

Bursa Bölgesi için Yerel Sismik İstasyon A' dan Elde Edilen Parametreler ile Yer Hareketi Simülasyonu

Barı ÜNAL¹ ve Aytegin ASKAN²

¹ Araştırma Görevlisi, Deprem Çalışmaları Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
² Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
Email: unalb@metu.edu.tr

ÖZET:

Türkiye’de en çok hasara yol açan doğal afetlerden bir tanesi depremdir. Bu doğal afetle mücadele etmek için yapılacak çalışmalarında, yerel sismik istasyon a'larına ait verileri kullanarak bölgelerin depremselliğinin hesaplanması önemli bir yere sahiptir. Kuzey Anadolu Fay Hattı’nın, ülkemizdeki deprem çalışmalarının odak noktası haline gelmesine karşın bu aktif alanın güneyindeki Bursa bölgesindeki deprem tehlikesi yakın zamana kadar çok detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Bölgede sismik tasarım ve analizlerin güvenli bir şekilde yapılabilmesi için; bölgede gerçekleştirebilecek ölçümü ya da simülasyondan elde edilmiş potansiyel yer hareketlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yeterince yer hareketi kaydı olmayan ve tekrarlanma periyodu uzun sismik aktiviteye sahip bölgelerde simülasyonlar daha da önem kazanmakta; analizlerde yalnızca maksimum yer hareketi parametrelerinin yetmediği ve ivme-zaman kaydı gerektiren durumlarda özellikle simülasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışma dinamik sınır frekanslı stokastik sonlu-fay simülasyon tekniğini kullanarak Bursa bölgesindeki geçmiş ve olası depremlerin modellenmesi hedeflenmiştir. Sentetik yer hareketi çıktılarının güvenilirliğini arttırmak adına girdi parametreleri yerel verilerden oluşturulmuştur. Zemin büyütme etkileri ve yüze yakın frekansa bağlı azalış parametresi gibi istasyona bağlı parametreler bölgedeki 33 kuvvetli yer hareketi istasyonunda ölçülen kayıtlardan elde edilmiştir. Kaynak ve yayılım parametreleri ise yerel verilere uygun bir şekilde daha önceki çalışmalardan derlenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında modelin sınanması amacıyla bölgedeki bazı geçmiş yer hareketleri, kendilerine karşılık gelen sentetik çıktılarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra bölgede olası bir senaryo depremin simülasyonu yapılmıştır. Sonuçlar seçilen noktalarda ivme-zaman grafiği ve maksimum yer ivmelerinin mekânsal dağılımı açısından sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Yer Hareketi Simülasyonu, Stokastik Sonlu-Fay Modeli, Bursa

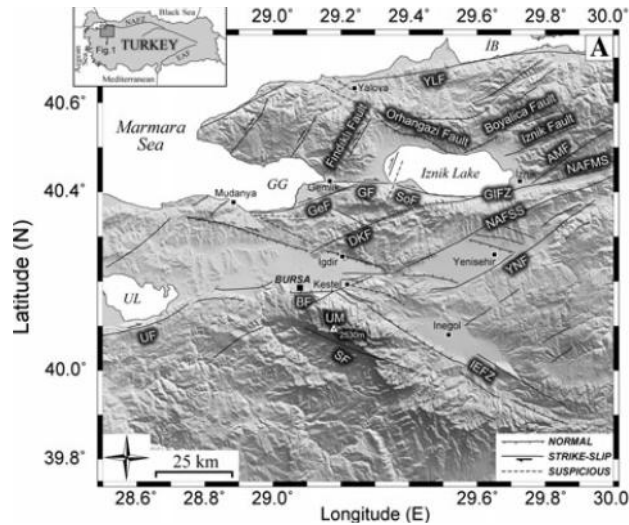
1. GİRİŞ

Depremler yapısal hasarların yanı sıra toplumlarda sosyal ve psikolojik yaralar da açmaktadır. Bu nedendir ki pek çok farklı araştırma alanı deprem problemi ile ilgilenmektedir. Deprem mühendisliği alanında, depreme dayanıklı yapıların tasarımı yapılırken ya da var olan yapılar depreme karşı güçlendirilirken potansiyel deprem kayıtlarına ihtiyaç duyulur. Gereken deprem kayıtları öncelikle ilgilenilen bölgede daha önce gerçekleştirilmiş depremlerden elde edilmeye çalışılır. Yeterli sayı ve nitelikte yer hareketi kaydı derleyebilmek için o bölgede uzun süredir aktif olan sismik istasyon a'larına ihtiyaç duyulmaktadır. Mühendislik uygulamaları için yeterince yer hareketi kaydı olmayan ve tekrarlanma periyodu uzun sismik aktiviteye sahip bölgelerde ise daha önceki deprem kayıtları kullanılarak oluşturulmuş matematiksel modellerden (yer hareketi tahmin denklemlerinden) maksimum yer hareketi parametreleri elde etmek mümkün olmaktadır. Ancak bu parametrelerinin yetmediği, ivme-zaman kaydı gerektiren durumlarda simülasyonlara özellikle ihtiyaç duyulmaktadır.

Yer hareketi simülasyonlarında kullanılan yaklaşımlar iki grupta toplanabilir; deterministik ve stokastik yaklaşımlar. Deterministik yöntemlerde dalga denklemi analitik ya da sayısal bir şekilde çözülür. Bu yöntemleri uygulayabilmek için kaynak ve dalga hız modellerinin detaylıca bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca her ne kadar

yer hareketlerini gerçeğe çok yakın üretebilseler de yüksek bilgisayar gücü gereksinimleri, deterministik yöntemlerin düşük frekanslar ($f < 1$ Hz) da uygulanabilirliklerini kısıtlamaktadır. Stokastik yöntemler ise yer hareketlerinin yüksek ve orta frekanslarını çok daha az bilgisayar gücü kullanarak elde edebilirler fakat dalga yayılımı denklemlerini doğrudan çözmedikleri için hassasiyetleri daha düşük olmaktadır. Mühendislik yapılarını ilgilendiren geniş bantlı yer hareketlerini elde etmek için bu iki yöntemin birlikte kullanılması idealdir. Konut tipi binalar çoğunlukla yer hareketlerinin orta ve yüksek frekanslarından daha fazla etkilendikleri için mühendislik uygulamalarında stokastik yöntemler uygulanabilir. Literatürdeki ilk stokastik yöntem Boore (1983) tarafından geliştirilen nokta kaynak metodudur. Yakın saha etkilerini yansıtamadığı için, bu yöntemin gözlem sahasının kaynaktan uzaklığı kırılan fayın genişliğinden az olduğu durumlarda kullanılması uygun olmamaktadır. Yakın saha etkilerini de gözlemleyebilmek için Beresnev ve Atkinson (1998) fayı dikdörtgen ekinde varsayıp, bu dikdörtgeni her biri nokta kaynak olarak modellenen küçük fay parçalarına bölerek analiz ettikleri sonlu-fay metodunu geliştirmişlerdir. Motazedian ve Atkinson (2005) ise önceki çalışmayı dinamik sınır frekansı yaklaşımla geliştirerek sonlu-fay modelinin kullanılan fay parçalarının boyutundan bağımsız olmasını sağlamışlardır. Bu çalışmada, Bursa'da yer hareketi simülasyonları yapabilmek amacıyla Motazedian ve Atkinson (2005)'in dinamik sınır frekanslı stokastik sonlu-fay yöntemini kullanan EXSIM bilgisayar programı kullanılmıştır.

Çalışma alanı olan Bursa, Kuzey Anadolu Fay Hattı Orta Kolu (KAF-OK)'nun güneyinde ve Kuzey Anadolu Fay Hattı Güney Kolu (KAF-GK) ve önü-Eskişehir Fay Hattı (IEFZ)'nin kuzeyinde bulunmaktadır. Bursa'nın batısında, Ulubat Gölü'nün güneyindeki KAF-GK'nun uzantısı Ulubat Fayı (UF) yer almaktadır (Yaltırak, 2002). Ayrıca bölgede bulunan Gemlik Fayı (GF), Geyve-Iznik Fay Hattı (GIFZ), Yenişehir Fayı (YNF) ve Bursa Fayı (BF) gibi aktif normal-atımlı ve yanıl-atımlı faylar ile fay parçaları da Bursa için tehlikeli olmaktadır (Gök and Polat, 2011). Bursa bölgesinde yaşanan en büyük tarihi depremlerden birisi 28 Şubat 1855'de $I_0 = X$ iddetinde ve yaklaşık olarak ($M_S = 7.1$) büyüklüğünde gerçekleşmiştir (Ambraseys, 2000; 2002).



Şekil 1 Bursa bölgesindeki önemli faylar. AMF Adliye Mevriye Fayı, BF Bursa Fayı, DKF Demirtaş - Kiblepınar Fayı, GeF Gençali Fayı, GF Gemlik Fayı, GG Gemlik Körfezi, GIFZ Geyve- İznik Fay Hattı, IEFZ önü-Eskişehir Fay Hattı, NAFMS Kuzey Anadolu Fay Hattı Orta Kolu, NAFSS Kuzey Anadolu Fayı Güney Kolu, SF Soğukpınar Fayı, SoF Soloz Fayı, UF Ulubat Fayı, UL Ulubat Gölü, UM Uludağ, YLF Yalova Fayı, YNF Yenişehir Fayı (Gök and Polat, 2011'den uyarlanmıştır).

2. D NAM K SINIR FREKANSLI STOKASTİK SONLU-FAY YÖNTEM

Sonlu-fay yönteminde dikdörtgen faylar daha küçük alt fay parçalarına bölünür ve bu alt fayların etkileri toplanarak herhangi bir gözlem noktasında fayın tüm etkisi elde edilir (Beresnev ve Atkinson, 1997). Her bir fay parçası Aki (1967)'nin önerdiği ω^{-2} spektrumlu stokastik nokta kaynaklarını gibi düşünülür. Deprem oda 1, fay parçalarından biri üzerinde seçilir. Yer hareketi merkezden dışarı doğru sabit bir yırılma hızıyla yayılır. Hareket, her bir alt fayın merkezine ulaştığında o parçayı tetikler. Bu sayede kırılan fay parçalarının etkileri doğru zaman aralıklarıyla toplanarak bütün fayın etkisinin elde edilmesi sağlanır (Atkinson ve ark., 2009). Fay parçalarının etkileri zaman uzayında aşağıdaki gibi toplanır:

$$a(t) = \sum_{i=1}^{nl} \sum_{j=1}^{nw} H_{ij} \times a_{ij}(t - \Delta t_{ij} - T_{ij}) \quad (1)$$

Denklem (1)'de, $a(t)$ bütün fayın kırılması ile ortaya çıkan yer ivmesini, a_{ij} ij endeksli fay parçasından gelen ivmeyi göstermektedir. nl ve nw sırasıyla ana fayın uzunluk ve genilik yönlerinde kaç tane alt fay parçasına bölündüğüünü belirtmektedir. T_{ij} fay parçasının çapının kırılma hızına oranını (Atkinson ve ark., 2009), Δt_{ij} ise hareketin sonlu-fay elemanına gelmesi için geçen süre ve fay parçası tetiklendikten sonra kesme dalgasının istasyona ulaşması için gereken sürenin toplamını ifade eder (Beresnev ve Atkinson, 1997). Denklemdeki

$$H_{ij} = N \cdot \sum f^2 / (1 + f/f_c)^2 \sum f^2 / (1 + f/f_{cij})^{2.5} \quad \text{Motazedian ve Atkinson (2005) tarafından}$$

yüksek frekanslardaki enerjiyi korumak için geliştirilen ölçekleme katsayısıdır. Beresnev ve Atkinson (1998) tarafından geliştirilen FINSIM programı, stokastik sonlu-fay yöntemini sabit sınır frekansı yaklaşımı ile uygulamaktadır. Ancak bu programda kullanılan fay parçalarının sayısı ve boyutları oluşturulan ivme spektrumunu etkilemektedir. Motazedian ve Atkinson (2005), bu problemi dinamik sınır frekansı yaklaşımı ile çözmüştür. Bu yaklaşımda fay kırılmaya devam ederken sınır frekansı o ana kadar kırılan alanla ters orantılı şekilde değişmektedir. Bu sayede açığa çıkan enerji, fay parçalarının boyutlarından bağımsız hale gelmiştir. Bu çalışmada da yukarıda söz edilen dinamik sınır frekansı yaklaşımını kullanan EXSIM programı kullanılmıştır. Bu yöntemdeki ij endeksli fay parçasının ivme spektrumu $A_{ij}(f)$; kaynak, kaynak ve saha arasındaki zemin ve saha etkilerine bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Motazedian ve Atkinson, 2005):

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

Denklem (2)'deki $C = \mathfrak{R}^{\theta\gamma} \cdot \sqrt{2} \cdot 4\pi\rho\beta^3$ katsayısında, $\mathfrak{R}^{\theta\gamma}$ yayılma örüntüsünü, ρ yoğunluk ve β kesme dalga hızını göstermektedir. $M_{0ij} = M_0 S_{ij} \sqrt{\sum_{k=1}^{nl} \sum_{l=1}^{nw} S_{kl}}$ ij endeksli fay parçasının sismik momentini, S_{ij} bağıl kayma oranını belirtir. Burada ij endeksli fay parçasının sınır frekansı $f_{cij} = N_R t^{-\frac{1}{3}} 4.9 \cdot 10^6 \beta \frac{\sigma}{M_{0ave}}^{\frac{1}{3}}$ ile gösterilmiştir. Yine denklemdeki $N_R(t)$, “t” anındaki kırılan fay parçalarının sayısını, σ deprem öncesi ve sonrasındaki bölgedeki gerilim farkını ve $M_{0ave} = M_0/N$ de fay parçalarındaki ortalama sismik momenti göstermektedir. H_{ij} ölçekleme katsayısını, R_{ij} sahadan uzaklığı, $Q(f)$ kaynak ile saha arasındaki frekansa bağlı elastik olmayan sönümlemeyi, Df zemin büyütme faktörünü ve $e^{-\pi\kappa f}$ de Anderson ve Hough (1984) tarafından önerilen ve sahada κ faktörüne göre yüksek frekanslardaki spektral azalmayı belirtmektedir. Motazedian ve Atkinson (2005), EXSIM programında ayrıca maksimum kırılan fay alanının toplam fay alanına oranını belirten maksimum kırılma oranı parametresini de kullanmışlardır. Kırılma devam ederken o anki kırılma

oranı, modellemede girdi olarak belirlenen maksimum kırılma oranına ula ana kadar dinamik sınır frekansı da azalmaya devam etmektedir.

Bu yöntemde ilk önce istenilen uzunlukta, sıfır ortalamaya ve birim varyansa sahip bir beyaz Gauss gürültüsü oluşturulur. Stokastik bu gürültü, önce zaman uzayında pencerelenir, sonra frekans uzayına çevrilip genlik spektrumun ortalamasının kareköküne göre normalize edilir. Kaynak modeli, kaynak ve saha arası yayılım modeli ve saha modeli ile deterministik bir hedef spektrum oluşturulur. Bu hedef spektrum normalize edilmiş gürültü ile çarpılıp tekrar zaman uzayına döndürülür. Bu biçimde fiziksel olarak modellenmek istenen depremin özelliklerini taşıyan ivme-zaman grafiği elde edilir (Boore, 1983).

Stokastik sonlu-fay yöntemi, dünyada birçok bölge için çalışılmıştır (Castro ve ark., 2001; Roumelioti ve ark., 2004; Motazedian ve Moinfar, 2006); Türkiye’de de yakın zamanda gerçekleştirilen 1998 Ceyhan (Yalcinkaya, 2005), 1999 Düzce (Ugurhan ve Askan, 2010), 1992 Erzincan (Askan ve ark., 2013), 2011 Van (Akinci ve Antonioli, 2012; Zengin ve Caktı, 2014) depremlerinin modellenmesiyle de doğrulanmıştır.

3. BURSA BÖLGESİ MODELİ

Bir bölgede senaryo deprem simülasyonu yapmadan önce simülasyon model parametrelerini daha önce gerçekleştirilen depremlerle karşılaştırmak, modelin fiziksel olarak doğrulanmasını sağlayarak senaryonun gerçekleştireceği etkiyi arttıracaktır. Bursa bölgesinde yer hareketlerinin büyüklük, frekans içeriği ve sürelerini etkileyebilecek parametreleri belirlemek amacıyla geçmiş depremlerin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonu yapılacak depremler seçilirken Bursa il merkezinden 200 km mesafe içerisinde gerçekleştirilen ve moment büyüklüğü $M_w = 4.5$ ’in üstündeki depremler aranmıştır. Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanı’ndan (http://kyhdata.deprem.gov.tr/2K/kyhdata_v4.php) bu ölçütlere uyan 6 deprem seçilmiştir. Bu depremlerden toplam 12 istasyonda 28 kayıt alınmıştır. Seçilen kayıtlar, taban çizgisi düzeltilmesi yapıldıktan sonra 0.5 Hz - 25 Hz frekans bandında filtrelenmiştir.

Yer hareketi simülasyon modelini oluştururken parametreler üç grupta toplanabilir: kaynak parametreleri, kaynak ile saha arası etkileri tanımlayan dalga yayılım parametreleri ve saha (zemin) parametreleri. Kaynak modeli şu parametrelerle tanımlanmaktadır: fayın bir köşesinin ve odağın enlem-boylam olarak yeri, fayın doğrultu ve dalım açıları, fayın boyutları, faydaki atım oranları ile dalım ve gerilim düzeyi. Bu çalışmada depremlere ait fay boyutları (deprem sonrası yapılan çalışmalarda mevcut olmadıkları için) Wells ve Coppersmith (1994)’in ampirik bağıntılarından elde edilmiştir. Genellikle parametre optimizasyonu sürecinde de fayın genişliği olarak kabul edilen kayma oranı, senaryo depremdeki belirsizliği arttırmaması için %50 olarak sabitlenmiştir. Gerilim düzeyi parametresi Mohammadioun and Serva (2001) tarafından önerilen $\sigma_{SS} = 8.9 \times W^{0.8}$ denklemi ile bulunmuştur. Bu denklemde σ_{SS} gerilim düzeyini, W ise fayın genişliğini göstermektedir. Diğer kaynak parametreleri ise depremlerin detaylı kaynak çözümlerinden alınmıştır.

Kaynak ile saha arası etkileri, geometrik yayılım, uzaklık bağımlı süre ve elastik olmayan sönümlenme parametreleri tanımlar. Bu çalışmada geometrik yayılım Ansal ve arkadaşlarının (2009) Marmara bölgesi için önerdiği fonksiyonla tanımlanmıştır. Uzaklık bağımlı süre parametresi doğrudan deterministik hedef spektrumunu etkilememektedir. Bu fonksiyona simülasyonun ivme-zaman grafiğinde ifade edilebilmesi için ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada Herrmann (1985)’in önerdiği $T = T_0 + 0.05R_{hypo}$ fonksiyonu kullanılmıştır. Burada R_{hypo} km cinsinden sahadan odağa olan uzaklığı ve T_0 ise saniye cinsinden kaynak süresini ifade eder. Kullanılacak frekansa bağımlı elastik olmayan sönümlenme parametresini seçmek için literatürden 3 farklı model denenmiştir. Bu modellerin iki tanesi Bursa bölgesi için geliştirilen modeller (Gündüz ve ark., 1998; Akyol ve ark., 2002); üçüncü ise bütün dünyadaki verileri kullanarak oluşturulmuş daha genel bir modeldir (Boore, 1984).

Bu çalışmada, sözü edilen üç model arasında gözlenen verilere en yakın sonuçları veren, Gündüz ve arkadaşlarının (1998) önerdiği bölgesel $Q_s = (50 \pm 1.7)f^{1.09 \pm 0.05}$ modelinin ortalama değerleri kullanılmıştır.

Saha etkileri, zemin büyütme fonksiyonu ve yüksek frekanslardaki spektral azalımı belirten kapa faktörü ile tanımlanmıştır. Zemin büyütme faktörlerinin doğrulanması amacıyla, zemin büyütme değerleri 1-boyutlu teorik transfer fonksiyonu, ampirik H/V fonksiyonu (Nakamura, 1989) ve Boore ve Joyner (1997) tarafından önerilen ortalama zemin büyütme fonksiyonları ile hesaplanıp, alternatif yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yalnızca 4 istasyonda (1610, 1611, 1612 ve 1614) sondaj bilgileri olduğu için karşılaştırmalar bu istasyonlar için yapılmıştır. Karşılaştırılan yöntemlerden 1-boyutlu teorik saha tepkisi, simülasyonlar sırasında gerçek kayıtlara en yakın sonuçları vermiştir. Fakat bu yöntem, detaylı hız profili mevcut olmayan diğer istasyonlar için geçerli olmadığından ve deneysel H/V fonksiyonları deprem verilerinden en uzak sonuçları verdiklerinden bu çalışmada Boore ve Joyner (1997) fonksiyonları kullanılmıştır. Kapa değeri Anderson ve Hough (1984) tarafından geliştirilen yöntem ile bulunmuştur. Bu yöntemde öncelikle seçilen istasyonda kaydedilen bütün kayıtların S-dalgası kısımları ayrılmıştır. Daha sonra, S-dalgasının Fourier dönüşümünden elde edilen spektrum yarı logaritmik eksenlerle çizilmiştir. Ortaya çıkan grafikte yüksek frekanslardaki düşük frekanslı frekans f_0 ve bittiği frekans f_{max} gözlemsel olarak belirlenmiştir. Bu iki nokta arasından geçirilen doğrunun eğimi $-\pi\kappa$ denmektedir. Buna göre $\kappa = -E \text{im} / \pi$ formülüyle bulunmuştur. Bu yöntem tüm kayıtlar için dört kere tekrarlanmış ve elde edilen 8 yatay ve 4 dikey kapa değerinin ortalaması alınmış ve merkeze uzaklık-kapa grafiği çizilmiştir. 350 km den uzak veriler atıldıktan sonra kalan noktalara bir doğru uydurulmuştur. Bu doğru kapa eksenini kestiği (uzaklığın 0 km olduğu) değer κ_0 , istasyonun bulunduğu yerdeki kapa değeridir.

Bursa bölgesi modelinin doğruluğunda çalışması için toplanan parametreler karşılaştırılarak en iyi parametre seti elde edilmiştir. Karşılaştırmalarda, önceden belirlenen $E f = \log \frac{A f_{gözlenen}}{A f_{sentetik}}$ hata fonksiyonunun değerini en aza indiren seçenek tercih edilmiştir. Bu fonksiyonda $A f_{gözlenen}$ gözlenen kaydın ivme spektrumu ve $A f_{sentetik}$ ise simülasyon sonucu elde edilen ivme spektrumunu göstermektedir. Bu süreçte ilk önce bütün bölge için geçerli olacak frekans bağımsız azalım faktörü değeri olarak seçilmiştir. Bütün kayıtlar göz önüne alındığında en düşük hatayı veren Gündüz ve arkadaşları (1998) tarafından önerilen $Q_s = 50 \pm 1.7 f^{1.09 \pm 0.05}$ fonksiyonu olmuştur. En iyi parametrelerin seçimindeki ikinci kısıtlama; bütün istasyonların ölçtüğü kayıtlardaki saha etkileri aynı olmasının gerekliliğidir. Buna göre istasyonlardaki zemin büyütme faktörleri Boore ve Joyner (1997) fonksiyonlarına göre hesaplanmıştır. Kapa faktörü olarak ise istasyonların kendi kapa faktörleri ile bölgedeki en büyük (0.0383, 1608 istasyonun kapa değeri) ve en küçük (0.031, 1613 istasyonunun kapa değeri) kapa faktörleri karşılaştırılmış ve istasyonların kendi kapa faktörleri çoğunlukla daha iyi sonuçlar vermektedir. Sözü edilen ölçütlere göre seçilen “en iyi” parametre seti Tablo 1’de sunulmuştur.

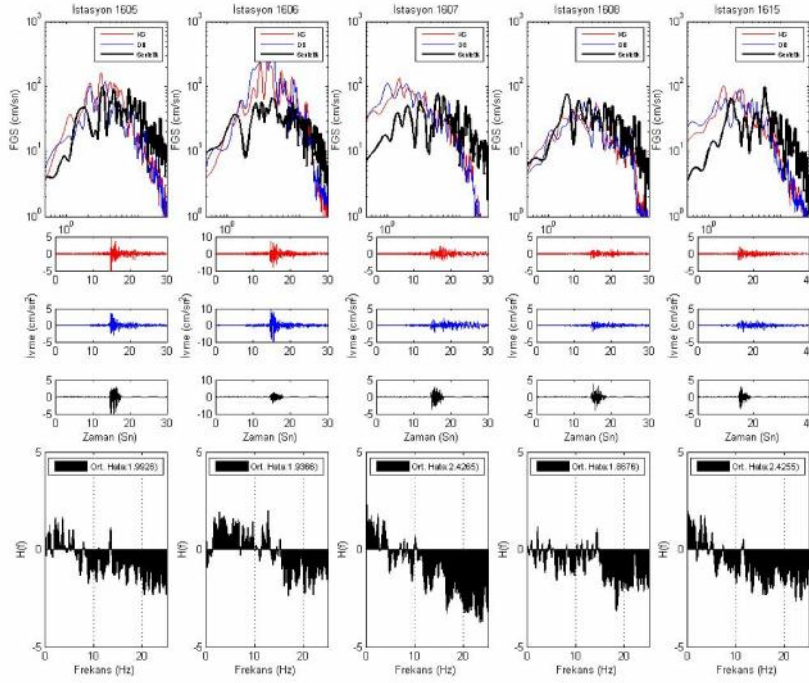
M.Kemalpaşa (Mw=4.6) depremine ait gerçek ve sentetik kayıtlar ekil 2’de karşılaştırılmışlardır. Buna göre 1605 ve 1608 istasyonlarında gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir. İstasyon 1606’da ise simülasyonlar sonucu orta frekanslarda gözlenen spektral değerlerden daha düşük değerler elde edilmiştir. 1607 ve 1615 istasyonlarında yüksek frekanslardaki azalım doğru tahmin edilememiştir.

Senaryo simülasyonundan önce modelin geçerliliğini bir kez daha sınamak için Bursa modeli, yerel ve global veriler ile oluşturulan yer hareketi tahmin denklemleri ile karşılaştırılmıştır. M.Kemalpaşa merkez üssünün 200km etrafında 500 rastgele noktada Bursa modeli kullanılarak yer hareketi simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Boore ve Atkinson (2008) tarafından dünyanın çeşitli yerlerindeki yer hareketi verileri kullanılarak geliştirilen yer hareketi tahmin denklemi ve Akkar ve Cagnan (2010) tarafından yalnızca Türkiye’deki depremler kullanılarak geliştirilen yerel yer hareketi tahmin denklemi ile karşılaştırılmıştır.

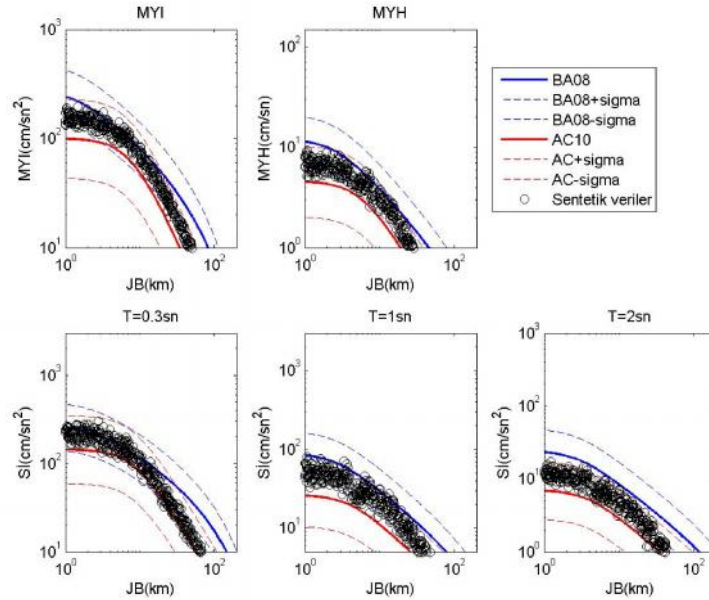
Tablo 1 Bursa bölgesindeki seçilen depremlerin simülasyon parametreleri

Merkez üssü	Bandırma	Bilecik	Çalica	Karacabey	Keles	M.Kemalpaşa
Tarih	2006	2011	1999	2006	2003	2003
Moment büyüklüğü	5.1	4.9	5.1	4.9	4.8	4.6
ç merkez enlemi (K)	40.25	40.14	40.53	40.27	39.88	39.99
ç merkez boylamı (D)	27.98	29.96	29.04	28.32	29.28	28.67
Fay ile yüzey arası uzaklık (km)	14.7	23.1	30	16.75	13.3	4.35
Fay doğrultusu	50	45	78	45	45	135
Fay dalımı	90	90	90	90	90	90
Fay boyutları	4×4	3×3.5	4×4	3×3.5	2.5×3	2×2.5
Fay parçası boyutları	1×1	0.5×0.5	1×1	0.5×0.5	0.5×0.5	0.5×0.5
Yer kabuğu kesme dalgası hızı (km/s)	3.5					
Yer kabuğu yoğunluğu (g/cm ³)	2.8					
Yırtılma hızı (km/s)	2.8					
Gerilim düzeyi (bar)	27	24	27	24	21	18.5
Maksimum kırılma oranı	50					
Azalış faktörü	$Q = 50f^{1.09}$					
Geometrik yayılım	$R^{-1}, R \leq 30 \text{ km}$ $R^{-0.6}, 30 \text{ km} < R \leq 100 \text{ km}$ $R^{-0.5}, 100 \text{ km} < R$					
Süre modeli	$T = T_0 + 0.5R$					
Pencereleme modeli	Saragoni ve Hart (1973)					
Kappa faktörü	stasyona bağlı kapa modeli					
Saha yükseltme faktörü	Boore ve Joyner (1997)					

Yer hareketi tahmin denklemleri ile yapılan karıştırmalar $M_W = 5$ büyüklüğü için yapılmıştır. Denklemlerden elde edilen maksimum yer ivmesi (MYI), maksimum yer hızı (MYH) ve 3 periyot ($T = 0.3sn, T = 1sn$ ve $T = 2sn$) için spektral ivme (SI) değerleri iki yer hareketi tahmin denkleminde de kullanılan Joyner-Boore mesafelerine (JB) göre ekil 3'te sentetik verilerle karıştırmalarıdır. Ekil 3'te görüldüğü gibi sentetik kayıtlar yer hareketi tahmin denklemlerinin ± 1 standart sapma alanının içinde kalmışlardır. Bu gözlem, Bursa model parametrelerinin gözlemsel verilerle oluşturulan denklemlerle de uyumlu olduğunu göstermekte ve model parametrelerinin doğruluğunu bir kez daha sınamaktadır.



ekil 2 M.Kemalpa a depreminin sentetik kayıtları ile gözlenen kayıtlarının Frekans Genlik Spektrumlarının (FGS) ve ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması ve hata-frekans grafikleri.

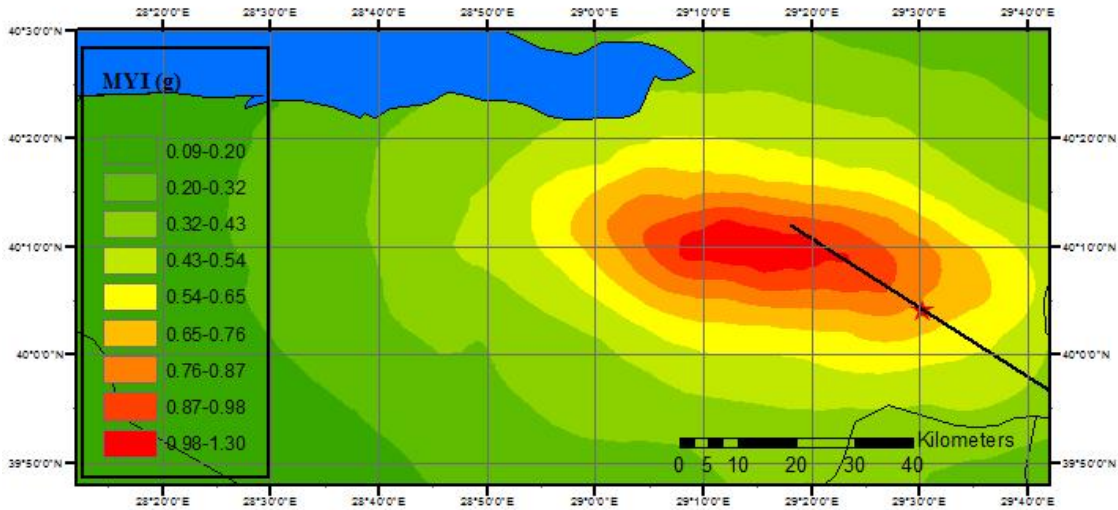


ekil 3 Sentetik verilerin genel (BA08) ve yerel (AC10) azalım denklemleri ile $V_{s30}=370\text{m/s}$ için karşılaştırılması.

4. BURSA FAYI SENARYO DEPREM

Önceki kısımda bölgesel veriler kullanılarak ve geçmiş depremlerle test edilerek bir Bursa yer hareketi modeli oluşturulmuştur. Bu modelin kullanım alanlarından bir tanesi, herhangi bir senaryo depremde belirli bir noktaya etki edecek yer hareketinin tahminidir. Öztürk (2008), çalışmada Bursa'daki deprem tehlikesine en büyük katkıyı Bursa Fayı'nın yaptığı gözlemiştir. Bu nedenle, bu çalışmada da Bursa Fayı'nın karakteristik moment büyüklüğünde ($M_W = 7.2$) kırılması senaryosu incelenmiştir. Bursa Fayı, Ulubat Gölü'nden Bursa'ya 45 km uzanan doğu-batı doğrultusunda normal bileşenli sağ yanal atımlı bir faydır (Topal ve ark., 2003). Senaryo simülasyonunda fayın kırılmaya tam ortasından başladığı varsayılmıştır.

Senaryo depreminin sonuçlarını gözlemleyebilmek için Bursa merkezi (40.24° K, 29.08° D) çevresinde 625 düğüm noktasında sentetik ölçüm yapılmıştır. Bölgede her düğüm noktasına ait zemin koşullarını belirleyecek çok detaylı dalga hız modelleri mevcut olmadığından, bu düğüm noktaları saha etkileri açısından dört bölgeye ayrılmıştır. Bursa'nın güneyi 1613 istasyonu, batısı 1614 istasyonu, doğusu 1605 istasyonu ve kuzeydoğusu 1608 istasyonu bilgilerine göre modellenmiştir. Deprem sonucunda ortaya çıkan maksimum yer ivmeleri bu 625 noktada ölçülmüştür ve MYI da ılımı 4 te gösterilmiştir.



ekil 4 Bursa Fayı senaryosunda ortaya çıkan maksimum yer ivmelerinin(MYI) mekânsal dağılımı

Büyük yer ivmelerinin doğu-batı doğrultusunda gözlenmesi fayın ortadan kırılmaya başlaması ve Bursa'nın doğusundaki saha koşulları ile açıklanabilir. Bu senaryoda gözlenen en yüksek maksimum yer ivmesi 1.26 g olmuştur. Gelecekte çalışılacak bölgede yerel zemin koşulları daha detaylı olarak mevcut olduğunda analizler daha detaylı sonuçlar elde etmek için tekrarlanabilecektir.

5. SONUÇ

Simülasyonlar, deprem ile ilgili çalışmalarda özellikle deprem kaydı olmayan ya da yetersiz olan bölgelerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Stokastik yer hareketi simülasyon sonuçları, yer hareketi gereken birçok uygulamada, örneğin depreme dayanıklı bina tasarımları, eski binaların güçlendirilmesi ve acil durum planlarındaki bina hasar oranlarının hesaplanmasında kullanılabilmektedirler.

Simülasyonda kullanılan kaynak modelinin gerçek kaynaklardan daha basit olması ve sahalar için yeterli bilgi olmamasından dolayı bazı istasyonlarda sentetik ve gerçek veriler arasında bazı uyumsuzluklar gözlenmiştir. Ancak, model özellikle ilgilenilen frekans aralığında gözlemlenen kayıtlara yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca, sentetik kayıtlar mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılan bir yerel (AC10) bir de genel (BA08) yer hareketi tahmin denklemi ile karşılaştırılmış ve ± 1 standart sapma alanının içinde kalmıştır. Bu sonuçlara dayanarak Bursa modelinin Bursa bölgesinde olası bir depremin simülasyonunda pratik bir şekilde kullanılabilmesine karar verilmiştir. Bursa Fayı'nın karakteristik büyüklüğünde ($M_W = 7.2$) kırıldığı varsayılan senaryoda Bursa'nın özellikle merkezi ve doğusunda 1g'den fazla yer ivmeleri gözlenmiştir. Bu sonuçlar, Bursa'da bulunan yoğun sanayi ve nüfus dağılımı açısından değerlendirilmeli; uzun vadede bölgede olası depremler için detaylı senaryo kayıp modelleri ve zarar azaltma çalışmaları planlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aki, K. (1967). Scaling law of seismic spectrum. *Journal of Geophysical Research* **72:4**, 1217-1231.
- Akinci, A., & Antonioli, A. (2013). Observations and stochastic modelling of strong ground motions for the 2011 October 23 Mw 7.1 Van, Turkey, earthquake. *Geophysical Journal International* **192**, 1217-1239.
- Akkar, S., & Çalkan, Z. (2010). A local ground-motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground-motion models. *Bulletin of the Seismological Society of America* **100:6**, 2978-2995.
- Anderson, J. G., & Hough, S. E. (1984). A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America* **74:5**, 1969-1993.
- Ansal, A., Akinci, A., Cultrera, G., Erdik, M., Pessina, V., Tönük, G., & Ameri, G. (2009). Loss estimation in Istanbul based on deterministic earthquake scenarios of the Marmara Sea region (Turkey). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **29:4**, 699-709.
- Askan, A., Sisman, F. N., & Uğurhan, 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 Dynamics and Earthquake Engineering* **55**, 170-181.
- Atkinson, G. M., Assatourians, K., Boore, D. M., Campbell, K., & Motazedian, D. (2009). A guide to differences between stochastic point-source and stochastic finite-fault simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America* **99:6**, 3192-3201.
- Beresnev, I. A., & Atkinson, G. M. (1997). Modeling finite-fault radiation from the \ln spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America* **87:1**, 67-84.
- Beresnev, I. A., & Atkinson, G. M. (1998). FINSIM--a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. *Seismological Research Letters* **69:1**, 27-32.
- Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America* **73:6**, 1865-1894.
- Boore, D. M., & Joyner, W. B. (1997). Site amplifications for generic rock sites. *Bulletin of the Seismological Society of America* **87:2**, 327-341.

- 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* **24:1**, 99-138.
- Castro, R. R., Rovelli, a., Cocco, M., Di Bono, M., & Pacor, F. (2001). Stochastic simulation of strong motion records from the 26 September 1997 (Mw6), Umbria-Marche (Central Italy) earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* **91:1**, 27–39.
- Gok, E., & Polat, O. (2012). An assessment of the seismicity of the Bursa region from a temporary seismic network. *Pure and Applied Geophysics* **169:4**, 659-675.
- Herrmann, R. B. (1985). An extension of random vibration theory estimates of strong ground motion to large distances. *Bulletin of the Seismological Society of America* **75:5**, 1447-1453.
- Motazedian, D., & Atkinson, G. M. (2005). Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America* **95:3**, 995-1010.
- Motazedian, D., & Moinfar, A. (2006). Hybrid stochastic finite fault modeling of 2003, M6.5, Bam earthquake (Iran). *Journal of Seismology* **10:1**, 91–103.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute* **30:1**, 25–33.
- Öztürk, N. Y. (2008). Probabilistic Seismic Hazard Analysis: A Sensitivity Study with Respect to Different Models. Doktora Tezi, n aat Müh. Bölümü, Orta Do u Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Rodolfo Saragoni, G., & Hart, G. C. (1973). Simulation of artificial earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **2:3**, 249-267.
- Roumelioti, Z., Kiratzi, A., & Theodulidis, N. (2004). Stochastic strong ground-motion simulation of the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* **94:3**, 1036–1052.
- Topal, T., Doyuran, V., Karahano lu, N., Toprak, V., Süzen, M. L., & Ye ilnacar, E. (2003). Microzonation for earthquake hazards: Yeni ehir settlement, Bursa, Turkey. *Engineering Geology* **70:1**, 93-108.
- Ugurhan, B., & Askan, A. (2010). Stochastic strong ground motion simulation of the 12 November 1999 Düzce (Turkey) earthquake using a dynamic corner frequency approach. *Bulletin of the Seismological Society of America* **100:4**, 1498-1512.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* **84:4**, 974-1002.
- Yalcinkaya, E. (2005). Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the June 27, 1998 Adana-Ceyhan earthquake. *Earth, Planets and Space* **57:2**, 107-115.
- Yaltrak, C. (2002). Tectonic evolution of the Marmara Sea and its surroundings. *Marine Geology* **190:1**, 493-529.

Zengin, E., & Cakti, E. (2014). Ground motion simulations for the 23 October 2011 Van, Eastern Turkey earthquake using stochastic finite fault approach. *Bulletin of Earthquake Engineering* **12:2**, 627-646.