

Zemin sıvılaşmasına yönelik fotogrametrik uygulamalar

Oktay AKSU*, **Gönül TOZ**

İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Deprem sonrası ortaya çıkan sıvılaşma ve fay hareketlerinin neden olduğu hasarların ve konumsal değişimlerin belirlenmesinde, fotogrametri ve uzaktan algılama veri ve yöntemleri de kullanılmaktadır. Uzaktan algılama görüntüleri ile değişim belirlemede etken faktörler; zamansal, konumsal ve spektral ayırma gücü ile radyometrik çözünürlüktür. Yani, görüntü çiftlerinin yılın aynı zamanlarında, aynı daimi bakış açısıyla, aynı algılayıcı ile aynı çözünürlükte temin edilmiş olması elde edilecek sonuçların güvenilirlik düzeyini etkileyen konulardır. Bu çalışmada; 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen depremden sonra, Sapanca Bölgesinde oluşan konumsal değişikliklerin ve Gölçük Bölgesinde çöken binaların, hava fotoğrafları ve Landsat 7 uydu görüntülerinden belirlenmesi hedef alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotogrametri, sıvılaşma, uydu görüntüsü.

Determination of spatial changes caused by liquefaction and fault movements by means of photogrammetric methods.

Abstract

Liquefaction is a process by which sediments below the water table temporarily lose strength and bearing because of rapidly applied loading and behave as a viscous liquid rather than a solid. The actions in the soil which produce liquefaction are seismic waves and primarily shear waves. Liquefaction occurs in saturated soils, that is, soils in which the space between individual particles are completely filled with water. Damages and three dimensional changes on the ground and structure which are caused by liquefaction and fault movements after an earthquake can be determined by using photogrammetry and remote sensing data and methods. Temporal, spatial and spectral resolutions are the effective factors to change detection by means of remote sensing imagery. That means, reliability of the obtained results are directly effected by the image pairs which are preferred to be taken by the same instantaneous field of view, the same sensor, same resolution and the same time of the year. In this study, it is aimed to determine using aerial photographs and Landsat-7 satellite images the spatial changes (displacements) in the area of the lake Sapanca and also the buildings collapsed due to the earthquake of 17 August 1999.

Keywords: Photogrammetry, liquefaction, satellite image.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Oktay AKSU. oaksu@hgk.mil.tr; Tel: (312) 595 22 75.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış "Zemin sıvılaşması ve fay hareketleri nedeniyle oluşan konum değişikliklerinin fotogrametrik yöntemlerle belirlenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 17.05.2002 tarihinde dergiye ulaşılmış, 24.09.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 28.02.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Zemin sıvılaşması; bir toprağın dayanıklılığının ve katılığının, deprem veya diğer ani yüklenmeler ile azaldığı bir oluşumdur. Diğer bir deyişle, belirli bir miktar suyun altında kalan toprak tortusunun, maruz kaldığı ani dış basıncın etkisiyle yükselmesi ve zeminin geçici olarak yapışkan bir sıvı gibi görüntü sergilemesi, gücünü kaybetmesi işlemdir (Youd, 1992).

Sıvılaşma durumunda, toprağın yapısı küçük bir kırıcı dirençle bozulabilir ve ortaya çıkan deformasyonlar, binaları veya diğer yapıları hasara uğratacak kadar büyük olabilir. Bu tür zeminler bozuk (gevşek) zemin olarak adlandırılır. Sıvılaşmaya neden olabilecek bir gevşeme, esas olarak toprağın gözenekliliğine, partiküller arasındaki kil veya diğer tutucu parçacık miktarına ve su boşaltma (akıtma) konusundaki kısıtlamalara bağlıdır. Bir sıvılaşmayı takiben toprakta oluşacak deformasyonun miktarı, materyalin gevşekliğine, derinliğine, kalınlığına ve sıvılaşan tabakanın zeminde kapsadığı alana, zeminin eğimine, bina ve diğer yapılar nedeniyle toprağa uygulanan yükün dağılımına bağlıdır (Cal.Div.of Mines, 1992). Toprakta sıvılaşmaya neden olan hareketler, sismik dalgalar ve özellikle de makaslama dalgalarıdır. Nemli topraklarda yani, toprak partiküllerinin arasının su ile dolu olduğu arazi kesimlerinde ortaya çıkan bir olaydır (Youd, 1992).

Sıvılaşma etkisi altındaki çevre, yalnızca bu oluşum nedeniyle tahrip edici veya tehlike yaratıcı bir durum çıkarmaz. Bu etkiyle birlikte, zeminde yer değişikliğine neden olabilecek bir başka olay da söz konusu olursa, o zaman yapılar üzerinde tahrip edici, yıkıcı bir etki yapması mümkün olur. Mühendislik uygulamaları amacıyla öncelikle dikkate alınması gereken, sıvılaşmanın mevcudiyeti değil onun tahrip kapasitesi veya şiddetidir. Sıvılaşmanın zıt etkileri bir çok biçimde ortaya çıkabilir. Bunlar; toprak kayması, yanal atımlar, zemin titreşimleri (sallantılar), mukavemetin kaybolması, oturma ve yanal basınç artmasıdır.

Ülkemiz 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 tarihlerinde iki büyük depremle sarsılmış, 20000 dolayında can kaybı, bunun iki katı yaralanma ve

100000'e yakın binada hasar oluşmuştur. Bunların yanı sıra, depremi takip eden ilk birkaç gün içerisinde, tüm kurum ve kuruluşları ile bu konuda ne denli hazırlıksız bir ülke olduğumuz da ortaya çıkmıştır. Bu noktada önemli eksikliklerden birisi de, depremden etkilenen ve yoğun hasarların olduğu bölgelerin ivedilikle belirlenmesi, kriz merkezlerine gerekli bilgi akışının sağlanması konusunda görülmüştür.

Fotogrametri ve uzaktan algılama bilimi ve teknolojisinin son yıllarda eriştiği düzey, tematik doğruluğu yüksek olan verilerin ivedilikle elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, bu verilerin yine uzun vadeli fotogrametrik çalışmalar ile konumsal doğruluğunu da iyileştirmek mümkündür. Orta ve küçük ölçekli topoğrafik harita üretiminde tüm dünyada yaygın olarak kullanılan uydu görüntülerinin yanı sıra, son yıllarda hızlı ve güvenilir sayısal arazi modelleri temininde etkin olarak kullanılmaya başlanan lazer tarama ve interferometrik SAR verileri, klasik kullanım alanlarının dışında farklı amaçlarla da dikkate alınması gereken veri kaynakları olarak görülmektedir.

Bu çalışmada, zemin sıvılaşması ve fay hareketleri nedeniyle ortaya çıkan konum değişikliklerinin ve bina hasarlarının belirlenmesinde hava fotoğrafları ve uydu görüntüleri ile fotogrametri ve uzaktan algılama yöntemlerinin kullanılabilirliği ve güvenirlilik düzeyi araştırılmıştır.

Sapanca Gölü çevresinde sıvılaşma ve faylanmanın hava fotoğrafları ile belirlenmesi

17 Ağustos 1999 tarihli Marmara Depremini takiben, Harita Genel Komutanlığınca bölgede jeodezik ölçüm faaliyetleri başlatılmış ve 8 Eylül 1999 tarihinde Avcılar, Çınarcık, Körfez, Adapazarı, Düzce bölgelerini kapsayacak şekilde 1:16000 ölçekli siyah-beyaz hava fotoğrafları çekilmiştir. Zemin sıvılaşmasının tespitine yönelik çalışmalarda ideal durum; deprem öncesi ve sonrasına ait mümkün olduğunca büyük (1:5000, 1:10000 gibi) ölçekli hava fotoğraflarının mevcut olmasıdır. Ancak, Harita Genel Komutanlığı arşivlerinde mevcut olan Körfez bölgesinin 1970'li yıllarda alınmış hava fotoğraflarında, nirengi noktaları mevcut olmadığı için ideal duruma uymamasına rağmen, 1994 tarihli

1:35.000 ölçekli hava fotoğrafları kullanılmıştır. Resim ölçeğinin küçük olması zayıf taraf gibi görülmekle birlikte, bölgedeki yapılaşma ve detay değişim yoğunluğu dikkate alındığında, deprem öncesi ve sonrası hava fotoğraflarının mümkün olduğunca birbirine yakın tarihli olması, özellikle tercih edilen bir konudur.

Depremden sonra çekilen hava fotoğrafları (yaklaşık 2000 adet) 21 µm piksel boyutlarıyla taranmış ve 100-200 resimlik bloklar halinde, dijital fotogrametrik nirengi ölçüm ve dengeleme işlemlerinin takibinde, 860 adet 1:5000 ölçekli sayısal ortofoto harita üretimi gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, mevcut resimlerin tamamının dış yöneltme parametreleri belirlenmiş durumdadır. Benzer şekilde, 1994 yılı 1:35000 ölçekli hava fotoğrafları da analitik fotogrametrik nirengi işlemine tabi tutularak 1:25000 ölçekli haritaların revizyonu amacıyla kullanıldığı için, model ve kolon bağlama noktalarının dengelenmiş koordinatları mevcuttur.

Bu çalışma kapsamında, deprem öncesi ve sonrası resimlerde, mümkün olduğunca çok sayıda ve resim üzerinde her yöne dağılmış olmak üzere ortak noktalar seçilmiştir. Bu noktaların yol kavşağı, köprü, bina vb. detaylar üzerinde ve yapay değişime uğramayacak şekilde olmasına özen gösterilmiştir.

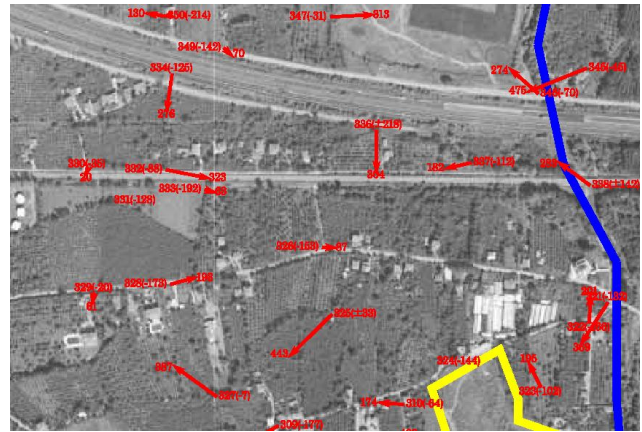
Sapanca Gölü kuzeyi (Eşme Bölgesi)'ni içeren modelde 302 adet noktada X, Y, Z koordinatları ölçülmüş ve bunlardan yararlanarak hareket vektörleri elde edilmiştir (Şekil 1). Bu bölgedeki hareketin ağırlıklı olarak doğu ve güneydoğu yönünde olduğu belirlenmiştir. Bu belirleme ve gölün kuzey kesiminde sıvılaşmanın gelişmediği dikkate alındığında, vektörlerin esas olarak faylanmaya bağlı hareketle uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır (Ulusay, 2002). Elde edilen sonuçlar; X yönünde 2.35 m, Y yönünde -0.43 m ve Z yönünde ise 0.62 m'lik yer değiştirmelere işaret etmektedir.

Sapanca Gölü sol köşesini (Şekil 2) içeren bölgede 423 adet noktada koordinat ölçümleri yapılmış ve elde edilen hareket vektörlerinin belirli bir yönde kümelenme göstermekten çok, tek düze olmayan bir hareket sergilediği görül-

müştür. Bu bölgenin kuzey kısmında, Eşme'de görülen hareket ile benzer karakter taşıyan bir hareket tespit edilmiştir. Güney kısmında ise; ölçü yapılan bölgeden fayın geçmesi ve zemin özelliklerinin değişken olması nedeniyle, her yönde dağınık hareketler gözlenmiştir. Yer değiştirme miktarları; X yönünde 0.65 m, Y yönünde 0.25 m ve Z yönünde 0.62 m'dir.



Şekil 1. Eşme Bölgesi hareket vektörleri



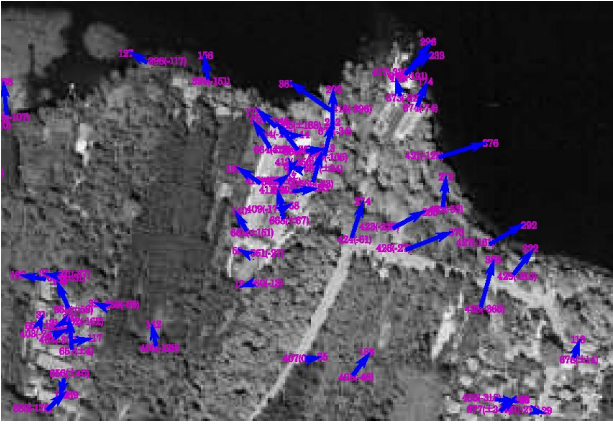
Şekil 2. Sapanca Gölü batısı hareket vektörleri

Sapanca Oteli bölgesinde ise, 418 adet noktada koordinat ölçümü yapılmış ve elde edilen hareket vektörlerinin bölgede yaygın olarak gözlenen sıvılaşma ve sıvılaşmanın göstergesi olabilecek diğer kanıtlar nedeniyle kuzeye, yani göle doğru olduğu gözlenmiştir (Şekil 3). Bölgede ortalama yer değiştirme miktarı; X yönünde 0.42 m, Y yönünde 0.84 m ve Z yönünde ise -1.70 m'dir.

Çöken binaların belirlenmesi

Sayısal fotogrametrik değerlendirme sistemlerinin çoğunda mevcut olan otomatik sayısal yükseklik modeli (SYM) oluşturma modülleri, otomatik

korelasyon yöntemleri kullanmaktadır. Otomatik görüntü korelasyonu, stereo çift oluşturan boyuna bindirmeli iki görüntünün aynı anda dijital analizine dayalıdır. İşlem; kamera (ya da algılayıcı) konum bilgilerini kullanarak, iki resmin orta noktaları ile izdüşüm merkezini içine alan epipolar düzlemin hesaplanmasıyla başlar. Sonra görüntü çiftinin bir resmi, epipolar düzlem içerisinde herhangi bir referans noktaya göre epipolar doğrular boyunca korelasyon işlemi ile örneklenir ve en iyi karşılık gelen nokta bulunur. Korelasyon sonuçları kontrol edilir ve yumuşatma yöntemleriyle düzeltilir, eğer sonuçlar yetersiz ise, işlemler iterasyonlar halinde devam eder. Son adımda, yükseklikler harita geometrisine göre hesaplanır.

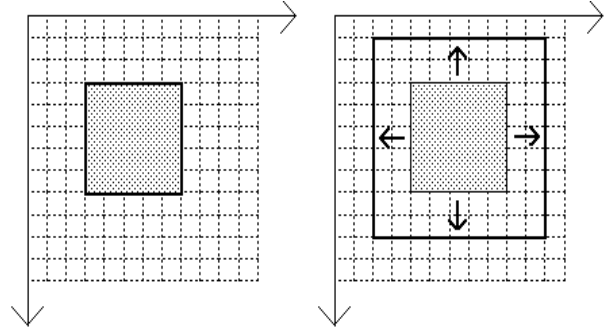


Şekil 3. Sapanca Oteli bölgesi hareket vektörleri

Otomatik SYM oluşturmanın doğruluğuna etki eden en temel ve önemli faktörlerden birisi, kullanılan görüntü eşleme teknikleridir. Alana bağlı ve detaya bağlı eşleme tekniklerinde en çok kullanılan yaklaşımlar, çapraz korelasyon ve en küçük kareler eşleme yöntemleridir.

Şekil 4'te tipik bir çapraz korelasyon işlemi; sol resimde küçük bir kalıp penceresi (a) ve buna karşılık gelen daha büyük bir araştırma penceresi (b) yer almaktadır.

SYM oluşturma işlemi, Vision Softplotter dijital fotogrametrik çalışma istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Block Tool modülü ile fotogrametrik nirengi sonuçları (yönelme dosyası) sisteme dahil edilmiş ve resimlerin iç yönelmeleri yapılmıştır.



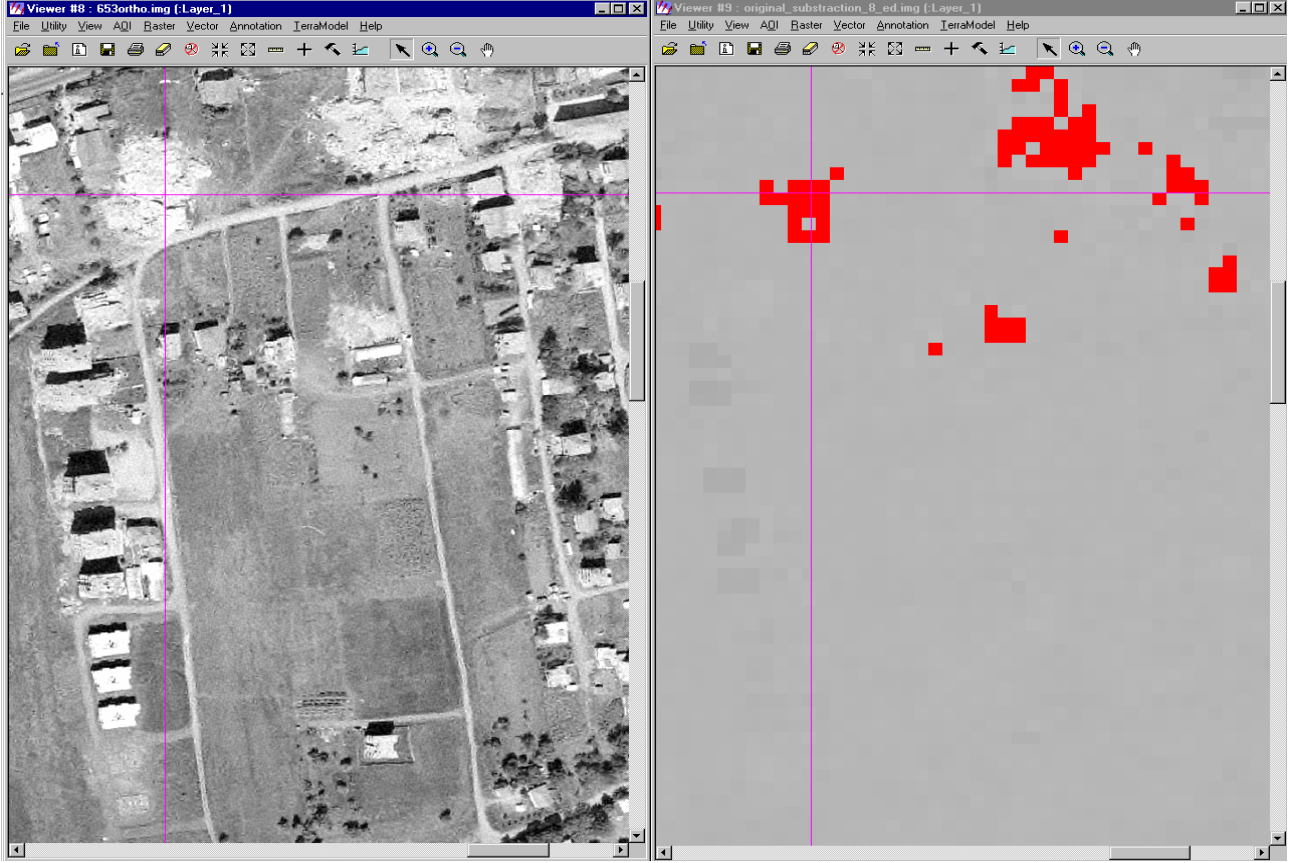
Şekil 4. Çapraz korelasyon ile piksel eşleme

DEM Tool ile; kullanıcı tarafından tanımlanan arazi uzaklık matrisine uygun olarak, sayısal yükseklikler otomatik olarak toplanmıştır. 8 m grid aralığı kullanılmış ve stereoskopik görüntü üzerine yansıtılan SYM, operatör tarafından kontrol edilerek interaktif biçimde düzeltilmiştir. Tüm alan için yeterli doğrulukta korelasyon sağlanmadığı için, SYM içinde oluşan boşluklar manuel olarak doldurulmuştur.

Deprem öncesi ve sonrası görüntülerden elde edilen SYM'ler birbirinden çıkartılmış ve deprem nedeniyle oluşan yükseklik değişimleri belirlenmiştir (Şekil 5). Sonuç, tematik bir katman halinde her bir pikselin yükseklik farkını göstermektedir. Düzenleme işlemi uygulanan SYM'leri ile doğruluğu daha yüksek sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Eğer daha büyük ölçekli hava fotoğrafları kullanma imkanı olursa, yıkılan veya çöken binaların tamamına yakın kısmının bu yöntem ile belirlenmesi olasıdır.

Landsat uydu görüntüleri kullanılarak depremden zarar gören alanların belirlenmesi
Önceki bölümlerde anlatılan uygulamalar, küçük alanları etkileyen depremlerin yol açtığı zararları ve konum değişimlerini tespit etmek için daha uygun olmasına karşın, Marmara Depremi gibi çok büyük alanları etkisi altına alan depremlerin sonuçlarını incelemek, hızlı ve güvenilir bir biçimde bilgi temin etmek için, uzaktan algılama verilerini kullanmak uygun çözüm yolu olarak görülmektedir.

Bu çalışmada Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) uydu görüntüleri kullanılarak bölgesel hasarlar ve deniz altında kalan alanlar tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5. Editlenmiş SYM farkları ile elde edilen değişimler

Landsat 7 uydusu 1999 yılı Nisan ayında yörüngeye yerleştirilmiş olup, pankromatik modda 15 m, multispektral modda 30 m ayırma gücüne sahip görüntüler sağlamaktadır.

Landsat 4 ve 5 verilerinden farklı olarak; iki yeni görüntüleme aralığı mevcuttur ve 60 m çözünürlüklü termal bandı ile radyometrik kalibrasyon doğruluğunu sağlamak üzere, iki güneş kalibre edici düzeneği eklenmiş durumdadır. Bu çalışmada, deprem bölgesinin önemli bir bölümünü kapsayan ve depremden bir hafta önce (10.08.1999) ile birkaç saat sonra (17.08.1999) alınmış Landsat uydu görüntüleri kullanılmıştır. Görüntülerin ortorektifikasyon işlemi ve elde edilen değişimlerin kontrolünde, 8 Eylül 1999 tarihinde çekilen 1/16000 ölçekli hava fotoğrafları ve bunlardan üretilen TIN (triangulated irregular network-düzensiz yapıdaki üçgensel ağ) kullanılmıştır. Ortorektifikasyon işlemi, Erdas Imagine 8.4 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle Landsat görüntüleri Erdas Imagine formatına dönüştürülmüştür. Ortofoto harita üzerinden

birinci görüntüde 8 adet, ikinci görüntüde 10 adet uygun dağılımlı yer kontrol noktası seçilmiştir. Sonraki adımda, iki farklı yaklaşım kullanılarak değişiklik tespiti yapılmıştır.

Landsat'ın 30 m. çözünürlüklü altı spektral bandı elektromanyetik spektrumda oldukça geniş bir aralığa sahiptir. İlk olarak, bu altı band üzerinde asal bileşen analizi yapılmış ve tek bir asal bileşene dönüştürülmüştür. Sonuç ürün bütün bandlardaki bilgilerin büyük kısmını içermektedir.

Otomatik değişiklik tespiti, farklı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler; bir noktanın iki farklı tarihli görüntüde sahip olduğu gri değerleri arasındaki farkın oranı olup, yüzde olarak ifade edilmektedir. Bu parametrenin küçük tutulması (%5, %10), düşük doğrulukta çok detaylı değişiklik bilgisi için uygundur. Küçük yüzdeli değişimler; iki görüntünün alımındaki atmosferik koşulları ve güneş ışınlarının yer yüzeyine değişik açılardan gelmesi gibi nedenlerden dolayı oluşabilmektedir. Yüksek

oranlar (% 25, % 35 gibi) yüksek doğrulukta bilgi vermesine karşın, arazide oluşan değişimlerin önemli bir bölümü tespit edilememektedir. Deneysel uygulamalar sonucu % 15 oranının kullanımı uygun bulunmuştur. Şekil 6'da gösterilen sonuçlar, söz konusu bölgenin 1:16000 ölçekli hava fotoğraflarından üretilen ortofoto haritalar ile karşılaştırıldığında; yoğun bina hasarlarının olduğu yerler ile deniz altında kalan alanların doğru tespit edildiği görülmektedir.



Şekil 6. Asal bileşen analizi ile multispektral modda tespit edilen çöküntü ve hasar alanları

İkinci uygulamada pankromatik band kullanılmıştır. Bu band için % 10 değeri seçilmiş ve elde edilen sonuçlar, önceki uygulama ile karşılaştırıldığında, tespit edilen değişimlerin hemen hemen aynı olduğu görülmüştür (Şekil 7).



Şekil 7. Pankromatik modda tespit edilen çöküntü ve hasar alanları

Sonuçlar

Ülkemiz tarih boyunca deprem ile sarsılmış, büyük boyutlarda can kayıplarına ve maddi hasarlara uğramıştır. Diğer taraftan, mevcut fay hatları ve tektonik yapı nedeniyle, potansiyel risk devam etmektedir.

17 Ağustos 1999 tarihli deprem, etki alanı ve depremin boyutları hakkında hızlı ve güvenilir bilgi ihtiyacının, ne denli önemli olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda, en hızlı bir biçimde temin edilebilecek veri kaynaklarından birisi, uygun ölçekte çekilmiş hava fotoğraflarıdır.

Hava fotoğrafları, özellikle dar kapsamlı deprem etki alanlarında detaylı analiz çalışmalarında kullanılabilmesi gibi, geniş kapsamlı etki alanlarında üretilecek ortofoto haritalar yardımıyla, yeniden yapılanma çalışmaları için de güvenilir bir bilgi kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Sıvılaşma alanlarının ve faylanma nedeniyle oluşan konumsal değişimlerin fotogrametrik yöntemler ile belirlenmesi için, deprem öncesi ve sonrası tarihlerde çekilmiş 1/5000-1/16000 ölçekli hava fotoğraflarının mevcudiyeti esas unsurdur. Bu çalışma sırasında görüldüğü üzere, Marmara Bölgesinde depremden kısa zaman sonra jeodezik ölçüm faaliyetleri tamamlandıktan sonra çekilmiş 1/16.000 ölçekli hava fotoğrafları bulunmasına karşın, eşidi ölçekte ve mümkün olduğunca depremden kısa süre önce çekilmiş, nirengi noktaları içeren hava fotoğrafları mevcut değildir. Bu nedenle, ideal duruma uymasına rağmen, nirengi noktaları içermesi ve yakın tarihli olması nedeniyle, 1994 yılı çekimi 1/35000 ölçekli hava fotoğrafları kullanılmıştır.

Depreme yönelik bilimsel ve araştırma faaliyetlerini yürüten kurum ve kuruluşlar ile üniversitelerin, gerilimin arttığı fay hatları ve sıvılaşma alanları üzerinde uygun ölçekte hava fotoğrafı alımı konusunu göz ardı etmemeleri, kaynak ayırmaları ve Harita Genel Komutanlığı ile Tapu Kadastro Genel Müdürlüğünü kanalize ederek katkılarını beklemeleri, gelecekteki çalışmalar için önemli yararlar sağlayacaktır.

Diğer taraftan, söz konusu amaçlar için özellikle daha dar etki alanlarında, hava fotoğraflarından

daha hızlı bir şekilde güvenilir bilgi sağlayan lazer tarayıcılar; ülkemizde henüz mevcut olmaması ve tesis maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, gelecekte kullanılmak üzere gelişmeleri yakından takip edilmesi gereken sistemlerdir.

Marmara Depremi gibi çok geniş alanları etkisi altına alan depremlerde, Landsat uydu görüntüleri uygun bir veri kaynağı olarak gerek yurtdışında (Matsuoka v. diğ., 2000), gerekse son zamanlarda ülkemizde (Barka v. diğ., 2000) kullanılmaktadır. Bu noktada doğruluğu ve güvenilirliği etkileyen unsurlar; değişim belirlemede kullanılacak olan görüntülerin yakın tarihli veya yılın aynı zamanlarında alınmış, aynı bakış açısıyla ve aynı ayırma gücü ile veri toplayan algılayıcı görüntüler olmalarıdır. Tez çalışmasında kullanılan Landsat 7 görüntülerinin bir hafta aralıklı olması ve ortorektifikasyon için uygun verilerin varlığı, alınan sonuçların doğruluğunu olumlu yönde etkilemiştir.

Jeoloji, jeo-fizik, jeodezi, sismoloji gibi farklı disiplinlerin ilgi alanı içerisinde yer alan deprem

araştırmalarında başarı grafiğini yükseltmek için, fotogrametri ve uzaktan algılama da göz ardı edilmeden ekip anlayışı içerisinde çalışılması gerekli görülmektedir.

Kaynaklar

- Barka A., v. diğ., eds (2000). *The 1999 İzmit and Düzce Earthquakes: Preliminary Results*, İTÜ.
- California Division of Mines and Geology (CDMG), (1992). *Draft GuideLines; Liquefaction Hazard Zones*, Sacramento, California.
- Matsuoka M., Yamazaki F., (2000). Digital Damage Detection Due to the 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, *Bulletin of ERSR*, 34, pp.55-66, University of Tokyo.
- Ulusay R., (2002). Kişisel Görüşme.
- Youd, T. L., (1993). Liquefaction, Ground Failure, and Con-sequent Damage During the 22 April 1991 Costa Rica Earthquake, *Proceedings of the NSF/UCR U.S. Costa Rica Workshop on the Costa Rica Earthquakes of 1990-1991*, April 2-4, 1992, Effects on Soils and Structures, ERI Publication No 93-A, pp.73-95 Oakland, California.