

Küresel Ölçekte Deprem Erken Uyarı Sistemleri: Algoritmik Yaklaşımlar ve Ülke Uygulamaları

Onur Murat Gören¹, Hüseyin Bayraktar²

Öz

Şiddetli depremlerin yıkıcı etkileriyle birçok kez sarsılmış ülkemizde, on yılların birikimi ile edinilen bilgilerin yanında teknolojinin de geldiği noktadan faydalanarak insanların deprem anında güvenliğini sağlamak ve can kayıplarının önüne geçmek adına; Deprem Erken Uyarı (DEU) sistemleri alanında çalışmalar devam etmekte ve günbegün farklı gelişmeler kaydedilmektedir. Bu makalede, ülkemizin de bir deprem ülkesi olduğu gerçeği göz önünde bulundurularak bu konuda gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir boşluğu doldurabilecek kapsamlı bir literatür kaynağı oluşturulmak amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, dünya genelinde DEU sistemleri üzerinde en çok çalışma yapmış ülkelerin önde gelen bilim insanlarının bu alanda çok alıntılanan makaleleri derlenerek farklı pencerelerden deprem erken uyarı sistemlerinin gelişimi incelenmiştir. Bu alanda literatürdeki boşluğu doldurmak ve saha çalışmalarında iyi sonuçlar almak için dünya üzerinde DEU sistemleri konusunda yapılan önemli çalışmalar incelenmeli, yöntemler araştırılmalı ve gerekirse güncellenmeli ve bu alanda çalışan diğer ülkelerle de ortak çalışmalar yapılmalıdır. Geçmişten günümüze DEU sistemlerinin gelişimini incelemenin, bu konuda çalışan bilim insanlarına ışık tutabileceği görülmektedir. Genellikle kullanılan yöntem depremin sarsıcı "S" (secondary) dalgaları şehirlere ulaşmadan, "P" (primary) dalgalarının ilk tespitiyle birlikte tüm hesaplamaları hızlıca yaparak depremin büyüklüğüne göre insanları deprem öncesinde uyarmak şeklinde gelişmiştir. Temeldeki bu benzerlik detaylarda ülkelerin deprem karakteristiğine ve bilimsel geçmişine göre ciddi farklılıklar göstermektedir. Bu makalede hem benzerlikler vurgulanırken hem de DEU sistemlerinin geliştiği ya da gelişmekte olduğu ülkelerdeki yaklaşımlarda ve algoritmalarda oluşmuş farklılıkların akademik düzeyde karşılaştırılması yapılmıştır. Yakın bir gelecekte gelişen yapay zeka teknolojileri ile birlikte daha hızlı tespitte bulunma ve haberleşme ağları sayesinde, dünyada can ve mal kayıplarını minimuma indirecek sistemlerin geliştirileceği ve yaygınlaştırılacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Deprem Erken Uyarı Sistemleri, Deprem Tehlikesi, P Dalgaları, S Dalgaları

Earthquake Early Warning Systems on a Global Scale: Algorithmic Approaches and National Implementations

Abstract

In our country, which has been shaken many times by the devastating effects of severe earthquakes, studies in the field of Earthquake Early Warning (EEW) systems are continuing in order to ensure the safety of people during earthquakes and prevent loss of life by taking advantage of both the knowledge accumulated over decades and the current state of technology. In this article, taking into consideration the fact that our country is also prone to earthquakes, a comprehensive literature source is aimed to be created for future studies in this field. In this study, the development of earthquake early warning systems from different

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce
İlgili yazar e-posta/Corresponding author e-mail: onurmuratgoren@gmail.com ORCID NO: 0009-0006-5062-3240

²Dr. Öğr. Üyesi, Düzce Üniversitesi, Kaynaşlı MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Kaynaşlı, Düzce
e-posta / e-mail: huseyinbayraktar@duzce.edu.tr ORCID NO: 000-0001-7277-0838

Bu makaleye atıf yapmak için / To cite this article

Gören O.M., Bayraktar H., (2025). Küresel Ölçekte Deprem Erken Uyarı Sistemleri: Algoritmik Yaklaşımlar ve Ülke Uygulamaları. *Afet ve Risk Dergisi*, 8(3), 1069-1085.

perspectives has been examined by compiling the most cited articles of leading scientists in countries that have conducted the most research on EEW systems worldwide. In order to fill the gap in the literature and achieve successful results in field studies, important studies on EEW systems worldwide should be examined, methods should be researched, updated if necessary, and collaborative studies should be conducted with other countries working in this field. It is seen that examining the development of EEW systems from past to present can illuminate scientists working in this field. The commonly used method of warning people before an earthquake based on the first detection of "P" (primary) waves, making all calculations quickly according to the magnitude of the earthquake before the shaking "S" (secondary) waves reach the cities, has developed. However, despite this basic similarity, there are significant differences in details according to the earthquake characteristics and scientific history of countries. This article not only emphasizes the similarities, but also compares the differences in approaches and algorithms in countries where EEW systems have developed or are developing at an academic level. It is thought that with the advancement of artificial intelligence technologies in the near future, systems that will minimize human and material losses worldwide will be developed and disseminated through faster detection and communication networks.

Keywords: Earthquake Hazard, Earthquake Early Warning Systems, P Waves, S Waves

1. GİRİŞ

Dünyanın birçok bölgesinde farklı doğal afetler meydana gelmekte ve hem toplumsal hem de bireysel olarak büyük yıkımlar doğurabilmektedir. Bu psikolojik ve ekonomik sarsıntılar yaşamı uzunca bir süre etkilemekte ve gelecek nesillerin de sağlıklı gelişimini engellemektedir. Bu büyük doğal afetlerden biri de depremdir. Dünyanın bazı bölgelerinde meydana gelen büyük depremler, o coğrafyaları depremden doğan hasarları önleme çalışmaları yapmaya itmiştir. Örneğin; Meksika'da 1986 Eylül'ünde büyük bir yıkıma sebep olan depremle DEU sistemleri üzerinde çalışılmaya başlanmıştır (Suarez vd., 2018). Aynı şekilde Çin'de de 2008 Mayıs'ında meydana gelen Wenchuan depreminin yarattığı hasar ve kayıplar, olası deprem felaketlerine önlem olarak DEU sistemlerinin geliştirilmesi düşüncesini doğurmuş ve 2009 yılında bir DEU sistemi geliştirilmiştir (Ye vd., 2011).

Ülkemiz de, sismolojik açıdan aktif bir coğrafyada yer alması nedeniyle deprem üreten faylara sahip bir konumdadır. Bu nedenlerle dünyadaki diğer önemli deprem merkezleri gibi Türkiye'de de deprem odaklı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmına makalenin ilerleyen bölümlerinde değinilecektir. Depremden önce alınabilecek önlemler arasında; yapı stokunun sağlamlaştırılması adına doğru mühendislik çalışmalarıyla yapılacak kentsel dönüşüm projeleri, yeni yapılacak yapıların sağlam zeminlere deprem yönetmeliğine uygun şekillerde kaliteli işçiliklerle inşası ve halkı deprem esnasında yapacakları konusunda bilinçlendirmek gibi uygulamalar yer alabilir. Bu gibi hayati önlemler deprem anında oluşacak can ve mal kaybının büyük ölçüde önüne geçebilmektedir. Deprem oluşturan kaynakta fay kırılımı gerçekleşikten sonra ise depremin yıkıcı dalgaları insanların yoğun olarak yaşadığı merkezlere ulaşmadan, orada yaşamakta olan tüm insanlara ya da belirli kuruluşlara ya da kişilere depremin gelmekte olduğu konusunda haber vererek; kişisel (kendisini ya da ailesini korumak, bulunduğu yeri terk etmek vs.) ya da kitlesel (asansörlerin en yakın katta durması ve kapılarının açılması, doğal gazın kesilmesi, raylı sistemlerin durması vs.) önlemler almaları hususunda uyarı DEU sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler farklı algoritmalarla aynı sonuca ulaşmaya çalışmakta; yani kamusal alanın bir ön süreye sahip olmasına yardım etmeyi amaçlamaktadır.

DEU sistemleri fayda ve maliyet açısından da değerlendirilmiş; ölümcül olmayan yaralanmalarda %1'lik bir azalma veya gazla ilgili yangın hasarında %0,25'lik bir önleme, tüm ABD Batı Kıyısı için kurulmuş bir kamu uyarı sisteminin 1 yıllık işletimini karşılamaya yetecek kadar para tasarrufu sağlayacağı sonucuna varılmıştır (Strauss vd., 2016).

Başka bir çalışmada ise 100 kişilik bir işçi grubuna yapılacak 2 saniyelik bir erken uyarı ile 75 kişi ölüp, 15 kişi ağır yaralanacakken; erken uyarı süresi 10 saniyeye çıktığında ölüm sayısı 10, ağır yaralı sayısı 30 olarak düşünülüyor; 20 saniyelik bir erken uyarıda ise ölüm sayısı 5'e kadar düşüyor (Fujinawa vd., 2013).

Türkiye’de DEU sistemleriyle ilgili yapılmış akademik çalışmaların genel itibarıyla yetersiz kaldığı görülmektedir. Özellikle bu alanda küresel çapta bilgiye ulaşmayı isteyen bilim insanları için kaynakça niteliğinde Türkçe bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma ile literatürdeki bu boşluk doldurulmaya çalışılmıştır. Bu makale özellikle deprem alanında çalışan ve DEU sistemlerini geliştirmek isteyen bilim insanları için oldukça faydalı olabilecek bilgiler içermektedir. Bu sebeple DEU sistemlerini en efektif şekilde kullanan ve bu alanda başarılı çalışmaları olan ülkeler seçilmiş ve bu ülkelerin önemli kurumlarında çalışan bilim insanlarının çalışmaları incelenmiştir.

Tablo 1’de yaptığımız derlemede bahsi geçen deprem erken uyarı sistemlerini kullanan ülkelerin kullandıkları sisteme ve kaydettikleri ya da vaat ettikleri başarıları göre özet kronoloji verilmektedir. Bu uyarı süreleri depremin karakteristik özelliklerine, derinliğine, merkez üssünün gözlem istasyonlarına göre değişim gösterebilmektedir.

Tablo 1. Deprem erken uyarı sistemlerine genel bir bakış

Ülke Adı	Organizasyon / Kurum / Algoritma	Uyarı Alanı	Başlangıç Tarihi	Ortalama uyarı Süresi (sn)
MEKSİKA	SASMEX	Ülke geneli	1986	60
JAPONYA	JMA	Ülke geneli	1996	20
TAYVAN	CWB	Ülke geneli	2001	10
ÇİN	CEA	Bazı bölgeler	2009	25
ABD	MyShake, Berkeley	Bazı bölgeler	1995	30
İTALYA	PRESTo, RAN	Bazı bölgeler	2005	10
İSVİÇRE	SED, VS, FinDer	Bazı bölgeler	2012	10
TÜRKİYE	İstanbul, EPIC, AFAD, Kandilli	Bazı bölgeler	2002	20

2. DEPREM ERKEN UYARI SİSTEMİ KULLANIMINDA ÖNCÜ ÜLKELER

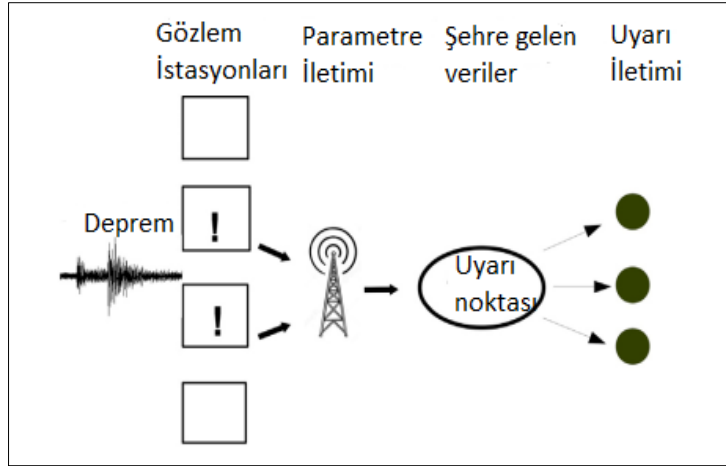
2.1. Meksika

1985 yılının Eylül ayında meydana gelen depremin başkent Mexico City’de meydana getirdiği beklenmedik yıkım, hem Meksika’da hem de dünya genelinde sismoloji açısından bir dönüm noktası olarak gösterilebilir. Çünkü bu büyük depremin yol açtığı can ve mal kayıpları Meksikalı sismologları bir arayışa yöneltti. Depremin yıkıcı dalgaları şehre ulaşmadan kent merkezini uyaracak bir erken uyarı sistemi geliştirme çabaları başladı. 1986 yılında SAS (Seismic Alert System) olarak geliştirilmeye çalışılan sistem 1991 yılında Meksika genelindeki tüm diğer çalışmalarla birleşerek SASMEX (Seismic Alert System: Mexico) adını almış ve ülke çapında yaygınlaştırılmıştır.

2017 yılında ülke çapında sayısı 97’ye ulaşan FS (free-field strong motion) istasyonları 1991 – 2017 yılları arasında 6896 deprem kaydetmiş ve bunların 158 tanesinde SASMEX halka erken uyarı vermiştir. Özellikle Mexico City’ye yaklaşık 700 km uzaklıktaki Tehuantepec merkez üssünde meydana gelen 7 Eylül 2017 tarihli 8,2 büyüklüğündeki depremde 2 dakikalık erken uyarı sisteminin en başarılı çalıştığı depremlerden biri olmuştur (Suarez vd., 2018).

Dünyanın ilk DEU sistemi olarak kabul edilen SASMEX'in erken uyarı ortalama süresi 60 saniye olarak düşünülebilir. 5 – 5.5 Mw aralığında depremler için özel kullanıcılarla erken uyarı mesajı paylaşılırken, 5.5 üstü depremlerde ise kamu uyarısı tetiklenir (Espinosa vd., 2012).

Şekil 1'de deprem erken uyarı sistemi sürecinin basitçe anlatıldığı bir şema görülebilecek olan SASMEX 30 yıllık pratiğinde 25 milyon kişiye ulaşmıştır. Cep telefonlarına indirilebilecek bir uygulama ile daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir. 30 yıllık kesintisiz ve başarılı bir hizmet sunmuştur. Başarılı hizmetinin yanında ilk kurulan sistem olması açısından diğer ülkelere ve bilim insanlarına da bu alanda yapacakları çalışmalar için önemli bir örnek olmuştur.



Şekil 1. SASMEX operasyon şeması (Suarez, 2022)

2.2. Japonya

1923 yılında Japonya'da yaşanan 7,9 Mw büyüklüğündeki Kanto depreminde çoğunluğu depremden sonra meydana gelen yangınlarda olmak üzere 105,000'den fazla kişinin ölümü bilim insanlarını deprem anında neler yapılabileceğini incelemeye sevk etmiş ve 1970 yılına gelindiğinde tüm gaz ocaklarının şiddetli bir sarsıntı tespit ettiğinde otomatik olarak gaz kesmesi bir gereklilik haline gelmiştir. 1980'li yılların sonlarında ise gaz şirketleri, güçlü sarsıntılarda sistemi tamamen kapatan teknolojileri hayata geçirmişlerdir. 1992 yılında hızlı trenlerin deprem esnasında güvenli bir şekilde durması için P dalgalarının tespitinden sonra sistemi uyarı Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS) adı verilen DEU sistemi hayata geçirilmiştir. Ulusal çapta DEU sistemi ise önce sınırlı kişi ve kurumlarla 2004'te denenmeye başlanmış olup, 2007'de ülke çapında hizmete girmiştir (Hoshiba, 2014).

JMA (Japan Meteorological Agency) tarafından Japonya için geliştirilen DEU sisteminde de amaç elektriksel iletimin deprem dalgalarına karşı sahip olduğu hız üstünlüğünü avantaja çevirmektir. Hatta depremin asıl yıkıcı olan S dalgaları, depremin yaydığı ilk P dalgalarından da yavaş olduğundan, özellikle bazı hayati noktalarda (raylı sistemi durdurmak, asansörleri en yakın katta durdurup kapısını açmak vs.) önlem alabilmek için ciddi bir süre kazanımı sağlayabilmektedir. Tablo 2'de Japonya'da JMA tarafından kullanılan deprem sınıflandırma sistemi görülmektedir. 1996 yılından sonra bazı değişiklikler yapılmış ve son halini almıştır.

Bu programın test çalışması sırasında 2005 yılında Miyagi bölgesinde 7.2 büyüklüğünde bir deprem meydana geldi. İlk uyarı en yakın istasyonun ilk P dalgası tespitinden 4.5 saniye sonra yayınlanmıştır. Bu sistemin kullanıcıları depremin sismik yoğunluğunun en yüksek olduğu şehir merkezi Sendai'ye S dalgaları varmadan 16 saniye önce depremden haberdar olmuşlardır (Oshiba vd., 2008).

2007’de kurulan DEU sistemi 2011’de meydana gelen ve ardından tsunami getiren, 18.000 kişinin ölümüne sebebiyet veren Tohoku-oki depreminde merkez üssüne yakın yerlerde yaşayan birkaç milyon insanı en şiddetli sarsıntı gelmeden 15 – 20 sn kadar önceden uyarılmış ve bu kişilerin %90’ı kendileri ve aileleri için önlem alma şansına sahip olmuştur (Fujinawa vd., 2011).

Tablo 2. JMA deprem sınıflandırması (URL 1)

Sınıflandırma	Şiddet ölçütü	Sınıflandırma		PGA(gal)
0	0 - 0.4	0	Hissedilmedi	< 0.8
I	0.5 - 1.4	I	Çok zayıf	0.8 - 2.5
II	1.5 - 2.4	II	Zayıf	2.5 - 8.0
III	2.5 - 3.4	III	Hafif kuvvetli	8.0 - 25.0
IV	3.5 - 4.4	IV	Kuvvetli	25.0 - 80.0
V lower	4.5 - 4.9	V	Çok kuvvetli	80.0 - 250.0
V upper	5.0 - 5.4			
VI lower	5.5 - 5.9	VI	Yıkıcı	250.0 - 400.0
VI upper	6.0 - 6.4			
VII	> 6.5	VII	Çok yıkıcı	> 400
Japonya Meteoroloji Ajansı (JMA) tarafından 1948'den beri kullanılan şiddet ölçeği JMA Şiddeti (1996'dan önce) JMA Şiddeti(1996'dan sonra)				

2.3. Tayvan

Tayvan, Pasifik çevresi sismik kuşağının batı kısmında yer almaktadır. Central Weather Bureau (CWB) tarafından bir DEU sistemi oluşturulmuştur. Bu sistemde gerçek zamanlı kuvvetli yer hareketi ağı ve P dalgası yaklaşımı benimsenmiştir (Hsiao vd., 2009).

15 Kasım 1986’da meydana gelen Hualien depremi (Mw 7.8) merkez üssünden neredeyse 120 km uzaklıktaki kalabalık Taipei şehrine ciddi hasarlar vermiş ve akabinde başlayan araştırma ve çalışmalarla CWB 1994 yılında iki DEU prototipi geliştirmiştir. Yerinde DEU sistemlerine örnek olan bu prototiplerin biri National Taiwan University (NTU) , diğeri ise National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) tarafından işletilmektedir. 2001 yılından itibaren ise CWB tarafından işletilen ulusal kapsayıcılıkta bir DEU sistemi mevcuttur. 2018 yılında meydana gelen Huealien depremi (Mw 6.4) için NTU DEU sistemi 2 – 8 sn’lik bir ön süre sağlamış ve 2 dk içinde detaylı bir deprem haritası oluşturmuştur (Wu vd., 2018).

Gerçek zamanlı kuvvetli yer hareketi ağı; Tayvan’da kullanılan sistem olup ve 36.000 km²’lik bir alanı kapsayan tüm Tayvan’a yayılmış 109 dijital telemetrili kuvvetli yer hareketi istasyonundan teşkilidir. Doğru tahminler yapan bir sistem olsa da raporlama süresi 10 saniyeye düşürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle P dalgası metodu yaklaşımı ile iyileştirilmesi gerekmektedir.

2.4. Çin

CEA (China Earthquake Administration) liderliğinde Çin’in sismolojik olarak en hareketli bölgelerinden biri olan Fuijan’da 2009 yılında geliştirilen ve 2012 Kasım’da online testlerine başlanan DEU sistemi; Pekin başkent bölgesini, güney – kuzey sismik kuşağını, güneydoğu kıyılarını ve kuzey Sincan bölgesini kapsayan bir ağ kurmayı amaçlamıştır. Fuijan’da kurulan deneysel sistemin çevrimiçi testleri ise 2012 Kasım’da başlamıştır. Aynı zamanda Tayvan’ı da kapsayan bir sistem kurulmuş ve Çin’in yanı sıra Tayvan’daki depremler de kaydedilmiştir.

4 Eylül 2013’te Xianyou’da Mw = 4.8 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Bu, Fujian bölgesindeki son beş yıldaki en büyük depremdir. 8 km derinliğinde olan deprem, ilk istasyonun tetiklenmesinden sadece 7.5 saniye sonra, deprem meydana geldikten 8.6 saniye sonra tüm kullanıcılara SMS gönderilmiştir. 4 saniye sonra ise veriler güncellenerek tekrar bir deprem uyarısı yapılmıştır.

2013'te Hualian'da meydana gelen 6.7 büyüklüğündeki depremde ise sistem iki erken uyarı üretilmiştir. İlki, ilk istasyon tetiklendikten 15.8 saniye sonra veya deprem oluştuktan 18.3 sn sonra yayınlanmıştır. Tahmin 5.7 idi. Bu bilgi yayınlandığında S dalgası henüz Fuijan'a ulaşmamıştı ve bölgedeki çoğu kıyı şehri sarsıntı öncesi en az 40 saniyeye sahipti. İlk uyarıdan sonra parametreler sıfırlanarak bu kez büyüklük tahminini 7.1'e yükseltti ve bu ikinci uyarıyı ise insanlar ile ilk uyarıdan 27 saniye sonra paylaştı. Bu ikinci uyarıda da şehirlerin depreme hazırlanmak için 10 saniyeden fazla süreleri vardı (Zhang vd., 2016).

2.5. ABD

ABD'de de P dalgası metodu ile depremin sarsıcı etkisi şehir merkezine ulaşmadan birkaç saniye ile birkaç on saniyelik bir ön süre ile depremin etkilerini azaltmaya yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda Earthquake Alarm System (ElarmS) adlı bir konsept geliştirilmiştir. 1995 yılından beri ikisi 7 üzeri olmak üzere birçok deprem kaydedilmiştir. ElarmS yaklaşımıyla 145 km'lik bir mesafeden 40 saniyelik bir erken uyarı mümkün olabilmektedir. 60 km uzaklıktaki bina sakinleri ise en yüksek sarsıntıdan 20 saniye kadar önce haber alabilmektedir (Allen vd., 2003).

ABD özelinde DEU sistemi çalışması olarak en önde gelen aplikasyon MyShake uygulamasının çalışma prensiplerine ilerleyen başlıklarda ayrıca değinilecektir.

2.6. İtalya

Güney İtalya'da DEU sistemlerini test etmek için simüle edilmiş, senkronize deprem kayıtlarında çevrimdışı çalışan dalga formu oynatma prosedürleri kullanılarak büyük bir sentetik dalga formu veri tabanı oluşturulmuştur. 1980 yılında gerçekleşen 6.9 büyüklüğündeki depremden sorumlu fayın ortalarında 6.0 büyüklüğünde bir olay yaşandığı simüle edilmiş ve bir de 1930'da meydana gelmiş 6.0 büyüklüğündeki bir depremi oluşturan fayın da hesaba katılmasıyla iki adet 6.0 ve bir adet 6.9 büyüklüğünde olan üç adet depremin veri tabanı elde edilmiştir. Üç yüz senaryo, fayın alt yarısındaki değişken çekirdekleşme noktaları, kayma ve kırılma hızı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Sentetik dalga formlarını ortam gürültüsü ve saha tepkisi açısından gerçekçi hale getirmek için, kayıtlar, gözlenen güç spektral yoğunluk eğrilerinden çıkarılan sentetik gürültü eklenmiştir (Zollo vd., 2009).

İtalya'nın tüm sismik aktif bölgelerine ve stratejik noktalarına kurulmuş beş yüzden fazla istasyondan oluşan RAN (Italian Accelerometric Network), ülke çapında bir DEU sistemi oluşturmaya namzet bir sistemdir. PRESTo (Probabilistic and Evolutionary early warning SysTem) ve RAN entegrasyonu ile ülke çapında bir erken uyarı sistemi kurulması amaçlanmıştır. Çalışma teorik olarak 5 – 10 saniyelik bir erken uyarının mümkün olduğunu ve bu yöntemle 25 saniyeye çıkabilecek bir sistem geliştirebileceklerini gösteriyor. RAN ve PRESTo entegrasyonunda iki temel yaklaşım esas alınmıştır. Gerçek veri analizlerine dayalı performans; ki bu yaklaşımda 2002 – 2013 yılları arasında gerçekleşmiş 4.5 üzeri 40 deprem ele alınmış PRESTo verileri çevrimdışı olarak çalıştırılmış ve RAN sisteminin bu verilere erişmesi sağlanmıştır. İkinci yöntem ise sentetik veriler kullanılarak yapılan analizlerdir; ki bu yöntemde de ağ geometrisi senaryosu, ağ geometrisi ve referans senaryosu ve Gutenberg – Richter türetilmiş sekanslar olarak üç farklı senaryo ile çalıştırılır (Picozzi vd., 2015).

PRESTo kullanılmaya başladıktan sonra büyük bir deprem meydana gelmediği için sentetik verilerle Mjma 7.2 2008 Japonya depremi modellenmiştir. Deprem PRESTo ile uygulanmış ve büyüklük biraz daha küçük bir tahminle ilk kırılma anından 7.4 saniye sonra rapor ve uyarı oluşturulmuştur (Satriano vd., 2011).

2.7. İsviçre

The Swiss Seismological Service (SED); Virtual Seismologist (VS) and Finite-Fault Rupture Detector (FinDer) algoritmaları olmak üzere iki farklı algoritma ile SeisComP algılama modülüne dayanarak bir erken uyarı sistemi geliştirmiştir. 2020'de meydana gelen 3.9 büyüklüğünde 1.7 km

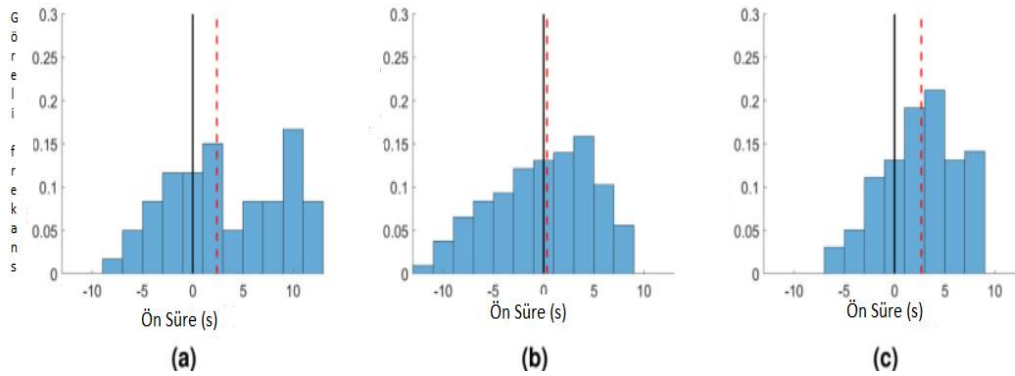
derinliğindeki Elm depremi için performansı değerlendirilmiş ve her iki algorithmada da iyi sonuçlar alınmıştır. VS ve FinDer için sırasıyla 7.3 ve 5.8 saniyelik ortalama gecikmeleri gösterirken; hız açısından ABD ShakeAlert DEU sistemine benzer bir performans elde ediyor. (Massin vd., 2021).

2.8. Avrupa Geneli

Avrupa sismik istasyon yoğunluğu 2277 istasyondan müteşekkil %45'i 20 km'den az mesafelerde bulunan bir banttır (Cremen vd., 2022). Avrupa genelinde kullanılan erken uyarı sistemleri test sistemleri ve operasyonel sistemler olarak ayrılır. Başlıca test sistemleri şunlardır:

- 1) PRESTo, İtalya
- 2) Multi-parameter wireless sensing unit (MP-WISE) at GFZ Potsdam, Hollanda
- 3) Virtual Seismologist, FinDer, Gutenberg Algorithm and EEWD at the Swiss Seismological Service (SED) at ETH Zurich/İsviçre

Şekil 2'de görülen grafiklerde üç Avrupa şehrine (a. Napoli, b. İzmir, c. Atina) ait ön süre dağılımları verilmiştir. Kırmızı kesik çizgi medyan süreyi gösterirken, siyah düz çizgi ise süre olarak pozitiflik eşiği olarak ifade edilebilir.



Şekil 2. DEU sistemleri görelî frekans - ön süre dağılımları (Cremen vd., 2022)

Operasyonel sistemler Türkiye ve Romanya'da yer almaktadır. İsrail, İtalya ve İsviçre'de ise yeni yaklaşımlar test edilmektedir. Ülkeler arası ortaklıklar da gelişmeye başlamıştır. Örneğin PRESTo Türkiye ve Romanya'da da kullanılırken, Kandilli'nin sistemleri Romanya'da kullanılmaktadır. Bununla birlikte İspanya da yeni yeni bu çalışmalara partnerlik etmektedir (Clinton vd., 2016).

2.9. Türkiye

DEU sistemi temel olarak iki yaklaşıma indirgenebilir: Bölgesel (regional) uyarı ve yerinde (on-site) uyarı. İTÜ (İstanbul Teknik Üniversitesi), BU (Boğaziçi Üniversitesi) ve KOERI (Kandilli Rasathanesi) tarafından on-site yaklaşımı kullanılarak Tau-C ve Pd yöntemleri incelenmektedir.

Tau-C yöntemi; P dalgasının varışından sonraki ilk t0 saniye boyunca yer hareketinin ortalama periyodunu karakterize eden τ_c ortalama periyot parametresi (sn), deprem büyüklüğünü tahmin etmek için dikey bileşen kayıtları kullanılarak hesaplanır, ancak büyüklük değeri doğrudan yerinde erken uyarı amaçları için kullanılmaz.

Pd yöntemi; PGV'yi (maksimum yer hızı) tahmin etmek için kullanılabilecek maksimum yer değiştirme genliğidir ve Pd'nin (yer değiştirme değeri) 0,5 cm'ye eşit veya daha büyük olması durumunda olayın büyük olasılıkla hasar verici olduğu düşünülmektedir.

Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System (IERREWS); 1999 yılında gerçekleşen iki yıkıcı depremin ardından İstanbul'da 2002 yılında kurulan bir sistemdir. 100 adet güçlü yer hareketi enstrümanı İstanbul'un en yoğun yerlerine hızlı iletişim amaçlı yerleştirilmiştir.

10 adet kuvvetli yer hareketi istasyonu ise fayın oldukça yakınına kurulmuştur. Bir eşik aralığı seçilerek basit bir algoritma uygulanmıştır. Eğer 10 istasyonun en az 3'ünden uyarı gelirse, bu uyarı paylaşılacak ve bu algoritma ile 8 – 10 saniyelik bir erken uyarı gerçekleştirilecektir (Alçık vd., 2011).

Stres transferi çalışmaları ve yenileme modeli türü olasılıksal araştırmalar, Marmara Denizi'nde $M_w = 7+$ büyüklüğünde bir deprem için yıllık yaklaşık %2 olasılık olduğunu göstermektedir. İstanbul'da beklenen depreme hazırlıkların bir parçası olarak, 2002'de bir erken uyarı sistemi kurulmuştur. Bu sistem için, belirtilen eşik zaman alanı genliğinin aşımına ve kümülatif mutlak hız (CAV) seviyelerine dayanan basit ve sağlam bir algoritma uygulanmıştır. Yeni parantezli CAV pencere yaklaşımı (BCAV-W) ile ilgili rasyonel eşik seviyeleri, İstanbul DEU sistemine dahil edilecek üç alarm seviyesiyle ilgili olarak 100 km'den daha az fay mesafelerine sahip güçlü yer hareketi kayıtlarının veri setine dayanarak 0,2 m/s, 0,4 m/s ve 0,7 m/s olarak belirlenir. (CAV: Cumulative Absolute Velocity – kümülatif mutlak hız; BCAV-W: bracketed CAV window – parantezli CAV pencere; IERREWS: kısaca I-NET) Bu çalışmada, 8 saniyelik pencere uzunluğuna (BCAV-W8), 1 saniyelik braket süresine ve minimum ivme seviyesi için 3 mg'a sahip BCAV'nin davranışı Marmara bölgesi için araştırılmıştır. 43 depremden 169 kayıt seçilmiştir (Alçık vd., 2009).

İstanbul'un bazı noktalarında kurulu DEU sistemlerinin (Trakya Elektrik Tesisleri, Kanyon Tower, Polat Tower, İşbank İş Kule) çalışma prensibi şu şekildedir:

Alarm 1: Tüm katlarda ve/veya dairelerde deprem anonsu yapılması.

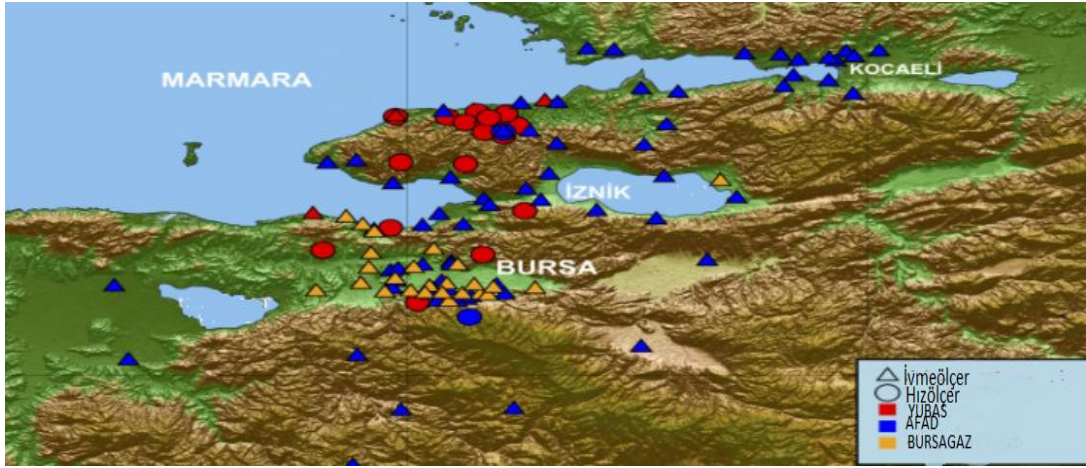
Alarm 2: Garaj çıkışı ve araç bariyerlerinin açılması, teras kapılarının açılması, asansörlerin ulaşabildiği en yakın katta kapısının açılması, turnikelerin açılması, hidrofor sisteminin kapatılması.

Alarm 3: Ana kapıların açılması, gaz sisteminin kapatılması.

Bu şekilde deprem etkisi en aza indirilmeye çalışılmaktadır (Alçık vd., 2013). Ülkemizde, jeodezi ve haritacılık amaçlı sürekli GNSS (Global Navigation Satellite System) istasyonları her gün artmakla birlikte, söz konusu istasyonların deprem amaçlı kullanımı oldukça sınırlıdır. Elde edilen sonuçlar, çok sınırlı sayıdaki GNSS istasyonu ile dahi deprem büyüklüğünün yüksek duyarlılıkla kestirilebildiğini göstermektedir. Özellikle, sismometrelerin yetersiz kaldığı büyük depremlerde kaynağa yakın veri elde ederek deprem büyüklüğünün elde edilmesi için halihazırdaki jeodezik altyapının erken uyarı amaçlı kullanımında önemli bir potansiyelin mevcut olduğu değerlendirilmektedir (Şentürk vd., 2019).

Sismik açıdan aktif bir bölge olan Bursa ili ve civar illeri için erken uyarı algoritmalarından EPIC uygulanmıştır. Kurulan ağ Şekil 3'te görülmektedir. Bursa ve civarındaki kurulu istasyonları kurumlarına ve çeşitlerine göre Şekil 3'teki harita göstermektedir. 2012 – 2021 yılları arasında meydana gelen 3.5'ten büyük 104 deprem incelenmiştir. P dalgasının ilk 4 saniyesinde oluşan tepe yer değiştirme genliği (Pd) ve baskın periyot (Tpmax) ile yeni geliştirilen denklemler ile Kaliforniya için kullanılan denklemlere göre iyileşme gözlemlenmiştir.

Gerçek deprem performansı; 3 Haziran 2022'de Balıkesir, Çaypınar'da 4.8 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. (22:58:57) Merkez üssünün Bursa şehrine uzaklığı 100 km. olan deprem Bursa'da hafif hissedildi ve hasarsız atlatıldı. EPIC algoritması kullanılarak Pd'ye dayalı büyüklük tahmini 4.2 iken, geliştirilen denklem ile 4.7 olarak hesaplanmıştır. Yani geliştirilen denklem ile çok iyi bir büyüklük tahmini elde edilmiştir. Konum hatası 0.6 km ve uyarı başlangıçtan 18.6 ve 17 saniyedir. Bursa için 11.4 saniyelik bir uyarı sistemi sağlanmıştır. Bu süre doğalgazın kesilmesi, metroların güvenle durdurulması, asansörün en yakın katta durdurulması gibi önemli önlemler için yeterli bir süre sağlamaktadır (Tunç vd., 2023).



Şekil 3. Bursa ve çevresinde kurulu istasyonlar

AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) web sitesinden indirilen gerçek deprem verileri ile akıllı telefonlarda kullanılabilecek ve cep telefonlarını ivmeölçerlere dönüştürmeyi hedefleyen bir uygulama olan ReQuakenition tasarlandı. Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde gerçekleşmiş, moment büyüklüğü (M_w) ≥ 4.5 olan 48 işlenmiş 44 ham veri olacak şekilde toplamda 92 adet ivmeölçer zaman serisi verisi indirildi. Gerçek deprem verilerinden yararlanarak, uzun kısa süreli bellek sahibi (LSTM: long – short term memory) tekrarlayan sinir ağı mimarisi (RNN: Recurrent Neural Network) derin öğrenme algoritmaları ile eğitilen verilerden elde edilen sonuçlarda %82'nin üzerinde duyarlılık gözlemlendi (Canpolat vd., 2021).

Farklı olarak ise şöyle bir yaklaşımla deprem tahmin sistemi geliştirilmeye çalışılmıştır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda depremlerin önceden tahmin edilmesi mümkün olmamıştır. Burdur transform fay zonunda Sıfı Maden Suyu (maden suyu), Bağlar (sondaj kuyusu) ve Yassıgüme (soğuk su kaynağı) istasyonları seçilerek bu istasyonlara yukarıda belirtilen hidrojeokimyasal parametreleri ve radon değerlerini ölçebilecek ölçüm cihazları yerleştirilmiştir. Bu parametrelere ek olarak Şifa istasyonunda bulunan radon sensörü ile radon gazı değerleri ölçülebilmektedir. Ölçülen değerler SDÜ'de (Süleyman Demirel Üniversitesi) bulunan Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezine gönderilmekte ve orada Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü'nden sağlanan sismik verilerle karşılaştırılmakta ve istatistiksel olarak değerlendirilerek bir DEU Sistemi geliştirmek üzere arşivlenmektedir (Özgür vd., 2005).

Bütün bu bilgiler ışığında ülkemiz için DEU sistemlerinin daha da gelişime muhtaç olduğu söylenebilir. Ülkemizin DEU sistemlerinde en gelişmiş ülke olarak gösterebileceğimiz Meksika ile deprem karakteristiğinin farklı olması sebebiyle aynı yöntemlerle benzer ön sürelelere erişemeyeceği görülmektedir. Bu nedenlerle daha ciddi ön sürelelere ulaşmak adına, mevcut algoritmaların daha da iyiye evrilmesi için çalışılmalıdır.

Ülkemizin sismoloji alanındaki dezavantajlarından biri deprem üreten fayların şehir merkezlerine yakın olması ve her türlü orta ya da büyük ölçekli depremlerde nüfus olarak yoğun yerleşim alanlarının bu depremlerden etkilenmesidir. Sadece son 100 yılda 18 yıkıcı deprem meydana gelmiş ve yüz binlerce insanımız hayatını kaybetmiştir. Son Kahramanmaraş depreminde 50.000'den fazla canımızı kaybettik. Eğer bu deprem esnasında ulusal ölçekte çalışan yüksek ön sürelelere sahip bir DEU sistemi alarm verseydi, belki de bu insanların büyük çoğunluğu şu anda aramızda olacaktı. Bu nedenle Türkiye'de DEU sistemlerinin evrildiği nokta depremde can kayıplarını minimuma indirebilirse, bu tüm deprem ülkeleri için DEU sistemi anlamında büyük bir adım olacaktır. Bu yüzdendir ki; Türkiye'nin depremle mücadele kapsamında geliştirdiği DEU sistemleri diğer ülkelere nazaran daha büyük önem arz etmektedir.

Kahramanmaraş depremi dışında da 1900 yılından günümüze gelinceye değin Kandilli Rasathanesi'nin kayıtlarından ulaştığımız, şiddeti IX ve üstü olan depremler ve meydana gelen can kayıpları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. 1900 yılı sonrası Türkiye'de meydana gelen IX ve üstü şiddetteki depremler

Yıl	Bölge	Şiddet	Büyüklik (Ms)	Can Kaybı	Hasarlı Bina
1903	Malazgirt	IX	6.7	600	450
1912	Mürefte	X	7.3	216	5540
1914	Burdur	IX	6.9	300	6000
1924	Horasan	IX	6.8	60	380
1928	Torbalı	IX	6.5	50	2500
1930	İran Sınırı	X	7.2	2514	-
1938	Kırşehir	IX	6.6	160	4066
1939	İzmir	IX	6.6	60	1235
1939	Erzincan	X – IX	7.9	32968	116720
1942	Erbaa	IX	7.0	3000	32000
1943	Hendek	IX	6.6	336	2240
1943	Ladik	IX – X	7.2	4000	40000
1944	Gerede – Çerkeş	IX – X	7.2	3959	20865
1944	Ayvalık	IX	6.8	30	5500
1949	Karaburun	IX	6.6	7	865
1949	Karlıova	IX	6.7	450	3500
1951	Kurşunlu	IX	6.9	50	3354
1953	Yenice	IX	7.2	265	6750
1955	Söke – Balat	IX	6.8	23	470
1957	Fethiye	IX	7.1	67	3200
1957	Abant	IX	7.1	52	5200
1964	Manyas	IX	7	23	5398
1966	Varto	IX	6.9	2396	20007
1967	Mudurnu	IX	6.8	89	7116
1970	Gediz	IX	7.2	1086	19291
1976	Muradiye	IX	7.5	3840	9232
1988	Kars	X	6.9	4	546
1999	Gölcük	X	7.8	17480	73342
1999	Düzce	IX	7,5	763	35519

3. ERKEN UYARI SİSTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ ALGORİTMALAR ve MySHAKE UYGULAMASI

3.1. ML – IoT (Machine Learning – Internet of Things)

IoT ağlarının yüksek ölçeklenebilirliği ve farklı uygulamaların birbirine bağlanması nedeniyle, DEU sistemi gibi bağımsız varlıklar arasında kaçınılmaz bir geçiş noktası haline gelmiştir. Ayrıca, ML (Machine Learning) farklı veri formatlarını analiz etmek ve karmaşık sorunları çözmek için kullanılabilir. Buna göre, izlemede IoT sistemlerine ve verimli veri analizi için ML'ye dayanan akıllı bir sistem kullanmak, erken uyarı sistemleri için güvenilir ve uyarlanabilir bir çözüm olabilir. Seçme, gürültü giderme, gürültü ve mikrosismik ayırmacılık, kümeleme, faz algılama, tepe parçacık hızı, deprem ve taş ocağı patlamalarının ayrımı gibi başlıklarda neredeyse %98'e varan duyarlılıklara ulaşılmıştır (Abdalzaher vd., 2023).

3.2. Algoritmalar

EPIC, FinDer ve PLUM algoritmaları gerçekçi koşullar altında 219 gerçek depremden oluşan bir veri grubuna geriye dönük olarak uygulandı. Bu algoritmaların şehirleri uyarabildiği görüldü. Performansları şaşırtıcı derecede benzer olsa da, birbirlerine oranla güçlü ya da zayıf oldukları yönler vardır. PLUM yoğun deprem dizileri sırasında daha basit ve daha kararlıdır. Genellikle EPIC

ve FinDer'den hızlıdır. 7 büyüklüğüne kadar olan depremlerde FinDer daha hızlıdır. EPIC de FinDer gibi hızlı olabilmektedir (Meier vd., 2020).

Önde gelen erken uyarı algoritmalarına göz atmamız gerekebilir. Basitçe bilgilendirme yapmamız gerekirse, şu şekilde listeleyebiliriz:

3.2.1. EPIC/ElarmS

The Earthquake Point-Source Integrated Code/Earthquake Alarm System; büyüklük, katalog büyüklükleri ile erken tepe mutlak yer değiştirme genlikleri arasındaki ampirik bir ölçekleme ilişkisi kullanılarak hesaplanır. ElarmS 2007 yılından bugüne kadar Kaliforniya genelinde birçok depremde başarı kaydetmiş bir algoritma olarak; Türkiye, Şili, İsrail gibi ülkelerde de kullanılmaktadır. EPIC ise ShakeAlert tarafından kullanılmak üzere ElarmS'in güncellenmiş versiyonu gibidir (URL 2).

EPIC algoritmasının Bursa için kullanımında Türkiye'deki ihtiyacına göre yeniden düzenlenip formalize edilmiş hali aşağıdaki gibidir (P_d : tepe yer değiştirmesi (cm) ; R : merkez üssü uzaklığı (km)).

$$M = 5,39 + 1,23 \log 10 (P_d) + 1,38 \log 10 (R) \text{ (Tunç vd., 2023)} \quad (1)$$

3.2.2. FinDer

The Finite-Fault Rupture Detector; sismik bir ağdaki gözlemlenen yer hareketi genliklerinin mekansal dağılımını teorik şablon haritalarıyla eşleştirerek küçük depremlerin çizgi kaynak modellerini hızla belirler. Sonlu Fay Kırılması Dedektörü (FinDer) algoritması, bir fay kırılmasının konumunu, uzunluğunu ve doğrultusunu tanımlayan hızlı deprem hat-kaynak modelleri sağlar. Bu parametreler, yoğun bir sismik ağ boyunca kaydedilen yüksek frekanslı PGA (Peak Ground Acceleration) genliklerinin mekansal dağılımından hesaplanır (Böse vd., 2021).

3.2.3. PLUM

The Propagation of Local Undamped Motion; sismik kaynağı karakterize etmeden, ancak yakındaki yerlerdeki gözlemlenen sarsıntı yoğunluklarını ekstrapole ederek bir ağdaki tüm yerlerdeki sarsıntı yoğunluklarını tahmin eder. PLUM, sorunlu sinyalleri önlemek için eş konumlu sensörlerden yararlanarak hız ve ivme verilerini kullanarak Değiştirilmiş Mercalli Yoğunluğunu (IMMI) hesaplar (Kilb vd., 2021).

3.2.4. VS

Virtual Seismologist; İsviçre'de kullanılmaya başlanan bu algoritma, yer ve büyüklük parametrelerini deprem sonrası tespit edilen ilk P dalgasından sonra üç saniye içinde yer hareketi oranları ve zayıflama korelasyonu vasıtasıyla tahmin eder. Bu algoritmanın diğerlerine göre en önemli farkı ise ön bilgi kullanımudur (Tunç vd., 2024).

Tüm algoritmaların kullanım amacı ön sürelerin artmasını sağlamak olduğu gibi, her algoritmanın kullanım alanı farklılıkları, diğerlerine göre avantajları, dezavantajları olabilmektedir. Bölgenin deprem karakteristiğine uygun algoritmayı seçip, kullanabilmek ve daha da ötesinde yapay zeka desteğiyle, verilerle destekleyerek, Machine Learning teknikleriyle bu algoritmaları kullanılan bölgeye göre revize edebilmek ve geliştirebilmek önemlidir. Şimdi bir de bu özetlediğimiz algoritmaları bir tablo şeklinde birbiriyle kıyaslayalım:

Tablo 4'te DEU sistemlerinde kullanılan algoritmaların başarılı ve başarısız olduğu noktalar ile şu an için kullanıcılara sağlayabileceği tahmini ön süreleri belirten bir çalışma gösterilmiştir.

Tablo 4. DEU Algoritmalarının Kullanımı

	Avantaj	Dezavantaj	Uygun Kullanım Alanları	Tahmini Ön Süre (sn)
FinDer	Yüzey kırığını ve yıkıcı bölgeleri daha doğru tanımlar	Hesaplama süresi diğer algoritmalara göre daha uzun sürer	İvmeölçerlerin yoğun kullanıldığı büyük şehirler ve geniş ve sık fay zonları	20
VS	Büyüklik tahminini daha kısa sürede oluşturur	Büyük depremleri tahmin etmekte zorlanır	Yaygın olarak küçük ve orta büyüklükte depremlerin olduğu bölgeler	15
PLUM	Büyüklik tahminine ihtiyaç duymadan sarsıntıyı direkt olarak haber verebilir	Özellikle büyük depremlerde ön süresi çok kısıtlıdır	Metro, demiryolu gibi ani durdurma gereken yerler	10
EPIC	Büyüklüğü ve merkez üssünü hızlı hesaplar	Fayın ilerleme yönünü dikkate almaz, yüzey kırığı uzadıkça yetersiz kalabilir	Deprem riski orta düzeyde olan yerleşim bölgeleri ve yerleşim bölgelerinden uzak endüstriyel alanlar	12

Kullanılan algoritmalar dört kategoriye ayrılabilir: Nokta kaynak algoritmaları, sonlu kaynak algoritmaları, GMM (Ground Motion Model) algoritmaları, yerinde yaklaşımlar (Allen vd., 2020).

Nokta kaynak algoritmaları; tüm bölgesel sistemlerde kullanılır ve deprem bilgilerini birkaç saniye içinde sunar.

Sonlu kaynak algoritmaları; daha büyük depremlerde (7 ve üstü gibi) henüz gerçekleşmemiş büyüklük tahminleri ve fay geometrisi açısından doğru uyarılara ulaşır.

GMM (Ground Motion Model) algoritmaları; gözlemlenen sarsıntıyı önceden tahmin ederek yaklaşan sarsıntının en doğru tahminini sağlar; ancak birkaç saniyelik uyarıyla sınırlıdır.

Yerinde yaklaşımlar; aynı konumu uyarı vermek bakımından en basit olanlardır; ancak sınırlı doğruluk ve uyarı süresine sahiptirler.

3.3. MyShake

Berkeley Üniversitesi tarafından geliştirilmiş bu sistem dünya çapında 2 milyona yakın kullanıcı tarafından bir telefon uygulaması olarak indirilmiştir. M 4,5 üstü depremler için erken uyarı sağlamaktadır. Uyarılar MyShake uygulamasına geldikten sonra kullanıcılara iletilmesi 4sn sürmektedir. Şehir içi depremlerde kullanıcıların %50'si S dalgasından önce, %90'ı ise en yüksek sarsıntıdan önce deprem haberdar olabilmektedir. Telefonlarda ölçülen sarsıntı ivmesi, geleneksel sismometrelerden 3 kat daha yüksek çıkıyor ve insan titreşimlerini de %93 gibi yüksek bir oranda depremden ayırabiliyor (Patel vd., 2022).

Ağ algılama algoritması, mevcut ElarmS-2 metodolojilerine dayanarak tasarlanmıştır. Aktif telefonlardan gelen tetikleyicilerin zamansal ve mekânsal kümelerini arar. Test aşamalarında ağ algılama algoritması simüle edilmiş gerçek zamanlı bir şekilde ABD depremleri için telefon benzeri tetikleyicilere uygulanmıştır. Merkez üssüne yakın istasyonların neredeyse tamamı tetiklenmiştir. İlk büyüklük tahmini 0.1 birim, konum hatası 3.8 km, başlangıç hatası zamanı 1.7 saniyedir (Kong vd., 2016).

Gelişmekte olan ülkelerde hızla yaygınlaşan akıllı telefon kullanımına rağmen yetersiz internet altyapısı MyShake uygulamasının etkin bir şekilde kullanılabilmesinin ve global ölçekte istenilen seviyelere gelmesine bir engel olarak görülebilir ancak mevcut altyapısı veya erişim alanı gibi özellikleriyle MyShake yerel ölçekte efektif ve hızlı sonuç veren bir DEU sistemi olmaktan çıkıp, küresel ölçekte veri toplayan ve akademik alana katkı sağlayan bir uygulama durumuna gelmiştir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

2003 yılı öncesi DEU sistemleri hakkındaki kabul edilmiş makale sayısı en fazla yılda iki olmuşken bu yıldan sonra artış göstermiş 2008’de 15’in de üzerine çıkmış ve DEU sistemine olan ilgi bilim dünyasında ivmeli bir artış göstermiştir. Daha öncesinde başarı sağlayan sistemler, Japonya’daki raylı sistemlerde kullanılan UrEDAS ve Mexico City’deki SAS idi. 2009 yılı itibarı ile Japonya’da umuma açık erken uyarı sistemi kullanılmakta ve Meksika’da da sistem genişletilmiş durumdadır. Bunların yanı sıra Tayvan, İstanbul ve Bükreş’te sınırlı kullanıcılara uyarı sağlayan ve sürekli iyileştirilen sistemler mevcuttur. Gerçek zamanlı DEU sistemleri ile ilgili testler İtalya, İsviçre, Çin, Hawaii ve Kaliforniya’da devam etmektedir (Allen vd., 2009).

DEU sistemlerine olan kamu ilgisi 2010 – 2020 yılları arasında hızla artmış ve bu durum da deprem sürecinin daha iyi tahlil edilmesini ve deprem fiziğinin daha derin anlaşılmasına ön ayak olmuştur. Bununla birlikte, jeofizik araştırmaların artmasına ve veri sağlayan ağların genişlemesine de neden olmuştur. En büyük gelişmeler kamu uyarıları veren ülkelerde (Meksika, Japonya, Güney Kore ve Tayvan) ve sınırlı uyarılar veren ülkelerde (Hindistan, Romanya, Türkiye ve Amerika Birleşik Devletleri) olsa da birçok bölgede bu sistemlere katkı verildiği de gözlemlenmiştir. Tablo 5’de sistemi kullanan ülkeler listelenmiş, Şekil 4’de ise DEU sistemini kullanan ülkeler harita üzerinde gösterilmiştir (Allen vd., 2020).

Tablo 5. Deprem erken uyarı sistemi kullanan ülkeler

*Kamusal uyarı	*Sınırlı kullanıcı	*Yapım aşamasında
Meksika	Hindistan	Şili: Ülke çapında
Japonya	Romanya	*Çin: Bazı bölgeler
Güney Kore	Türkiye	Kosta Rika: Bölgesel
Tayvan	ABD	El Salvador: Bölgesel
Çin	İtalya	İsrail: Ülke çapında
Küresel: MyShake	İsviçre	*İtalya: Irpinia bölgesi
		Nikaragua: Bölgesel
		*İsviçre: Ülke çapında

***Kamusal uyarı:** Tüm halka yayın yapan uyarı sistemleri

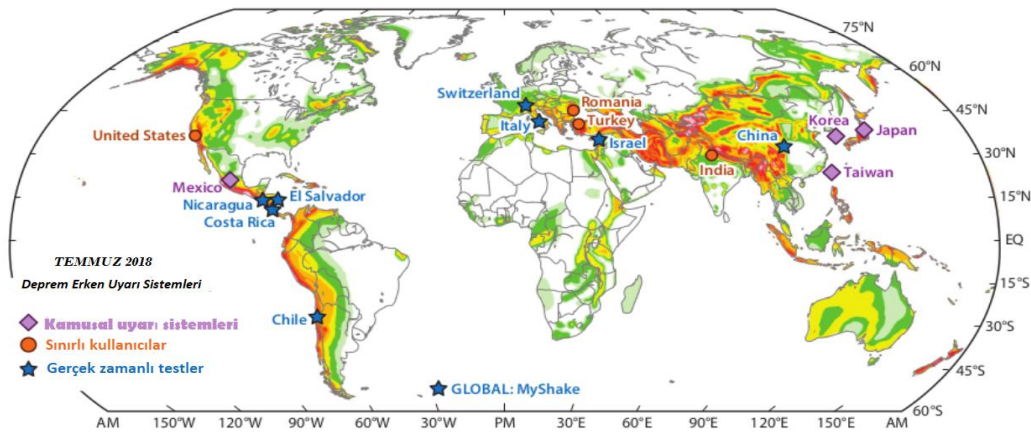
***Sınırlı kullanıcı:** Belirli kişi ve kuruluşları bilgilendiren uyarı sistemleri

***Yapım aşamasında:** Gerçek zamanlı testler yapan ve yapım sürecinde olan ülkeler

Ülkemizin coğrafi özellikler bakımından deprem kuşağında yer alması sebebiyle birçok kentimiz deprem tehlikesi altındadır. Ülkemizde bulunan fay hatlarının üretebileceği depremlerin büyüklükleri ve etki alanları hususunda önemli çalışmalar olsa da; hatta bu depremlerin ne zaman olabileceğine dair yakın tahminler yapılabiliyor olsa da; bugün itibarıyla depremin tam zamanını söylemek ya da yaklaşan depremi aylar, günler veya saatler öncesinden haber vermek imkansızdır. Bu nedenle deprem bakımından riskli bölgelerde yaşayan insanlara deprem anına daha hazırlıklı girmesi ve insanların sarsıntının en şiddetli olduğu anlarda güvende olmasını sağlamak adına geliştirilen DEU sistemleri deprem kuşağında bulunan ülkeler için bir lüks değil, bir gerekliliktir. Ancak en iyi durumda dahi; uyarı, fay kırılımından sonra deprem dalgalarının ulaşacağı ilk istasyonlara gelecek verilerin sonucunda oluşturulacağı için her zaman bir süre kısıtlaması olacaktır. Bilim dünyasının bu konuda 30 yılı aşkın tecrübesi ile geliştirilen algoritmaların, ülkelerin deprem özelliklerine göre güncellenebilir olması ve sürekli iyileştirilmesi ile sistemlerin performansı gittikçe maksimum değerine yaklaşmaktadır. Türkiye, DEU sistemlerinin geliştirilmesi konusunda çalışmaları ile dünyanın önde gelen ülkelerinden birisidir. Ancak deprem performansı açısından bu sistemlerle bugüne kadar dikkat çekici bir fark yaratamamıştır. Bunun nedeni ülkemizde meydana gelen depremlerin karakteristiğiyle de ilgili olabileceği gibi, bu sistemler üzerine çalışma yapan bilim insanı sayısının kısıtlı olması da sayılabilir. İleride, bu alanda ciddi çalışmalar yapan ve belli sonuçlar alabilmiş Çin, Japonya, Meksika gibi ülkeler ve Avrupa’da DEU sistemleri geliştirmiş ya da geliştirme aşamasında olan İtalya, İsviçre, Romanya

gibi ülkelerde mutlaka ortak çalışmalar yapılmalı ve bu alanda daha fazla bilim insanının çalışması teşvik edilmelidir. Kandilli Rasathanesi, AFAD, İTÜ gibi kurumlarımızın eşsiz tecrübelerinden mutlaka faydalanılmalıdır. Nüfusun büyük çoğunluğunun akıllı telefonlar kullandığı günümüzde, deprem erken uyarı sistemlerine uygun kullanışlı uygulamalar geliştirilmeli ve kullanımı konusunda halk eğitilmelidir. Cep telefonlarının istasyon olarak kullanılabilmesi senaryolar geliştirilmeli ve bu konuda çalışmalar yapılmalıdır. Yapı stokunu güçlendirmek ve yenilemek ne kadar hayati olsa da; yaklaşan depremlerde oluşacak hasarların önüne geçmek adına DEU sistemlerini geliştirmek çok daha hızlı ve çok daha az maliyetli bir önlem olacaktır. Orta ve uzun vadede amaç, yapı stoku açısından deprem dirençli kentler yaratmak olsa da; kısa vadede meydana gelebilecek muhtemel depremlerden en az kayıpla çıkmayı amaçlayarak yeterli ön süreler ulaşabildiğimiz DEU sistemlerini geliştirmek depremle mücadelede çok önemli bir adım olacaktır.

Şekil 4. Haziran 2018 tarihi itibarıyla dünyada erken uyarı sistemi kullanımı haritası



Bu sistemlerin gelişimiyle birlikte daha uzun ön süreler elde edilmeye çalışılırken, bir yandan da sistemin ulaşacağı insanların sistemi kullanımıyla alakalı bilgilendirilmesi ve bilinçlendirilmesi de oldukça önem arz etmektedir.

Günümüz dünyasında artık cep telefonları insanların vazgeçilmez bir dostu hatta ailesi haline gelmiş durumda. Farklı bilim disiplinlerinde bu bir problem olarak görülebilecekken, DEU sistemlerinin geliştirilmesi ve insanlarla buluşturulması açısından faydalı anlamda kullanılabilir bir durum. İnsanların kullanımı basit ve ilgisini çeken uygulamalara çok hızlı adapte olabildiğini de göz önünde bulundurursak; DEU sistemlerinin akıllı telefonlarda kullanılabilir kullanıcı dostu uygulamaları bir anda milyonlarca kullanıcıya ulaşabilir ve uygulama üzerinden bile verilebilecek basit eğitimlerle toplum bu konuda çok daha bilinçli hale gelebilir. Tabii her ülkenin hatta ülke içinde bulunan bölgelerin bile farklı deprem karakteristikleri, farklı zemin özellikleri ve farklı yapı stokları olduğundan DEU sistemleri gerekli farklılıkları göstermelidir. Bu durumda ise muazzam bir veri tabanı oluşacak ve gelecek çalışmalar için literatüre büyük katkılar sağlayacak bilgiler elde edilecektir. İnsanların mobil yaşamları ve beklenmedik yer hareketleri ile şu anda hepsine hakim olmadığımız yapısal sorunlar bu konuda yapılacak çalışmalar için potansiyel zorluklar teşkil etse de, veriye erişimin geçtiğimiz dönemlere nispeten oldukça kolay olması ve gittikçe de daha kolay bir hale gelmesi bu zorlukları aşmayı daha da basitleştirecektir.

Bütün bu bilgilerin ışığında, kamu – özel sektör iş birliği arttırılırsa ve yerli yazılımlar teşvik edilirse ülkemizde ulusal çapta efektif olarak kullanılabilir bir DEU sistemi modellemek mümkün olacaktır. Özellikle akıllı telefonların ivmeölçer olarak kullanılabilmesi ve gün geçtikçe

daha da güçlü akıllı telefonların piyasaya sürülüp milyonlarca kullanıcıya ulaşabilecek bir ağ kurulması bu yeni DEU tasarımlarında mutlaka faydalanılması gereken imkanlardandır.

KAYNAKLAR

- Abdalzaher, M. S., Elsayed, H. A., Fouda, M. M., & Salim, M. M. (2023). Employing machine learning and IoT for earthquake early warning system in smart cities. *Energies*, 16, 495, <https://doi.org/10.3390/en160104965>
- Alçık, H., Özel, O., Apaydın, N., & Erdik, M. (2009). A study on warning algorithms for Istanbul earthquake early warning system. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L00B05, doi: 10.1029/gl036659
- Alçık, H. (2013). İstanbul'da kurulu deprem erken uyarı sistemleri. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, S65-S72.
- Alçık, H., Özel, O., Wu, Y. M., Özel, N. M., & Erdik, M. (2011). An alternative approach for the Istanbul earthquake early warning system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, doi:10.1016/j.soildyn.2010.03.007
- Allen, R. M., & Kanamori, H. (2003). The potential for earthquake early warning in southern California. *Science* 300, doi: 10.1126/science.1080912
- Allen, R. M., Gasparini, P., Kamigaichi, O., & Böse, M. (2009). The status of earthquake early warning around the world: an introductory overview. *Seismological Research Letters*, doi: 10.1785/gssrl.80.5.682, S682-S693
- Allen, R. M., & Melgar, D. (2020). Earthquake early warning: advances, scientific challenges, and societal needs. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, S361-S388, <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060457>
- Böse, M., Hutchinson, A., Manighetti I., Li, J., Massin, J., & Clinton, J. (2021). FinDerS(+): real-time earthquake slip profiles and magnitudes estimated from back projected displacement with consideration of fault source maturity gradient. *Frontiers in Earth Science*, Volume 9, <https://doi.org/10.3389/feart.2021.685879>
- Canpolat, B., & Ahi G. A., (2021). Akıllı telefonda derin öğrenme ile deprem erken uyarı sistemi tasarımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Sayı 23, S23-S27, doi:10.31590/ejosat.891896
- Clinton, J., Zollo, A., Marmureanu, A., Zulfikar, C., & Parolai, S. (2016). State-of-the art and future of earthquake early warning in the European region. *Bull Earthquake Engineering*, doi: 10.1007/s10519-016-9922-7
- Cremen, G., Galasso, C., & Zuccolo, E. (2022). Investigating the potential effectiveness of earthquake early warning across Europe. *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27807-2>
- Espinosa-Aranda, J. M., Cuéllar, A., Ibarrola, G., Islas, R., & García, A. (2022). The seismic alert system of Mexico (SASMEX) and their alert signals broadcast results. *Frontiers in Earth Science*, doi: 10.3389/feart.2022.827236
- Fujinawa, Y., Noda, Y. (2013). Japan's earthquake early warning system on 11 march 2011: performance, shortcomings, and changes. *Earthquake Spectra*, Volume 29, S341-S368.
- Hoshiba, M. (2014). Review of the nationwide earthquake early warning in japan during its first five years. *Hazards and Disasters Series*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394848-9.00019-5>
- Kilb, D., Bunn, J. J., Saunders, J. K., Cochran, E. S., Minson, S. E., Baltay, A., O'Rourke, C. T., Hoshiba, M., & Kodera, Y. (2021). The PLUM earthquake early warning algorithm: a retrospective case study of West Coast, USA, data. *Advancing Earth and Space Sciences*, <https://doi.org/10.1029/2020JB021053>

Kong, Q., Allen, R. M., Schreier, L., Kwon, Y. W. (2016). MyShake: a smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond. *Science Advances*. Doi: 10.1126/sciadv.1501055

Massin, F., Clinton, J., & Böse, M. (2021). Status of earthquake early warning in Switzerland. *Frontiers in Earth Sciences*, doi: 10.3389/feart.2021.707645

Meier, M. A., Kodera, Y., Böse, M., Chung, A., Hoshiba, M., Cochran, E., Minson, S., Hauksson, E., & Heaton, T. (2020). How often can earthquake early warning systems alert sites with high intensity ground motion?. *American Geophysical Union*, doi: 10.1029/2019jb017718

Nai-Chi Hsiao, N. C. ; Wu, Y. M. ; Shin, T.C. ; Zhao, L. ;Teng T. L. (2009) Development of earthquake early warning system in Taiwan. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L00B02, doi: 10.1029/2008gl036596

Oshiba, M. H., Amigaichi, O. K., Aito, M. S., Sukada, S. T., & Amada, N. H. (2008). Earthquake early warning starts nationwide in Japan. *American Geophysical Union*, Vol.89, S73-S80

Özgür, N., & Öncü, Z. (2005). Burdur fay zonunda deprem erken uyarı sistemi geliştirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Araştırma Projesi, Proje Numarası: 467

Patel, S. C., & Allen, R. M. (2022). The myshake app: user experience of early warning delivery and earthquake shaking. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220220062>

Picozzi, M., Zollo, A., Brondi, P., Colombelli, S., Elia, L., & Martino, C. (2015) Exploring the feasibility of a nationwide earthquake early warning system in Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, S2446-S2465, doi:10.1002/2014jb011669

Satriano, C., Elia, L., Martino, C., Lancieri, M., Zollo, A., & Iannaccone, G. (2011) PRESTo, the earthquake early warning system for Southern Italy: concepts, capabilities and future perspectives. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, S137-S153, doi:10.1016/j.soildyn.2010.06.008

Strauss, J. A., & Allen, R. M. (2016). Benefits and costs of earthquake early warning. *Seismological Research Letters*, doi: 10.1785/0220150149

Suárez, G., Espinosa-Aranda, J. M., Cuéllar, A., Ibarrola, G., García, A., Zavala, M., Maldonado, S., & Roberto I. (2018). A dedicated seismic early warning network: the Mexican seismic alert system (SASMEX). *Seismological Research Letters*, doi: 10.1785/0220170184

Suárez, G. (2022). The seismic early warning system of Mexico (SASMEX): a retrospective view and future challenges. *Frontiers in Earth Science*, doi: 10.3389/feart.2022.827236

Şentürk, M. D., & Aktuğ, B. (2019), Yerdeğiştirme tabanlı deprem erken uyarı sistemleri. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(2), S218-S227, doi: 10.2134/dacd.574177

Tunç, S., Tunç, B., Budakoğlu, E., Çaka, D., Nof, R. N., & Barış, Ş. (2023) Implementation of the EPIC earthquake early warning system in the Bursa province (Türkiye) and its surroundings. *Applied Science*, 4985, <https://doi.org/10.3390/app13084985>

Tunç, S., Tunç, B., Çaka, D., & Budakoğlu, E. (2024). An overview of traditional and next-generation earthquake early warning systems. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Science*, Vol.10, S747-S760, doi.org/10.28979/jarnas.1481067

URL 1, https://www.researchgate.net/figure/Intensity-scale-used-by-Japan-Meteorological-Agency-JMA-since-1948-JMA-Intensity_tbl2_240675686

URL 2, https://seismo.berkeley.edu/research/eew_elarms.html

URL 3, koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/buyuk-depremler/

Wu, Y. M., Mittal, H., Chen, D. Y., Hsu, T. Y. & Lin, P. Y. (2021). Earthquake early warning systems in taiwan: current status. Journal Geological Society of India. Vol:97, S1525-S1532. DOI: 10.1007/s12594-021-1909-6

Ye, S., Zhai, G. & Hu, J. (2011). Damages and lessons from the wenchuan earthquake in china. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. , Vol:17, S598-S612 <https://doi.org/10.1080/108070309.2011.571086>

Zhang, H., Jin, X., Wei, Y., Li, J., Kang, L., Wang, S., Huang, L., & Yu, P. (2016). An earthquake early warning system in Fujian, China. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.160, doi: 10.178/0120150143

Zollo, A., Iannaccone, G., Lancieri, M., Cantore, L., Convertito, V., Emolo, A., Festa, G., Gallovič, F., Vassallo, Martino, C., Satriano, C., & Gasparini, P. (2009) Earthquake early warning system in Southern Italy: methodologies and performance evaluation. Geophysical Research Letters, Vol. 36, L00B07, doi: 10.1029/2008gl036689