

## REAL-TIME (GERÇEK-ZAMAN) SİSMOLOJİSİ, DÜNYADAKİ GELİŞİMİ ve TÜRKİYE'DE UYGULANABİLİRLİĞİ

### REAL-TIME SEISMOLOGY, ITS GLOBAL DEVELOPMENT and ITS APPLICABILITY IN TURKEY

**Murat UTKUCU, Ömer ALPTEKİN**

İ.Ü. Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34850 Avcılar-İstanbul

**ÖZ:** Gerçek-zaman sismolojisi deprem tehlikesini azaltmak için yeni gelişen bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, deprem kayıplarını ve depremin yoğun nüfuslu sanayileşmiş bölgelerdeki etkisini azaltmak için deprem verilerini deprem ile ilgili bilgilere hızlı dönüştürmede sismik alet teknolojisindeki, veri sağlama sistemlerindeki, sayısal haberleşme sistemlerindeki ve bilgisayar sistemlerindeki en güncel gelişmelerden yararlanmaktadır. Gerçek-zaman sismolojisi sistemleri depremle ilgili büyüklük ve episantr koordinatları gibi çok temel bilgilerin yanında acil müdahale ve iyileştirme çalışmalarını planlamak için depremin etkilediği alanda maksimum yer ivmesi, hızı ve yerdeğiştirmesi türünden yer sarsıntısının uzaysal dağılımı ve kayıp hesaplamaları gibi bilgileri de sağlayabilmektedir. Bu sistemler, bazı durumlarda enerji istasyonları, ana bilgisayarlar, metro vb. sistemlerin uğrayabileceği deprem zararını azaltmak için hasara neden olabilecek yer sarsıntısı için erken uyarı verebilir. Bunların yanısıra, faylanmanın ve hasarın uzanımını daha iyi değerlendirmek için depremin faylanma mekanizması, kayma dağılımı ve kırılma yönelimi gibi önemli bilgileri de sağlamaktadır.

Bu çalışmada, gerçek-zaman sismolojinin küresel olarak nasıl geliştiği, ne tür alt sistemleri içerdiği, ne dereceye kadar deprem tehlikesini azaltma kabiliyetine sahip olduğu ve ülkemiz için neden önemli olduğu incelenmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Gerçek-Zaman Sismolojisi, deprem zararlarının azaltılması, sarsıntı haritaları.

**ABSTRACT:** Real-time seismology is a newly developing approach in seismology to mitigate earthquake hazard. It exploits up-to-date advances in seismic instrument technology, data acquisition systems, digital communications systems and computer systems for quickly transforming data into earthquake information in real-time to reduce earthquake losses and its impact on social and economic life in the earthquake prone densely populated urban and industrial areas. Real-time seismology systems are capable of giving rapid earthquake information, comprising not only most common informations of magnitude and epicentral location but also spatial distribution of ground shaking by means of ground acceleration, velocity and displacement in order to plan emergency response and recovery efforts in the earthquake struck area. In some cases, it may even provide early warnings before upcoming ground shaking to reduce earthquake damage to power stations, main computers systems, subway operations etc. In addition to faulting mechanism, it also provides finite-fault and rupture process information, such as slip distribution and rupture directivity, for large earthquakes in near-real-time to further assess extent of faulting and damage. In this study, we examine how the real-time seismology has globally developed, what sort of systems it incorporate, to what extent it has been capable of earthquake hazard mitigation and why it is important for our country.

**Key words:** Real-time Seismology, earthquake hazard mitigation, shake maps.

### GİRİŞ

Depremler ve depremlerle ilişkili olayların bilimsel olarak incelenmesinin yanında sismolojinin amaçlarından biri de depremlerin sebep oldukları zararları ve can kayıplarını en aza indirecek çalışmalar yapmak ve halkı deprem tehlikesi ve buna karşı alınacak önlemler

konusunda bilgilendirmektir. Bu amaca ulaşmanın en kısa yolu depremlerin olacakları yerleri, büyüklüklerini ve zamanlarını önceden tahmin etmek ve buna bağlı olarak gerekli önlemleri almak ve halkı bilgilendirmektir. Bu bağlamda özellikle 1960'lı ve 70'li yıllarda dünyanın çeşitli yerlerinde depremlerin işaretçisi olabilecek

çok sayıda karmaşık olayın incelenmesiyle depremlerin oluş zamanının önceden kestirilmesine çalışılmıştır (Vogel ve diğ., 1998). Ancak depremler heterojen bir yapısı olan yerkabuğu içinde uzun bir zaman döneminde karmaşık bir mekanizma ile oluşan enerji birikim ve boşalım süreci olduğundan son derece düzensiz (chaotic) doğal olaylardır. Bu konudaki çalışmalarla (ör: levha hareketleri ve enerji birikimi, fay parçalarının etkileşimleri v.d. gibi çalışmalar) deprem oluşumunu aydınlatacak önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen depremlerin kısa dönemli olarak yer, zaman ve büyüklüklerinin önceden tahmin edilmesi günümüzde yine de imkansızdır. Bundan dolayı günümüzde sismoloji camiası depremlerin önceden tahmin edilmesi çalışmalarında genel olarak gelecekteki depremlerin yer, zaman ve büyüklüklerinin kesin olarak belirlenmesinden çok, bir yerde gelecekte bir depremin olmasının beklendiği uzay ve zaman ortamının daraltılması çalışmalarına (Oppenheimer ve diğ., 1990) önem vermektedir.

Bununla birlikte, depremlerin yer ve zamanlarının önceden tahmin edilebildiği varsayılsa dahi, nüfusun yoğun olduğu yerler ve yakın civarında meydana gelebilecek büyük bir deprem muhtemelen geniş ölçüde hasara, sosyal ve ekonomik hayatta kesintilere neden olabilecektir. Depremlerin bu kaçınılmaz zararlarını azaltabilmek için sismolojide yeni bir yaklaşım ortaya çıkmıştır. Deprem algılayıcılarındaki (sismometreler), bilgisayar ve veri iletişim teknolojilerindeki en son gelişmeleri kullanan ve depremlerle ilgili hızlı ve güvenilir bilgiler veren bu yaklaşımın adı gerçek-zaman sismolojisi (Kanamori ve diğ. 1997). Gerçek-zaman deprem bilgi akış sistemlerinin amacı depremin hemen sonrasındaki bir-kaç dakika ve hatta yakın gelecekte onbeş-yirmi saniye içinde depremin oluş zamanı, yeri ve büyüklüğü gibi önemli parametreleri vermek ve deprem sonrasında en fazla nerelerin acil müdahaleye ihtiyaç duyduğunun değerlendirmesini yapabilmek için kuvvetli yer hareketi (ivme, hız ve yerdeğiştirme) haritaları diğer bir ifadeyle sarsıntı haritaları (shake maps) üretmektir (Kanamori ve diğ., 1997; Teng ve diğ., 1997; Wald ve diğ., 1999a). Bu şekilde depremin en fazla nerede hasar meydana getirebileceği ve nerede acil müdahale ihtiyacının daha fazla olduğu depremin hemen sonrasındaki birkaç dakika içinde bilinebilmekte ve acil müdahale birimleri ve kaynaklar da buna uygun olarak yönlendirilerek özellikle nüfus yoğunluğu fazla endüstrileşmiş bölgelerde can ve mal kaybının azaltılmasına çalışılmaktadır. Yakın geçmişte dünyada nüfusun yoğun olduğu çeşitli yerlerde meydana gelmiş depremler böyle sistemlere olan ihtiyacı açıkça göstermiştir. Örneğin, Japonya'daki 1995 Kobe depreminde sismik veri iletim ağı ve haberleşme sistemlerinin depremin neden olduğu kuvvetli yer hareket-

leri nedeniyle devre dışı kalması sebebiyle başkent Tokyo'daki merkezi hükümet, hasarın kapsamı ve uzanımı hakkında depremin saatler sonrasına kadar sağlıklı haber alamamıştır (Kanamori ve diğ. 1997). Bunun benzeri 17 Ağustos 1999 İzmit depreminin ardından ülkemizde yaşanmıştır. Geniş bir alanda yıkıma neden olan bu depremin ardından haberleşme hatları aşırı yüklenmeden kilitlenmiş ve otoyollardaki hasar ve aşırı trafikten dolayı deprem bölgesiyle ulaşım da imkansız hale gelmiş ve üst düzeydeki hükümet yetkilileri depremin etkileri ve verdiği hasarın boyutları hakkında birinci gün sonunda dahi tam bir fikir sahibi olamamıştır. Bu durum acil müdahale ve kurtarma ekiplerinin etkin bir şekilde çalışabilmesini etkilemiştir.

Gerçek-zaman deprem bilgi akış sistemlerinin diğer bir önemli yanı da bazı durumlarda deprem ile ilgili "erken uyarı" niteliğindeki bilgilerin daha hasara neden olan sarsıntı başlamadan evvel bazı birimlere ulaştırılabilmesidir. Gözlem yerlerine ilk ulaşan P dalgası bazen zarara neden olmakla birlikte zararın çoğu daha sonra ulaşan yüksek genlikli S dalgası sebebiyle olur. Bu nedenle, bir erken uyarı olasılığı asıl hasara sebep olan S dalgasının yayılma zamanına, yani depremin kaynağı ile erken uyarı yapılmasının düşünüldüğü yer arasındaki uzaklığa bağlıdır (Bakun ve diğ., 1994; Teng ve diğ., 1997). Eğer deprem kaynağı erken uyarının yapılmasının düşünüldüğü yerin çok yakınında veya hemen altında ise erken uyarı olanaksızdır. Bununla birlikte, çoğu halde büyük metropolitan alanlar aktif fayların tam üstünde değil belli bir miktar uzağında yer almaktadır (Kaliforniya, Meksika, Japonya, Tayvan, Romanya ve Türkiye'de olduğu gibi). Bu gibi yerlerde erken uyarı mümkün hale gelmektedir. Bunun yaşanmış örneklerine aşağıda değinilecektir. Araştırmacılar erken uyarıyı mümkün kılan bilgisayar destekli çeşitli sismik alarm sistemleri önermişlerdir (Heaton, 1985; Toksöz ve diğ., 1990). Bir yerde yer sarsıntısı başlamadan önce bir erken uyarının alınması sistemle bağlantılı diğer yerlerde bazı önlemlerin otomatik olarak harekete geçirilmesini sağlayabilir. Bu önlemlerden bazıları ana bilgisayar sistemlerinin kapatılması, havaalanı operasyonlarının durdurulması, yüksek gerilim hatlarındaki akımın kesilmesi, doğalgaz, içme suyu ve petrol boru hatlarındaki akımın durdurulması, hastanelerin acil müdahale birimlerinin alarma geçirilmesi, yangın çıkış kapılarının açılması, acil durum jeneratörlerinin çalıştırılması, asansörlerin güvenli durumda durdurulması, nükleer santrallerin ve rafinerilerin çalışmalarının durdurulması, fabrikalarda makinelerin durdurulması, metro, tramvay ve banliyö trenleri gibi toplu taşıma araçlarının durdurulması, sesli uyarı ve radyo yayınlarının yapılması ve son olarak da deprem denizde meydana gelmişse olası tsunami teh-

likesine karşı halkın ve deniz taşıtlarının uyarılması şeklinde sıralanabilir. Böyle bir sistemin çok iyi bir haberleşme ve veri iletim sistemi gerektirdiği açıktır. Esasen bir gerçek-zaman deprem bilgi iletim sistemi dört bileşenden ibarettir (Wenzel ve diğ., 1999). Bunlar; (1) çeşitli algılayıcılardan oluşan algılama ve görüntüleme sistemi, (2) verileri algılayıcılardan veri işlem sürecinin yapılacağı bilgisayarlara iletecek gerçek-zaman iletişim sistemi, (3) algılayıcılardan gelen verileri işleyerek erken uyarı için gerekli bilgiyi üreten bilgi işlem birimi ve (4) gerekli uyarı mesajlarını yayınlayan ve bu uyarıları sistemin özel kullanıcılarına ileten sistemdir.

### GERÇEK-ZAMAN DEPREM BİLGİ AKIŞ SİSTEMLERİNİN DÜNYADAKİ GELİŞİMİ

*Japonya:* Japonya'da sismik alarm sistemleri demiryolu faaliyetleri için 1950'li yılların sonunda basit sismometrelerin kullanımı ile başlamış ve 1964 yılında hızlı trenlerin devreye girmesiyle büyük depremlerden kaynaklanan kuvvetli yer hareketleri sırasında bu hızlı trenleri durdurmak veya yavaşlatmak için otomatik sismik erken uyarı sistemleri geliştirilmesiyle devam etmiştir (Kanamori ve diğ. 1997; Teng ve diğ., 1997). Japon Demiryolları günümüzde UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System) adı verilen daha karmaşık algoritmaları kullanan bir deprem bilgi akış sistemi kullanmaktadır. 1995 Kobe depreminin ardından gerek acil müdahale birimlerinin işini kolaylaştıracak real-time deprem verisi gerekse bilimsel araştırmalar için yeterli kuvvetli yer hareketi verisi sağlamada görülen eksikliklerden dolayı Japon hükümeti kuvvetli yer hareketi istasyonlarının sayısını arttırmayı, mevcut olanları yenileştirmeyi ve gelecekteki depremlerin verilerinin hızlıca kullanıcılara iletilmesini sağlayacak bir planı yürürlüğe sokmuştur (Kinoshita, 1998). Bu plan kapsamında Kyoshin Net (K-Net) adında 1000 adet kuvvetli yer hareketi ivme kayıtcısı ile bir ana ve iki de yardımcı kontrol merkezini içeren bir ağ oluşturulmuştur (Şekil 1). K-Net bir depremin verilerini, depremi takip eden ilk bir-kaç saat içinde hızlıca Internet aracılığıyla (ör: <http://www.K-NET.bosai.go.jp>) kullanıcıların hizmetine sunmakta ve eğer 50'den fazla istasyonda deprem kayıt edilmişse ivme eşkontur haritasını vermektedir. Sistemin yazılım ve donanımı, veri eldesi ile ilgili teknik bilgiler Kinoshita (1998)'de verilmiştir. Bunun yanında, bazı Japon enerji ve gaz dağıtım firmaları da kendi bünyelerindeki acil müdahale faaliyetlerinde kullanılmak üzere gerçek-zaman deprem bilgi akış sistemleri geliştirmişlerdir.

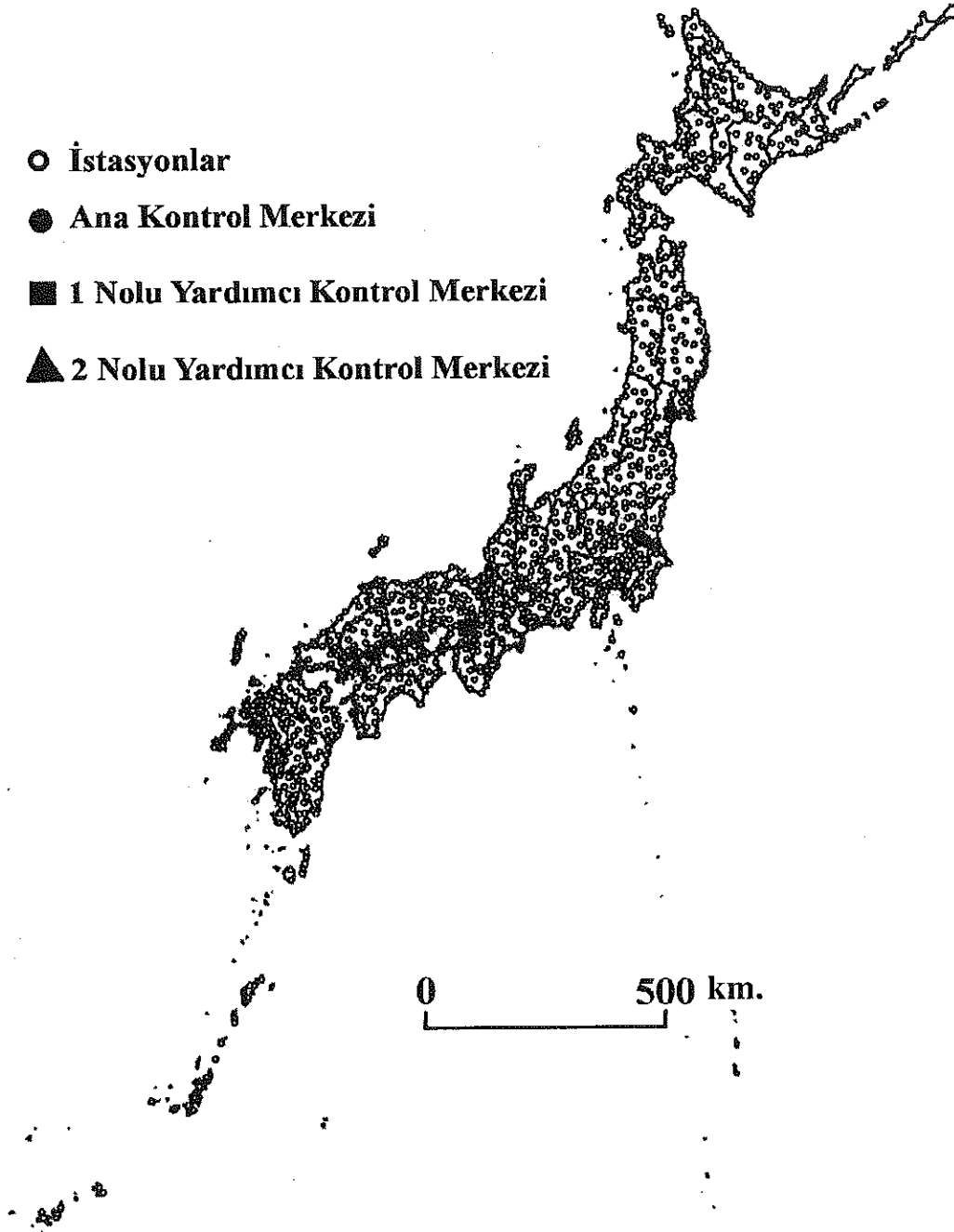
*Meksika:* Orta Amerika dalma-batma zonu üzerinde meydana gelen 1985 Michoacan depreminin ( $M=8.1$ ) başkent Mexico City'de büyük mal ve can kay-

bına neden olmasının ardından bilim adamlarının bu dalma-batma zonu üzerinde yapmış olduğu sismotektonik çalışmalar, 1985'tekine benzer bir büyük depremin başkent Mexico City'nin 300 km güneybatısında 30 yıldır sismik bakımından sessiz olan Guerrero sismik boşluğu üzerinde meydana gelebileceği ve başkent için tehlike oluşturabileceği kaygısıyla sonuçlanmıştır (Goltz ve Flores, 1997). Bu yüzden 1985'teki büyük depremin sonrasında Meksika hükümeti bina inşa yasalarında ve şehir planlamacılığında iyileştirmeleri, halkın eğitimini, bilimsel kuruluşlar ile işbirliğini ve Sismik Alarm Sistemi (SAS) diye adlandırılan bir deprem erken uyarı sistemini içeren çok kapsamlı bir çalışma başlatmıştır (Epinosa-Aranda ve diğ., 1995; Goltz ve Flores, 1997). Guerrero sismik boşluğundan başkent'in bulunduğu yere sismik dalgaların ulaşması 100 sn lik bir zaman gerektirdiğinden SAS'ın amacı hükümet yetkililerini, hayati hizmet operatörlerini ve başkent sakinlerini magnitudü 6 dan büyük bir depremden kaynaklanan kuvvetli yer hareketi başkente ulaşmadan 50-70sn kadar önceden haberdar etmektir. 1991 yılında tamamlanan sistem Guerrero ve Mexico City arasında faaliyet gösteren sismik alıcılar ve iletişim sisteminden (radyo alıcı ve vericileri) ve alıcıları tetikleyerek halka otomatik olarak uyarıda bulunacak sinyalin gönderileceği başkentteki Sismik Kayıt Merkezi'nde konuşlandırılmış bir merkezi kontrol sisteminden ibaretti. Mexico City'nin güneybatısında Pasifik Okyanusu kıyılarının Guerrero olarak adlandırılan kesimindeki sismik istasyonlardan başkente bir deprem bilgisinin ulaşması 2 sn zaman almaktaydı. Sismik alarm şehir sakinlerine, okullara, ulusal acil müdahale ve enerji dağıtım ünitelerine ve ana ulaşım sistemi olan metroya sistemin özel alıcıları, ticari radyolar, ve sesli alarm mekanizmaları (sirenler) vasıtasıyla yayınlanmaktaydı. 14 Eylül 1995 tarihinde bilim adamlarının beklediği gibi Guerrero sismik boşluğunda başkent'in yaklaşık 300 km güneyinde magnitudü  $M=7.3$  olan bir deprem meydana gelmiş ve sismik erken uyarı sistemini harekete geçirmiştir. Depremin kuvvetli yer hareketi başkente ulaşmadan 72 sn evvel sistem başkentteki ticari radyolarda, sistemin özel alıcılarının yerleştirildiği okullarda ve sirenlerle sesli olarak bir sismik alarm yayınlamıştır. Sistem alıcılarının bulunduğu okullarda da boşaltım işlemi çok düzenli bir şekilde başarılı olarak tamamlanmıştır. Bunda Eğitim Bakanlığı yetkilileri kontrolünde her ay bir defa veya yerine göre bazen daha sıklıkla yapılan boşaltım eğitim ve tatbikatlarının büyük katkısı vardır ve bu da sistemin önemli unsurlarından biridir (Goltz ve Flores, 1997).

*Tayvan:* Günümüzde Tayvan'da gerçek-zaman sismolojisi amaçlı olarak hizmet eden ve oluşundan bir dakika sonra herhangi bir büyük depremin şiddet harita-

# Kyoshin Net (K-Net)

- İstasyonlar
- Ana Kontrol Merkezi
- 1 Nolu Yardımcı Kontrol Merkezi
- ▲ 2 Nolu Yardımcı Kontrol Merkezi



**Şekil 1.** Japonya'da faaliyet gösteren K-Net sismik ağının kuvvetli yer hareketi kayıt istasyonlarının dağılımını gösteren harita. 1000 adet istasyon, biri ana olmak üzere üç kontrol merkezi K-Net'i oluşturmaktadır (Kinoshita, 1998'den uyarlanmıştır).

**Figure 1.** The map showing distribution of strong-motion stations of K-Net seismic network of Japan. 1000 stations and three control centers form the K-Net (modified from Kinoshita, 1998).

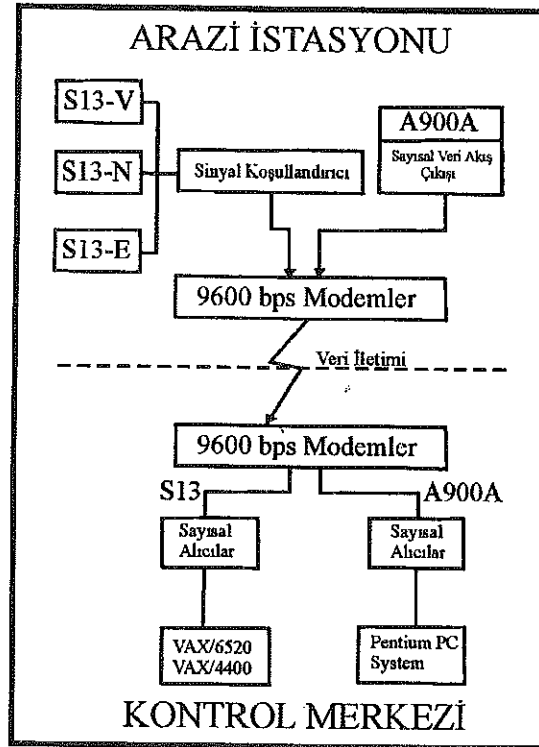
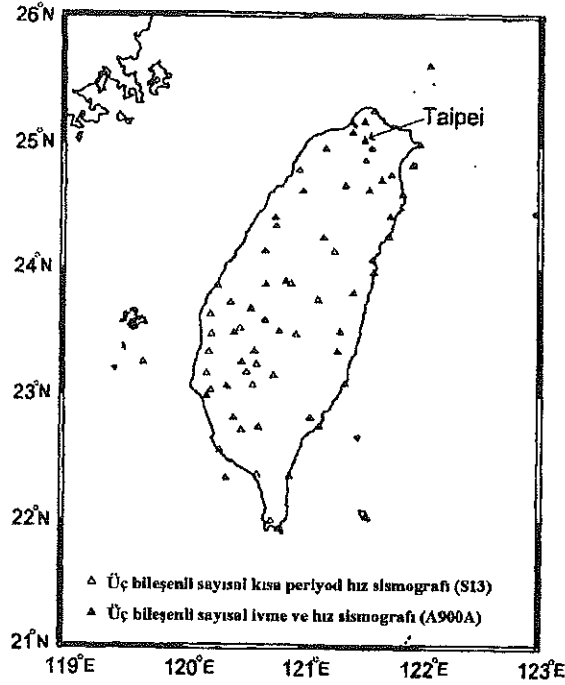
sını, etkin episantr ve etkin magnitudünü veren modern bir sismik istasyon ağı ve gerçek-zaman deprem bilgi akış sistemi mevcuttur (Teng ve diğ., 1997; Wu ve diğ., 1997). Burada etkin episantr en yüksek yer ivme konturunun merkezi ve etkin magnitud depremin serbestlenen toplam enerjisinden sadece hasar veren miktarını yansıtan bir büyüklüktür (Teng ve diğ. 1997). 1989 yılında ülke çapında 75 adet sayısal üç bileşenli kısa-periyot hız sismografından (Teledayn-Geotech S-13 1-Hz) oluşan bir sismik istasyon ağı oluşturulmuştur (Şekil 2). 1991 yılında ise yeni bir program kapsamında yukarıda bahsi geçen istasyonlardan 48'ine üç bileşenli sayısal ivme ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 2). İstasyonlarda alınan tüm sinyaller sayısal olarak başkent Taipei'deki bir merkez ağ vasıtasıyla milisaniyelerle ifade edilen bir zaman dilimi içinde gönderilmektedir (Şekil 2). Gerekli bilgisayar donanımına sahip bu merkezde istasyonlardan gelen sinyaller gerekli işlemlerden geçirilerek sinyalin ait olduğu depremin şiddet haritası ve episantr-magnitud bilgileri elektronik olarak ilgili birimlere iletilmektedir (Wu ve diğ., 1997). İster erken uyarı amaçlı olsun, ister hızlı bilgi edinme amaçlı olsun, sistem sadece hasara yol açacak kadar büyük depremleri dikkate alacak şekilde ayarlanmıştır. Tayvan'daki bu sismik ağ Tayvan'ın yoğun nüfuslu batı sahillerini de etkileyen 21 Eylül 1999 Chi-Chi depremi sırasında başarıyla kullanılmış ve sistemin sağladığı bilgiler yetkililerin ilk durum değerlendirmesinde anahtar rol oynamıştır (EERI, 1999). Bu sistem ile depremin hemen iki dakika sonrasında depremin yeri, magnitudü ve sarsıntı haritası yetkililere sistem tarafından otomatik olarak iletilmiştir (Şekil 3) (Ma ve diğ., 1999).

*Amerika Birleşik Devletleri:* Hızlı deprem bilgi işlem sistemleri 1980'li yıllardan itibaren Güney Kaliforniya'da United States Geological Survey (USGS) tarafından kullanılmaktadır (Kanamori ve diğ., 1997). 1990 yılında Los Angeles gibi metropolitan alanlarında deprem hasarını azaltmak ve büyük deprem dizileri süresince hızlı ve güvenilir deprem bilgileri sağlamak için üniversiteler, eyalet yönetimleri ve özel şirketler arasında yakın ilişkilerin zaruri olduğunun farkına varılmış ve California Institute of Technology (Caltech) ve USGS Pasadena ofisi, CUBE (Caltech/USGS Broadcast of Earthquake) projesini başlatmıştır. CUBE sistemi Southern California Seismic Network (SCSN) diye adlandırılan 250 istasyonluk bir sismograf ağına ve geniş bir dinamik aralığa sahip olan geniş-bantlı TERRAScope sayısal istasyonlarını da içeren 50 den fazla sayısal sismografın sağladığı bilgileri kullanılmaktadır. Bu sismograf ağları Caltech ve USGS tarafından birlikte işletilmektedir. CUBE sisteminde episantr, magnitud ve orijin zamanı gibi deprem bilgilerini proje katılımcılarına bir ticari veri iletim sistemi üzerinden gönderilebilmek

çin gerekli yazılım ve donanımlar ilave edilmiştir. Projenin katılımcıları da kendi faaliyet birimlerinde CUBE sisteminin gösterim programlarını yüklemişlerdir. Sadece büyük depremler değil belli bir magnitudün üzerindeki tüm depremler depremselliğin devamlı izlenmesi için rapor edilebilmektedir. CUBE sistemi 1991 Sierra Madre (M=5.8), 1992 Joshua-Tree (M=6.7), Landers (M=7.3) ve 1994 Northridge (M=6.7) depremleri sırasında etkin bir şekilde kullanılmıştır. 1993 yılında Berkeley'deki California Üniversitesi ve USGS'in Menlo Park'taki ofisi Kuzey Kaliforniya'da deprem bilgilerini yine hızlı ve güvenilir şekilde yayımlamak için REDI (Rapid Earthquake Data Integration) projesini başlatmıştır. Bu projenin üç önemli amacı vardı: (1) Kuzey ve Orta Kaliforniya'daki depremlerin episantr ve magnitudlerini gerçek-zaman yakınında (near real-time) belirlemek, (2) bu depremlerle ilişkili fayların kırılma özelliklerini tesbit etmek ve (3) önemli depremlerin hemen ardından yer hareketi dağılımını haritalamaktı (Gee ve diğ. 1996).

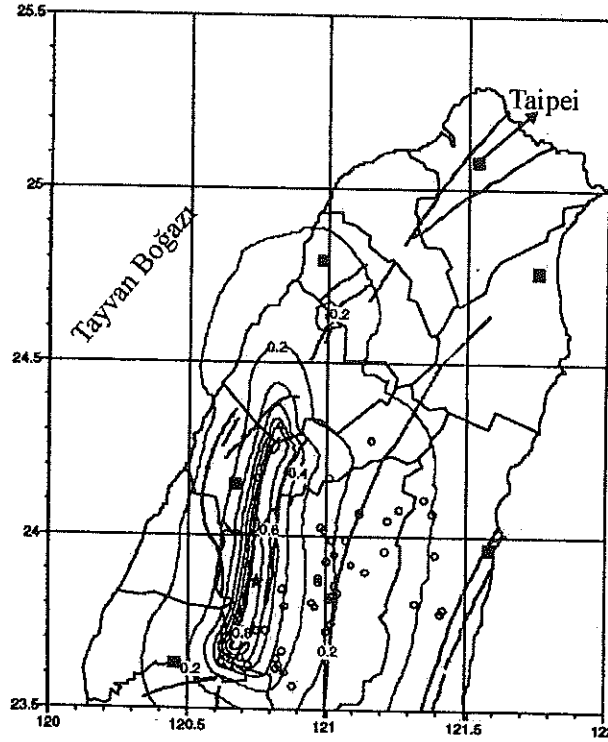
1994 Northridge depremi CUBE gibi sismik ağ sistemleriyle görüntülenen bir bölge olan Güney Kaliforniya'da meydana gelmiş olmasına rağmen gerek acil müdahale birimlerinin işini kolaylaştıracak gerçek-zaman deprem verileri, gerekse yapı mühendisleri ve diğer bilim adamları için lazım olan aletsel kuvvetli yer hareketi verilerinin sağlanması açısından önemli eksiklikler hissedilmiştir (Mori ve diğ., 1998). Bunun için de sismik ağ ile görüntüleme 1997'de başlayan ve TriNet projesi olarak adlandırılan düzenlemelere gidilmiştir. CUBE sisteminden elde edilen tecrübeleri de içeren bu yeni proje USGS, Caltech ve CDMG (California Division of Mines and Geology) işbirliğinde yürütülmekte olup her üç kurumun istasyon ağını birleştirmektedir (Şekil 4). TriNet projesinin üç temel amacı vardır (Mori ve diğ., 1998; Wald ve diğ., 1998; TriNet web sayfası, [http://www.trinet.org/trinet\\_desc.html](http://www.trinet.org/trinet_desc.html)):

Birincisi: Acil müdahale birimlerinin verimliliğini arttırmak için tahripkar bir depremin bir kaç dakika sonrasında yer sarsıntı hareketi verilerini sağlamak. Hasar dağılımını doğru bir şekilde elde etmek için depremin sebep olduğu yer hareketinin maksimum ivme ve hızının azimutal dağılımını gösteren haritalara ihtiyaç vardır. Bu haritalar tahripkar bir depremin ardından potansiyel olarak hasar verici sarsıntının dağılımının hızlı bir resmini verdiğinden acil müdahale çalışmalarının etkin bir şekilde yürütülmesinde, kayıp miktarları hakkında bir ön fikir elde edilmesinde ve medya aracılığıyla halkı bilgilendirme de kullanılabilirler. Sayısal iletişim ve hesaplama imkanlarında yakın geçmişte meydana gelen gelişmelerle bu haritalar günümüzde gerçek-zaman sismolojisi çalışmaları kapsamında depremin yaklaşık bir dakika sonrasında otomatik olarak



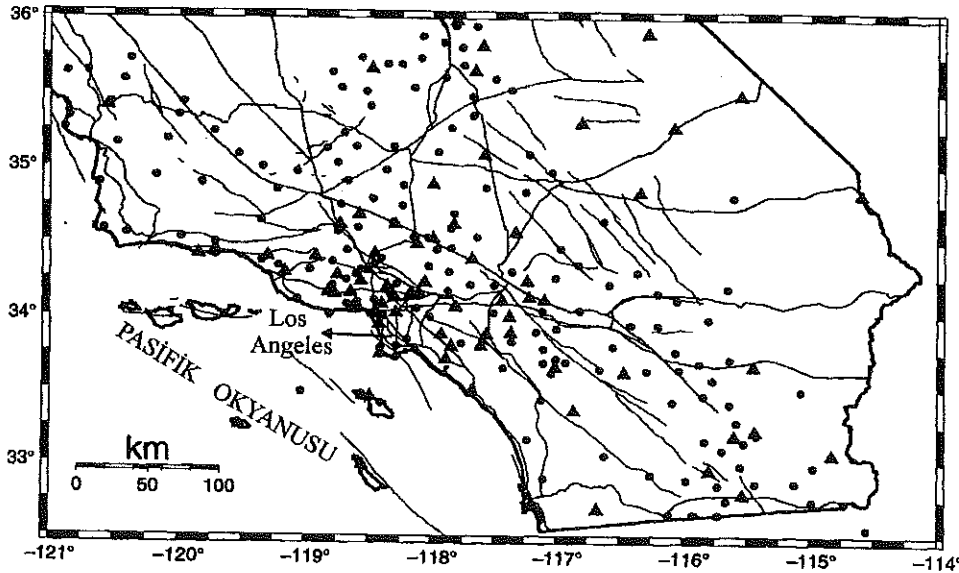
Şekil 2. Tayvan'da faaliyette olan gerçek-zaman sismik ağının istasyon dağılım haritası (üstte) ve sayısal veri iletim şeması (altta) (Teng ve diğ., 1997'den uyarlanmıştır).

Figure 2. The map showing distribution of stations (top) and the scheme of the digital data telemetry (bottom) of real-time seismic network operating in Taiwan (modified from Teng et al., 1997).



Şekil 3. Tayvan'da faaliyet gösteren gerçek-zaman sisteminin sağladığı 1999 Chi-Chi depreminin maksimum ivme haritası (EERI, 1999). Sistem depremin yer, magnitüd ve sarsıntı haritasını depremin iki dakika sonrasında yetkililere otomatik olarak iletmiştir (Ma ve diğ., 1999). Siyah yıldız depremin episantırını, içi boş daireler artçı depremleri ve siyah kareler önemli şehir merkezlerini göstermektedir. İvme değerleri gal birimindedir.

Figure 3. Peak ground acceleration shake map of the 1999 Chi-Chi earthquake provided by the real-time seismic system operating in Taiwan (EERI, 1999). The system provided location, magnitude and shake map of the earthquake to executive and people after 2 minutes of the origin time (Ma et al., 1999). Solid star, solid squares and open circles represent epicenter of the earthquake, major cities and aftershocks, respectively. Ground acceleration values are in gal.



Şekil 4. ABD'nin Kaliforniya eyaletinin güney kesiminde faaliyet gösteren TriNet gerçek-zaman sismik ağıının USGS ve Caltech tarafından işletilen istasyonları. Koyu üçgenler sayısal istasyonları ve içi dolu çemberler de analog istasyonları göstermektedir (Wald ve diğ., 1997).

Figure 4. Seismic stations incorporated by TriNet real-time seismic network operated by USGS and Caltech in southern California. Solid triangles and solid circles represent digital and analog stations, respectively (Wald et al., 1997).

üretilmekte ve kullanıcılara ulaştırılmaktadır. Örneğin, yukarıda değindiğimiz TriNet projesi kapsamında günümüzde Güney Kaliforniya'da magnitüdüleri 3'den büyük depremler için sarsıntı haritaları (maksimum ivme ve hız haritaları) ve bu haritalar temel alınarak aletsel şiddet haritaları üretilmektedir (Wald ve diğ., 1999a; 1999b). Elde edilen bu haritalar daha sonra otomatik olarak Web sayfasına (<http://www.trinet.org/shake>) aktarılmaktadır.

İkincisi: Bina inşaa yönetmeliklerinde gerekli iyileştirmeleri yapmak ve bilimsel araştırmaları geliştirmek için sismik yer hareketi verileri elde etmek.

Üçüncüsü: Bir prototip erken uyarı sistemi geliştirmek. Yer hareketi bilgisini hızlıca kayıt edip, analiz ederek kullanıcılara iletmek. Sismik dalgalar saniyede bir kaç km hızla yayıldıklarından deprem bilgilerinin hızlıca yorumlanması bir erken uyarı için zaruridir. Projenin tamamlanmasıyla birlikte 670 adet istasyondan elde edilen bilgiler rapor edilecek ve mühendisler ve sismologlar için çok iyi bir sismik veri tabanı oluşacaktır (Wald ve diğ., 1998). Bu veriler temel alınarak Los Angeles metropolitan bölgesi ve çevresi için frekans bağımlı yer etkisi haritaları (site-response maps) üretilmesi (Hartzell ve diğ., 1998) gibi önemli bilimsel çalışmalar yapılacaktır.

TriNet gerçek-zaman sismik istasyon ağı Güney Kaliforniya'da meydana gelen 16 Ekim 1999 Hector Mine depremi sırasında başarı ile hizmet vermiştir (USGS, SCEC and CDMG, 2000). Sistem 90 sn içinde depremin yerini ve magnitüdünü ve 4 dk içinde de depremin sarsıntı haritasını kullanıcılarına otomatik olarak elektronik ortamda iletmıştır ve verdiği bilgileri de gerektiğinde güncelleştirir.

## GERÇEK-ZAMAN SİSMOLOJİ SİSTEMLERİN-DEN ELDE EDİLEN BİLGİLERİN KULLANILMASI

Gerçek-zaman sismoloji sistemleriyle elde edilen bilgiler farklı amaçlarla kullanılabilir. Aşağıda bir kaç örnek verilecektir.

1. Kaliforniya'daki 1989 Loma Prieta depreminin ( $M=6.9$ ) ardından USGS depremin episantrından 100 km uzaklıkta yer alan yıkılmış otoyol köprülerinde temizlik yapan inşaat işçilerini artçı deprem sarsıntılarında korumak için bir erken uyarı sistemi kurmuştur (Bakun ve diğ., 1994). Büyük bir artçı deprem olduğunda bu sistem inşaat işçilerine potansiyel olarak tehlike arz eden yıkım alanını boşaltmaları için 20 sn'lik bir zaman sağlıyordu.
2. Kara ve demiryolları ve bunlar üzerindeki viyadük ve köprüler depremden en çok etkilenen yapılar arasında yer almaktadır. Depremin hemen ardından bu yapılar üzerindeki hasarlar gerçek-zaman deprem

bilgileriyle yönlendirilmiş arazi ekiplerince kısa sürede tesbit edilebilecektir. Örneğin, Pasadena yakınlarındaki 1991 Sierra Madre depremi sırasında Santa Fe demiryolu üzerindeki işçiler CUBE sisteminin verdiği rapor ile alışılmış teftiş işlemini 2 saat daha kısa bir sürede bitirmişlerdir (Kanamori ve diğ., 1997).

3. Bir depremin hemen ardından elektrik ve gaz dağıtım şirketlerinin arazide çalışan personelinin gidecekleri yerleri etkin bir şekilde tayin edebilmek için meydana gelmiş depremin büyüklüğünün ve yer hareketi şiddetinin dağılım haritasının dikkate alınması önem arz eder. Örneğin, 1994 Northridge depreminin büyük artçı depremlerinden biri bir enerji dağıtım şirketinin transformatörüne ciddi bir şekilde zarar vermiştir. CUBE sistemi hasar görmüş transformatörün tamamen hizmet dışı kalmasını önlemek için mühendislerin yeterince hızlı bir şekilde müdahalesine imkan sağlamıştır (Kanamori ve diğ., 1997). Benzer durum petrol boru hatları için de geçerlidir.
4. REDI sistemi 1998 yılı Ağustos ayında meydana gelen  $M_w=5.1$  büyüklüğündeki bir deprem sırasında başarıyla kullanılmış ve sistemin sağladığı bilgilerle San Francisco yarım adasında hizmet veren bir demiryolu şirketinin acil müdahale birimleri demiryolu kontrol edilirken sefer yapan 14 banliyö treninden sadece birinin durdurulmasına karar vermiştir (Uhrhammer ve diğ., 1999).

## DEPREMİN HEMEN SONRASI (NEAR REAL-TIME) SİSMOLOJİ

Buraya kadar bir depremin oluşumunu takip eden ilk bir dakikaya ve hatta bazı durumlarda erken uyarı niteliğinde olan on-yirmi saniye sonrasına değinilmiştir. Deprem hakkında gerçek-zaman olarak bilgi edinme işlemlerinin yanısıra önemli depremlerin on-yirmi dakika hatta bir kaç saat sonrasında yapılan ve deprem hızlı bilgi akış sistemlerinden yararlanarak gerekli yerlere ulaştırılan deprem analizleri de vardır. Bu analizler genel olarak meydana gelen depremin kaynağı ve fayın kırılma özellikleri hakkında kısa bir süre içinde bilgi edinmeyi amaçlar. Örneğin, yukarıda değindiğimiz Kuzey Kaliforniya'daki REDI sistemi magnitüdü  $M \geq 3.5$  olan depremlerin kaynak boyutlarını, odak mekanizmalarını ve derinliklerini ilk on dakika içinde otomatik olarak hesaplamakta ve hızlı bir deprem bilgi akış sistemi aracılığıyla sistem kullanıcılarına ulaştırmakta ve gerektiğinde güncellemektedir (Gee ve diğ., 1996). Sistemin gelecekte enerji yönelim (directivity), süre ve kayma dağılımını ve hatta GPS gözlemlerinden yerdeğiştirmeleri otomatik olarak belirlemesi planlanmaktadır (Gee ve diğ., 1996).



Güntümüzde önemli depremlerin kayıtları depremi takip eden bir kaç dakika içinde IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) gibi veri merkezlerinden Internet aracılığıyla temin edilebilmektedir. Depremin hemen sonrasında elde edilen kayıtlar kullanılarak çeşitli yöntemler yardımıyla büyük depremlerin kaynak parametreleri bulunmaktadır. Bunlara Harvard Üniversitesi tarafından yapılan CMT (Central Moment Tensor) çözümleri örnek olarak verilebilir.

Mühendislik uygulamalarında deprem hasarının bir ölçüsü olarak göz önüne alınan ve büyük bir depremin kayıtlarında rastlanılan S dalgası hız pulsunun (genelde 1m/sn veya daha hızlı yer hareketi) büyüklüğü ve bunun azimutal dağılımı depremin kırılma süreci ile doğrudan ilişkilidir (Hall ve diğ., 1995). Genel olarak tek taraflı kırılmada en büyük S dalgası genlikleri, kırılmanın yayıldığı ve ona dik doğrultuda gözlemlenir. Dolayısıyla potansiyel hasar da kırılmanın yayıldığı ve ona dik doğrultuda fazla olacaktır (Hall ve diğ., 1995). Kırılma iki taraflıysa S dalgası genliğinin etkisi azalacaktır. Bu yüzden depremdaki faylanmanın hiposantrdan itibaren tek taraflı (unilateral) mı yoksa çift taraflı (bilateral) mı yayıldığı depremin kuvvetli yer hareketini etkileyen bir özelliktir. Fayın kırılması ile ilgili bu tür bilgi depremin yapacağı hasarın nerede daha fazla olabileceğini belirler ve acil müdahale birimlerini bu konuda yönlendirebilir. Valesco ve diğ. (1994) büyük bir depremi takip eden bir veya iki saat içinde depreme sebep olan fay üzerindeki kayma dağılımını, fayın kırılmasının yönelimini, uzunluğunu, süresini ve kırılma süresince mekanizmasındaki değişimleri veren bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemin gerçek-zaman analizde rutin bir şekilde kullanılmasına Ammon ve diğ. (1994)'nin çalışması güzel bir örnek teşkil eder.

Büyük depremlerin kırılma düzlemi onlarca kilometreye varan ve hatta bazen 100 kilometreyi aşan uzunluklara sahiptir ve kırılmanın büyüklüğü ve dolayısıyla serbestlenen enerji miktarı da bu düzlem üzerinde değişkendir. Pürüz (asperite) olarak adlandırılan ve fay düzlemi üzerinde kırılmanın göreceli olarak büyük olduğu yer veya yerler yüksek frekanslı deprem enerjisinin de kaynağıdır ve büyük kırılma uzunluğuna sahip depremler için asperitelere yakın konumda olan yerlerde hasarın daha da fazla olması muhtemeldir. Buna yerel jeolojinin etkisi de (site effect) eklendiğinde depremin kuvvetli yer hareketi merkezi (strong-motion centroid) çoğu zaman geleneksel olarak bulunan odakdan yani kırılmanın başladığı noktadan farklı çıkar (Kanamori, 1993). Bu nedenle depremin hemen sonrasında fay düzlemi üzerinde kayma dağılımının bilinmesi önem taşıyabilir. Mendoza (1996) dalma-batma kuşaklarında mey-

dana gelen büyük depremlerde fay üzerindeki kayma dağılımını P dalga şekillerinin ters çözümü ile yaklaşık iki saat sonrasında veren rutin bir sonlu-fay analiz yöntemi önermiştir. Böyle bir sonlu-fay analizi ile depremin kırılma düzlemi üzerindeki enerji serbestlenmesinin ayrıntılı bir resmi elde edilmektedir. Depreme neden olan fayın boyutlarının ve bu fay üzerindeki kaymanın uzaysal dağılımının hızlıca elde edilmesi kırılan fayın yakınında kırılacak durumdaki faylar üzerindeki gerilme yüklemesinin hesaplanması (Nalbant ve diğ., 1996) gibi deprem tehlike analizlerinde önemlidir.

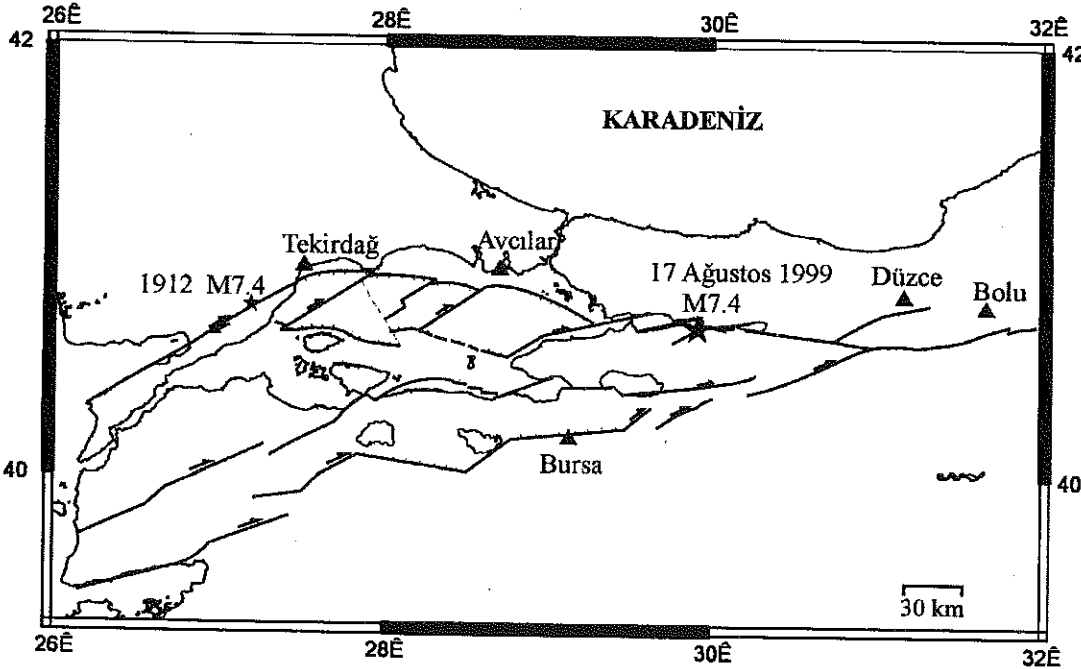
Bunların yanısıra deprem kayıplarının sanal ortamda depremi takip eden bir kaç saat içinde hesaplanması çalışmaları da mevcuttur ve Kaliforniya'daki 1994 Northridge depreminde ilk olarak kullanılmıştır (Goltz, 1996; Eguchi ve diğ., 1997; Kircher ve diğ., 1997). Gerçek gerçek-zaman deprem bilgi akış sistemlerinde meydana gelen gelişmeler ve gerekse bilgisayar ve Coğrafik Bilgi Sistemlerindeki (Geographic Information System, GIS) ilerlemeler çeşitli deprem senaryoları için ve en önemlisi de gerçek-zaman' da parametreleri (magnitüd ve episantr) verilen gerçek bir deprem için gerçek-zaman yakını kayıp hesaplamalarını mümkün kılmıştır. Bu amaçla ABD'de EPEDAT (The Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool) adında gerçek-zaman deprem verilerini, bina envanterlerini, nüfus miktarlarını ve iletişim, enerji ve diğer yaşamsal hatlara ait bilgileri kullanıp hasar ve kayıp hesabı yapan GIS tabanlı bir yazılım sistemi geliştirilmiştir (Eguchi ve diğ., 1997). EPEDAT yazılımının temel giriş verilerini yukarıda bahsedilen CUBE gibi gerçek-zaman deprem bilgi akış sistemlerinden sağlanan depremin magnitüdü, episantr koordinatları ve eğer mevcut ise maximum ivme değerleri oluşturmaktadır. Yazılım, kendi içeriğinde sayısal olarak bulunan ilgili bölgenin fay haritalarından yararlanarak depreme neden olan fayı ve çeşitli modeller yardımıyla da kırılma uzunluğunu belirler. Yer hareketlerinin dağılımı kırılan fayın uzaklığına bağlı olduğundan bu bilgiler önemlidir. Bunun ardından eşşiddet haritası elde edilen verilerden ve amprik bağıntılardan üretilerek hasar ve can kaybı miktarı yine yazılımın içeriğinde yer alan kullanıldığı bölgeye ait bina envanterleri, nüfus dağılımı ile yoğunluğu ve yaşamsal hat verilerinden yararlanılarak hesaplanır. 1994 Northridge depreminde EPEDAT yazılımıyla hesaplanan veriler yetkililerce depremi takip eden 24-48 saat süresince acil müdahale faaliyetleri için kullanılmış ve yine yazılım ile hesaplanan maddi kayıp miktarı merkezi hükümetin bölgeye yapılacak afet yardımı miktarını belirlemesinde temel teşkil etmiştir (Eguchi ve diğ., 1997).

## TÜRKİYE'DE GERÇEK-ZAMAN SİSMOLOJİSİNİN ÖNEMİ

Türkiye tektonik açıdan aktif bir bölgede bulunduğundan tahripkar depremlerin sık tekrarlandığı ülkelerden birisidir. Bununla birlikte depremlerden korunma ve hasarlarının azaltılması için deprem tehlikesiyle orantılı önlemlerin alındığını söylemek mümkün değildir. 27 Haziran 1998 Adana-Ceyhan, 17 Ağustos 1999 İzmit, 12 Kasım 1999 Düzce ve diğer depremlerde karşılaşılan hasarların boyutları ülkemizdeki yapıların depremlere karşı yeterince dayanıklı olmadığını ve insanların böyle felaketlere karşı yeterince eğitilmemiş olduklarını göstermiştir. Bu nedenle gerçek-zaman sismolojisi çalışmaları ülkemiz için de çok önemlidir. 1993 yılından beri Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi ile bir Japon hükümet kuruluşu arasında ortak yürütülen bir proje ile Kuzey Anadolu Fay'ının orta kısmını çevreleyen ve 9 ili kapsayan ve yukarıda bahsedilen gerçek-zaman sismolojisi sistemlerine benzer amaçlar taşıyan bir çalışma yürütülmektedir (<http://www.deprem.gov.tr/edprc/edvce.html>). Herne kadar, yukarıda örneklerine değinilen türlerde bir gerçek-zaman sismolojisi çalışması Türkiye'nin şu andaki ekonomik durumu açısından mümkün görünmese de bu çalışmalara kayıtsız kalınması ve gelecekte de bu tür çalışmaların yapılamaması anlamına gelmemektedir. Nitekim, 1999 İzmit depreminin ardından yaşananlar ger-

çek-zaman deprem bilgi akış sistemlerine olan ihtiyacı bir kez daha su yüzüne çıkarmış ve hatta yazılı ve görsel basında özellikle Japonya'daki bu tür sistemler hakkında haberler yer almıştır.

1999 İzmit ve Düzce depremlerinde yaşananlar göstermiştir ki ülkemizde bir gerçek-zaman sismolojisi sisteminin oluşturulmasına hem ekonomik hem de verimlilik açısından en uygun yer Marmara Bölgesidir. Türkiye'nin en gelişmiş, en sanayileşmiş ve nüfus yoğunluğunun en fazla olduğu Marmara Bölgesi sınırları içinde aktif, büyük depremler üretebilen Kuzey Anadolu Fayı'nın batı bölümü üç kol halinde uzanmaktadır (Şekil 5). Dolayısıyla bölgede yüksek bir deprem tehlikesi mevcuttur ve son yaşanan depremler gelecekteki deprem tehlikesi için bir somut kanıt olarak algılanmalıdır. Yine spekülasyonu çokça yapılan bir konu da bölgenin en büyük ve en gelişmiş şehri İstanbul'un meydana gelebilecek bir depremden nasıl etkileneceğidir. İstanbul ve yakın çevresinde tarihte bazıları İstanbul'da hasara da yol açan bir çok büyük deprem meydana gelmiştir ve yapılan çalışmalar gelecekteki deprem tehlikesinin de yüksek olduğuna işaret etmektedir (Nalbant ve diğ., 1998; Hubert-Ferrari ve diğ., 2000). İzmit depreminin episantırı İstanbul'a yaklaşık 80 km uzaklıkta olmasına rağmen şehrin bazı semtlerinde hasar ve can kaybı meydana getirmesi İstanbul'un özellikle KAF'nın Marmara Denizi içinde uzanan kolları üzerinde sahile on-yirmi km uzak-



Şekil 5. Marmara bölgesi içinde Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun uzanımını ve 1912 Mürefte-Şarköy ve 1999 İzmit depremlerinin yerlerini gösteren harita. Faylar Wong ve diğ., 1995'den yararlanılarak çizilmiştir.  
Figure 5. The map showing extent of the North Anatolian Fault Zone in the Marmara Region and location of epicenters of 1912 Mürefte-Şarköy and 1999 İzmit earthquakes. Faults are plotted from Wong et al., (1995).

lıkta, meydana gelebilecek depremler karşısındaki zayıflığının bir göstergesidir. Gelecekte İstanbul'u etkileyecek tahripkar bir deprem sadece bölgenin değil, aynı zamanda tüm ülkenin sosyal ve ekonomik hayatını etkileyeceğinden böyle bir depremi en az zararla atlama için şimdiden tedbirlerin alınması gerektiği açıktır. İstanbul'un bu hassas konumundan dolayı İstanbul Büyükşehir Belediyesi şehir merkezi ve yakın çevresinin deprem etkinliğini ve zemin özelliklerini incelemek amacıyla 6 istasyondan oluşan bir deprem ağını yakın geçmişte hizmete sokmuştur (İlkışık ve diğ., 1999). Ancak en etkin tedbirlerden biri de bölge çapında yukarıda dünyadaki örneklerine değinilen bir gerçek-zaman sismolojisi sisteminin oluşturulması olacaktır. Böyle bir sistem kapsamında bölge içinde fayların uzanımı da göz önüne alınarak yoğun bir sabit istasyon ağı oluşturulmalı ve bu istasyonlardan alınan bilgiler devamlı olarak bir gerçek-zaman veri iletim hattıyla bir kontrol merkezine iletilmelidir. Bu kontrol merkezi büyük bir olasılıkla İstanbul olabilir ve gerekli bilgisayar, yazılım ve uzman alt yapısının oluşturulmuş olduğu bu kontrol merkezinde veriler yine gerçek-zaman'da ve otomatik olarak gerekli veri işlem basamaklarından geçirilerek bilgiye (magnitüd, episantr koordinatları ve maksimum ivme haritaları gibi) çevrilmelidir. Hasar yapması muhtemel, belirli bir magnitüdden büyük depremler için bu bilgiler yine real time'da ve otomatik olarak sistemin alıcılarına, merkezi hükümet yetkililerine ve depremin olduğu il veya illerin valilikleriyle ilgili kamu kuruluşlarına (Sivil Savunma, Karayolları, Demiryolları, İGDAŞ ve Tedaş gibi) iletilmeli ve maksimum ivme haritalarından yararlanarak bir hasar ve can kaybı senaryosu oluşturularak acil müdahale birimleri uygun bir şekilde dağıtılmalıdır. Depremi takip eden ilk bir kaç dakika içinde belli bir magnitüd değerinden büyük depremler için maximum ivme haritaları (sarsıntı haritaları) oluşturulması ve kuvvetli yer hareketi merkezinin tesbit edilmesi geniş bir alet ağına sahip sistemin ana gayelerinden birini oluşturmalıdır. Küçük depremler de dahil olmak üzere elde edilen bilgiler gerek internet ve gerekse basın yayın organları aracılığıyla anında kamuoyuna duyurulmalıdır. Üniversitelerle de işbirliği yapılarak deprem olması beklenen yerler araştırılmalıdır. Tesbit edilen yerlere gerekirse ilave mobil istasyonlar da kurulmalı ve mikrodeprem etkinliği daha duyarlı izlenmelidir. Çok önemli bir nokta da sistem tarafından sağlanacak çok sayıda verinin bilimsel çalışmalarda kullanılmak üzere Japonya (Kinoshita, 1998) ve Amerika Birleşik Devletleri'nde olduğu gibi (Wald ve diğ., 1998) sınıflanarak araştırmacıların kullanımına sunulması ve araştırmalar önündeki büyük bir engel olan veri eksikliğinin giderilmesi olacaktır. Böylece oluşacak geniş kapsamlı bir veri bankası

ile yerel jeolojinin deprem kuvvetli yer hareketi üzerine etkisini gösteren haritaların üretilmesi için gerekli çalışmalar yapılabilir ve bu çalışmaların sonuçları ışığında bina inşaat yönetmeliklerinde gerekli düzenlemeler yapılabilir. Ayrıca, küçük depremlerin yer ve derinlikleri daha duyarlı olarak tesbit edilerek faylar üzerindeki sismik ve asismik bölgeler belirlenebilir, sismik aktivitenin derinlikle değişimleri ayrıntılı bir şekilde tesbit edilerek fay üzerinde deprem üretme potansiyeline sahip yerler ve karakteristik depremler için önem arzeden fay parçalarının sınırları belirlenebilir (Oppenheimer ve diğ., 1990). İzmit depreminden sonra gözlerin Marmara Denizi'nin altındaki faylara çevrilmesi bu faylar üzerindeki mikrodepremselliğin daha detaylı incelenmesinde gerçek-zaman olarak faaliyet gösteren deniz dibi sismograflarına olan ihtiyacı da göstermektedir. Ancak bu tür aletler alınsa dahi en etkin bir şekilde kullanımı için deniz dibindeki fayların konumlarının ve uzanımlarının çok ayrıntılı olarak tesbit edilmesi gereklidir. Bunların yanısıra, oluşturulacak bir gerçek-zaman sismik sisteminin ayrıntılarının tesbit edilmesi sismologların, elektronik ve bilgisayar mühendislerinin kapsamlı bir işbirliğini gerektirecektir.

Uygun durumlarda deprem yer hareketinin erken uyarı ihtimali de söz konusu olacaktır. Örnek olarak İzmit depreminin yaklaşık 17 km derinde olan odağının İstanbul'un en büyük hasar ve can kaybının gözlemlendiği Avcılar ilçesine uzaklığı yaklaşık 107 km'dir (Şekil 5). Depremin episantrında yer alan Gölcük'de gerçek-zaman deprem hızlı bilgi akış sistemine bağlı bir istasyon bulunması halinde kaynaktan çıkan P dalgasının bu istasyona ulaşması, P dalga hızı 6 km/sn alınırsa, 2.5 sn sürecek ve yıkıcı S dalgasının Avcılar'a ulaşması da, S dalga hızı 3.5 km/sn alınırsa, 30.5 sn sürecektir. Gölcük'teki istasyonda algılanan yer hareketinin kontrol merkezine ulaşması ve bilgisayarlarda otomatik olarak veri işleminden geçirilmesinin de yaklaşık 2 sn alacağı düşünülürse Avcılar'a yıkıcı S dalgalarının ulaşmasından 26 sn önce alarm verilmesi mümkün olabilecektir. Benzer şekilde erken uyarı süresi Tekirdağ için 53 sn'ye ve Bolu içinde 42 sn'ye çıkmaktadır (Şekil 5). Doğalgaz kullanılan ve yakın gelecekte Metro ulaşımının yaygınlaşacağı İstanbul'da bu erken uyarı süresi içinde doğalgaz vanaları kapatılabilir ve Metro araçları durdurulup diğer gerekli önlemler alınabilir. Benzer bir erken uyarı süresi 1912 Mürefte-Şarköy depremi için de hesaplanabilir (Şekil 5). Özellikle, İstanbul ile Sakarya arasında yoğun olarak bulunan sanayi tesislerinin son yaşanan depremden fazlaca etkilenmeleri göz önüne alındığında 5-10 sn'lik bir erken uyarı süresi bu tesislerdeki makinelerin durdurulması, bilgisayarların kapatılması ve diğer bazı acil tedbirlerin alınması için yeterli olabilecektir.

Deprem zararlarını azaltmak için kurulacak böyle bir sisteme ihtiyaç duyan bazı kamu ve özel sanayi kuruluşlarının mevcut olduğu düşünülürse sistemin finansmanı ve idamesinde bu kuruluşların katkı sağlayabileceği açıktır. Nitekim, Meksika'daki sismik alarm sistemi özel bir kurum tarafından finanse edilmiştir (Kanamori ve diğ., 1997). Dikkat edilmesi gereken bir husus da erken uyarı olasılığının halkın uyarılması anlamında ele almaktan çok kamu ve özel kuruluşlar için bir erken uyarı anlamında ele alınmasıdır. Çünkü, bu şekilde bir erken uyarının başarısı süreden ziyade halkın eğitimine bağlıdır ve panik oluşturma ihtimali göz önüne alınarak halkın herhangi bir erken uyarıya karşı vereceği tepkiler ayrıntılı olarak çalışılmalıdır. Örnek olarak, Meksika'daki sismik alarm sisteminde sağlanan erken uyarılara halkın verdiği tepkiler sosyolojik olarak da incelenmekte, daha önce doğal afetlerin önceden haber verilmesi karşısında insanların gösterdiği tepkilerden edinilmiş tecrübelerden de yararlanılmaktadır ve özellikle okullarda düzenli olarak verilen bir sismik alarm için boşaltma tatbikatları yapılmaktadır (Goltz ve diğ., 1997). Böyle bir gerçek-zaman sistemin Türkiye'de de oluşturulması halinde Türk halkı için de bu türde sosyolojik çalışmaların yapılması gereklidir.

## SONUÇLAR

Geçmişte yapılan çalışmalar, depremlerin çok düzensiz ve karmaşık bir süreç ile oluştuğunu bu nedenle yer ve zamanlarının önceden kesin olarak kestirilemesinin bugünkü teknoloji ve bilgi birikimi ile çok zor olduğunu göstermiştir. Bu yüzden günümüzdeki çalışmalar depremlerin yer ve zamanlarını önceden belirlemeye çalışmaktan çok onlara karşı nasıl korunulabileceği ve zararlarının nasıl azaltılabileceği yönünde yoğunlaşmaya başlamıştır. Böylece, günümüzde genel olarak gerçek-zaman sismoloji olarak adlandırılan ve veri iletim ve hesaplama teknolojilerindeki en son gelişmeleri kullanan deprem hızlı bilgi işlem ve iletim sistemleri ortaya çıkmıştır. Bu sistemlerden elde edilecek geniş kapsamlı bilgiler depremlerin yer ve zamanlarını önceden kesin olarak belirleme çalışmalarında da kullanılabilir. Hatta, depremler önceden belirlenebilseler bile bu sistemlere ihtiyaç duyulacaktır. Bu sistemlerin örnekleri ABD, Japonya, Tayvan ve Meksika gibi ülkelerde mevcuttur. 1995 Northridge (ABD) depreminde böyle bir sistem kapsamlı olarak kullanılmıştır. 1995 Guerrero (Meksika) depreminde ise erken uyarı amacıyla kullanılmıştır. Japonya gibi hem ekonomik hem de sismoloji alanında gelişmiş bir ülkede yaşanan 1994 Kobe depreminde merkezi hükümetin depremin etkilerinin çok büyük olduğunu ancak depremden 24 saat sonra farkına varabilmesi orta ve büyük depremlerin sık olarak

yaşandığı ülkeler için bu tür sistemlere olan ihtiyacın açık örneğidir. En güncel örnek ise Türkiye'de 17 Ağustos 1999 tarihinde yaşanan İzmit depremidir. Depremin hemen sonrasında telefon hatlarının kilitlenmesi ve ulaşımın tıkanmasıyla yaşanan felaketin boyutlarının tesbitinde gecikmeler olması bu tür sistemlerin Türkiye ve özellikle Türkiye'nin ekonomik olarak en gelişmiş bölgesi olan Marmara Bölgesi için gerekli olduğunu açıkça göstermiştir.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışmanın gelişimi esnasında yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Ali Pınar'a ve Araştırma Görevlileri Eşref Yalçınkaya ve İsmail Demir'e teşekkür ederiz.

## SUMMARY

To minimize the immediate impact of large earthquakes in the earthquake prone modern urban areas, a new approach called the real-time seismology has been developed with the use of most advanced seismic receivers, data acquisition and telemetry systems in seismology. Real-time seismology systems provide a rapid estimation of the the earthquake parameters (origin time, epicentral location and magnitude) and the ground motion distribution or shake maps to its users to effectively organize recovery efforts and emergency response and to minimize social disruption after large earthquakes. Real-time seismology systems are currently operating in the earthquake prone countries such as Japan, United States, Taiwan and Mexico and a prototype system under development stage in Romania. These systems successfully performed after the 1995 Guerrero earthquake in Mexico, 1994 Northridge and 1999 Hector-Mine earthquakes in United States and 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan.

In this study we examine the global development of the real-time seimology systems and their configurations, how they perform after the most recent large earthquakes and speculate on its necessity for Turkey.

## DEĞİNİLEN BELGELER

**Ammon, C.J., Lay, T., Velasco, A.A. and Vidale, J.E., 1994,** Routine estimation of earthquake source complexity: the 18 October 1992 Colombian earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 1266-1271.

**Bakun, W.H., Fischer, F.G., Jensen, E.G., ve VanShack, J., 1994,** Early warning system for aftershocks, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 359-365.

**EERI, 1999,** The Chi-Chi, Taiwan earthquake of September 21, 1999, *Vol. 33, N.12, p5.*

- Eguchi, R.T., Goltz, J.D., Seligson, H.A., Flores, P.J., Blais, N.C., Heaton, T.H. ve Bortugno, E., 1997,** Real-time loss estimation as an emergency response decision support system: The early post earthquake damage assesment tool (EPEDAT), *Earthquake Spectra*, 13, 815-832.
- Epinosa-Arvea, J.M., Jimenez A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Inostroza, M. ve Maldonado, S., 1995,** Mexico City seismic alert system, *Seism. Res. Lett.*, 66, 42-52.
- Gee, L.S., Neuhauser, D.S., Dreger, D.S., Pasyanos, M.E., Uhrhammer, R.A. ve Ramanowicz, B., 1996,** Real-time seismology at UC Berkeley: The rapid earthquake data integration system, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 936-945.
- Goltz, J.D., 1996,** Use of loss estimates by government agencies in the Northridge earthquake for response and recovery, *Earthquake Spectra*, 12, 441-455.
- Goltz, J.D. ve Flores, P.J., 1997,** Real-time earthquake early warning and public policy: A report on Mexico City's sistema de alerta sismica, *Seism. Res., Lett.*, 68, 727-733.
- Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. ve Wald, D.J., 1995,** Near-source ground motion and its effect on flexible buildings, *Earthquake Spectra*, 11, 569-605.
- Hartzell, S., Harmsen, S., Frankel, A., Carver, D., Cranswick, E., Meremonte, M. ve Micheal, J., 1998,** First generation site-response map for the Los Angeles region based on earthquake ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 463-472.
- Heaton, T.H., 1985,** A model for a seismic computerized alert network, *Science*, 228, 987-990.
- Hubert-Ferrari, A., Barka, A., Jacques, E., Nalbant, S.S., Meyer, B., Armijo, R., Topponnier, P. ve King, G.C.P., 2000,** Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 İzmit earthquake, *Nature*, 404, 269-273.
- İlkışık, O.M., Taymaz, Ö., Yücel, H., Alptekin, Ö., Baş, M., Karaoğlu, H., Akarsu Taybars, N., ve Saryoğlu, Enver, 1998,** İstanbul'da zemin ve deprem incelemeleri, *Kent Yönetimi ve Çevre Politikaları*, Cilt 2, 179-189, *Kent Yönetimi İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu 99*, 17-19 Şubat 1999, İstanbul.
- Kanamori, H., 1993,** Locating earthquakes with amplitude: Application to real-time seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 264-268.
- Kanamori, H., Hauksson, E. ve Heaton, T., 1997,** Real-time seismology and earthquake hazard mitigation, *Nature*, 390, 461-464.
- Kinoshita, S., 1998,** Kyoshin net (K-Net), *Seism. Res. Lett.*, 69, 309-332.
- Kircher, A., Ritherman, R.K., Whitman, R.V., ve Arnold, C., 1997,** Estimation of earthquake losses to buildings, *Earthquake Spectra*, 13, 703-720.
- Ma, K.F., Lee, C.T. ve Tsai, Y.B., 2000,** The Chi-Chi, Taiwan earthquake: Large surface displacements on an island thrust fault, *EOS*, 80, 605.
- Mendoza, C., 1996,** Rapid derivation of rupture history for large earthquakes, *Seism. Res. Lett.*, 67, 19-26.
- Mori, J., Kanamori, H., Davis, J., Hauksson, E., Clayton, R., Heaton, T., Jones, L., Shakal, A. ve Porcella, R., 1998,** Major improvements in progress for Southern California earthquake monitoring, *EOS*, 79, 217.
- Nalbant, S.N., Barka, A.A. ve Alptekin, Ö., 1996,** Failure stress change caused by the 1992 Erzincan earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1561-1564.
- Nalbant, S.N., Barka, A. ve Alptekin, Ö., 1998,** İstanbul ve deprem, *Bilim ve Teknik*, Mayıs 1998, sf.64-66.
- Oppenheimer, D.H., Bakun, W.H. ve Lindh, A.G., 1990,** Slip partitioning of the Calveras Fault, California, and prospects for future earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 95, 8483-8498.
- Teng, T., Wu, L., Shin, T.C., Tsai, Y.B. ve Lee W.H.K., 1997,** One minute after: Strong-motion map, effective epicenter and effective magnitude, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 1209-1219.
- Toksöz, M.N., Dainty, A.M. ve Bullitt, J.T., 1990,** A prototype earthquake warning system for strike slip earthquakes, *Pageof*, 133, 475-487.
- Uhrhammer R., Lind S. G., Murray M., Dreger, D. ve Romanowicz, B., 1999,** The MW 5.1 San Juan Bautista, California earthquake of 12 August 1998, *Seism. Res. Lett.*, 70, 10-18.
- USGS, SCEC ve CDMG, 2000,** Scientists from United States Geological Survey, Southern Californiya Earthquake Center and California Division of Mines and Geology, Preliminary report on the 16 October 1999, M7.1 Hector Mine, California, earthquake, *Seism. Res., Lett.*, 71, 11-23.
- Wald, L.A., Jones L.M., Schwarz, S. ve Hutton, L.K., 1998,** The 1997 Southern California seismic network bulletin, *Seism. Res., Lett.*, 69, 532-549.
- Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., Kanamori, H., Scrivner, C.W. ve Worden, C.B., 1999a,** Trinet "Shake Maps": Rapid generation of peak ground mo-

- tion and intensity maps for earthquakes in southern California, *Earthquake Spectra*, 15, 537-555.
- Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H. ve Kanamori, H., 1999b**, Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California, 15, 557-564.
- Wenzel, F., Oncescu, M.C., Baur, M., Fiedrich, F. ve Ionescu, C., 1999**, An early warning system for Bucharest, *Seism. Res., Lett*, 70, 161-169.
- Velasco, A.A., Ammon, C.J. ve Lay, T., 1994**, Empirical green function deconvolution of broadband surface waves: Rupture directivity of the 1992 Landers, California (MW =7.3), earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 735-750.
- Vogel, A., Yueqing, Z., ve Kahnemund, L., 1998**, Earthquake dynamic control networks: Surveillance of earthquake generation, alert warning and rapid emergency control., *Earthquake Prognostic World Forum "Seismic Safety of Big Cities"*, İstanbul, September, 21-25, 1998.
- Wong, H.K., Lüdman, T., Uluğ, A. ve Görür, N., 1995**, The sea of Marmara: A plate boundary in an escape tectonics regime, *Tectonophysics*, 244, 231-250.
- Wu, Y.M., Shin, T.C., Chen, C.C., Tsai, Y.B., Lee, W.H.K. ve Teng T. L., 1997**, Taiwan rapid earthquake information release system, *Seism. Res., Lett*, 68, 931-943.

**Makalenin geliş tarihi** : 29.11.2000  
**Makalenin yayına kabul tarihi** : 16.04.2001  
**Received** : November 29, 2000  
**Accepted** : April 16, 2001