

İSTANBUL İÇİN 3 BOYUTLU HIZ MODELİ İLE YER HAREKETİ SİMÜLASYONU

Gülüm TANIRCAN

Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Üsküdar, İstanbul.

birgore@boun.edu.tr

(Geliş/Received: 20.09.2010; Kabul/Accepted: 16.11.2011)

ÖZET

Bu çalışmada Marmara Denizi'nde, Prens Adaları'nın güneybatısından geçen Kuzey Anadolu Fayı Kuzey Sınır Kolu (KAFKSK)'nin Mw7,2 büyüklüğündeki bir senaryo deprem ile kırılması sonucu İstanbul'da 82 ivme istasyonunda oluşacak kuvvetli yer hareketleri simüle edilmiştir. Bunun için Doğu Marmara Bölgesi'nin üç boyutlu nümerik hız modeli, sonlu farklar simülasyon tekniğine entegre edilerek hız modelinin İstanbul bölgesi için gerçekçiliği deprem kayıtları ile araştırılmış, eldeki yüzeysel hız yapısı bilgileri ile modifiye edilmiş ve düşük frekanslı yer hareketleri hesaplanmıştır. Yüksek frekanslı yer hareketi ise stokastik teknikler ile elde edilmiştir. Senaryo deprem yer hareketi simülasyonu melez Green's fonksiyonları ile gerçekleştirilmiştir. Yüzeyle yakın zemin katmanlarından ileri gelen lineer zemin büyütmelemlerini hesaba katmak için her istasyonda H/V yöntemi ile hesaplanan spektrumlar kullanılmıştır. Simülasyonlar melez Green's fonksiyonları kullanılarak üç farklı asperite modeli ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre yırtılma iki taraflı gerçekleştiğinde (Senaryo 1) İstanbul Avrupa yakasındaki en büyük ivme değerleri 5 m/s^2 civarında kalmakta iken Asya yakasından bu değer 8 m/s^2 'e ulaşmaktadır. Yırtılma kuzeybatıya doğru tek taraflı (Senaryo 2) gerçekleştiğinde Avrupa yakasındaki en büyük ivme değerleri yönlenme etkileri dolayısıyla 7 m/s^2 , hız değerleri ise $1,6 \text{ m/s}$ 'ye kadar yükselmektedir. Senaryo 3 kırılmasının ise kaynak ve yerel zemin etkileri ile daha çok Asya yakasında lokal ivme yükselmeleri meydana getirdiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İstanbul deprem senaryoları, 3 boyutlu hız modeli, sonlu farklar, yer hareketi modellemesi

GROUND MOTION SIMULATION FOR ISTANBUL WITH A THREE DIMENSIONAL VELOCITY MODEL

ABSTRACT

In this study strong ground motions in Istanbul due to a Mw7,2 scenario earthquake on Northern Boundary of North Anatolian Fault were simulated. A rupture is anticipated to pass through southwest of the Prince Islands in the Marmara Sea. A three dimensional velocity structure was integrated into a finite difference simulation technique. In order to validate the proposed velocity structure for Istanbul area, synthetic and recorded ground motion recordings were compared. The structure was modified by available shallow velocity profiles, hence low frequency ground motions were calculated. High frequency ground motions were obtained by stochastic techniques. Ground motion simulations for the scenario earthquake were performed by hybrid Green's functions using three different asperity models. For bilateral rupture propagation (Scenario 1) peak accelerations on the European side were found to be within 5 m/s^2 , whereas on the Asian side they reached up to 8 m/s^2 . Due to forward directivity effects, unilateral rupture propagation towards northwest (Scenario 2) increased the peak accelerations and velocities on the European side up to 7 m/s^2 and $1,6 \text{ m/s}$, respectively. It was also found that unilateral rupture propagation toward southeast (Scenario 3) causes only localised high accelerations due to the combination of source and local site effects.

Keywords: Istanbul earthquake scenarios, 3 dimensional velocity model, finite difference, ground motion modelling

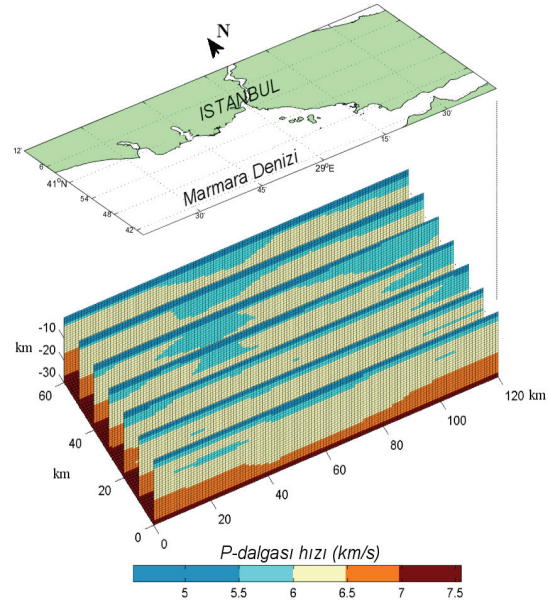
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de Kuzey Anadolu Fayı (KAF) depremlerinin 1939 Erzincan Depremi’nden itibaren doğudan batıya doğru göçü 1999’daki Kocaeli ve Düzce Depremleri ile devam etmiştir. Bu depremlerden sonra yapılan istatistikî çalışmalar KAF’ın Marmara Denizi içinden geçen kuzey kolunun 30 sene içindeki kırılma ihtimalini % 65 olarak göstermektedir [1]. İstanbul’u tehdit eden deprem riski, bölgede beklenebilecek deprem hareketinin deterministik olarak belirlenmesini, hasar dağılımının belirlenip, buna dayalı olarak deprem acil müdahale planlarının hazırlanmasını zorunlu kılmıştır. Bu amaçla geçmişte deprem hareketlerinin deterministik olarak belirlenmesine yönelik çeşitli modeller yapılmıştır. Ampirik-Stokastik Green’s Fonksiyonları ve tek boyutlu zemin hız modeli kullanılarak yapılan teorik simülasyonlar 1999 sonrasında KAF’da meydana gelen depremlerin kaynak modellerini belirlemek ve senaryo deprem etkilerini incelemek amacıyla kullanılmıştır [2-6]. Teorik ve stokastik modellerin beraber kullanılarak geniş frekans bantlı simülasyonların yapılmasına olanak sağlayan melez modellemenin [7] Türkiye’de ilk sayılabilecek örneği İzmit Körfezi için, yakın sahada esas alınması gereken tasarım spektrumların tespiti amacıyla yapılmıştır [8]. Daha sonra, Pulido ve ark. [9] tarafından Marmara Denizi içinde meydana gelebilecek 3 farklı kırılma şekli için melez modelleme gerçekleştirilmiştir. Sorensen ve ark. [10] deprem kaynak parametrelerinin deprem senaryolarına olan etkisini araştırmış ve vaka analizi olarak Marmara Fayı deprem senaryolarını kullanmıştır. Ansal ve ark. [11] da Marmara Fayı senaryolarını kullanarak İstanbul deprem kayıp profilini çıkarmışlardır. Bahsi geçen bu simülasyonlar tek boyutlu basit bir zemin hız yapısı ile gerçekleştirildiğinden özellikle düşük frekanslarda görülmesi muhtemel yayınım etkilerini yansıtamamaktadır.

Bu çalışmanın birincil amacı Doğu Marmara Bölgesi’nin üç boyutlu hız modelinin İstanbul bölgesi için gerçekliğini deprem kayıtları ile sınamak ve eldeki yüzeysel hız yapısı bilgileri ile modifiye etmektir. Nihai amaç ise bu hız modeli ile Marmara Denizi kaynaklı bir depremde İstanbul’daki bina hasarlarının gerçekçi olarak tahminine esas olacak kuvvetli yer hareketinin geniş frekans bandında melez simülasyonunu gerçekleştirmektir. Elde edilen deprem hareketleri takviyeye ihtiyaç gerektiren yapıların deprem performanslarının iyileştirilmesinde ve proje aşamasındaki yapıların tasarıma esas deprem yer hareketi olarak kullanılabilmesinden meydana gelecek hasarların azaltılması açısından önem arz etmektedir.

2. DÜŞÜK FREKANSLI YER HAREKETİ (LOW FREQUENCY GROUND MOTION)

Düşük frekanslı yer hareketi simülasyonu için Pitarka [12] tarafından hazırlanan üç boyutlu sonlu farklar yöntemi (3D-FDM) kullanılmıştır. Bu yöntem farklı boyuttaki hücrelerin kullanılmasına imkan sağladığı için yer hareketini büyük ölçüde değiştiren yüzeye yakın düşük hızlı zemin tabakalarının etkilerini de detaylı olarak sonuca yansıtılabilmektedir. İstanbul’u ve ana fayları kapsayacak şekilde Doğu Marmara Bölgesi’nin nümerik hız modeli Gök ve ark. [13]’dan alınmış ve 3D-FDM’e entegre edilmiştir. Model yatay düzlemde her 10 km’de ve her 3-5 km derinlikte P dalgası hız değerini göstermektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Hız modelinin kapsadığı alan. 3 boyutlu P dalgası hız modeli x-z axisinde 10 km lik dilimler halinde gösterilmiştir. (Area covered by the velocity model. 3 dimensional P-wave velocity model was shown with 10km slices in x-z axes).

Modelin doğruluğu 29/10/2004’deki Prens Adaları depreminin (Mw4,2) simülasyonu (Tablo 1) ile araştırılmıştır. Bu deprem İstanbul Acil Müdahale Sistemi (IAM) altında çalışan 82 kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilmiş olup, simülasyon sonuçlarının güvenilirliğine bu kayıtlar ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda karar verilmiştir.

Tablo 1. Mw4.2 Prens Adaları depremi kaynak parametreleri. (Source parameters of Prince Islands Earthquake)

Tarih /saat (GMT)	29/09/2004 15:42:07
Merkezüssü	40,81K /29,02D
Odak mekanizması(°)	159/12/-20
Derinlik (km)	14
Mo (dynecm)	1,73E22

Yapılan ilk simülasyonlarda sediman tabakalar üzerinde kaydedilmiş uzun süreli ve yüksek genlikli

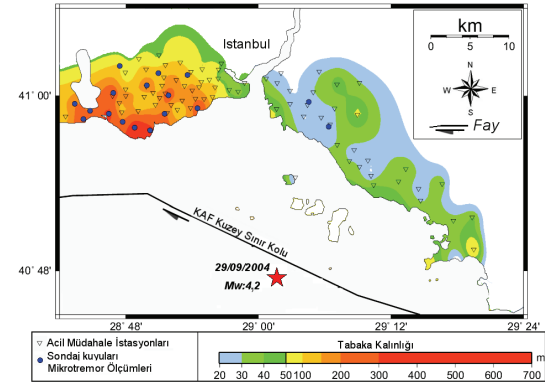
hareketler üretilememiştir. Hız modelinin ilk 5 km derinlikteki hız yapısının çözünürlüğü arttırmak için, elde edilen veriler ile Marmara Denizi batimetrisi ve Çınarcık Bölgesi ile Marmara Denizi için yapılmış iki boyutlu sismik tomografi çalışmaları [14] esas alınarak ve tabakaların batimetre geometrisini takip ettiği varsayılarak daha düşük bir P-dalgası hız yapısı eklenmiştir. Yüze yakın zemin katmanlarında S dalgası hızlarına ait bilgilerin modele eklenmesi için İstanbul temel kayası (760 m/s) derinliği geometrisi esas alınmıştır [15] (Şekil 2). İstanbul’da yapılan derin sondaj bilgileri [16] ile mikrotremor ölçüm sonuçları [17-19] ışığında 3 sediman tabakası da modele eklenmiştir. Ampirik bağıntılar [20] kullanılarak P dalgası hız modelinden S dalgası hızı ve yoğunluk bilgilerine ulaşılmıştır. Graves [21] takip edilerek her tabaka için frekans bağımsız azalım faktörü Q tanımlanmıştır. Bu bilgilerle İstanbul ve Doğu Marmara Denizi’ni içine alacak şekilde, 120x60x30 km’lik (Şekil 1) bir bölgenin 0,2x0,2x0,2 km lik grid aralıkları ile hız yapısı lineer interpolasyon yöntemi ile kurulmuştur (Tablo 2). Bu model ile yapılan simülasyon sonucundaki maksimum yer hızı (PGV) ve faz uyumunun ölçülmesi için Pitarka ve ark. [22]’de belirtilen, Denklem 1-2 ile ifade edilen “uygunluk fonksiyonları” kullanılmıştır.

$$f_1 = \exp \left[- \left(\frac{PGV_{syn} - PGV_{obs}}{\min(PGV_{syn}, PGV_{obs})} \right)^2 \right] \quad (1)$$

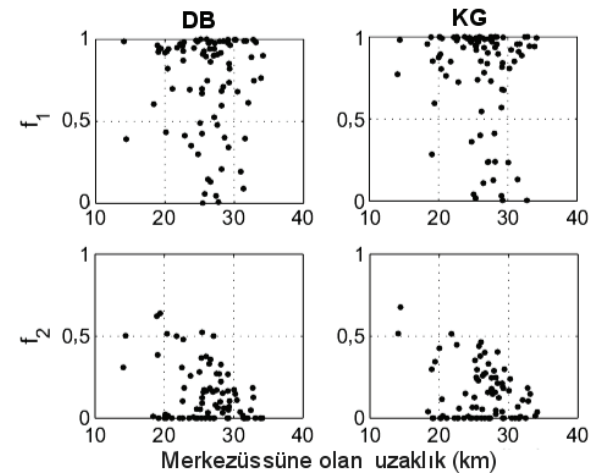
$$f_2 = 2 \frac{\int Obs(t)Syn(t)dt}{\int Obs(t)^2 dt + \int Syn(t)^2 dt} \quad (2)$$

Burada $Obs(t)$ ve $Syn(t)$ kaydedilmiş ve üretilmiş yer hareketi, PGV_{obs} ve PGV_{syn} kaydedilmiş ve üretilmiş yer hareketinin maksimum değeridir. Bu denklemde kaydedilmiş ve üretilmiş yer hareketi maksimum değerleri aynı ise f_1 1 değerini ve fazları

birbirini mükemmel takip ediyorsa f_2 1 değerini alır. Burada f_1 ve f_2 değerleri 82 istasyonda P dalgası gelişinden itibaren 12 saniyelik kayıt için hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 3’de sunulmuştur.



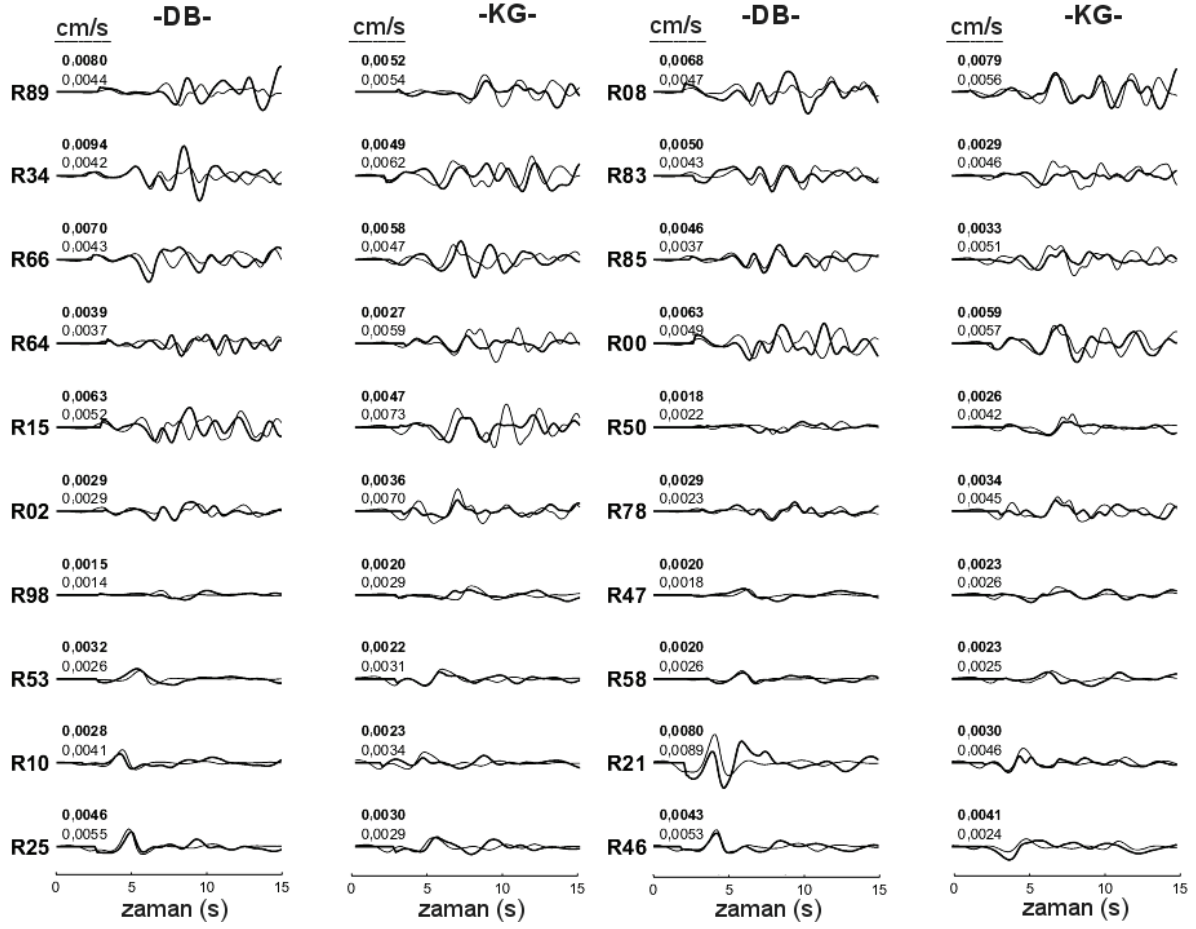
Şekil 2. İstanbul taban kayası derinlik dağılımı [15]. Yıldız, simüle edilen depremin yerini göstermektedir. (Distribution of cover thickness for İstanbul [15]. Star shows the simulated earthquake)



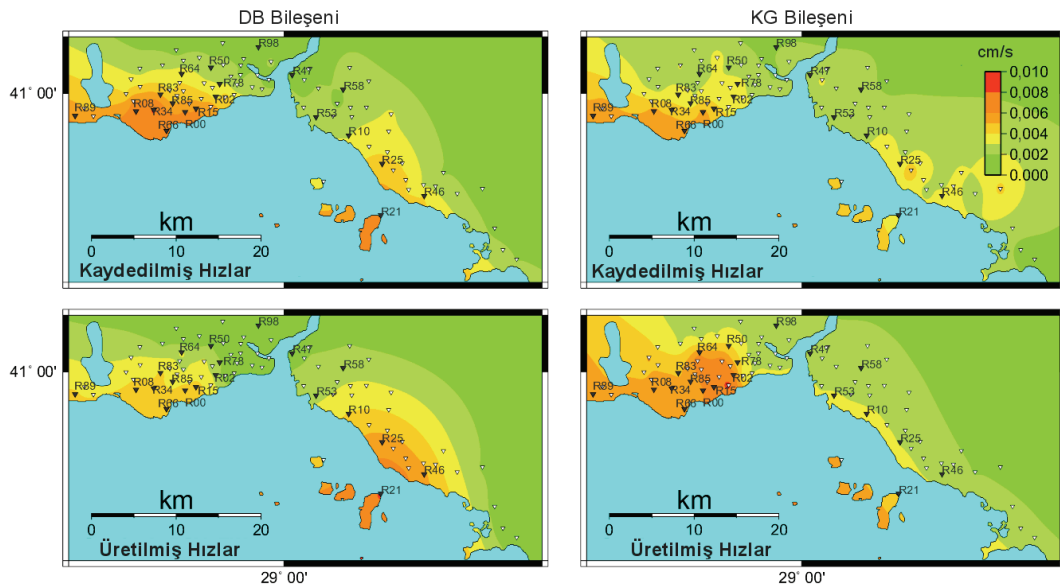
Şekil 3. 82 istasyon için uygunluk fonksiyonları. (Goodness of fit factors at 82 stations)

Tablo 2. Bölgenin hız modeli (a) Karabulut ve ark. [14] (b) Gök ve ark. [13] kullanılarak oluşturulan tabaka modeli (c) sediman tabakalar (Velocity model of the region (a) Layers after Karabulut et al [14] (b) after Gök et al [13] (c) sedimentary layers)

(a)	Tabaka No	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Yoğunluk (g/cm ³)	Q
Derinlik: 0-6 km	1	4,5	2,6	2,34	300
	2	5,0	2,9	2,4	500
	3	5,3	3,1	2,5	500
	4	5,7	3,2	2,6	500
(b)					
Derinlik >6 km	5	6,25	3,6	2,7	1000
	6	6,75	3,9	2,8	1000
	7	7,25	4,1	3,0	1000
(c)					
Sediman tabakalar Derinlik < 0.6 km	1	1,9	0,6	1,9	50
	2	2,3	0,85	2,0	100
	3	2,4	1,1	2,15	200



Şekil 4. 20 kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilmiş (kalın çizgi) ve üretilmiş (ince çizgi) hız dalgaformlarının karşılaştırılması. Dalgaformları 0,1-0,8 Hz frekans aralığında filtre edilmiştir.(Comparison of recorded (thick line) and synthetic (thin line) velocity waveforms at 20 selected strong motion stations. Waveforms are filtered between 0,1-0,8 Hz.)



Şekil 5. 29.09.2004 Mw:4,2 depreminin kaydedilmiş ve üretilmiş PGV değerlerinin dağılımı. Üçgenler 82 istasyonun yerlerini göstermektedir. (PGV distribution of recorded and simulated motions to of 29.09.2004 Mw:4,2 event at 82 stations. Triangles show station locations.)

Her iki yatay bileşendeki yüksek f_1 değeri kurulan hız modelinin gerçekle uyumlu maksimum yer hızı ürettiğini göstermektedir. 0 ile 0,6 arasında değişen f_2 değerleri ise pek çok istasyonda üretilmiş ve kaydedilmiş sinyallerin fazlarının çok uyumlu olmadığına işaret etmektedir. Bu da iki boyutlu olarak eklenen yüzeyel hız yapılarının geometrilerinin yeterli olmadığını göstermektedir.

20 kayıt istasyonundaki kaydedilmiş ve üretilmiş dalga formu karşılaştırmaları Şekil 4’de sunulmuştur. Yatay bileşenlere ait kaydedilmiş ve üretilmiş PGV değerlerinin uyumu Şekil 5’de karşılaştırılabilir.

Model genelde S dalgasının ana faz karakterlerini yakalayabilmiştir. Sığ tabakalar kullanılmaksızın yapılan öncü simülasyonlarda Avrupa yakasında sediman tabaka üzerinde kaydedilmiş yüksek genlikli hareketler üretilemezken, modele eklenen sediman yapı (R00, R08, R83, R34, R64 gibi) kompleks ve uzun süreli dalga hareketini oluşturmakta etkili olmakla beraber yüzey dalgalarını tekrar üretmekte başarılı olamamıştır (R89, R08 gibi).

Asya yakasında yer alan istasyonlara bakıldığında yer hareketi basit, kısa süreli ve büyük genlikli bir sinyal olup, kullanılan hız modeli bu sinyalleri üretmekte başarılı olmuştur.

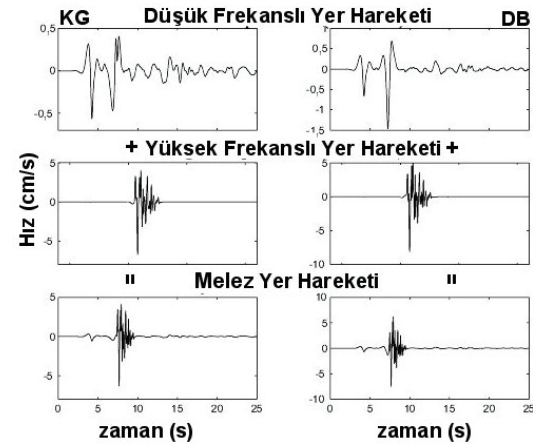
3. YÜKSEK FREKANSLI YER HAREKETİ (HIGH FREQUENCY GROUND MOTION)

Yüksek frekanslı yer hareketi simülasyonu için kullanılan stokastik teknikte [23] filtrelenmiş ve pencerlenmiş Gaussian gürültüsü, frekans tanım aralığında w^2 kaynak modelini takip edecek ve seçilen merkez frekans, sismik moment ve stres düşümü değerlerini veren bir spektrum üretecek şekilde filtrelenmiştir. Depremın yüksek frekanslı kaydını oluşturmak için Tablo 3’de belirtilen kaynak parametreleri kullanılmıştır. Marmara Bölgesi için hesaplanan frekans bağımlı azalım değeri Gürbüz ve ark.[24]’dan alınmıştır. Kayıtlar 0,8-10 Hz arasında filtrelenmiştir.

Bu kayıtları yatay bileşenlerine ayırmak için gerekli olan dağılım deseni katsayıları Pitarka ve ark. [25] tarafından önerilen yöntem ile hesaplanmış yüzeye yakın zemin katmanlarından ileri gelen her istasyondaki lineer zemin büyütme için Özel ve ark [26]’nın H/V yöntemi esas olarak yaptıkları çalışma sonuçları kullanılmıştır.

4. SENARYO DEPREM SİMÜLASYONU VE SONUÇLAR (SCENARIO EARTHQUAKE SIMULATION AND RESULTS)

Kullanılan 3 boyutlu hız modelinin uygunluk fonksiyonlarına göre kabul edilebilir dalgaformları ürettiği tespit edildikten sonra aynı model ile KAFKSK’nın üzerinde Mw5,2 büyüklüğündeki sentetik bir depremin İstanbul’daki 82 istasyonda oluşturacağı 0,1-0,8 Hz frekans aralığındaki kayıtları 3D-FDM yöntemi ile üretilmiştir. Teorik simülasyondan elde edilen 0,1-0,8 Hz frekans aralığındaki Green’s Fonksiyonu ile stokastik simülasyondan elde edilen 0,8-10 Hz frekans aralığındaki Green’s Fonksiyonu birleştirilerek geniş bantlı melez Green’s Fonksiyonu her istasyonda yatay bileşenler için bulunmuştur (Şekil 6).



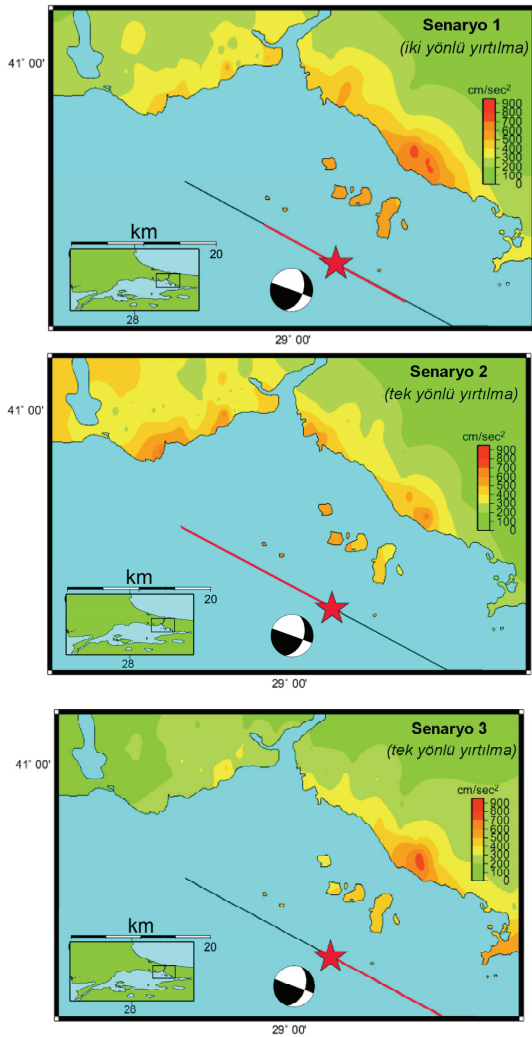
Şekil 6. Melez Green’s Fonksiyonlarının üretilmesi
(Calculation of Hybrid Green’s Functions)

Marmara Bölgesi’nin sismotektonik yapısı ve deprem tehlike analiz sonuçları incelendiğinde Marmara Denizi içinde bulunan KAFKSK ve Ana Marmara Fayı kırılma ihtimali yüksek olan faylar olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada “Kuzey Sınır Fayı’nın orta noktasından Mw7,2 büyüklüğündeki deprem ile kırılacağı” senaryosu üzerine çalışılmış, kullanılan tek asperitenin konumu değiştirilerek odak noktası her senaryo deprem için sabit tutulacak şekilde üç farklı kırılma modeli için hesaplama yapılmıştır. Asperite alanı deprem ölçeklemesi kurallarına uyacak şekilde kareleştirilerek küçük fay yüzeyleri elde edilmiş ve her bir fay yüzeyinin noktasal kırılması Mw5,2 büyüklüğündeki deprem için üretilmiş Green’s fonksiyonları ile ifade edilmiştir. Buna göre kırılma sırasıyla asperitenin güney-orta noktası (Senaryo 1), güneydoğu (Senaryo 2) ve güneybatı (Senaryo 3) köşelerinden

Tablo 3. Green’s Fonksiyonu olarak seçilen depremin kaynak parametreleri. (Source parameters of the earthquake which is chosen as the Green’s Function)

Büyükölük (Mw)	Sismik Moment (dyne-cm)	Köşe Frekans (Hz)	Derinlik (km)	Stres Düşümü (bar)	Odak Mekanizması (°)	Kırılma Alanı (kmxkm)
5,2	5E23	1	14	80	110/90/-135	5,85

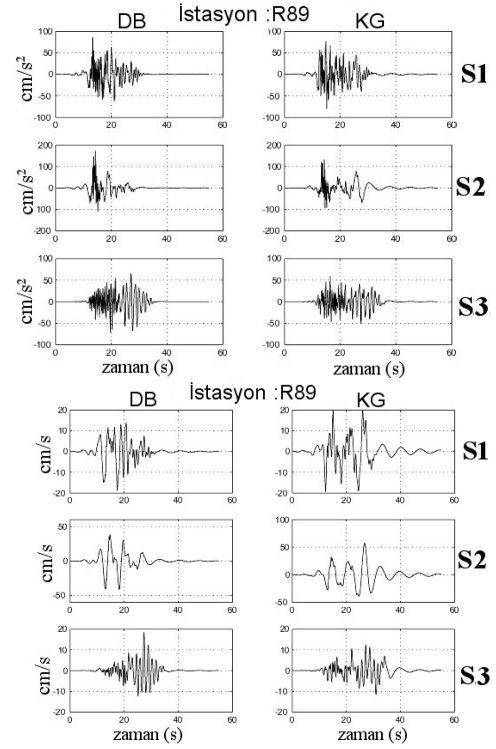
başlamaktadır (Şekil 7). Yırtılma alanı ve asperite alanı Somerville ve ark.[27]'de verilen sismik momente bağlı ilişkiler esas alınarak hesaplanmıştır (Tablo 4). Her bir küçük fay yüzeyindeki Green's fonksiyonlarının, 3,5 m/s lik S-dalgası ve 2,8 km/s kırılma hızı ile yaydığı kabulü ve mesafeden kaynaklanan zaman gecikmelerinin kombine edilmesi ile istasyonlarda dalga formları elde edilmiştir [28]. Üç simülasyon için de elde edilen zemin bağımlı en büyük iveme (PGA) değerleri ve bunların kaynağa uzaklıkla olan değişimleri Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre, sıg zemin etkileri ile İstanbul şehir merkezinde hissedilecek PGA değerleri 1,5 m/s²-8,8 m/s² arasında değişmekte, PGV değerleri ise 1,60 m/s'ye kadar ulaşabilmektedir.



Şekil 7. Üç senaryo için elde edilen zemin bağımlı PGA değerlerinin dağılımı. Yıldız, senaryo depremin merkezüssünü, kalın kırmızı çizgi her senaryoda kullanılan asperite yerini göstermektedir. (Distribution of site dependent PGA obtained from three scenarios. Red star and dark red line show the epicenter of the scenario earthquake and asperity location for each scenario, respectively.)

Tablo 4. Senaryo deprem kaynak parametreleri. (Scenario earthquake source parameters)

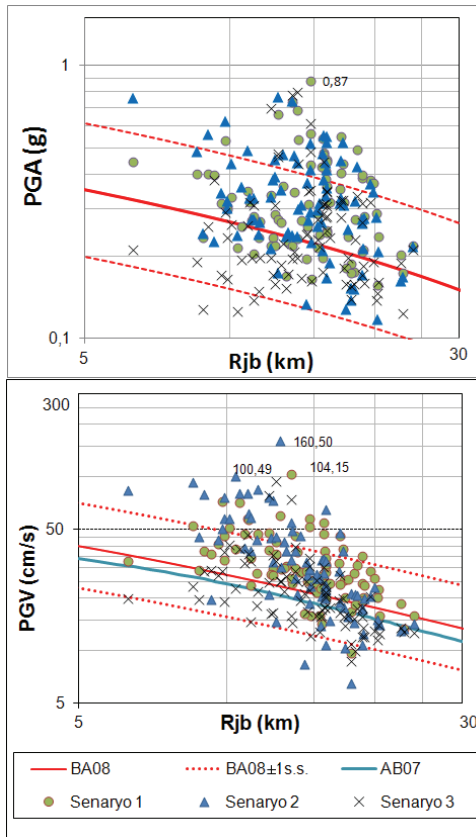
Büyükölçü(Mw)	7,2
Merkezüssü	40,81 K/29,02D
Sismik moment (dyne-cm)	5E26
Derinlik (km)	14
Odak Mekanizması(°)	110/90/-135
Yırtılma Alanı (kmxkm)	1200
Asperite Alanı (kmxkm)	16,8 x14,4
Asperite sayısı	1
Karelaj sayısı	40
Asperite yeri	Şekil 7



Şekil 8. R89 istasyonundaki ivme (üst) ve hız (alt) kayıtları. (Acceleration (up) and velocity(down) waveforms at R89 station)

Yırtılma iki taraflı gerçekleştiğinde (Senaryo 1) Avrupa yakasındaki PGA değerleri 5 m/s² civarında kalmakta iken Asya yakasından bu değer 8 m/s²'e ulaşmaktadır. Yırtılma kuzey batıya doğru tek taraflı (Senaryo 2) gerçekleştiğinde Avrupa yakasındaki PGA değerleri yönlenme etkileri dolayısıyla 7 m/s²'ye kadar yükselmekte buna karşın Asya yakasında, Senaryo 1 ile kıyaslandığında, belirgin bir azalma sözü konusu olmaktadır. Senaryo 3 kırılmasının ise kaynak ve yerel zemin etkileri ile daha çok Asya yakasında lokal ivme yükselmeleri meydana getirdiği

görülmektedir. Dalgaların yönlenme doğrultusunda olan R89 istasyonundaki sentetik kayıtlarda (Şekil 8) Senaryo 1 ve 2'den kaynaklanan ileri yönlenme etkileri ile oluşan yüksek periyotlu ve genlikli dalgaformları net olarak görülmektedir. Her üç senaryo için 82 istasyonda elde edilen PGA ve PGV değerlerinin mesafe ile dağılımını azalım ilişkileri [29,30] ile karşılaştırıldığında (Şekil 9) tüm değerlerin genel olarak ± 1 standart sapma içinde kalmakta olduğu ancak ileri yönlenme etkileri sebebiyle Senaryo 2'de üretilen hız değerlerin bir bölümünün $+1$ standart sapma üzerinde yer aldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 9. PGA ve PGV değerlerinin mesafe (R_{jb}) ile dağılımının yer hareketi azalım ilişkileri ile karşılaştırılması. BA08: Boore ve Atkinson, 2008 [29], AB07:Akkar ve Bommer, 2007[30]. (Comparison of PGA and PGV versus distance (R_{jb}) distribution with recent ground motion attenuation relationships. BA08: Boore and Atkinson, 2008 [29], AB07:Akkar and Bommer, 2007[30].)

5. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Üç boyutlu hız modelleri her ne kadar basen yapılarının oluşturduğu uzun periyotlu dalgaformlarını gerçekçi bir şekilde yansıtmada etkin olsa da, bu çalışmada üretilen dalgaformlarında bölge içinde kalan Çınarcık Çukurluğu'na ait baskın bir etki görülmemektedir.

Sığ zemin etkilerinin, üç boyutlu hız yapısının etkilerine göre dalgaformları üzerinde daha etkili olduğu gözlenmektedir. Modele eklenen sığ zemin tabakaları gerçekçi maksimum hız değerleri vermiş olsa da, model geometrisi kabullere dayalı olarak oluşturulduğu için faz uyumlarının kalitesi ve dolayısıyla hız modeli tartışmaya açıktır.

Şüphesiz zemin etkilerinin hesaba katılmasında H/V yöntemi ile bulunan spektrumların kullanılması, yöntemin spektum genliğinde her zaman doğru sonuçlar vermemesi sebebiyle tercih edilen bir yöntem değildir. IAM sistemi altında çalışan kayıtçıların yerel zemin koşullarının bilinmemesi nedeniyle bu yöntem benimsenmiştir. İleride düşünülen projeler kapsamında özellikle Avrupa yakasında var olan sondaj kuyusu bilgileri ve miktotremor analizleri ile elde edilmiş hız yapıları bilinen bölgelerde zemin tepkisi analizleri gerçekleştirilerek ve bu istasyonların senaryo deprem ivme kayıtlarında kullanılacaktır.

Buradaki çalışma bölgeyi etkileyebilecek en büyük depremlerden biri düşünülerek yapılmıştır. Bundan sonraki araştırmalar Marmara Denizi içinde olabilecek tüm deprem senaryolarını kapsayacak şekilde sistematik simülasyon teknikleri kullanarak yer hareketi dağılımı değişimlerini hesaplamak olacaktır.

6. SEMBOLLER (SYMBOLS)

- KAFKSK : Kuzey Anadolu Fayı Kuzey Sınır Kolu
 KAF : Kuzey Anadolu Fayı
 3D FDM : 3 Boyutlu sonlu farklar yöntemi
 PGA : En büyük yer ivmesi
 PGV : En büyük yer hızı
 $Obs(t)$: Kaydedilmiş yer hareketi
 $Syn(t)$: Üretilmiş yer hareketi
 PGV_{obs} : Kaydedilmiş yer hareketinin en büyük değeri
 PGV_{syn} : Üretilmiş yer hareketinin en büyük değeri
 f_1 ve f_2 : Uygunluk fonksiyonları

7. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmiştir. Proje No .05T101

8. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Parsons, T., Toda,S., Stein,R.S. ve Barka, A., "Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul: An Interaction-Based Probability Calculation" **Science**, Cilt 288, 661-665, 2000.
- Sekiguchi, H. ve Iwata, T., "Rupture Process of the 1999 Kocaeli, Turkey, Earthquake Estimated

- from Strong Motion Waveforms”, **Bull. Seism. Soc. Am.** Cilt 90, 300-311, 2002.
3. Bouchon, M., Toksöz, N., Karabulut, H., Bouin, M-P., Dietrich, M., Aktar, M. ve Edie, M., “Space and Time Evolution of Rupture and Faulting during the 1999 İzmit (Turkey) Earthquake” **Bull. Seism. Soc. Am.**, Cilt 92, No 1, 256-267, 2003.
 4. Birgören G., Sekiguchi H. ve Irikura, K., "Rupture Model of the 1999 Düzce, Turkey, Earthquake Deduced from High and Low Frequency Strong Motion Data" **Geophys. Res. Lett.**, Cilt 31, L05610, 2004.
 5. Birgören, G. ve Irikura, K., “Estimation of Site Response in Time Domain Using Meyer-Yamada Wavelet Analysis”, **Bull. Seism. Soc. Am.**, Cilt 95, No 4, 1447-1456, 2005.
 6. Durukal, E., “Critical Evaluation of Strong Motion in Kocaeli and Duzce (Turkey) earthquakes”. **Soil Dyn. Earthq. Eng.**, Cilt 22, No 7, 589-609, 2002.
 7. Heaton, T.H., “Overview of Seismological Methods for the Synthesis of Strong Ground Motion”. **Modeling Earthquake Ground Motion at Close Distances, Palo Alta, CA**, 15-1 - 15-17, 1995.
 8. Erdik M. ve Durukal, E. “A Hybrid Procedure for the Assessment of Design Basis Earthquake Ground Motions for near-fault Conditions”, **Soil Dyn. Earthq. Eng.** Cilt 21, No 5, 431-443, 2001.
 9. Pulido N., Ojeda, A., Kuvvet A. ve Kubo, T., “Strong Ground Motion Estimation in the Sea Region (Turkey) Based on a Scenario Earthquake”, **Tectonophysics**, Cilt 391, 357-374, 2004.
 10. Sørensen, M.P., Pulido, N. ve Atakan, K., “Sensitivity of Ground-Motion Simulations to Earthquake Source Parameters: A Case Study for Istanbul, Turkey”, **Bull. Seism. Soc. Am.**; Cilt 97, No. 3, 881-900, 2007.
 11. Ansal, A., Akıncı, A., Cultrera, G., Erdik, M., Pessina, V., Tönük, G. ve Ameri, G., “Loss Estimation in Istanbul based on Deterministic Earthquake Scenarios of the Marmara Sea Region, Turkey”, **Soil Dyn. Earthq. Eng.** Cilt 29, No 4, 699-709, 2009.
 12. Pitarka, A., “3D Elastic Finite-Difference Modeling of Seismic Motion Using Staggered Grids with Nonuniform Spacing.” **Bull. Seism. Soc. Am.**, Cilt 89, 54 – 68, 1999.
 13. Gök, R., Husen, S ve Hutchings, L., “3-D Local Earthquake Tomography Within The Marmara Sea Region”, **AGU Fall Meeting**, S11E-05, 2004.
 14. Karabulut, H., Özalaybey, S., Taymaz, T., Aktar, M., Selvi, O. ve Kocaoğlu, A. “A Tomographic Image of the Shallow Crustal Structure in the Eastern Marmara” **Geophys. Res. Lett.**, Cilt 30, No. 24, 2277 10.1029/2003GL018074, 2003.
 15. Birgören, G., Özel, O. ve Siyahi, B., “Bedrock Depth Mapping of the Coast of Istanbul: Comparison of Analytical and Experimental Analyses”, **Turkish Journal of Earth Sciences**, Cilt 18 No 2, 315-329, 2009.
 16. Japan International Cooperation Agency (JICA) ve Istanbul Metropolitan Municipality (IMM), “The Study on A Disaster Prevention / Mitigation Basic Plan in Istanbul including Seismic Microzonation”, Field Report, Volume 2 Appendix 1, 2002.
 17. Kudo, K., Kanno, T., Okada, H., Özel, O., Erdik, M., Sasatani, T., Higashi, S., Takahashi, M. ve Yoshida, K., “Site-Specific Issues for Strong Ground Motions during the Kocaeli, Turkey, Earthquake of 17 August 1999, as Inferred from Array Observations of Microtremors and Aftershocks”, **Bull. Seism. Soc. Am.** Cilt 92, No 1, 448-465, 2002.
 18. Özel O, Cranswick E, Meremonte M, Erdik M ve Şafak E., “Site effects in Avcılar, west of Istanbul, Turkey, from Strong- and Weak-Motion Data”. **Bull Seismol Soc Am** Cilt 92, No 1, 499–508, 2002.
 19. Özel O, Sasatani, T., Kudo, K., Okada, H., Kanno, T., Tsuno, S., Yoshikawa, M., Noguchi, S., Miyahara, M. ve Goto, H., “Estimation of S-Wave Velocity Structures in Avcılar-Istanbul from Array Microtremor Measurements”, **Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University**. Seri 7, Geophysics Cilt 12 No 2, 115-129, 2004.
 20. Brocher M.T., “Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth’s Crust”, **Bull. Seismol. Soc. Am.**, Cilt 95, No 6, 2081-2092, 2005.
 21. Graves, R.W., “Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media using Staggered-Grid Finite Differences”, **Bull. Seism. Soc. Am.** Cilt 86, 1091-1106, 1996.
 22. Pitarka A, Graves, R. ve Somerville, P., “Validation of a 3D Velocity Model of the Puget Sound Region Based on Modeling Ground Motion from the 28 February 2001 Nisqually Earthquake”, **Bull. Seism. Soc. Am.** Cilt 94, 1670-1689, 2004.
 23. Boore, D.M., “Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions based on Seismological Models of the Radiated Spectra”. **Bull. Seism. Soc. Am.**, Cilt 73, 1865-1894, 1983.
 24. Gürbüz C., Aktar M., Eyidoğan H., Cisternas, A., Haessler, H., Barka A., Ergin M., Türkelli, N., Polat O., Ucer S.B., Kuleli S., Baris S., Kaypak B., Bekler T., Zor, E., Biçmen, F. ve Yörük A., “The Seismotectonics of the Marmara region (Turkey): Results from a Microseismic Experiment”. **Tectonophysics**, Cilt 316, 1 – 17, 2000.
 25. Pitarka A., Somerville P., Fukushima Y., Uetake T., ve Irikura, K., “Simulation of Near-Fault Strong-Ground Motion Using Hybrid Green’s

- Functions” **Bull. Seism. Soc. Am.** Cilt 90, 566-586, 2000.
26. Özel O, “İstanbul Deprem Acil Müdahale ve Erken Uyarı Sisteminin Kalibrasyonu ve İstasyon Yerlerinin Depreme Karşı Yerel Tepkilerinin Belirlenmesi”, **B.U. Proje Sonuç Raporu** No: 05T102, 2006.
27. Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., ve Kowada, A., “Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion”, **Seism. Res. Lett.** Cilt 70, 59-80, 1999.
28. Kamae, K., Irikura, K. ve Pitarka, A., “A Technique for Simulating Strong Ground Motion using Hybrid Green’s Function”, **Bull. Seism. Soc. Am.**, Cilt 88, No 2, 357-367, 1998.
29. Boore D.M. ve Atkinson G.M. “Ground Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5% - damped PSA at Spectral Periods between 0.01s and 10.0s”. **Earthq. Spectra** Cilt 24:99 -38, 2008.
30. Akkar S, Bommer J.J, “Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East”. **Bull. Seism. Soc. Am.** Cilt 97-2:511–530. doi: 10.1785/0120060141, 2007.

