



A Simulated Strong Ground Motion Database for Potential Earthquake Scenarios on North Anatolian Fault Zone

Aysegul Askan¹ and Shaghayegh Karimzadeh¹

¹ Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Cankaya 06800 Ankara
ORCID: 0000-0003-4827-9058, 0000-0003-3753-1676

Keywords

Strong ground motion, simulation, North Anatolian Fault Zone, earthquake, database

Highlights

- * Strong ground motions are used as input to many disciplines regarding earthquakes.
- * Simulated ground motions become necessary in regions of sparse ground motion data.
- * The first simulated ground motion database of Turkey is compiled.

Acknowledgements

Turkish National Union of Geodesy and Geophysics, Japan International Cooperation Agency

Aim

To prepare a simulated strong ground motion database for potential events on the North Anatolian Fault Zone (NAFZ)

Location

Erzincan and Duzce regions on the NAFZ

Methods

Stochastic finite-fault method is employed for ground motion modelling in this study

Results

The database presented in this study is found to be consistent with the characteristics of real ground motions in Turkey. The simulated motions in the database can be employed in various applications in regions with similar seismotectonic and geological settings.

Supporting Institutions

Project Nr. TUJJB-UDP-01-12, JICA-SATREPS MARDIM project

Manuscript

Research Article

Received: 24.05.2019

Revised: 12.06.2019

Accepted: 13.06.2019

Printed: 30.06.2019

DOI

doi.

Corresponding Author

Aysegul Askan

Email: aaskan@metu.edu.tr

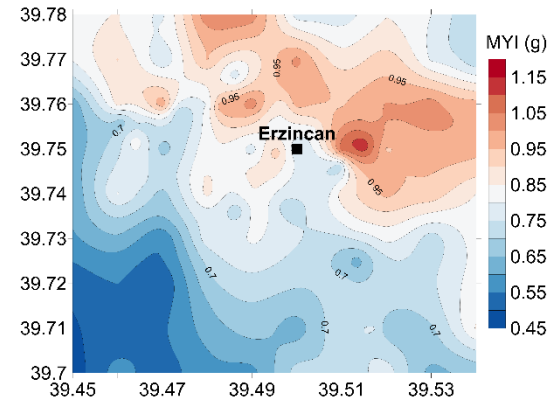


Figure
Spatial distribution of simulated motions in terms of peak ground acceleration in Erzincan region on the NAFZ for the Mw=7.0 scenario earthquake

How to cite:

Askan A., Karimzadeh S., 2019. A Simulated Strong Ground Motion Database for Potential Earthquake Scenarios on North Anatolian Fault Zone, Turk. J. Earthq. Res. 1 (1), 76-97



Kuzey Anadolu Fay Hattı Üzerinde Olası Deprem Senaryoları İçin Benzeştirilmiş Bir Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanı

Ayşegül Askan¹ ve Shaghayegh Karimzadeh¹

¹ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çankaya 06800 Ankara
ORCID: 0000-0003-4827-9058, 0000-0003-3753-1676

ÖZET

Depremler sırasında oluşan ve ivmeölçerler tarafından geçici ya da kalıcı istasyonlarda ölçülmekte olan kuvvetli yer hareketleri, temel olarak, kaydedilen depremin büyüklüğüne, kaynaktan istasyona olan mesafeye ve istasyonun bulunduğu (yerel) zemin özelliklerine bağlı olarak değişirler. Bu ivme-zaman kayıtları, yer bilimlerinden deprem mühendisliğine uzanan farklı disiplinlerde kullanılmakta olan girdi parametreleridir. Dünyada ve ülkemizde bulunan kuvvetli yer hareketi ağları sürekli olarak genişlemekte; bu sayede farklı deprem kayıtları ile hem geçmiş depremlere ait kaynak bilgileri hem de yerküre hakkındaki çalışmalar sayıca artmaktadır. Ancak, farklı büyüklükteki depremler istatistik olarak aynı sıklıkta meydana gelmediği için, dünyanın en gelişmiş ağlarında bile kayıt eksiklikleri bulunmaktadır. Başka bir deyişle, bir bölgede olası sismik etkilerin bütünü incelenmek istendiğinde bazı şiddet değerlerine karşılık gelen kayıtlar bulunmamaktadır. Yoğun istasyon dağılımı bulunmayan yer hareketi ağlarında ise bu sorun daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sebepler nedeniyle günümüzde yer hareketi benzetim çalışmaları tüm dünyada giderek önem kazanmaktadır. Çalışmanın temel amacı; Türkiye'deki en aktif fay hattı olan Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde olası depremler için benzeştirilmiş bir yer hareketi veri tabanı hazırlamak, bunun temel özelliklerini incelemek ve bu özellikleri gerçek yer hareketlerinden elde edilmiş bulgular ile karşılaştırmaktır.

Anahtar kelimeler

Kuvvetli yer hareketi, benzetim, Kuzey Anadolu Fay Zonu, deprem, veri tabanı

Öne Çıkanlar

- * Kuvvetli yer hareketleri depremlerle ilgili birçok disiplinde girdi parametre olarak kullanılmaktadır.
- * Benzeştirilmiş yer hareketleri seyrek veri bulunan bölgelerde gerekli olmaktadır.
- * Türkiye'nin benzeştirilmiş ilk yer hareketi veri tabanı derlenmiştir.

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 24.05.2019
Düzeltilme: 12.06.2019
Kabul: 13.06.2019
Basım: 30.06.2019

DOI

doi.

Sorumlu yazar

Ayşegül Askan
Eposta:
aaskan@metu.edu.tr

A Simulated Strong Ground Motion Database for Potential Earthquake Scenarios on North Anatolian Fault Zone

Aysegül Askan¹ and Shaghayegh Karimzadeh¹

¹ Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Çankaya 06800 Ankara
ORCID: 0000-0003-4827-9058, 0000-0003-3753-1676

ABSTRACT

Strong ground motions, which are recorded by accelerometers at temporary or permanent stations during earthquakes, vary depending on magnitude of the recorded event, distance from the earthquake source to station and local site characteristics of the station. These acceleration-time records are input parameters used in different disciplines ranging from earth sciences to earthquake engineering. Strong ground motion networks in the world and Turkey are constantly expanding; thus, both the information on the sources of past earthquakes and the studies on the Earth are increasing in number with the help of different earthquake records. However, since the earthquakes of different magnitudes do not statistically occur with the same frequency, there are deficiencies even in the world's most developed networks. In other words, when the entire potential seismic effects in a region is to be examined, there are no records corresponding to some intensity values. This problem is more evident for the ground motion networks in regions where no dense station distribution is available. Nowadays, ground motion simulation studies are becoming increasingly important all over the world. The main goals of this study are to prepare a simulated earthquake ground motion database on the North Anatolian Fault Zone which is the most active fault zone of Turkey; to investigate the fundamental characteristics of this database, and to present those features by comparing findings obtained from recorded ground motions.

Keywords

Strong ground motion, simulation, North Anatolian Fault Zone, earthquake, database

Highlights

- * Strong ground motions are used as input to many disciplines regarding earthquakes.
- * Simulated ground motions become necessary in regions of sparse ground motion data.
- * The first simulated ground motion database of Turkey is compiled.

Manuscript

Research Article

Received: 24.05.2019
Revised: 12.06.2019
Accepted: 13.06.2019
Printed: 30.06.2019

DOI

doi.

Corresponding Author

Aysegül Askan
Email:
aaskan@metu.edu.tr

1. GİRİŞ

Depremler sırasında oluşan ve ivmeölçerler tarafından geçici ya da kalıcı istasyonlarda ölçülmekte olan kuvvetli yer hareketleri, temel olarak, kaydedilen depremin büyüklüğüne, kaynaktan istasyona olan mesafeye ve istasyonun bulunduğu zemin özelliklerine bağlı olarak değişirler. Bu ivme-zaman kayıtları, yer bilimlerinden deprem mühendisliğine uzanan farklı disiplinlerde kullanılmakta olan girdi parametreleridir. Dünyada ve ülkemizde bulunan kuvvetli yer hareketi ağları sürekli olarak genişlemekte; bu sayede farklı deprem kayıtları ile hem geçmiş depremler hakkındaki bilgiler hem de yer küre hakkındaki çalışmalar sayıca artmaktadır. Ancak, farklı büyüklükteki depremler istatistik olarak aynı sıklıkta meydana gelmediği için dünyanın en gelişmiş ağlarında bile kayıt eksiklikleri bulunmaktadır. Başka bir deyişle, bir bölgede olası sismik etkilerin bütünü incelenmek istendiğinde bazı şiddet değerlerine karşılık gelen kayıtlar bulunmamaktadır. Yoğun istasyon dağılımı bulunmayan yer hareketi ağlarında ise bu sorun daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır (Askan ve diğ. 2013). Bu temel sebepler ile günümüzde yer hareketi simülasyon çalışmaları tüm dünyada giderek önem kazanmaktadır.

Yer hareketi simülasyonları temel olarak deterministik ve stokastik yöntemler ile elde edilmektedir. Deterministik yöntemler ile düşük frekans aralıklarındaki yer hareketleri etkili biçimde modellenirken (Olsen ve diğ. 1996), stokastik yöntemler ile yapıları ilgilendiren yüksek frekanslardaki genlikler modellenmektedir (Motazedian ve Atkinson 2005). Son yıllarda hibrit yöntemler ile geniş bant aralıklı kuvvetli yer hareketleri de benzeştirilmektedir (Mai ve diğ. 2010). Kuvvetli yer hareketi benzetimleri, temel olarak geçmiş bir depremi matematiksel yaklaşımlar ile modellemek, modeli depreme ait kayıtlar ile doğrulamak ve çalışılan deprem sırasında istasyon bulunmayan noktalarda açığa çıkmış olması muhtemel yer hareketlerini elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Ancak, simülasyonlar yoluyla, kayıtları mevcut olmayan tarihi depremler ya da olası senaryo depremler de modellenmeye başlanmıştır. Geçmiş depremler modellenirken kullanılacak olan simülasyon parametreleri, benzeştirilmiş yer hareketlerinin deprem sırasında istasyonlarda kaydedilmiş yer hareketleri ile karşılaştırılırlar. Tarihi ve senaryo deprem simülasyonlarında ise bu depremlere ait kayıt bulunmadığından, benzeştirilmiş kayıtlar mevcut yer hareketi azalım denklemleri ya da tarihi depremlere ait eş şiddet haritalarıyla doğrulanmaktadır (Karimzadeh ve Askan 2018).

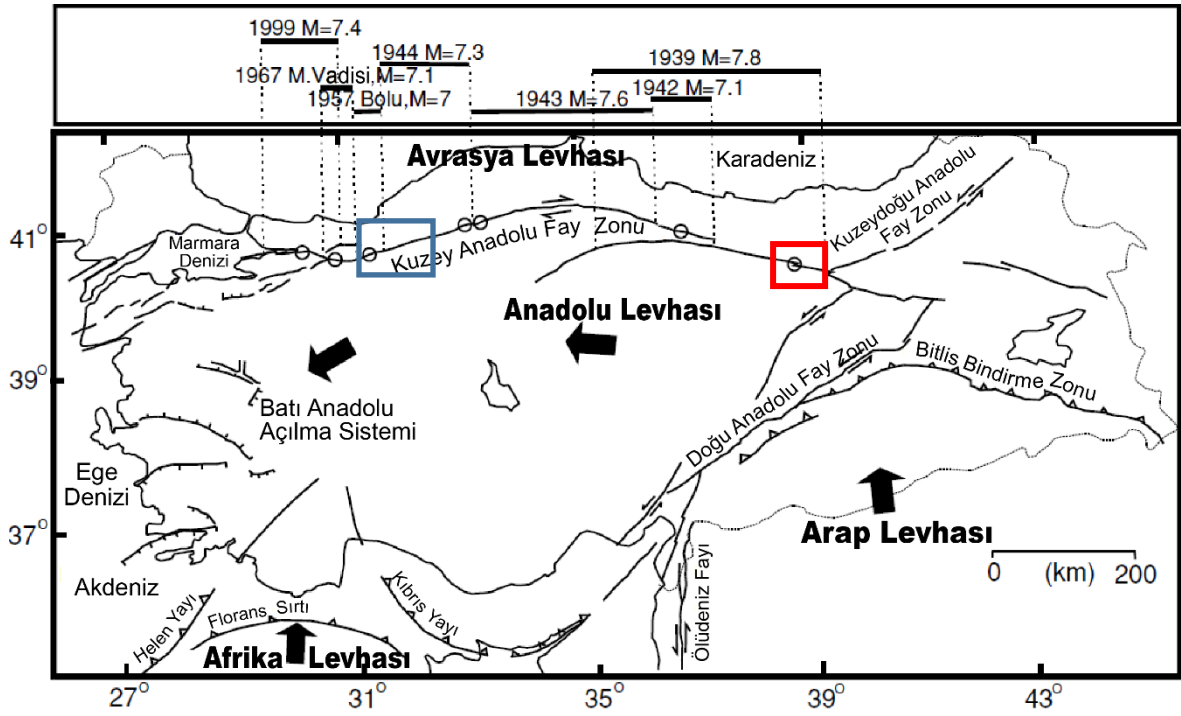
Son yıllarda, yer hareketi simülasyonları ile elde edilen kayıtlar, yer bilimleri dışındaki diğer disiplinlerde de, özellikle deprem mühendisliğinde kullanılmaya başlanmıştır. Literatürdeki güncel çalışmalarda, benzeştirilmiş yer hareketleri tek- ve çok-serbestlik-dereceli sistemler ile modellenen yapıların sismik analizinde, sismik kırılma ve kayıp modellerinde ve şiddet dağılım değerlendirmelerinde kullanılmaktadır (Ugurhan ve diğ. 2011, Sorensen ve Lang 2014, Karimzadeh ve diğ. 2017; 2018). Literatürde eksik olan ise tıpkı kaydedilmiş (gerçek) yer hareketi veri tabanlarına benzer farklı deprem büyüklükleri, farklı zemin koşulları ve farklı kaynak-saha mesafeleri içeren benzeştirilmiş bir yer hareketi veri tabanının bulunmamasıdır. Böyle bir veri tabanı bölgeye özgü olası yer hareketlerini kapsamlı biçimde içerecek ve farklı disiplinlerin kullanımına açık olacaktır.

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'deki en aktif fay hattı olan Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde olası depremler için benzeştirilmiş bir yer hareketi veri tabanı hazırlamak, bu veri tabanının temel özelliklerini incelemek ve bu özellikleri kaydedilen yer hareketlerinden elde edilmiş bulgular ile karşılaştırarak sunmaktır.

2. ÇALIŞMA SAHALARI

Bu çalışmada sunulan kuvvetli yer hareketi veri tabanı, Kuzey Anadolu Fayı (KAF) üzerinde seçilen Erzincan ve Düzce bölgelerinde geçmiş ve olası depremler modellenerek oluşturulmuştur. Bu sahaların seçilmesinin temel nedeni, sadece ülkemizin değil dünyanın sismik açıdan en aktif faylarından birisi olan KAF üzerinde yer almaları ve yapılan deprem simülasyonlarının karşılaştırılabileceği yakın zamanlı büyük depremlere ait kayıtların bulunmasıdır.

Kuzey Anadolu Fayı, Türkiye'nin kuzeyinde bulunan ve dünyanın en tehlikeli sismik bölgeleri arasında yer alan aktif yanal atımlı bir fay zonudur (Barka 1993). Bu çalışmada, Düzce ve Erzincan'ın çalışma sahaları olarak seçilmesinin temel nedeni, her ikisinin de benzer sağ yanal atımlı fay mekanizmaları içermesi ve iki şehrin de geçtiğimiz yüzyılda büyük yıkıcı depremler deneyimlemiş olmasıdır. Düzce, KAF'ın batısında daha yoğun bir sismik ağ içerisinde yer alırken, Erzincan doğuda daha seyrek bir ağ içerisinde yer almaktadır. Geçtiğimiz yüzyılda Erzincan 1939 ($M_s \sim 8.0$) ve 1992 ($M_w = 6.6$) depremleriyle sarsılırken, Düzce ise 1999 yılında Kocaeli depremini takip eden $M_w = 7.1$ büyüklüğünde yıkıcı bir deprem geçirmiştir. Şekil 1, Anadolu levhasını, Kuzey Anadolu Fay hattı üzerinde geçtiğimiz yüzyılda meydana gelmiş olan depremleri ve bu çalışmadaki inceleme sahalarını göstermektedir.



Şekil 1: Türkiye'nin belli başlı tektonik unsurları ve geçtiğimiz yüzyılda Kuzey Anadolu Fayı'nda meydana gelmiş olan depremler. Mavi ile kırmızı dikdörtgenler sırasıyla Düzce ile Erzincan çalışma alanlarını göstermektedir ve büyük oklar göreceli levha hareketlerinin yönünü temsil etmektedir (Utkucu ve diğ. 2003'den düzenlenmiştir).

Erzincan, KAF ve Ovacık faylarının tektonik hareketleri nedeniyle oluşmuş yaklaşık olarak 50x15 km büyüklüğünde bir havza içerisinde yer almaktadır. KAF üzerindeki en büyük havza olup, kenarlarındaki dağlık alanlardan havza merkezine doğru kalınlığı giderek artan alüvyon tabakaları içermektedir (Barka 1993, Lav ve diğ. 1993). Bu havza etkisi nedeniyle,

depremler sırasında kaydedilen kuvvetli yer hareketleri özellikle büyümektedir (Karimzadeh ve diğ. 2018). Geçen yüzyılda KAF üzerinde meydana gelmiş olan büyük depremler 1939 Erzincan depremi ile başlamış, batıya doğru ilerlemiştir. Erzincan'da 1992'de, 1939 fayının daha doğusunda, orta büyüklükte ($M_w=6.6$) olmasına rağmen yıkıcı olan bir deprem daha meydana gelmiştir. Sözü edilen 1992 Depremi, yalnızca 3 adet kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilmiştir. Düzce bölgesi ise daha sığ bir alüvyon havza üzerinde yer almakla birlikte (Asten ve diğ. 2014), Erzincan'a kıyasla kentsel nüfusun daha yoğun olduğu bir bölgedir. 1999 Düzce depremi, 1999 Kocaeli depreminden 3 ay sonra sağ yanal atımlı bir fay üzerinde gerçekleşmiş; Düzce ve Bolu illerinde yoğun yapısal hasara ve can kaybına sebep olmuştur. Türkiye'nin endüstriyel ve nüfusu yoğun alanlarına çok yakında meydana gelen 1999 depremleri, bölgedeki sismik etkinliğe dikkatleri çekmiş ve ülkemizde deprem zararlarının sistematik olarak azaltılması çalışmaları açısından bir milat olmuştur. Veri tabanındaki kayıtlar, Türkiye'de ve dünyada tektonik özellikleri ve zemin koşulları benzer olan seyrek istasyon dağılımına sahip diğer bölgelerdeki yer hareketi benzetim çalışmalarında kullanılabilir.

3. YÖNTEM

Sonlu-fay modelleri, depremlerde ortaya çıkan kuvvetli yer hareketlerini, seçilen noktalarda fayın sonlu boyutlarını göz önüne alarak modellemeyi (simüle etmeyi) hedefler. Beresnev ve Atkinson (1997), orijinal stokastik sonlu fay çalışmalarında, dikdörtgen bir fayı sonlu sayıda alt-faya bölerek, her bir alt-fayı ω^2 kaynak spektrumlu stokastik bir nokta-kaynak (Boore 1983) olarak kabul eden bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde, depremin odağı alt-faylardan birisine yerleştirilir ve dalgalar odakta sabit bir yırtılma hızı ile yayılmaya başlar. Yırtılma, sırasıyla her bir alt-faya ulaştığında, o alt-faydan dalga yayılımı başlatılır. Bu biçimde ana fayı oluşturan bütün alt-fayların katkısı kinematik gecikmelerle üst üste eklenir ve herhangi bir gözlem noktasında zamana bağlı ivme değerleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{nl} \sum_{j=1}^{nw} A_{ij}(t + \Delta t_{ij}) \quad (1)$$

Denklem 1'de, $A(t)$ bütün faydan elde edilen ivme kaydı; A_{ij} ise dalga alanına ij . alt-fayın ivme katkısıdır. Bu denklemde nl ve nw sırasıyla fayın uzunluğu ve genişliği boyunca alt-fay sayılarını ifade etmektedir. Her bir alt-fay için kinematik olarak hesaplanan gecikme payı Δt_{ij} , yırtılma yüzeyinin her bir sonlu elemana ulaşması için geçen süre ile S-dalgasının gözlem noktasına varana kadar geçirdiği sürenin toplamına eşittir (Beresnev ve Atkinson 1997). Beresnev ve Atkinson (1997) tarafından önerilmiş olan orijinal yöntemdeki temel kısıt, toplam alt-fay sayısına üzerindeki üst limit ve faydan yayılan toplam enerjinin alt-fay boyutlarına bağlı olmasıdır. Bu kısıt, Motazedian ve Atkinson (2005) tarafından tanımlanmış olan dinamik köşe frekansı kavramı ile aşılmıştır. Bu yeni modelde yayılan toplam enerji alt-fay boyutundan bağımsız olarak korunmuş ve düşük frekanslarda yayılan dalga genlikleri alt-fay boyutlarından bağımsız hale gelmiştir. Stokastik sonlu-fay yöntemi, temel olarak kaynak, yayılım ve saha özelliklerinin her bir alt-fay için frekans ortamında deterministik spektrum ve rassal faz açıları cinsinden modellenmesine dayanmaktadır. Bu modelde, ij . alt-faya ait ivme değerlerinin frekans uzayında kaynak, yayılım ve zemin filtreleri cinsinden spektral ifadesi $A_{ij}(f)$ aşağıdaki gibidir:

$$A_{ij}(f) = CM_{0ij} H_{ij} \frac{(2\pi f)^2}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_{c_{ij}}}\right)^2\right]} e^{-\frac{\pi f R_{ij}}{Q(f)\beta}} G(R_{ij}) A(f) e^{-\pi \kappa f} \quad (2)$$

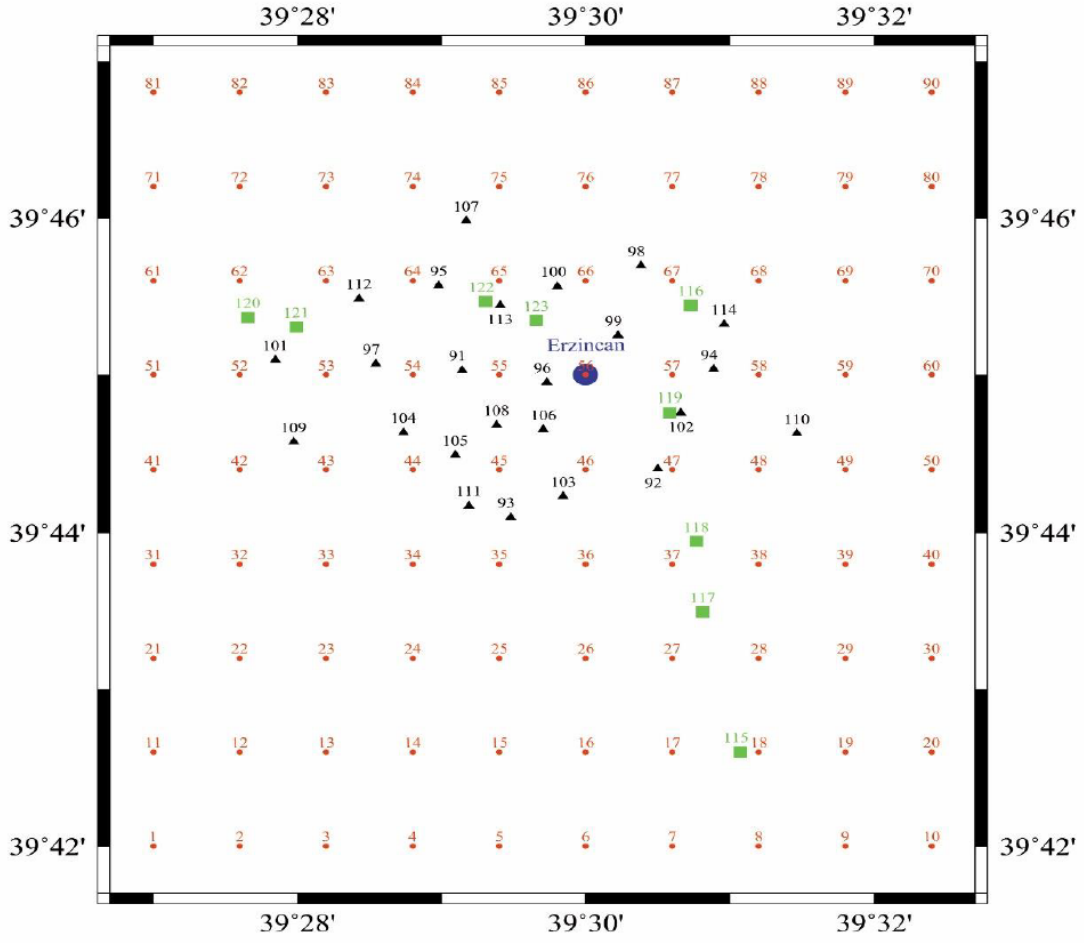
Burada $C = \frac{\mathfrak{R}^{\theta\phi} \cdot \sqrt{2}}{4\pi\rho\beta^3}$ ölçekleme katsayısı, $\mathfrak{R}^{\theta\phi}$ ışınım (radyasyon) örüntüsü, ρ yoğunluk, β S-dalgı hızı, $M_{0ij} = \frac{M_0 S_{ij}}{\sum_{k=1}^{nl} \sum_{l=1}^{nw} S_{kl}}$ ij . alt-faya ait sismik moment, S_{ij} görelı kayma ağırlıkları, $f_{cij}(t)$ ij . alt-faya ait dinamik köşe frekansdır ve $f_{cij}(t) = N_R(t)^{-1/3} 4.9 \times 10^6 \beta \left(\frac{\Delta\sigma}{M_{0ave}} \right)^{1/3}$ olarak tanımlanmıştır. Burada $\Delta\sigma$ gerilim düşümü, $N_R(t)$ herhangi bir t zamanında kırılmış olan toplam alt-fay sayısı ve $M_{0ave} = M_0/N$ alt-fayların ortalama sismik momentidir. R_{ij} gözlem noktasından uzaklık, $Q(f)$ sönüm kalite faktörü, $G(R_{ij})$ geometrik yayılım faktörü, $A(f)$ saha büyütme filtresi, $e^{-\pi\kappa f}$ zeminlerin yüzeye yakın azalım özelliklerini ifade eden ve kapa faktörü olarak da bilinen yüksek frekans filtresini göstermektedir (Anderson ve Hough 1984). Yine bu denklemde, H_{ij} yüksek frekansların genliklerini düzenleyen bir filtre olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$H_{ij} = \left\{ N \frac{\left[\frac{\sum \left[\frac{f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c} \right)^2} \right]}{\sum \left[\frac{f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_{cij}} \right)^2} \right]} \right]^{1/2}}{\left[\frac{\sum \left[\frac{f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_{cij}} \right)^2} \right]}{\sum \left[\frac{f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c} \right)^2} \right]} \right]^{1/2}} \right\} \quad (3)$$

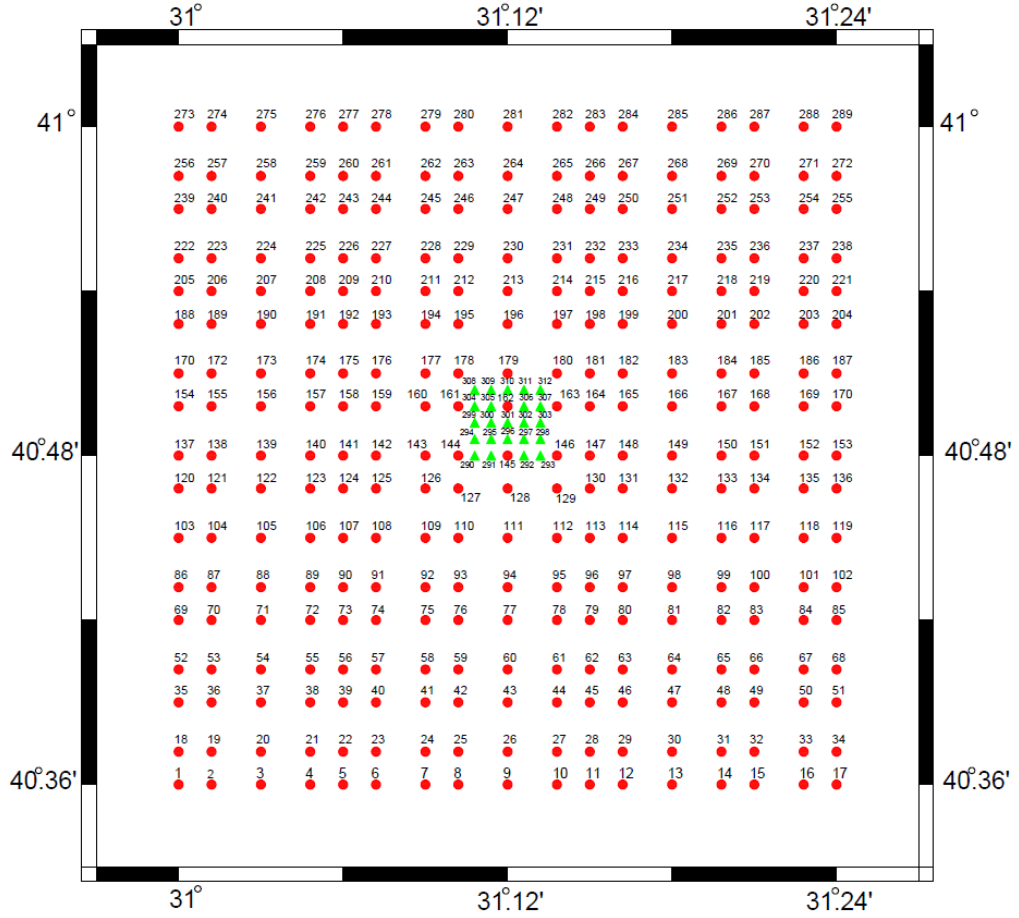
Bu çalışma kapsamında, sözü edilen güncellenmiş stokastik sonlu-fay modeli ve EXSIM bilgisayar programı (Motazedian ve Atkinson 2005) kullanılmaktadır.

4. BENZEŞTİRİLMİŞ KUVVETLİ YER HAREKETİ VERİTABANI

Bu çalışmada sunulmuş olan veri tabanı sırasıyla Erzincan ve Düzce bölgelerindeki olası depremlerde açığa çıkabilecek yer hareketlerini kapsamaktadır. Bu nedenle, öncelikle fiziksel olarak güvenilir ve kaynak, yayılım ve zemin etkilerini içeren simülasyon parametrelerinin elde edilmesi gereklidir. Bu çalışmada, Erzincan bölgesi için simülasyon parametreleri olarak, Askan ve diğ. (2013) tarafından 1992 Erzincan (Mw=6.6) depreminde kaydedilen ivme kayıtları ile benzeştirilmiş ivme kayıtları arasındaki hatayı en aza indirgeyerek elde edilmiş yayılım ve zemin parametreleri kullanılmıştır. Benzer biçimde, Düzce bölgesine ait yayılım ve zemin parametreleri ise 1999 (Mw=7.1) Düzce depremi ile ilgili Uğurhan ve Askan (2010) ile Karimzadeh ve diğ. (2017) çalışmalarından uyarlanmıştır. Deprem kaynak parametreleri ise her bir senaryo deprem için fay geometrisi, stres düşümü ve kayma dağılımı cinsinden ifade edilerek ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tablo 1 ve 2'de Erzincan ve Düzce fayları üzerinde üretilen senaryo depremlere ait stokastik sonlu fay simülasyon parametreleri verilmektedir. Parametrelerin seçiminde, senaryo depremlerin sismik açıdan aktif ve Erzincan ile Düzce illerine kritik uzaklıklarda bulunan faylar üzerinde olmasına dikkat edilmiştir. Böylece, Erzincan bölgesinde 123, Düzce bölgesinde ise 312 ayrı düğüm noktasında yer hareketi simülasyonları yapılmıştır. Şekil 2 ve 3'te sırasıyla, Erzincan ve Düzce bölgelerinde kullanılan noktaların konumları sunulmaktadır. Seçilen bu düğüm noktaları ve yakınlarındaki yerel zemin modelleri, bölgede gerçekleştirilmiş olan mikrotremör SPAC (Uzamsal Özilişki yöntemi) ve Yatay/Düşey Spektral Oran çalışmalarından elde edilmiştir (Uğurhan ve Askan 2010, Asten ve diğ. 2014, Askan ve diğ. 2015).



Şekil 2: Erzincan bölgesinde deprem simülasyonları yapılan düğüm noktalarının konumu (Kırmızı noktalar eşit aralıkla seçilen düğüm noktalarını, siyah üçgenler mahalle merkezlerini ve yeşil kareler ise yakınında detaylı zemin çalışması bulunan noktaları ifade etmektedir)



Şekil 3: Düzce bölgesinde deprem simülasyonları yapılan düğüm noktalarının konumu (Kırmızı noktalar eşit aralıkla seçilen düğüm noktalarını, yeşil üçgenler ise şehir merkezinde sıklaştırılmış düğüm noktalarını ifade etmektedir)

Tablo 1: Erzincan bölgesindeki senaryo depremlerde kullanılan kaynak, yayılım ve saha parametreleri

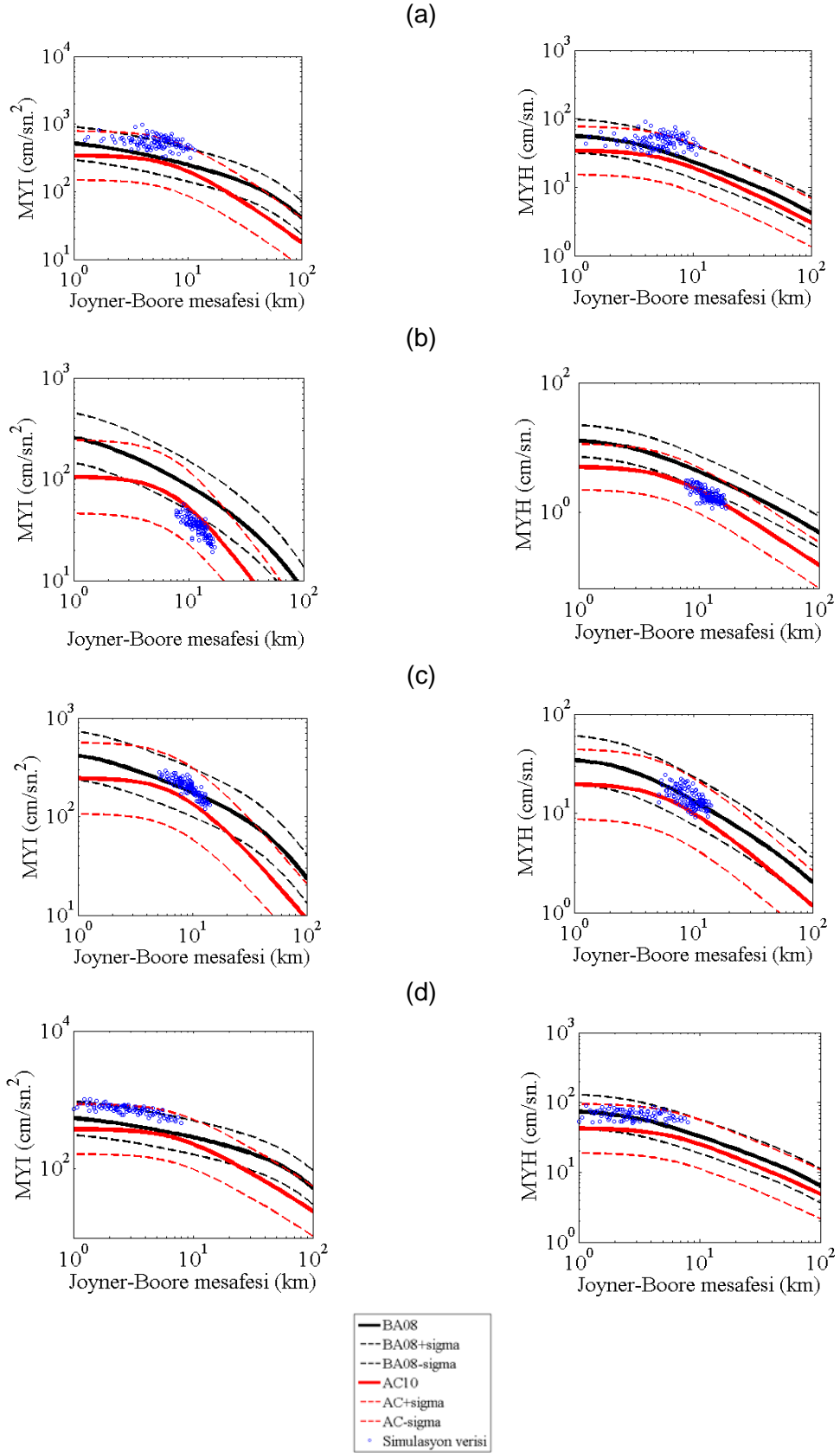
Model Parametresi	Aldığı Değer
Depremin Moment büyüklüğü (Mw)	5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0
Fay geometrisi	Doğrultu: 125°, Eğim: 90°
Fay boyutları	Wells ve Coppersmith (1994)
Kabuk S-dalga hızı	3700 m/s
Yırtılma hızı	3000 m/s
Kabuk yoğunluğu	2800 kg/m ³
Gerilme düşümü	Mohammadioun ve Serva (2001)
Fay yırtılma yüzdesi	40 %
Kalite faktörü	$Q = 122f^{0.68}$
Geometrik yayılım faktörü	$R^{-1.1}, R \leq 25km$ $R^{-0.5}, R > 25km$
Süre modeli	$T = T_0 + 0.05R$
Zemin büyütme faktörleri	Yerel zemin modelleri (Askan ve diğ. 2015)
Kappa sönümleme modeli	Yerel Kappa faktörü

Tablo 2: Düzce bölgesindeki senaryo depremlerde kullanılan kaynak, yayılım ve saha parametreleri

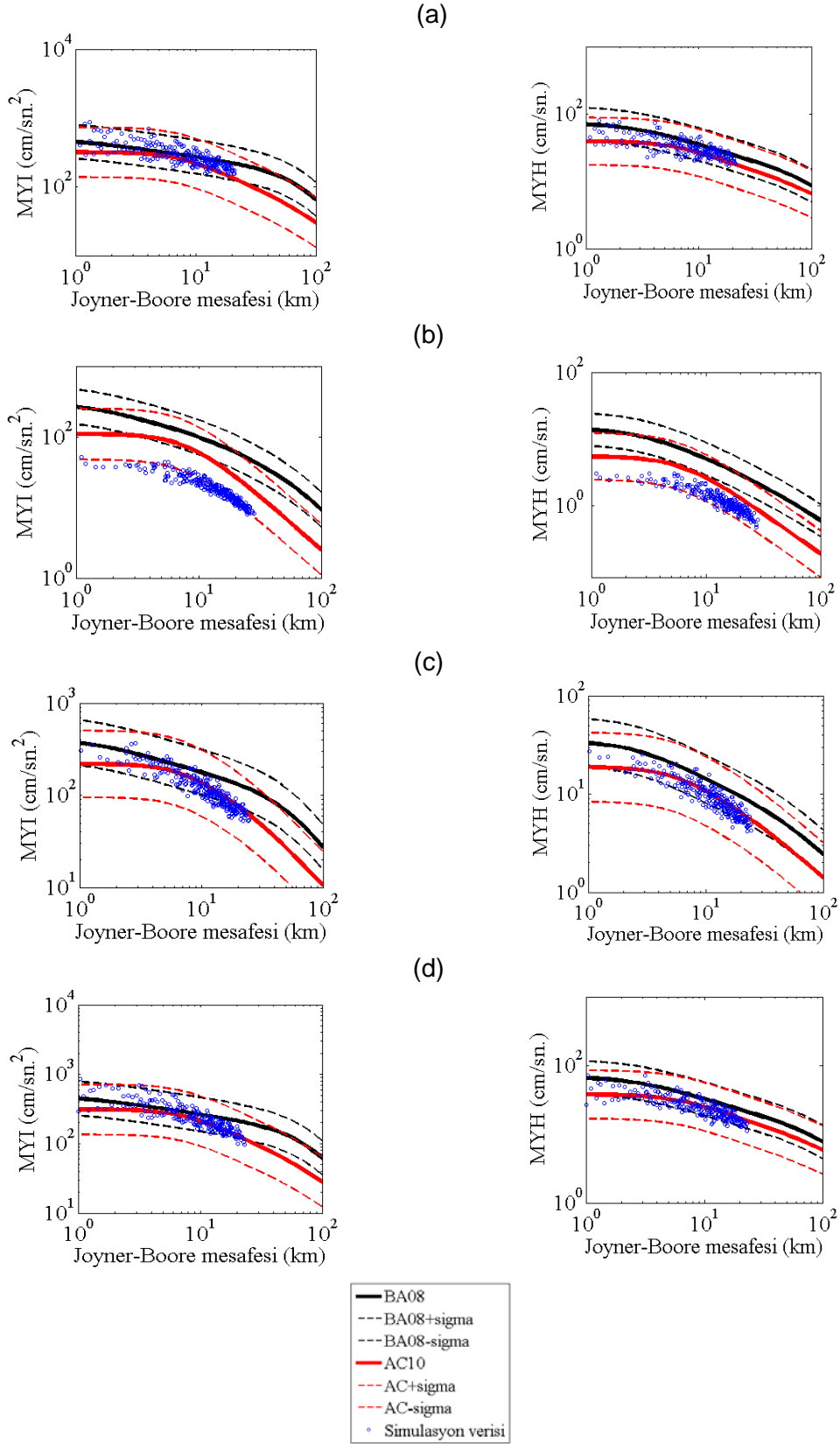
Model Parametresi	Aldığı Değer
Depremin Moment büyüklüğü (Mw)	5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0
Fay geometrisi	Doğrultu: 264°, Eğim: 64°
Fay boyutları	Wells ve Coppersmith (1994)
Kabuk S-dalga hızı	3700 m/s
Yırtılma hızı	3000 m/s
Kabuk yoğunluğu	2800 kg/m ³
Gerilme düşümü	Mohammadioun ve Serva (2001)
Fay yırtılma yüzdesi	30 %
Kalite faktörü	$Q = 88f^{0.9}$
Geometrik yayılım faktörü	$R^{-1}, R \leq 30 \text{ km}$ $R^{-0.4}, 30 \text{ km} < R \leq 60 \text{ km}$ $R^{-0.6}, 60 \text{ km} < R \leq 90 \text{ km}$ $R^{-0.8}, 90 \text{ km} < R \leq 100 \text{ km}$ $R^{-0.5}, R > 100 \text{ km}$
Süre modeli	$T = T_0 + 0.05R$
Zemin büyütme faktörleri	Yerel zemin modelleri (Ugurhan ve Askan 2010; Asten ve diğ. 2014)
Kappa sönümlenme modeli	Yerel Kappa faktörü

Bu çalışmada sunulan veri tabanında belirtilen düğüm noktalarında Erzincan ve Düzce bölgelerinde büyüklükleri Mw=5.0, 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0 olan senaryo depremler modellenmiştir. Bunlara ek olarak, 1992 Erzincan (Mw=6.6) ve 1999 Düzce (Mw=7.1) depremlerine ait yer hareketleri de düğüm noktalarında hesaplanmıştır. Sonuç olarak, veri tabanında, büyüklükleri $5.0 \leq Mw \leq 7.0$ arasında değişen depremlere ait, kaynak-saha mesafesi R_{JB} cinsinden 0-30 km arasında olan ve farklı zemin sınıflarına (NEHRP C ve D) karşılık gelen noktalarda toplamda 2610 tane yer hareketi kaydı bulunmaktadır.

Oluşturulan yer hareketi veri tabanındaki kayıtlar, 1992 Erzincan ve 1999 Düzce yer hareketleri ile doğrulanmıştır. Ancak, tüm Mw, kaynak-saha mesafesi ve zemin koşulları olasılıkları için deprem kaydı bulunmadığından, sözü edilen her düğüm noktasında böyle bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. O nedenle benzeştirilmiş yer hareketleri literatürden seçilen yer hareketi tahmin denklemleri ile doğrulanmalıdır. Bu amaçla, Şekil 4 ve 5, Boore ve Atkinson (2008) ile Akkar ve Cagnan (2010)'a ait yer hareketi tahmin denklemleri ile Mw=5.0, 6.0 ve 7.0 senaryolarına ve 1992 Erzincan ve 1999 Düzce depremlerine ait benzeştirilmiş kayıtların maksimum yer ivmesi (MYI) ve maksimum yer hızı (MYH) değerlerini karşılaştırmaktadır. Burada görüleceği üzere, benzeştirilmiş olan kuvvetli yer hareketlerinin maksimum değerlerinin azalımı, yer hareketi tahmin denklemleri ile örtüşmekte ve benzeştirilmiş kayıtların azalımı iki tahmin denklemi ile de uyumlu olup, ± 1 standart sapma içerisinde kalmaktadır. Fiziksel olarak çalışılan bölgeye uygun parametreler ile yapılan kuvvetli yer hareketi simülasyonları, ampirik verilerle hazırlanmış tahmin denklemleri ile uyumlu sonuçlar vermektedir.



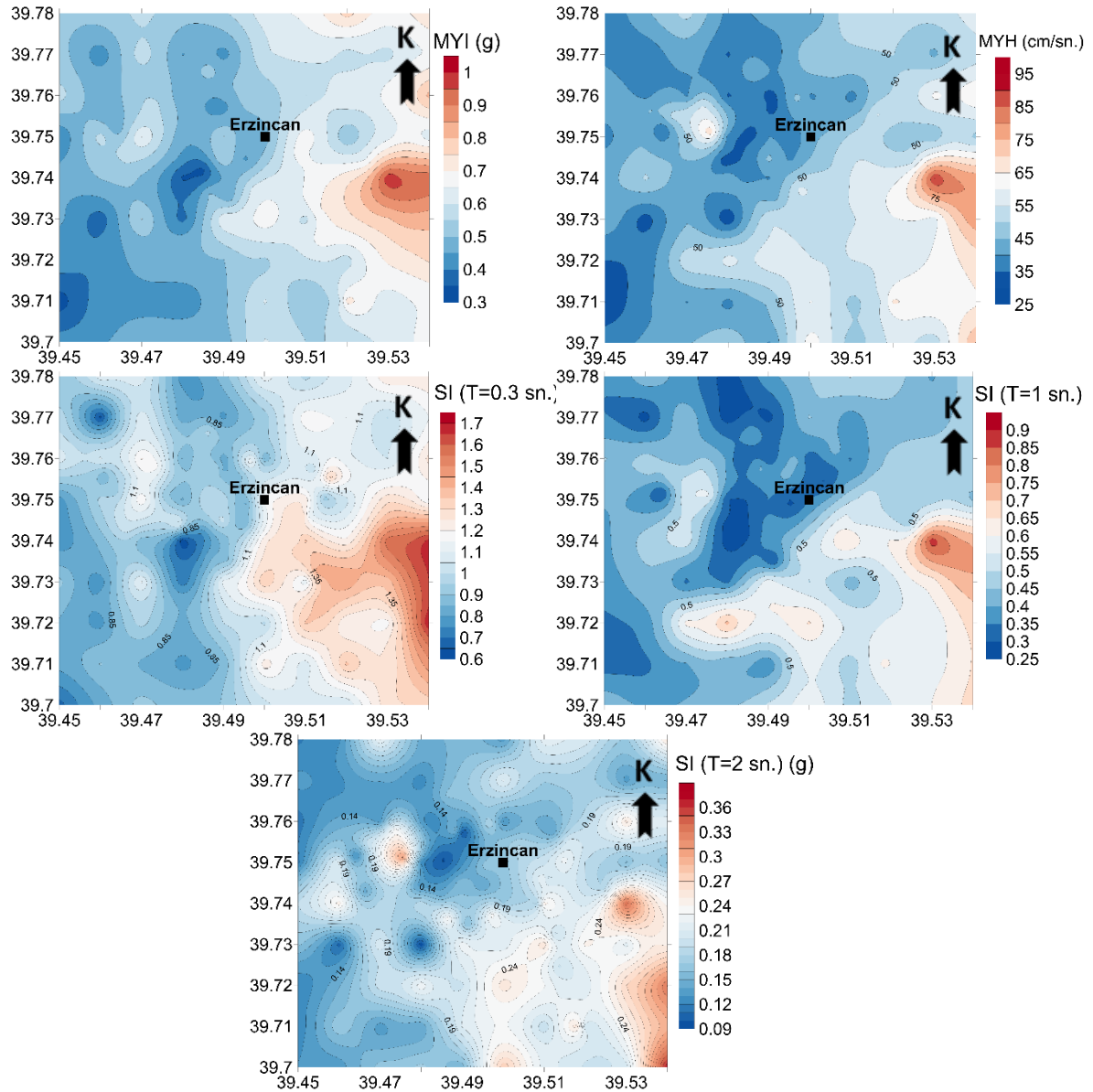
Şekil 4: Benzeştirilmiş kayıtların ve tahmin denklemlerinin; a) Erzincan 1992 Depremi, b) Mw=5.0, c) Mw=6.0 ve d) Mw=7.0 senaryo depremleri için MYI ve MYH cinsinden karşılaştırılması



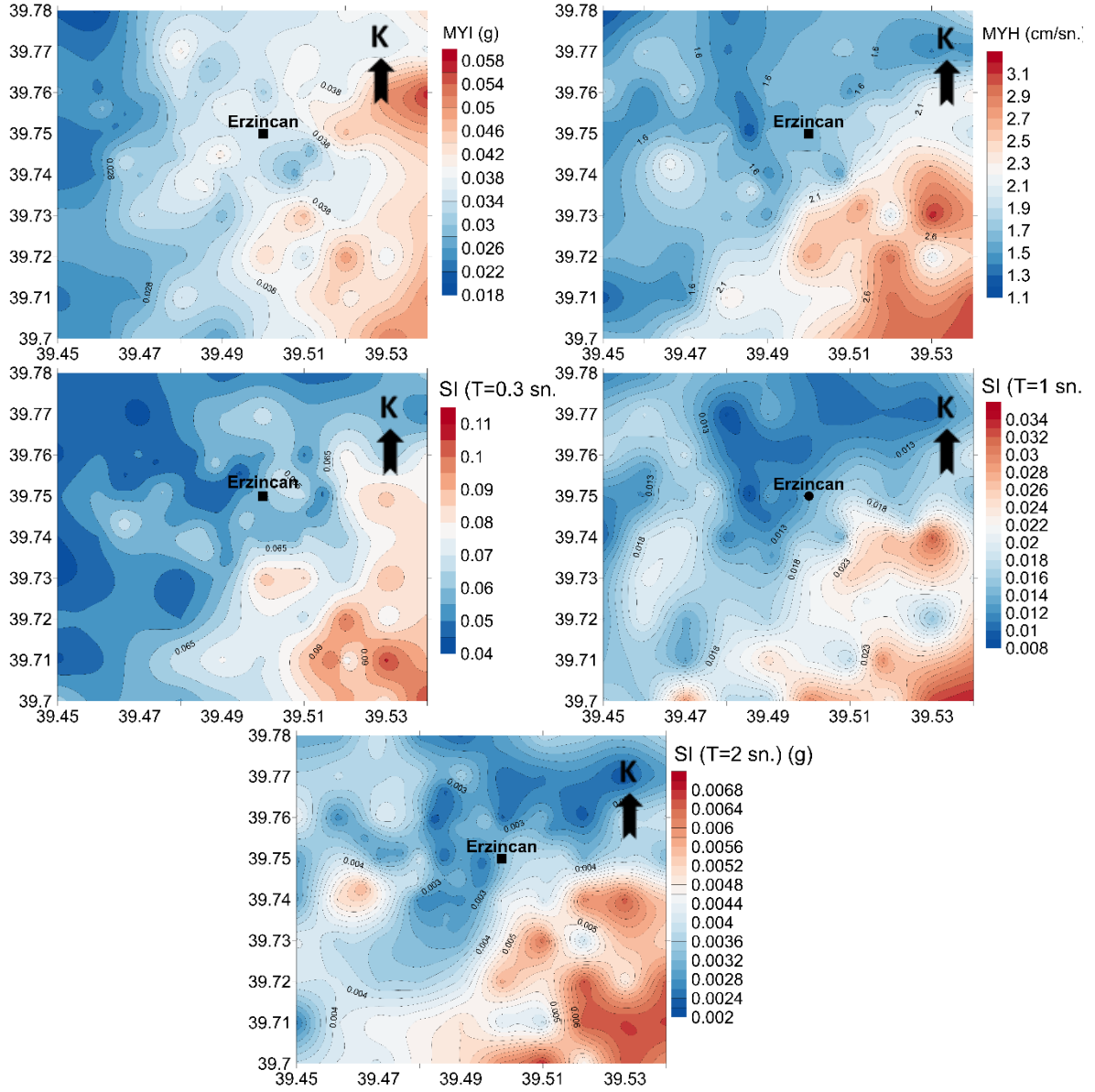
Şekil 5: Benzeştirilmiş kayıtların ve tahmin denklemlerinin; a) Düzce 1999 Depremi, b) Mw=5.0 , c) Mw=6.0 ve d) Mw=7.0 senaryo depremleri için MYİ ve MYH cinsinden karşılaştırılması

Şekil 6 ile 9 arasında, 1992 Erzincan depremi ve Mw=5.0, 6.0 ve 7.0 senaryo depremleri için düğüm noktalarında modellenmiş MYİ, MYH ile farklı periyotlardaki spektral ivme dağılımları gösterilmektedir. Benzer biçimde Şekil 10 ile 13 arasında ise Düzce bölgesindeki dağılımlar sunulmaktadır. Tüm şekillerde yatay ve düşey eksenler sırasıyla Enlem (°) ve Boylam (°)'i ifade etmektedir.

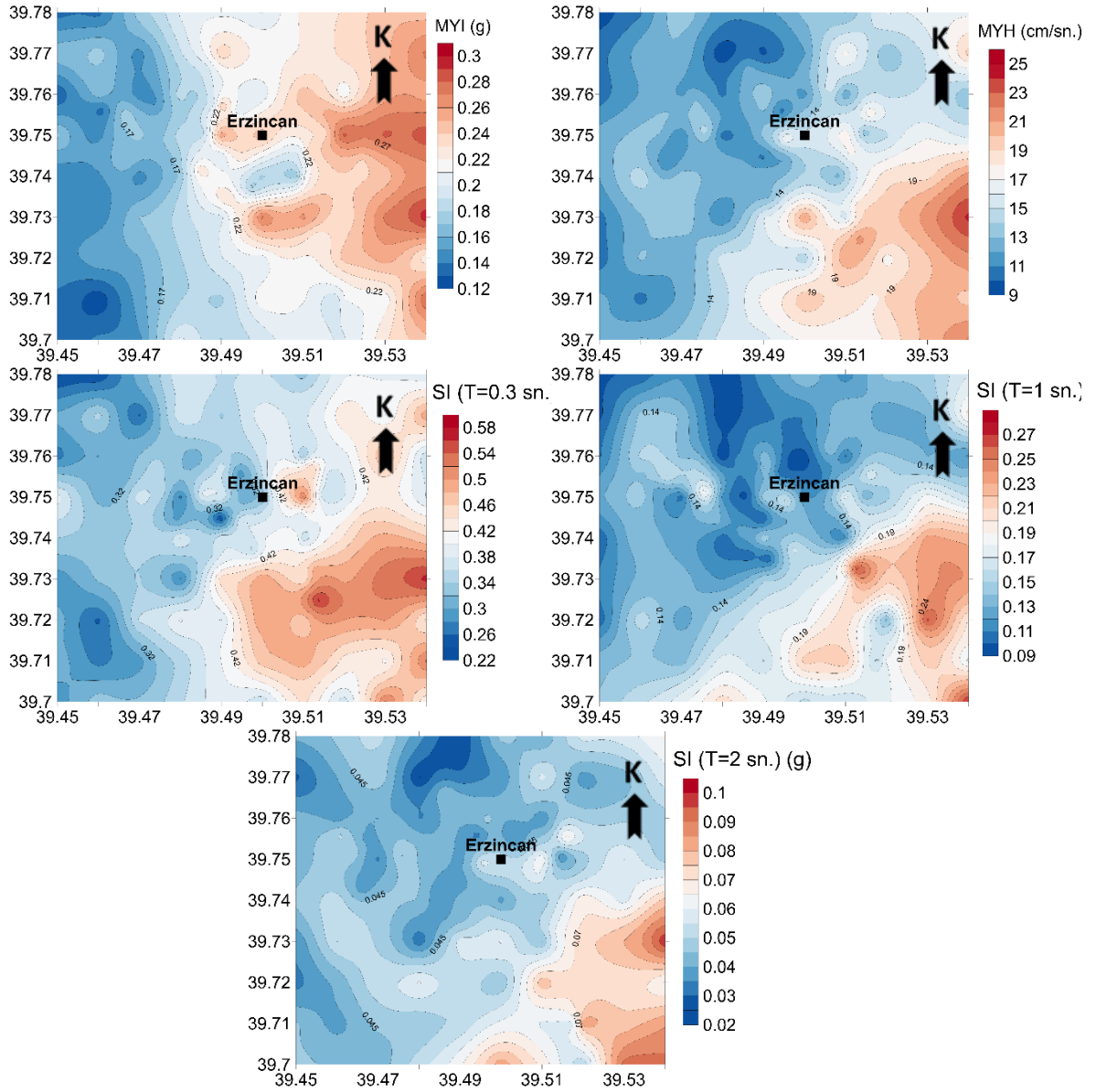
Şekil 6 ile 13 arasında mekânsal dağılımları verilen yer hareketi benzetimlerinin ivme-zaman cinsinden tüm-dalga formları veri tabanında kullanıma hazır durumda bulunmaktadır.



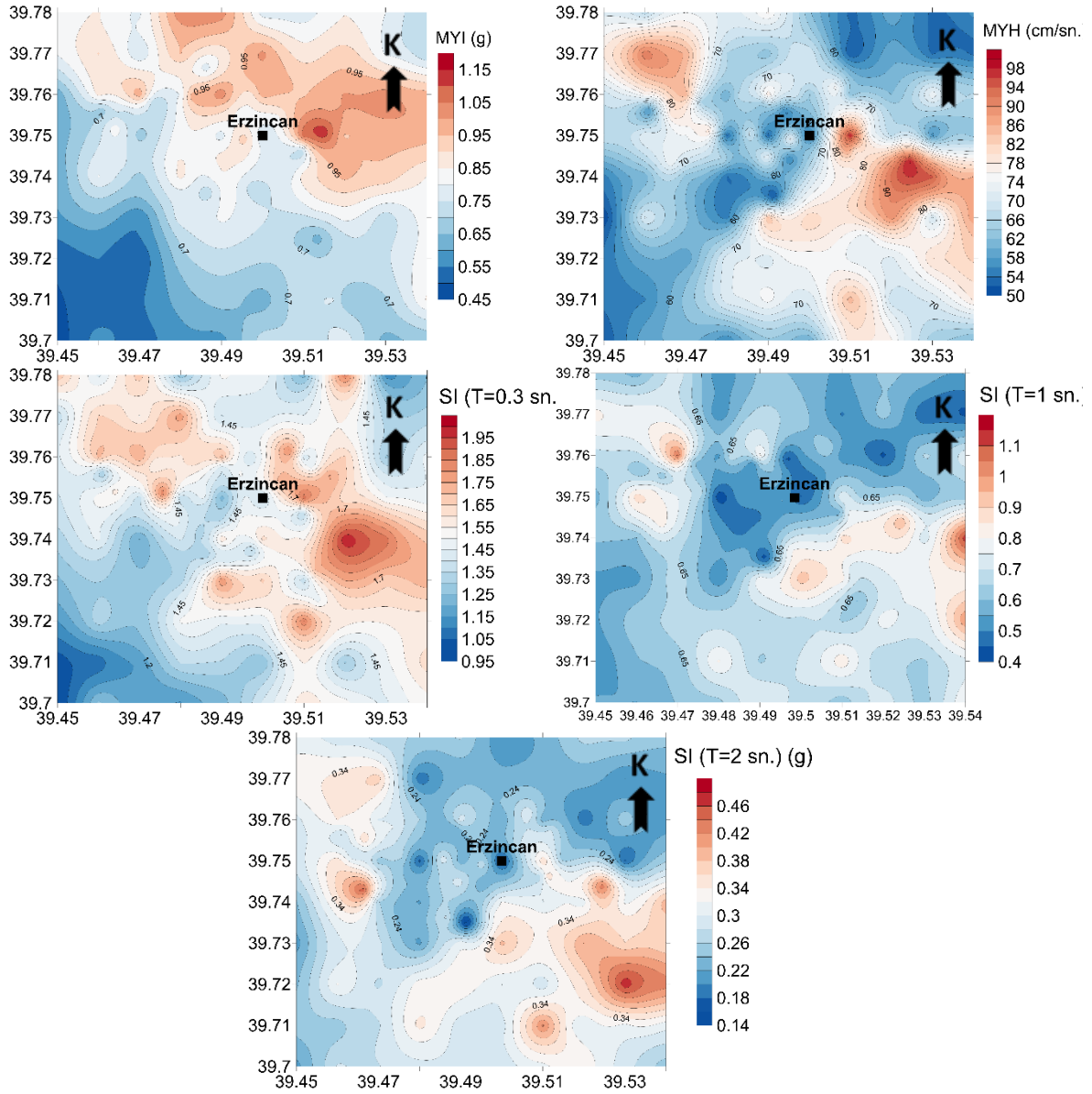
Şekil 6: 1992 Erzincan depremi için benzeştirilmiş kayıtların MYİ, MYH ve 0.3, 1.0 ve 2.0 sn'deki spektral ivme cinsinden mekânsal dağılımları



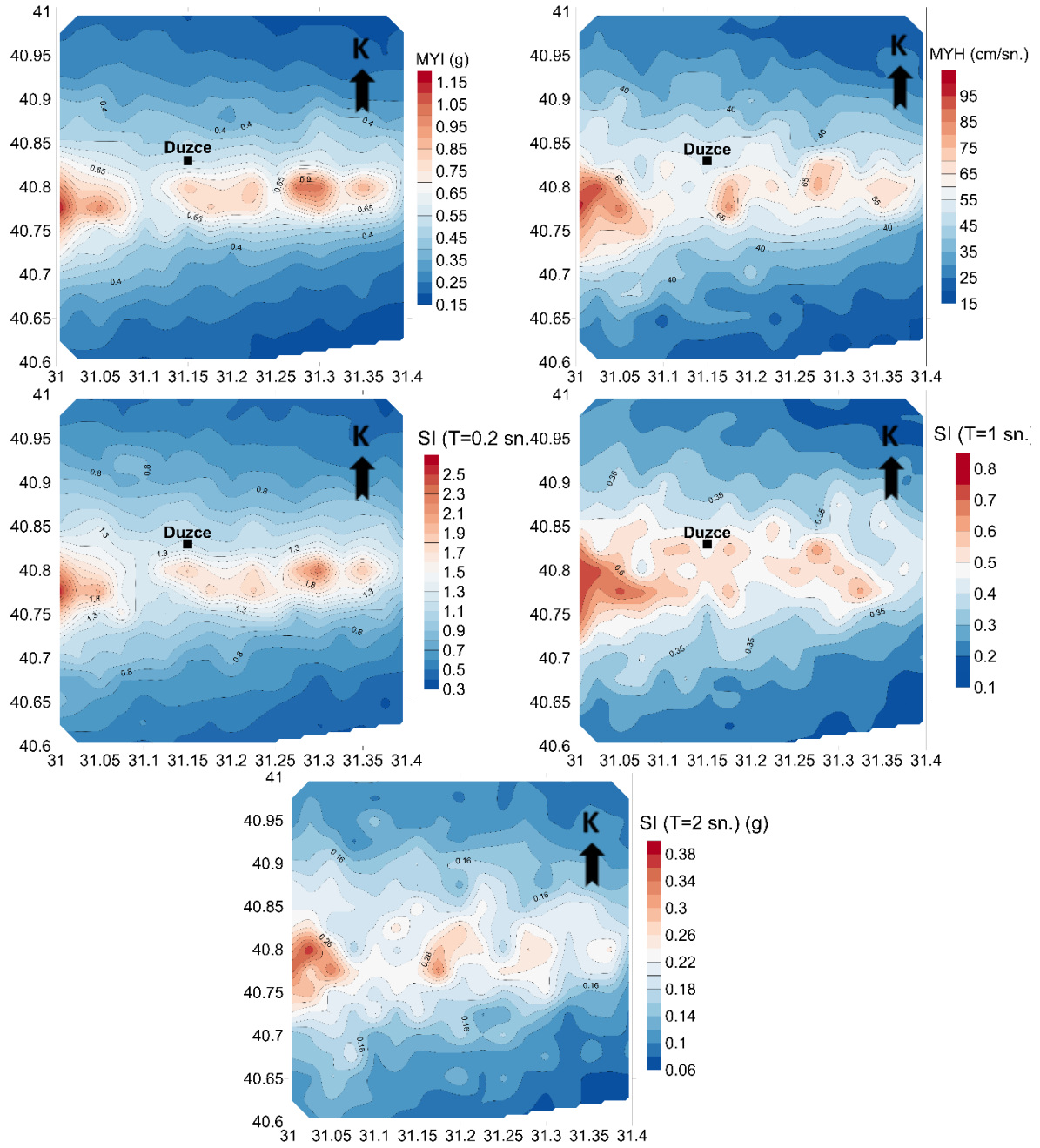
Şekil 7: Erzincan bölgesinde Mw=5.0 senaryo depremi için benzeştirilmiş kayıtların MYI, MYH ve 0.3, 1.0 ve 2.0 sn'deki spektral ivme cinsinden mekânsal dağılımları



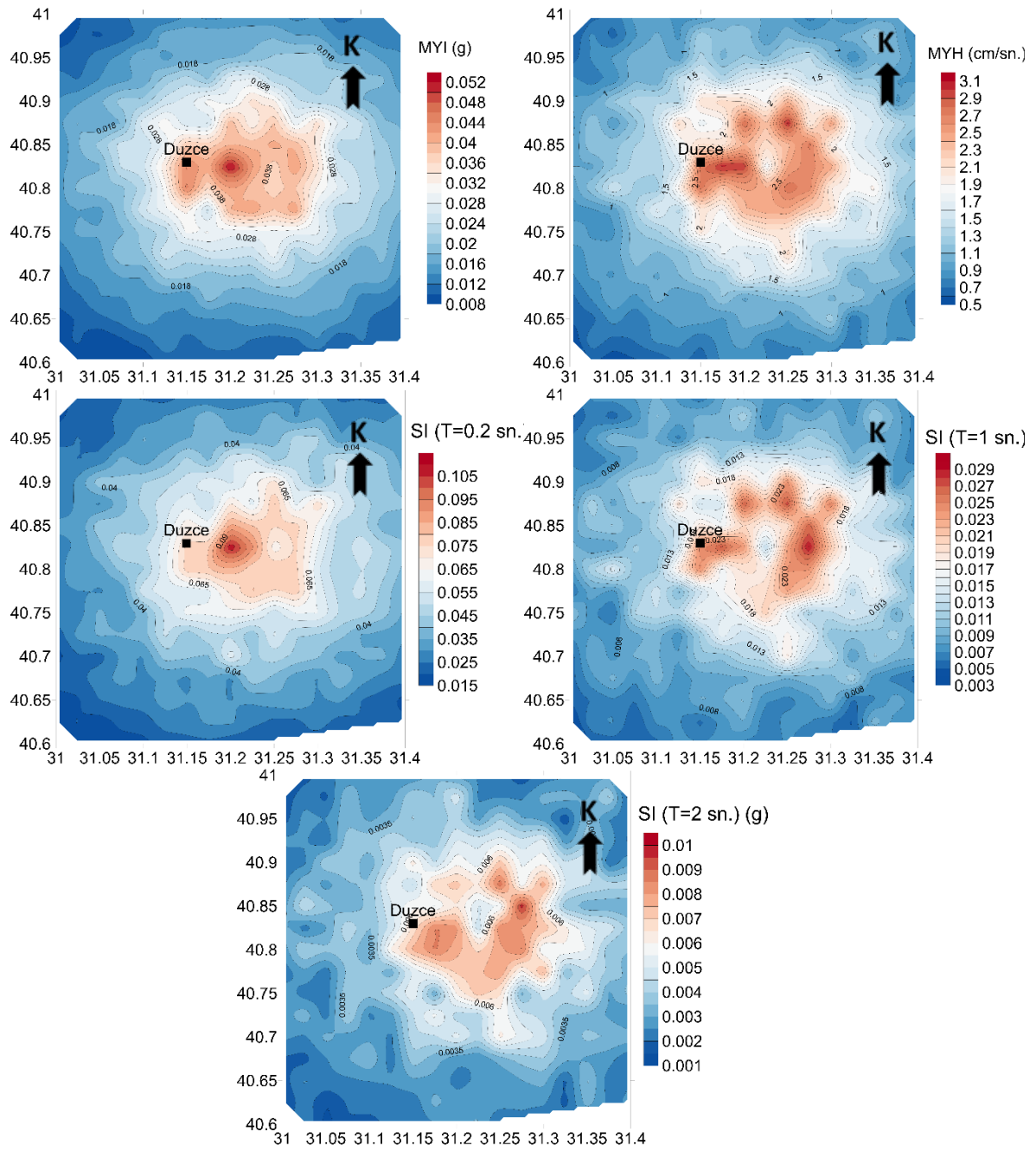
Şekil 8: Erzincan bölgesinde $M_w=6.0$ senaryo depremi için benzeştirilmiş kayıtların MYI, MYH ve 0.3, 1.0 ve 2.0 sn'deki spektral ivme cinsinden mekânsal dağılımları



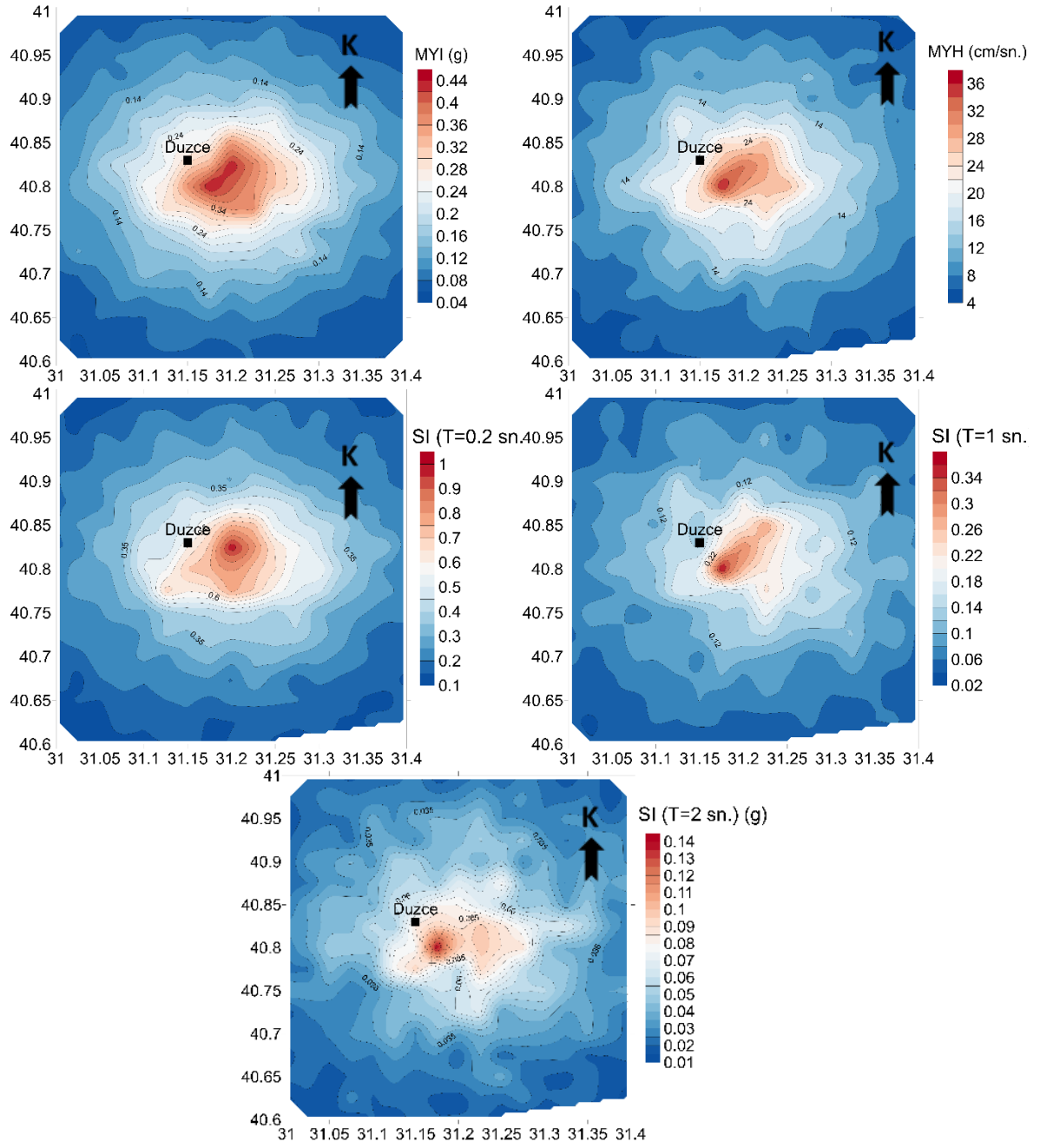
Şekil 9: Erzincan bölgesinde $M_w=7.0$ senaryo depremi için benzeştirilmiş kayıtların MYI, MYH ve 0.3, 1.0 ve 2.0 sn'deki spektral ivme cinsinden mekânsal dağılımları



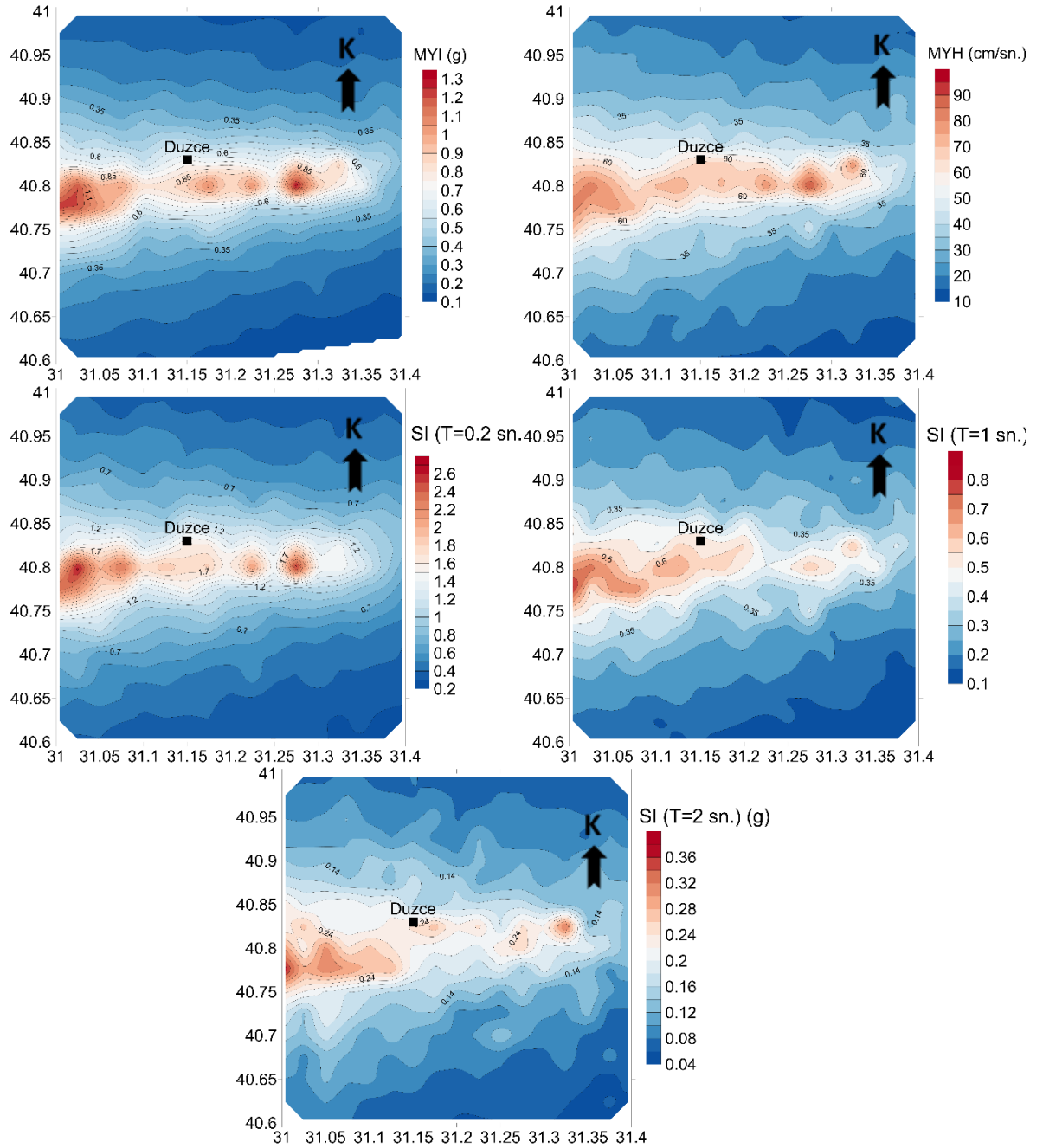
Şekil 10: 1999 Düzce depremi için benzeştirilmiş kayıtların MYİ, MYH ve 0.2, 1.0 ve 2.0 sn'deki spektral ivme cinsinden mekânsal dağılımları



Şekil 11: Düzce bölgesinde Mw=5.0 senaryo depremi için benzeştirilmiş kayıtların MYİ, MYH ve 0.2, 1.0 ve 2.0 sn'deki spektral ivme cinsinden mekânsal dağılımları



Şekil 12: Düzce bölgesinde $M_w=6.0$ senaryo depremi için benzeştirilmiş kayıtların MYİ, MYH ve 0.2, 1.0 ve 2.0 sn'deki spektral ivme cinsinden mekânsal dağılımları



Şekil 13: Düzce bölgesinde $M_w=7.0$ senaryo depremi için benzeştirilmiş kayıtların MYİ, MYH ve 0.2, 1.0 ve 2.0 sn'deki spektral ivme cinsinden mekânsal dağılımları

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Erzincan ve Düzce bölgelerinde yer hareketi simülasyonları kullanılarak ülkemizde bulunan gerçek deprem yer hareketi kayıtlarını ve ilgili veri tabanlarını destekler nitelikte benzeştirilmiş bir yer hareketi veri tabanı sunulmuştur. Çalışılmış olan iki bölgede de, Türkiye'nin kritik ve baskın deprem kaynak mekanizması olan yanal atımlı faylanma mevcuttur. Geliştirilmiş olan bu veri tabanı, Erzincan ve Düzce bölgelerinde $M_w=5.0$, 5.5, 6.0, 6.5, 6.6, 7.0 ve 7.1 deprem büyüklüklerini, 0-30 km kaynak-saha mesafelerini ve farklı zemin koşullarını temsil eden 2610 kayıt içermektedir.

Bu çalışmada yapılan yer hareketi simülasyonlarında kullanılan parametreler, çalışma alanlarında meydana gelmiş olan yıkıcı depremlerin ivme kayıtları ile doğrulanmış parametrelerdir. Bu çalışmada oluşturulan senaryo depremlere ait kuvvetli yer hareketi kayıtları, yer hareketi tahmin denklemleri ile karşılaştırılmıştır. Fiziksel olarak çalışılan bölgeye uygun parametreler ile yapılan simülasyonlardan elde edilen yer hareketlerinin mesafe ile azalımının ampirik yer hareketi tahmin denklemleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak, seçilen senaryolara karşılık gelen maksimum yer hareketi parametrelerinin mekânsal dağılımları sunulmuştur.

Güncel deprem yönetmeliklerinde benzeştirilmiş yer hareketlerinin deprem mühendisliğindeki uygulamalarına yer verilmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, geçmiş yıkıcı depremlerin benzeştirilmiş kayıtları, yapıların dinamik analizlerinde ve sismik kayıp analizlerinde etkili biçimde kullanılmış; benzeştirilmiş kayıtlar aynı depremlere ait gerçek kayıtlarla elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar vermiştir (Karimzadeh ve diğ. 2017; 2018). Bu çalışmada sunulan veri tabanındaki yer hareketi kayıtları ise tek bir depremi değil geniş bir aralıktaki sismik aktiviteyi kapsadığı için, sözü edilen Erzincan ve Düzce bölgeleri dışında da, benzer faylanma, kaynak-saha mesafesi ve zemin koşullarına sahip bölgelerde çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Bu veri tabanındaki kayıtların, özellikle gerçek deprem kaydı bulunmayan çalışma alanlarında yapılacak olan deprem mühendisliği uygulamalarında, hasar ve kayıp tahminlerinde, eş şiddet kestirimlerinde kullanılması mümkündür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasına TUJJB-UDP-01-12 ve JICA-SATREPS MARDIM projeleri kısmi katkılar sağlamıştır. Bu destekler için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akkar S., Cagnan Z., 2010. A local ground-motion predictive model for Turkey and its comparison with other regional and global ground-motion models, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 100, 2978-95.

Anderson J.G., Hough S.E., 1984. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 74 (5), 1969-1993.

Askan A., Sisman FN., Ugurhan B., 2013. Stochastic strong ground motion simulations in sparsely monitored regions: a validation and sensitivity study on the 13 March 1992 Erzincan (Turkey) earthquake, *Soil. Dyn. Earthq. Eng.* 55, 170-181, doi: 10.1016/j.soildyn.2013.09.014

Askan A., Karimzadeh S., Asten M., Kilic, N., Sisman F.N., Erkmen C., 2015. Assessment of seismic hazard in the Erzincan (Turkey) region: construction of local velocity models and evaluation of potential ground motions, *Turk. J. Earth. Sci.* 24 (6), 529-565, doi: 10.3906/yer-1503-8

Asten M., Askan A., Ekincioglu E., Sisman F.N., Ugurhan B., 2014. Site characterisation in north-western Turkey based on SPAC and HVSR analysis of microtremor noise, *Exploration Geophysics*, doi: 10.1071/EG12026

Barka A. 1993. Erzincan baseni çevresinin tektoniği ve 13 mart 1992 depremi. 2. Ulusal deprem Müh. Konfransı, TMMOB İnşaat Müh. Odası, Deprem Müh. Türkiye Milli Komitesi, İTÜ Yapı ve Deprem Uyg-Ar.Mrk., 259-270.

Beresnev I., Atkinson G.M., 1997. Modeling finite-fault radiation from the ω^n spectrum, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 87 (1), 67-84.

Boore D. M., 1983. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 73 (6A), 1865-1894.

Boore D.M., Atkinson G.M., 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s, *Earthquake Spectra* 24, 99-138.

Karimzadeh S., Askan A., Yakut A., 2017. Assesment of simulated ground motions for their use in structural engineering practice; a case study for Duzce (Turkey), *Pure Appl. Geophys.* 174 (9), 3325-9.

Karimzadeh S., Askan A., Erberik M.A., Yakut A., 2018. Seismic damage assessment based on regional synthetic ground motion dataset: a case study for Erzincan, Turkey, *Nat. Hazards* 92 (3), 1371-97.

Karimzadeh S., Askan A., 2018. Modeling of the 1939 Erzincan, Turkey (Ms7.8) earthquake: observations on anticipated ground motions and felt intensity distribution, *Acta Geophys.* 66 (3), 293-304.

Lav A, Erken A, İyisan R, Ansal A., 1993. Erzincan'da yerel Zemin koşulları ve bunun yapısal hasar üzerindeki etkisi. Türkiye İnşaat Mühendisliği 12. Teknik Kongresi Bildiri Kitabı, 25–38.

Mai P.M., Imperatori W., Olsen K.B., 2010. Hybrid broadband ground-motion simulations: Combining longperiod deterministic synthetics with high-frequency multiple S-to-S back-scattering, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 100 (5A), 2124-2142. <https://doi.org/10.1785/0120080194>

Mohammadioun B., Serva L., 2001. Stress drop, slip type, earthquake magnitude, and seismic hazard, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91 (4), 694-707, <https://doi.org/10.1785/0120000067>

Motazedian D., Atkinson G.M., 2005. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95 (3), 995-1010, doi: 10.1785/0120030207

Olsen K.B., Archuleta R.J., Matarrese J.R., 1996. Three-dimensional simulation of a magnitude 7.75 earthquake on the San Andreas fault, *Science* 270 (5242), 1628

Sorensen M.B., Lang D.H., 2014. Incorporating simulated ground motion in seismic risk assessment-application to the lower Indian Himalayas, *Earthq. Spectra* 31 (1), 71-95. doi: 10.1193/010412EQS001M

Ugurhan B., Askan A., 2010. Stochastic strong ground motion simulation of the 12 November 1999 Duzce (Turkey) earthquake using a dynamic corner frequency approach, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 100 (4), 1498-1512, doi: 10.1785/0120090358

Ugurhan B., Askan A., Erberik M.A., 2011. A methodology for seismic loss estimation in urban regions based on ground-motion simulations, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101 (2), 710-725. doi: 10.1785/0120100159

Utkucu M., Nalbant S.S., McCloskey J., Steacy S., Alptekin O., 2003. Slip distribution and stress changes associated with the 1999 November 12, Duzce (Turkey) earthquake ($M_w=7.1$), *Geophys. J. Int.* 153 (1), 229-41.

Wells D.L., Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84 (4), 974-1002.