MARMARA BÖLGESİ İÇİN ÜÇ BOYUTLU DALGA YAYILIMI MODELLEMESİ

S. Yelkenci[1] ve M. Aktar[1]

[1] *Jeofizik Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul*
Email: seda.yelkenci@boun.edu.tr, aktar@boun.edu.tr

ÖZET:

Sismik dalga yayılımı modellemesi, üç boyutlu karmaşık yer modellerinin geliştirilmesi ve bunların ihtiyaç duyduğu hesaplama gücündeki güncel ilerlemeler sayesinde yer kabuğunun yapısal özelliklerinin araştırılmasında olduğu kadar lokal bölgelerdeki büyütmelerin belirlenmesinde de önemli bir araç haline gelmiştir. Bu yaklaşımın büyük ölçekte Marmara Bölgesi ve daha yerel ölçekte çok yüksek risk taşıyan bir kent olan İstanbul için uygulanması, çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında, Marmara denizinde meydana gelmiş küçük-orta büyüklükteki depremler ele alınmıştır. Veri kaynağı olarak KRDAE' tarafından İstanbul'un Anadolu ve Avrupa yakasında kurulmuş kuvvetli yer areketi (strong motion) istasyonları kullanılmıştır. Sismik dalga yayılımı öncelikle yatay olarak tabakalanmış bir kabuk modeli kullanılarak üretilmiştir. Sismik dalga yayılımı bu aşamada, paralel işletim sistemlerinde çalışan bir sonlu farklar kodu (WPP) kullanılarak uygulanmıştır. Üretilen yapay (sentetik) veriler gözlemsel verilerle karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada, çalışma bölgesi için daha önceden oluşturulmuş modeller birleştirilerek, bölge için bütünleştirilmiş üç boyutlu bir sismik model geliştirilmektedir. Bu üç boyutlu hız modeli ile, İstanbul metropol alanlarındaki yerel basenlerde dalga yayılımı davranışını anlamak adına bir temel oluşturulmaktadır. Bu kapsamda, sedimanlardan oluşmuş basenlerin dalga genliğini ne miktarlarda büyüttüğü ve üç boyutlu yayılım etkilerinin ne ölçüde göz önünde tutulması gerekliliği ortaya koyulmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER : 3-B kabuk modeli, Marmara bölgesi, sismik dalga yayılımı

1. GİRİŞ

Gerçeğe yakın bir kabuk modeli ve uygun bir dalga yayılımı algoritması kullanılması durumunda, hem geçmişte olmuş hem de gelecekte olası büyük bir depremin zararlarının anlaşılması mümkündür. Bu çalışma kapsamında iki ölçekte modelleme yapılması hedeflenmiştir: büyük ölçekte Marmara bölgesi ve daha küçük ölçekte İstanbul metropol alanı. Küçük ölçekte yapılan çalışma mevcut yerel basenler ve eski nehir yataklarındaki sismik dalga yayılımı özelliklerinin ortaya koyulmasına yöneliktir. Özellikle Kaliforniya, San Francisco körfezi olmak üzere dünyada çeşitli bölgelerde üç boyutlu sonlu farklar yöntemi ile deprem kuvvetli yer hareketi benzetimleri yapılmaktadır [*Olsen, 2000, Rodgers ve diğ.,2006,*]. Yüksek başarımlı hesaplama gücü gerektiren bu uygulamanın Türkiye'de daha önce yapılmış örnekleri bulunmamaktadır. Bu bildiri kapsamında, yöntemin İstanbul metropolü için uygulanması ele alınmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

2. YÖNTEM

Üç boyutlu sismik dalga yayılımı benzetimlerinde genellikle sonlu eleman, spektral eleman ve sonlu farklar yöntemlerine dayalı sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise, bahsi geçen yöntemlerden sonlu farklara dayalı geliştirilmiş olan bir yazılımdan faydalanılmıştır. Kullanılan yöntem ve algoritma, düşük frekans ve bölgesel ölçeklerde uygulamalara yatkınlık göstermektedir.

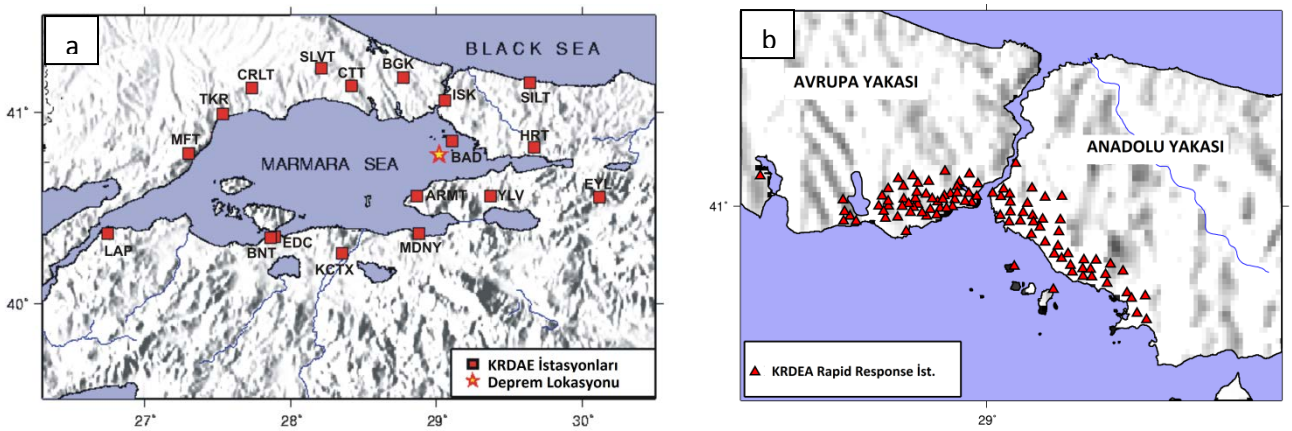
Marmara bölgesinde özellikle büyük depremlerin sayısının fazla olmaması, çalışmanın ilk aşamada küçük depremler kullanılarak yüksek frekanslarda ve daha lokal ölçekte uygulanmasına yöneltmiştir. Sismik dalga yayılımı çalışmalarında gerçekçi sonuçlar alınabilmesinin gerekli şartları, uygun bilgisayar yazılımı, doğru belirlenmiş deprem parametreleri, yeterli veri kaynağı ve ayrıntılı kabuk modeli gibi konulardır. Uygulama alanımız için bu problemlere ilişkin geliştirilen çözümler aşağıda ele alınmıştır.

2.1. Kullanılan Program (WPP)

Çalışmada, üç boyutlu sismik dalga yayılımı modellemesinde en yaygın olarak kullanılan sayısal yöntemlerden biri olan elastik sonlu farklar yöntemi benimsenmiştir. Bu bağlamda Lawrence Livermore Ulusal Laboratuarı tarafından geliştirilen Wave Propagation Program (WPP) kodu kullanılmıştır. Programın en önemli özelliği paralel hesaplamalar için geliştirilmiş olmasıdır. Fortran, phython, C, C++ dillerinde yazılmış olan program Linux, Mac Osx platformlarında kurulup, çalıştırılabilmektedir. Bu yöntem Kartezyen hacim üzerinde çalışmakta ve hesaplama alanı için en üstte serbest yüzey; diğer taraflarda ise yansımayan (Clayton-Engquist) sınır koşullarını kabul ederek üç boyutlu dalga denklemini çözmektedir [*Petersson ve Sjogreen, 2009*]. Yöntem sıkça kullanılan çapraz (staggered) grid hız-stres formülasyonları yerine, problemi her bir grid noktasında üç yer değiştirme bileşeni için çözen ikinci dereceden sonlu farklar sistemini kullanmaktadır [*Nilsson ve diğ.,2007*]. Ayrıca, hafıza ve hesaplama verimliliğini büyük ölçüde arttıran düşey yönde örgü iyileştirme (mesh refinement) özelliği kullanımına da imkan vermektedir. Bu çalışma kapsamında, program İTÜ ve TÜBİTAK-ULAKBİM yüksek performans hesaplama merkezlerinde kurularak çalışır duruma getirilmiştir.

2.2. İstasyon Dağılımı ve Veriler

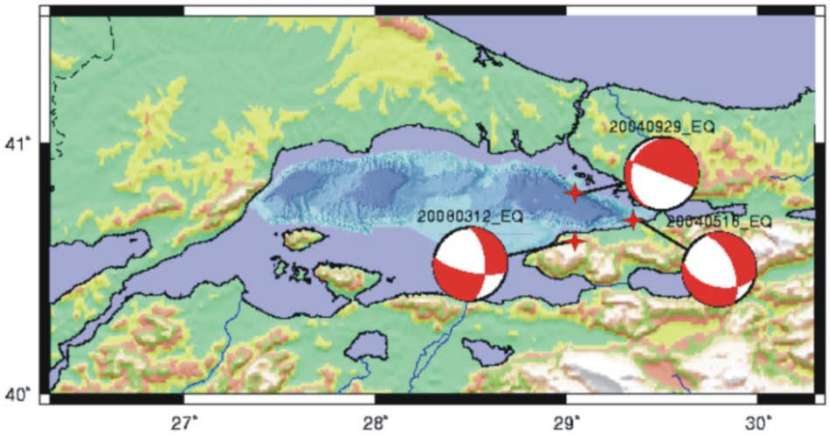
Çalışmada, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) Ulusal Deprem İzleme Merkezi tarafından işletilen istasyonlar kullanılmıştır. Bunlar, 24-bitlik geniş bantlı ve 16-bitlik kısa periyotlu, örnekleme aralığı 50 olan üç bileşenli istasyonları kapsamaktadır. Bunun yanı sıra, KRDAE Deprem Mühendisliği A.B.D. tarafından, İstanbul Erken Uyarı ve Acil Müdahale (IEWRR) Projesi kapsamında İstanbul'un Anadolu ve Avrupa yakasında kurulmuş istasyonlar da kullanılmıştır. Bunlar 24-bitlik üç bileşenli toplam 90 adet kuvvetli yer hareketi (strong motion) istasyonlarını içermektedir. İstasyonların Marmara bölgesi ve İstanbul metropolündeki dağılımı sırasıyla Şekil 1a ve Şekil1b'de gösterilmiştir.



Şekil 1. KRDAE sismik (a) ve kuvvetli yer hareketi (b) istasyonları dağılımı

2.3. Referans Depremler

Sismik dalga yayılımı benzetimleri için, Marmara Denizinde meydana gelmiş küçük-orta büyüklükteki depremlerden kuvvetli yer hareketi istasyonları tarafından tetiklenmiş olan, deprem konumlarına göre yoğun bir azimut dağılıma ve yüksek sinyal-gürültü oranına sahip referans depremler seçilmiştir. Bu depremlerin yerleri ve odak mekanizma çözümleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Dalga yayılımı benzetimleri için seçilen referans depremler

Gerçeğe uygun kabuk modellerinin geliştirilmesi kadar, deprem lokasyon kalitesinin arttırılması, en uygun lokasyon, derinlik, orijin zamanı ve özellikle odak mekanizma çözümlerinin belirlenmesi, dalga yayılımı benzetimi uygulamalarında gözlemsel ve hesaplanan dalga formlarının doğru yorumlanabilmesi için büyük önem taşımaktadır. Dolayısı ile bu parametreler kuvvetli yer hareketi istasyonları da dahil edilerek model depremler için yeniden bulunmuştur.

2.3.1. Lokasyon

Sismik benzetimleri yapılacak referans depremler için tüm istasyon kayıtlarının P ve S fazları okunarak tekrar lokasyon hesaplamaları yapılmıştır. Bu kapsamda, farklı kabuk modellerinin test edilmesiyle lokasyon işlemleri tekrarlanarak en düşük lokasyon hataları ve RMS rezidüelleri sağlayan değerler bulunmaya çalışılmıştır. Lokasyon işlemlerinde Karabulut ve diğ. (2002)'ne ait hız modeli başlangıç modeli olarak kabul edilmiş, daha sonra bu model üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır.

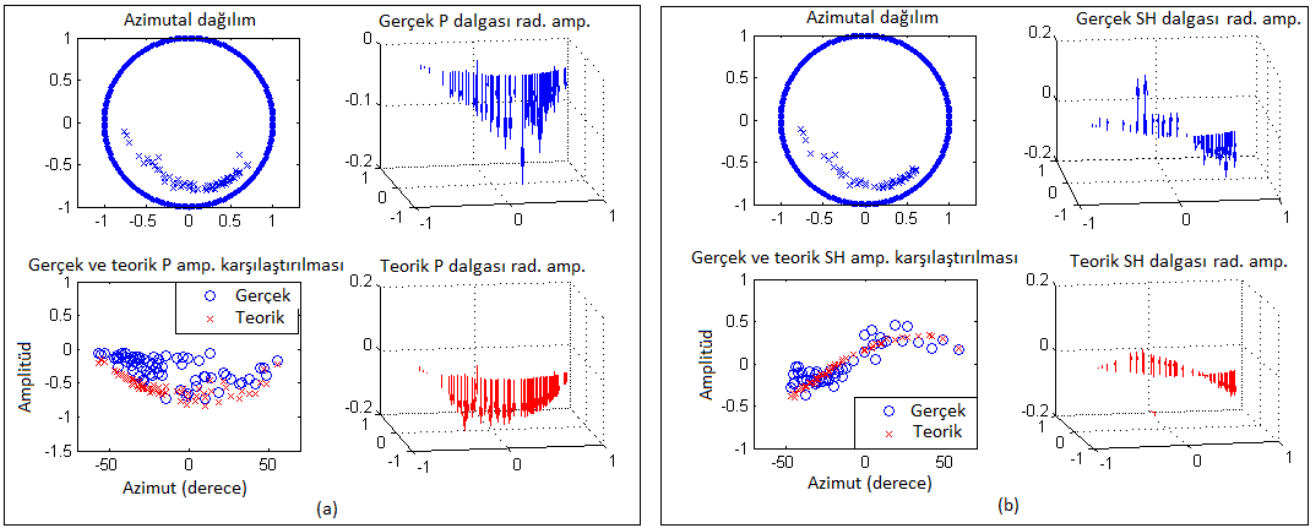
2.3.2. Odak Mekanizması

Referans depremlerin kaynak parametrelerinin en uygun şekilde bulunması için, P dalgası ilk hareketlerinin belirlenmesine dayalı bilinen konvansiyonel yöntemlerin yanı sıra P ve SH dalgaları yayılma genliklerinin kıyaslanması ve buna karşılık gelen en uygun fay düzlemi çözümlerinin belirlenmesine dayalı ayrıntılı analizler yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak kuvvetli yer hareketi ivme kayıtlarının üzerinden, hız ve yer değiştirme kayıtlarının elde edilmesi, her bir hız kaydının radyal ve transversal bileşenlere dönüştürülmesi, düşey hız bileşenlerinden P fazı, transversal bileşenlerinden ise SH fazı okunması ve sonrasında kayıtlarda ofset giderilmesi gibi analiz öncesi bazı adımlar gerçekleştirilmiştir. Nihai kayıtlar üzerinden gerçek P ve SH dalgası yayılma genlikleri değerleri bulunmuştur. Üretilen sentetik kayıtlardaki genliklerle geçek genlikler karşılaştırılmış ve en uygun fay düzlemi parametrelerinin ne olduğu araştırılmıştır. Burada fay düzlemi parametreleri ile genlik arasındaki ilişkiyi ifade eden yayılma örüntüsü (radiation pattern) bağıntısı kullanılmıştır (denklem 1 ve denklem 2).

$$R^{P} = \left[\cos\lambda\sin\delta\sin^{2} i_{\xi}\sin 2(\phi-\phi_{s})\right]-\left[\cos\lambda\cos\delta\sin 2i_{\xi}\cos(\phi-\phi_{s})\right] + \left[\sin\lambda\sin 2\delta\left(\cos^{2} i_{\xi}-\sin^{2} i_{\xi}\sin^{2}(\phi-\phi_{s})\right)\right]+\left[\sin\lambda\cos 2\delta\sin 2i_{\xi}\sin(\phi-\phi_{s})\right] \quad (1)$$

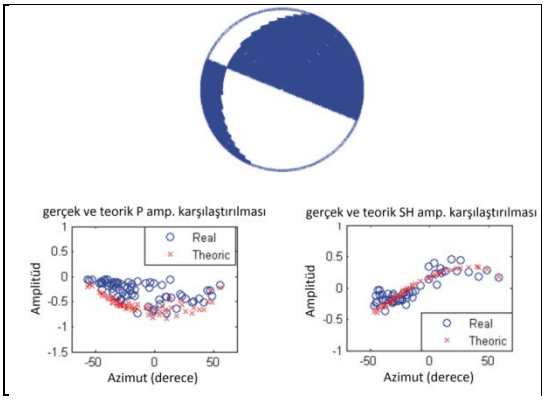
$$R^{SV} = \left[\sin\lambda\cos 2\delta\cos 2i_{\xi}\sin(\phi-\phi_{s})\right]-\left[\cos\lambda\cos\delta\cos 2i_{\xi}\cos(\phi-\phi_{s})\right] + \left[1/2\cos\lambda\sin\delta\sin 2i_{\xi}\sin 2(\phi-\phi_{s})\right]-\left[1/2\sin\lambda\sin 2\delta\sin 2i_{\xi}\left(1+\sin^{2}(\phi-\phi_{s})\right)\right] \quad (2)$$

Bu ifadelerde fayın doğrultu, dalım ve kayma açıları, kaynaktan çıkış açısı (takeoff angle) ve azimut bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan kaynak çıkış açısı doğrudan bilinmediği için bu bağlamda çok terimli uyum yoluyla, deprem kaynağının alıcılara olan uzaklığına ve kaynaktan çıkış açılarına bağlı ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Şekil 3.'te 29.09.2004 tarihinde Çınarcık baseninde meydana gelen deprem için yapılan analiz sonuçları gerçek ve teorik yayılma genliklerin karşılaştırılmasıyla ifade edilmiştir. Bu örnekte, depremin yoğun bir azimut dağılımı göstererek kürenin büyük bölümünü kapladığı görülmektedir. Ayrıca, P ve SH dalgası yayılma genliklerinin azimuta göre dağılımı da oldukça iyi gözlenmektedir.



Şekil 3. P (a) ve SH (b) dalgaları için yayılma genliklerin karşılaştırılması

İlk aşamada P ve SH fazları arasında polarite uyumluluğunu sağlayan sonrasında ise, teorik ve gerçek genlik değerleri arasındaki farkları en aza indiren fayın doğrultu, dalım ve kayma açılarını bulmaya yönelik bir optimizasyon analizi yapılmıştır. Bu şekilde referans depremler için olası en uygun fay düzlemi çözümleri bulunmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. 29.09.2004 depremi için bulunan en uygun fay düzlemi çözümü

2.4. Hız Yapısı

Marmara bölgesi kabuk yapısının araştırılmasında bugüne kadar yapılmış çalışmalar göz önüne alındığında, kara ve denizleri kapsayan tüm bölge için üretilmiş üç boyutlu hız modellerinin bulunmadığı ancak Marmara Denizi'ndeki basenleri içeren ve henüz yayınlanmamış tomografi çalışmalarının [*Bayrakçı, 2009*, *Doktora tezi*,] varlığı bilinmektedir. Bunun yanı sıra, mikro depremlerin bir boyutlu optimizasyonu [*Bulut ve diğ. 2009, Karabulut ve diğ.,2002*] ve her bir istasyon altındaki yapının derinliğe bağlı hız değişimlerini veren alıcı fonksiyon çalışmaları [*Zor ve diğ., 2006*] bulunmaktadır. Dolayısı ile daha önceden geliştirilmiş ve bu çalışma için başlangıç noktası olarak kabul edilen bu bir boyutlu modeller ilk aşamada interpolasyon teknikleri ile bölge genelindeki derin yapıları kapsayan üç boyutlu modele dönüştürülmektedir. Sonraki aşamada daha sığ yapıların dikkate alınması, özellikle İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından yapılmış olan jeofizik ve jeoteknik çalışmalardan elde edilen sismik profil, kuyu logu ve PS Loglama verilerinin üç boyutlu model üzerine işlenmesi ile İstanbul'daki yerel basenlerin modellenmesi yapılacaktır.

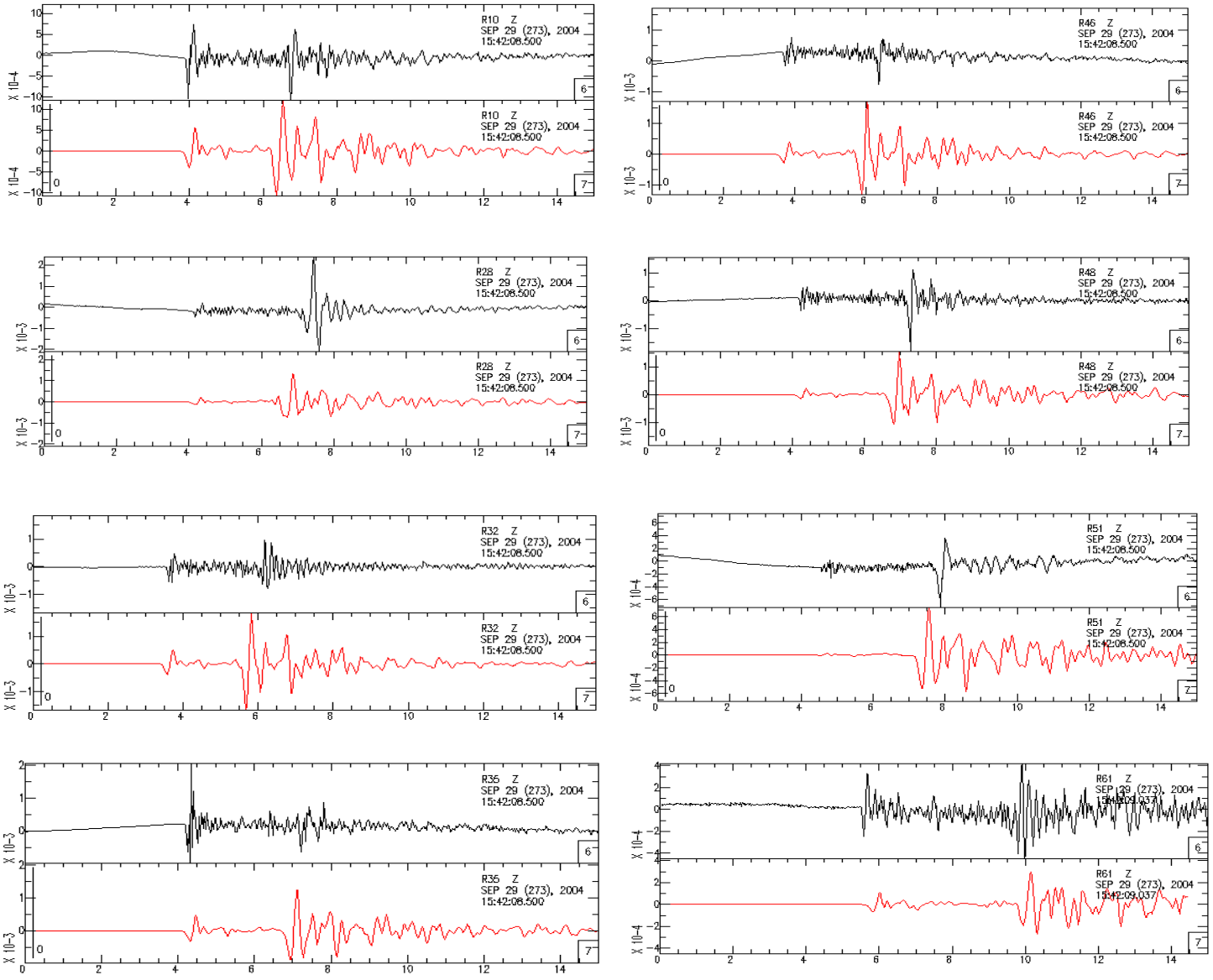
3. SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan referans depremlerden 29.09.2004 Çınarcık depremine ait benzetimler 35m grid aralığıyla 56kmx43kmx35km hacimde 2.0 Hz frekansa kadar üretilecek yapay veriler için uygulanmıştır. Tablo 1.'de gösterilen giriş parametreleri kullanılarak her bir kuvvetli yer hareketi istasyonu için yapay dalga formları üretilmiş ve istasyonlara ait gerçek veri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Kullanılan kaynak ve hesaplama parametreleri

Derinlik (km)	9.6	Hacim (km)	56x43x35
Sismik Moment (dyn.cm)	10^{22}	Grid aralığı (m)	35
Doğrultu Açısı (^{o})	112	Maksimum Frekans (Hz)	2.0
Dalım Açısı (^{o})	90	Grid nokta sayısı	$1.2x10^8$
Kayma Açısı (^{o})	108	CPU time (saniye)	38443
Minimum Vs (m/s)	1310	(örgü iyileştirm ile)	

Yapay ve gözlemsel veriler kıyaslandığında, dalga formlarının ve genliklerin birbirleriyle örtüştüğü görülmektedir. Ancak kullanılan kabuk-hız modelinde sığ derinliklerde düşük hız tabakalarının yer almamasından dolayı, üretilen yapay verilerin gerçek verilere göre zaman zaman daha erken P ve S varışları gözlenmektedir (Şekil 5). Bu durumda, kullanılmakta modelin yüzeye yakın derinliklerine, İstanbul'da oldukça düşük hızlı sedimentler içeren basen yapılarının eklenmesi ile dalga formlarının birbiriyle uyumunun arttırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca, geliştirilmekte olan üç boyutlu hız modelinin, çalışma alanı için bir başlangıç modeli olması ve ileride yapılacak benzer çalışmalar için bir taban oluşturması hedeflenmektedir.



Şekil 5. Gözlemsel (siyah) ve yapay (kımızı) dalga formlarının karşılaştırılması

TEŞEKKÜR
Bu araştırmada yer alan nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi ile İTÜ Yüksek Başarımlı hesaplama merkezlerinde gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Aagaard, B., T. Brocher, D. Dreger, A. Frankel, R. Graves, S. Harmsen, S. Larsen, K. McCandless, S. Nilsson, N. A. Petersson, A. Rodgers, B. Sjogreen and M. L. Zoback (2008), Ground motion modeling of the 1906 San Francisco earthquake II: Ground motion estimates for the 1906 earthquake and scenario events, Bull. Seism. Soc. Amer., 98, 1012-104

Bayrakçı, G. (2009), Hétérogénéité 3D de la croûte supérieure sous la Mer de Marmara : Tomographie sur une grille de sismomètres fond de mer et de profils de tirs, Doktora Tezi, Équipe de sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris

Bulut,F. , Bohnhoff M., Ellsworth W. L., Aktar M. and Dresen G. (2009), Microseismicity at the North Anatolian Fault in the Sea of Marmara Offshore Istanbul, Journal of Geophys. Res. doi: 10.1029/2008JB006244

Karabulut, H., M. Bouin, M. Bouchon, M. Dietrich, C. Cornou, and M. Aktar (2002), The seismicity in the Eastern Marmara Sea after the 17 August 1999 Izmit Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 92, 382– 393.

Lay,T., Wallace, T.C., Modern Global Seismology, Academic Press

Le Pichon, X., et al. (2001), The active Main Marmara Fault, Earth Planet. Sci. Lett., 192, 595– 616.

Nilsson, S., N.A. Petersson, B. Sjogreen, H.-O. Kreiss, (2007), Stable difference approximations for the elastic wave equation in second order formulation, SIAM J. Numer. Anal. v. 45, pp 1902-1936

Olsen, K. B. (2000), Site Amplification in the Los Angeles Basin from Three-Dimensional Modeling of Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, 90, 6B, pp. S77–S94.

Petersson, N. A., B. Sjogreen (2009), An EnergyAbsorbing Far-Field Boundary Condition for the Elastic Wave Equation**,** LLNL-JRNL-405423, Comm. Comput. Phys. v. 6, no. 3, pp. 483-508.

Rodgers, A., A. Petersson, S. Nilsson, B. Sjogreen and K. McCandless (2008). Broadband Waveform Modeling of Moderate Earthquakes in the San Francisco Bay Area To Evaluate the USGS 3D Seismic Velocity Model, Bull. Seism. Soc. Am., 98, 969-988.

Zor, B. E., Özalaybey, S., Gürbüz, C. (2006), The crustal structure of the Eastern Marmara Region (Turkey) by teleseismic receiver functions, Geophysical Journal İnt., Vol. 1365-246X, p. 10.111.