Japonya' daki Deprem ve Tsunami Erken Uyarı Sistemleri ve 11 Mart 2011 "Büyük Doğu Japonya Afeti"ndeki Performansları

G. Yenilmez

Uzman Yardımcısı, Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, Deprem Bilgi Sistemleri Çalışma Grubu, Ankara
guler.yenilmez@afad.gov.tr

ÖZET:

Japonya Pasifik Okyanusuna kıyısı olan Tohoku bölgesinde 11 Mart 2011 Cuma günü saat 14:46 (JST)' da 9.0 büyüklüğünde ve 32 km derinliğinde meydana gelen deprem ve ardından oluşan tsunami ile tarihinin en büyük afetlerinden birini yaşamıştır. Yaşanan yıkıcı olay Japonlar tarafından **Büyük Doğu Japonya Afeti (Higashi Nihon Daishinsai)** olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada Japonya' daki deprem ve tsunami erken uyarı sistemlerinin çalışma prensipleri incelenmiş ve tanıtılmıştır. Ayrıca bu sistemlerin 11 Mart 2011 tarihinde meydana gelen depremde sergiledikleri performanslar değerlendirilmiştir. Deprem erken uyarı sistemi yıkıcı olan dalga kıyıya ulaşmadan yaklaşık bir dakika önce başarılı bir şekilde çalışarak uyarı vermiştir. Ancak deprem ve tsunamiden sonra kayıt alınamayan istasyonlar olduğundan ilk üç saatte meydana gelen artçı depremlerde deprem erken uyarı sistemi çalışmamıştır. Tsunami uyarısı ise deprem meydana geldikten üç dakika sonra en yüksek seviyede verilmiş ve en az 3 m yüksekliğindeki bir "büyük tsunami" olarak nitelendirilmiştir. Ayrıca tsunami uyarısı Pasifik Okyanusuna kıyısı olan ülkelerde de verilmiş ve dalgalar bu ülke kıyılarına ulaşmadan önce gerekli önlemler alınmıştır. Ancak tsunaminin yüksekliği tahmin edilenden fazla olduğu için ve deprem uyarısı da yeteri kadar geniş bir bölgede verilmediği için depremin ve tsunaminin yol açtığı hasar oldukça büyük olmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Japonya, Deprem, Tsunami, Erken Uyarı Sistemi

1. DEPREM ERKEN UYARI SİSTEMİ

Erken uyarı sistemi depremin meydana getirdiği zararları azaltan, depremin merkez üssüne en yakın istasyonlarda gözlenen sismik dalga verilerini kullanarak depremin büyüklüğü ve hiposentrını tahmin eden ve S dalgasının varışından önce beklenen sismik şiddetleri veren bir sistemdir.

Deprem erken uyarı sistemleri sismometreler, yüksek hızlı iletişim sistemleri ve bilgisayarlardan meydana gelir. Deprem erken uyarı sistemini oluşturan, bir bölgede yerleştirilmiş olan sismometrelerin dizilimi depremi algıladıktan sonra yüksek hızlı iletişim sistemleri ve bilgisayarlar sismometrelerdeki değerleri toplar ve bilgisayarlar aracılığıyla depremin büyüklüğü ve yeri belirlenir. Büyük bir depreme ait veriler kaydedilirse, alarmlar etkilenmesi muhtemel bölge boyunca uyarı verebilir. Kısa da olsa bu gibi uyarılar pek çok insanın daha güvenli yerlere saklanmaları veya gitmeleri ve trenlerin, fabrikaların ve asansörlerin durdurulması için yeterli olabilir.

Dünya genelinde deprem erken uyarı sistemi bulunan 9 ülke vardır. Bu ülkelerden Japonya, Türkiye, Meksika, Romanya ve Tayvan aktif olarak sistemi kullanmakta ve uyarılar vermektedir. Sistemin test aşamasında olduğu ülkeler ise Çin, İtalya, Kaliforniya, İsviçre' dir. Ayrıca Hawaii' deki Pasifik Tsunami Uyarı Merkezi uluslar arası çapta tsunami uyarıları vermektedir.

1.1. Deprem erken uyarı sisteminin çalışma prensibi

Bir yerde deprem meydana geldiğinde depremin meydana geldiği yere en yakın istasyon tarafından deprem dalgalarından ilki olan P dalgası algılandıktan sonra veriler anlık veri aktarımı ile JMA' ya gönderilir. JMA ikincil ve deprem kaynaklı hasarlara neden olan S dalgası gelmeden önce de gelen verileri hızlı bir şekilde çözümleyerek halka deprem meydana geldiğini haber verir ve halkı tahmini olarak depremin yeri ve büyüklüğü hakkında bilgilendirir. Erken uyarı televizyon, radyo ve cep telefonu gibi çeşitli yayın organları ile halka iletilmektedir (Şekil 1.).

Erken uyarı depremin odağına yakın olan alanlarda güçlü ve yıkıcı olan dalgalar gelmeden önce yayınlanmayabilir. Ayrıca sismik dalgalar depremin odağına yakın olan daha fazla istasyon tarafından algılanırsa sistem depremin yeri ve büyüklüğüyle ilgili daha doğru erken uyarı yayınlar.

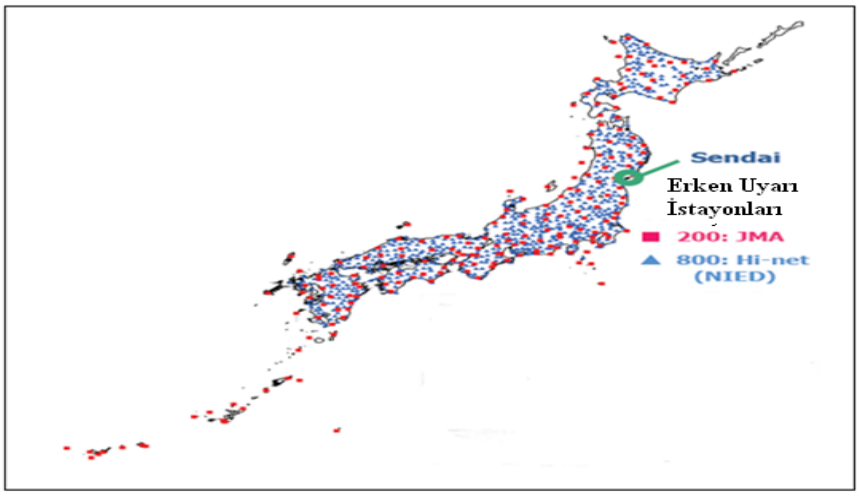
Şekil 1. Deprem erken uyarı sistemini akış şeması

1.2. Japonya'daki Deprem Erken Uyarı Sistemleri

1960' ların sonlarında Japon Demiryolu sistemleri kendi demiryolu hatları boyunca yer sarsıntı şiddetinin eşik değerini aştığı zamanlarda tetiklenen ve trenlere giden enerjiyi kesek sismometreler yerleştirmiştir. Alarm sismometreler olarak kullanılan bu yaklaşım sadece güçlü bir deprem başlar başlamaz uyarı verir (Nakamura, 1984). 1960' larda alarm-sismometreler kullanmaya başlayan Japonya Demir yolları daha sonra da Shinkansen hızlı trenlerine giden enerjiyi kesmek için 1980' lerde ön belirleme deprem erken uyarı sistemlerini kullanmaya başladı. Bu sistem Demiryolu Teknik Araştırma Enstitüsü (Railway Technical Research Institute-RTRI) tarafından tasarlanan ve kurulan Acil Deprem Algılama ve Alarm Sistemi (Urgent Earthquake Detection and Alarm System-UrEDAS) dir. UrEDAS Japonya'daki deprem erken uyarı sistemlerinin babası olarak kabul edilir ve daha sonra yapılan erken uyarı sistemleri UrEDAS üzerine modellenerek geliştirilmiştir. Sistem deprem kaynağı yakınındaki kendi ağları ile P dalgasının varışını algılayarak bir depremin yerini ve büyüklüğünü çok hızlı bir şekilde tahmin eder. Sistem daha sonra S dalgasının varışından önce yüksek hızlı trenleri durdurmak için bu bilgileri kullanır. İlk UrEDAS ağı 1989' da Tokyo Metropoliten alanında faaliyete başlamıştır. O tarihten itibaren Japonya' da hızlı demiryolu sistemleri için birtakım UrEDAS ağları yerleştirildi. Hızlı demiryolu sistemleri için ilk UrEDAS ağı 1992' de Tokaido Shinkansen' inde 14 ölçü cihazı ile çalışmaya başladı. 1995 Kobe Depreminden sonra Japonya genelindeki demiryolu hatları boyunca genişledi. Ayrıca Kobe depremi 1998' de ray ve metro sistemleri bünyesinde faaliyete geçen Kompakt UrEDAS olarak adlandırılan daha hızlı bir versiyonun da yapımını harekete geçirmiştir.

Ayrıca Japonya' da 1994' ün sonlarından beri faaliyet gösteren gerçek zamanlı hasar değerlendirme sistemleri olan Tokyo Gaz Şirketi'nin Sismik Bilgi Toplama ve Ağ Uyarısı sistemi (SIGNAL-the Seismic Information Gathering and Network Alert) ve Kawasaki ve Tokyo itfaiyesine ait acil durum yönetimi için erken hasar değerlendirme sistemleri geliştirilmiştir.

1995' te Kobe' de meydana gelen büyük Hanshin Awaji depremi Japonya' da 6000' den fazla kişinin ölümü ve milyonlarca dolar kayıp ülke genelinde uyarı sistemlerinin gelişimine sebep olmuştur. Bunun üzerine ülke genelinde daimi istasyon sıklığı ile sismik ağlar kuruldu. Bu sismik ağların yaklaşık 800 yüksek hassasiyetli istasyonun (Hi-net) yaklaşık 650 tanesi kuyu içine yerleştirilmiş kuvvetli yer hareketi (KiK-net) aletinden oluşur. Bunlara ilave olarak yaklaşık 1000 tane yüzeyde bulunan kuvvetli yer hareketi aleti ve yaklaşık 70 tane de broadband sismometre kurulmuştur. Bu istasyonlar NIED tarafından kurulmuştur. JMA, 1993' teki Okushiri depreminden sonra daha hızlı ve doğru tsunami uyarısı ve deprem bilgisi vermek için ülke genelinde yaklaşık 200 kuvvetli yer hareketi ölçer içeren sismometre ağını yenilemeyi yakın geçmişte tamamlamıştır. Bu sismik ağların kurulumundan sonra JMA Şubat 2004' te deprem erken uyarı yöntemlerini test etmeye başlamıştır. 16 Ağustos 2005' te Miyagi bölgesinin kıyısında meydana gelen 7,2 büyüklüğündeki depremde ilk P dalgasının algılanmasından 4,5 sn sonra ve Sendai' ye S dalgasının varışından 16 sn önce uyarı verilmiştir (Hoshiba vd., 2008). JMA Ağustos 2006' da sınırlı sayıda kullanıcı için uyarılar yayınlamaya başlamıştır. Ekim 2007' de ise halka uyarı vermeye başlamıştır. Ağustos 2006' dan Ekim 2007' ye kadar geçen süre içerisinde JMA tarafından, dağıtım kampanyaları, televizyonlarda yayınlanan kısa bilgi videoları, posterler, seminerler ve JMA web sitesindeki bilgi kayıtlarını içeren, alınacak uygun önlemler ve erken uyarı sisteminin sınırlamaları ve amaçları hakkında bilgi vermek için bir eğitim kampanyasına karar verilmiştir. 2009 yılında yapılan çalışmalara göre halka uyarı vermek amaçlı kullanıma hazır erken uyarı sistemi yaklaşık 800 Hi-net istasyonu ve yaklaşık 200 JMA' ya ait kuvvetli yer hareketi istasyonundan oluşur (Şekil 2.). Bu sistemde veriler tüm ülkede 20 km sabit aralıklarla kurulmuş istasyonlardan oluşan bir ağdan sağlanır. Uyarılar, JMA ölçeğine göre maksimum şiddet 5- veya daha fazla olarak tahmin edildiğinde yayınlanır. Ekim 2007' den Mart 2009' a kadar geçen sürede 5- veya daha fazla olarak gözlemlenen ve uyarı verilen 11 deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerde maksimum şiddet 4 olarak tahmin edilmiş fakat 5- olarak gözlemlendiği için 2 uyarı kaçırılmıştır. Ayrıca sismik şiddeti 5- olarak tahmin edilmiş fakat 4 olarak gözlemlenmiş olduğu için de 3 yanlış uyarı verilmiştir. Sistem 2007-2010 yılları arasında Richter ölçeğine göre büyüklüğü 6' dan büyük olan depremlerin 9 tanesinde uyarı vermiştir. Bu 9 uyarıdan sadece 30 Ekim 2009' da meydana gelen depremin sismik şiddeti 5- olarak tahmin edilmiş fakat daha sonra 4 olarak gözlemlendiği için 1 yanlış uyarı verilmiştir fakat kaçırılan uyarı olmamıştır. 2007-2010 yılları arasında sistem toplamda 21 uyarı vermiştir.



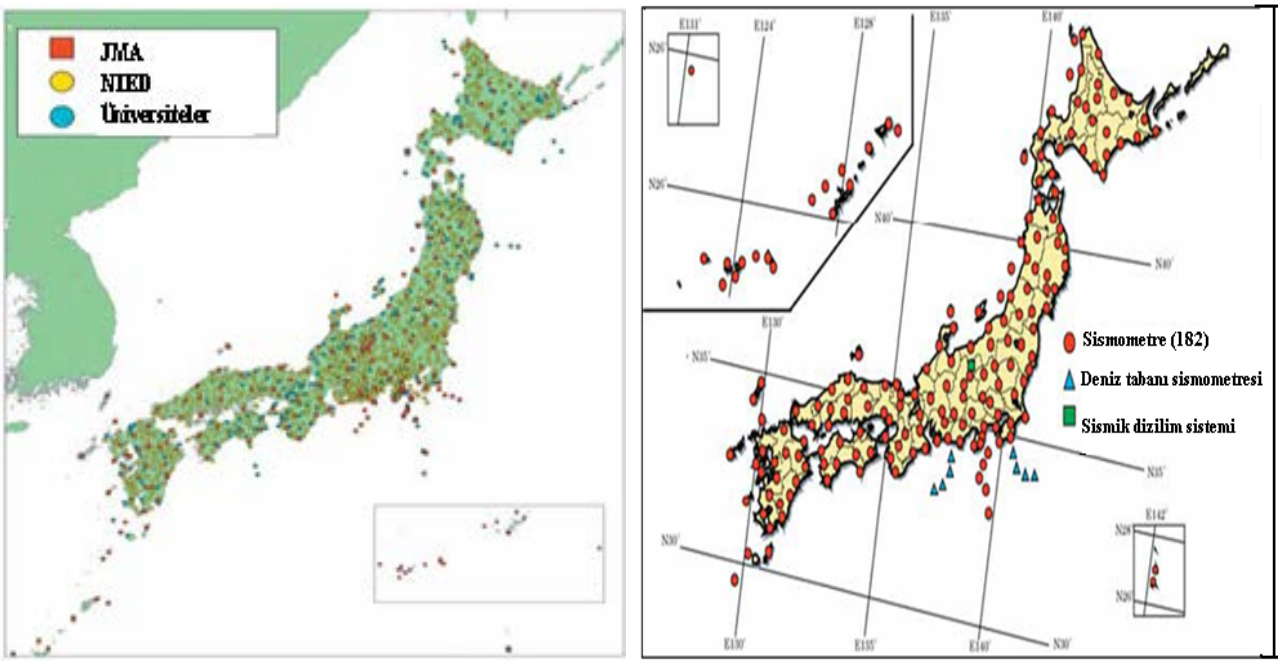
Şekil 2. Japonya'daki deprem erken uyarı sistemine ait istasyon ağı

JMA tarafından yapılan uyarılar halka televizyon, cep telefonu, radyo gibi çeşitli yollarla iletilir. Televizyon ve radyo aracılığıyla yapılan uyarılarda NHK (Japon Yayın Kuruluşu) dokuz radyo ve televizyon istasyonu aracılığıyla yayın yapmayı talep eder. Ayrıca Eylül 2008' den itibaren 127 televizyon istasyonundan 124' si ve ayrıca 35 FM, 41 AM radyodan uyarı yayınlamaktadır. Çoklu tehlike J-Alert Sistemi de belediyelere uyarılar verir. Mart 2009' dan itibaren 1851 belediyeden 226' sı J-Alert alıcılarına sahiptir ve bu 226 belediyeden de 102 tanesi uyarıları yayınlamak için Hoparlör sistemi kullanmaktadır. Japonya' da üç cep telefonu şirketi (Docomo, AU ve Softbank) kullanıcılarına ücretsiz uyarı mesajları göndermektedir ve şu anda yaklaşık 52 milyon kişi bu uyarıları cep telefonlarına alabilmektedir. Halka yönelik yapılan bu uyarılara ek olarak çok sayıda kullanıcı uyarıları alır ve bu yarıları kendi otomatikleştirilmiş kontrol ve yanıt sistemlerinin içerisine dahil eder. JMA konuma özgü uyarı bilgisi vermez fakat önceden JMA tarafından onaylanmış özel servis sağlayıcıları uyarı bilgisi verebilir. Aralık 2008' den itibaren 54 sertifikalı servis sağlayıcısı bulunmaktadır. Bu servis sağlayıcıları 204 demir yolu şirketi, fabrika, inşaat alanı, apartman, okul, alışveriş merkezi, hastane gibi kuruluşların 52 tanesine bilgi verir. Servis sağlayıcısı tarafından uyarı bilgisi alan demiryolu şirketlerinden bazıları kendi erken uyarı sistemlerini de işletmektedir.

1.3. Japonya'daki istasyon ağları ve deprem ve sismik şiddet bilgilerinin yayınlanması

JMA büyük bir deprem meydana geldiğinde hem kendisine ait olan sismometre, sismik şiddet ölçer ve gelgit ölçerlerden hem de araştırma enstitüleri, yerel yönetimler gibi diğer kuruluşlar tarafından kurulmuş olan istasyonlardan gelen veriler yardımıyla deprem bilgisi, sismik şiddet bilgisi ve tsunami bilgisi yayınlar.

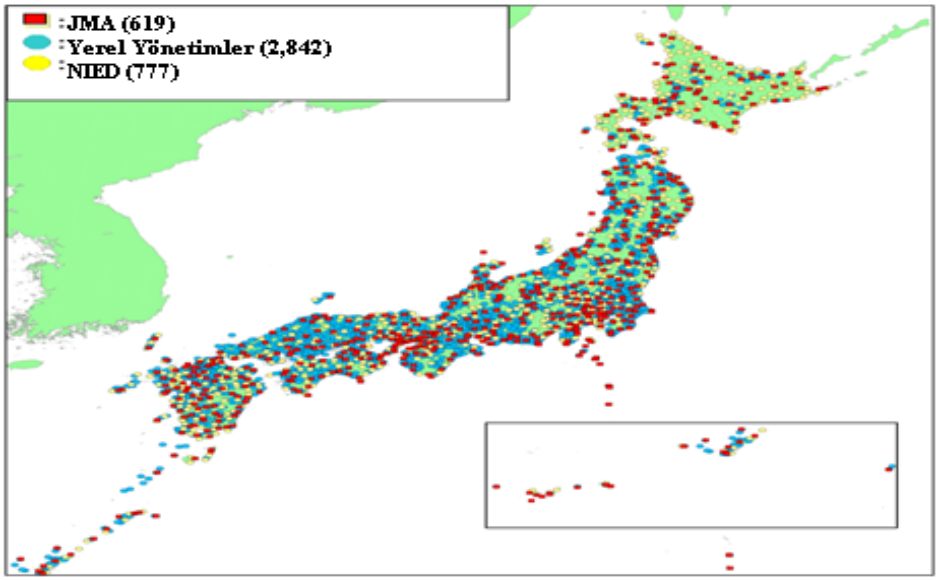
Japonya, sık sık depremlere ve volkanik aktivitelere sebep olan ve tektonik olarak oldukça aktif, doğusunda Pasifik, batısında Asya, kuzeyinde Kuzey Amerika ve güneyde Filipinler levhalarının buluştuğu ve dalma-batma zonlarının oluştuğu bölgede bulunduğu için Japonya' daki sismik aktivite sürekli olarak incelenmektedir. Bu amaçla JMA bir deprem meydana geldikten sonra hızlı bir şekilde depremin merkez üssünü belirlemek ve büyüklüğünü tahmin etmek ve derhal tsunami tahmini yayınlamak için ülke genelinde yaklaşık olarak her 60 km' de olmak üzere yaklaşık 180 yerde sismometre istasyonu kurmuştur (Şekil 3.(b)). JMA kendi istasyonlarından elde ettiği verilerin yanı sıra araştırma enstitüleri tarafından kullanılan yüksek hassasiyetli sismometreler (Şekil 3.(a)) içeren online veri kaynaklarından gözlemsel verileri toplayarak sürekli olarak sismik aktiviteyi de görüntüler.



(a) **(b)**

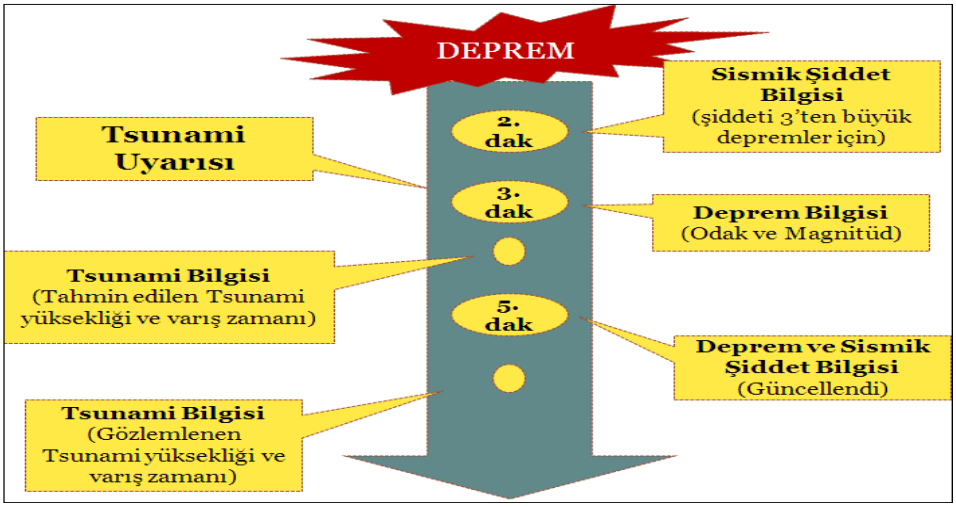
Şekil 3. Japonya genelindeki sismometre ağı (a) ve JMA' ya ait sismometre ağı (b)

JMA ülke genelinde NIED tarafından kurulmuş yaklaşık 1000 kuvvetli yer hareketi sismik gözlem istasyonlarından (K-NET) yaklaşık 777 tanesinden alınan veriler ve yerel yönetimler tarafından yaklaşık 2800 yerde kurulmuş sismik şiddet ölçerlerden alınan verilerin yanı sıra yer hareketinin şiddetini ölçmek için ülke genelinde yaklaşık her 20 km' de yaklaşık 600 yerde kurulan kendilerine ait sismik şiddet ölçerlerden alınan verilerle toplamda yaklaşık 4100 yer için sismik şiddet bilgisini yayınlar (Şekil 4.).



Şekil 4. JMA tarafından verilen bilgi için kullanılan sismik şiddet ölçer ağı (www.jma.go.jp)

JMA Şekil 5.' te de gösterildiği gibi bir deprem meydana geldiğinde sismometre, sismik şiddet ölçer ve gelgit ölçerlerden topladığı verilerden yararlanarak 2 dakika içerisinde JMA ölçeğine göre sismik şiddeti 3 veya 3' ten büyük olan depremler için sismik şiddet bilgisi raporu yayınlar. Yayınlanan bu rapor afet yönetimi yetkilileri tarafından acil durumda ilk olarak yapılacak işlerde referans olarak kullanılır. JMA deprem meydana geldikten sonra 3 dakika içerisinde depremin büyüklüğünü, merkez üssünü ve güçlü sarsıntının gözlendiği yerlerdeki sismik şiddeti gösteren bir deprem bilgisi raporu yayınlar ve tsunami uyarısı verir. JMA 5 dakika içerisinde verdiği tsunami uyarısı ile ilgili tsunaminin tahmini yüksekliğini ve varış zamanını veren bir tsunami bilgisi yayınlar. Yine beşinci dakikada daha önce vermiş olduğu deprem ve sismik şiddet bilgilerini günceller. JMA beşinci dakikadan sonra gözlemlemiş olduğu tsunami yüksekliğini ve varış zamanını yayınlar.



Şekil 5. Deprem, Tsunami ve Sismik şiddet bilgisinin yayınlanmasına ait akış şeması

2. TSUNAMİ ERKEN UYARI SİSTEMİ

Tsunami erken uyarı sistemi, tsunami dalgalarını algılayan, can ve mal kaybını önlemek için uyarılar veren bir sistemdir. Bu sistem tsunami dalgalarını algılamak için sensörlerden oluşan bir ağ ve kıyı bölgelerinden kaçışa izin veren güncel uyarılar yayınlayan iletişim alt yapısından oluşan aynı derecede önemli iki bileşenden meydana gelir.
Japonya pek çok deprem ve tsunaminin yaşandığı aktif dalma batma zonu yakınında bulunmaktadır. Japonya yakınında bulunan bu dalma batma zonunun neden olduğu depremler tarafından üretilen yerel tsunamiler ülkede büyük hasarlara neden olmuştur. Bu yüzden Japonya, Pasifik' te ve dünya çapında en büyük tsunami uyarı sistemlerinden birini geliştirmiştir. Japon Meteoroloji Ajansının (JMA) asıl gözlemevi Tokyo' da bulunmaktadır ve 5 bölgesel gözlemevi tsunami uyarıları yayınlamadan sorumludur. JMA' da veriler sürekli bir şekilde hücresel iletişim ve uydular kullanılarak toplanmaktadır.

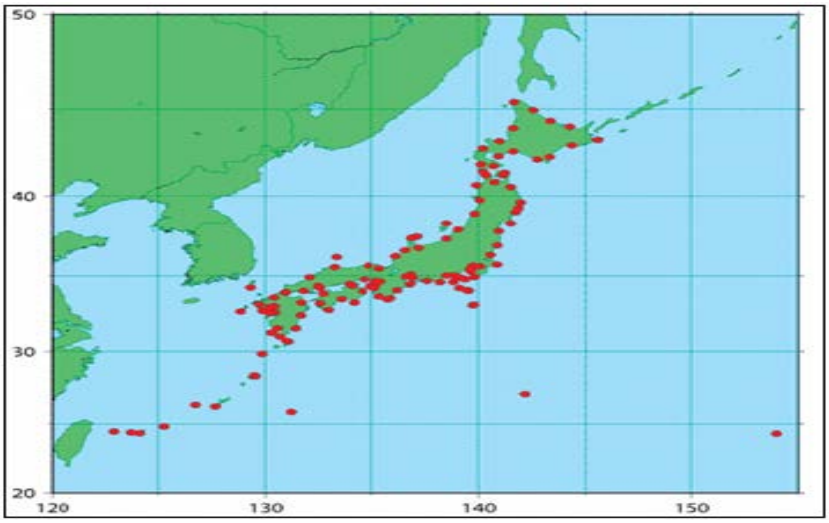
UNESCO' nun Hükümetler arası Oşinografi Komisyonu altında 1966' da oluşturulan Pasifik Tsunami Uyarı ve Zarar Azaltma Sistemi için Hükümetler arası Koordinasyon Grubu (ICG/PTWS), PTWS' nin ilk merkezi olarak tsunami gözlemede Pasifik' in her yerini kapsayan Pasifik Tsunami Uyarı Merkezi' nin (PTWC) kapasitesini artırmak ve ilaveler yapmak için JMA tarafından alınabilen Kuzeybatı Pasifik bölgesindeki bölgesel merkezin rolünü tasarlamıştır.

Bu uluslar arası talebe karşılık olarak JMA, Ocak 2001' de ilgili ülkelere Japon Denizinde meydana gelen depremler için tsunami tahmini sağlamaya başlamıştır. Mart 2005' te JMA Kuzeybatı Pasifik Tsunami Danışma

Merkezi' ni kurmuş ve Kuzeybatı Pasifik Bölgesindeki depremler için tsunami olasılığına karşı uyarı vermeye başlamıştır.

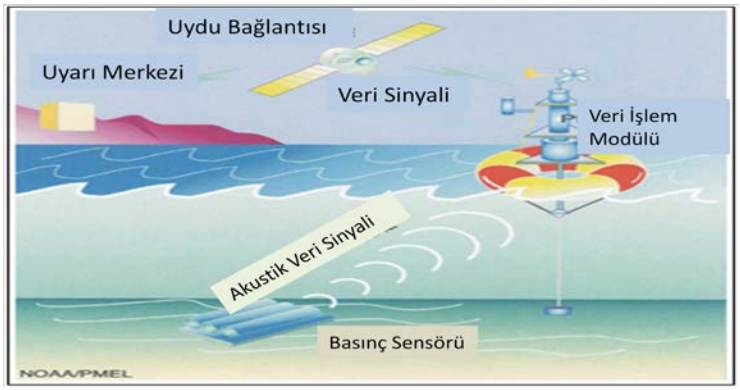
2.1. Tsunami erken uyarı sisteminin çalışma prensibi

JMA ülke genelinde yaklaşık 80 gelgit ölçer istasyonu çalıştırmaktadır ve Japon Sahil Güvenlik ve yerel hükümet kuruluşları gibi kuruluşlar tarafından işletilen istasyonlar da dahil olmak üzere yaklaşık 100 istasyondan gerçek zamanlı deniz seviyesi verisi toplamaktadır (Şekil 6.).



Şekil 6. Japonya genelindeki gelgit ölçer ağı

Tsunami uyarı sisteminde deniz seviyesinden 6000 m derinde 1 cm kadar küçük genliklerle tsunamileri algılayabilen ve ölçebilen basınç algılayıcıları bulunur. Tsunamiyi algılayan basınç algılayıcıları deniz yüzeyinde bulunan şamandıralara monte edilmiş transmitterlere akustik modem aracılığıyla uyarı sinyalleri gönderir. Transmitterler tarafından alınan veriler uyduya iletilir. Uydu, transmitterlerden aldığı verileri uyarı merkezine gönderir ve Tsunami dedektörün üzerinden geçtikten iki dakika sonra veriler JMA' ya ulaşmış olur (Şekil 7.).



Şekil 7. Tsunami erken uyarı sisteminin şeması (www.unisdr.org)

JMA çeşitli yer ve büyüklüklerdeki varsayılan depremler için ilk olarak bilgisayarlarla tsunami similasyonunu yapar ve tsunami veri tabanı olarak adlandırılan bir veri tabanında tsunami varış zamanları ve yüksekliklerinin sonuçları depolar. Büyük bir deprem meydana geldiğinde işletim sistemi tsunami veri tabanı için yapılan araştırmalarda hesaplanan merkez üssü ve büyüklüklere dayanarak, depremin merkez üssü ve büyüklüğünü hızlı

bir şekilde hesaplar ve veri tabanından en uygun sonuçları seçer. Meydana gelen depremin büyüklüğünün veri tabanındaki verilerle karşılaştırılmasıyla depremin tsunami üretebilecek potansiyelde olası durumunda JMA deprem meydana geldikten sonra 3 dakika içerisinde her kıyı bölgesi için tsunaminin tahmin edilen yüksekliğini ve varış zamanını belirten tsunami olasılığı veya tsunami uyarısı yayınlar. Tahmini tsunami yüksekliğine dayanarak yapılan tsunami uyarısı büyük tsunami (3 m veya daha fazla) ve tsunami (1 m veya 2 m) olmak üzere ikiye ayrılır. Tsunami uyarıları azami derecede tedbir almayı gerektirir. Tsunami olasılığında ise tsunami yüksekliği 0,5 m veya daha azdır ve tsunami olma olasılığına karşı önlem almak gerekir.

JMA tarafından yapılan bu uyarılar acilen uydu sistemleri ve afetten korunma amaçlı bilgi ağları kullanılarak afet yönetimi kuruluşları ve medyaya iletilir. Uyarılar daha sonra bu kuruluşlar tarafından denizdeki gemilere ve risk altındaki kıyı bölgelerinde yaşayan insanlara iletilir.

Japonya' da meydana gelen yerel tsunamilere ek olarak Şili veya Alaska gibi Japonya' dan uzak Pasifik okyanusuna kıyısı olan bölgelerde meydana gelen depremlerin ürettiği uzak tsunamilerde uyarı vermek için uluslar arası veri alışverişi ve bilgi paylaşımı şeklinde uluslar arası bir işbirliği gerekmektedir. Bu nedenle JMA Japonya sahili boyunca tsunaminin meydan getireceği etkileri tahmin etmek ve tsunami uyarıları verebilmek için Hawaii' de bulunan Pasifik Tsunami Uyarı Merkezi (PTWC) ile yakın ilişkiler içerisindedir. Bu amaçla uzak tsunamiler için dünya çapındaki sismoloji ağı ve deniz aşırı deniz seviyesi verilerini toplayarak analiz eder ve ilgili kuruluşlar aracılığıyla halkı uyarır.

3. DEPREM VE TSUNAMİ ERKEN UYARI SİSTEMLERİNİN 11 MART 2011 "BÜYÜK DOĞU JAPONYA AFETİ"NDEKİ PERFORMANSLARI

11 Mart 2011' de Japonya' da 9.0 büyüklüğünde, saat 14:46:18:1 (JST)' de ülkede büyük bir felakete neden olan Büyük Doğu Japonya Depremi meydana gelmiştir. Deprem meydana geldikten sonra merkezüssüne en yakın istasyon ilk P dalgasını 5,4 sn sonra saat 14:46:40:2' de algılamış ve tahmin edilen magnitüd 4,3, JMA ölçeğine göre 1 şiddetinde olduğu için uyarı verilmemiştir. Veriler devamlı olarak güncellenmiş ve 4. güncellemede JMA ölçeğine göre 5- şiddetine denk geldiği için 8,6 sn sonra ve saat 14:46:48:8' de uyarı verilmiştir. Deprem, depremin meydana geldiği yere en yakın noktada bulunan Sendai şehrinde uyarıdan 17 sn sonra, Tokyo' da ise yaklaşık olarak bir dakika sonra hissedilmiştir.

Uyarılar halka televizyon, radyo ve cep telefonları aracılığıyla iletilmiştir. Depremin meydan geldiği noktaya en yakın yerleşim yeri olan Sendai' deki okullarda ve Tohoku Üniversitesi'nde de uyarılar okullardaki mevcut sistemler aracılığıyla yayınlanmış ve okullardaki öğrenciler öncelikle sıraların altına saklanmışlar, deprem sona erdikten sonra da tahliye edilmişlerdir. Deprem sırasında Tohoku Shinkansen sisteminde kurulmuş deniz kıyısındaki 9 sismometre ile raylarda kurulu olan 44 sensör ilk titreşimleri algılayarak otomatik olarak enerjiyi kesmiş ve güvenlik frenleri devreye girmiştir. Böylelikle deprem sırasında çalışır durumda olan 24 tren raylardan çıkmadan durdurulmuştur. Ayrıca trenler tünellerde ve köprülerde herhangi bir hasara uğramamış ve faaliyetlerini hızlı bir şekilde eski haline geri getirebilmişlerdir. 11 Mart ile 25 mart arasında meydana gelen 45 artçı depremden (JMA ölçeğine göre 5- ve daha büyük olarak tahmin edilen depremlerden) 3 tanesi eksik tahmin edilerek kaçırılmış, 2 tanesi de fazla tahmin edilerek yanlış uyarı verilmiştir.

Depremde erken uyarı sistemi depremi algılamış S dalgası kıyıya ulaşmadan önce merkezüssüne yakın bölgelerde uyarı verilmiş ve pek çok kişinin kendisini korumasına olanak sağlamıştır. Bu açıdan sistem başarılı bir şekilde çalışmıştır. Fakat uyarıyı alan bölge yeteri kadar geniş değildir ve depremin büyüklüğü 9 yerine 8 olarak belirtildiği için eksik tahmin edilmiştir. Ayrıca sistem artçı depremlerle de mücadele etmiştir. Deprem ve tsunami yüzünden hasar gören ve kayıt alınamayan istasyonlar olduğu için depremden sonra ilk 3 saatte meydana gelen artçı depremlerde uyarı sistemi çalışmamıştır.

JMA (Japon Meteoroloji Ajansı) tarafından en yüksek seviyede tsunami uyarısı depremden 3 dakika sonra verilmiştir.Tsunami Erken uyarısı yayınlanmasına rağmen depremlerin tekrarlanan meydana gelişi yüzünden insanlar tsunaminin yüksekliğini daha tahmin etmişler ve güvende hissetme duygusu yanlış anlamaya neden olmuştur. Pasifik Tsunami Uyarı Merkezi ise depremden 9 dakika sonra Doğu Asya ve Güney Amerika'nın batı sahillerini kapsayan çok geniş bir alanda tsunami uyarısında bulunmuştur. Tsunami depremden 26 ile 35 dakika sonra kıyıya ulaşmıştır. Tayvan, Endonezya, Yeni Zelanda, Rusya, Filipinler, Pasifik Adaları, Hawaii, Meksika, Peru, ve Kolombiya' da tsunami uyarısı verilmiştir.

KAYNAKLAR

Allen, R. M., Gasparini, P., Kamigaichi, O. ve Böse, M. (2009). The status of earthquake early warning around the world: An introductory overview. *Seismological Research Letters* 80:5, 682-693.

Allen, R., Kanamori, H., Mori, J. ve Yamada, M. (2011). Earthquake warnings in Japan Building the system, and warnings for the 2011 Tohoku-oki earthquake. University of California, Berkeley.

http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/brochure_earthquake_and_tsunami.pdf. Erthquake and tsunami monitoring and information.

http://www.unisdr.org/2006/ppew/tsunami/what-is-tsunami/backinfor-tsunami-ws.htm

http://itic.ioc-unesco.org/

http://tr.wikipedia.org/wiki/2011_T%C5%8Dhoku_depremi_ve_tsunamisi

http://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami_warning_system

Kamigaichi, O. (2004). JMA Earthquake early warning. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering* 4:3, 134-137.

Kong, L., McCreery, C. ve Yamamoto, M. (2008). Tsunami Warning Centers-An Overview.

www.bousai.go.jp/kyoryoku/pdf/soukikeikai.pdf. Japan's Natural Disaster Early Warning Systems and International Cooperative Efforts. (2006).

Yamazaki, F., Meguro, K. ve Noda, S. (1998). Developments of early damage assessment systems in Japan. Structural Safety and Reliability, Shiraishi, Shinozuka&Wen. 1573-1580.