İZMİT HAVZASI İÇİN SPEKTRAL ELEMAN YÖNTEMİ İLE DALGA YAYILIMI MODELLEMESİ: İLKSEL SONUÇLAR

K.F. Elcömert[1] ve A. Kocaoğlu[1]

[1] *Jeofizik Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*
Email: firtana@itu.edu.tr

ÖZET:

Genellikle, çökel havzalar depremler sırasında oluşan yer hareketini büyütmektedir. Ayrıca, havzalarda ölçülen yer hareketi kayıtlarının kaya üzerindekilere göre daha karmaşık ve uzun süreli oldukları bilinmektedir. Kuvvetli ve/veya zayıf yer hareketi alıcılarından oluşan yoğun bir sismik gözlem ağının mevcut olduğu durumlarda, havzaların sismik büyütme etkisi deprem kayıtlarının analiz edilmesiyle doğrudan deneysel olarak incelenebilir. Alternatif olarak, sismik yer etkisi dalga yayılımı modellemesi (simülasyonu) ile de incelenebilmektedir. Bu çalışmada, İzmit Havzası için daha önce yapılan jeofizik çalışmalardan elde edilen 3-B anakaya geometrisi ve havza içi S-dalgası hız yapısı kullanılarak yüzeyde oluşacak yer hareketinin modellenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, dalga yayılımı modellemesinde, sıklıkla kullanılmakta olan pseudo-spektral, sonlu-fark, sonlu-eleman veya sınır-eleman yöntemleri yerine, son yıllarda yaygınlaşmakta olan spektral-eleman yöntemi kullanılmıştır. Literatürde, spektral-eleman yönteminin havza ölçeğinde dalga yayılımı modellemesi amacıyla kullanımına ilişkin örnekler sayılıdır. Yüksek mertebeli sonlu-eleman yöntemi olarak da bilinen bu yöntemin en büyük avantajı, pseudo-spektral ve sonlu-elaman yöntemlerinin sahip olduğu üstünlükleri birleştirmiş olmasıdır. Bu üstünlükler, speudo-spektral yöntemin dalga alanını hesaplamada sağladığı yüksek doğruluk derecesi ve sonlu-elaman yönteminin yeraltı geometrisini tanımlamada sağladığı esnekliktir. Bu çalışmada, İzmit Havzası için yapılması planlanan 2-B ve 3-B dalga yayılımı modellemelerine temel oluşturacak ilksel simülasyonlara ilişkin sonuçlar sunulmaktadır.

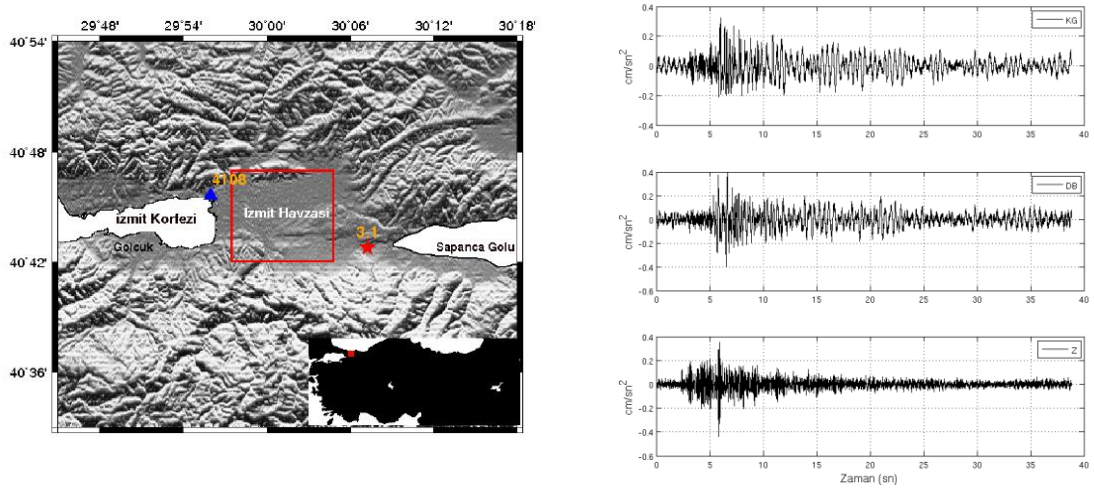
ANAHTAR KELİMELER: İzmit havzası, sismik büyütme, dalga yayılımı modellemesi, spektral eleman yöntemi.

1. GİRİŞ

Deprem esnasında sedimanter havzalarda gözlenen yer hareketi büyütmesi, deprem dalgalarının doğrudan analizi yerine sayısal modelleme yolu ile de incelenebilir. 2-B ve 3-B sismik dalga yayılımı modellemesinde genellikle sonlu eleman, sınır eleman, sonlu fark ve pseudo-spektral yöntemler tercih edilmektedir (Sanchez-Sesma ve diğ. 1995, Bao 1998, Reipl ve diğ. 2000, Kebeasy ve diğ. 2003). Bu yöntemlere alternatif olarak, spektral eleman yöntemi, global ölçekteki çalışmaların dışında (Captaville ve diğ., 2003, Chaljub ve diğ., 2003) son yıllarda havza ölçeğindeki çalışmalarda da (Komatitsch ve diğ., 2004, Pilz ve diğ., 2011, Stupazzini, 2009, Smerzini ve diğ., 2011) kullanılmaktadır. Spektral eleman yöntemi pseudo-spektral ve sonlu eleman yöntemlerinin üstünlüklerini taşıyan bir sayısal modelleme yöntemidir. Pseudo-spektral yöntemde çözüm, hesaplama ağındaki elemanların düğüm noktalarında ortogonal Chebyshev polinomları veya yüksek mertebeden Lobatto polinomları kullanılarak tanımlanır. Bu yöntemin en büyük avantajı hesaplama hatasının, polinom derecesine bağlı olarak eksponansiyel olarak azalmasıdır. Fakat bu yöntem genellikle basit geometriye sahip modellerde uygulanabilmektedir. Sonlu eleman yönteminin en büyük avantajı ise hesaplama ağında kullanılan sonlu elemanların şeklinin ve boyutlarının esnekliği sayesinde geometrik olarak karmaşık olan modellerde de yöntemin uygulanabilirliğidir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı ise hesaplama hatasını arttırmamak için

düğüm noktalarında 1. veya 2. dereceden yaklaştırma polinomlarının kullanılmasıdır. Spektral eleman yönteminde ise, sonlu eleman yönteminde olduğu gibi model, sonlu elemanlara bölünerek ayrıklaştırılır. Bu yöntemde, hesaplama ağındaki her bir elemandaki Gauss-Lobatto-Legendre (GLL) interpolasyon noktalarında yerdeğiştirme vektörü, yüksek dereceden Lagrange polinomları ile ifade edilebildiğinden yüksek doğruluk dereceli çözüm elde edilebilir. Spektral eleman yönteminin ilk uygulandığı alan akışkanlar mekaniğidir (Patera, 1984). Bu yöntemin sismolojideki ilk uygulamaları ise 2-B (Cohen ve diğ., 1993; Priolo ve diğ., 1994) ve 3-B rejyonal (Komatitsch ve Vilotte, 1998; Komatitsch ve Tromp, 1999; Komatitsch ve diğ., 2004) ve global (Chaljub ve diğ., 2003; Chaljub ve diğ., 2004; Komatitsch ve Tromp, 2002a,b) sismik dalga yayılımı problemleri üzerine olmuştur.

Bu çalışmada sayısal modelleme için spektral eleman yöntemine dayalı olarak çalışan SPECFEM2D/3D (Komatitsch, D. ve diğ., 1998) programı kullanılmıştır. İnceleme bölgesi olan İzmit havzası, neotektonik dönemde Kuzey Anadolu Fay Sistemi denetiminde oluşan Kuvaterner-Neojen yaşlı önemli aktif çek-ayır havzalardandır (Doğan, B. ve Gürer F., Ö, 2005). Marmara Bölgesinin doğusunda yer alan bu bölge, doğuda Sapanca Gölü, batıda ise İzmit körfezi ile sınırlandırılmıştır. Havzanın orta zonununu kat eden D-B doğrultulu sağ yanal atımlı fay nedeniyle, yüksek deprem riski taşıyan önemli bir metropolitandır. Şekil 1'de, 29.09.2010 yılında İzmit havzasının içinde meydana gelen M_d 3.1 büyüklüğündeki depremin, yaklaşık 17 km uzaklıkta bulunan ve AFAD Deprem Daire Başkanlığına ait istasyonda kaydedilmiş ivme kaydı verilmektedir. Örnek deprem kaydı incelendiğinde kaynak ile depremin algılandığı nokta arasındaki ortamın fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Yatay bileşen kayıtları incelendiğinde, havza içinde kapanlanan yüzey dalgaları ile havza kenarlarından gelen yansımalar ve faz dönüşümleri nedeniyle yatay bileşen ivme kayıtlarının daha karmaşık olduğu görülmektedir. Düşey bileşene göre göreceli olarak yüksek enerjili yatay bileşen kayıtları, deprem esnasında havzanın farklı lokasyonlarında zemin büyütmesine neden olabilmektedir. 1999 Kocaeli depremi ile ağır can ve mal kaybının yaşandığı bölgede, zemin özelliklerinden kaynaklanan deprem tehlikesinin değerlendirilmesi çalışmaları yerbilimleri ve mühendislik sismolojisi açısından önemli bir konudur. Bu amaç doğrultusunda, bu çalışmada İzmit havzası ve çevresinde sismik dalga yayılımı modellemesi ile zemin etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu bildiri kapsamında, üzerinde çalışılmakta olan, İzmit Havzası sismik dalga yayılımı modellemesine zemin oluşturacak 2-B ve 3-B ilksel modellerden örnekler sunulmaktadır. 2-B ve 3-B modeller için havza içi hız yapısı bilgisi ve 3-B anakaya geometrisi, Özalaybey ve diğ, (2002) ve Zor ve diğ., (2010)' dan alınmıştır. 3-B modellerdeki daha derin hız bilgisi için Marmara bölgesi kabuk yapısının araştırılmasında bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar (Zor ve diğ., 2006, Özalaybey ve diğ., 2002, Karabulut ve diğ., 2003, Gurbuz ve diğ., 2000) ile CRUST 2.0 1-B kabuk hız modeli kullanılmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanı ve 29.09.2010 M_d 3.1 depreminin ivme kaydı.

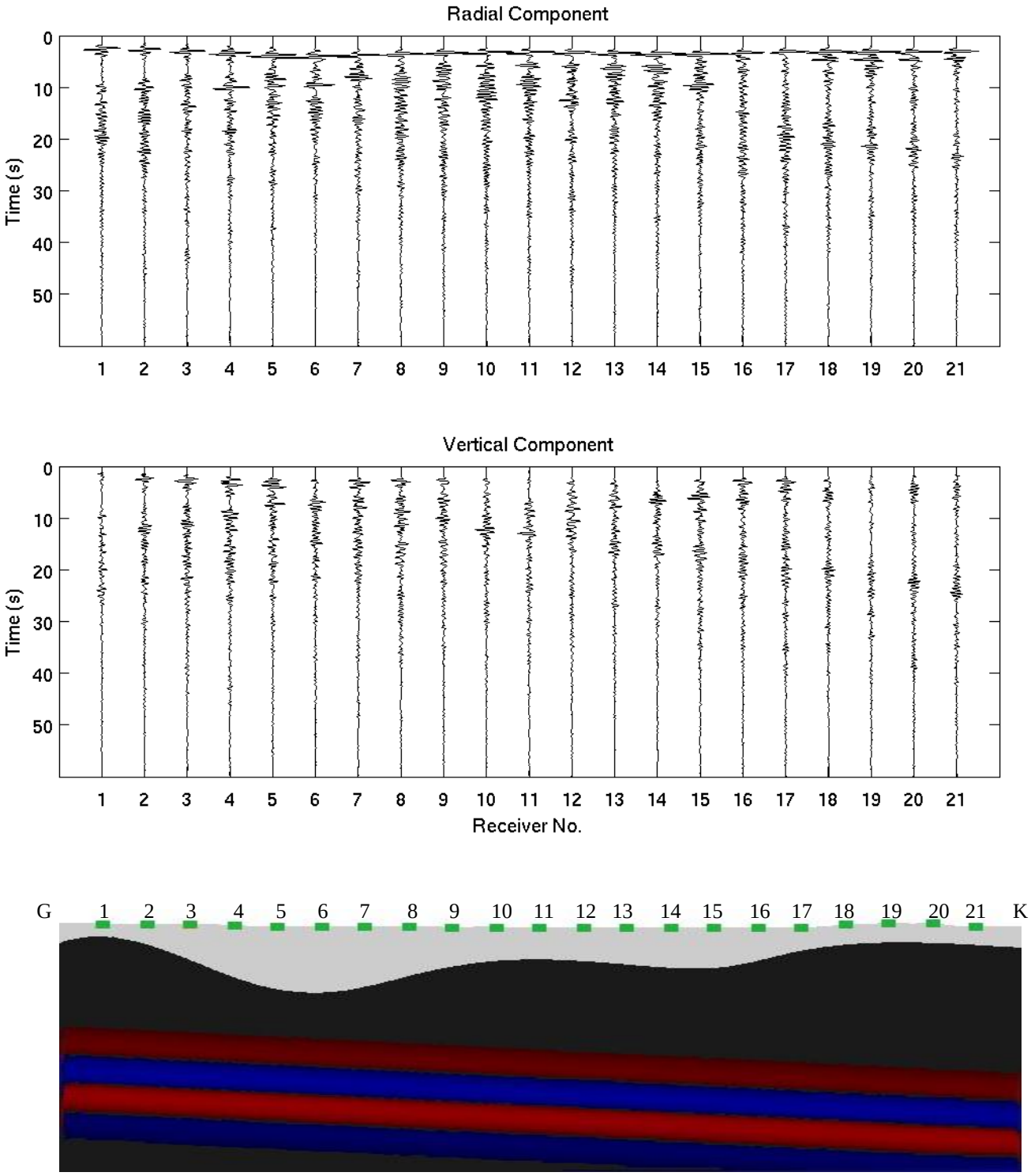
2. 2-B VE 3-B SİSMİK DALGA YAYILIMI MODELLEMESİ: ÖRNEKLER

2.1. 2-B Modelleme

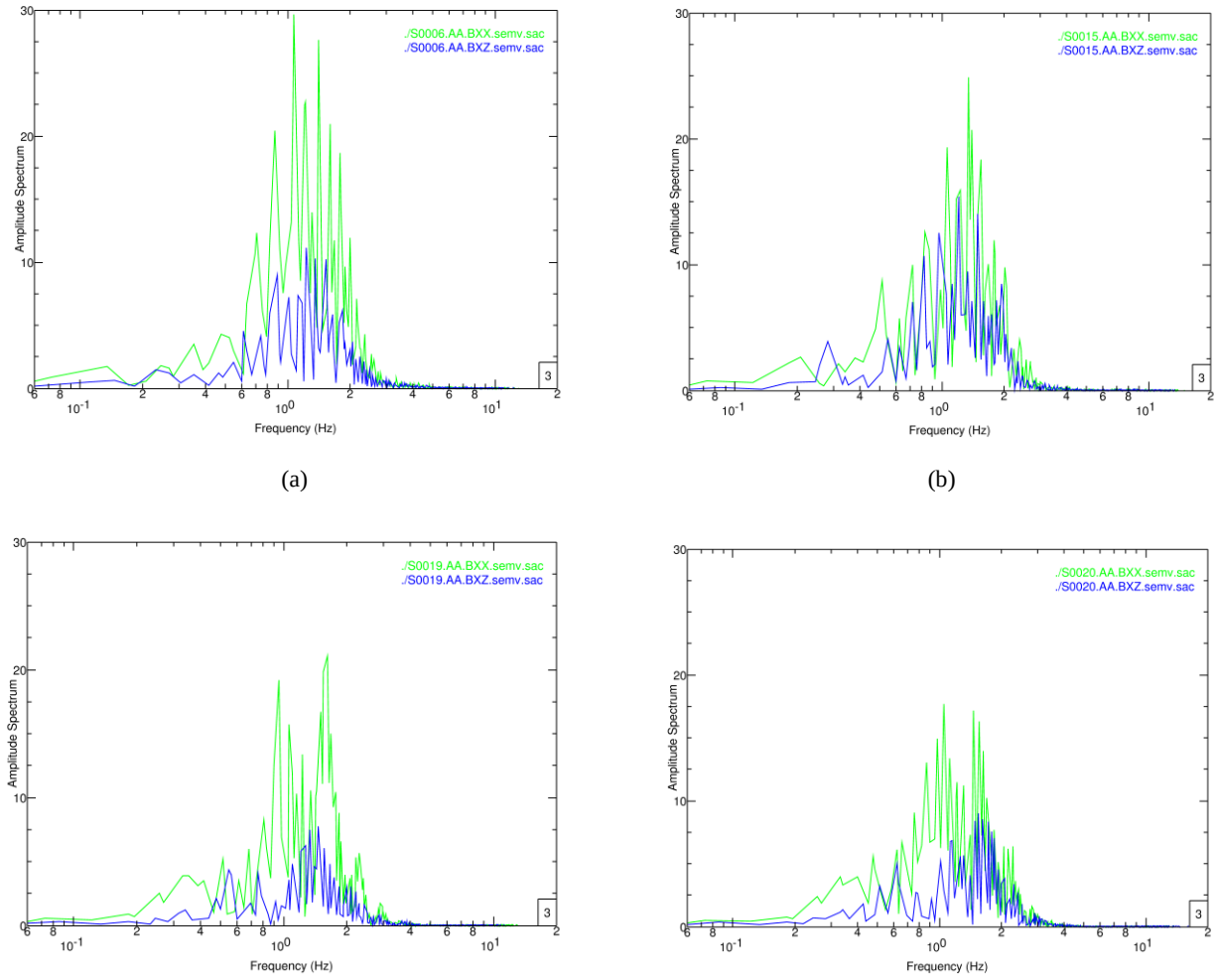
Havzalarda 3-B sismik büyütme etkisinin analizi için, öncelikle 2-B rezonans etkileri ve yüzey dalgası oluşumunun havza üzerindeki farklı doğrultular boyunca değişiminin araştırılması gerekmektedir. Spektral eleman yönteminin geometrik esnekliği sayesinde hesaplama ağına topoğrafya, batimetri verisi ile yanal/düşey süreksizlikler dahil edilebilir. Bu çalışmada, topoğrafya yüzeyi Amerikan Jeoloji Kurumu'ndan (USGS) sağlanan yaklaşık 90 m. yanal çözünürlüklü sayısal SRTM3 verisi kullanılarak hazırlanmıştır. Havza-anakaya arayüzeyi Zor ve diğ. (2010) çalışmasındaki 3-B anakaya geometri bilgisinden faydalanılarak oluşturulmuştur. 2-B modele ilişkin hesaplama ağı SPECFEM2D/3D paketinin içinde yer alan XMESHFEM programı kullanılarak hazırlanmıştır. Burada, kullanılan 2-B model, Zor ve diğ. (2010) tarafından verilen K-G hız profili temel alınarak oluşturulmuştur. SPECFEM2D programında P-SV dalga modları için PML (Mükemmel Uyumlu Tabaka) sınır koşulları uygulanabilmektedir. Profil boyunca topografyada çok önemli değişimler gözlenmese de havza ortasındaki ve profil başlangıç-bitiş noktalarındaki alıcılar arasında yaklaşık 100 metrelik bir kot farkı bulunmaktadır. Dolayısı ile elde edilen hız sismogramları ağırlıklı olarak havza etkisi ile oluşan dalga formlarını içermekle birlikte havza kenarlarında topografya etkisi ile oluşacak yansımaları ve faz dönüşümlerini de içermektedir. Kullanılan model parametreleri Tablo 1' de verilmektedir. Düzlem SV-dalgası gelişi için yapılan simulasyon sonucu elde edilen radyal ve düşey bileşen hız sismogramları Şekil 2' de verilmiştir. Radyal bileşen hız sismogramlarında yüksek genlikli S-dalgası fazını takiben, havza içi düşük hız ve yoğunluk değerleri nedeniyle, sismik enerjinin sediman birim içinde hapsolması ve ardışık yansımalardan dolayı, özellikle havza ortasında bulunan alıcılarda yüksek genlikli yüzey dalgası paketleri oluşmuştur. Bu dalga paketleri yer hareketinin genliğini ve süresini önemli bir biçimde etkilemektedir. Düşey bileşen kaydında ise göreceli olarak daha düşük genlikli belirgin bir P-dalgası varışı ve düşük genlikli yansımalar kaydedilmiştir. K-G profili üzerindeki alıcılarda kaydedilen hız sismogramlarının genlik sprektrumları incelendiğinde (Şekil 3), yatay ve düşey spektral genliklere bakılarak, havzanın farklı konumlarında oluşabilecek zemin büyütmesi hakkında yorum yapılabileceği anlaşılmaktadır. Buna göre, havzanın en derin noktası üzerinde bulunan 6. alıcı için (Şekil 3a) 0.3-0.6 Hz aralığında radyal bileşende genlik artışı gözlenmektedir. Yine havzanın bir diğer derin bölgesi üzerinde bulunan 15. alıcıdaki (Şekil 3b) genlik spektumu incelendiğinde 0.4-0.6 Hz frekans aralığına radyal bileşen genliğinin düşey bileşen genliğine göre 2 kat arttığı gözlenmektedir. Seçilen profil için güneyden kuzeye doğru gidildikçe havza derinliği giderek sığlaşmakatadır. Havza kenarında bulunan 19. ve 20. alıcılardaki yatay ve düşey spektrumlarda yaklaşık 1 Hz civarında gözlenen büyütme, havza geometrisi ile uyumlu sonuçlar vermektedir.

Tablo 1. 2-B modellemede kullanılan parametreler

Boyut	5x11 km		
Örnekleme aralığı	0.001 s		
Sismogram Uzunluğu	60 s		
Kaynak	Düzlem dalga		
Düzlem dalga geliş açısı	5^o		
Kaynak dalgacık baskın frekansı	1		
Hız Modeli	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (g/cm^3)
	866	500	1.9
	2600	1500	2.4



Şekil 2. Düzlem SV-dalgası gelişi için düşey bileşen hız sismogramları (üstte ve ortada) ve yer modeli (altta).



(a) (b)

(c) (d)

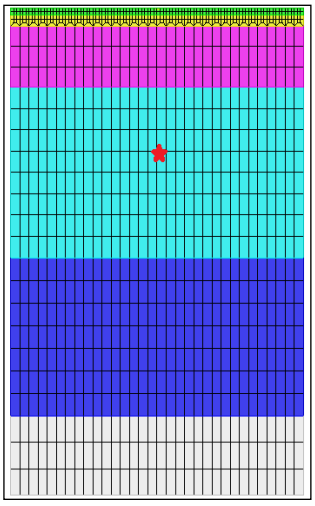
Şekil 3. 6. (a), 15. (b), 19. (c) ve 20. (d) alıcıda kaydedilen yatay (yeşil) ve düşey (mavi) bileşen hız sismogramlarının genlik spektrumları.

2.2. 3-B Modelleme ve Karşılaşılan Problemler

3-B dalga yayılımı modellemesi için test amaçlı olarak basit bir model ele alınmıştır. Bu model İzmit havzasını temsilen 12x12x40 km boyutlarında seçilmiştir (Şekil 1'deki kırmızı kare). 6-katmanlı 1-B bir yer modeli için hesaplama ağı CUBIT programında hazırlanmıştır (Şekil 4). Tablo 2'de verilen model parametreleri kullanılarak yapay sismogramlar üretilmiştir. Elde edilen sismogramlarda model sınırlarından yüksek genlikli yansımaların gerçek sinyalleri örttüğü görülmüştür. Bu nedenle, yapay yansıma etkisini en aza indirgemek için hedeflenen alanın 2 katı büyüklüğünde bir hesaplama ağı oluşturulmuştur. Elde edilen yapay sismogramlar, yarı-analitik bir yöntem olan ayrık dalgasayısı integrasyonu (discrete wavenumber integration) yönteminden (Herrmann ve Ammon 2004) elde edilen sismogramlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 5a). Düşey hız sismogramları karşılaştırıldığında, modelin 2 kat büyütülmesi durumunda spektral eleman sentetiklerinin yaklaşık 12 s 'ye kadar dalgasayısı integrasyon yöntemi ile elde edilen sismogramlarla tutarlı sonuçlar verdiği gözlenmektedir. 12 s 'den sonra dalgasayısı integrasyon sentetiğinde dalga genliği giderek düşerken, spektral eleman sismogramında yaklaşık 25 s civarında yüksek genlikli yapay yansımalar kaydedilmiştir. Hesaplama modeli 3 kat

büyütüldüğünde ise yapay yansımaların genliğinin spektral eleman sentetiklerinde oldukça azaldığı gözlenmektedir (Şekil 3b).

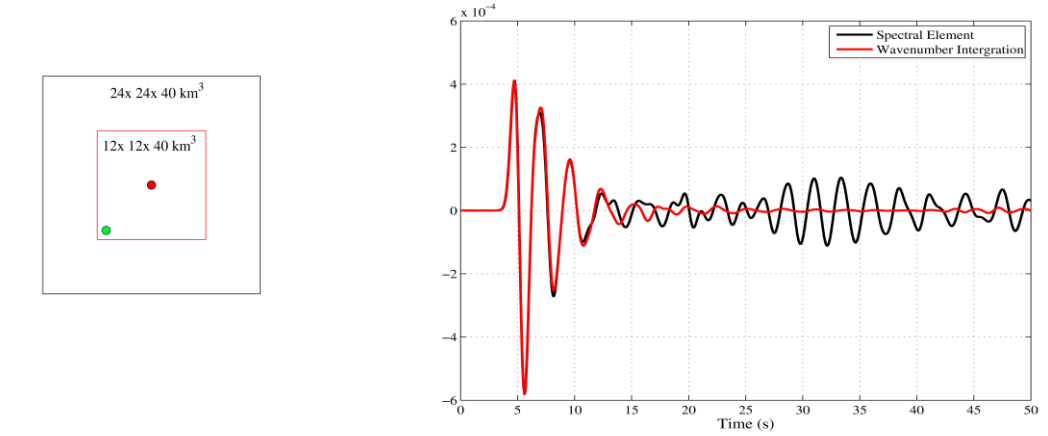
Çalışma konusu olan İzmit havzası için yapılacak dalga yayılımı modellemesinin frekans içeriğinin en az 5 Hz olması gerekmektedir. İzmit havzasında tek istasyon 3 bileşen mikrotremör ölçümlerinden yatay / düşey spektral oranlama (HVSR) yöntemi kullanılarak yapılmış olan çalışmada (Özalaybey ve diğ., 2011) kuvaterner yaşlı sedimanların yer aldığı havzanın en derin bölgesinde, baskın frekans değerlerinin 0.2-0.3 Hz aralığında, havza kenarlarında ise 1.0-5.0 Hz aralığında değişim gösterdiği saptanmıştır. Ayrıca Zor ve diğ. (2010), pasif kaynaklı mikrotremor ağ dizilim yöntemi ve aktif kaynaklı yüzey dalgalarının çok kanallı analizi yöntemi ile elde ettikleri Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisinin ters çözüm sonuçlarına ve Vs30 zemin sınıflamasına göre, İzmit havzası içinde S-dalgası hızının 200 m/s'den düşük olduğu bölgeler yer almaktadır. Bu nedenle kurulacak modelde, yüzeye yakın katmanlarda gevşek zemini temsilen düşük S-dalgası hızlarının atanması gerekmektedir. En düşük hızın 200 m/s ve ilgilenilen en yüksek frekans değerinin 5 Hz olması nedeniyle, yüzeye yakın katmanlarda oldukça küçük eleman boyutları (yaklaşık 20 m) gerekmektedir. Yukarıda bahsedilen tüm bu zorunluluklar daha fazla hesaplama süresi ve gücü gerektirmektedir.



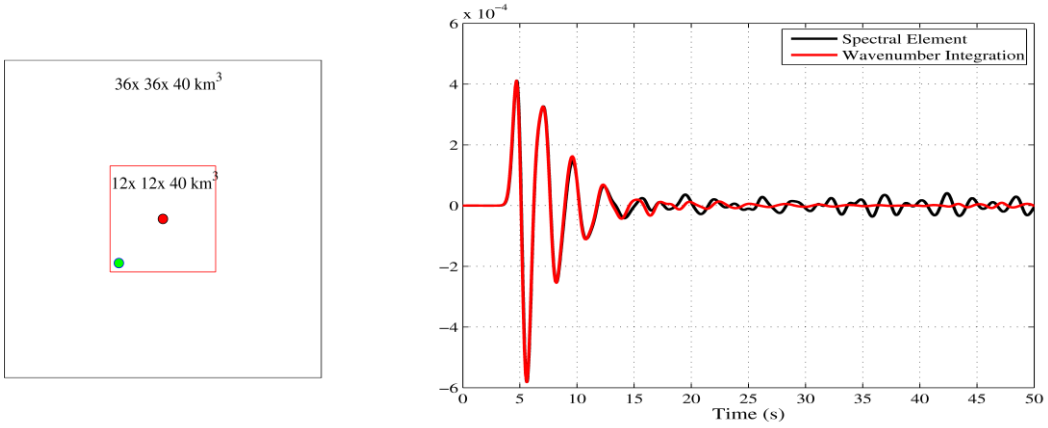
Şekil 4. CUBIT programında hazırlanan 3-B hesaplama ağının önden görüntüsü ve kaynağın konumu (kırmızı yıldız).

Tablo 2. 3-B modellemede kullanılan parametreler

Örnekleme aralığı	0.002 s			
Sismogram Uzunluğu	50 s			
Kaynak Türü	Patlatma			
Kaynak dalgacık baskın frekans	0.5 Hz			
Kaynak Derinlik	12 km			
En küçük eleman boyutu	300 m			
Desteklenen en yüksek frekans	1 Hz			
Alıcıların Derinliği	0 km			
Hız Modeli	h (km)	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (g/cm^3)
	0.6	1.12	0.60	1.9
	0.9	2.67	1.50	2.2
	5.0	5.70	3.20	2.5
	14.0	6.10	3.60	2.8
	13.0	6.80	3.85	3.1
	6.5	8.00	4.55	3.4



(a)



(b)

Şekil 5. (a) 24x 24x 40 km ve (b) 36x 36x 40 km boyutlarındaki modeller için spektral eleman ve dalgasayısı integrasyon yöntemi ile elde edilen düşey bileşen hız sismogramları.

3. SONUÇLAR

İzmit havzası için spektral eleman yöntemi (SPECFEM2D programı) ile 2-B dalga yayılımı modellemesi yapılarak düzlem SV-dalgası gelişi için hız sismogramları elde edilmiştir. Farklı alıcılardaki genlik spektrumları incelendiğinde, havza geometrisi ile uyumlu büyütme değerleri gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre, havzanın en derin kesiminde 0.3-0.6 Hz frekans aralığında radyal bileşen genliklerindeki artış, havzanın sığ kesimlerindeki alıcılarda yaklaşık 1 Hz civarında gözlenmektedir. Ayrıca, 3-B simulasyonlar için gerekli ilksel testler yapılmıştır. SPECFEM2D programından farklı olarak, SPECFEM3D programında hesaplama alanının kenarlarından gelen yapay yansımaları en iyi biçimde yok eden PML sınır koşulları henüz uygulanmamıştır. Bu nedenle, model sınırlarından gelecek yapay yansımaları engellemek için model boyutlarının en az 3 kat büyütülmesi gerekmektedir. Ayrıca, kullanılması gereken eleman boyutunun çok küçük olması, toplam eleman sayısını aşırı derecede arttıracağından, gerekli bilgisayar gücü ve CPU zamanı 3-B modellemeler için kısıtlayıcı olacaktır.

Bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında, İzmit havzası üzerinde farklı doğrultular için hazırlanacak olan 2-B sismik hız modellerinin analizi ile, sismik büyütme etkisinin havza içindeki değişimi incelenecek ve elde edilecek sonuçlara göre 3-B modelleme aşamasına geçilecektir. Ancak bu aşama, modeli 3 kat büyütme yoluna gitmeden, PML sınır koşullarının programa adapte edilmesi durumunda mümkün olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Bu proje kapsamında hesaplamalarda kullanılmak üzere Intel Xeon X5650 2.66 GHz 12 çekirdekli 48 GB RAM konfigürasyonlu HP iş istasyonu temin edilmiştir. İzmit Havzası ve çevresine yapmış oldukları çalışmaların verilerini bizimle paylaşarak destek olan TUBİTAK Marmara Araştırma Merkezi araştırmacılarından Doç. Dr. Serdar Özalaybey'e ve Doç. Dr. Ekrem Zor'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Bao, H., Bielak, J., Ghattas, O., Loukas, F., Kallivokas, D., R., O'Hallaron, J., R.,(1998). Large scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers. *Comp. Meth. Appl. Mesh. Eng,*. 152, 85-102.

Captaville, Y., Chaljub, E., Vilotte, R. V. and Montagner, J., P. (2003). Coupling the spectral element method with a modal solution for elastic wave propagation in global Earth models. *Geophysical Journal International*, 152, 34-67.

Chaljub, E., Capdeville, Y. and Vilotte, J., P., (2003). Solving elastodynamics in a fluid-solid heterogeneous sphere: a parallel spectral element approximation on non-conforming grids. *Journal of Computational Physics*, 187 (2), 457-491.

Cohen, G., Joly, P. and Tordjman, N., (1993). Construction and analysis of higher-order finite elements with mass lumping fort he wave equation, *in Proceedings of the second international conference on mathematical and numerical aspects of wave propagation, edited by R. Kleinman,* 152-160, SIAM, Philadephia, PA.

Courant, R., Friedrichs, K. and Lewy, H., (1928). On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM Journal of Research and Development*, 11(2), 215-234.
CUBIT,(2003). Mesh Generation Toolsuite.http://cubit.sandia.gov.

Doğan, B. ve Gürer F., Ö., (2005). Kocaeli Havzasının Tektono- Stratigrafik Oluşum Modeli Nedir? *Kocaeli Deprem Sempozyumu*,23-25 Mart 2005.

Gurbuz, C., Aktar, M, Eyidoğan, H., Cisternas, A., Haessler, H., Barka, A., Ergin, M., Türkelli, N., Polat, O., Üçer, S., B., Kuleli, S., Baris, S. Kaypak, B., Bekler, T., Zor, E., Bicmen, F. and Yoruk, A., (2000). The seismotectonics of the Marmararegion (Turkey):results from a microseismic experiment. Tectonophysics, 316, 1-17.

Herrmann, B.ve Ammon, C.J. (2004). Computer programs in seismology, surface waves, receiver functions, and crustal structure, version 3.30

Karabulut, H., Özalaybey, S., Taymaz, T., Aktar, M., Selvi, O. and Kocaoğlu, A., (2003). A tomographic image of the shallow crustal structure in the Eastern Marmara. Geophysical Research Letters, 30, 24, 2277.

Kebeasy, T., R., M. and Husebye, E., S., (2003). A finite-difference approach for simulating ground responses in sedimentary basins:quantitative öodelling of Nile Valley, Egypt. *Geophysical Journal International*, 154, 913-924.

Komatitsch, D. and Vilotte J., P., (1998). The spectral-element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. Bulletin *of the Seismological Society of America*, 88(2), 368-392.

Komatitsch, D., and Tromp, J., (1999). Introduction to the spectral element method for 3 -D seismic wave propagation, *Geophysical Journal International*, 139, 806-822.

Komatitsch, D. and Tromp, J., (2002a). Spectral-element simulations of global seismic wave propagation-I. Validation, *Geophysical Journal International*, 149, 390-412.

Komatitsch, D., Barnes, C. and Tromp, J., (2000b). Simulation of anisotropic wave propagation based upon a spectral element method, *Geophysics*, 65,1251-1260.

Komatitsch, D., Liu, Q., Tromp, J., Süss, P., Stidham, C. and Shaw, J., H., (2004). Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon the spectral-element method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 187-206.

Komatitsch, D., Tsuboi, S. and Tromp, J., (2005). The Spectral-element method in seismology. Seismic Earth: Array Analysis of Broadband Seismograms, Geophysical Monograph Series: 157, AGU.

Patera, A., T., (1984). A spectral element method for fluid dynamics: laminar flow in a channel expansion, *Journal of Computational Physics*, 54, 468-488,1984.

Peter, D., Komatitsch, D., Luo, Y., Martin, R., Goff, N., Casarotti, E., Loher, P., Magnoni, F., Liu, Q., Blitz, C., Nissen-Meyer, T., Basini, P. and Tromp, J., (2011). Forward and adjoint simulations of seismic wave propagation on fully unstructured hexahedral meshes. *Geophysical Journal International*, 186, 721-739.

Pilz, M., Parolai, S., Stupazzini, M., Paucci, R., Zschau, J., (2011).Modelling basin effects on earthquake ground motion in the Santiago de Chile basin by a spectral element code. *Geophysical J. Int.*, 187 (2), 929-945.

Priolo, E., Carcione, J., M. and Seriani, G., (1994). Numerical simulation of interface waves by high-order spectral modeling techniques, *Journal of Acoust. Soc. Am*., 95, 681-693.

Riepl, J., Zahradnik, J., Plicka, V. and Bard, P., Y., (2000). About the efficiency of Numerical 1-D and 2-D Modelling of Site Effects in Basin Structures. *Pure Appl. Geophysics*, 157,319-342.

Sanchez-Sesma, F., J. and Luzon, F., (1995). Seismic response of three-dimensional alluvial valleys for incident P,S and Rayleigh waves. *Bulletin of Seismological Society of America*, 85,269-284.

Smerzini, C., Paolucci, R. and Stupazzini, M., (2011). Comparison of 3D, 2D and 1D numerical approaches to predict long period earthquake ground motion in the Gubbio plain, Central Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 2007-2029.

Stupazzini, M., Paolucci, R., Igel, H., (2009). Near-fault earthuake ground motion simulation in the Grenoble valley by a high- performance spectral element code. *Bulletin of Seismological Society of America,* 99, 286-301.

Özalaybey, S., Ergin, M., Aktar, M., Tapırdamaz, C., Biçmen, F. and Yörük, A., (2002). The 1999 İzmit Earthquake Sequence in Turkey: Seismological nad Tectonic Aspects. Bulletin of Seismological Society of America, 92, 1,376-386.

Özalaybey, S., Zor, E., Ergintav S., and Tapırdamaz, S., (2011). Investigation of 3-D basin structures in the İzmit Bay area (Turkey) by single-station microtremor and gravimetric methods, Geophysical Journal International, 186, 883-894.

Zor, E., Özalaybey, S. and Gürbüz, C., (2006). The crustal structure of eastern Marmara region, Turkey by teleseismic receiver functions, Geophysical Journal International, 167, 213-222.

Zor, E., Özalaybey, S., Karaaslan, A., Tapırdamaz, M., C., Tarancıoğlu, A. and Erkan, B., (2010). Shear wave velocity structure of the İzmit Bay area (Turkey) estimated from active- passive array surface wave and single-station microtremor methods. Geophysical Journal International, 182,1603-1618.