

ARMUTLU YARIMADASI MANYETOTELÜRİK VERİSİNDEKİ ÜÇ BOYUTLU DENİZ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

MODELING THE THREE DIMENSIONAL OCEAN EFFECT ON MAGNETOTELLURIC DATA AT ARMUTLU PENINSULA

S. Bülent TANK¹

¹*Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve D. A. E., Çengelköy, İstanbul, Türkiye*

Yayına Geliş (Received): 15.06.10, Yayına Kabul (Accepted): 24.12.10

ÖZ:Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kesiminde gerçekleştirilen manyetotelürük ölçümlerde toplanılan verinin ve veriye ait iki-boyutlu (2B) analizlerin, yüksek elektrik iletkenliğe sahip Marmara Denizi'nden kaynaklanan deniz etkisine maruz kalacakları gözönünde bulundurulurken, etkinin boyutunu tespit etmek üzere, iki-boyutlu (2B) ve üç-boyutlu (3B) düz çözüm denemeleri yapılmıştır. Buna göre Armutlu Yarımadası'nın batı kesiminde iletkenliği etkileyebilecek unsurlar sentetik yer modelleri oluşturularak sınanmışlardır. Sonuç olarak, test edilen geometride, 2B ters çözüm analizlerinin doğruluğunu arttırmak için, deniz etkisini baskın biçimde taşıdığı saptanan, **E**-polarizasyonu verisi yerine ağırlıklı olarak **B**-polarizasyonu verisinin kullanılması gerekmektedir.

Anahtar kelimeler: Kuzey Anadolu Fayı, Düz çözüm, Manyetotelürük yöntem, Elektrik öz direnç, Boyutluluk

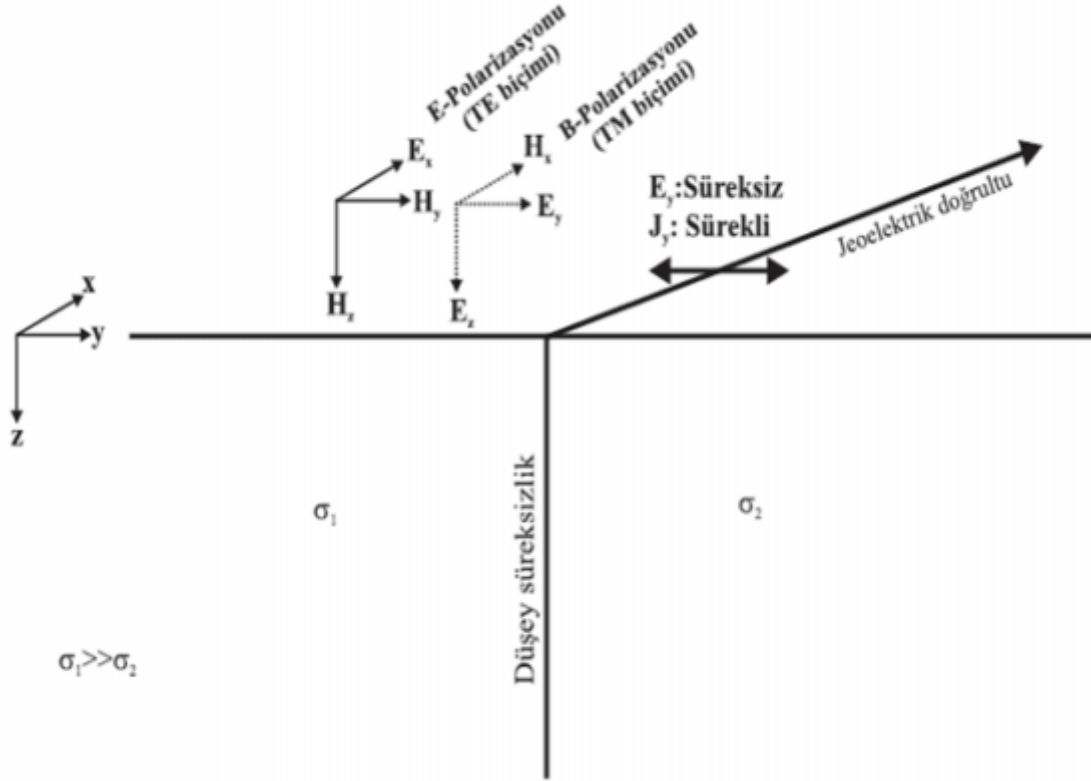
ABSTRACT: Magnetotelluric data collected at the western part of the North Anatolian Fault Zone and the two-dimensional analysis associated with them, are likely to be influenced by the "ocean effect". Two and three dimensional forward modeling tests were performed at a geometry that is representing the western edge of the Armutlu Peninsula. The results following these tests suggested that the two dimensional inversions should depend on **B**-polarization rather than **E**-polarization for Armutlu Peninsula geometry.

Key words: North Anatolian Fault, Forward modeling, Magnetotellurics, Electrical resistivity, Dimensionality

GİRİŞ

Günümüzde manyetotelürük (MT) verilerinin 2B ters çözüm yöntemleri kullanılarak değerlendirilmesi olağan bir hal almıştır. Arazi çalışmalarında toplanan verilerin değerlendirilmeleri esnasında yaygın olarak 2B ters çözüm yöntemleri (Ogawa ve Uchida, 1996; deGroot-Hedlin ve Constable, 1990; Siripunvaraporn ve Egbert, 2000; Rodi ve Mackie, 2001) kullanılmakla birlikte toplanılan MT verileri çoğunlukla 3B'lu özellikler göstermektedir (Ledo, 2005). Bu sebepten

ötürü gerçekleştirilen 2B analizlerde çeşitli sınırlamalar gözlenebilir. Sınırlamalar daha çok, **E** ve **B**-polarizasyonlarındaki (uçlaşmalarındaki) (Şekil 1) değişime, kullanılan frekans aralığının etkisine ve verinin toplandığı istasyonların konumlarına bağlıdır. Bazı araştırmacılar bu sınırlamaların üstesinden gelmek için yalnızca **B**-polarizasyonu (uçlaşması) kullanımını uygun bulmaktadırlar (Ting ve Hohmann, 1981; Wannamaker ve diğ., 1991).



Şekil 1: Düsey bir süreksizlik düzlemi ile ikiye bölünmüş yer modeli. Süreksizliğin her iki tarafında elektriksel iletkenlik değerleri birbirlerinden farklıdır ve süreksizlik x yönüne doğru devam etmektedir. Bu yer modelinde elektromanyetik alanların birbirlerinden bağımsız iki ayrı biçime (moda) ayrıldığı gözlenebilir. Bunlar; elektrik alanının doğrultuya paralel olduğu kabul edilen E-polarizasyonu (TE biçimi) ve manyetik alanın doğrultuya paralel olduğu kabul edilen B-polarizasyonudur (TE biçimi). Bu şekil Simpson ve Bahr (2005)'dan alınmıştır.

Figure 1. Earth model divided by a vertical discontinuity. The electrical conductivity on both sides of the discontinuity have different values and the discontinuity has a strike in the x direction. In this earth model, the electromagnetic fields are separated into two modes. These are E-polarization (TE mode) where the electric field is parallel to the strike and B-polarization (TM mode) where the magnetic field is parallel to the strike (redrawn from Simpson and Bahr, 2005).

İki boyutlu analizde karşılaşılan problemlerin doğurduğu etkiler 3B düz çözüm çalışmaları kullanılarak belirli bir oranda tanımlanabilmektedir. Örneğin, Park ve Mackie (1997) 3B analizlerinde yüzeyde mostra veren temel kayayı, kendisine dik yönde doğrultuya sahip sedimenter yapıyla çevrelemişler ve takip eden analizlerini bu yönde gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuca göre 2B analizin mümkün olduğunu ancak bu analizin durumların (modların) kullanımının frekans aralığına ve konuma bağlı olduğuna işaret etmişlerdir. Benzer şekilde Ledo ve diğ. (2002) sentetik olarak bir profil boyunca oluşturdukları manyetotelürik verisine, 2B analiz uyguladıklarında, profilin altında 3B'luluğa sebep olan iletken bir yapının bulunması ve bu yapının doğrultusunun boyunun nüfuz derinliğinin yarısına ulaşması durumunda, sınırlı uzunluktaki doğrultu veren

yapıların etkilerinin belirgin olmadığını gözlemlemişlerdir.

Bu makalede, 2B ve 3B düz çözüm yöntemlerinden faydalanarak sentetik olarak oluşturulmuş ve çok boyutluluk gösteren manyetotelürik veri, Armutlu Yarımadası'nın sunduğu elektromanyetik yapı göz önüne alınarak analiz edilmiştir. Söz konusu 2B ve 3B düz çözüm denemelerinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmayı gerçekleştirmekteki esas amaç 2B ters çözüme tabi tutulacak olan 3B arazi verisinin iyileştirilmesine yöneliktir.

MANYETOTELÜRİK YÖNTEMİ VE BOYUTLULUK KAVRAMI

Manyetotelürik (MT) yöntem, doğada geniş bir spektrum (dalga kuşağı) aralığında gözlemlenebilen birincil jeomanyetik değişimlerle, bu değişimlerin

Dünya'nın içinde endüksiyon (irgitim) prensiplerine uygun şekilde oluşturdukları ikincil elektromanyetik alanları kaynak olarak kullanan pasif bir jeofizik araştırma tekniğidir. Akım kaynağını, kondüksiyon (iletim) prensiplerine uygun bir şekilde yer içine enjekte edildiği aktif yer-elektrik tekniklerden farklıdır. Aslında MT ve bahsi geçen yer-elektrik yöntemler arasında resmetmeye çalıştıkları fiziksel parametreden (elektrik özdirenç) başka ortak nokta yoktur. Bu şekilde incelendiğinde, MT daha çok jeomanyetik derinlik sondajı yöntemine benzemektedir (Vozoff, 1972; Simpson ve Bahr, 2005).

MT yönteminde atmosferin tabakalarından biri olan iyonosferin bir düzlem dalga kaynağı olarak davrandığı kabul edilir. İyonosferden geldiği varsayılan düzlem dalgalar yeryüzüne ulaştıklarında ve yerin içine nüfuz etmeye başladıklarında ortamın özdirencine bağlı olarak soğurlurlar. Bu aşamada ortamın özdirenci ve düzlem dalganın frekansı, dalganın ne kadar derine ulaşabileceğini belirleyen fiziksel parametrelerdir. Bu olgu “nüfuz derinliği” olarak bilinir ve bir elektromanyetik teknik olan MT yöntemine temel teşkil eder. 1950’li yılların başlarında Tikhanov (1950;1986), Rikitake (1950) ve Cagniard (1953) yeryüzünün herhangi bir noktasında elektrik ve ona ortogonal (dik) yönde gelişen manyetik alan bileşenlerindeki değişimlerin, birbirlerine senkronize edilerek (eşzamanlandırılarak) kaydedildiklerinde, elektrik ve manyetik alan bileşenleri arasında kompleks (karışık) oranların (elektromanyetik empedansların (dirişimlerin) tanımlanabileceğine işaret etmişlerdir. Bu oranlardan yola çıkarak farklı frekanslar için genlik (elektrik özdirenç) ve faz gibi fiziksel parametreler hesaplanabilmektedir. Genel olarak tüm elektromanyetik yöntemlerde olduğu gibi yüksek frekanslar sıg yapılar hakkında bilgi sağlarken, alçak frekanslar derinlerden bilgi edinmemize olanak vermektedir. Günümüzde elektrik ve manyetik alanlar arasındaki senkronizasyon (eşzamanlama) “Global Positioning System” (GPS) teknolojisi kullanılarak yapılmaktadır.

Farklı frekanslarda hesaplanan empedanslar rank'i 2 olan ve 2 x 2 boyutlarında bir empedans tensörü (direnç gereyi) olarak tanımlanırlar. Empedans tensörleri yeraltının göstereceği boyutluluğa bağlı olarak üç farklı şekil alabilirler. Bunlar sırasıyla bir-boyutlu (1B), iki-boyutlu (2B) ve üç-boyutlu (3B) empedans tensörleri olarak adlandırılırlar. Bir-boyutlu yer modelinde özdirencin sadece derinliğe bağlı olarak değişim gösterdiği varsayılır. Bir başka deyişle, diyagonal (köşegenel) olmayan iki kompleks empedans tensör (karışık direnç gereği) elemanı eşit büyüklükte değer alabilir ve ters işaretlidirler. İki boyutlu durumda ise (diyagonal (köşegenel) olmayan) bu elemanlar birbirlerinden farklı kompleks (karışık) değerlere sahip olabilirler. Bir ve iki boyutlu empedans tensörlerinde diyagonal (köşegenel) elemanlar sıfır

(veya sıfıra çok yakın) değerler alabilirler. Son olarak üç-boyutlu yer modelini tanımlayan tensörde tüm elemanlar birbirlerinden farklı ve kompleks değerler alabilirler.

MT yönteminde elektromanyetik dalganın yer içine nüfuzu tanımlanırken difüzyon (soğrulma) denklemi kullanılmaktadır. Bu deklemler Maxwell denklemlerinden elde edilir (Kaufman ve Keller, 1986; Hohmann, 1983) ve verilerin analizi hangi boyutta yapıyorsa ona göre biçimlenir. İki boyutlu çözümleme düşünüldüğünde difüzyon denklemi birbirlerinden bağımsız iki farklı durumda (modda) incelenebilir. Bu durumlar **E**-polarizasyonu ve **B**-polarizasyonu olarak isimlendirilirler. İki boyutlu yer modelinde yeraltında düşey bir süreksizliğin olduğu ve bu süreksizliğin yatay yönde bir doğrultu boyunca uzandığı varsayılırsa, elektrik alanının söz konusu doğrultuya paralel olduğu hal **E**-polarizasyonunu tanımlar. Bilimsel yazında **E**-polarizasyonu TE (transvers elektrik durumu) olarak da karşımıza çıkabilmektedir. Benzer şekilde **B**-polarizasyonu halinde (TM: transvers manyetik durumu) ise manyetik alanın örneğimizdeki doğrultuya paralel yönde olduğu kabul edilmektedir (Şekil 1).

MANYETOTELÜRİK VERİ

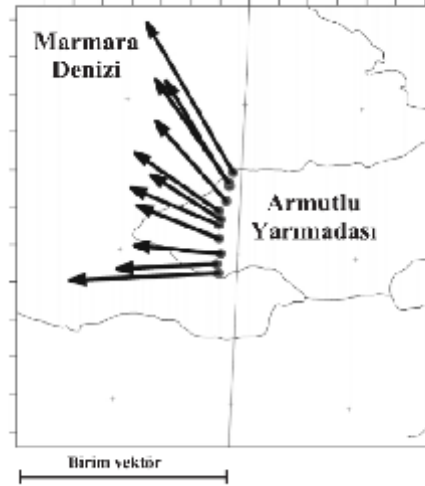
Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Tokyo Teknoloji Enstitüsü ve Kyoto Üniversitesi'nin ortaklaşa yürüttüğü Türk-Japon projesi boyunca 1999-2005 yılları arasında Kuzey Anadolu Fayı'nın (KAF) batı kesiminde gerçekleştirilen arazi çalışmaları sırasında, batıda Armutlu Yarımadası'nın batı ucundan, doğuda Düzce'yi içine alan bir bölgede kuzey-güney yönelimli 10 profil üzerinde, 250'nin üzerinde ölçüm noktasında genişbant (320 Hz - 0.0005 Hz) manyetotelürük verileri toplanmıştır. Şekil 2'de Armutlu Yarımadası üzerindeki ölçü noktalarının bazılarının konumları resmedilmektedir. Bu verilerin esas toplanma amacı KAF sisteminin batı kısmında sismojenik zonuna karşılık gelen derinliklerdeki (yaklaşık 10-15 km) elektriksel özdirenç yapısı hakkında fikir sahibi olmaktır (Honkura ve diğ., 2000, Oshiman ve diğ., 2002, Tank ve diğ., 2003, 2005; Kaya ve diğ., 2009; Tank ve diğ., 2010).

ARMUTLU MT PROFİLİ VE MARMARA DENİZİ'NİN ETKİSİ:

Endüksiyon okları, yer yüzeyine yatay manyetik alan bileşenlerindeki (H_x veya H_y) değişimlerin, yeryüzüne dik yöndeki manyetik alan bileşenindeki (H_z) değişimlere oranı olarak tanımlanabilirler. Bu okların farklı frekanslar için çizdirilmeleri, çalışmanın yürütüldüğü sahada yer altındaki iletkenlerin konumlarını ve ne kadar iletken olduklarını belirlenmesinde etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadırlar. Şekil 2'de Armutlu Yarımadası'nın batı kesiminde 11 MT ölçüm noktasından (gri daireler) oluşan profil üzerinde 0.01 Hz

frekansındaki endüksiyon oklarının gerçel kısımları (oklar iletkeni gösterir şekilde) Parkinson tarzı (Parkinson, 1959) benimsenerek çizdirilmiştir. Şekil 2'deki endüksiyon oklarının yöneliminden de

anlaşılabileceği gibi bu profil için Marmara Denizi'nin iletkenliği sadece profilin kuzey ve güney kesimlerinde değil, profilin batısında da etkili olmaktadır.



Şekil 2: Armutlu Yarımadası'nın batı ucunda bulunan profil için 0.01 Hz frekansında endüksiyon oklarının gerçel bileşenleri (Parkinson tarzı). Gerçel bileşeni gösteren oklar, iletken Marmara Denizi'ni işaret edecek şekilde yönelim göstermektedir.

Figure 2: Real component of induction arrows drawn at 0.01 Hz (in Parkinson convention) for a profile located at the western edge of Armutlu Peninsula. All real arrows are pointing to the conductive Marmara Sea.

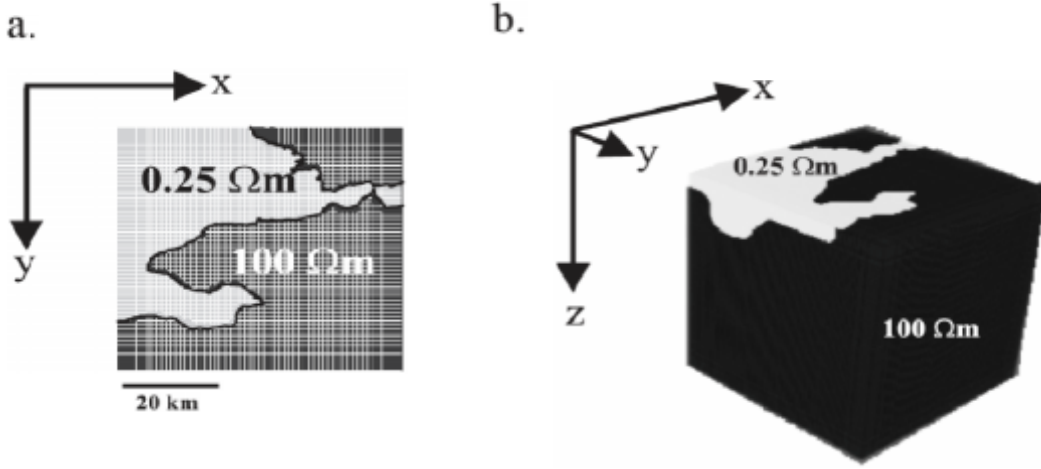
Elektromanyetik çalışmalarda "deniz etkisi veya kıyı etkisi" (ocean effect ya da coast effect) tabir edilen bu etkiyi yok etmenin etkin yolu modelleme aşamasında bu bölgeyi sabit bir iletken olarak tanımlamakla mümkündür. Açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, 2B analiz sırasında deniz etkisini model içerisine sabit iletken(ler) yerleştirerek yok etmek mümkündür, ancak şekildeki örneğimizde olduğu gibi 3B deniz etkisini 2B analizde gidermek her zaman mümkün değildir. Bu sebepten ötürü deniz etkisinin boyutunu anlamak ve toplanılan arazi verilerinin hataya mahal vermeyecek bir şekilde analiz edilebilmesi sağlamak için 3B modelleme yapılması gerekmektedir.

İKİ (2B) VE ÜÇ BOYUTLU (3B) DÜZ ÇÖZÜM:

Bu çalışmada iki-boyutlu (2B) düz çözüm deneyi esnasında 2B model tepkileri, Ogawa ve Uchida (1996) tarafından geliştirilen program kullanılarak hesap edilmiştir. Ogawa ve Uchida (1996) programı sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. Öte yandan üç-boyutlu (3B) düz çözüm deneyi esnasında ise model tepkileri Mackie ve diğ. (1993) tarafından geliştirilmiş olan 3B düz çözüm programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu program Maxwell denklemlerinin integral

hallerini temel almaktadır ve manyetik alan yaklaşımlarını sonlu farklar yöntemi kullanarak ortaya çıkarmaktadır. Program sınır koşulları problemini 3. boyuttaki sınırlara 2B modeller koyarak çözmektedir. Yer modeli, boyutları değiştirilebilen dikdörtgen bloklara bölünmüştür. Manyetik alan (\mathbf{H}) blok kenarlarında, elektrik alan (\mathbf{E}) ve akım yoğunluğu (\mathbf{J}) ise blok yüzlerine normal olacak şekilde oluşturulmuşlardır (Mackie ve diğ., 1993).

Bu çalışmada 50x50x50'lik bir ağ (grid) oluşturulmuş, x ve y yönündeki mesafe yaklaşık 50 km olarak belirlenmiştir. Marmara Denizi'nin batimetri bilgisi Armijo ve diğ. (2002)'den alınmıştır. Başlangıç modelinde karalar için özdirenç değeri 100 Ωm (yeşil, Şekil 3a), Marmara Denizi'ni temsilen ise 0.25 Ωm (Siyah, Şekil 3a) alınmıştır. Bu çalışmada x bileşeni doğu yönüne karşılık gelmektedir. Armutlu Yarımadası doğu-batı yönelimindedir. Diğer bir deyişle bu çalışmada x bileşeninin yönünün E-polarizasyonuna (TE durumu) karşılık geldiği kabul edilmektedir. Şekil 3b'de düz çözümde kullanılan başlangıç modelinin blok diyagramı görülmektedir.

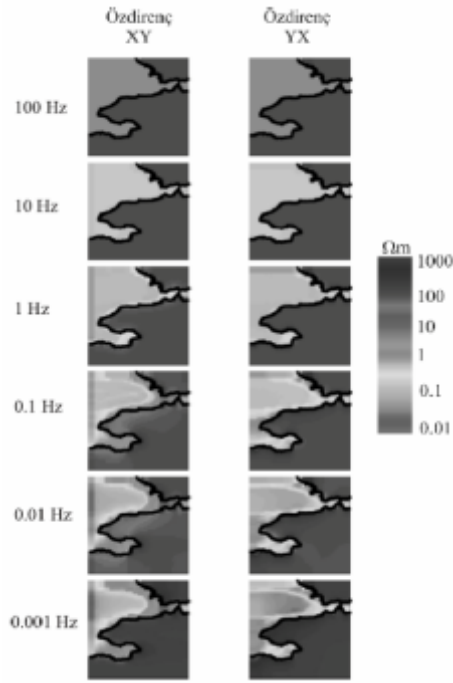


Şekil 3: (a). Düz çözüm başlangıç modelinin yüzey dilimi. Karalar yeşil ($100 \Omega\text{m}$), Marmara Denizi kırmızı ($0.25\Omega\text{m}$) ile gösterilmiştir. (b). Başlangıç modelin blok diyagramı olarak görünüşü. Her iki şekilde x yönü doğu yönüne karşılık gelmektedir.

Figure 3: (a). Surficial slice of the initial model to be used in the forward modeling. Land are painted in green ($100 \Omega\text{m}$) and Marmara Sea in red ($0.25 \Omega\text{m}$). (b). Initial model shown as a block diagram. On both figures x is given as east direction.

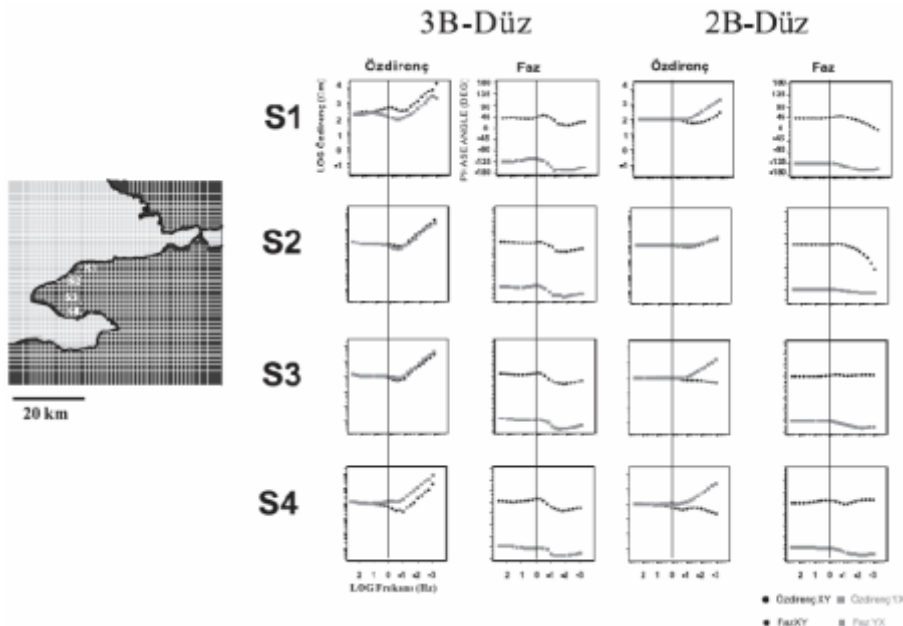
Şekil 4'te, Şekil 3'te tarif edilen başlangıç modelinin 3B düz çözümü sonrasında oluşan genlik tepkisi 6 frekans dilimi **E** ve **B**-polarizasyonları için gösterilmektedir. 100 Hz yüzeye yakın dilimleri, 0.001 Hz ise hesaplanmış en derin dilimi resmetmektedir. Armutlu Yarımadası'nın batı ucuna karşılık gelen bölümlerde kara için başlangıçta $100 \Omega\text{m}$ olarak girilen özdirenç değerinin düz çözüm sonucunda da $100 \Omega\text{m}$ olarak kalması beklenirken, özellikle **E**-polarizasyonunun 0.1 Hz ve 0.01 Hz dilimlerinde, daha düşük özdirenç değerleri elde edilmiştir. Düz çözüm sonuçları daha derin bir dilim olan 0.001 Hz'te ise olması gerektiğinden daha dirençli bir yapının varlığını işaret etmiştir. Armutlu Yarımadası'nın batı ucunda, yüzeyde iletken bir kütle olarak bulunan Marmara Denizi sentetik olarak oluşturduğumuz MT verisinde sığ bölgelerde olduğundan daha iletken, derinde ise olduğundan daha yüksek özdirençli halde gözükmesine sebep olmuştur.

Şekil 5'te, Armutlu Yarımadası'nın batı ucuna konumlandırılan 4 sentetik MT istasyonunun (S1-S4) özdirenç ve faz eğrileri 3B ve 2B durumlar için kıyaslanmıştır. Söz konusu etki en belirgin şekilde S3-S4 istasyonlarında gözlenebilmektedir. Bu istasyonda 3B olarak hesaplanmış ve çizdirilmiş özdirenç eğrileri her iki bileşen için yaklaşık olarak 0.1 Hz'den aşağıdaki değerlerde $100 \Omega\text{m}$ 'den daha özdirençli bir yapı varmış gibi bir etki oluşturmaktadır. Benzer şekilde 3B durum için faz bilgisi incelendiğinde özdirençli yapının varlığını düşündürecek bir etki gözlenmektedir. Öte yandan 2B duruma bakıldığında durumlardan biri (**B**-polarizasyonu) özdirenç ve faz eğrilerinde 3B'a benzer tepki vermesine rağmen, diğer durum (**E**-polarizasyonu) 3B'lu körfez yapısı nedeniyle oluşan etkiyi, belirli bir frekanstan sonra özdirençin daha yükselmesini hissedememiştir. Bu tamamıyla yüzeyde düşük özdirençli bir kütle olarak bulunan Marmara Denizi'nin S3 ve S4 MT istasyonlarındaki elektromanyetik alan üzerinde gerçekleştirdiği etkiden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4: Şekil 3'te tarif edilmiş başlangıç modelinin 3B düz çözüm sonucu oluşan model tepkisinin genlik için 6 farklı frekans dilimi göstermektedir. XY yöneliminin 0.1-0.01 Hz'lik dilimlerinde Armutlu Yarımadası'nı temsil eden bölgede daha iletken olarak başlayan etki, daha derin dilim olan 0.001 Hz'lik dilimde aynı bölge için olması gerektiğinden daha özdirençli olarak gözlenebilmektedir.

Figure 4: Amplitude response of the initial model described on Figure 3 at 6 frequency slices. The effect is most clear at the 0.1-0.01 Hz slices of the XY component as the region gets more conductive. At a deeper slice (0.001 Hz), however the resistivity values tend to increase.



Şekil 5: 3B ve 2B'lu modelleme denemeleri için sentetik olarak hesaplanmış dört istasyondaki (S1-S4) özdirenç ve faz eğrilerinin XY ve YX bileşenleri grafiklenmiştir. S3 ve S4 istasyonlarının 3B'lu haldeki özdirenç ve faz eğrileriyle 2B'lu haldeki eğrileri karşılaştırıldıklarında XY bileşeninin 2B'lu durumda duyarsız olduğu görülebilmektedir.

Figure 5: XY and YX components of resistivity and phase values at four synthetically calculated site (S1-S4) for 3D and 2D cases. When the resistivity and phase curves are compared for both cases, especially at sites S3 and S4, it can be seen that the XY component in 2D case is senseless.

Elde edilen bu sonuca dayanarak, Ting ve Hohmann, (1981), Wannamaker ve diğ., (1991) işaret ettiği şekilde Armutlu Yarımadası'nın batı ucunda deniz etkisine maruz kalan batı kesiminde 2B analiz uygularken E-polarizasyonunun (uçlaşmasının) kullanımında dikkatli olunması ve ağırlığın B-polarizasyonuna verilmesi gerekmektedir.

SONUÇ

Manyetotelürük verilerinin analizinde deniz etkisi dikkat edilmesi gereken bir unsurdur ve sonuç modelleri oluşturulurken hesaba katılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kesiminde yürütülen manyetotelürük çalışmaları sırasında Marmara Denizi'ne yakın ölçü noktalarında elde edilen veriler üzerindeki etkinin miktarını tespit etmek için 2B ve 3B düz çözüm deneyi gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar deniz etkisinin Armutlu Yarımadası'nın batı ucunda, E-polarizasyonunun (uçlaşmasının) belirli bir frekans aralığında (0.1 – 0.01 Hz) etkin olmaya başladığı tespit edilmiştir. B-polarizasyonu (uçlaşması) durumunda ise 2B ve 3B düz çözüm sonuçlarının benzer veriyi ürettiği saptanmış, bu nedenle üç boyutluluk sunan bu alanda deniz etkisinden en az etkilenen, B-polarizasyonu (uçlaşması) arazi verisi kullanılarak 2B ters çözüm yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

SUMMARY

Synthetic magnetotelluric data were produced to test the influence of the ocean effect at a geometry that is representing the western edge of Armutlu peninsula. First 2D and then 3D forward modeling attempts were performed and compared at 4 (sites S1 - S4) artificial sites. The results of this comparison indicate that E-polarization data (especially between 0.1 to 0.01 Hz) were heavily influenced by the ocean effect. On the contrary B-polarization data seem to be more robust against such influences.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Armijo, R., B. Meyer, S. Navarro, G. King, A. Barka, 2002.** Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: a clue to propagation processes of the North Anatolian Fault? *Terra Nova*, 14, No. 2, 80-86.
- Cagniard, L., 1953.** Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting: *Geophysics*, 18, p. 605.
- de Groot-Hedlin, C.D. and S.C. Constable, 1990.** Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, 55, 1613-1624.

- Hohmann, G.W., 1983.** Three-dimensional EM modeling, *Geophysical Surveys*, 6, 27-53.
- Honkura, Y., A.M. Işıkara, N. Oshiman, A. Ito, B. Üçer, S. Barış, M.K. Tunçer, M. Matsushima, R. Pektaş, C. Çelik, S.B. Tank, F. Takahashi, M.Nakanishi, R. Yoshimura, Y. Ikeda and T. Komut, 2000.** Preliminary results of multidisciplinary observations before, during and after the Kocaeli (Izmit) earthquake in the western part of the North Anatolian Fault Zone, *Earth Planets Space*, 52, 293-298.
- Kaya, T., Tank, S.B., Tunçer M.K., Rokityansky I.I., Tolak I., and Savchenko T., 2009.** Asperity along the North Anatolian Fault imaged by magnetotellurics at Düzce, Turkey, *Earth, Planets and Space*, v61, n 7, p 871-84.
- Kaufman, A.A., and Keller, G.V., 1981.** The Magnetotelluric Sounding Method: Elsevier, Amsterdam.
- Ledo, J., 2005** 2-D Versus 3-D Magnetotelluric Data Interpretation, *Surveys in Geophysics*, 26:511-543.
- Ogawa, Y. and T. Uchida, 1996.** A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, 126, 69-76.
- Oshiman, N., R. Yoshimura, T. Kasaya, Y. Honkura, M. Matsushima, S. Barış, C. Çelik, M.K. Tunçer, and A. M. Işıkara, 2002.** Deep resistivity structure around the fault associated with the 1999 Kocaeli earthquake, Turkey, in *Seismotectonics in Convergent Plate Boundary* (Eds. Y. Fujinawa and A. Yoshida), *Terra Sci. Publ. Company*, 293-303.
- Mackie, R.L., Madden, T.R. and Wannamaker, P.E., 1993.** Three-dimensional magnetotelluric modeling using finite difference equations – Theory and comparisons to integral equation solutions: *Geophysics*, 58, 215-226.
- Park, S.K. and Mackie, R.J., 1997.** Crustal structure at Nanga Parbat, Northern Pakistan, from magnetotelluric soundings, *Geophys. Res. Lett.* 24, 2415-2418.
- Parkinson, W.D., 1959.** Direction of rapid geomagnetic fluctuations, *Geophysical Journal*, 2, 1-14.
- Rikitake, T., 1950.** *Bull. Earthquake Res., Inst. Tokyo Univ.* 28, p45, 219.
- Rodi, W. and Mackie, R.L., 2001.** Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversions, *Geophysics*, 66, 174-187.
- Simpson and Bahr, 2005.** *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000.** An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data, *Geophysics*, 65, 3, 791-803.
- Tank, S.B., Y. Honkura, Y. Ogawa, N. Oshiman, M.K. Tunçer, M. Matsushima, C. Çelik, E. Tolak, and A. M. Işıkara, 2003.** Resistivity structure in the western part of the fault rupture zone associated with the 1999 İzmit earthquake and its seismogenic implication, *Earth Planets Space*, 55, 437-442.

- Tank, S.B., Y. Honkura, Y. Ogawa, M. Matsushima, N. Oshiman, M.K. Tuncer, C. Celik, E. Tolak, A.M. Isikara, 2005.** "Magnetotelluric imaging of the fault rupture area of the 1999 Izmit (Turkey) earthquake", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150, 213, 25.
- Tank, S.B., Y. Honkura, Y. Ogawa, M.K. Tuncer, N. Oshiman, M. Matsushima, E. Tolak, 2010.** Fault Zone Conductors inferred from audio frequency magnetotellurics, *Earth Planets Space*, (yayın aşamasında).
- Tikhonov, A.N., 1950, 1986.** On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust, *Geophysics Reprint Series*, No. 5 Magnetotelluric Methods, p. 2-3.
- Ting, S.C. and Hohmann, G.W., 1981,** Integral Equation Modeling of Three-Dimensional Magnetotelluric Response, *Geophysics* 46, 182-197.
- Vozoff, K., 1972.** The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, *Geophysics*, 37, 98.
- Wannamaker, P.E., Wright, P.M., Zhou, Z.X., Li, X.B., and Zhao, J.X., 1991.** Magnetotelluric transect of long valley caldera-resistivity cross-section, structural implications, and the limits of a 2D analysis, *Geophysics* 56, 926-94.