

## Uydu ve yersel veri entegrasyonu ile deprem sonrası arazi örtüsü/kullanımı analizi

**Cihangir AYDÖNER\***, Derya MAKTAV

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

### Özet

17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen depremin Kocaeli ili arazi örtüsü/arazi kullanımında yarattığı etkiler, farklı spektral ve mekânsal çözebilirlikli (NOAA, ERS, LANDSAT, SPOT, IRS) uydu verilerinin ve yersel verilerin (jeoloji, yükseklik, toprak vb.) entegrasyonu ile analiz edilmiştir. İlk aşamada, uydu verilerinin analizi ile, yer kabuğu deformasyonları, deprem öncesi ve sonrasında termal anomaliler, şehir dokusu ve kıyı çizgisindeki değişimler analiz edilmiştir. İkinci aşamada ise, Kocaeli ilindeki jeolojik formasyonlar, deformasyonlar, toprak sınıfları, eğim, ana ulaşım ağı ve yerleşim durumu dikkate alınarak çok kriterli değerlendirme yöntemi ile yerleşime uygunluk analizi yapılmış ve sonuçlar uydu verilerinden üretilen bilgiler ile yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Deprem, SAR interferometre, arazi örtüsü/arazi kullanımı, uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemi, çok kriterli değerlendirme yöntemi.

### Land cover/land use analysis after an earthquake through integration of satellite and ground data

#### Abstract

The adverse effects of the earthquake of August 17, 1999 on the land use/land cover of the Kocaeli Province were analyzed through integration of (NOAA, ERS, LANDSAT, SPOT, IRS) satellite data of varying spectral and spatial resolutions with ground data (geology, elevation, soil etc.). This study was carried out in two main stages. The first stage consisted of studies on the earth crust deformation, thermal abnormalities occurring before and after the earthquake, damages in the urban texture and changes in the coastline through analysis of satellite data before and after the earthquake. Earth crust deformations resulting after the earthquake were mapped by ERS-SAR data using SAR interferometry. NOAA-AVHRR satellite data acquired just before and after the earthquake were used to generate temperature maps of the sea and land surface to investigate the abnormalities before the earthquake. Damages in the urban centers and the coastline were assessed by analysis of SPOT and LANDSAT images. IRS data is used for the current land use/land cover map of the entire province. The second stage involved settlement suitability analysis by multi criteria evaluation methodology taking into account of the geologic formations of the Kocaeli Province, land cover, soil classes, slope, main transportation network and urbanization status and the results obtained were interpreted by the information generated through satellite images.

**Keywords:** Earthquake, SAR interferometry, land cover/land use, remote sensing, geographical information system, multi-criteria evaluation method.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Cihangir AYDÖNER. Cihangir.Aydoner@mam.gov.tr; Tel: (262) 641 23 00/4357.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Deprem sonrasında uydu verileri ve yersel veri entegrasyonu ile arazi örtüsü/arazi kullanımı analizi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 14.07.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 09.08.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen 7.4 büyüklüğündeki Marmara depremi yüksek oranda can kaybı ve bina hasarlarına neden olmuştur. Sadece Kocaeli İli'nde 8511 kişi hayatını kaybetmiş, 9213 kişi ise yaralanmıştır (DPT, 1999). Çok sayıda bina tamamen yıkılmış veya ağır hasar görmüştür.

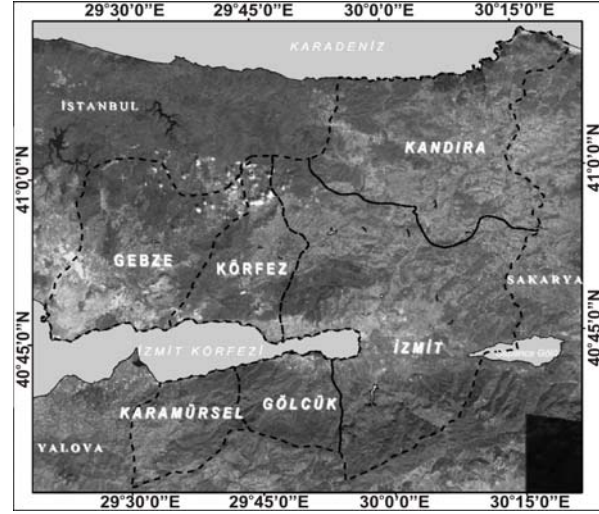
Her ne kadar Türkiye'de deprem sorununa ilişkin çeşitli alanlarda yürütülen araştırmalar 1999'dan sonra artış göstermişse de, bu araştırmaların yeterli düzeyde olduğu söylenemez. Oysa, bu konuda alınacak kararların ve izlenecek politikaların geniş araştırma bulgularına dayandırılması ve bilimsel tartışmalara konu edilmesi önem taşımaktadır. Dolayısı ile yıkıcı depremler sonrasında, arazide meydana gelebilecek değişimleri bilimsel yöntemlerle analiz edip bilgiler çıkarmak, bu bilgileri kullanarak doğru önlemleri almak ve yerleşime uygun olabilecek yeni yerleri belirlemek, hem afetler ile mücadelede, hem de olabilecek depremlere hazırlık açısından önemli bir gereksinimdir.

Bu çalışmada 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen depremin Kocaeli ili arazi örtüsü/arazi kullanımında yarattığı etkilerin, farklı spektral ve mekansal çözebilirliklere sahip (NOAA, ERS, LANDSAT, SPOT, IRS) uydu verileri ile değerlendirilmesinden sonra, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ortamında hazırlanan jeoloji, yükseklik, toprak vb. yersel verilerin entegrasyonu ile, çeşitli meslek gruplarına ait araştırma yöntemleri de kullanılarak, yerleşime uygunluk analizleri yapılmıştır.

## Çalışma alanı

17 Ağustos 1999 Marmara depreminde büyük kayıplar veren Kocaeli İli çalışma alanı olarak seçilmiştir. İleri düzeyde sanayi ve endüstri kenti olan Kocaeli, Türkiye'nin en gelişmiş karayolu ve demiryolu ağına sahiptir. Bunun yanısıra Derince ve Kocaeli limanlarıyla da dünyanın dört bir yanına deniz yolu ile bağlanmıştır. Yüzölçümü açısından küçük bir il olan Kocaeli, gerek sanayi sektöründeki üretim, katmadeğer, gerekse bu sektörde çalışan insan açısından bü-

yük öneme sahiptir. İl ve ilçe sınırları ile Kocaeli ili uydu görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kocaeli İli ve ilçelerinin IRS uydu görüntüsü

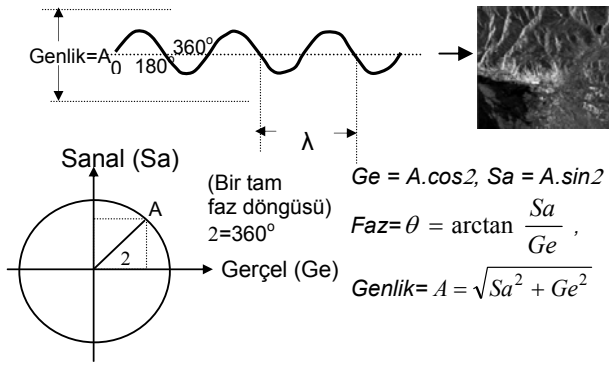
## ERS SAR verileri ile yerkabuğu deformasyonunun haritalanması İnterferometrik SAR (InSAR) tekniği

Kompleks radar sinyallerinin faz bileşenlerinin InSAR tekniğine uygun olarak analiz edilmesi sonucunda yeryüzünün 3 boyutlu bilgilerine ulaşılabileceği konusu 1960'lı yıllara dayanmaktadır. 1986 yılına kadar süren teorik çalışmalardan sonra Zebker ve Goldstein tarafından Jet Propulsion Laboratory (JPL)'de uygulamalı InSAR çalışmaları yapılmıştır. Uydulara yerleştirilen SAR sistemleri ile görüntülerin elde edilmesi, InSAR tekniğinin daha yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Dünyada yeni gelişen bu tekniğin ülkemizdeki kullanımı ise yok denecek kadar azdır.

InSAR tekniğinin teorisi ve uygulamaları hakkında detaylı bilgilere Gens ve Genderen (1996), Massonnet ve Feigl (1998), Madsen vd. (1993), Rosen vd. (2000)'den, ulaşılabılır. Aşağıda sadece InSAR tekniği ile yeryüzü deformasyonlarının ve topoğrafyasının haritalanması konusunda bazı temel bilgiler özetlenmiştir.

SAR algılama sistemleri, göndermiş olduğu elektromanyetik sinyalin hem geri yansıyan

kısımının şiddetini, hem de sinyaldeki gecikme zamanlarını kaydeder. Sinüs dalgası şeklinde olan elektromanyetik sinyalin taşımış olduğu genlik ve faz bilgisi Şekil 2’de gösterilmiştir. Genlik bilgisi kullanılarak gri değerlere sahip raster nitelikteki klasik radar görüntüsü oluşturulur. Açısal olarak ifade edilen ve tek başına bir anlam taşımayan faz açısı  $360^\circ$ ’ye ulaştığında bir tam faz oluşur. InSAR, kompleks radar sinyallerini kullandığı için, temin edilen ham SAR verilerinin kompleks olarak ifade edilmesi gerekir (Şekil 2).



Şekil 2. Elektromanyetik sinyal özellikleri

Aynı bölgenin iki farklı noktadan alınmış SAR verilerinin faz bilgilerini kullanarak o bölgedeki yükseklik modeli veya meydana gelen deformasyonlar ölçülebilir (Şekil 3).

Kosinüs teoreminden,

$$(\rho + \delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 - 2\rho B \cos(\theta + 90 - \alpha) \quad (1)$$

$$(\rho + \delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 + 2\rho B \sin(\alpha - \theta) \quad (2)$$

yazılabilir. Buradan,

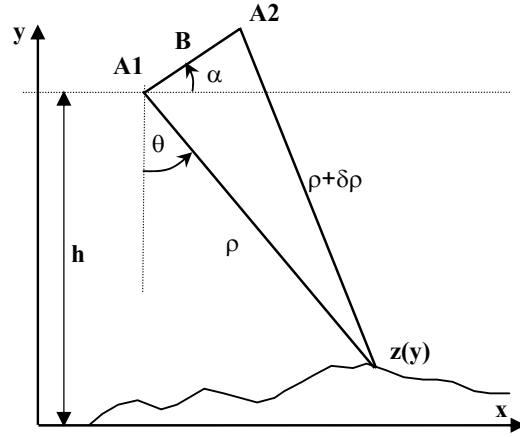
$$\sin(\alpha - \theta) = \frac{[(\rho + \delta\rho)^2 - \rho^2 - B^2]}{2\rho B} \quad (3)$$

elde edilir. A2 noktasında üretilen kompleks SAR verisinin A1 noktasındaki kompleks SAR verisine çakıştırılması ve her iki kompleks verinin çarpımı sonucu elde edilen  $\phi = \phi_1 - \phi_2$  faz farkı görüntüsü (interferogram), bağlı deformasyo-

nun bir ölçüsüdür. Dolayısıyla, iki görüntüdeki faz farkı  $\phi$  kullanılarak,

$$\delta\rho = \frac{\lambda\phi}{4\pi} \quad (4)$$

hesaplanır.



Şekil 3. İnterferometrik SAR (InSAR) geometrisi.

Sonuçta noktaya ait yükseklik değeri,

$$z(y) = h - \frac{\left[ \left( \frac{\lambda\phi}{4\pi} \right)^2 - B^2 \right] \cos\theta}{2B \sin(\alpha - \theta) - 2 \left( \frac{\lambda\theta}{4\pi} \right)} \quad (5)$$

formülü ile hesaplanabilir. Buradaki h, uydunun yüksekliği, B, baz hattı uzunluğudur.

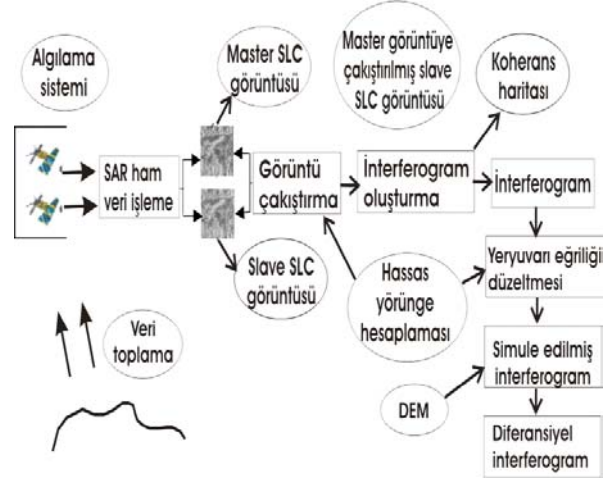
Şekil 3’teki geometriden InSAR tekniği ile dijital yükseklik modeli oluşturulabilir. Ancak, özellikle deprem sonrası oluşan yer kabuğu hareketlerinin saptanmasında diferansiyel interferometri adı verilen InSAR tekniğinden yararlanır. Burada deprem öncesi ve deprem sonrası topoğrafyayı temsil eden iki farklı interferogram üretilir. Üretilen bu interferogramların birbirlerinden çıkarılması sonucu elde edilen fark interferogram görüntüsü deprem sonrası oluşan deformasyona karşılık gelir. Diferansiyel interferometri için en fazla kullanılan iki yöntem aşağıda verilmiştir:

-Üç geçiş veya çifte fark yöntemi ile diferansiyel interferometri: Burada farklı zamanlarda alınmış üç SAR görüntüsü kullanılır. Birinci ve ikinci görüntü kullanılarak üretilen interferogram görüntüsünün, ikinci ve üçüncü görüntü kullanılarak üretilen interferogram görüntüsünden çıkarılmasıyla gerçekleştirilir. Elde edilen sonuç görüntüye çifte fark interferogram (double-difference interferogram) adı verilir.

-İki geçiş ve DEM yöntemi ile diferansiyel interferometri: Burada ise farklı zamanlarda alınmış sadece iki SAR görüntüsü kullanılır ve tek bir interferogram üretilir. Farkın alınacağı ikinci interferogram ise, DEM (Digital Elevation Model) ve görüntünün alındığı anda hassas olarak hesaplanmış uydu konum bilgisi kullanılarak yapay olarak üretilir. Üretilen bu interferogramdan SAR görüntülerinden üretilen interferogramın çıkarılması ile oluşan interferogram görüntüsünden deformasyon bilgisine ulaşılabilir.

Diferansiyel interferometri sonucunda elde edilen interferogram görüntüsündeki örgeler (fringe), kullanılan dalga boyuna bağlı olarak yeryüzündeki deformasyon miktarını belirtir. Burada sinyalin uydudan-noktaya ve noktadan-uyduya olan iki yönlü hareketinden dolayı görünen deformasyon, gerçek deformasyonun iki katıdır. Bu nedenle dalga boyunun biriminde olan deformasyonun ikiye bölünmesi gerekir. Yani ERS verisi için tek bir öрге  $56/2=28\text{mm}$ 'lik bir deformasyona karşılık gelir.

InSAR verilerinin işlenmesi sürecinde Şekil 4'te belirtilen adımlar söz konusudur. Şekil 4 incelendiğinde, öncelikle ham olarak uydulardan elde edilen master (birinci) ve slave (ikinci) görüntülerde kayıtlı bulunan faz bilgileri korunarak, SLC formatındaki SAR verileri oluşturulur. Daha sonra slave SLC görüntü master SLC görüntüye göre düzeltilerek çakıştırma işlemi yapılır. Çakıştırma işleminden sonra slave görüntünün kompleks SAR değerleri ile master görüntünün kompleks eşleniği çarpılarak interferogram oluşturulur. Çarpma işlemi sonunda her bir piksel için ortalama genlik değeri ve faz farkı bilgileri elde edilir.



Şekil 4. InSAR veri işleme adımları

InSAR tekniği için uygun olan veri çiftleri, aynı bölgenin farklı zamanlarda çekilen verileri arasındaki dikey baz uzunluk değerleri hesaplanarak belirlenir. Baz uzunluk değerlerine göre ERS-1 SAR verilerinin hangi uygulamalarda kullanılacağı Tablo 1'de belirtilmiştir (Gens, 1998).

Tablo 1. ERS-1 için uygulama bazında önerilen baz uzunlukları

Uygulamalar	Baz uzunluğu
SAR interferometri	$< B \perp < 600 \text{ m}$
Dijital arazi modeli	$150 \text{ m} < B \perp < 300 \text{ m}$
Yüzey değişimlerinin belirlenmesi	$30 \text{ m} < B \perp < 70 \text{ m}$
Yüzeydeki cisim hareketleri	$< B \perp < 5 \text{ m}$

SAR verilerinde baz uzunluk değerlerinin artması korelasyonun azalmasına neden olur. Baz uzunluğu kritik değerine ulaştığında veri çifti arasındaki korelasyon tamamen kaybolur. Uygulamalar açısından önemli olan kritik baz uzunluk değeri aşağıdaki formül ile hesaplanabilir (Gens, 1998).

$$B_c = \frac{\lambda r}{2 R_y \cos^2 \theta} \quad (6)$$

Burada,

$Bc$	:	Kritik baz uzunluğu
$\lambda$	:	Dalga boyu
$r$	:	Uzaklık
$Ry$	:	Uçuş doğrultusuna dik olan çözebilirlik
$\theta$	:	Bakış açısıdır.

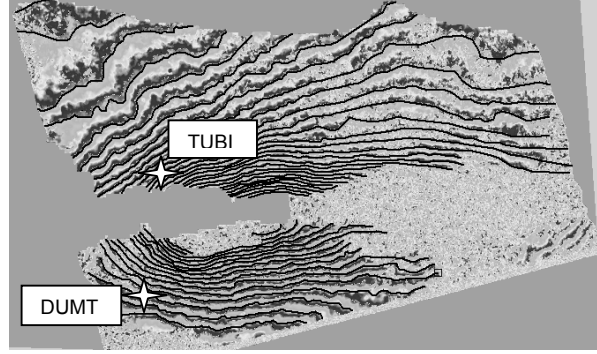
### Kocaeli İli örneği

Veri arşivinde bulunan Tablo 2'deki veriler arasında depremin hemen öncesi ve sonrasında elde edilen 22556 ve 23057 yörünge numaralarına sahip olan veri çiftine ait dikey baz uzunluk değeri, InSAR çalışması için gereken kritik baz uzunluk değerinin (600 m) altındadır. Dolayısıyla ile bu veri çifti InSAR çalışması için kullanılabilir.

Tablo 2. Çalışma kapsamında kullanılan ERS-SAR verileri

Uydu	Yörünge No	İz no	Çerçeve no	Tarih
ERS-1	42637	064	2781	10-09-1999
ERS-2	20459	064	2781	20-03-1999
ERS-2	20960	064	2781	24-04-1999
ERS-2	22964	064	2781	11-09-1999
ERS-2	20230	336	2781	04-03-1999
ERS-1	20364	336	2781	07-06-1999
ERS-1	42408	336	2781	25-08-1999
ERS-2	00691	336	2781	08-06-1999
ERS-2	22735	336	2781	26-08-1999
ERS-2	18226	336	2781	15-10-1998
ERS-2	19228	336	2781	24-12-1998
ERS-1	42730	157	0815	16-09-1999
ERS-2	22556	157	0815	13-08-1999
ERS-1	42229	157	0815	12-08-1999
ERS-2	23057	157	0815	17-09-1999

NASA/JPL'de geliştirilen ve LINUX işletim sistemi altında çalışan ROIPAC InSAR paket programı yardımı ile 22556 ve 23057 yörünge numarasına sahip veri çifti için üretilen interferogram Şekil 5'te verilmiştir. Burada hesaplanan deformasyon, uydunun bakış doğrultusuna ait göreceli deformasyondur. Şöyleki; Şekil 5'te Karadeniz kıyısından başlayarak İzmit Körfezi'nin kuzeyine kadar sayabildiğimiz örge sayısı 26'dır. Dolayısıyla ile Karadeniz kıyılarına göre, İzmit Körfezi'nin kuzey kesimleri, yaklaşık olarak  $26 \times 2.8 \text{ cm} \approx 72.8 \text{ cm}$ 'lik bir deformasyona uğramıştır.



Şekil 5. 13.08.1999 ve 17.09.1999 tarihli ERS SAR kompleks verilerinden elde edilen interferogram ve dijitalleştirilen örgeler

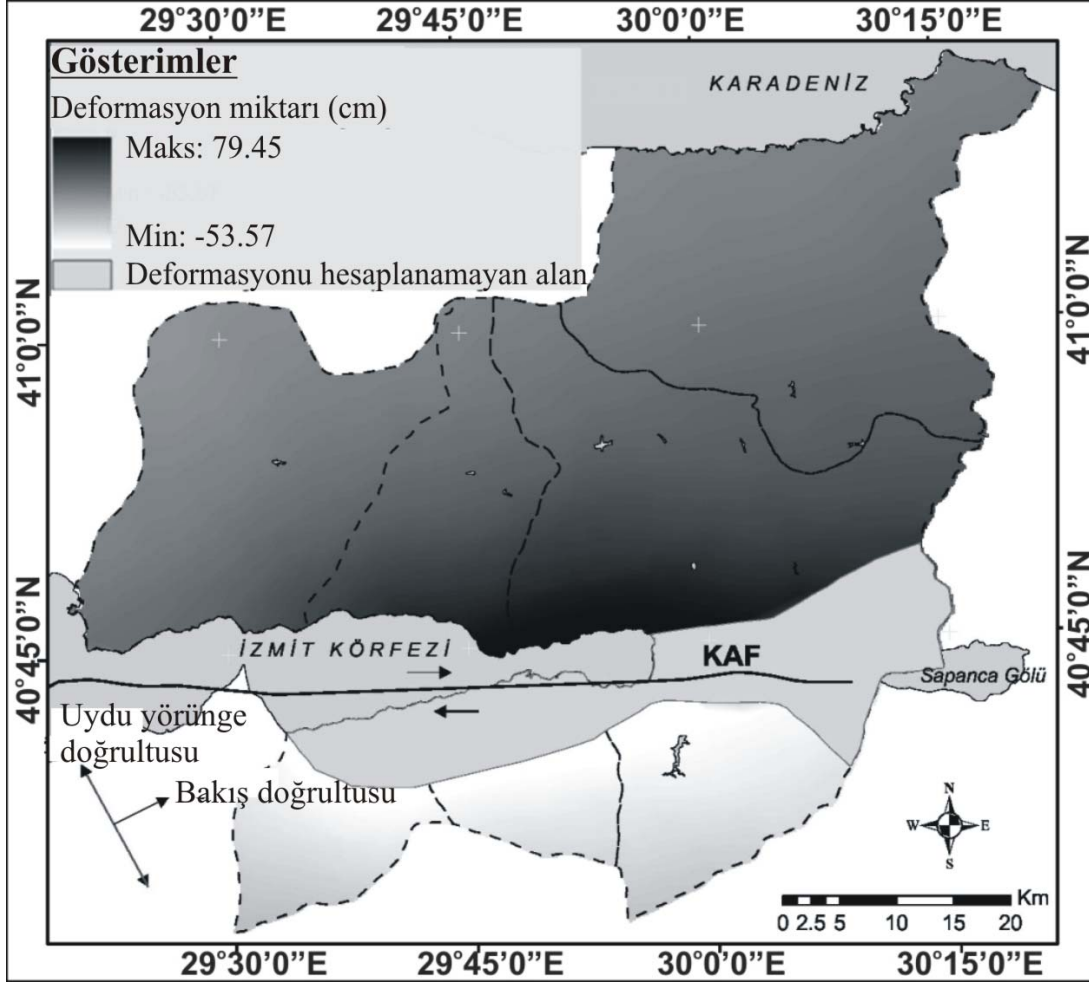
İnterferogram görüntüsünden yararlanarak doğrudan deformasyon bilgisine ulaşmak için her bir örge için dijitalleştirilmesi yoluna gidilmiştir. Şekil 5'te, dijitalleştirilmiş olan her bir örge için kesin deformasyon değerlerini belirlemek amacıyla, çalışma bölgesinde TÜBİTAK MAM YDBE tarafından kurulan ve bölgede sürekli veri toplayan 2 adet GPS istasyonundan (TUBI, DUMT) alınan veriler kullanılmıştır. Kuzey Anadolu Fayı'nın (KAF), doğrultu atımlı, yani düşey hareketi yok denecek kadar az ve sadece yatay düzlemde hareket ettiği göz önünde bulundurulursa, örgelerin net olarak elde edildiği bölgelere ait uydu bakış doğrultusundaki deformasyon miktarı Hanssen (2001)'den ERS uydusu için,

$$d_r = -0.0678d_n + 0.3848d_e \quad (7)$$

$d_r$ : Uydu bakış doğrultusundaki deformasyon  
 $d_n$ : Kuzey-güney doğrultusundaki deformasyon  
 $d_e$ : Doğu-batı yönündeki deformasyondur.

Buna göre, dijitalleştirilen her bir örge için uydunun bakış doğrultusuna ait kesin deformasyon değerleri hesaplanmış olup uydu bakış doğrultusuna ait mutlak deformasyon haritası Şekil 6'da verilmiştir.

Burada KAF'ın kuzeyinin, doğu yönünde, güneyinin ise, batı yönünde bir deformasyona uğradığını belirtmek gerekir.



Şekil 6. Uydu bakış doğrultusuna ait deformasyon miktarı

### NOAA-AVHRR verileri ile deprem öncesi ve sonrası termal anomalilerin izlenmesi

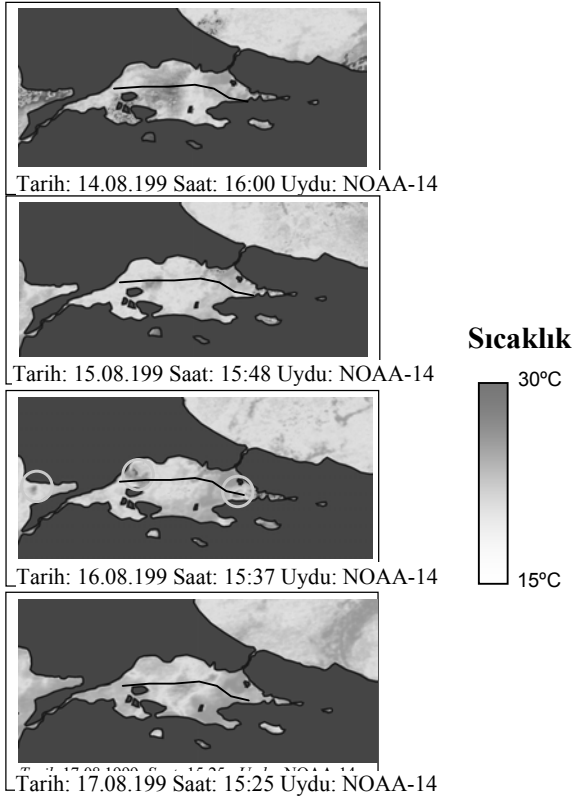
Çeşitli literatürler, büyük depremler öncesinde ortaya çıkan sıcaklık artışının belirlenmesinde NOAA AVHRR uydu görüntülerinden yararlanılabileceğini göstermektedir. Nitekim, Qiang ve diğerleri (1991,1992) Datong depremi (18 Ekim 1989, M=6.1), Changsu depremi (9 Şubat 1990, M=5.1) ve Gonghe depremi (26 Nisan 1990, M=7.0) öncesinde termal anomaliler saptamıştır.

Aynı şekilde, Orta Asya'da 7 yıl boyunca elde edilen termal görüntüler analiz edilerek, sıcaklık değişimi ile sismik aktivite arasında bir ilişki kurulmuştur (Tronin vd., 2002). Oluşan bu sıcaklık

değişimleri Çin ve Japonya'da farklı şekillerde ortaya çıkmıştır. Pekin'de depremden 6 ile 24 gün önce, uzunluğu 700 km, genişliği 50 km olan bir alanda, büyüklüğü 4.7'den büyük depremler için 3°C'lik bir sıcaklık değişimi saptanmıştır. Buna karşılık, Japonya'da ise depremden 7 ile 10 gün önce ve daha da küçük bir alanda saptanmıştır (Tronin vd., 2002). Ayrıca, 7 Eylül 1999 tarihinde Atina'da meydana gelen 5.9 büyüklüğündeki depremin öncesinde de termal anomaliler saptanmıştır (Filizzola vd., 2004). Bu çalışma kapsamında, 17 Ağustos 1999 tarihinde saat 03.02 de meydana gelen depremin öncesi ve sonrası için hem kara yüzeyindeki, hem de deniz yüzeyindeki sıcaklıklar analiz edilerek olası anomaliler araştırılmıştır. Deprem



öncesi (14, 15, 16 Ağustos) ve sonrasında (17, 18, 19 Ağustos) saat 04.00 – 06.00 arasında ve saat 15.00 – 16.00 arasında TÜBİTAK-MAM’da bulunan uydu yer istasyonundan elde edilen NOAA uydu verileri, deniz yüzeyi sıcaklığı ve kara yüzeyi sıcaklığı olmak üzere iki grupta değerlendirilerek, sıcaklık haritaları üretilmiştir. Deniz yüzeyi sıcaklıklarının net olarak izlenmesine rağmen, kara yüzeyinin sıcaklık değişimleri, KAF ve civarının bulutlarla kaplı olması nedeni ile net bir şekilde izlenememiştir. Özellikle deprem öncesi öğleden sonra elde edilen görüntülerden hesaplanan deniz yüzeyi sıcaklıkları incelendiğinde, önemli bulgulara rastlanmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Deprem öncesi ve sonrasında saat 15.00 ile 16.00 arasındaki deniz yüzeyi sıcaklık değişimleri

Deprem bir gün öncesinde saat 15:37’de alınan görüntüde Gelibolu Yarımadası’nın batısındaki bölgede, Çınarcık ile Adalar arasındaki bölgede ve Tekirdağ ile Marmara Adası arasındaki bölgede olmak üzere toplam üç farklı nok-

tada yaklaşık 2-3°C lik sıcaklık artışları göze çarpmaktadır. Depremden 3 gün önceki görüntülerde başlayan ve depremden bir gün önceki gündüz görüntülerinde de belirgin olan önemli sıcaklık anomalilerinin KAF boyunca düzenli ve sistematik şekilde görülmesi ilginçtir. Yeni olmakla birlikte bu tür çalışmalar depremlerin önceden kestirilmesi çalışmalarına katkı sağlayabilir. Bu nedenle Marmara Denizi’ne ait yıllık, mevsimlik ve aylık deniz suyu sıcaklık değişimlerinin akıntı rejimi ve meteorolojik koşullarla nasıl değiştiği incelenerek, anomalilerin fayın hareketine bağlı olup olmadığı incelenmelidir.

### LANDSAT ve SPOT verileri ile yerleşim alanı ve kıyı çizgisi değişimlerinin haritalanması

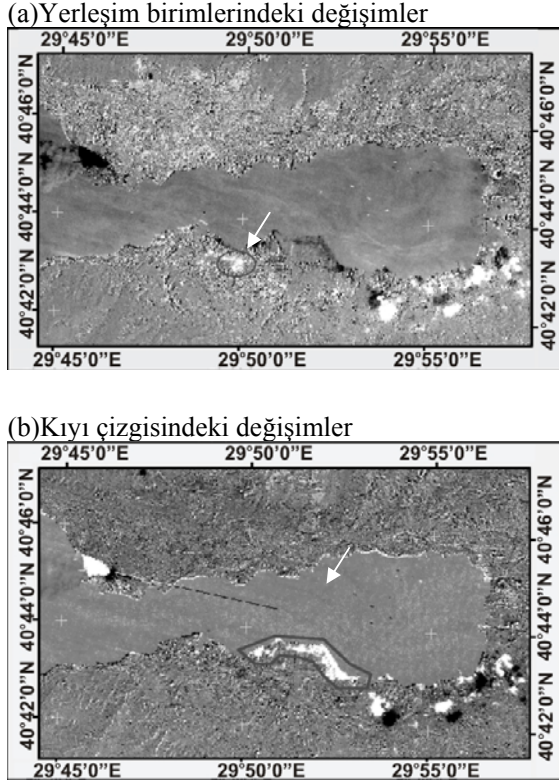
17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen depremin hemen öncesi ve sonrası için kısa zaman aralığında elde edilen LANDSAT ve SPOT görüntüleri ile değişim saptama (change detection) analizleri yapılarak, hem kıyıda, hem de yerleşim birimlerinde depremin oluşturduğu hasarlar haritalanmıştır.

### LANDSAT verileri ile yapılan çalışmalar

Atmosferik ve geometrik olarak düzeltilmiş görüntülerle değişim saptama analizi yapmadan önce, görüntülerdeki radyometrik farklılıklar histogram eşleme tekniği ile giderilmiştir. Deprem öncesi (10.08.1999 tarihli) LANDSAT görüntüsünün 1, 2, 3 No.lu bantları ile deprem sonrası (18.08.1999 tarihli) LANDSAT görüntüsünün 1, 2, 3 No.lu bantları alınarak 6 bantlı bir görüntü oluşturulmuştur. Oluşturulan bu görüntüye ana bileşenler dönüşümü uygulandıktan sonra yerleşim birimlerindeki değişimi belirten en küçük özdeğere sahip olan bileşen tespit edilmiştir (Şekil 8a).

Kıyılarda oluşan değişimlerin ana bileşenler yöntemi ile saptanması için deprem öncesi ve sonrası LANDSAT verilerinin 4, 5, 7 No.lu bantları kullanılarak 6 bantlı bir görüntü oluşturulmuştur. Uygulanan ana bileşenler dönüşümü sonrasında en küçük özdeğere ait bileşenler arasında değişimin bulunduğu bileşen saptanmıştır

(Şekil 8b). Ana bileşenler analizi sonunda yerleşim birimlerinde ve kıyılarda oluşan değişimler daha açık veya daha koyu renk tonlarında haritalanmıştır. 30m çözünürlüğe sahip LANDSAT görüntüsünde, değişimin çok belirgin olduğu Gölcük ilçesinde depremin neden olduğu hasarın boyutları görülebilmektedir.

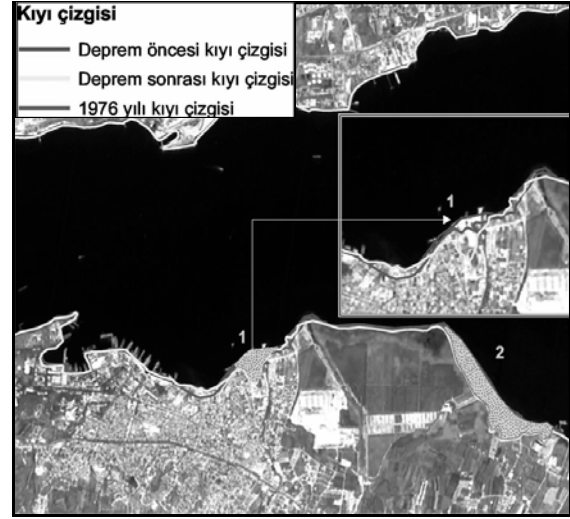


Şekil 8. LANDSAT verileri ile deprem sonrası oluşan değişimin ana bileşenler analizi (PCA) ile haritalanması

### SPOT verileri ile yapılan çalışmalar

Deprem öncesi (15.07.1999) ve sonrasında (20.08.1999) ait 10m çözünürlüklü SPOT-PAN verilerine gerekli düzeltme işlemleri uygulandıktan sonra fark alma yöntemi ile değişim saptama analizi yapılmıştır. Ancak TÜPRAŞ rafinerisinde meydana gelen yangının oluşturduğu yoğun duman, yerleşim alanlarında depremin yarattığı değişimlerin sağlıklı olarak belirlenmesine engel olmuştur. SPOT verilerinin LANDSAT verilerine göre yüksek olan çözünürlüğünden yararlanılarak kıyıda oluşan değişim

min tespit edilmesi için, ilk olarak SPOT uydusunun 20m çözünürlüklü çok spektrumlu XS (renkli) verileri ile 10m çözünürlüklü siyah/beyaz (PAN) verileri birleştirilerek 10m çözünürlüklü renkli karma veri oluşturulmuştur. Deprem öncesi ve sonrası için oluşturulan 10m çözünürlüklü karma veriler üzerinden depremden önceki ve sonraki kıyı çizgileri dijitalleştirilmiştir (Şekil 9). Özellikle Gölcük bölgesindeki kıyı çizgisi değişiminin önemli boyutlarda olduğu görülmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda 1 nolu bölgede yaklaşık 10.05 hektarlık, 2 nolu bölgede ise yaklaşık 36.55 hektarlık bir alan tamamen veya kısmen sular altında kalmıştır. Gölcük kıyısında meydana gelen bu derece büyük bir değişimin nedenlerinin araştırılması yönünde farklı bir çalışma daha yapılmıştır. Bu çalışmada ise SPOT karma verileri ile aynı ölçekte veri detayına sahip olan 1976 yılındaki veriler temel alınarak üretilmiş 1/25.000 ölçekli standart topoğrafik haritadaki kıyı çizgisi 3. bir kıyı çizgisi olarak dijitalleştirilmiş ve Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. SPOT verileri ile kıyı çizgisi değişimlerinin analizi

Deprem öncesi, sonrası ve 1976 yılına ait kıyı çizgilerinin birlikte verildiği Şekil 9 incelendiğinde depremden sonra çöken 1 nolu alanın, 1976 yılında deniz niteliğinde olduğu, daha sonra yer kazanmak amacıyla doldurulduğu anlaşılmaktadır.



### IRS verileri ile mevcut arazi örtüsü/ arazi kullanımının haritalanması

5m çözünürlüğe sahip IRS-1C PAN ve 22.5m çözünürlüğe sahip çok spektrumlu LISS verileri, depremin hemen öncesi için temin edilememiştir. Ancak, deprem sonrası için mevcut olan 27 Eylül 1999 tarihli veriler kullanılarak Kocaeli ili güncel arazi örtüsü/arazi kullanımı durumu haritalanmıştır. Bu amaçla yapılan işlemler aşağıda özetlenmiştir.

1. Klasik kümeleme yöntemi yerine görsel yorumlama yöntemi kullanılarak sınıfların birbirlerine karışmaması (örneğin gölgeli alanlar ile suyun karışması) sağlanmıştır.
2. CORINE (Coordination of Information on the Environment) sınıflandırma yönteminin birinci düzey sınıfları (yapılaşma alanları, tarım alanları, orman ve yarı doğal alanlar, sulak alanlar, su yüzeyleri, deniz) temel alınmıştır.

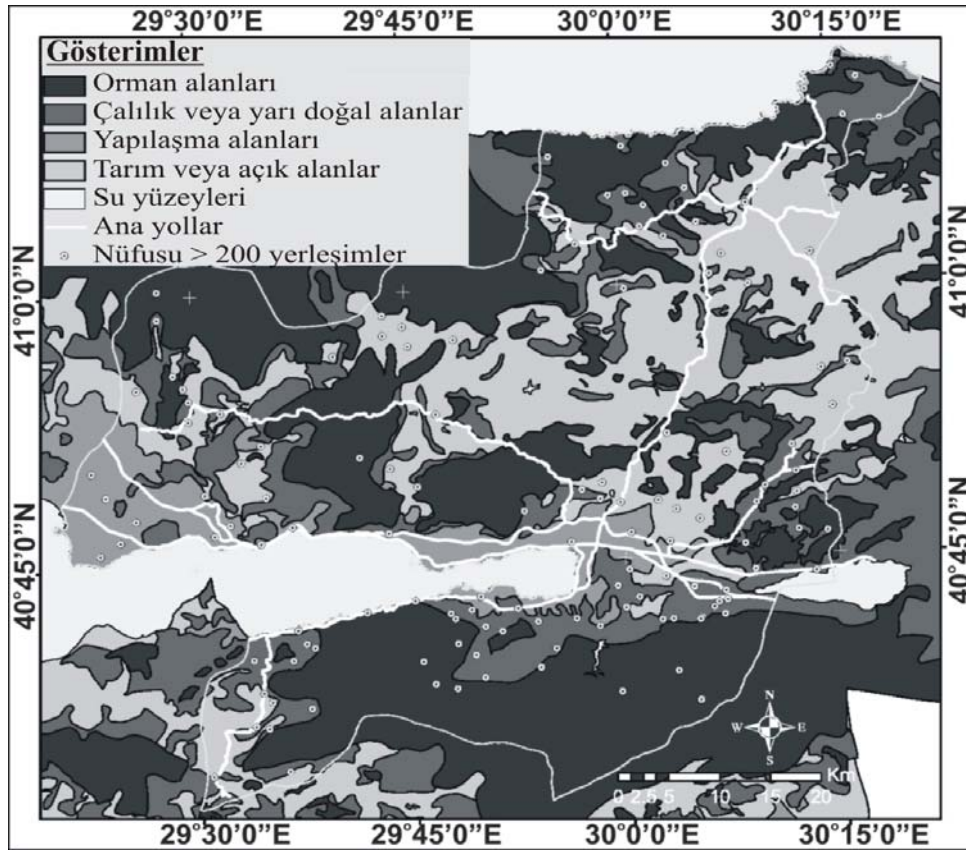
3. IRS görüntüsü üzerinde yukarıda ifade edilen sınıflar elle ekran üzerinden Kocaeli ili kapsamında dijitalleştirilerek güncel arazi örtüsü/arazi kullanımı haritası oluşturulmuştur.

Üretilen arazi örtüsü/arazi kullanımı haritası, köy bazında yerleşim birimleri ve ana ulaşım hatları ile birlikte Şekil 10'da verilmiştir. Söz konusu haritanın oluşturulmasındaki ana amaç, çok kriterli karar verme yöntemi ile üretilecek olan yerleşime uygunluk haritasının, mevcut arazi örtüsü/arazi kullanımı haritası ile karşılaştırılmasını sağlamaktır.

### Deprem sonrası yerleşime uygun yeni alanların belirlenmesi

#### Yersel verilerin oluşturulması

Deprem sonrasında en önemli gereksinimlerden birisi, daha önce yanlış yerleşim ve yapılaşma politikaları nedeni ile yıkılan konutların



Şekil 10. IRS verilerinden üretilen Kocaeli arazi örtüsü/arazi kullanımı haritası

yerine yenilerinin yapılmasıdır. Bu amaçla dijital yükseklik modeli, jeolojik formasyonlar, topografik kabiliyet sınıfları, mevcut yerleşim ve ulaşım durumunu belirten yersel nitelikteki veriler CBS ortamında oluşturulmuştur.

Bu çalışmada, deprem güvenliği esas alınarak yerleşime uygun alan belirleme çalışmalarında kullanılmak üzere hazırlanması düşünülen en önemli yersel veri katmanlarından birisi yatay yer ivmesi durumudur. Yer ivmesi, deprem anında zeminin ne miktarda ve ne hızla sarsıldığıнын bir ölçüsüdür. Deprem anında yer hareketinin ivmesini kaydeden ivme ölçerlerin ölçtüğü değerin birimi  $\text{cm/sn}^2$  (gal) dir ve yerçekimi ivmesinin ( $g=981 \text{ cm/sn}^2$ ) kesri olarak kayıt alır. Campbell (1997)'de geliştirilen model kullanılarak Kocaeli ili bazında yer ivmesi modeli oluşturulmuştur. En büyük yatay yer ivmesi, deprem odağına uzaklık, jeoloji ve zemin koşulları arasındaki ilişkiyi tanımlayan (8) bağıntısı temel alınarak oluşturulan Kocaeli İli yatay yer ivmesi modeli Şekil 11'de verilmiştir.

$$\ln(A_H) = -3.512 + 0.904 M - 1.328 \ln \sqrt{R_{SEIS}^2 + [0.149 \exp(0.647 M)]^2} + [0.440 - 0.171 \ln(R_{SEIS})]S_{SR} + [0.405 - 0.222 \ln(R_{SEIS})]S_{HR} + \varepsilon \quad (8)$$

$A_H$  : En büyük yatay yer ivmesi.

$M$  : Deprem moment büyüklüğü.

$R_{SEIS}$  : Deprem odağına olan uzaklık (km). Bu uzaklık hipotenüs uzaklığı olduğu için faya dik uzaklık ile depremin derinliğinin (Kocaeli depremi için yaklaşık 17km) kareleri toplamının karekökü alınarak hesaplanır.

$S_{SR}, S_{HR}$ : Yerel zemin koşullarını temsil eden sabitlerdir. Alüvyon veya sert toprak türünde zeminler için  $S_{SR}=S_{HR}=0$ , zayıf kayaç türünde zeminler için  $S_{SR}=1, S_{HR}=0$ , sağlam kayaç türünde zeminler için  $S_{SR}=0, S_{HR}=1$  dir.

$\gamma$  : Standart sapma.

Kocaeli il sınırları içerisindeki Afet İşleri Genel Müdürlüğü'ne ait istasyonlarda ölçülen ivme değerleri ile, hesaplanan yer ivmesi değerleri karşılaştırılmış ve elde edilen farklar Tablo 3'te

özetlenmiştir. Söz konusu farkların çok önemli boyutlarda olmadığı söylenebilir.

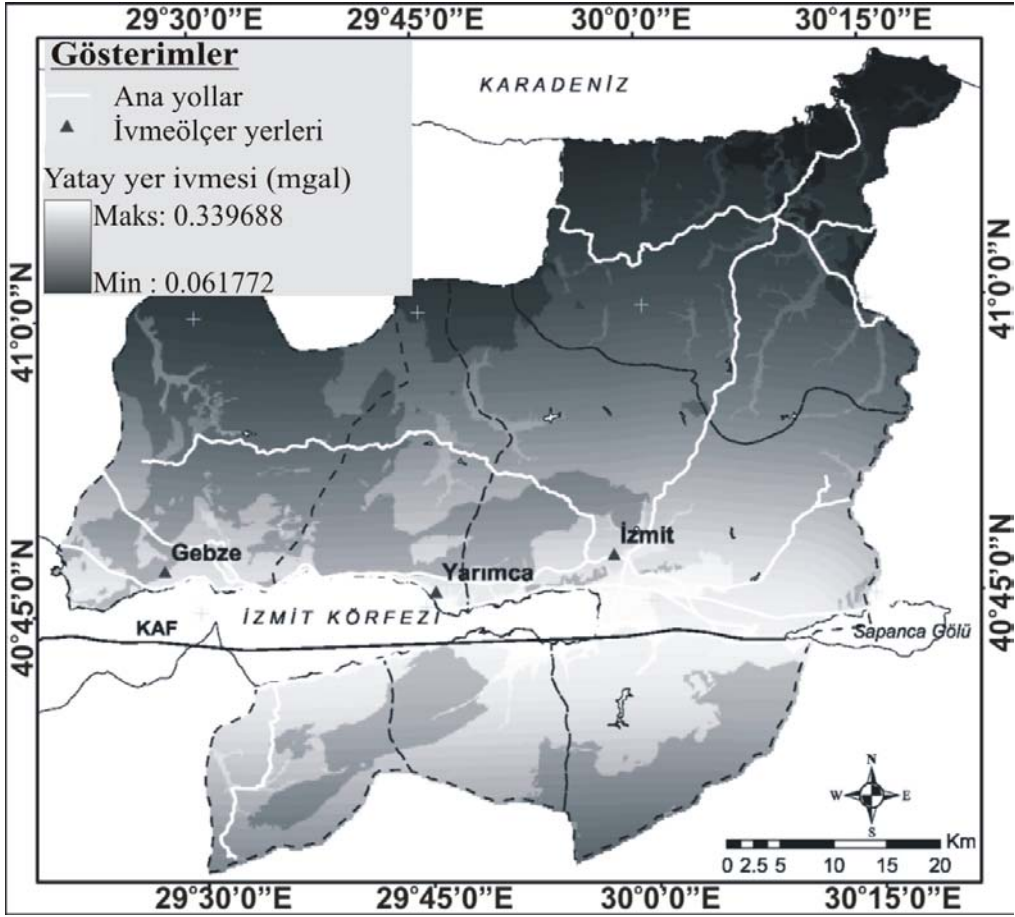
Tablo 3. Ölçülen ivme değerleri ile Campbell (1997)'e göre hesaplanan ivme değerleri arasındaki farklar

Yer	Ölçülen değer (mgal)	Hesaplanan değer (mgal)	Fark (mgal)
İZMİT	0.2765	0.2928	0.0163
GEBZE	0.2992	0.3045	0.0049
YARIMCA	0.3882	0.3339	0.0543

### Çok kriterli karar verme yöntemi

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) işlemi, seçilen kriterlere uygun değerlendirme yapan bir model, yöntem veya yaklaşım olarak kabul edilebilir. Söz konusu kriterler birden fazla sayıda ve farklı uzmanlıklarda olabileceği için, her bir kriterin uzmanı tarafından değerlendirilmesi gerekir. Burada temel amaç, çoklu kriterler ışığında karmaşık problemlerin çözümü için alternatifler belirlemektir. Anlaşılır ve sade bir şekilde üretilen alternatiflerin uygunluk derecelerine göre sıralanması gereklidir (Janssen ve Rietved, 1990). Son on yılda gelişen bilişim sektörüne paralel olarak CBS'nin ÇKKV yöntemi ile entegrasyonu sağlanmış ve karar verme sürecinde kullanıcılara önemli kolaylıklar sunulmuştur. Bu nedenle, karar verme problemlerinin çözümünde bu yöntem büyük ilgi görmüş ve özellikle arazi uygunluk değerlendirmeleri için çok yararlı bir yöntem haline gelmiştir (Pereira ve Duckstein, 1993; Malczewski, 1996; Joerin vd., 2001).

ÇKKV analizi, coğrafi verileri girdi kabul edip çıktı olarak karar üreten bir süreçtir. Bu süreç problemin tanımlanması ile başlar, önerilerin sunulmasıyla sonuçlanır. Şekil 12'de akış şeması verilen ÇKKV süreci üç aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşamada problemi tanıma ve anlama, ikinci aşamada problemin çözümüne yönelik tasarım yapma, son aşamada ise ortaya çıkan öneriler arasında seçim yapma işlemi gerçekleştirilir. İlk aşamada CBS teknikleri, ikinci aşamada ÇKKV yönteminin kendisi, üçüncü aşamada ise hem CBS teknikleri, hem de ÇKKV yöntemi önemli rol oynar.



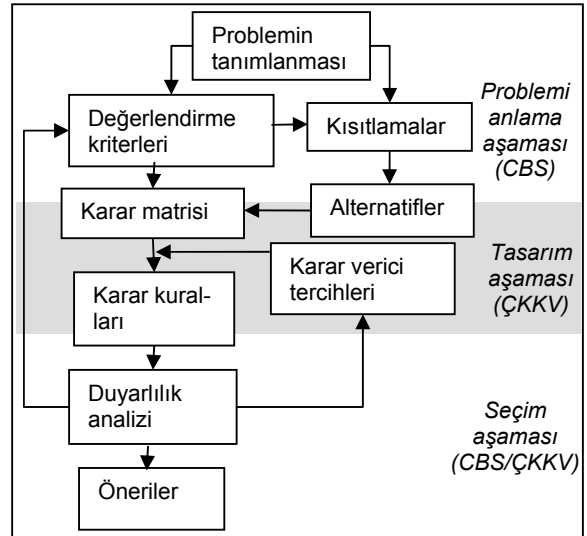
Şekil 11. Kocaeli İli için hesaplanan en büyük yatay yer ivmesi haritası

Bu çalışma kapsamında hazırlanan tüm uydu ve yersel verilerin birlikte kullanılması ile, deprem güvenliği esas alınarak yerleşime uygun yeni alanların belirlenmesi için çok kriterli değerlendirme yöntemi kullanılmıştır.

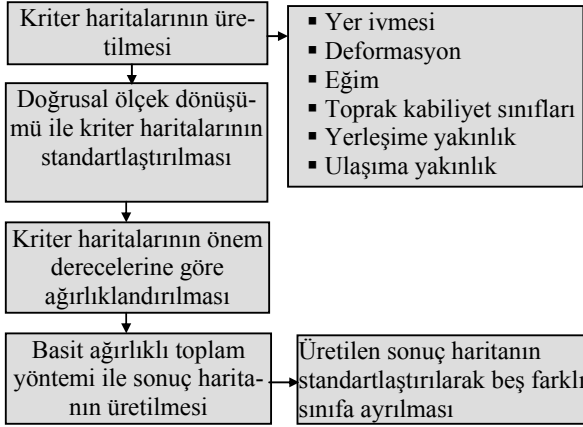
Mevcut veri olanakları ve CBS yeteneklerinin kullanıldığı bu yöntem kapsamında izlenen adımlar Şekil 13'te özetlenmiştir.

Şekil 14'te yapılaşma açısından uygunluk derecesini gösteren sonuç harita, deprem sonrası yaşanan can ve mal kaybının yüksek olmasının en önemli nedenlerinden birini açıklamaktadır.

Tüm Kocaeli bazında yerleşime uygunluk derecesini gösteren söz konusu haritadan hesaplanan alan ve yüzde değerleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 12. ÇKKV analizi akış şeması (Malczewski, 1999)

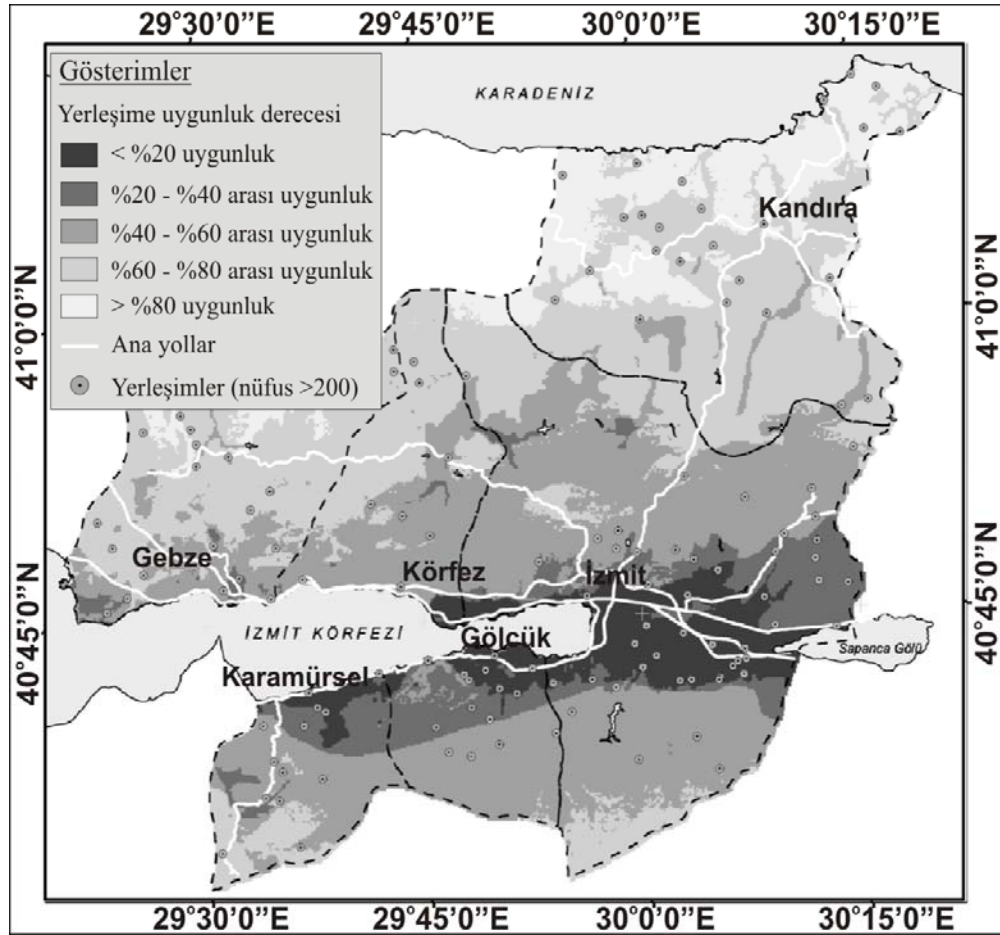


Tablo 4. Kocaeli yerleşime uygunluk derecesi alan dağılımları

	Oran aralığı (%)	Alan (Ha)	Alan (%)
<b>Yerleşime uygunluk derecesi</b>	0-20	26033.6	7.6
	20-40	30799.1	9.0
	40-60	122979.4	35.8
	60-80	120662.5	35.1
	80-100	42824.4	12.5
<b>TOPLAM</b>		<b>343299.0</b>	<b>100.0</b>

Şekil 13. Çok kriterli karar verme yöntemi ile yapılan yerleşime uygunluk analizi adımları

Şekil 14'te verilen uygunluk derecesini gösteren haritanın güncel arazi örtüsü/arazi kullanımı ile analizi yapıldığında önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Nitekim ilçe bazında yapılan değerlendirmelerde,



Şekil 14. Deprem güvenliği açısından çok kriterli karar verme analizi ile üretilen yerleşime uygunluk haritası

yapılaşma alanlarının, Karamürsel ilçesi için 2828 ha ile %100'ü, Gölcük ilçesi için 1356.5 ha ile %92.9'u, İzmit merkez ilçesi için 6374.8 ha ile %61.4'ü, Körfez ilçesi için 925.4 ha ile %30.9'u yerleşime uygunluk açısından düşük bir değere sahip %20'den küçük bölgede bulunduğu saptanmıştır. Gebze ilçesindeki yerleşimin %49.9'unun yerleşime uygunluk açısından yüksek sayılabilecek %40-%60 aralığındaki bölgede, Kandıra ilçesindeki yerleşimin %80'inin yerleşime uygunluk açısından en yüksek değere sahip %80-%100 aralığındaki bölgede olduğu saptanmıştır.

Daha önce uydu verileri ile yapılan değişim saptama çalışmaları sonucunda elde edilen haritalar yerleşime uygunluk haritası ile birlikte değerlendirildiğinde, değişimlerin yoğun olduğu bölgelerin yerleşime uygunluk açısından en düşük değere sahip bölgelerde olduğu görülmüştür.

## Sonuçlar

17 Ağustos 1999 Marmara Depremi'nin öncesi ve sonrasına ait farklı spektral ve mekansal çözübilirlikli uydu verileri ile yapılan analiz ve değerlendirmelerle, hem depremin neden olduğu değişimlerin boyutunun belirlenmesi, hem de deprem öncesinde oluşan sıcaklık anomalileri ile ilgili önemli bilgiler elde edilmiştir. Deprem 2 gün öncesi ve 2 gün sonrasına ait NOAA-AVHRR verileri ile hesaplanan deniz yüzeyi sıcaklıklarında depremden bir gün önce noktasal sıcaklık artışları saptanmıştır. Fay üzerinde belirlenen 2-3°C'lik bu sıcaklık artışı NOAA-AVHRR verilerinin, deprem kestirimi çalışmaları için yararlı olabileceğini göstermiştir.

Marmara Bölgesi'nde etkili olan depremin neden olduğu yıkım felaketi, özellikle arazi kullanım planlarını hazırlarken ülkemizdeki deprem gerçeğinin göz ardı edilmiş olduğunu göstermektedir. Bu çalışma ile, belirtilen eksikliğin giderilmesi yönünde önemli bir adım atılmıştır. Kocaeli il sınırları içerisinde makro ölçekte çok kriterli değerlendirme yönteminin kullanıldığı bu çalışma sonucunda mevcut olan yerleşim durumunun büyük bir kısmının deprem güvenliği açısından oldukça riskli olan bölgede konumlandığı saptanmıştır. Nitekim deprem sonrasında

ortaya çıkan ölü ve yaralı bilançosunun onbinlere varması bunun en açık göstergesidir. Yerleşim politikaları değiştirilmediği sürece söz konusu bilançoların geçmişte olduğu gibi gelecekte de yaşanması kaçınılmaz olacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında ülkemizin başta deprem olmak üzere farklı doğal afetler ile karşılaşabileceği gerçeği göz önünde bulundurularak, arazi örtüsü/arazi kullanımı analizlerine yönelik olarak izlenebilecek adımlar konusunda bir yöntem geliştirilmiştir. Uydu ve yersel veri entegrasyonu kullanılarak Kocaeli ili için yapılan bu örnek uygulamanın deprem tehdidi altında bulunan diğer iller için de yapılması, bu bölgelerde oluşabilecek depremlerin an az hasarla atlatılması bakımından önem taşımaktadır. Depremi esas alındığı bu çalışmanın temelinde kullanılan çok kriterli değerlendirme yönteminin, planlama faaliyetlerinde daha isabetli ve doğru kararların alınması için, ülkemizdeki kullanımının gerek merkezi yönetim, gerekse yerel yönetimler bazında yaygınlaştırılması gereklidir.

## Kaynaklar

- Campbell, K. W., (1997). Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra, *Seismological Research Letter*, **68**, 154-179.
- DPT, (1999). Depremi ekonomik ve sosyal etkileri muhtemel finansman ihtiyacı kısa-orta ve uzun vadede alınabilecek tedbirler, Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı raporu, 127, Ankara.
- Filizzola, C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V., (2004). Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's earthquake, *Physics and Chemistry of the Earth*, **29**, 517-527.
- Gens, R. ve Vangenderen, J.L., (1996). SAR interferometry - issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 1803-1835.
- Gens, R., (1998). Quality assessment of SAR interferometric data, *PhD Thesis*, Universtiy of Hannover, Hannover, Germany.
- Hanssen, R. F., (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, 308 sh., Kluwer Academic Publishers, Boston.



- Janssen, R., Rietved, P., (1990). *Multicriteria analysis and GIS: an application to agriculture landuse in the Netherlands* in Scholten, H., Stilwell, J., eds, *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*, 129–138, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Joerin, F., Thériault, M., Musy, A., (2001). Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment, *International Journal of Geographical Information Science*, **10**, 321–339.
- Madsen, S. N., Zebker, H. A. ve Martin, J., (1993). Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing Techniques, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **31**, 246-256.
- Malczewski, J. A., (1996). GIS-based approach to multiple criteria group decision-making, *International Journal of Geographical Information Science*, **10**, 321–339.
- Malczewski, J. A., (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, 392 sh., John Wiley and Sons, New York, NY.
- Massonnet, D., ve Feigl, K.L., (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, **36**, 441-500.
- Pereira, J. M. C., Duckstein, L., (1993). A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation, *International Journal of Geographical Information Science*, **7**, 407–424.
- Qiang, Z. J., Xu, X. D., Dian, C. G., (1991). Thermal infrared anomaly precursor of impending earthquakes, *Chinese Science Bulletin*, **36**, 319–323.
- Qiang, Z. J., Dian, C. G., (1992). Satellite thermal infrared impending temperature increase precursor of Gonghe earthquake of magnitude 7.0, Qinghai Province, *Geoscience*, **6**, 297–300.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E. ve Goldstein, R. M., (2000). Synthetic aperture radar interferometry, *Proceedings of IEEE*, **88**, 333– 382.
- Tronin, A. A., Hayakawa, M., Molchanov, O. A., (2002). Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China, *Journal of Geodynamics*, **33**, 519–534.