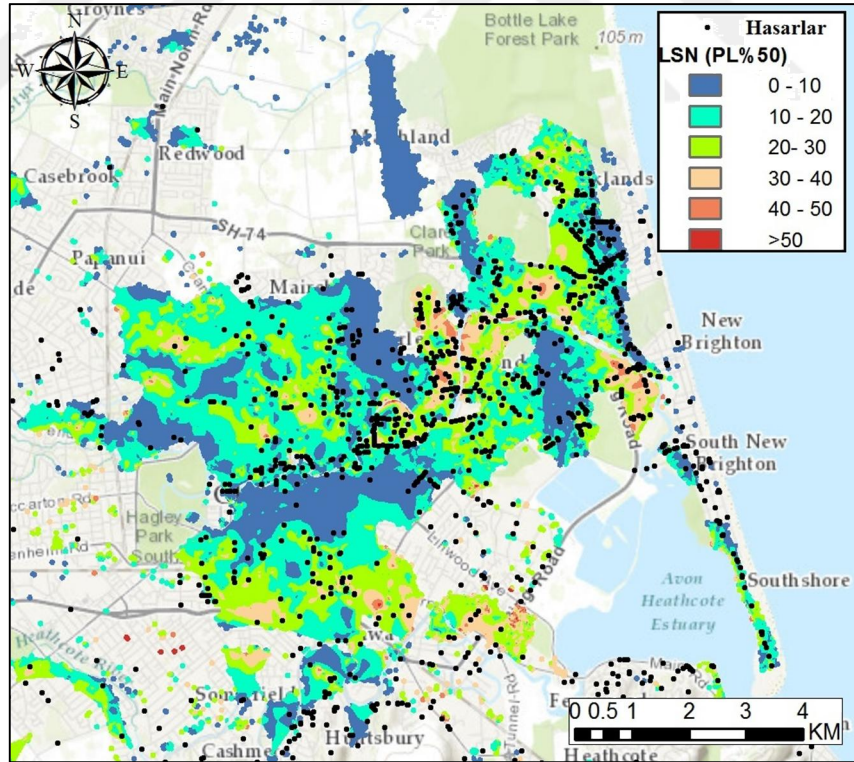


Şekil 4.14: Arazi hasar gözlemleriyle LSN arasındaki ilişkiler (Tonkin ve Taylor 2015, Van Ballegooy ve diğ. 2015^b)

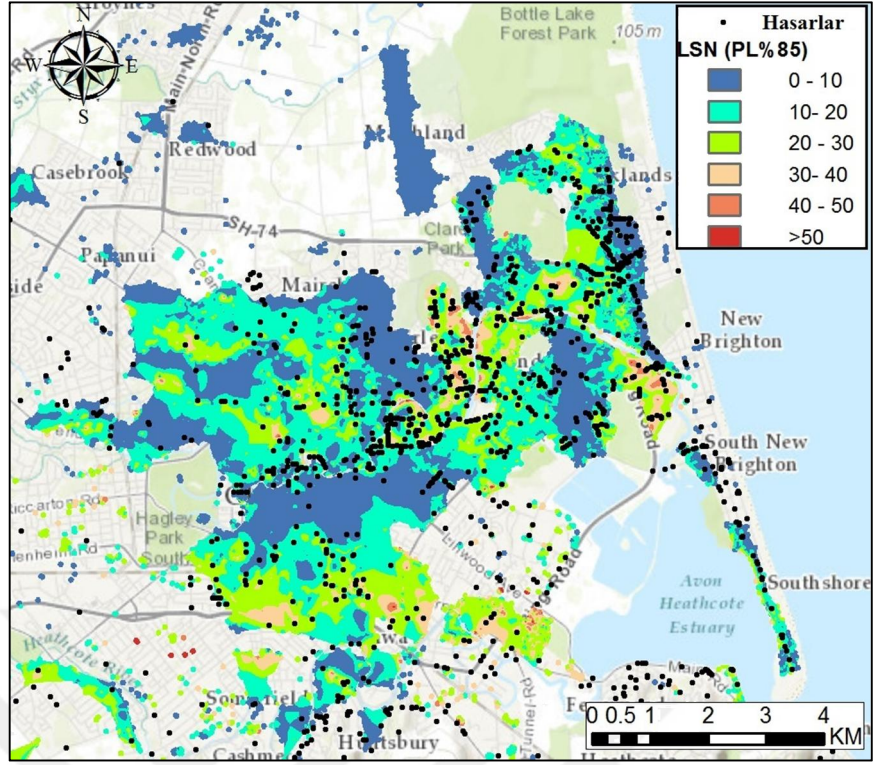
Şekil 4.15-Şekil 4.17’de sırasıyla PL=%15, %50 ve %85 sıvılaşma olasılığına sahip LSN değerlerinden çıkarılan haritalar görülmektedir.



Şekil 4.15: Christchurch depremi için boru hasarları ve PL=%15 LSN haritası



Şekil 4.16: Christchurch depremi için boru hasarları ve PL=%50 LSN haritası



Şekil 4.17: Christchurch depremi için boru hasarları ve PL=%85 LSN haritası

5. HASAR İLİŞKİLERİ

5.1 Giriş

Depremden dolayı boru hatlarında oluşan zararı tanımlamak için geliştirilen hasar ilişkileri, sağlamlık ve güvenilirlik analizleri için önemli olmasının yanında bütün ileriye dönük deprem zarar tahminlerinin yapılması çalışmalarında kullanılmaktadır (Toprak ve diğ. 2011). Depremin gömülü boru hatları üzerine olan zararı, geçici yer deformasyonlarıyla (GYD) ya da kalıcı yer deformasyonlarıyla (KYD) olmaktadır. Boru hatlarında oluşan zararlar ile farklı deprem parametreleri arasında coğrafi etkileşimi tespit edebilmek için değişik araştırmacılar tarafından hasar ilişkileri ve metotlar geliştirilmiştir. Bu ilişkiler temel olarak ampiriktir ve geçmiş depremlerden elde edilen veriler ışığında geliştirilmiştir. Boru hasarları genellikle onarım oranları (RR) ile belirtilir. Boru onarım oranları bir bölgedeki boru onarım sayısının aynı bölgedeki boru hattı uzunluğuna bölünmesiyle elde edilmektedir. 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), spektral ivme, spektral hız, şiddet spektrumu ve Arias şiddeti bu sismik parametrelerdendir. Toprak (1998), O'Rourke ve diğ. (1998), O'Rourke ve Toprak (1997) 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) 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. Geçmiş depremlerde alt yapı sistemlerinde meydana gelen büyük hasarların özellikle KYD gerçekleşen alanlarda çok yoğunlaştığı gözlenmiştir. KYD hasar ilişkileri daha çok gözlenen deplasman ve oturma miktarları ile ilişkilendirilmiştir.

Bu çalışmada, KYD parametreleri olarak sayılan yatay-düşey yer hareketleri yardımıyla hesaplanan yatay şekil değiştirme ve oturmaya bağlı açısall dönme parametreleri ve sıvılaşma parametrelerinden yararlanılarak hasar ilişkileri analizleri yapılmıştır. Sıvılaşma parametreleri kullanılarak hesaplanan boru hasar ilişkileri literatürde ilk olma özelliğini taşımaktadır. Hasar ilişkileri hesaplanırken tüm hasar ilişkilerinde onarım oranının (RR) yanında hasar olasılığı (PoD) adı verilen bir parametre kullanılmıştır. Tez kapsamında belirli aralıklardaki parametreler (yatay şekil değiştirme, oturmaya bağlı açısall değişim ve sıvılaşma) ile o aralıklara karşılık gelen RR ve PoD arasında hesaplamalar yapılarak hasar ilişkileri geliştirilmektedir. Bu aralıklar belirlenirken aşağıda açıklanan eleme kriteri kullanılmıştır. Hasar olasılığı (PoD) belirli aralıklardaki hasarlı boyu sayısının, toplam boru sayısına bölünmesi ile tanımlanmış bir parametredir. Toplam boru sayısı ise toplam boru uzunluğunun, tek bir boru uzunluğuna bölünmesiyle bulunmaktadır. Tek bir boru uzunluğu malzeme cinsine göre değişmekte olup boru döşenme uzunluğu olarak da adlandırılabilir.

Eleme kriteri (x) O'Rourke ve diğ. (2014) tarafından uyarlanan, anlamlı korelasyonlar üretmek için yeterli boru uzunluğunu bulmayı amaçlayan bir parametredir ve Formül 5.1 yardımıyla bulunmaktadır.

$$x \geq [\phi^{-1}(\beta_c)]^2 / \alpha^2(RR) \quad (5.1)$$

Formülde x örnek uzunluğunu; $\phi^{-1}(\beta_c)$, β_c 'nin güvenli aralığını ve standart normal sapmayı; α gerçek değerin yüzdesini ve RR onarım oranını göstermektedir. Formül 5.1'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. Aynı zamanda nispeten küçük bölgeleri kaplayan çalışmalarda çok yararlı olmaktadır. Örneğin güvenli aralığı %90, $\alpha = 0.5$ ve RR=2 hasar/km, olarak alınırsa, $\phi^{-1}(90\%) = 1.645$ bulunduktan sonra Formül (5.1) kullanılarak 5.41 km boru uzunluğu elde edilir. Bu demektir ki belirli bir parametre (yatay şekil değiştirme, oturmaya bağlı açısall değişim ve sıvılaşma) aralığında RR=2 ise o parametre aralığındaki toplam boru

uzunluğu en az 5.41 km olmalıdır. Çalışmada çeşitli güvenlik aralıkları kullanılmıştır (%85 ve %90). Toprak ve diğ. (2014, 2015a, 2015d, 2016, 2017) çalışmalarında Avonside çalışma bölgesi için çeşitli parametreleri kullanarak hasar ilişkileri analizleri yapmışlardır. Bu çalışmaların bazılarında Christchurch boru hasarlarının daha eski veri tabanı kullanılmıştır. Bouziou (2015) çalışmasında kullandığı son güncel hasar verileri elde edildikten sonra tez kapsamında hasar veri setinin son hali kullanılarak hasar analizleri hesaplanmıştır.

5.2 Yer Deplasman Ölçüm Metotları Kullanılarak Elde Edilen Hasar İlişkileri

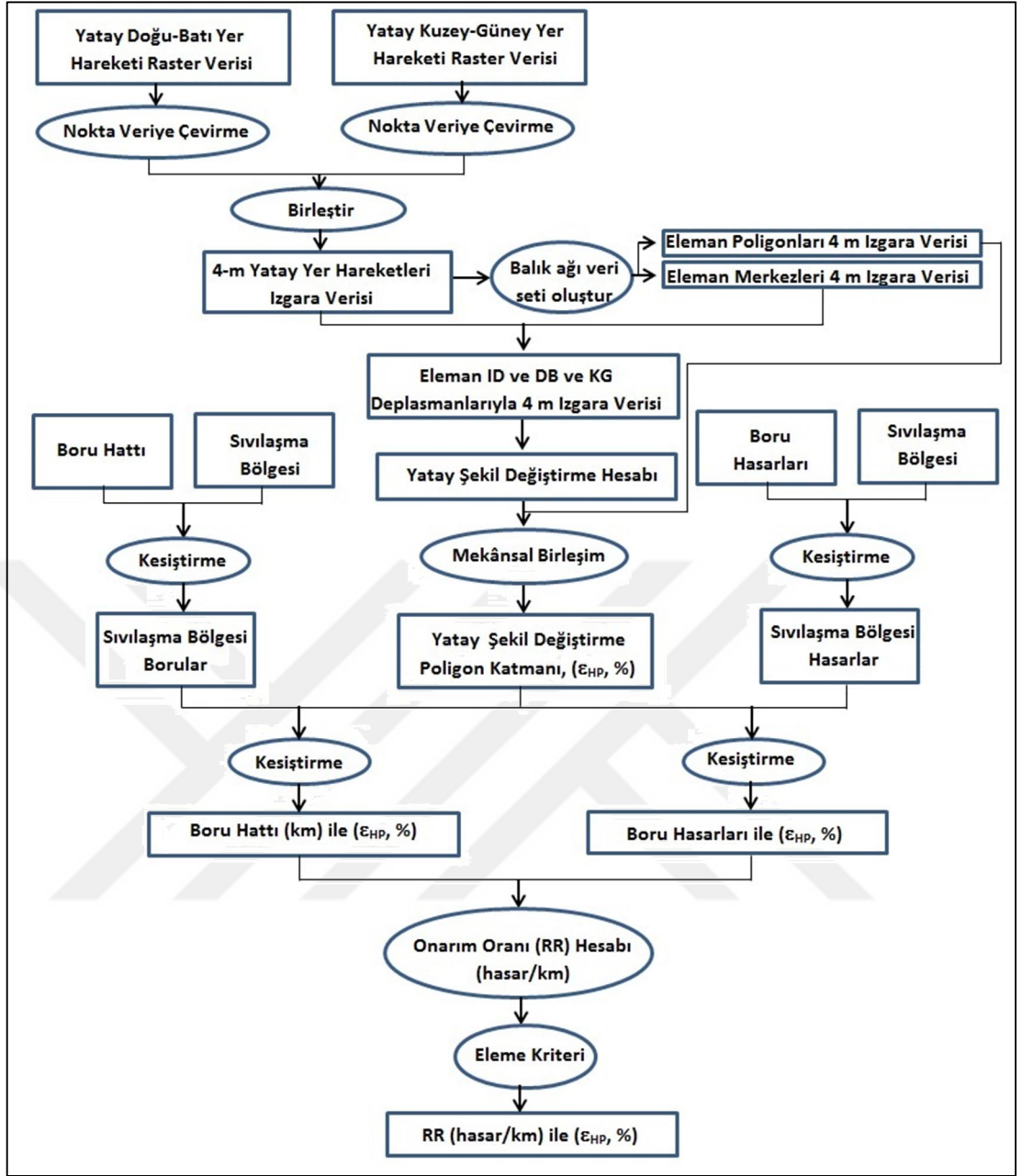
Yer deplasman ölçüm metotları kullanılarak elde edilen hasar ilişkileri yatay ve düşey yer deplasmanlarının yardımıyla elde edilen hasar ilişkileri olmak üzere ikiye ayrılmakta ve nasıl elde edildikleri aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

5.2.1 Yatay Yer Hareketleri Ölçüm Metotları Kullanılarak Elde Edilen Hasar İlişkileri

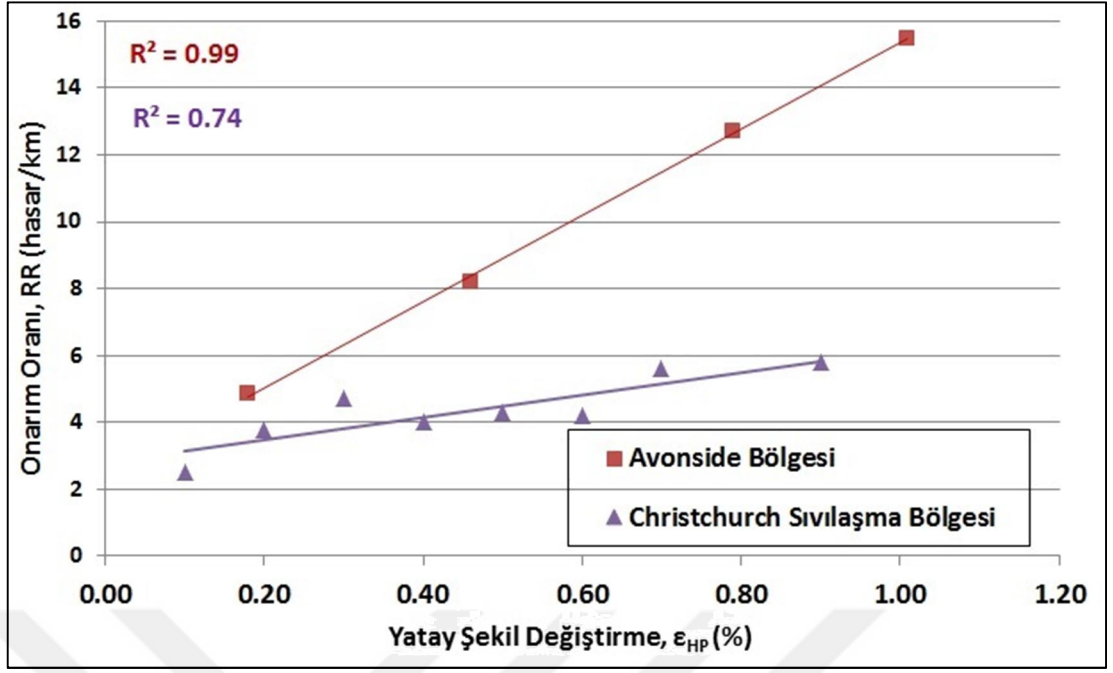
Avonside bölgesi adı verilen çalışma bölgesinde 22 Şubat 2011 Christchurch depreminden kaynaklı oluşan yatay yer hareketleri, üçüncü bölümde anlatıldığı gibi farklı uzaktan algılama metotları kullanılarak (hava fotoğrafları, LiDAR ve uydu ölçümleri) elde edilmiştir. Her bir yatay yer hareketi ölçüm noktası, kuzey-güney ve doğu-batı yönünde aynı olmak koşuluyla birbirleriyle belirli mesafelerde ardışık olarak dizilmektedirler. Bu mesafeler hava fotoğrafı ve LiDAR 56x56 m ölçümleri için 56 metre, LiDAR 4x4 m ölçümleri için 4 metre ve uydu ölçümleri için 16 metredir. Yatay şekil değiştirmeler üçüncü bölümde anlatıldığı gibi sonlu elemanlar formülleri yardımıyla her bir kare elemanda bulunmuştur. Daha sonra ise boru hasarları ve borularla kesiştirilerek sınılaşma bölgesinde yer alan her bir boru hasarı ve boru için yatay şekil değiştirme değeri hesaplanmıştır. Eleme kriterine tabi tutularak belirli bir güvenlik değeri için belirli yatay yer değiştirme aralıklarına karşılık gelen onarım oranlarıyla yatay şekil değiştirmeler arasındaki hasar ilişkileri

hesaplanmıştır. Hasar olasılığı bulunurken ise her bir borunun döşenme uzunluğunun göz önüne alınması gerekmektedir. Yapılan literatür çalışmalarında ve bu konuda dünyaca ünlü akademisyenlerden görüş alınarak (Prof. Dr. T. D. O'Rourke) AC borular için her bir borunun döşenme uzunluğu 4 metre alınırken CI borular için ise döşenme yılının uzunluğa etkisinin bulunduğu bilgisine varılmıştır. 1940 öncesi döşenen CI borular için döşenme uzunluğu 3.7 metre sonrası içinse 6 metre olduğu belirlenmiştir. Çalışma bölgesinde 1940 yılından önce döşenen boru uzunluğu çok az miktarda olmasından dolayı 6 metre olarak alınmıştır. Şekil 5.1'de yatay yer hareketleri yardımıyla hesaplanan boru hasar ilişkilerinin akış diyagramı görülmektedir. ArcGis programı yardımıyla yapıla Bu diyagram LiDAR 4x4 metre için hazırlanmış olup diğer ölçüm metotlarında da aynı yol izlenmiştir.

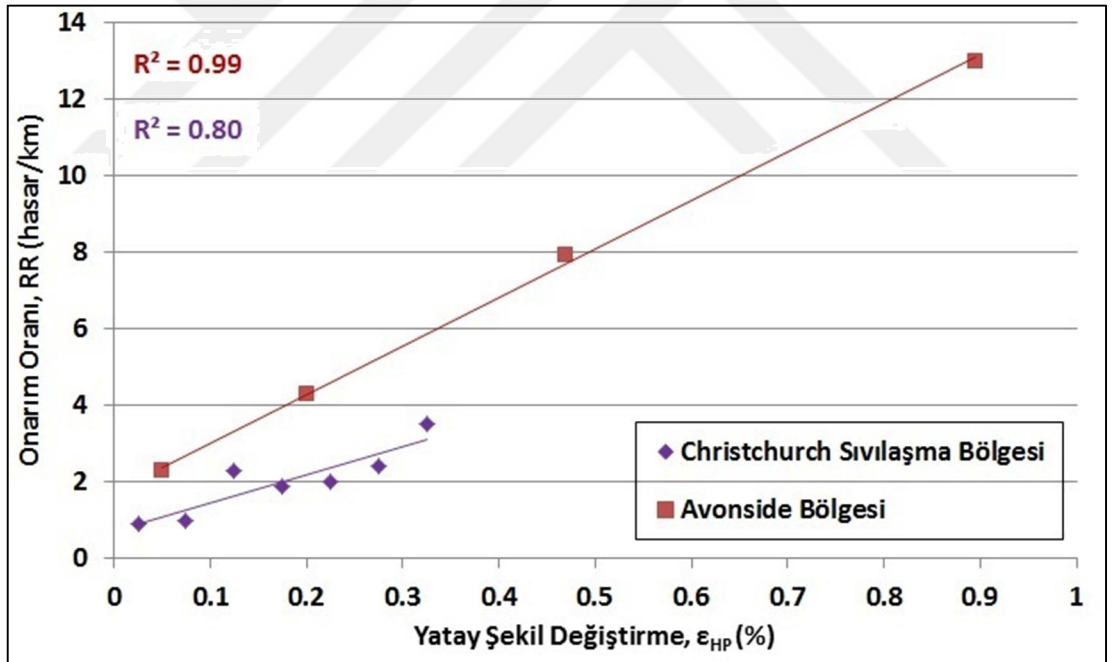
Avonside bölgesi olarak adlandırılan çalışma bölgesi ikinci bölümde anlatıldığı gibi ortalama onarım oranı olarak AC ve CI tipi borular için genel sınılaşma bölgesine göre yaklaşık üç katı büyüklüğüne sahiptir (Tablo 2.3 ve Tablo 2.5). Bir başka deyişle Avonside bölgesinde km başına düşen hasar sayısı üç kat daha fazladır. Bu kadar yoğun hasar içeren bir bölge 2011 Christchurch depreminin altyapılara verdiği zararın incelenmesinde elbette ki büyük bir öneme sahiptir. Bouziou, 2015 çalışmasında tüm Christchurch bölgesi için yatay şekil değiştirme ile onarım oranı arasındaki ilişkiler üzerinde çalışmıştır. Tez kapsamında Christchurch genel bölgesi için hasar analizleri hesaplanmış ancak özellikle Avonside bölgesi üzerinde durulmuştur. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de Christchurch sınılaşma bölgesi ile Avonside bölgesinde LiDAR 4x4 m yardımıyla elde edilen yatay şekil değiştirme ile onarım oranı arasındaki hasar ilişkileri karşılaştırmaları verilmiştir. Beklenildiği gibi aynı yatay şekil değiştirmeye sahip noktalar daha fazla onarım oranı değerine sahiptir.



Şekil 5.1: Yatay yer hareketleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri akış diyagramı



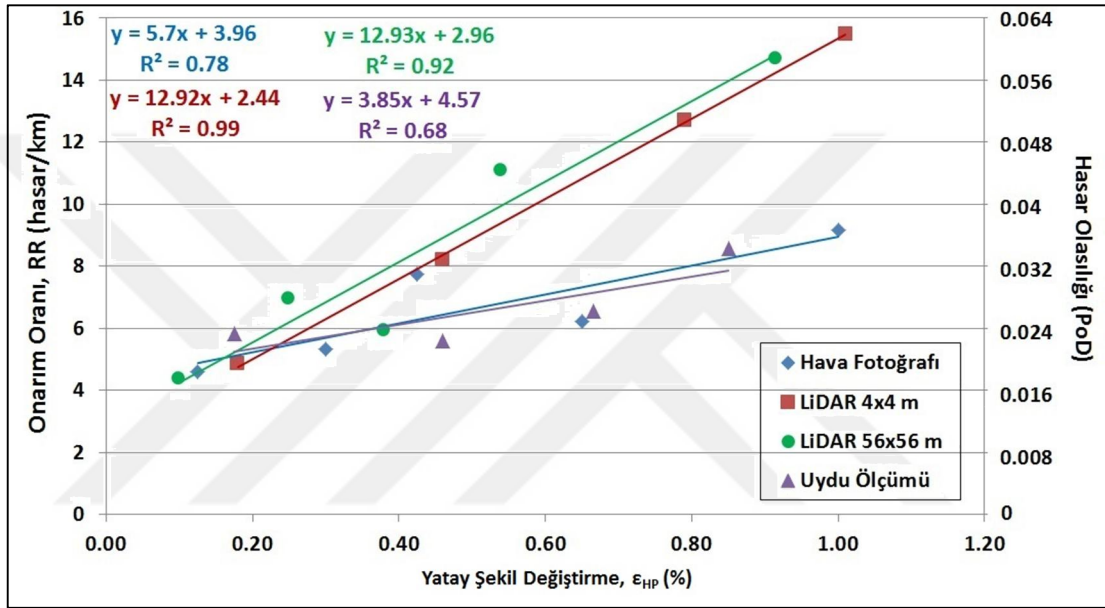
Şekil 5.2: AC tipi borular için Avonside Bölgesi ile Christchurch bölgesi hasar ilişkileri



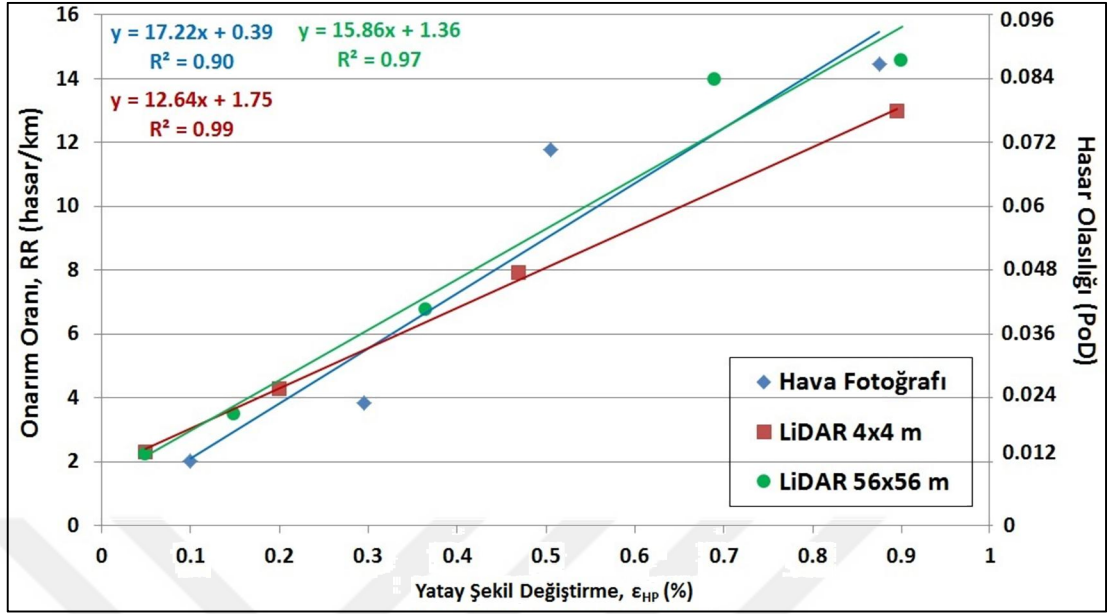
Şekil 5.3: CI tipi borular için Avonside Bölgesi ile Christchurch bölgesi hasar ilişkileri

Avonside bölgesinde farklı metotlar (hava fotoğrafı, LiDAR ve uydu ölçümleri) yardımıyla elde edilen yatay yer değiştirmeleri kullanarak hesaplanan yatay yer şekil değiştirmelerle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler tez kapsamında üstünde çok durulan konulardan biridir. Farklı tip borular (AC ve CI)

için eleme kriteri de göz önüne alınarak hasar ilişkileri hem uzaktan algılama yöntemleri arasındaki farkları hem de Christchurch depreminin altyapıya verdiği zararı açıklamada yardımcı olmaktadır. Şekil 5.4’de AC tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m, LiDAR 56 m ve uydu ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri görülmektedir. Şekil 5.5’de ise CI tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m, LiDAR 56 m ile hesaplanan hasar ilişkileri görülmektedir. Uydu ölçümleri daha az bir alanı kapladığı için CI tipi borularda anlamlı ilişkiler elde edilememiştir. Bunun bir sebebi de eleme kriterini sağlayan yeterli miktarda boru bulunmamasıdır.



Şekil 5.4: AC tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m, LiDAR 56 m ve uydu ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri



Şekil 5.5: CI tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m, LiDAR 56 m ve uydu ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri

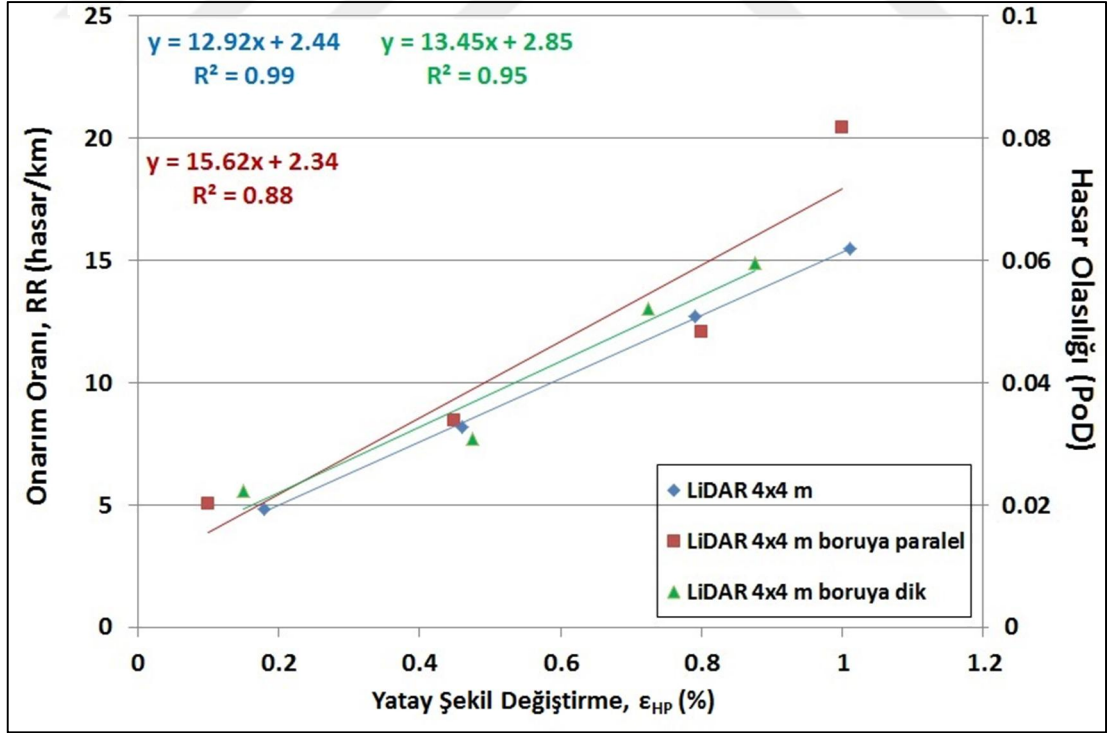
AC tipi borular için hesaplanan hasar ilişkilerinde en büyük R^2 değerini (0.99) LiDAR 4 m yardımıyla hesaplanan yatay yer değiştirmeleri vermiştir ki bu değer oldukça yüksektir. İkinci olarak yine bir LiDAR yöntemi olan LiDAR 56 m, R^2 değerini 0.92 olarak verirken bu iki yatay yer değiştirme veri seti ile hesaplanan hasar ilişkileri birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Hava fotoğrafları ve uydu ölçümleri ise LiDAR veri setlerine göre nispeten daha düşük R^2 değerleri verirken hasar ilişki doğruları birbirine yakın gözükmemektedir.

CI tipi borular için hesaplanan hasar ilişkilerinde en büyük R^2 değerini (0.99) ile yine LiDAR 4 m yardımıyla hesaplanan yatay yer değiştirmeleri vermiştir. İkinci olarak yine bir LiDAR yöntemi olan LiDAR 56 m, R^2 değerini 0.97 olarak verirken hava fotoğraflarında bu değer 0.90 olmaktadır. CI için çeşitli yöntemler yardımıyla hesaplanan hasar ilişkilerinde ortalama R^2 değeri AC'ye daha yüksektir. AC boruların CI borulara göre daha kırılkan olması sebebiyle aynı yatay şekil değiştirme değerinde daha yüksek onarım oranına sahiptir.

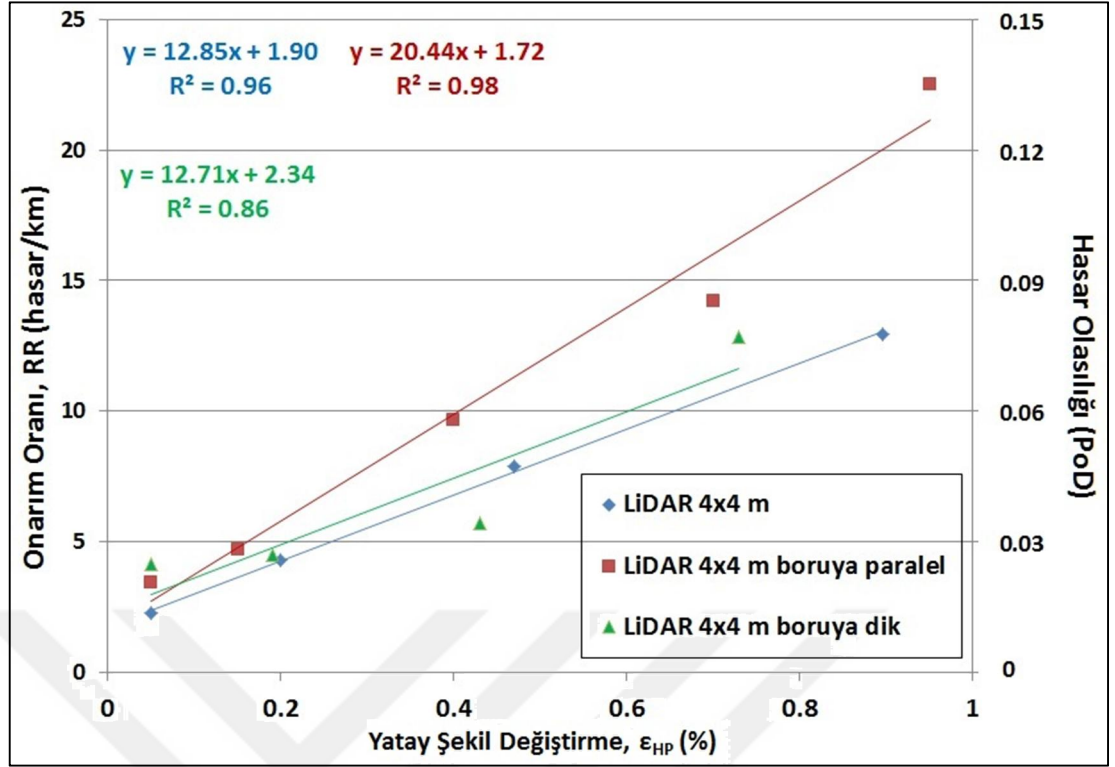
Üçüncü bölümde yatay yer değiştirmeleri haritaları yardımıyla LiDAR yönteminin uydu yönteminde yatay şekil değiştirmede daha üstün olduğu yorumu

getirilmiştir. AC borular için hesaplanan hasar ilişkilerinde ise R^2 değerinin hem LiDAR 56 m hem de LiDAR 4 m veri setlerinde uydu ölçümlerine göre daha yüksek çıkması boru hasar ilişkilerinde yatay şekil değiştirmeler kullanılacak ise LiDAR verilerinden elde edilmesinin nispeten daha doğru sonuçlar vereceği yorumu getirilebileceği açıktır.

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'deki AC ve CI tipi boruların hasar ilişkileri hesaplamalarında yatay şekil değiştirme değeri olarak en büyük asal şekil değiştirme değeri kullanılmıştır. Bu şekil değiştirme dışında her bir borunun doğrultusuyla ilgili olarak boruya paralel (ϵ_{ξ}) ve boruya dik yönde (ϵ_{η}) hesaplanan yatay şekil değiştirmelerin hasar ilişkilerine etkisi de tez kapsamında çalışılmıştır. Bu şekil değiştirmelerin nasıl hesaplandığına dair bilgiler Bölüm 3'de verilmiştir. Boru doğrultusuna bağlı hasar ilişkileri hesaplamalarında LiDAR 4m ve LiDAR 56 m verileri kullanılmıştır. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de sırasıyla AC ve CI tipi borular için LiDAR 4m kullanılarak elde edilen en büyük asal yatay şekil değiştirme, boruya paralel ve boruya dik yöndeki yatay şekil değiştirmelerle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir.

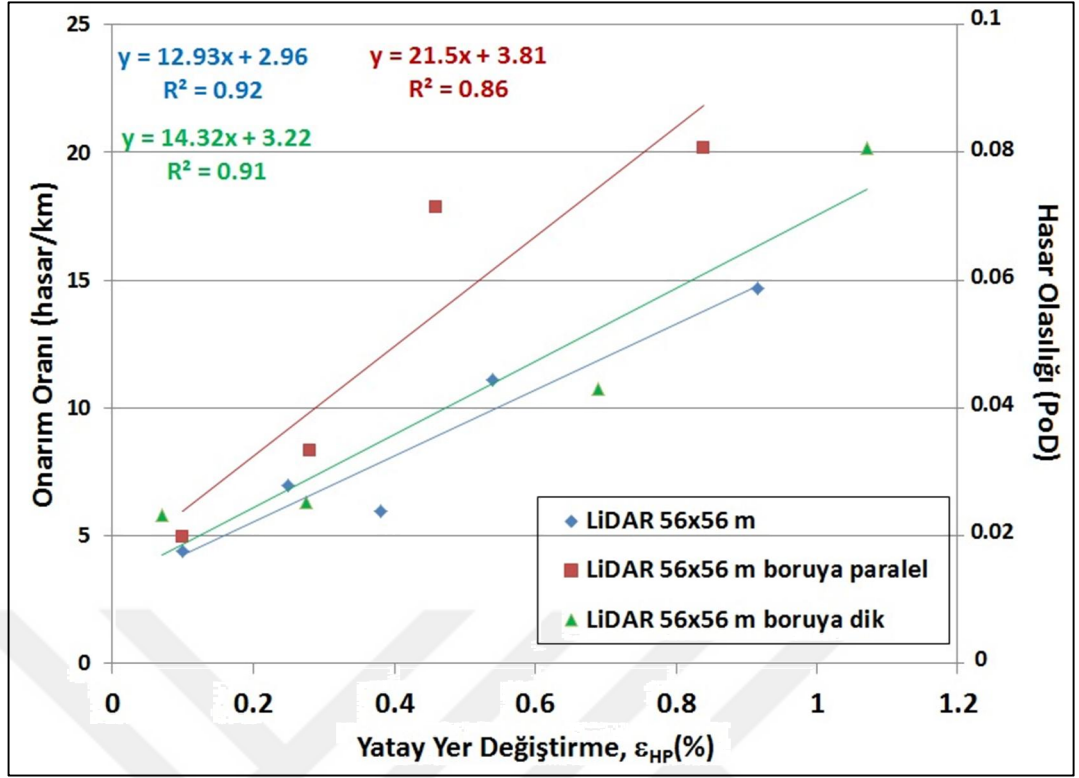


Şekil 5.6: AC tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri (en büyük asal yatay yer değiştirme, boruya paralel ve boruya dik)

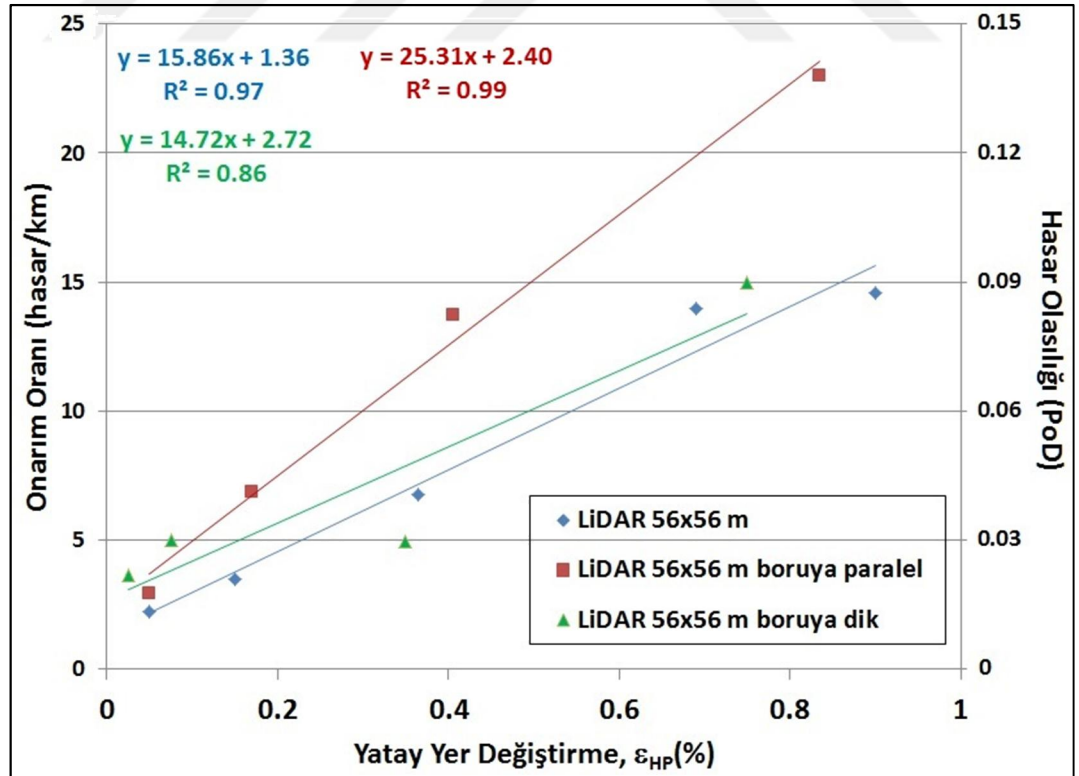


Şekil 5.7: CI tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 4m ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri (en büyük asal yatay yer değiştirme, boruya paralel ve boruya dik)

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de görüldüğü gibi AC tipi borular, boruya paralel ve dik yöndeki yatay şekil değiştirmelerden hemen hemen aynı şekilde etkilenmekte iken CI tip borularda boruya paralel yöndeki yatay şekil değiştirmelerden daha fazla etkilenmektedir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da ise AC ve CI tipi borular için LiDAR 56 m yatay yer değiştirme verisinden yararlanılarak elde edilen hasar ilişkileri görülmektedir. AC tipi borular için LiDAR 4m ile farkı boruya paralel yöndeki davranış farklıdır ama yine de LiDAR 4 veri setine yakın sonuçlar vermektedir. CI tipi borular için ise LiDAR 56 m yardımıyla elde edilen yatay şekil değiştirmelerle hesaplanan hasar ilişkileri LiDAR 4m ile çok benzemekte ve boruya paralel yöndeki yatay şekil değiştirmelerinden daha fazla etkilenmektedir. Her iki veri setinden de boru doğrultusunda hasar ilişkileri çıkartılmıştır. Genel sonuç olarak boru doğrultusunda hesaplan hasar ilişkilerinin kullanılmasında en büyük asal yatay şekil değiştirmelerin kullanılmasına göre bir üstünlüğü bulunmamıştır.



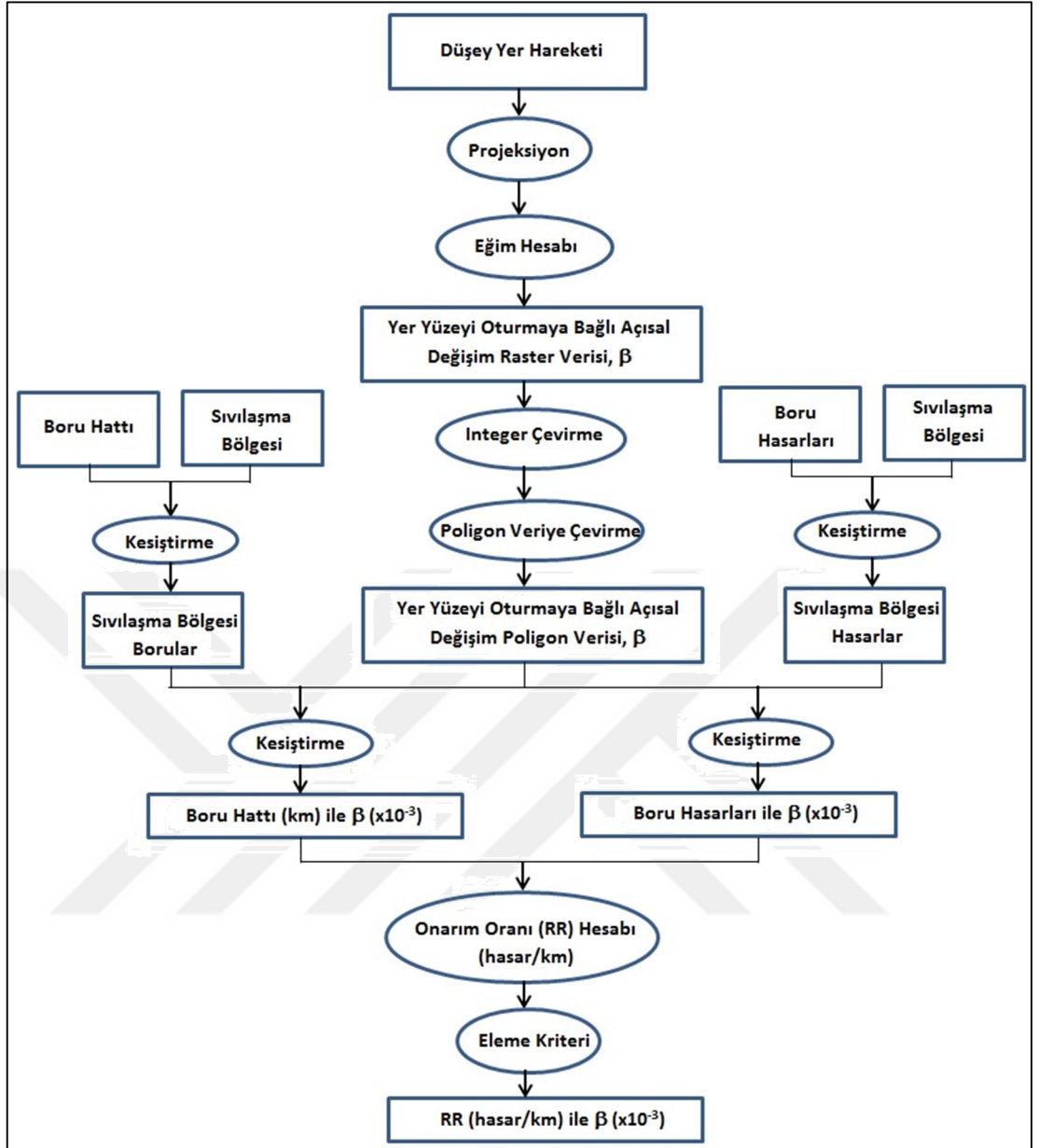
Şekil 5.8: AC tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 56m ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri (en büyük asal yatay yer değiştirme, boruya paralel ve boruya dik)



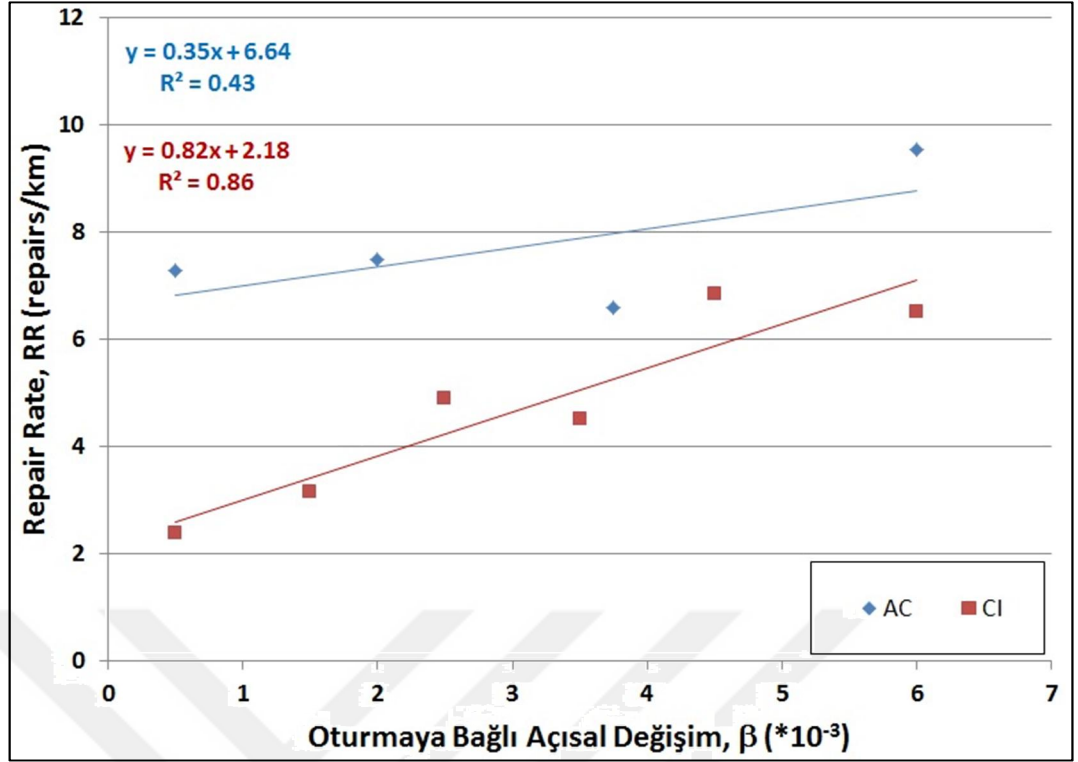
Şekil 5.9: CI tipi borular için hava fotoğrafı, LiDAR 56m ölçümleri ile hesaplanan hasar ilişkileri (en büyük asal yatay yer değiştirme, boruya paralel ve boruya dik)

5.2.2 Düşey Yer Hareketleri Kullanılarak Elde Edilen Hasar İlişkileri

Düşey yer hareketleri yardımıyla elde edilen oturmaya bağlı açısal değişim parametresi ardışık iki ölçüm noktasındaki düşey yer hareketi farkının bu noktalar arasındaki mesafeye bölünmesiyle bulunmaktadır. 22 Şubat 2011 depreminden sonra LiDAR yöntemiyle elde edilen düşey yer hareketleri, CBS yazılımındaki (ArcMap) birçok komut yardımıyla borular ve hasarlara atanarak hasar ilişkileri hesaplamaları yapılmıştır. LiDAR düşey yer hareketleri ölçüm verileri arasındaki mesafe 5 metredir. Toprak ve diğ. (2015^a) çalışmasında Avonside bölgesinde düşey yer hareketlerinden kaynaklı oturmaya bağlı açısal değişim parametresini kullanarak hasar ilişkileri analizleri yapmış ve tüm Christchurch bölgesine göre yatay şekil değiştirmeleri kullanan hasar ilişkilerine paralel sonuçlar ortaya koymuştur. Avonside bölgesindeki hasar ilişkileri tüm bölgeye göre yaklaşık üç kat fazla onarım oranlarına karşılık gelmiştir. Tez kapsamında düşey yer hareketleri için LiDAR verisinden başka uzaktan algılama metodundan yararlanılmamıştır. Şekil 5.10'da düşey yer hareketleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri akış diyagramı verilmiştir. İleriki çalışmalarda farklı uzaktan algılama metotlarından düşey yer hareketi veri setleri elde edilebilirse yatay yer hareketlerinden elde edilen hasar ilişkilerinin karşılaştırılması gibi bir çalışma yapılması mümkün olacaktır. Şekil 5.11'de AC ve CI tipi borular için hesaplanan hasar ilişkileri gösterilmiştir. AC tipi borular CI tipi borulara göre daha kırılgan olduğundan aynı oturmaya bağlı açısal değişim değerlerinde daha fazla onarım oranına karşılık gelmesi iyi bir sonuç sayılmaktadır.



Şekil 5.10: Düşey yer hareketleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri akış diyagramı

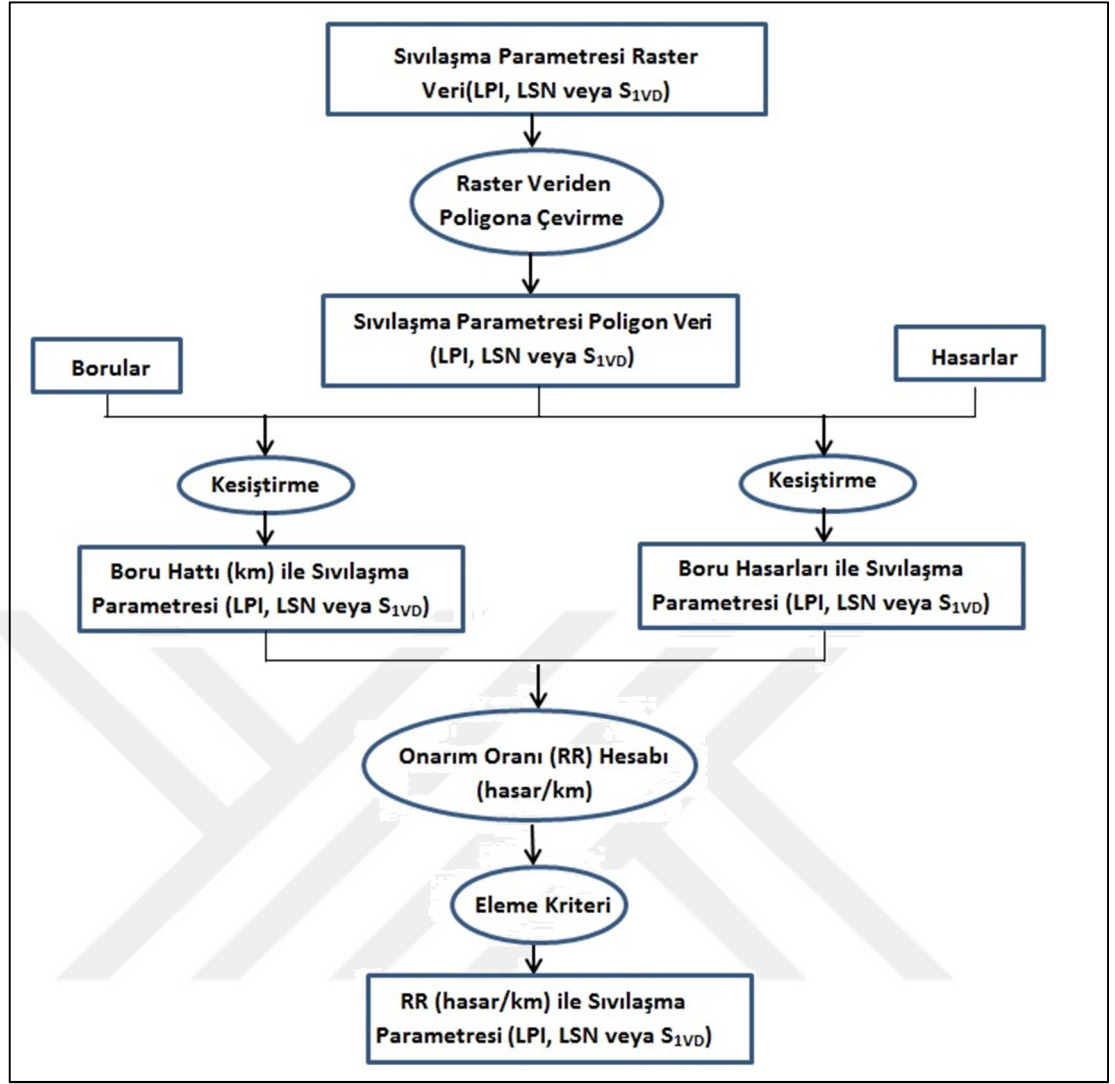


Şekil 5.11: Avonside bölgesinde AC ve CI tipi borular için düşey yer hareketleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri

5.3 Sıvılaşma Parametreleri Kullanılarak Elde Edilen Hasar İlişkileri

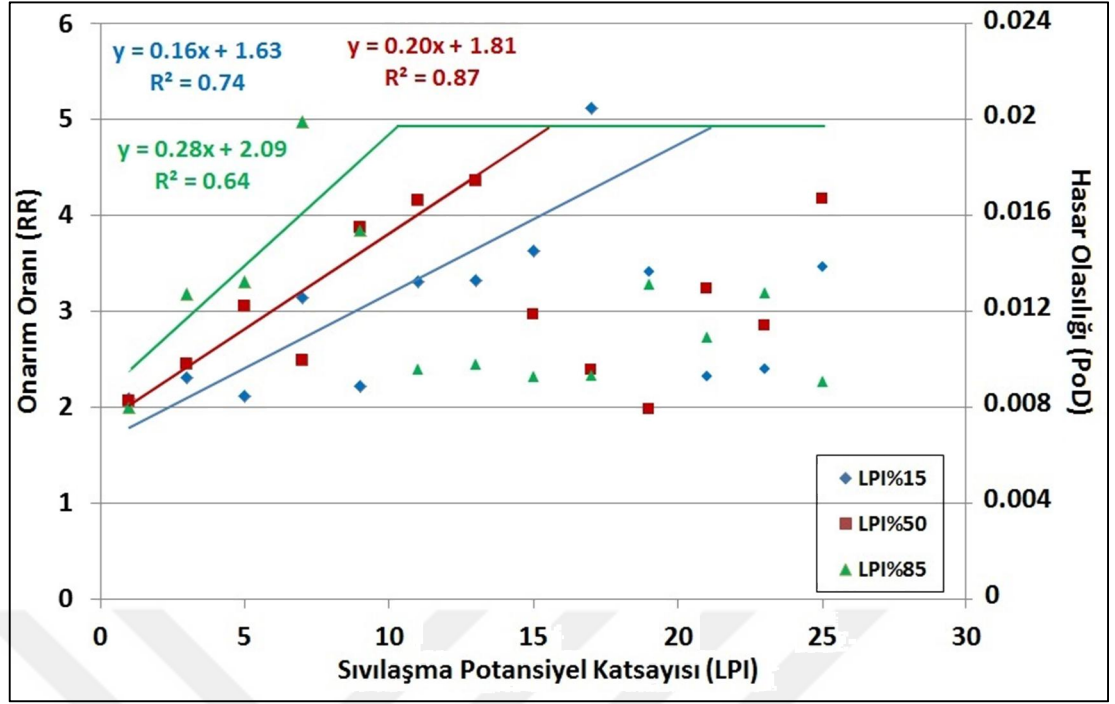
Sıvılaşma depre sarsıntıları nedeniyle tetiklenen daha çok iri daneli zeminlerde meydana gelen ve geoteknik mühendislerinin üstünde sayısız çalışmaları bulunan karmaşık konulardan biridir. Literatürde sıvılaşmaya bağlı boru hasarları üzerine çalışan az sayıda akademisyen ve mühendis bulunmakla beraber sıvılaşma parametreleriyle boru hasarları arasındaki hasar ilişkilerine tez kapsamında dünyada bir ilk olmak için çalışılmıştır. İlk kez Toprak ve diğ. (2017) çalışmasında boru hasarları ile %15 sıvılaşma tetikleme olasılığı ile hesaplanan sıvılaşma parametrelerinden sıvılaşma şiddeti indeksi (LSN) arasındaki ilişkiler ile değerlendirilerek tez çalışmasının sıvılaşma bölümünün temelleri atılmıştır. Bu çalışmada değişik sıvılaşma tetikleme olasılıkları (%15, %50 ve %85) ile hesaplanan sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI), hesaplanmış tek boyutlu oturma (S_{VID}) ve sıvılaşma şiddeti indeksi (LSN) ile boru hasar ilişkileri hesaplanıp literatüre önemli bir katkı konulması amaçlanmıştır.

Canterbury deprem dizisi tekrarlı sivilaşma olayının meydana gelmesine örnek olarak dünyada en önemli deprem serisidir. Bu deprem serisi ile ilgili özellikle sivilaşma konusunda çok kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Tez kapsamında da yararlanılan çalışmalardan bazıları şunlardır; Tonkin ve Taylor 2013, 2015; Van Ballegooy ve diğ. 2014^a, 2015^a, 2015^b; Lacrosse ve diğ. 2015. Bu çalışmalarda ayrıca LSN parametresinin arazi ve yerleşim yerleri temellerindeki gözlenen hasarlarla anlamlı korelasyonlar sağladığını göstermiştir. Sivilaşma parametreleri ile boru hasarları arasındaki ilişkileri hesaplamak için GIS yazılımlarından ArcMap yardımıyla bazı işlemler yapıldıktan sonra hasar analizleri için hazır duruma gelinmiştir. Tıpkı yatay ve düşey yer hareketleri için kullanılan eleme kriteri ile anlamlı sivilaşma parametreleri aralıklarında onarım oranları bulunmuştur. Sivilaşma parametrelerini kullanarak hesaplanan hasar ilişkilerinin tümünde güven aralığı %90 olarak seçilmiştir. Bu kadar yüksek güvenli aralığın seçilmesindeki ana etkenlerden biri sivilaşma parametrelerinin oluşturduğu alanın geniş olması ve %90 güvenli aralıklarda boru uzunluğunun hayli fazla olmasıdır. Yatay ve düşey yer hareketleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri için çalışma bölgesi olarak kullanılan Avonside bölgesinde yaklaşık olarak 15 km AC tipi boru ve 10 km CI tipi boru mevcutken, sivilaşma parametrelerinin hesaplandığı alanda yaklaşık 239 km AC 93 km CI ve 90 km PVC tipi boru mevcuttur. Hasar olasılığı hesaplamalarında gereken tek bir boru uzunluğu veya döşeme uzunluğu AC borularda 4 metre olarak alınırken, CI tipi borularda 1940 öncesi ve sonrası döşeme yılları göz önünde bulundurularak 5 metre olarak alınmıştır. PVC borularda ise döşeme uzunluğu 6 metre olarak alınmıştır. Şekil 5.12’de sivilaşma parametreleri kullanılarak hesaplanan hasar ilişkilerinin hesap adımları akış diyagramı olarak verilmiştir. Sivilaşma parametreleri hesaplanırken sivilaşma tetikleme olasılıkları olarak %15, %50 ve %85 kullanılmıştır. Boulanger ve Idriss (2014) tetikleme metodunda başlangıç girdi parametreleri zorunlu olmakta iken Tonkin ve Taylor (2015) çalışmalarında %15 olasılığı pratik mühendislik standartlarına göre en yaygın şekilde kullanılmasının gerekliliğini tartışıp ortaya koymuştur.



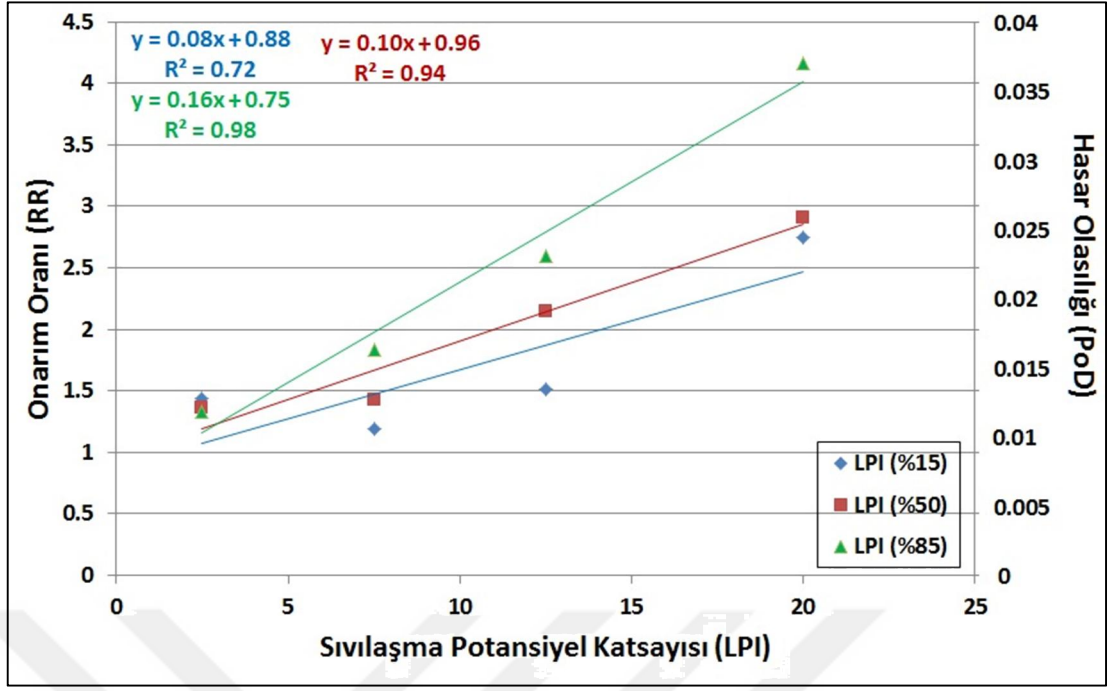
Şekil 5.12: Sıvılaşma parametreleri yardımıyla hesaplanan hasar ilişkileri akış diyagramı

Şekil 5.13’de AC tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan LPI değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. %50 sıvılaşma olasılığına ait hasar ilişkisi en yüksek R^2 değerini vermiştir. Hasar ilişkileri, Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{INCS} ’ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine (Şekil 4.6) paralel sonuçlar vermektedir.



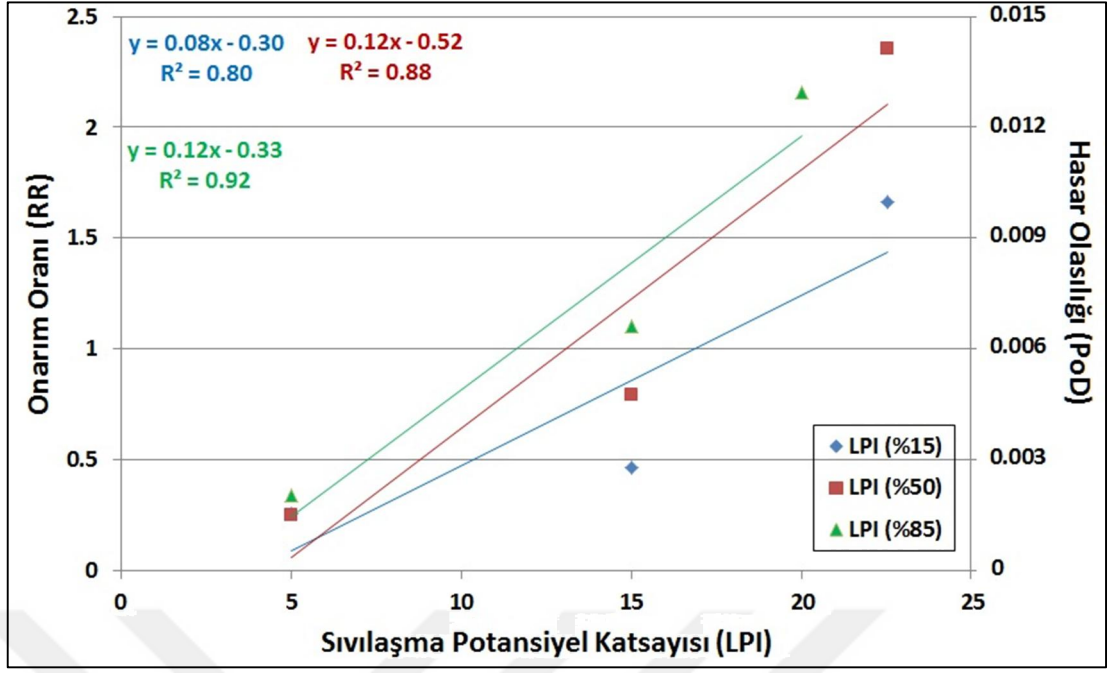
Şekil 5.13: AC tipi borular için LPI %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri

Şekil 5.14’de CI tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan LPI değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. İlişkilerde ilk göze çarpan Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{INCS} ’ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine (Şekil 4.6) paralel sonuçlar vermesidir. Sırasıyla alttan üste doğru %15, %50 ve %85 olasılıklardaki hasar ilişkileri dizilmiştir. R^2 değerleri yüksek olmakla birlikte en yükseği %85 sıvılaşma tetikleme olasılığına ait hasar ilişkisidir ($R^2=0.98$).



Şekil 5.14: CI tipi borular için LPI %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri

Şekil 5.15’de PVC tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan LPI değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. İlişkiler, Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{1NCS} ’ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine (Şekil 4.6) paralel sonuçlar vermektedir. Sırasıyla alttan üste doğru %15, %50 ve %85 olasılıklardaki hasar ilişkileri dizilmiştir. Birbirine yakın ilişkiler ortaya çıkmakta olup %85 sıvılaşma tetikleme olasılığına hasar ilişkisi en yüksek R^2 değerini (0.92) vermektedir. Diğer ilişkilerde güçlü korelasyonlar vermiştir.

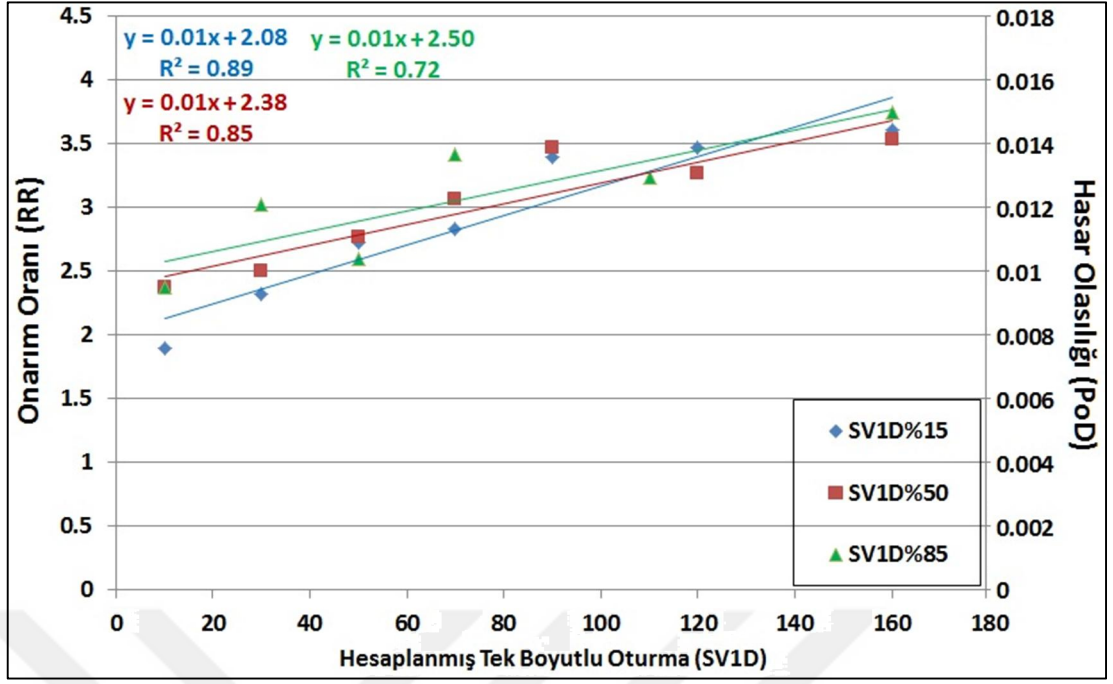


Şekil 5.15: PVC tipi borular için LPI %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri

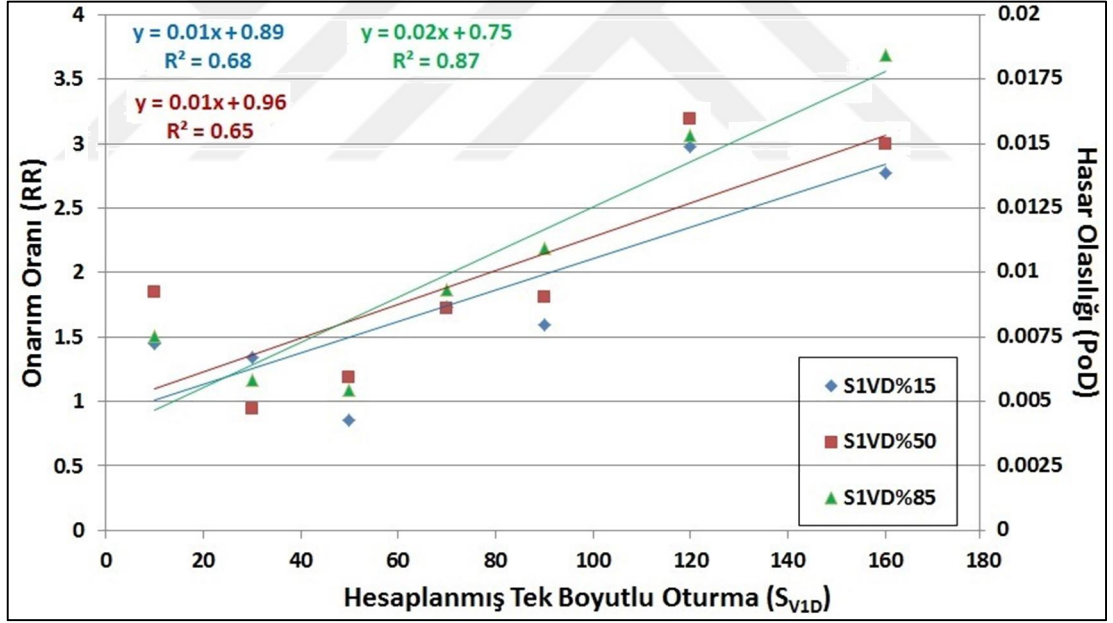
Şekil 5.16'da AC tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan S_{VID} değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Birbirine yakın ilişkiler ortaya çıkmakta olup %15 sıvılaşma tetikleme olasılığına hasar ilişkisi en yüksek R^2 değerini (0.89) vermektedir. %85 e göre düşük çıktığından dolayı hasar ilişkisi düşük R^2 değeri (0.72) vermiştir.

Şekil 5.17'de CI tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan S_{VID} değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. İlişkiler Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{1NCS} 'ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine (Şekil 4.6) benzer görülmektedir. En yüksek R^2 değerini (0.87) %85 hasar ilişkisi vermiştir. Diğer hasar ilişkileri 0.65 ve 0.68 değerlerini verirken bazı S_{VID} aralıklarında farklı hasar ilişkileri hemen hemen aynı onarım oranı değerlerini vermektedir.

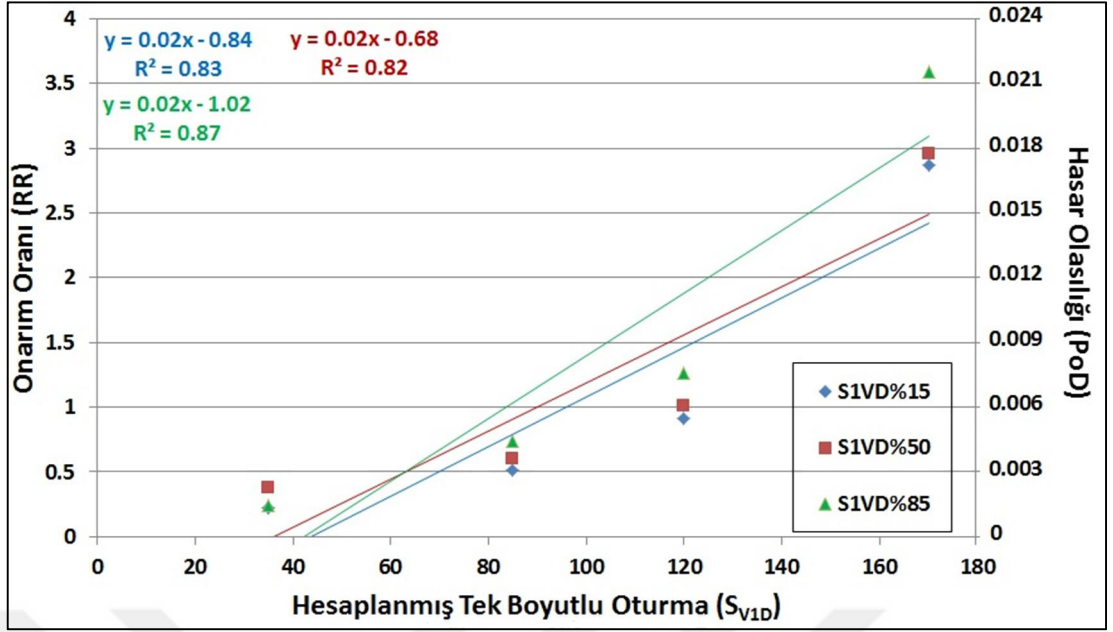
Şekil 5.18'de ise PVC tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan S_{VID} değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Birbirine yakın ilişkiler ortaya çıkmakta olup %85 sıvılaşma tetikleme olasılığına hasar ilişkisi en yüksek R^2 değerini (0.87) vermektedir.



Şekil 5.16: AC tipi borular için S_{V1D} %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri



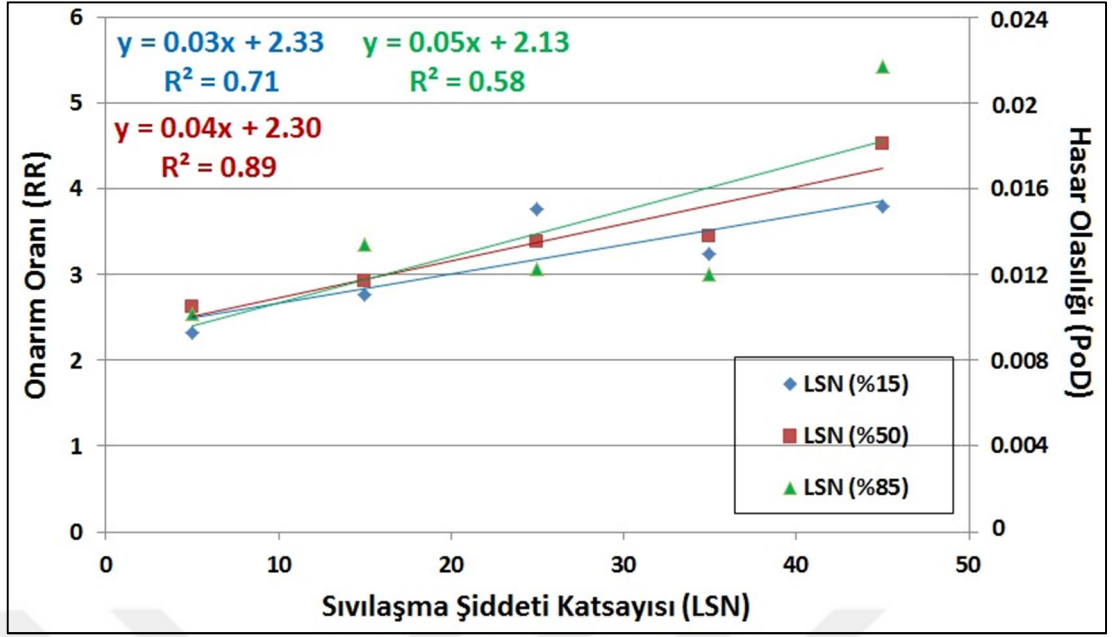
Şekil 5.17: CI tipi borular için S_{V1D} %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri



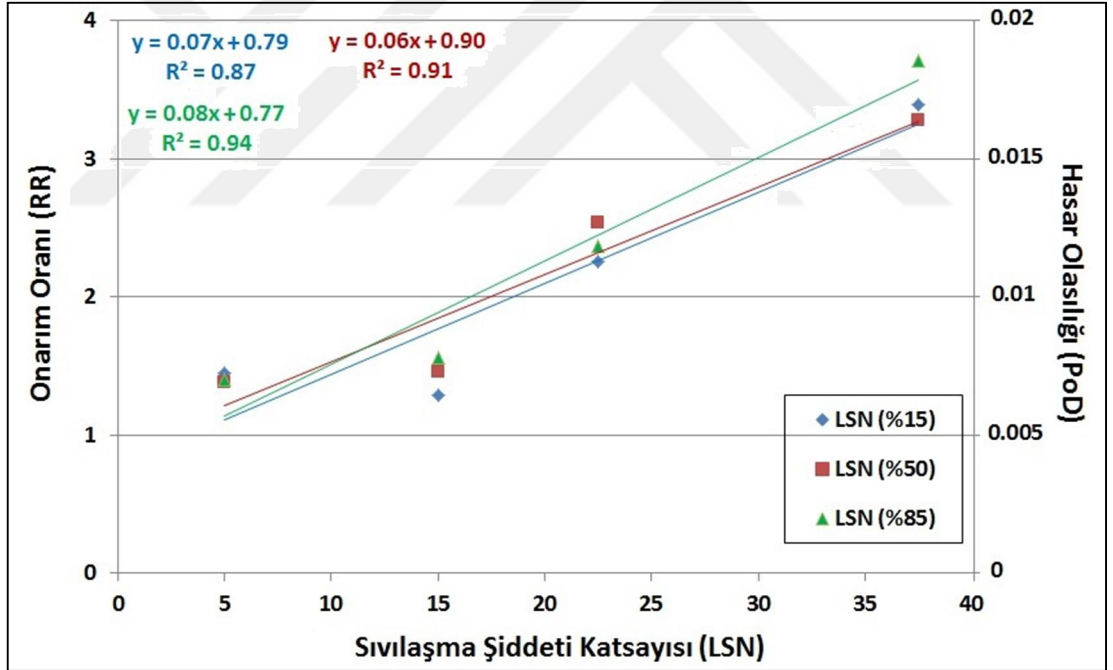
Şekil 5.18: PVC tipi borular için S_{VID} %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de AC ve CI tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan LSN değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Canterbury deprem serisi için LSN parametresinin arazi ve bina temelleri hasarları için diğer parametrelere göre daha iyi sonuçlar verdiği ve LSN parametresinin diğer parametrelere göre avantajları bulunduğu yukarıda açıklanmıştır. Boru hasar ilişkilerinde ise özellikle CI tipi borularda yüksek korelasyon sağlanmış ve ilişkiler birbirlerine yakın çıkmıştır (Şekil 5.19). AC tipi borular için ise %50 sıvılaşma tetikleme olasılığı ile hesaplanan hasar ilişkisi en yüksek değeri vermiştir. Yine Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{INCS} ’ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine (Şekil 4.6) benzer hasar ilişkileri Şekil 5.20’de gösterilmiştir.

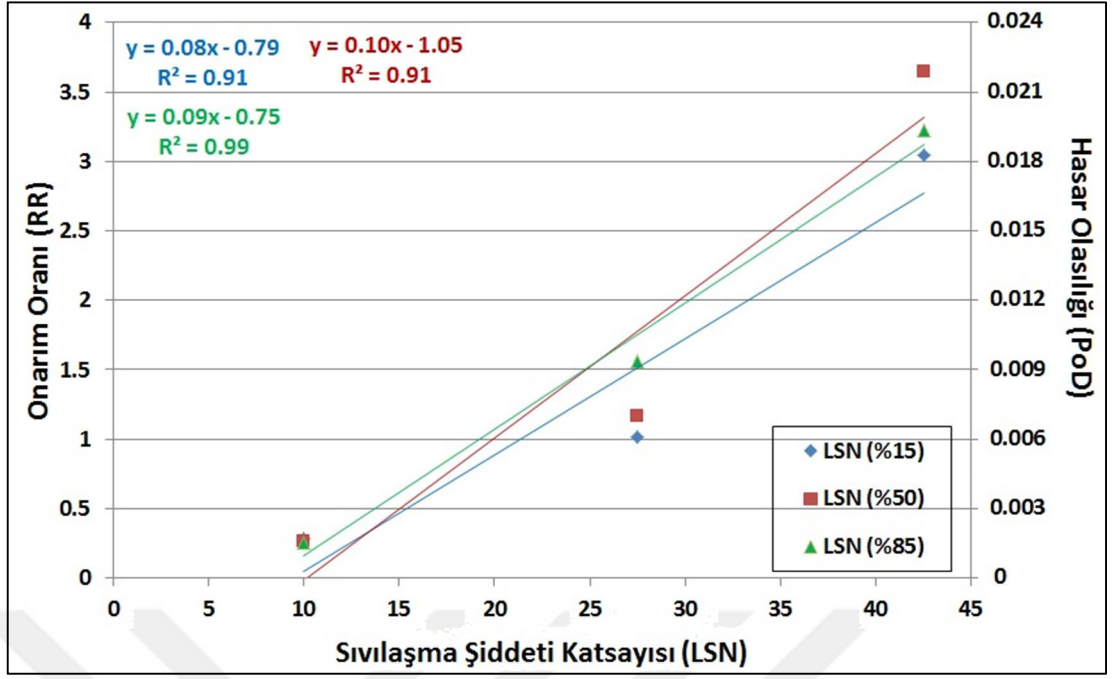
Şekil 5.21’de ise PVC tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan LSN değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Birbirine yakın ilişkiler ortaya çıkmakta olup %85 sıvılaşma tetikleme olasılığına hasar ilişkisi en yüksek R^2 değerini (0.99) vermektedir.



Şekil 5.19: AC tipi borular için LSN %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri

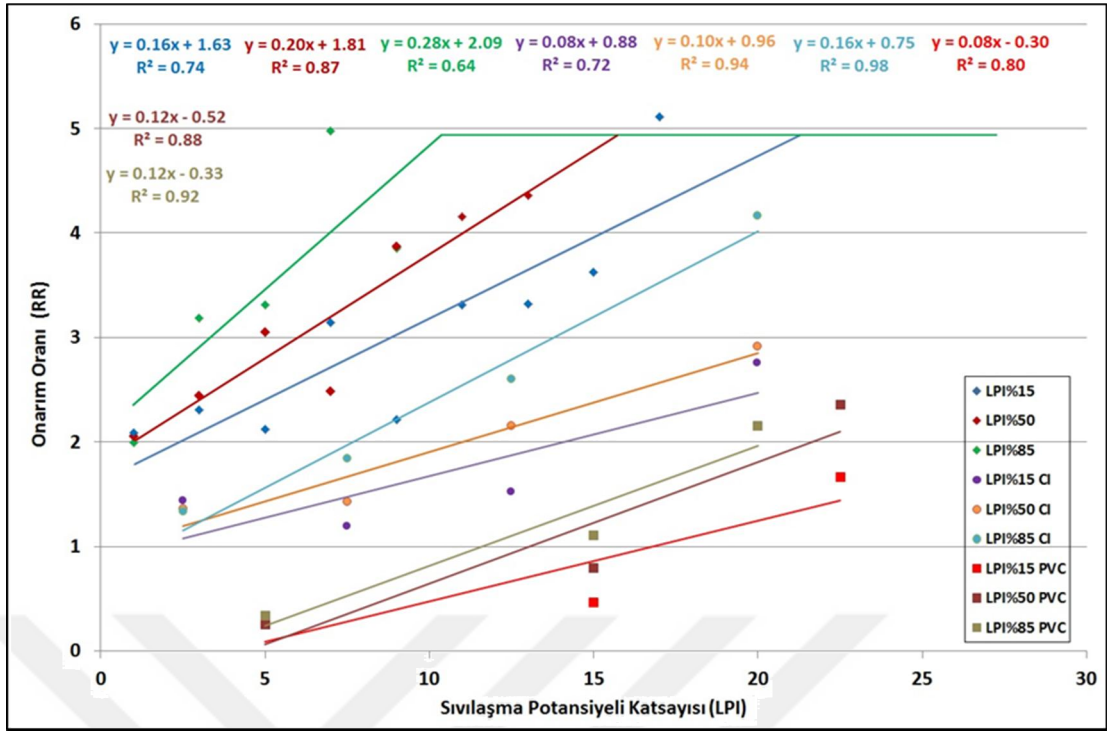


Şekil 5.20: CI tipi borular için LSN %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri

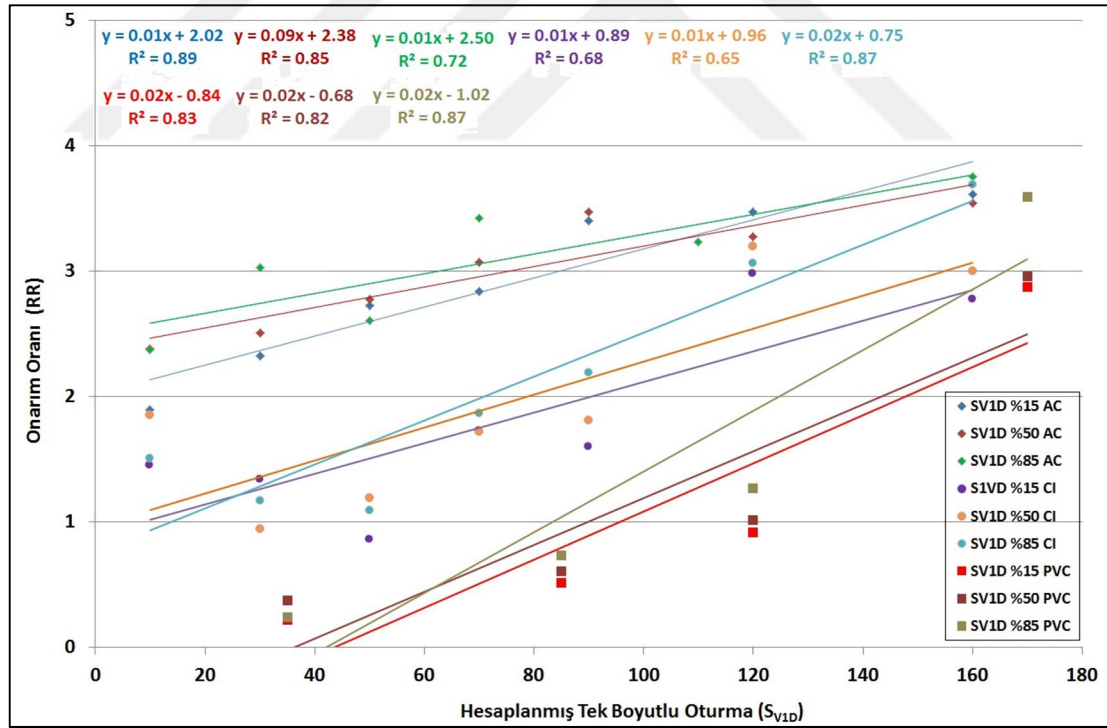


Şekil 5.21: PVC tipi borular için LSN %15, %50 ve %85 kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri

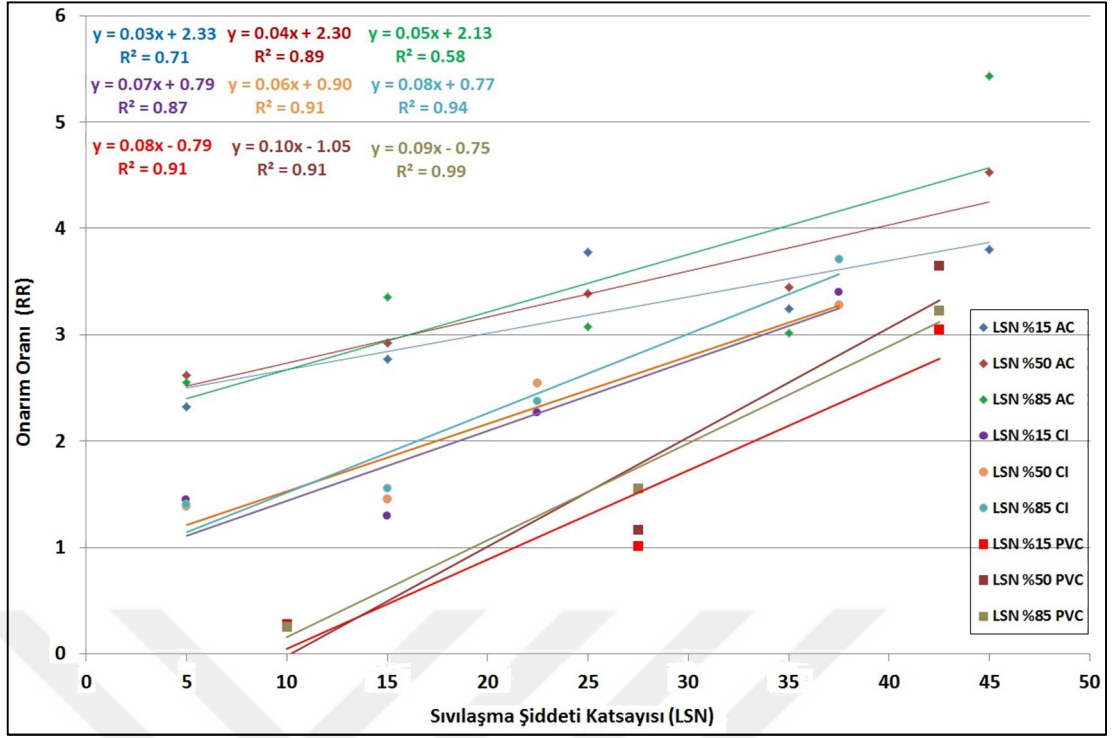
Sıvılaşma parametreleriyle geliştirilen tüm hasar ilişkilerinde incelenen boru tipine göre (AC, CI ve PVC) onarım oranları yüksek kırılmanlığa sahip boru tipinden düşük kırılmanlığa sahip boru tipine göre sıralanmıştır. Kırılmanlılığı en yüksek olan AC tipi boruların onarım oranı değerleri en yüksek çıkarken AC tipi boruları CI ve PVC tipi borular takip etmiştir. Bu sonuçlar sıvılaşma parametreleri ile hesaplanan hasar ilişkilerinin doğruluğunu gösterir niteliktedir. Şekil 5.22-5.24’de sıvılaşma parametrelerine göre hesaplanan hasar ilişkilerinin özeti verilmiştir. Ayrıca hemen hemen tüm hasar ilişkilerinde Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{INCS} ’ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine paralel sonuçlar vermiştir. Tüm sıvılaşma parametreleriyle anlamlı korelasyonlar elde edilmiştir.



Şekil 5.22: LPI parametresi kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri



Şekil 5.23: S_{VID} parametresi kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri



Şekil 5.24: LSN parametresi kullanılarak hesaplanan hasar ilişkileri

6. SONUÇLAR

Tez kapsamında sismik etkiler altındaki gömülü boru hatlarındaki hasar analizleri üstünde kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada 4 Eylül 2010 tarihinde büyüklüğü 7.1 Mw olan Darfield depremiyle başlayan, birbiri ardına gerçekleşen birçok büyük deprem ve sayısız artçı şoktan oluşan ve literatürde eşsiz bir deprem serisi olarak sayılan Canterbury deprem dizisinin en büyük depremlerinden 22 Şubat 2011 (Mw 6.2) Christchurch depremi kullanılmıştır. Christchurch depreminin yol açtığı yatay hareketler üç farklı uzaktan algılama metodu (LiDAR, hava fotoğrafı ve uydu ölçümleri) ile dört farklı veri seti olarak elde edilmiştir.

LiDAR 4m, LiDAR 56 m, hava fotoğrafı ve uydu ölçümleri ile elde edilen yatay hareketlerin ilk olarak Avonside bölgesinde kapsamlı karşılaştırmaları yapılmıştır. Farklı metotlarla elde edilen yatay yer hareketlerinin karşılaştırılmasına olanak sağlayan Avonside bölgesinin önemi çok büyüktür. Dört farklı veri seti ilk önce birbirleriyle ikili kombinasyonlar şeklinde karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yaparken çeşitli metotlar kullanılarak eleme süreciyle birlikte anomali diye tabir edilebilecek veri noktaları elenmiştir. Karşılaştırmalar herhangi bir ölçüm metodunun diğerlerine göre bir üstünlük sağlamadığını göstermiştir. Sonuç olarak aynı veri setinden türetilen LiDAR 4m ve LiDAR 56 veri setleri beklenildiği gibi birbirine en yakın veri setleri olarak ortaya çıkmıştır. LiDAR veri setleriyle uydu ölçümleri hava fotoğraflarına göre daha yüksek korelasyonlar göstermiştir. Tüm karşılaştırmalarda doğu-batı R^2 değerleri kuzey-güney R^2 değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç deplasman ölçüm metotlarında yön etkisinin bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

İkinci karşılaştırma metodu olarak daha doğrudan sonuçlar vermesi amacıyla Avonside bölgesinde 10 adet hat oluşturulmuş ve bu hatlar boyunca farklı metotlarla elde edilen yatay yer hareketleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu 10 hat içerisinde bazı hatlarda benchmark adı verilen ve Avonside bölgesinde sınırlı sayıda bulunan ölçüm noktalarından da faydalanan ölçüm metotları arasında herhangi bir üstünlüğün olmadığı sonucu çıkmaktadır. Seçilen hatlar boyunca yer değiştirmelerin karşılaştırılması, farklı tekniklerden elde edilen yanal zemin hareketlerinin

karşılaştırılmasının karmaşıklığını göstermektedir. Tüm hatlarda yapılan karşılaştırmalarda ölçüm metotları arasında kesin bir benzerlik bulunamamıştır. Bazı ölçüm tekniklerinin bazı hatlarda benzer eğilimler gösterirken bazı hatlarda ise farklılıklar gösterdiği önemli bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır.

Avonside bölgesinde farklı uzaktan algılama metotlarına göre oluşturulan yatay deplasman ve yatay şekil değiştirme haritaları sonucunda uydu ölçümlerinin yatay yer hareketlerini tahmin etmede iyi bir ölçüm metodu olduğunu ancak yatay şekil değiştirmeleri tahminde LiDAR kadar iyi sonuç vermediği gözlemlenmiştir. Aksine LiDAR ölçümleri ise yatay şekil değiştirmelerini tahminde çok iyi sonuçlar verirken yatay yer hareketlerinin tahmininde aynı başarıya ulaşamamıştır. Uydu görüntülerinden elde edilen yatay yer deplasmanları haritasında Avonside nehri etrafından uzaklaştıkça deplasman değerlerinin sıfıra yaklaştığı gözlemlenmekte iken LiDAR ölçümlerinde bir çok yerde sıfır değerine yaklaşmıştır. LiDAR yatay şekil değiştirme haritalarında ise nehirden uzaklaştıkça, şekil değiştirmeler azalarak sıfıra yaklaşmış ve çok fazla değişiklik eğiliminde olmamıştır. Uydu ölçümlerinden elde edilen yatay şekil değiştirme haritalarında ise nehirden uzakta da birçok yerde yüksek yatay şekil değiştirme bölgeleri gözlenmiş ve şekil değiştirme dağınıklık göstermiştir.

Avonside bölgesinde AC ve CI tipi borularda yatay şekil değiştirmeleri kullanarak hesaplanan hasar ilişkilerinde, yatay şekil değiştirmeler AC tipi borular için LiDAR 56 m, LiDAR 4m, hava fotoğrafı ve uydu ölçümleri yardımıyla elde edilirken, CI tipi borular için LiDAR 56 m, LiDAR 4m ve hava fotoğrafı yardımıyla elde edilmiştir. Yatay şekil değiştirme olarak en büyük asal yatay şekil değiştirmeler bulunduktan sonra hasar ilişkileri eleme kriterine tabi tutularak hesaplanmıştır. Aynı zamanda hasar sayısının boru adedine bölünmesiyle elde edilen hasar olasılığı (PoD) parametresi de kullanılmıştır. AC tipi borularda en büyük asal yatay şekil değiştirme kullanılarak hesaplanan hasar ilişkilerinde en yüksek R^2 değerlerini LiDAR verilerinden türetilen LiDAR 4m ve LiDAR 56 ilişkilerinin vermesi, LiDAR yönteminin şekil değiştirme hesaplarında uydu ölçümlerinden daha iyi sonuçlar verdiğini desteklemektedir. Hava fotoğraflarından elde edilen hasar ilişkileri uydu ölçümlerine daha yakın görülmektedir. CI tipi boruların hasar ilişkilerinde göze çarpan en büyük sonuç hasar ilişkilerinin (LiDAR 4m, LiDAR 56m ve hava

fotoğrafları) birbirlerinden önemli bir farklılık göstermemesi ve R^2 değerlerinin oldukça yüksek olmasıdır. CI tipi borular için uydu ölçüm alanında hasar ilişkisi hesaplanacak yeterli veri nokta sayısı bulunmadığından dolayı hasar ilişkisi hesaplanamamıştır.

AC ve CI boru tiplerinin kırılğan borular olduğu bilinmektedir ve bu nedenle deformasyon eşik seviyesinin aşılması durumunda hasar görebilir. AC tipi boruların hasar ilişkilerindeki veri noktaları, özellikle düşük şekil değiştirme seviyelerinde daha dağınıktır. Bu davranış kısmen AC borular için deformasyonun alt eşik seviyesine ve bitişik boruya bağlantı yapmak için asbestli çimento malzemesinden yapılan nispeten güçsüz kelepçe nedeniyle olabilmektedir.

Tez kapsamında en büyük asal yatay şekil değiştirmesi ile hesaplanan hasar ilişkilerinin yanında boru doğrultusunun da göz önünde bulundurarak doğrultunun hasar ilişkilerine etkisi araştırılmıştır. Bunun için LiDAR 4m ve LiDAR 56m veri setleri kullanılarak boru doğrultusunda ve boruya dik yönlerde hasar ilişki analizleri yapılmıştır. LiDAR 4m veri seti kullanılarak hesaplanan hasar ilişkilerinde AC tipi borular, boruya paralel ve dik yöndeki yatay şekil değiştirmelerden hemen hemen aynı şekilde etkilenmekte iken CI tip borularda boruya paralel yöndeki yatay şekil değiştirmelerden daha fazla etkilenmektedir. LiDAR 56 m yatay yer değiştirme verisinden yararlanılarak elde edilen hasar ilişkilerinde ise AC tipi borular için boruya paralel yöndeki davranış farklıdır ama yine de LiDAR 4 veri setine yakın sonuçlar vermektedir. CI tipi borular için ise LiDAR 56 m yardımıyla elde edilen yatay şekil değiştirmelerle hesaplanan hasar ilişkileri LiDAR 4m ile çok benzemekte ve boruya paralel yöndeki yatay şekil değiştirmelerinden daha fazla etkilenmektedir. Her iki veri setinden de boru doğrultusunda hasar ilişkileri çıkartılmıştır. Sonuç olarak boru doğrultusunda hesaplan hasar ilişkilerinin kullanılmasında en büyük asal yatay şekil değiştirmelerin kullanılmasına göre bir üstünlüğü bulunmamıştır.

Çeşitli yöntemlerle elde edilen yatay yer hareketleri yanında LiDAR yöntemiyle 22 Şubat 2011 Christchurch depremi sonrasında oluşan düşey yer hareketleri yardımıyla hesaplanan oturmaya bağlı açısai değişim parametresi kullanılarak AC ve CI tipi borularda hasar ilişkileri hesaplanmıştır. O'Rourke ve diğ. (2014) çalışmasında özellikle AC tipi boruların farklı oturma sonucu ortaya çıkan oturmaya bağlı açısai değişime çok duyarlı olduğunu tüm Christchurch sivilaşma

bölgesinde CI tipi borulara göre yaklaşık 1.5 kat daha fazla onarım oranı değerine sahip olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada ise Avonside bölgesinde düşey yer hareketlerinden kaynaklı boru hasar ilişkilerinde, AC tipi borularda aynı oturmaya bağlı açısız değişim değerlerinde CI tipi borulara göre yaklaşık 2 kat daha fazla onarım oranı değerleri ortaya çıkmıştır.

Çalışmada son olarak literatürde sıvılaşma parametreleriyle boru hasarları arasındaki ilişkileri ilk kez ortaya koyması açısından büyük önem taşıyan sıvılaşma parametreleri ile boru hatları arasındaki hasar ilişkileri hesaplanmıştır. Farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları (%15, %50 ve %85) ile hesaplanan LPI, S_{VID} ve LSN parametreleri kullanılarak AC, CI ve PVC tipi borular için hasar ilişkileri hesaplanmıştır. LPI parametresini kullanarak hesaplanan hasar ilişkilerinde AC tipi borularda %50 sıvılaşma olasılığına ait hasar ilişkisi en yüksek R^2 değerini vermiştir. Hasar ilişkileri, Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{INCS} 'ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine (Şekil 4.6) paralel sonuçlar vermektedir. CI tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan LPI değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkilerde Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{INCS} 'ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine paralel sonuçlar vermiştir. Sırasıyla alttan üste doğru %15, %50 ve %85 olasılıklardaki hasar ilişkileri dizilmiştir. R^2 değerleri yüksek olmakla birlikte en yüksek %85 sıvılaşma tetikleme olasılığına ait hasar ilişkisidir. PVC tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan LPI değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. İlişkiler, Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{INCS} 'ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine (Şekil 4.6) paralel sonuçlar vermektedir. Sırasıyla alttan üste doğru %15, %50 ve %85 olasılıklardaki hasar ilişkileri dizilmiştir. Birbirine yakın ilişkiler ortaya çıkmakta olup %85 sıvılaşma tetikleme olasılığına hasar ilişkisi en yüksek R^2 değerini (0.99) vermektedir. Diğer ilişkiler de güçlü korelasyonlar vermiştir.

AC tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan S_{VID} değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkilerde birbirine yakın ilişkiler ortaya çıkmakta olup %15 sıvılaşma tetikleme olasılığına hasar ilişkisi en yüksek r^2 değerini (0.89) vermektedir. CI tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan S_{VID} değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki

ilişkilerde Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{1NCS} 'ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine benzer görülmektedir. En yüksek R^2 değerini (0.87) %85 hasar ilişkisi vermiştir. Diğer hasar ilişkileri 0.65 ve 0.68 değerlerini verirken bazı S_{VID} aralıklarında farklı hasar ilişkileri hemen hemen aynı onarım oranı değerlerini vermektedir. PVC tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan S_{VID} değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Birbirine yakın ilişkiler ortaya çıkmakta olup %85 sıvılaşma tetikleme olasılığına hasar ilişkisi en yüksek R^2 değerini (0.87) vermektedir.

Canterbury deprem serisi için LSN parametresinin arazi ve bina temelleri hasarları için diğer parametrelere göre daha iyi sonuçlar verdiği ve LSN parametresinin diğer parametrelere göre daha yararlı bir parametre olduğu literatürde yer almaktadır. Boru hasar ilişkilerinde ise özellikle CI tipi borularda yüksek korelasyon sağlanmış ve ilişkiler birbirlerine yakın çıkmıştır. AC tipi borular için ise %50 sıvılaşma tetikleme olasılığı ile hesaplanan hasar ilişkisi en yüksek değeri vermiştir. Yine Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasındaki CRR ve q_{1NCS} 'ye bağlı sıvılaşma tetikleme olasılığı eğrilerine benzer hasar ilişkileri elde edilmiştir. PVC tipi borular için farklı sıvılaşma tetikleme olasılıkları ile hesaplanan LSN değerleriyle onarım oranı ve hasar olasılığı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Birbirine yakın ilişkiler ortaya çıkmakta olup %85 sıvılaşma tetikleme olasılığına hasar ilişkisi en yüksek R^2 değerini (0.99) vermektedir.

Kırılganlığı en yüksek olan AC tipi boruların onarım oranı değerleri en yüksek çıkarken AC tipi boruları CI ve PVC tipi borular takip etmiştir. Bu sonuçlar sıvılaşma parametreleri ile hesaplanan hasar ilişkilerinin doğruluğunu gösterir niteliktedir.

7. KAYNAKLAR

Ballantyne, D. B., Berg, E., Kennedy, J., Reneau, R., and Wu, D. "Earthquake loss estimation modeling for the Seattle water system: Report to U.S. Geological Survey under Grant 14-08-000 I-G 1526", Technical Report, Kennedy/Jenks/Chilton, Federal Way, WA., (1990).

Barenberg, M. E. "Correlation of pipeline damage with ground motions", *J. Geotech. Eng*, ASCE, June, 114 (6), 706-711, (1988).

Beavan, J., Levick, S., Lee, J., and Jones, K., "Ground displacements and dilatational strains caused by the 2010-2011 Canterbury earthquakes", GNS Science Consultancy Report 2012/67, 2012: p. 59, (2012).

Black, J., "Earthquake damage to buried pipelines: a Christchurch perspective", ASCE Pipelines 2013 Conference, Fort Worth, Texas, 26-28 June, (2013).

Boscardin, M. D. and Cording, E. J., "Building response to excavation-induced settlement", *J. Geotech. Eng*, ASCE 115(1), 1-21, (1989).

Boulanger, R. W., and Idriss, I. M., "CPT and SPT based liquefaction triggering procedures", Report UCD/CGM-14/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp, (2014).

Bouziou, D., "Earthquake-induced ground deformation effects on buried pipelines" Ph.D Thesis, Cornell University: Ithaca, New York, (2015).

Bray, J.D., O' Rourke T. D., Cubrinovski, M., Zupan, J. D., Jeon, S. S., Taylor, M., Toprak, S., Hughes, M., van Ballegooy, S., and Bouziou, D., "Liquefaction impact on critical infrastructure in Christchurch" Final Technical Report, U.S.G.S. Award Number: G12AP20034, 51pp, (2013).

Burrough, P. A. and McDonnell, R. A., Principles of geographical information systems, Oxford University Press, Oxford, U.K., (1998).

Canterbury Earthquake Recovery Authority (CERA). Geotechnical database for Canterbury Earthquake Sequence, NZ, available at: <https://canterburygeotechnicaldatabase.projectorbit.com>. (2012).

Canterbury Geotechnical Database, “Liquefaction interpreted from aerial photography, map layer CGD0200 - 11 Feb 2013”, Available at: <https://canterburygeotechnicaldatabase.projectorbit.com/>, (2013).

Clough, G. W. and O'Rourke, T. D., “Construction induced movements of in-situ walls”, In Proceedings, Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE, 439-470, (1990).

Cook, R. D., Finite element modeling for stress analysis. John Wiley and Sons, (1995).

Eguchi, R. T. “Seismic hazard input for lifeline systems”, *Struct. Saf.*, 10,193-198, (1991).

Eguchi, R. T. “Seismic vulnerability models for underground pipes”, Proceedings of Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, ASME, PVP-77, New York, June, 368- 373, (1983).

GNS Science, The most recent aftershock map, available at <http://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Natural-Hazards/Recent-Events/Canterbury-quake/Recent-aftershock-map> (2013).

Hamada, M., and O'Rourke, T. D., “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, (1992).

Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R., and Emoto, K., “Study on liquefaction induced permanent ground displacement”, Association for the Development of Earthquake Prediction, Tokyo, Japan, November, (1986).

Horn, B. K. P., “Hill shading and the reflectance map”, *In Proceedings, IEEE* 69(1), 14-47, (1981).

Idriss, I. M., and Boulanger, R. W., Soil liquefaction during earthquakes. 1st ed. Oakland, Calif.:Earthquake Engineering Research Institute (EERI), (2008).

Ishihara, K., and Yoshimine, M., “Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes”, *Soils Found.*, 32(1), 173–188, (1992).

Isoyama, R., and Katayama, T. “Reliability evaluation of water supply systems during earthquakes”, Report of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 30 (I), Serial No. 194, (1982).

Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K., “Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes, Proc. Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, 925-939, (1982).

Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., and Yasuda, S., “A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan”, In Proceedings, 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco, pp. 885–896, (1978).

Japan National Committee on Earthquake Engineering, “Niigata earthquake of 1964”, Proceedings, The Third World Conference on Earthquake Engineering, Auckland and Wellington, New Zealand, 3, pp. S78-108, (1965).

Juang, C. H., Fang, S. Y., and Li, D. K. “Reliability analysis of soil liquefaction potential.” Geotechnical Special Publication, 133, ASCE, Reston, VA, U.S.A., (2005b).

Juang, C.H, Yuan, H., Kun, D., Yang, S.H., and Christopher, R.A. “Estimating severity of liquefactioninduced damage near foundation”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 25 pp:403-411, (2005a).

Katayama, T., Kubo, K., and Sato, N. “Earthquake damage to water and gas distribution systems”, Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Oakland, CA, 396-405, (1975).

Kavak, K. Ş., “Uzaktan algılamanın temel kavramları ve jeolojideki uygulama alanları”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 52, 63-74, (1998).

Kersten, Th., Sternberg, H., Mechelke, K., and Acevedo Prado, C., “Terrestrial laserscanning system MENSIS GS 100/GS 200”, Panoramic Photogrammetry Workshop, (2004).

Kramer, S. L., *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J, (1996).

Lacrosse, V., Van Ballegooy, S., and Bradley, B.A. “Effect of liquefaction triggering uncertainty on liquefaction consequence”, Proceedings of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Christchurch, New Zealand: ISSMGE, (2015).

Lees, J., van Ballegooy, S. and Wentz, F. J. “Liquefaction susceptibility and fines content correlations of the Christchurch soils”, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November, New Zealand, (2015).

Martin, J. G., “Measuring liquefaction-induced deformation from optical satellite imagery”, M.S. Thesis, University of Texas at Austin, (2014).

Martin, J. G., and Rathje, E. M., “Lateral spread deformations from the 2010-2011 New Zealand earthquakes measured from satellite images and optical image correlation”, Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Anchorage, AK, (2014).

Ministry of Business, Innovation & Employment (MBIE), “Revised issue of Repairing and rebuilding houses affected by the Canterbury earthquakes, (2012).

Mogami, T., and Kubo, K., “The behavior of soil during vibration”, Proceedings, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Vol. 1, pp. 152-155, (1953).

Moss, R., Seed, R., Kayen, R., Stewart, J., Der Kiureghian, A., and Cetin, K. O., “CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(8), pp.1032-1051, (2006).

Nacaroğlu, E., “Deprem etkisiyle oluşan boru hasarlarının coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve kümeleme analizi ile değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, (2010).

New Zealand Geotechnical Database (NZGD), “LiDAR and digital elevation models, map layer CGD0500 - 23 July 2012”, <https://www.nzgd.org.nz>.

O’Callaghan, F.W., “Pipeline performance experiences during seismic events in New Zealand over the last 27 years”, Proceedings of the 17th Plastic Pipes Conference, September 22-24, Chicago, Illinois, USA, (2014).

O’Rourke, T. D., “An Overview of geotechnical and lifeline earthquake engineering”, In Geotechnical Special Publication No. 75, ASCE (Pakoulis, P., Yegian, M., Holtz, D. (eds.)), Reston, VA, 1998, II, pp. 1392-1426, (1998).

O’Rourke, T. D., Jeon, S. S., Toprak, S., Cubrinovski, M., Hughes, M., Ballegooy, S., and Bouziou, D., “Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ”, Earthquake Engineering Research Institute, EERI, Vol. 30, No. 1, pp. 183-204 (2014).

O’Rourke, T. D., Toprak, S., and Sano, Y., “Factors affecting water supply damage caused by the Northridge earthquake”, Proceedings, Sixth U.S.

National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, WA, pp: 1-12, (1998).

O'Rourke, M. J., and Ayala, G. "Pipeline damage due to wave propagation", *J. Geotech. Eng*, ASCE, 119 (9), 1490-1498, (1993).

O'Rourke, T. D., and Toprak, S., "GIS assessment of water supply damage from the Northridge earthquake", Frost, J. D. (Ed.) Geotechnical Special Publication, ASCE, New York pp: 117-131, (1997).

O'Rourke, T. D., Jeon, S. S., Toprak, S., Cubrinovski, M., and Jung, J. K., "Underground lifeline system performance during the Canterbury earthquake sequence", 15th World Conference in Earthquake Engineering, 2012, September. Lisbon, Portugal, (2012).

Quigley, M. C., Bastin, S., and Bradley, B. A., "Recurrent liquefaction in Christchurch, New Zealand, during the Canterbury earthquake sequence", *Geology*, doi: 10.1130/G33944.1, V.41 (4): 419-422, (2013).

Rathje, E. M., Kayen, R., and Woo, K.S, "Remote sensing observations of landslides and ground deformation from the 2004 Niigata Ken Chuetsu earthquake". *Soils Found.*, Japanese Geotechnical Society, 46(6), 831-842, (2006).

Rathje, E. M., Woo, K., Crawford, M., and Neuenschwander, A., "Earthquake damage identification using multi-temporal high-resolution optical satellite imagery", International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Seoul, South Korea, July (2005).

Rathje, E.M., and Franke, K. W., "Remote sensing for geotechnical earthquake reconnaissance", 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November, Christchurch, New Zealand, (2015).

Robertson, P., and Wride, C., "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test", *Can. Geotech. J.*, 35(3), pp.442-459, (1998).

Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., and Faris, A., Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering : A Unified and Consistent Framework. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, (2003).

Tonkin & Taylor Ltd., Christchurch Central City Geological Interpretative Report, Version 1.1 (2011).

Tonkin & Taylor Ltd., Canterbury Earthquake Sequence: Increased Liquefaction Vulnerability Assessment Methodology. Report Number: 52010.140.v1.0, (2015).

Tonkin & Taylor Ltd., Liquefaction Vulnerability Study. Report Number: 52020.0200/v1.0, (2013).

Toprak S., Koç A. C., and Taşkın F., “Evaluation of Water Distribution Pipeline Performance Against Earthquakes”, Paper No: 1748, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 25-28, 2007, Greece, (2007).

Toprak, S., “Earthquake effects on buried lifeline systems”, PhD Thesis, Cornell University, Ithaca, NY, (1998).

Toprak, S., and Holzer, T. L., “Liquefaction potential index: field assessment.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 129(4), 315–322, (2003).

Toprak, S., Nacaroglu, E., and Koc, A. C., “How important the ground strain and pipeline orientation for the seismic damages”, 4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2-4 June, Near East University, Nicosia, North Cyprus, (2016).

Toprak, S., Nacaroglu, E., and Koc, A. C., “Seismic damage probabilities for segmented buried pipelines in liquefied soils”, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November, New Zealand, (2015d).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C., Sarı, M., and Yıldırım U. S., “Seismic damages in pipelines in the light of preventive maintenance”, EWRA 9th World Congress Water Resources Management in a Changing World: Challenges and Opportunities, Istanbul, 10-13 June, (2015b).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C., Van Ballegooy, S., Jacka, M., Torvelainen, E., and O’Rourke, T. D., “Pipeline damage predictions in liquefaction zones using LSN”, 16th World Conference on Earthquake, Santiago Chile, January 9th to 13th, (2017).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C., ve Cetin, O. A., “Seismic damage probabilities for segmented buried pipelines”, 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ETH Zurich, Switzerland, August 1-4, (2011).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koç, A. C. Sarı, M., Yıldırım, Ü. S., ve Helva, V., “Christchurch, Yeni Zelanda Depreminin Avonside bölgesindeki gömülü borular üzerine etkisi”, Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 11-15 Mayıs 2015, İstanbul, (2015a).

Toprak, S., Nacaroglu, E., O’Rourke, T. D., Koc, A. C., Hamada, M., Cubrinovski, M., and JEON, S. S., “Pipeline damage assessment using horizontal displacements from Air photo and LiDAR measurements in Avonside area, Christchurch, NZ”, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 25-29 August, Istanbul, (2014).

Toprak, S., Taskin, F., and Koc, A.C., “Prediction of earthquake damage to urban water distribution systems: a case study for Denizli, Turkey”, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 68: 499–510, (2009).

Toprak, S., Nacaroglu, E., and Koc, A. C., “Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology Vol. 2”, Bölüm adı: (Seismic Response of Underground Lifeline Systems), Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, Edt: Ansal, Atilla, Basım sayısı: 1, pp: 458, ISBN: 978-3-319-16963-7, İngilizce (Bilimsel Kitap), (2015c).

Van Ballegooy, S., Cox, S.C., Thurlow, C., Rutter, H.K., Reynolds, T., Harrington, G., Fraser, J. and Smith, T. “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, (2014b).

Van Ballegooy, S., Lacrosse, V., Simpson, J., and Malan, P. “Comparison of CPT-based simplified liquefaction assessment methodologies based on Canterbury Geotechnical Dataset”, 12th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington, New Zealand, (2015a).

Van Ballegooy, S., Malan, P., Lacrosse, V., Jacka, M. E., Cubrinovski, M., Bray, J. D., O'Rourke, T. D., Crawford, S. A., and Cowan, H., “Assessment of liquefaction-induced land damage for residential Christchurch”, *Earthquake Spectra*: February 2014, Vol. 30, No. 1, pp. 31-55, (2014a).

Van Ballegooy, S., Wentz, R., and Boulanger, R. W. “Evaluation of a CPT-based liquefaction procedure at regional scale”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Special Issue: Liquefaction in New Zealand and Japan, (2015b).

Yıldız, F. “Büyük Ölçekli Harita Üretiminde LiDAR ve Ortofoto” Ders sunumu, Selçuk Üniversitesi, http://atlas.selcuk.edu.tr/1205734/Lidar_2.pdf erişim tarihi; 20. Şubat. 2017.

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe, K. H., “Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE 127(10), 817–33, (2001).

Zhang, G., Robertson, P. K., and Brachman, R. W. I., “Estimating liquefaction induced ground settlements from CPT for level ground”, *Can. Geotech. J.*, 39, 1168–80, (2002).

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : ENGİN NACAROĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi : KAHRAMANMARAŞ 03.12.1981

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : enacaroglu@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
B Blok İnşaat Mühendisliği

Yayın Listesi

- Toprak, S., Koc, A. C., Nacaroglu, E., Inel, M., and Senel S. M., “*Operational Methods for the Assessment and Management of Aging Infrastructure*, Bölüm adı: (Pipelines and Water Supply)., Tipografia editrice Pisana snc, Edts:Croce Pietro, Holický Milan , Basım sayısı:1, pp: 186, ISBN:978-88-8250-147-1, İngilizce (Bilimsel Kitap), (2015).
- Toprak, S.,Nacaroglu, E., and Koc, A. C., “*Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology Vol. 2*”, Bölüm adı: (Seismic Response of Underground Lifeline Systems), Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, Edt: Ansal, A., Basım sayısı:1, pp: 458, ISBN:978-3-319-16963-7, İngilizce (Bilimsel Kitap), (2015).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., Helva, V., and Koc, A. C., “*Design Charts for Pipelines under Longitudinal Soil Loading*”, Journal of Environmental Protection and Ecology, vol. 18. İngilizce (Makale), (2017).

Konferans listesi :

- Toprak, S., Koc, A. C., Nacaroglu, E., and Cetin, O. A., “Robustness of lifeline systems”, Proceedings of the 1st Workshop, 169-180, 4 - 5 February 2008, COST Action TU0601 Robustness of Structures, Zurich, Switzerland, (2008).
- Toprak, S., Koc, A. C., Cetin, O., and Nacaroglu, E., “Assessment of buried pipeline response to earthquake loading by using GIS”, Paper ID: 06-0077, 12-17 October 2008, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, (2008).
- Toprak, S., Koç, A. C., Fırat, M., Dikbaş, F., Bacanlı, Ü. G., Nacaroglu, E., ve Çetin, O. A. “Kentsel altyapı sistemlerinin performans değerlendirmesi”, Denizli Kent Sempozyumu, (2008).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., Cetin, O., and Koc, A. C., “Pipeline damage assessment using cluster analysis”, Proceedings of the 2009 ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference, ASCE Conf. Proc. 357, 78, DOI:10.1061/41050(357)78, 28 June - 1 July 2009, TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, Oakland, California, (2009).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., Cetin O., and Koc, A. C., “Pipeline damage assessment using cluster analysis”, Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment Proceedings of the 2009 ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference, USA, (2009).
- Toprak, S., Koc, A. C., Cetin O., and Nacaroglu, E., “Pipeline performance under longitudinal permanent ground deformation”, 14th European Conference on Earthquake Engineering, Republic of Macedonia, (2010).
- Toprak, S., Koc, A. C., Cetin O., and Nacaroglu, E., “A GIS approach for seismic analysis of pipeline networks”, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, Trabzon, Turkey, (2010).

- Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C., and Cetin O., “Use of subtractive clustering analysis in pipeline damage assessment”, 14th European Conference on Earthquake Engineering, Republic of Macedonia, (2010).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., and Koc, A. C., “Seismic damage probabilities for segmented buried pipelines”, Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP11), August 1-4, ETH Zurich, Switzerland, (2011).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., ve Koç, A. C. “Boru hasarlarının değerlendirilmesinde kümeleme tekniklerinin kullanımı”, Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 30 Mayıs-3 Haziran, İstanbul, Türkiye, (2011).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., O'Rourke, T. D., Koc, A. C., Hamada, M., Cubrinovski, M., and JEON, S. S., “Pipeline damage assessment using horizontal displacements from Air photo and LiDAR measurements in Avonside area, Christchurch, NZ”, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 25-29 August, Istanbul, (2014).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C., Sarı, M., and Yıldırım, U. S., “Seismic damages in pipelines in the light of preventive maintenance”, 9th World Congress of the European Water Resources Association (EWRA), 10-13 June, Istanbul, Turkey, (2015).
- Koc, A. C., Toprak, S., Yıldırım, U. S., and Nacaroglu, E., “Performance indicators for damaged water distribution systems”, 9th World Congress of the European Water Resources Association (EWRA), 10-13 June, Istanbul, Turkey, (2015).
- Koç, A. C., Toprak, S., Sarı, M., Nacaroglu, E., Yıldırım, Ü. S., ve Helva, V., “Hasar görmüş su dağıtım sistemlerinin performans analizi”, 7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, 13-14 Kasım, Trabzon, Türkiye, (2015).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C., Sarı, M., Yıldırım, Ü.S., ve Helva, V. “Christchurch, Yeni Zelanda depreminin Avonside bölgesindeki gömülü borular üzerine etkisi”, Sekizinci Ulusal

Deprem Mühendisliği Konferansı, Mayıs 11-14, İstanbul, Türkiye, (2015).

- Toprak, S., Nacaroglu, E., and Koc, A. C., “Seismic damage probabilities for segmented buried pipelines in liquefied soils”, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November, New Zealand, (2015).
- Koc, A. C., Yıldırım, U. S., Toprak, S., Sarı, M., Nacaroglu, E., ve Cirmıktılı, O., “Su dağıtım sistemlerinin sağlamlık ve hasar görebilirliğinin graf tabanlı indislerle değerlendirilmesi”, International Symposium of Water and Wastewater Management, 26-28 October, (2016).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., and Koc, A. C., “How important the ground strain and pipeline orientation for the seismic damages”, 4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2-4 June, Near East University, Nicosia, North Cyprus, (2016).
- Koc, A. C., Toprak, S., Demir, U. S, Sari, M., Nacaroglu, E., and Helva, V. “Usage of graf metrics in the design of earthquake resistant water distribution systems”, 16th World Conference on Earthquake, Santiago Chile, January 9th to 13th, (2017).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C., Van Ballegooy, S., Jacka, M., Torvelainen, E., and O’Rourke, T. D., “Pipeline damage predictions in liquefaction zones using LSN”, 16th World Conference on Earthquake, Santiago Chile, January 9th to 13th, (2017).