

3 UBAT 2002 ÇAY DEPREMİNİN SAYISAL MODELLENMESİ : KUVVETLİ YER HAREKETİ SİMÜLASYONU VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Gizem CAN¹ ve Aytekin ASKAN²

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi/Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh., ODTÜ, Ankara

² Doçent Dr., İnşaat Müh., ODTÜ, Ankara

Email: cgizem@metu.edu.tr

ÖZET:

Sismik olarak aktif bölgelerde kuvvetli yer hareketlerinin belirlenmesi sismik tasarım ve analizinden afet yönetimine dek uzanan çeşitli amaçlar için gereklidir. Az sayıda veri olan alanlar ile uzun tekerrür periyodu olan depremler içeren bölgelerde simülasyonlar önem kazanmaktadır. Bu durum özellikle yalnızca maksimum yer hareketi parametreleri gerektiğinde de il, deprem mühendisliği açısından tüm ivme-zaman kaydı talep edildiğinde geçerli olur. Simülasyonlar, yalnızca deprem mühendisliği parametreleri sağlamakla kalmaz; depremin kaynak, yayılım ve saha etkilerine de açıklık kazandırır.

Bu çalışmada, 3ubat 2002 Çay depremi stokastik sonlu-fay metodu ile simüle edilmiştir. Bu depremin ana oku 200 km'de merkezi mesafe içerisinde yalnızca dört istasyonda kaydedilebilmiştir. Bu çalışmada öncelikle bu kayıtlar simüle edilerek girdi parametreleri değerlendirilmiştir. Daha sonra potansiyel yer hareketlerinin bölgesel dağılımı elde edilmiştir. Sonunda, Türkiye için önerilmiş olan bir ampirik denklem aracılığıyla simüle edilmiş deprem haritası, deprem sonrası sahada gözlemlenmiş deprem haritası ve hasar dağılımları ile karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar, depremin etkili bir biçimde simüle edildiğini göstermektedir. Bu ve benzeri çalışmalar ileride geliştirilebilecek ve olası gelecek depremlerde ortaya çıkabilecek potansiyel yer hareketleri henüz bu depremler olmadan değerlendirilip, gerekli hasar azaltma önlemleri alınabilecektir.

ANAHTAR KELİMELER: Deprem, Kuvvetli yer hareketi simülasyonu, Stokastik yöntem, Sonlu-fay

1. GİRİŞ

Yapı mühendisliği kapsamındaki deprem çalışmaları temel amacı yapının ömrü boyunca maruz kalacağı sismik yükleri tahmin etmektir. Bu nedenle, yer hareketleri belli bazı kritik özellikleri bakımından incelenir: genlik, frekans içeriği ve süre. Önemli sismik aktivite ve yoğun sismik alanlar içeren bölgelerde, gerçek yer hareketi kayıtlarını mühendislik amaçlı kullanmak mümkündür. Bölgesel kayıtlar seyrek olduğunda, genellikle benzer tektonik ve saha koşulları içeren diğer bölgelerden seçilen gerçek kayıtlar kullanılır. Ancak, dünya üzerinde tamamen aynı fiziksel özelliklere sahip iki yer bulmak zordur. Bu nedenle, simülasyon yoluyla elde edilen yer hareketleri yeterli kayıt olmayan aktif sismik bölgelerde ya da uzun tekerrür süreli büyük depremler yaayan bölgelerde güçlü bir seçenek haline gelmeye başlamıştır.

Maksimum yer hareketi parametrelerinin ampirik değerlendirilmesi büyüklük, kaynak saha arası mesafe ve saha koşullarının bir fonksiyonu olarak ampirik Yer Hareketi Tahmini Denklemleri (YHTD) diğer bir deyişle azalım denklemleri vasıtasıyla yapılmaktadır. Mühendislik kullanımı için tüm ivme zaman kayıtları gerektiğinde, yer hareketi simülasyonları, özellikle kayıtların yetersiz olduğu bölgelerde önem kazanmıştır. Bu durumlarda, YHTD yoğun data içeren diğer bölgelerin kayıtları yardımıyla oluşturulduğu için yüksek oranda belirsizlik içerdiği bilinir. Bu durumlarda, yer hareketi simülasyonlarının diğer bir avantajı ise yerel saha etkilerini, sahadaki sızma zemin tabakalarında büyütmeleri modelleyerek dahil edebilmektir.

Neredeyse tüm yer hareketi kayıtları düşük (<1 Hz) ve yüksek (>1 Hz) frekanslar içeren geniş bantlı kayıtlardır. Çoğunlukla, düşük bantlı frekansları modellerken deterministik, yüksek bantlı frekansları modellerken ise stokastik yaklaşımlar kullanılır. Tam dalga yayılımı metodları en fiziksel deterministik metodlar olmalarına rağmen, sadece belli frekans aralıkları ile kısıtlıdır. Bunun nedeni ise bu metodların

geni bant simülasyonlar için, detaylı ve yüksek çözünürlüklü dalga hız modellerine ve yüksek hesaplama gücüne ihtiyaç duymalarıdır. Bunun yanında stokastik metotlar, yayılma etkilerini tam olarak hesaba katmadıkları için daha az kesindir, bununla birlikte bina tipi yapıları en çok etkileyen orta ve yüksek frekansları modellemede oldukça pratik çözümler sunarlar. Mümkün olduğu durumlarda en iyi seçenek, geniş bant frekans içeriğinde gerçekçi genlik değerleri modellemek için deterministik ile stokastik yaklaşımları birleştirilen hibrid metotlar kullanmaktır.

Stokastik metotlar dünya çapında birçok çalışmayla doğrulandı gibi Türkiye’de de 1998 Ceyhan (Yalçınkaya, 2005), 1999 Düzce (Uğurhan ve Askan, 2010) ve 1992 Erzincan (Askan vd. 2013) depremlerini modellemek için kullanılmıştır.

Bu çalışmada, 31 Ocak 2002 Afyon-Çay depremi stokastik sonlu fay metodu ile modellenmiştir. Ana odak, merkez üsse 200 km mesafede bulunan sadece 4 yer hareketi ölçüm istasyonunda ölçülebilmektedir. Bu yüzden, öncelikle bu seyrek kayıtları modellemek ve istasyonlardaki simülasyon parametreleriyle doğrulamak amaçlanmıştır. Sonrasında, ana odak sırasında oluşabilecek potansiyel yer hareketlerinin bölgesel tahminleri üretilmiştir. Son olarak, Türkiye için önerilmiş ampirik bir bağıntı ile, simüle edilmiş iddet dağılımı elde edilmiştir; bu dağılım gözlenen iddet ve hasar verileriyle karşılaştırılmıştır. Bölge için henüz detaylı ve yüksek çözünürlüklü bir dalga hız modeli bulunmadığı için, düşük frekanslar da stokastik teknik içinde değerlendirilmiştir.

2. YÖNTEM: DİNAMİK KÖLE FREKANSLI STOKASTİK SONLU FAY MODELİ

Beresnev ve Atkinson (1997) çalışmasında sonlu-fay yönteminde fay düzlemi alt fay parçalarına bölünür, her bir parça nokta kaynak olarak modellenir ve bu fay parçalarının etkileri toplanarak faydan gelen hareketin tüm etkisi elde edilir. Bir fayı oluşturan ω^{-2} spektrumlu her bir nokta kaynağın toplam yer hareketine katkısı kinematik zaman ötelenmeleri ile toplanarak elde edilir, gözlem noktasında gerçek tepkiyi elde edebilmek için her bir kaynağın zamanlaması hesaba katılmalıdır (Atkinson vd., 2009). Denklem 2.1 bir gözlem noktasında fay boyu ve genişliği boyunca bulunan her kaynağın katkısını toplayarak yer hareketini elde edebilmek için kullanılır:

$$a(t) = \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_w} a_{ij}(t - \Delta t_{ij} - T_{ij}) \quad (2.1)$$

burada $a(t)$ tüm fay alanından gelen yer hareketini, a_{ij} ise ij alt fayından gelen hareketi ifade eder. n_l ve n_w fayın boyu ve eni boyunca kaç adet alt faya ayrıldığını göstermektedir. T_{ij} alt fayın yarıçapının fayın kırılma hızına oranı olarak tanımlanır (Atkinson vd., 2009). Δt_{ij} her bir elemana ait gecikmedir, bir dairesel fay kırılmasının o elemana ulaşması için gereken sürenin toplamı ve kesme dalgasının eleman tetiklendikten sonra alıcıya ulaşması için gereken süredir (Beresnev ve Atkinson, 1997). Beresnev ve Atkinson (1997) ilk çalışmalarında bir alt fayın frekans ivme spektrumunu Denklem 2.2’deki gibi tanımlamıştır, burada A_{ij} stokastik nokta kaynak modeli ile tam olarak aynıdır:

$$A_{ij}(f) = \frac{CM_{0ij}}{1 + \frac{f}{f_{c_{ij}}}} \frac{2\pi f^2}{2} \frac{1}{R_{ij}} e^{-\frac{\pi f R_{ij}}{Q\beta}} D(f) e^{-\pi \kappa f} \quad (2.2)$$

burada alt fayın köle frekansı Denklem 2.3’teki gibi tanımlanır:

$$f_{c_{ij}} = 4.9 * 10^6 \beta \frac{\Delta\sigma}{M_{0ij}}^{\frac{1}{3}} \quad (2.3)$$

Literatürde, stokastik sonlu fay modellemesi metodunu kullanan ilk program FINSİM’dir (Beresnev ve Atkinson, 1998a; 1998b). Sentetik yer hareketinin genliğini ve köle frekansını alt fayların sayısı ve boyutlarından bağımsız kılmak için, program Motazedian ve Atkinson (2005) tarafından geliştirilmiştir. EXSİM olarak isimlendirilen bu gelişmiş program dinamik köle frekansı metodunu kullanmaktadır.

Güncellenen bu metotta, kırılma ilerlerken kö e frekansı o anda kırılan alana ters orantılı olarak de i ir. Kö e frekansı Denklem 2.4'te tanımlandı ı gibidir:

$$f_{cij} = N_R t^{-1/3} * 4.9 * 10^6 \beta \frac{\Delta \sigma}{M_{0ave}} \frac{1}{3} \quad (2.4)$$

burada $N_R(t)$ t zamanında kırılan alt fayların kümülatif sayısını, $M_{0ave} = M_0/N$ alt fayların ortalama sismik momentlerini gösterir. Bu yeni yaklaşımda, fay kırılması ilerlerken kırılan alan arttı ı için, yüksek frekanslarda ivme-duyarlı bölgeyi kontrol eden açı a çıkan enerjiyi korumak amacıyla H_{ij} ölçekleme faktörü spektruma uygulanmı tır (Motazedian ve Atkinson, 2005). Denklem 2.5 ivme spektrumunun ve ölçekleme faktörünün güncellenmi halini gösterir:

$$A_{ij} f = \frac{CM_{0ij}H_{ij} 2\pi f^2}{1 + \frac{f}{f_{cij}}} \frac{1}{R_{ij}} e^{-\frac{\pi f R_{ij}}{Q\beta}} D f e^{-\pi \kappa f} \quad H_{ij} = N \frac{\sum \frac{f^2}{1 + \frac{f}{f_{cij}}} \frac{1}{2}}{\sum \frac{f^2}{1 + \frac{f}{f_{ij}}}} \quad (2.5)$$

Bu çalı mada, yakın-saha istasyonlarında ölçümlenen 3 ubat 2002 Afyon-Çay ($M_w = 6.6$) depreminin yer hareketi ivme kayıtlarının S-dalgası kısmı dinamik kö e frekansına dayalı stokastik sonlu fay modeli (Motazedian ve Atkinson, 2005) kullanılarak simüle edilmi tir.

3.3 UBAT 2002 ÇAY DEPREM ($M_w=6.6$) YER HAREKET S MÜLASYONU: DO RULAMA ÇALI MASI

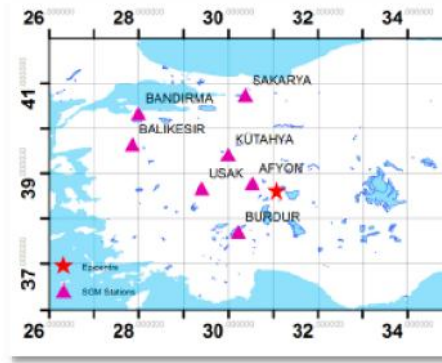
3.1. Deprem Hakkında Gerekli Ön Bilgiler

Afyon-Çay Depremi 3 ubat 2002 tarihinde yerel saatle 09:11'de Afyon ehrinin Çay ilçesi yakınlarında Eber ve Ak ehir Gölleri arasındaki do u-batı e ilimli fay segmentinde meydana gelmi tir. Deprem ç Anadolu Bölgesi'nin sismik olarak aktif bölgesinde, Batı Anadolunun do u sınırında ve Isparta Açısının uç noktasında olu mu tur (Akıncı vd., 2013). İlgili bölge Ak ehir-Bolvadin, Çay-Afyon ve Karadilli-Çay-Üçkuyu-Yunak (Karamık Graben) kesiminde yer alır. Ak ehir fay hattında yer alan Sultanda ı fayının, bölge civarında yapılan yakın zaman jeolojik ara tırmalar (Koçyi it vd., 2000) sonucu Kuzey-Do u dalımlı minör yatay atım bile enli normal bir fay oldu u kanıtlanmı tir. Yerel saatle 11:26, 13:39, ve 13:54'te moment büyüklüğü (M_w) 4.8-6.0 aralı ı arasında olan üç artçı ok meydana gelmi tir. Ana sarsıntının kaynak ve odak parametreleri farklı ara tırmacılar ve kurulu lar tarafından Tablo 1'de belirtildi i gibi incelenmi tir. Bu bildiride, Aktu (2009) modelinin bölgesel jeolojik kanıtlara olan uyumu dü ünülerek kullanılmaya karar verilmi tir.

Tablo 1. Ana Depremın Kaynak Parametreleri

Model	Boylam	Enlem	Dü üm Düzlemi 1			Dü üm Düzlemi 2			Derinlik (km)	M_0 (dyne.cm)	M_w
			Do rultu	E im	Yatım	Do rultu	E im	Yatım			
Aktug (2009)	31.078	38.609	271	43	-63	-	-	-	5	9.4×10^{25}	6.6
Harvard CMT	31.210	38.620	269	37	-71	66	55	-104	15	6.0×10^{25}	6.5
NEIC	31.271	38.573	53	39	-106	254	53	-78	22	2.4×10^{25}	6.2
EMSC	31.271	38.573	39	48	-137	277	60	-51	15	1.1×10^{25}	6.0
INGV	31.260	38.660	106	45	-51	237	57	-122	28	7.4×10^{25}	6.5
ETHZ	31.271	38.573	252	54	-96	83	37	-82	18	9.17×10^{25}	6.6
Taymaz (2002)	31.110	38.560	56	36	-143	295	69	-60	7	4.01×10^{25}	6.5

Kayıtlı kuvvetli yer hareketi verilerinin ham hali DAPHNE veri tabanından (http://kyhdata.deprem.gov.tr/2K/kyhdata_v4.php) alınmı tir. Ana depremi kaydeden kuvvetli yer hareketi istasyonlarının yeri ekil 1'de gösterilmi tir. Tüm kuvvetli yer hareketlerinin ham verilerine ilk olarak taban çizgisi düzeltilmesi ve dördüncü derece Butterworth filtresi 0.25-25 Hz frekans aralı nda uygulanmı tir. Çalı mada kullanılan istasyonlar hakkındaki detaylı bilgi ekil 2'de verilmi tir.



Şekil 1. Kuvvetli Yer Hareketi stasyonlarının Yerleşimi

Tablo 2. stasyonlar Hakkında Detaylı Bilgi

stasyon	Kod	Boylam (°)	Enlem (°)	Ortalama $V_{s,30}$	Zemin Sınıfı (NEHRP)	R_{epi} (km)	R_{jb} (km)	MY (cm/s^2)	
								KG	DB
Afyon-Merkez	AFY	30.534	38.776	226	D	64.71	51.67	123.13	96.37
Burdur-Merkez	BRD-2	30.221	37.704	294	D	124.94	112.69	2.33	2.67
Uşak-Merkez	USK	29.404	38.671	285	D	157.48	144.43	7.64	5.69
Kütahya-Merkez	KUT	29.997	39.419	243	D	144.41	132.77	23.13	22.88

3.2. Model Parametreleri

Yerel verilerden elde edilen sismolojik girdi parametreleri, doğrudan simülasyonlar için gereklidir. Bölgesel çalışmaların ve verilerin yerel model parametrelerin tayini için yetersiz olduğu durumlarda, simülasyonlarda genel parametreler benzer sismotektonik özellikteki bölgelerden veya benzer saha koşullarından alınması dikkat edilerek kullanılabilir.

3.2.1. Çay Depreminin Kaynak Parametreleri

Yer hareketlerinin sonlu-fay modellenmesi için gerekli kaynak parametreleri genişlik ve doğrultu açıları, fay kırılma düzleminin genişliği ve boyu, iç merkez derinliği ve koordinatları, fay düzlemi boyunca kayma miktarı, gerilim farkı ve kırılma oranıdır. Farklı modeller arasında, Aktu (2009) fay modeli tahminlerdeki uyumsuzlukları azaltmak için kullanılmaktadır. Çay depremi fay düzlemi boyunca oluşan kayma miktarı ile ilgili mevcut bir çalışma olmadığı için, EXSIM programında depremin sismik momentini koruyarak moment büyüklüğüne doğrudan rassal kayma miktarı kullanılmaktadır. Fay mekanizması dışında kalan diğer kaynak parametreleri gerilim farkı ve kırılma oranıdır, bu parametreler diğer kaynak-saha arası parametreler ve saha parametrelerinin sınırlandırılmasından sonra sentetik ve gözlemlenen kayıt arasındaki farkı minimize edecek şekilde belirlenir.

3.2.2. Çay Depreminin Kaynak-Saha Arası Yayılım Parametreleri

Yeryüzünde dalganın yayılmasını tanımlamak için, üç önemli parametre bulunmaktadır; geometrik yayılım, azalım faktörü ve süre modeli. Geometrik yayılım ve süre modeli için global verilerden elde edilen genelleştirici faktörler kullanılmaktadır. Geometrik yayılım, Denklem 3.1'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$R^{-1} \quad R \leq 30 \text{ km} \text{ ve } R^{-0.5} \quad 30 < R \leq 1000 \text{ km.} \quad (3.1)$$

Elastik olmayan azalım modeli Batı Anadolu'nun verilerini kullanan Akıncı vd. (2013) çalışmasından adapte edilmiştir, bu modelinin seçilmesindeki amaç çalışılan bölgelerdeki benzer tektonik rejimdir. Denklem 3.2'de belirtilen azalım faktörü modelde uygulanmıştır:

$$Q_f = 180 * f^{0.55}. \quad (3.2)$$

Mesafeye dayalı ampirik süre modeli Herrmann (1985)'ten Denklem 3.3'te belirtildiği gibi modele adapte edilmiştir:

$$T = T_0 + 0.05 R_{hypo} \quad (3.3)$$

burada T_0 saniye cinsinden kaynak süresini, R_{hypo} depremin kilometre cinsinden iç merkez derinliğini gösterir.

3.2.3. Çay Depremi Kayıtlı Stasyonlardaki Saha Etkileri

Saha etkisi iki önemli faktörden oluşur; zemin büyütmesi ve yüksek frekanslardaki azalım fonksiyonu. Zemin büyütme fonksiyonunu hesaplamak için ampirik ve teorik yöntemler olmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. En doğru yaklaşımı elde edebilmek için, bu çalışmada kapsamında iki yöntem de kullanılmış ve kıyaslanmıştır. H/V (ampirik) metodunda, her bir istasyonda kayıtlı her hareketin S-dalgası kısmının yatay ve dikey frekans genlik spektrumunun oranı hesaplanır.

Bu çalışmada sahaların 30 m derinliğine kadar olan hız profili bilindiği için, teorik büyütme faktörleri hesaplanabilmektedir. Her sahanın hız profili erişilebilir olmasına rağmen, derin zemin tabakalarında hız değerlerinin ölçülme zorluğu dolayısıyla belirsizlikler içerebilir. Verilen profillerin SPT darbe vuruları kullanılarak düzenlenmesi sonucu en yakın geoteknik değerlendirmeler her saha için ayrı ayrı oluşturulabilir. Bu çalışmada saha tepki analizi DeepSoil programı yardımıyla elde edilen lineer yaklaşım kullanılarak oluşturulmuştur. Sahalarda kaydedilmiş yer hareketi sayısı ve kayıtların kalitesi yeterli olmadığından, ampirik yöntem (H/V) kullanılarak elde edilen sonuçlar genellikle daha az güvenilir bulunmuştur. Sonuç olarak bu çalışmada, simülasyonlarda daha doğru saha etkisi modelleyebilmek için teorik büyütme faktörleri kullanılmıştır.

Saha parametresinin ikincisi, S-dalgasının frekans genlik spektrumunun yarı-logaritmik uzayda yüksek frekans aralığındaki lineer azalımını modelleyen kapa (κ) faktörüdür (Anderson and Hough, 1984). Sahanın kapa faktörünün belirlenmesi spektral azalımın son noktaları her kayıta değerlik gösterdiği için otomatik olmayan bir tekniktir (Douglas et.al, 2010; Askan et al., 2014). Kapa faktörleri her istasyonda 30 kayıt için hesaplandıktan sonra merkezüsel mesafelere karşın her kayıt için çizdirilir ve kapa faktöründen kaynaklı elastik olmayan azalım etkilerini yok etmek için κ_0 değeri kullanılır.

3.2.4. Simülasyonlarda Kullanılan Optimum Model Parametreleri

Gerilim farkı ve kırılma oranı simülasyonun oluşturulması için gerekli son iki parametredir. Gerilim farkı değerini belirlemek doğrudan deprem oltuğunda fayın yaydığı enerji ile ilintili olduğu için kolay bir prosedür değildir. Sabitlenmemiş parametrelerin optimum değerlerini belirlemek için frekansa bağlı bir hata fonksiyonu $E_f = \log \frac{A_i f_{gözlenen}}{A_i f_{sentetik}}$ kullanılmıştır. Stasyonlarda farklı gerilim farklarına karşılık gelen hata değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

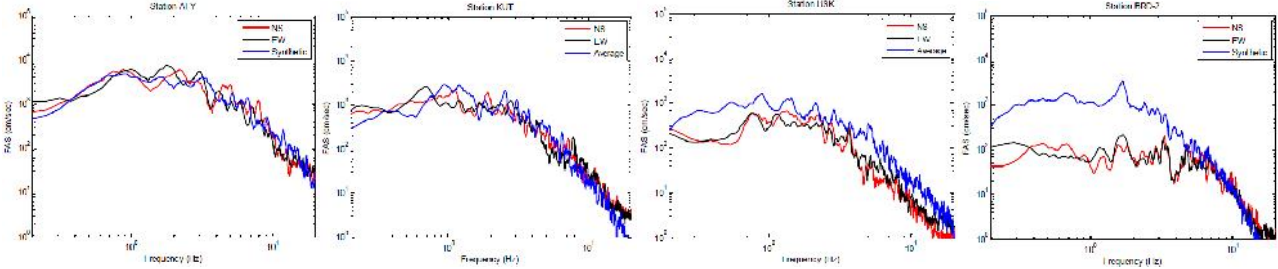
Tablo 3. Her Sahada Farklı Gerilim Farklarına Karşılık Hata Değerleri

stasyon	Hata	Hata	Hata	Hata
	$\sigma = 30 \text{ bar}$	$\sigma = 45 \text{ bar}$	$\sigma = 60 \text{ bar}$	$\sigma = 75 \text{ bar}$
Afyon-Merkez	0.00031	0.00019	0.00011	0.00005
Burdur-Merkez	0.00021	0.00015	0.00011	0.00007
Uşak-Merkez	0.00058	0.00052	0.00049	0.00046
Kütahya-Merkez	0.00059	0.00053	0.00049	0.00046

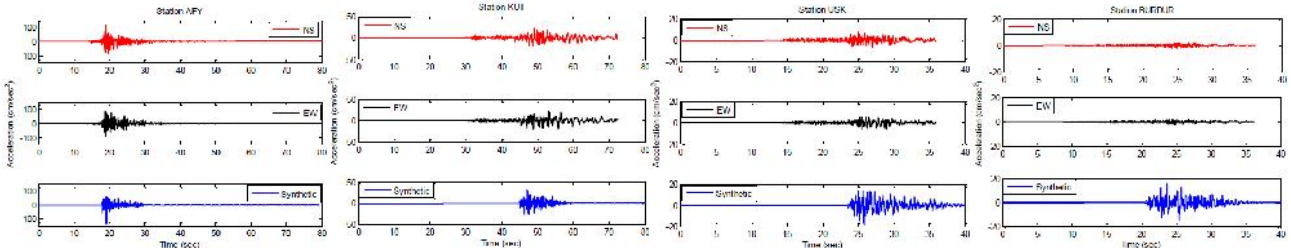
Tüm istasyonlar değerlendirilerek, gerilim farkı simülasyonların yaklaşımlarındaki hatayı düşürmek ve spektrumun yüksek frekans aralığını kontrol edebilmek için 45 bar olarak seçilmiştir. Bu 45 bar gerilim farkı değeri Mohammadioun ve Serva (2001)'nin kaynak boyutları ve gerilim farkı arasında teorik ve ampirik bir ilişki sağlayan çalışmasından elde edilen değerle de benzerlik göstermiştir. Önceki parametrelerle Frekans Genlik Spektrumları'nın (FGS) yüksek frekans aralığı için spektral genlikler sabitlendikten sonra, FGS'nun düşük frekans aralığı farklı kırılma oranları için kontrol edilir (Motazedian ve Atkinson, 2005). Sonuç olarak, kaynak özellikleri sahalar arasında farklılık göstermediği için simülasyonlarda 50% kırılma oranı ve 45 bar gerilim farkı değeri kullanılmıştır.

3.3. Simülasyon Sonuçları: stasyonların Gözlemlenen ve Simüle Edilen Dalgabıçimlerinin Kıyaslanması
Çıktılarını karşılaştırmak için, FGS ve ivme-zaman kayıtları oluşturulmuştur. Ekil 2 ve ekil 3'te FGS ve ivme-zaman kayıtları sentetik ve gerçek kayıtlar için kıyaslanmıştır. Karşılaştırmalar genlik, süre ve frekans içeriği açısından yapılır. Simülasyonlar BRD-2, KUT ve USK istasyonlarında genellikle yüksek yer hareketi maksimum ivme değerleri verir. Özellikle, BRD-2'de zaman-uzayında genlik değerleri büyük ölçüde yüksek tahminler verir. Diğer taraftan, AFY istasyonunda simüle edilen MY ve tüm diğer genlikler gerçek değerlerle yakın derecede eşleşmektedir. AFY, USK ve BRD-2 istasyonlarında sentetik hareketin süresi kayıtlı hareketle eşleşir, KUT istasyonunda ise simüle edilen toplam süre gerçek yer hareketi ile kıyaslandığında düşük bulunmuştur. Ancak, tüm durumlar için kesme dalgasının süresi uygun bulunmuştur. Toplam süredeki farklılık, stokastik modelin sadece S-dalgasını modelleyebilmesinden gelmektedir; gerçekte ise yüzey dalgaları süreyi artırmaktadır.

Frekans içeriği ve spektral genlik için FGS değerlendirildiğinde, BRD-2 istasyonundaki istasyonlar için, yüksek frekans aralığında iyi bir eşleşme yakalanmıştır. Ancak, BRD-2 istasyonunda, yüksek frekanslarda yakın bir eşleşme olmasına rağmen, gözlemlenen spektrum 4 Hz'den küçük frekans aralıklarında düz bir plato göstermiştir. Teorideki ise eğilin böyle olması gerçekçi değildir. Bu istasyonda, hem zaman hem frekans uzayında veri fiziksel olmayan bir durum gösterir, bu sonuç enstrüman aletindeki bir arızadan ileri gelebilir. AFY istasyonunda FGS kıyaslaması tüm frekans aralıkları için çok yakın bir eşleşme gösterir sonuçlar zaman-uzayında da uyumludur. Bu istasyon kaynağına en yakın istasyon olduğu için, bu istasyondaki sonuçlar simülasyonlardaki yakın saha modellemesinin başarısını gösterir. KUT istasyonundaki FGS'da, 0.3-0.6 Hz aralığında gözlemlenen spektrum etkili bir şekilde simüle edilebilmiştir. USK istasyonu incelendiğinde ise yüksek frekanslarda ihmal edilebilir mertebede yüksek tahminler bulunmuşken düşük frekanslarda ise farkedilebilir yüksek veri mevcuttur. FGS'da oluşan farklılıklar kaynak ve kaynak-saha arası parametrelerinin frekans ve zaman uzayı için AFY istasyonunda oluşturulmasından kaynaklanabilir. AFY istasyonunda bariz bir farklılık gözlenmemiştir, simülasyon başarıları sonuçlar verir. Ancak, USK, KUT ve BRD-2 istasyonlarındaki düşük genlik ve uzun hareket süresi geri yönlü direktivite koşulundan kaynaklanabilir. Stokastik kaynak modelleri bunun gibi karmaşık kaynak etkilerini tam olarak irdeleyememektedir; dolayısıyla FGS'nun düşük frekans bölgesindeki farklılığının bundan ileri geldiği düşünülebilir.



ekil 2. FGS'lerinin Sentetik ve Gerçek Kayıtlar için Kıyaslanması



ekil 3. ivme-Zaman Kayıtlarının Sentetik ve Gerçek Kayıtlar için Kıyaslanması

Tablo 4'te istasyonlarda gözlemlenen ve simüle edilen maksimum yer ivmesi değerlerinin kıyaslanması gösterilmiştir.

Tablo 4. stasyonlarda Gözlemlenen ve Simüle Edilen MY Değerlerinin Kıyaslanması

stasyon	Kod	R _{jb}	MY -gözlemlenen	MY -simüle edilen
---------	-----	-----------------	-----------------	-------------------

		(km)	(g)		(g)
			(KG)	(DB)	
Afyon-Merkez	AFY	51.67	0.126	0.098	0.143
Burdur-Merkez	BRD-2	112.69	0.002	0.003	0.017
Uşak-Merkez	USK	144.43	0.008	0.006	0.019
Kütahya-Merkez	KUT	132.77	0.024	0.023	0.033

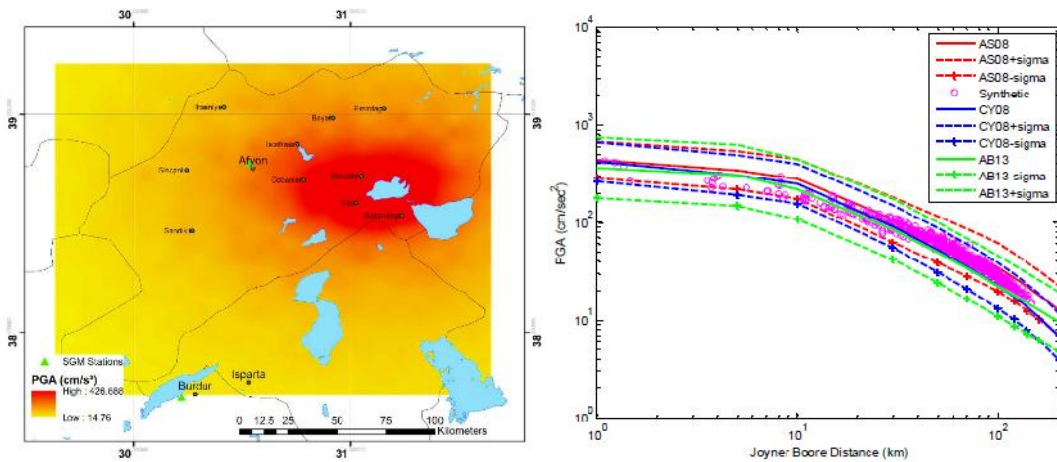
3.4. Merkez Üssü Civarında Yapılan Simülasyonlar

Daha fazla doğrulama yapabilmek için, Afyon ili içinde dış merkez alanı çevresinde kayıt olmayan 625 düüm noktasında (sanal istasyonda) simülasyonlar yapılmıştır. Düüm noktaları dikdörtgenel grid olarak belirlenmiştir. Bu simülasyon çalışması iki amaç için yapılmıştır: biri sentetiklerin uzaklıkla azalımını YHTD'leriyle kıyaslamak; diğeri ise simüle edilen ziddet da ılımını o bölgede kar ılık gelen gözlemlenmiş ziddet de erleriyle kıyaslamaktır.

3.4.1. Sentetiklerin YHTD'leriyle kıyaslanması

Tüm düüm noktalarında, Afyon sahası için geliştirilen teorik zemin büyütmesi faktörleri kullanılmıştır. Diğer bir deyişle, Afyon ili için düzgün saha koşullarının olduğu varsayımında bulunulmuştur. Olu turulan ivme-zaman kayıtları kullanılarak, 5% sönümle oranına kar ılık gelen spektral ivmeler $T=0.3, 1.0, 2.0$ s için belirlenen düüm noktalarında hesaplanmıştır. Maksimum Yer vmesi (MY) için simüle edilen de erlerin da ılımları ekil 4 (a)'da gösterilmiştir. Çay bölgesi civarında merkez üsse en yakın bölgede gözlemlenen maksimum MY de eri 0.44g olarak hesaplanmıştır, aynı bölgede Spektral vme $S(0.3 s), S(1.0 s)$ ve $S(2.0 s)$ de erleri ise 0.93g, 0.34g, 0.11g de erlerine ulaşmıştır.

Bu amadan sonra, sentetik kayıtların azalımı 'Next Generation of Attenuation (NGA) Relations' Projesi kapsamında oluşturulan Chiou ve Youngs (2008), Abrahamson ve Silva (2008) YHTD'leriyle kıyaslanmıştır. Bunlara ek olarak, Avrupa ve Orta Do u verileri kullanılarak oluşturulan Akkar vd. (2013) çalışması yerel YHTD olarak kullanılmıştır. Tüm düüm noktaları için azalım denklemlerinde kesme dalgası hızı 226 m/s (AFY istasyonunda ölçüldü ü gibi) olarak kullanılmıştır. ekil 4 (b)'de sentetik hareketlerin azalımına kar ılık YHTD de erlerini göstermektedir. Sentetik MY de erlerinin azalımı ve YHTD'lerinin bir standart sapma aralığında kalmaktadır. Sonuçlar sentetiklerin azalım karakterinin Chiou and Youngs (2008) denklemine yakın olduğunu göstermektedir. Yerel azalım denklemi (Akkar vd., 2013), sentetik de erlere en yakın formu sağlamıştır, bunun nedenini büyük olasılıkla bu modeli oluşturmak için kullanılan kuvvetli yer hareketi verilerinin çalışma bölgesi olan ç Anadolu'dan de il, Kuzey Anadolu Fay hattından alınmış olmasıdır.



ekil 4. MY De erlerinin Afyon İli Bölgesinde Da ılımı (a) MY Sentetik Hareketinin Azalımına kar ın YHTD'nin Azalım E rileri (b)

3.4.2. Gözlemlenen ziddet ve Hasar Da ılımı ile Simüle Edilmiş ziddet Da ılımının Kıyaslanması

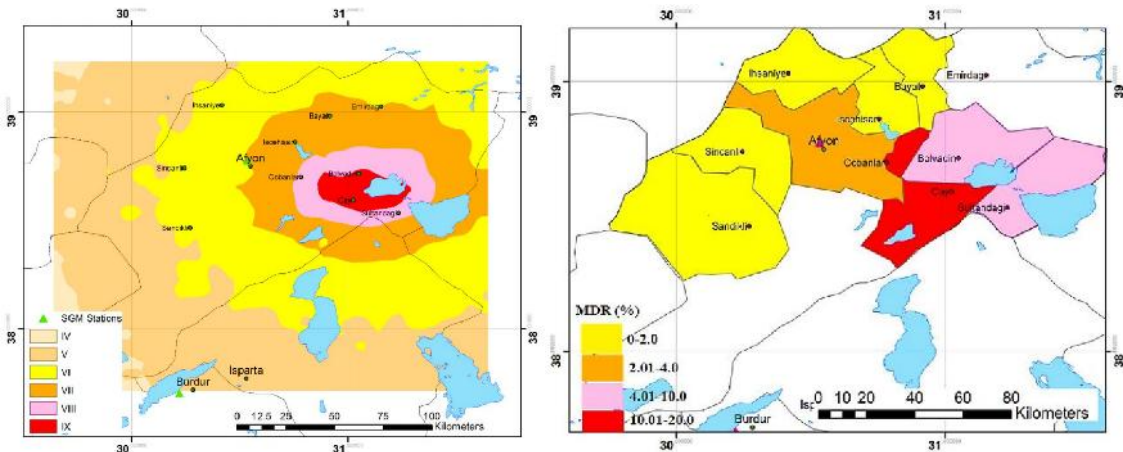
Aletsel yer hareketi parametrelerini (MY , MYH veya S) hissedilen iddet ölçüleriyle ili kilendirme ile ilgili çalı malar dünya çapında artmaya devam etmektedir (Wald vd., 1999; Faenza ve Michelini, 2010; Bilal ve Askan, 2014). Yakın zamanda yapılan bir çalı ma (Bilal ve Askan (2014)) Türkiye’de olmu depremler için MMI-MY /MYH/S arasında ampirik korrelasyonlar önermi tir. Bilal ve Askan (2014) çalı masında betonarme yapılar için MMI-MYH ili kisinin, daha rijit olan yı ma yapılar içinse MMI-MY ili kisinin daha iyi sonuçlar verdi i gösterilmi tir. Bu çıkarımlar, Erberik (2008a, b) çalı masındaki yakla ımı onaylar niteliktedir: MY yı ma yapılarda olu an hasarla daha iyi ili kilendirilirken, MYH ise göreceli olarak daha esnek olan betonarme yapılarda temel yer hareketi iddet parametresi olarak kullanılır.

Bu çalı mada, sentetik her hareketi da ılımı kullanılarak Afyon bölgesinde Çay depreminde kaynaklanan hissedilen- iddet (MMI) haritası hazırlanmı tir. Çay ilçesinde hasarın büyük bir kısmının çok katlı betonarme yapılarda olu ması sebebiyle (Koçyi it vd., 2002; Gülkan vd., 2002), Bilal and Askan (2014) çalı masından MMI-MYH ili kisi ($MMI = 2.673 + 4.340 * \log MYH$) seçilmi tir. Sonuç olarak, simüle edilen PGV de erleri dü üm noktalarında MMI de erlerine çevrilmi tir. Sentetik ve gerçek iddet da ılımının Afyon ili için hemen her ilçede aynı oldu u gözlenmi tir. Gözlemlenen ve simüle dilen iddet de erlerinin ilçe bazında da ılımı Tablo 5’te sunulmu tur (Koçyi it vd., 2002).

Tablo 5. Afyon li İlçeleri için Gözlemlenen iddet De erlerine Kar ın Simüle Edilen iddet De erleri

İlçe	Gözlemlenen iddet	Simüle Edilen iddet
Afyon (M)	6	6
Çobanlar	8	8
Sultanda 1	8	8
Bolvadin	8	9
Çay	9	9
Sincanlı	6	6

Son olarak, simüle edilen iddet da ılımı Çay depreminin hasar da ılımı ile kıyaslanmı tir. Faya yakın alanlardaki yapı hasarının bir ölçümü olarak, Afyon ili ilçeleri için betonarme konutlarda yapılan hasar tespit çalı malarına dayalı Ortalama Hasar Oranı (OHO) tanımlanmı tir (Özmen, 2002). Bir ilçedeki Merkezi Hasar Oranı (MHO) ise her bir hasar seviyesinin olma oranının (merkez hasar oranı) a ırlıklı ortalaması alınarak hesaplanır. ekil 5 simüle edilen MMI haritası ile MHO da ılım haritasının kıyaslanmasını göstermektedir. Genellikle, simüle edilen yüksek iddet seviyeleri yüksek MHO seviyelerine kar ılıklı gelmektedir. Bazı ilçeler için tahmin edilen de erler gözlemlere yakın de ildir. Buna sebep olarak bölgede yapılan hasar tespiti çalı malarındaki belirsizlikler ve yer hareketi modellemesindeki varsayımlar gösterilebilir.



ekil 5. Afyon li Bölgesinde Simüle Edilen MMI Haritası ile MHO Da ılım Haritasının Kıyaslanması

ekil 5’te verilen de erlerin Özmen (2002) çalı masında belirtilen ilçeler için iddet de erleri Tablo 6’da gösterilmi tir.

Tablo 6. Afyon li İlçeleri için MHO iddet De erleri Kar ın MMI de erleri

İlçe	Simüle Edilen iddet	MHO’dan Elde Edilen iddet
------	---------------------	---------------------------

Afyon (M)	6	7
scehisar	7	6
Bayat	7	6
hsaniye	6	6
Sandıklı	6	6
Çobanlar	8	9
Sultanda 1	8	8
Bolvadin	9	8
Çay	9	9
Sincanlı	6	6

4. SONUÇ

- Stokastik simülasyonlar, kullanılan model parametreleri dikkatli seçildi inde ivme kayıtları olu turmada güvenilir derecede yakın ve fiziksel olarak do ru de erler verir. Bu simülasyonlar yer hareketinin sadece maksimum parametrelerini ampirik olarak sa layabilen YHTD'lere göre daha fizik-tabanlı bilgiler sa lar.
- stasyonlarda olu an yerel zemin tepkisinin modellenmesinin güvenilirli i simülasyonların do rulu u açısından önemli bir noktadır. Zemin büyütmesinin yer hareketinin süre, frekans içeri i ve genlik özelliklerinde do rudan etkisi vardır.
- Simüle edilen kayıtlar genellikle mühendislik ilgi alanı olan ($f > 1$ Hz) aralı nda iyi sonuçlar sa lamaktadır. Bu sebeple, bu kayıtlar bazı onaylama testleri sonrası (süre ve enerji içeri i gibi) deprem mühendisli i çalı malarında kullanılabilir.
- Genellikle, sentetik hareketlerin azalımının YHTD'lerinin genel karakteriyle e le me göstermektedir.
- Bu çalı mada simüle edilen maksimum yer hareketi de erleri kullanılarak Türkiye için çıkarılmı olan MMI ve MY/MYH/S arasındaki ampirik formüller vasıtasıyla elde edilen iddet da ılımları, gözlemlenen de erlerle uyum göstermi tir. Benzer iddet haritası uygulamaları gerçek veya senaryo depremler için erken uyarı, afet yönetimi ve tüm sismik kayıpları azaltma amaçları do rultusunda kullanılabilir.
- Hemen hemen tüm model parametreleri ve simülasyonların verimlili i sismik olarak aktif olan bölgelerden alınan yüksek kalitedeki kaydın miktarına ba lıdır. Bu sebeple, depremselli in daha iyi de erlendirilebilmesi için, i letimde olan kuvvetli yer hareketi kayıt istasyonlarının sayısını artırmak ve sismik a ı özellikle ülkemizde ve dünya çapında geni letmek bu ve benzeri çalı maların do rulanması açısından önem ta ımaktadır.

REFERANSLAR

- Abrahamson, N. A., and W. J. Silva (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations, Earthquake Spectra 24, 67-97.
- Akinci, A., S. D'Amico, L. Malagnini, A. Mercuri (2013). Scaling earthquake ground motions in western Anatolia, Turkey, Physics and Chemistry of the Earth 63, 124-135.
- Akkar S, MA Sandıkkaya, JJ Bommer (2013). Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East, Bulletin of Earthquake Engineering, ISSN: 1570-761X
- Aktug, B., B. Kaypak, R. N. Celik (2009). Source parameters for the Mw = 6.6, 03 February 2002, Çay Earthquake (Turkey) and aftershocks from GPS, Southwestern Turkey, Journal of Seismology 14, 445-456.
- Anderson, J. and S. Hough (1984). A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, Bull. Seism. Soc. Am. 74, 1969-1993. 106
- Askan, A. and M. S. Yucemen (2010). Probabilistic Methods for the Estimation of Potential Seismic Damage: Application to Reinforced Concrete Buildings in Turkey, Structural Safety 32, 262-271
- Askan, A., F. N. Sisman, B. Ugurhan (2013). Stochastic strong ground motion simulations in sparsely-monitored regions: A validation and sensitivity study on the 13 March 1992 Erzincan (Turkey) earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 55, 170-181.
- Askan, A., F. N. Sisman, O. Pekcan (2014). A Regional Near-Surface High Frequency Spectral Attenuation (Kappa) Model for Northwestern Turkey, Soil Dynamics and Earthquake Engineering (under revision).

- Atkinson, G. M., K. Assatourians, D. M. Boore, K. Campbell and D. Motazedian (2009). A Guide to Differences between Stochastic Point-Source and Stochastic Finite-Fault Simulations, *Bull. Seism. Soc. Am.* 99, 6, 3192–3201.
- Beresnev, I. and G. M. Atkinson (1997). Modeling finite-fault radiation from the ω spectrum, *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, 67 - 84. 107
- Beresnev, I. and G. M. Atkinson (1998a). FINSIM—a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite-faults, *Seism. Res. Lett.* 69, 27–32.
- Beresnev, I. and G. M. Atkinson (1998b). Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California earthquake. I. Validation on rock sites, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 1392–1401.
- Bilal, M. and A. Askan (2014). Relationships between felt intensity and recorded ground motion parameters for Turkey, *Bulletin of the Seismological Society of America* 104, 1, 484–496.
- Chiou, B. S.-J. and R. R. Youngs (2008). An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthquake Spectra* 24, 173-215.
- Douglas, J., P. Gehl, L. F. Bonilla, C. Gelis (2010). A model for mainland France, *Pure and Applied Geophysics* 167, 1303-1315.
- Erberik, M.A. (2008a). Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 37, 387-405.
- Erberik, M.A. (2008b). Fragility-based assessment of typical mid-rise and low-rise RC buildings in Turkey, *Engineering Structures* 30, 1360-1374.
- Faenza, L. and A. Michelini (2010). Regression Analysis of MCS Intensity and Ground Motion Parameters in Italy and its Application in ShakeMap, *Geophysical Journal International* 180, 1138-1152.
- Gurpinar A, M. Abalı, M. S. Yucemen, Y. Yesilcay (1978). Feasibility of mandatory earthquake insurance in Turkey. *Earthquake Engineering Research Center, Middle East Technical University, Ankara, Report No. 78-05.*
- Herrmann, R.B. (1985). An extension of Random Vibration Theory estimates of strong ground motion to large earthquakes, *Bull. Seis. Soc. Am.* 75, 1447–1453.
- Karimzadeh, S., A. Askan, A. Yakut and G. Ameri (2014). Nonlinear Time History Analyses of Structures Under Real and Synthetic Ground Motions, *Journal of Earthquake Engineering (under revision)*.
- Kocyyigit, A., E. Unay, G. Sarac, G. (2000). Episodic graben formation and extensional neotectonic regime in West Central Anatolia and the Isparta Angle: a case study in the Ak ehir-Afyon Graben, Turkey. *Geological Society, London, Special Publications* 173, 405-421.
- Kocyyigit A., E. Bozkurt, N. Kaymakci, F. Saroglu (2002). Source Mechanism of 3 February 2002 Çay (Afyon) Earthquake and Damage Reasons: Ak ehir Fault Zone, *Geo. Preliminary Report, Middle East Technical University Faculty of Engineering Geological Engineering Tectonics Research Unit (in Turkish)*.
- Mohammadioun, B. and L. Serva (2001). Stress drop, slip type, earthquake magnitude, and seismic hazard, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91, 694–707.
- Motazedian, D., and G. M. Atkinson (2005). Stochastic finite-fault modeling based on a Dynamic Corner Frequency, *Bull. Seism. Soc. Am.* 95, 995–1010.
- Ozmen, B. (2002). Seismic intensity map and damage distribution of 3 February 2002 Çay (Afyon) earthquake, *Directorate of Disaster Affairs, Ankara, Report No: 4083.1 (in Turkish)*.
- Ugurhan, B. and A. Askan (2010). Stochastic Strong Ground Motion Simulation of the 12 November 1999 Düzce (Turkey) Earthquake Using a Dynamic Corner Frequency Approach, *Bull. Seism. Soc. Am.* 100, 1498-1512.
- Ugurhan, B., A. Askan and M.A. Erberik (2011). A Methodology for Seismic Loss Estimation in Urban Regions Based on Ground Motion Simulations, *Bulletin of the Seismological Society of America* 101, 710–725.
- Wald, D.J., V. Quitoriano, T.H. Heaton, H. Kanamori, C.W. Scrivner, and B.C. Worden (1999a). TriNet "ShakeMaps": Rapid generation of peak ground-motion and intensity maps for earthquakes in southern California, *Earthquake Spectra* 15, 537-556.
- Yalcinkaya, E. (2005). Stochastic Finite-fault Modeling of Ground Motions from the June 27, 1998 Adana-Ceyhan Earthquake, *Earth Planets Space* 57, 107–115.