Yerbilimleri, 2016, 37 (3), 285-305
Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni
Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

Manyetotellürik Veri Üzerindeki Deniz Etkisinin İncelenmesi: Düzce Bölgesi Örneği

Investigation of the Sea Effect On Magnetotelluric Data: An Example from Düzce Region, Turkey

FATİH UZUNCA[1]*, S. BÜLENT TANK[2], TÜLAY KAYA[3], LEVENT GÜLEN[1]

[1]Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Serdivan, Sakarya, Türkiye
[2]Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Çengelköy, İstanbul, Türkiye
[3]Tokyo Teknoloji Enstitüsü, Volkanik Sıvıları Araştırma Merkezi, Meguro-ku, Tokyo, Japonya

Geliş *(received)* : 16 Mart (*March*) 2016
Kabul *(accepted)* : 18 Ekim (*October*) 2016

ÖZ

Bu çalışmada manyetotellürik (MT) veriler üzerindeki deniz etkisinin miktarının belirlenmesi amacıyla Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kısmında Düzce bölgesine karşılık gelen alan temel alınarak düz çözüm çalışması yapılmıştır. Bölgenin tektonik yapısı dikkate alınarak oluşturulan modellerde, deniz için 0.3 Ω-m ve kara için çeşitli modellerde 100 Ω-m, 500 Ω-m ve 1000 Ω-m gibi sabit özdirenç değerleri atanmıştır. Deniz derinliğinin değişimi, fay, sediman ve Karadeniz kıyı şeridinin basit biçimde eklenmesi gibi parametreler de kullanılmıştır. Modellere ait MT tepkileri üç-boyutlu (3B) düz çözüm programı ile elde edilmiştir. Yapılan çalışma kuramsal bir çalışma olup, kuramsal veriler kullanılmıştır. Düz çözümden elde edilen özdirenç eğrileri, endüksiyon (irgitim, tesir) okları ve faz eğrileri karşılaştırılarak deniz etkisinin miktarı tartışılmıştır. Deniz derinliği ve deniz-kara sınırındaki özdirenç farklılığının artması ile MT tepkilerinin bozulmalara uğradığı sonucuna ulaşılmıştır. Deniz etkisinden dolayı **E**-kutuplaşması (transverse electric, TE mode) özdirenç eğrileri **B**-kutuplaşması (transverse magnetic, TM mode) özdirenç eğrilerine göre asıl olması gereken değerden büyük oranda farklı görülmektedir. Gerçek endüksiyon okları ise özdirenç eğrilerinin denizden etkilenmeye başladığı periyotlarda yön değiştirme eğilimi göstermiştir. Denize yakın yerlerde yapılan MT çalışmalarında deniz etkisinin MT tepkisinden giderilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, denize yakın noktalarda yapılabilecek MT ölçümlerine dayanacak modeller geliştirildiğinde, doğru sonuca ulaşılabilmesi bakımından önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Deniz (kıyı) etkisi, Kuzey Anadolu Fayı, Manyetotellürik yöntem.

ABSTRACT

*In this study, it was applied forward modeling to investigate the sea effect on the magnetotelluric (MT) measurements originating from a geometry that is similar to the Düzce area near Black Sea. It was used constant resistivity value for the sea 0.3 Ω-m and for the land 100 Ω-m, 500 Ω-m and 1000 Ω-m in the models while considering also the tectonic features in the area. Additionally, it was used parameters such as; depth, fault, sediments and coast line of the Black Sea. The three-dimensional MT responses were calculated for a number of models. This is a theoretical study based on synthetic data. The resistivity curves, induction arrows and phase curves obtained from models, were compared with each other using templates and the sea effect was discussed. Consequently, when the resistivity contrast between sea-land and the depth of sea are high, MT responses are effected significantly. When compared with **E**-polarization (transverse electric, TE mode) resistivity curves and **B**-polarization (transverse magnetic, TM mode) resistivity curves, **E**-polarization one has more distortion compared to the latter. Real induction arrows change direction beginning from the period when the sea effects on the MT measurements. Therefore, sea effect must be removed from the MT responses, if the study area is near the sea. This study is important in terms of obtaining accurate results when developing models based on MT measurements in coastal areas.*

Keywords: *Sea (coast) effect, North Anatolian Fault, Magnetotelluric method.*

*F. Uzunca
e-posta: fuzunca@live.com

GİRİŞ

Manyetotellürik (MT) yöntem, çeşitli jeolojik ortamlardaki yeraltı yapılarının elektrik iletkenliğinin belirlenmesinde kullanılan bir jeofizik yöntemdir (Rikitake, 1948; Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953). Pasif elektromanyetik yöntemler sınıfına giren MT yöntemi, geniş bir spektrumda gözlemlenebilen birincil jeomanyetik değişimler ve bu değişimlerin endüksiyon prensibine bağlı olarak oluşturduğu ikincil jeomanyetik değişimleri kaynak olarak kullanan bir araştırma tekniğidir (Vozoff, 1972; Simpson ve Bahr, 2005; Tank, 2010). Yöntemin öne çıkan önemli özelliği yeryüzünün sığ derinliklerinden başlayıp bir kaç yüz kilometre derinliklere kadar yeraltı hakkında iyi çözünürlüklü bilgi edinilmesine olanak sağlamasıdır (Vozoff, 1972).

Jeofizik yöntemler sahada uygulanırken çeşitli fiziksel olgulardan (gürültüler, uygulama hataları, bazı jeolojik geometriye sahip kütleler) etkilenirler. MT yönteminin de uygulanması sırasında etkilendiği fiziksel olgular bulunmaktadır. Bu etkiler istasyon civarındaki kültürel gürültüler (rüzgâr, elektrik hatları, boru hatları, hava alanları), yüzeye yakın bölgelerde yer alan ve homojenliği bozan üç boyutlu yapılar ile karmaşık topografya olarak sıralanabilir. Çalışma alanının yakınlarında yüksek iletkenlikli deniz ve okyanus gibi yapıların bulunması durumunda MT verileri ayrıca, iletken su kütlesi ve kara arasında bulunan yüksek özdirenç farklılığından kaynaklanan bir etkiye maruz kalır. Bu etki genel olarak deniz etkisi ya da kıyı etkisi (sea effect ya da coast effect) olarak adlandırılır. Deniz etkisinin MT verilerinden ayırt etmek ve özellikle deniz etkisinin varlığından dolayı derin yapıların iletkenliklerini belirlemek oldukça güçtür (Yang vd., 2010).

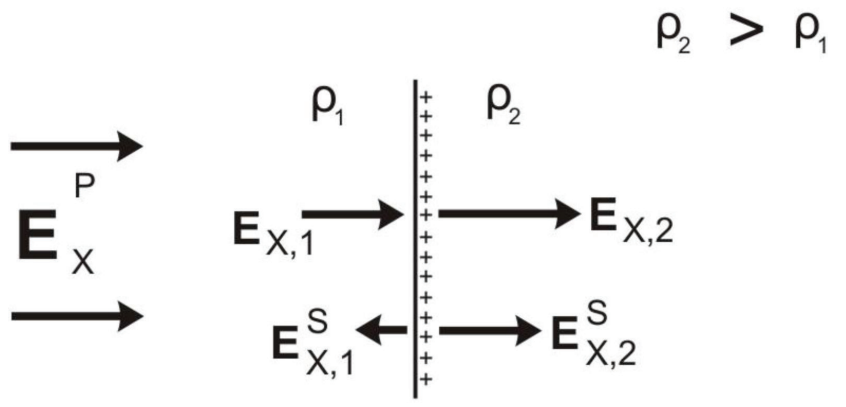
Deniz etkisi birçok çalışmada araştırılmıştır (Parkinson, 1959; Rikitake, 1959; Parkinson,1962; Jones, 1983; Singh vd., 1995; Pous vd., 2002; Santos vd., 2006; Constable vd., 2009; Han vd., 2009; Tank, 2010; Worzewski vd., 2010; Key ve Constable, 2011; Kaya vd., 2013). Deniz etkisinin düzeltilmesi için ise Santos vd. (1999), Santos vd. (2001), Nam vd. (2008), Yang vd. (2010) tarafından çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

MT istasyonları, yüksek özdirenç farklılığı bulunan deniz-kara sınırına yakın bir bölgede ise, istasyonlardan toplanan veriler, ilgili istasyonların deniz-kara sınırına yakınlıkları oranında etkilenirler (Yang vd., 2010). Deniz gibi çok iletken bir yapı ile yalıtkan bir yapıyı ayıran ara yüzeye gelen birincil elektrik alan alternatif yüzey yükleri oluşturur (Şekil 1). Yüzey yükleri ikincil elektrik alanları oluşturur. Oluşan ikincil alanlar, iletken kısımda toplam elektrik alanı azaltırken, yalıtkan kısımda toplam elektrik alanı arttırır (Jiracek vd., 1995). Elektromanyetik alanın nüfuz derinliği, yalıtkan kısımda iletken kısma göre daha fazladır. Başka bir ifade ile akım yoğunluğu iletken kısımda daha büyüktür (Şekil 2c ve d). Akımın iletken-yalıtkan sınırına yaklaştıkça yataylığını kaybetmesi (Şekil 2c), bu sınıra yakın belirli bir uzaklıkta bulunan MT istasyonunda toplanan veriyi etkiler (Şekil 2a).

Derin yapıların özdirenç modellerinden hareketle gömülü süreksizliklerin kestirilmesi tektonik açıdan önemlidir. MT yöntemi derin yapıların özdirenç değerlerinin saptanmasında iyi sonuçlar verebilmektedir. Bununla birlikte denize yakın bölgelerde yöntemin uygulanması sırasında deniz etkisi dikkate alınmalıdır. Türkiye üç tarafı denizlerle çevrili olması nedeniyle denize yakın sahalarda yapılacak manyetotellürik çalışmalarda, verilerin denizden etkilenmesi kaçınılmazdır. Bu çalışmada, Deniz etkisinin miktarını belirlemek için Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kısmında Düzce ve çevresine benzeyen bir geometri temel alınarak Mackie vd. (1993) algoritmasını içeren WinGLink® programı ile üç-boyutlu düz çözüm çalışması yapılmıştır. Çalışma kuramsal bir çalışma olup, kuramsal veriler kullanılmıştır. Basit bir modelden başlanıp Düzce bölgesini temsil eden model yapılarına (faylar, özdirenç değerleri, sediman, basitleştirilmiş kıyı çizgisi) göre hesaplanan özdirenç eğrileri, endüksiyon okları ve faz eğrileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre toplanan verilerin ait olduğu istasyonun deniz-kara sınırına yakınlığı oranında denizden etkilendiği saptanmıştır. Bu çalışmanın amacı ileride yapılacak çalışmalara katkı sağlamaktır.

MANYETOTELLÜRİK YÖNTEM

Manyetotellürik (MT) yöntem, yer içinde bulunan ve birincil jeomanyetik değişimlerin oluşturduğu birbirine dik elektrik (**E**, koyu yazım vektör olduğunu simgeler) ve manyetik **(H)** alanlardaki dalgalanmaların yüzeyde ölçülmesi ve belirli veri işlem süreçleri ile yer içindeki elektrik özdirenç (iletkenliğin tersi) dağılımının elde edilmesinde kullanılan bir yöntemdir (Simpson ve Bahr, 2005). Jeofizikte ilk olarak 1950'li yıllarda (Rikitake, 1948; Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953) tarif edilen yöntem, 1800'lü yılların ortalarında geliştirilmiş Maxwell denklemlerini (Maxwell, 1865) temel alır (Vozoff, 1972). MT yöntemi yer içinde birkaç on



Şekil 1. Birincil ve ikincil elektrik alanlar P üst simgesi birincil alan, S üst simgesi ikincil alan Jiracek vd. (1995)'den tekrar çizilmiştir.

Figure 1. Primary and secondary electric fields. Superscript P and S represent primary and secondary electric fields, respectively (redrawn from Jiracek at al.(1995)).

metreden, birkaç yüz kilometreye kadar elektrik özdirenç yapısını çözebilir (Simpson ve Bahr, 2005). Birbirine dik yatay elektrik ve manyetik alan bileşenleri karmaşık empedans gerey (impedance tensor) **(Z)** ile birbirine bağlı olup, Eşitlik 1 dolayısıyla Eşitlik 2 geçerlidir.

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{Z}\ \boldsymbol{H} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{E_x} \\ \boldsymbol{E_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Z_{xx}} & \boldsymbol{Z_{xy}} \\ \boldsymbol{Z_{yx}} & \boldsymbol{Z_{yy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{H_x} \\ \boldsymbol{H_y} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Burada, **E**, elektrik alan (V/m), **H**, manyetik alanı (A/m) gösterir (Simpson ve Bahr, 2005). Homojen ve tekdüze (isotropic) bir ortamda birbirine dik elektrik ve manyetik alanların oranı ile elektromanyetik empedans (bundan böyle sadece empedans olarak adlandırılacaktır) elde edilir. Empedans kullanılarak görünür özdirenç, (ρ_a) Eşitlik 3 ile elde edilir.

$$\rho_a = (\boldsymbol{Z})^2/\mu\,\omega \tag{3}$$

Burada, **Z**, empedans (Ω), μ, manyetik (H/m) ve ω açısal frekanstır (R/Sn) (Vozoff, 1972).

Özdirenç değeri (ρ) söz konusu ortamın bir özelliğidir ancak elektrik ve manyetik alan değerlerinden hesaplanırsa "görünür özdirenç" olarak isimlendirilir ve ölçme ile ilişkilidir (Vozoff, 1972). Empedans gerçek ve sanal kısımlar içerdiğinden faz bilgisi de içerir. Faz, Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanır (Simpson ve Bahr, 2005).

$$\phi = tan^{-1}\left(\frac{Sanal\ \boldsymbol{Z}}{Gerçel\ \boldsymbol{Z}}\right) \tag{4}$$

Yüksek faz değeri iletken yapıları işaret ederken düşük faz değeri yalıtkan yapıları işaret etmektedir (Jiracek vd., 1995).

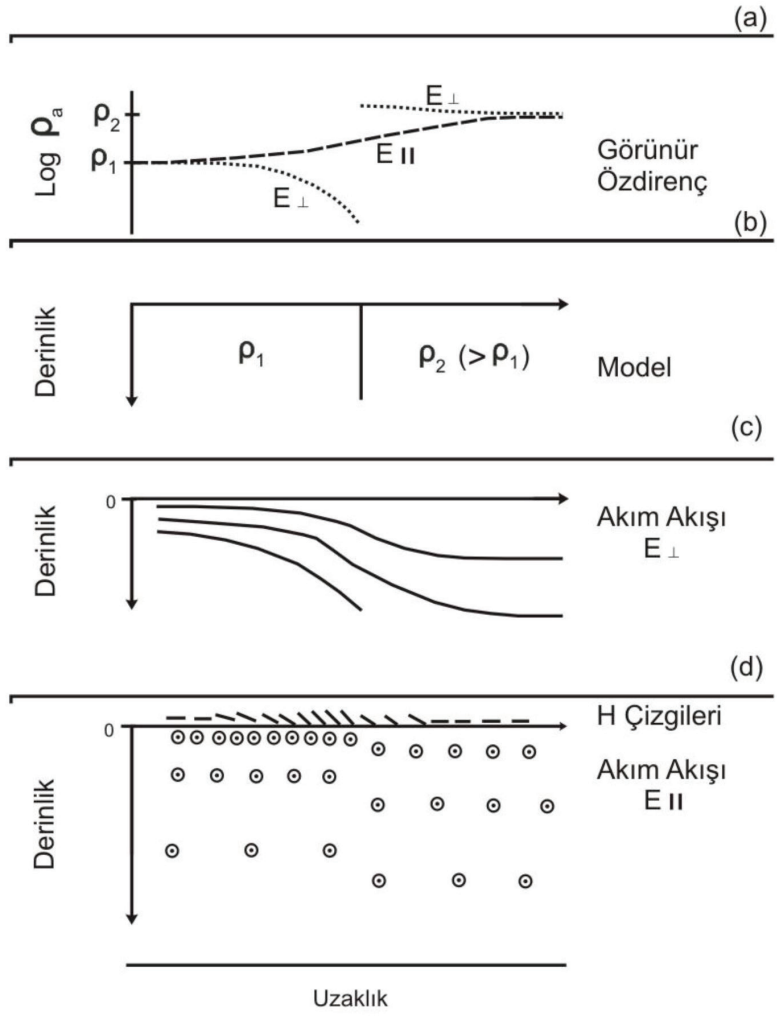
Endüksiyon okları, düşey manyetik alanın yatay manyetik alana oranını temsil eden gerçek kısım ve sanal kısım içeren oklardır. Düşey manyetik alan yanal iletkenlik değişiminden meydana geldiği için endüksiyon okları bu iletkenliğin var olup olmadığını belirlemede kullanılabilir. Bunun için iki yaklaşım vardır. Parkinson (1959) yaklaşımına göre endüksiyon okları iletkeni gösterir. Wiese (1962) yaklaşımına göre ise endüksiyon okları yalıtkanı gösterir. Bu oklar bazı kaynaklarda (Vozoff, 1972; Jiracek vd., 1995; Simpson ve Bahr, 2005) "tipper" terimi ile isimlendirilmiştir. Düşey manyetik alan ve yatay manyetik alan arasında, Eşitlik 5 geçerlidir (Simpson ve Bahr, 2005).

$$\boldsymbol{H_z}(\omega) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{T_x}(\omega) & \boldsymbol{T_y}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{H_x}(\omega) \\ \boldsymbol{H_y}(\omega) \end{bmatrix} \tag{5}$$

Burada, $\mathbf{H_z}$, düşey manyetik alan (A/m), $\mathbf{H_x}$ ve $\mathbf{H_y}$, yatay manyetik alan (A/m), $\mathbf{T_x}$ ve $\mathbf{T_y}$, endüksiyon ok bileşenleri (bilinmeyen karmaşık katsayılar (Vozoff, 1972)) olarak tanımlanır (Simpson ve Bahr, 2005). Endüksiyon oklarının büyüklükleri ise Eşitlik 6 ile verilmektedir.

$$\boldsymbol{T_B} = \left(\boldsymbol{T_{x_r}^2}(\omega) + \boldsymbol{T_{x_i}^2}(\omega) + \boldsymbol{T_{y_r}^2}(\omega) + \boldsymbol{T_{y_i}^2}(\omega)\right)^{(0.5)} \tag{6}$$

Burada, r ve i indisleri bilinmeyen karmaşık katsayıların gerçek ve sanal kısımlarını ifade etmektedir (Vozoff, 1972).



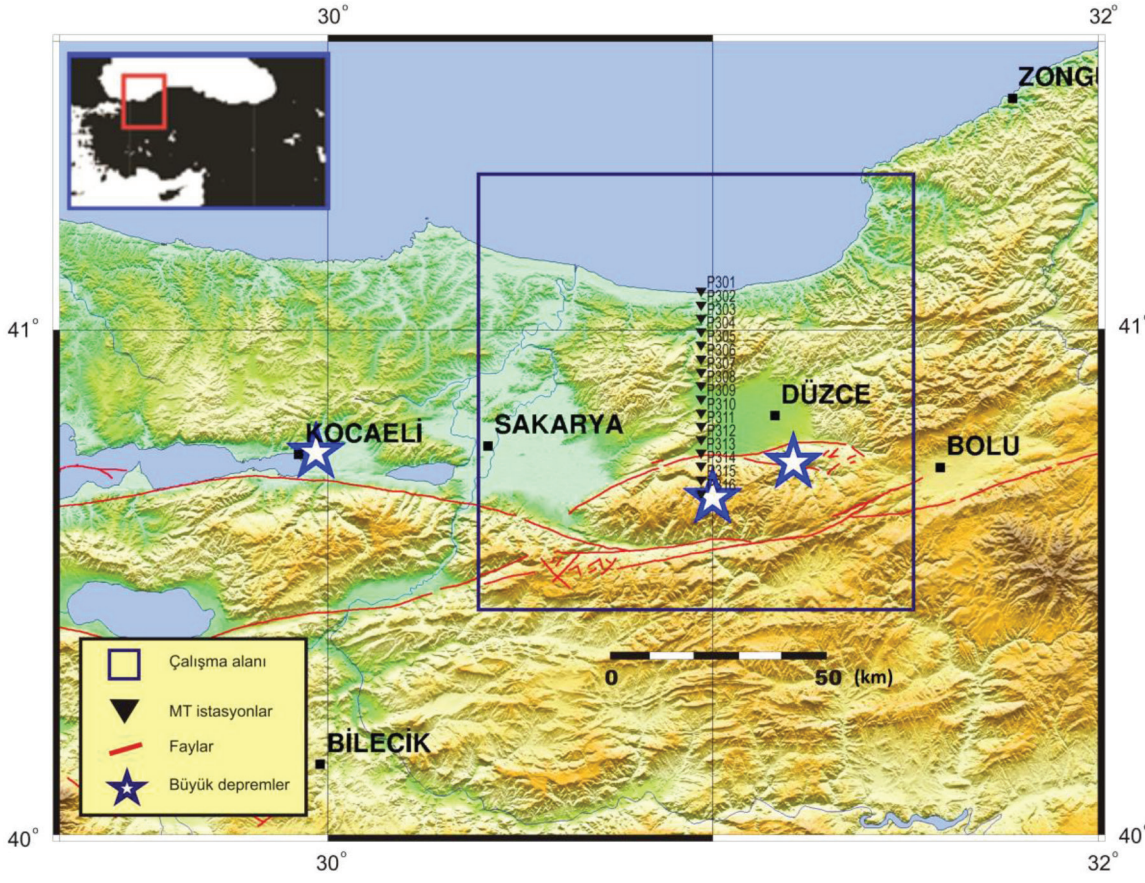
Şekil 2. (a) Modele ait özdirenç eğrileri, (b) model, (c) elektrik alan yer elektrik doğrultusuna (strike) dik iken akım ve (d) elektrik alan yer elektrik doğrultusuna paralel iken akım ve manyetik alan çizgileri Vozoff (1972)'dan tekrar çizilmiştir.

Figure 2. (a), Resistivity curves obtained from the model, (b), the model, (c), current flux when electric field is parallel to strike and (d), current flux when electric field is perpendicular to strike and magnetic field lines (redrawn from Vozoff (1972)).

KURAMSAL MODELLER VE MANYETOTELLÜRİK DÜZ ÇÖZÜM

Model Tasarımı İçin İnceleme Alanı

Manyetotellürik yöntemin temel amacı yer içinin özdirenç değişimini saptamaktır. Yöntem bunu yaparken tüm diğer jeofizik yöntemlerde olduğu gibi bazı yer parametrelerinden (galvanik etkiler, üç boyutlu yüzeye yakın yapılar ve deniz) etkilenmektedir. Deniz ve okyanuslar gibi, içerdiği yüksek tuz miktarından dolayı yüksek iletkenlikli kütleler manyetotellürik veriler üzerinde ciddi bozulmalara neden olmaktadır. Bu çalışmada Düzce ve çevresine benzeyen bir geometri kullanılmıştır. Bölgenin kuzeyinde de bu şekilde bozulmalara yol açabilecek Karadeniz bulunmaktadır. Karadeniz'den kaynaklanan bu bozulmaların Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kısmındaki Düzce bölgesinde toplanan ya da ileride toplanılacak manyetotellürik veriler üzerindeki olası etkisi araştırılmaktadır. Bunun için Karadeniz'in bir bölümü ve Düzce bölgesini de içine alan geniş bir inceleme alanı belirlenmiştir (Şekil 3). İnceleme alanını gösterir harita Generic Mapping Tools (GMT) programında oluşturulmuştur (Wessel ve Smith, 1995). Program Emre vd. (2013) tarafından hazırlanan Türkiye Diri Fay Haritası verisini kullanmaktadır.



Şekil 3. Deniz etkisi araştırma ve kuramsal model çalışmalarında kullanılan MT istasyonların konumları. (Harita Generic Mapping Tools (GMT) programıyla oluşturulmuştur (Wessel ve Smith, 1995). Program Emre vd. (2013) tarafından hazırlanan Türkiye Diri Fay Haritası verisini kullanmaktadır).

Figure 3. The locations of the MT stations which used on forward modelling to investigate sea effect. (The fault data is taken from Emre et al. (2013). The map was generated using Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel and Smith, 1995)).

Kuzey Anadolu Fayı geçmişte çeşitli büyüklüklerde ve yıkıcı depremlere neden olmuştur. En son Düzce depremi (M_w=7.2, 1999) ve Gölcük depremi (M_w=7.5, 1999) ile gündeme gelen fay özellikle beklenen Marmara depremi ile gündemdeki yerini korumaktadır. Bu nedenle bu yapının çok iyi analiz edilmesi, üzerinde meydana gelmiş depremleri tartışmak ve ileride meydana gelebilecek depremleri tahmin etmek önemlidir. Bu da çeşitli bilimsel yöntemlerin yanında MT yöntemi ile de yapılabilir. MT yöntemi ile elde edilen verilerin doğru bir şekilde yorumlanması için Düzce bölgesindeki Karadeniz'den kaynaklanan deniz etkisinin miktarının bilinmesi gereklidir. Tüm bunlar düşünüldüğünde bu çalışma Düzce bölgesinde ileride yapılacak MT çalışmalarına kaynak teşkil edecektir. Düz çözüm aşamasında sınır problemi ile karşılaşmamak için oluşturulan modelin sınırları oldukça geniş tutulmuştur.

Düz Çözüm

Manyetotellürik yöntemde saha verileri ile karşılaştırılmak üzere kuramsal verilerin hesaplanabilmesi için tüm jeofizik yöntemlerde olduğu gibi modelleme işlemi yapılır. Modelleme işleminin ilk aşaması düz çözümdür. Bu çalışmada düz çözüm WinGLink® programı kullanılarak yapılmıştır. Program, Mackie vd. (1993) tarafından geliştirilen üç-boyutlu düz çözüm algoritmasını kullanmaktadır. Algoritma Maxwell denklemlerinin integral formlarını sonlu farklar yöntemi kullanarak çözmektedir. Oluşturulan model çok fazla karmaşık olmadığı durumda, integral denklemlerinin çözümü çok hızlıdır (Mackie vd., 1993). Deniz etkisinin belirlenmesi için çalışılan bölge sabit bir iletken olarak girildiğinden (Tank, 2010) bu çalışmada oluşturulan modeller çok karmaşık modeller değildir. Bu algoritma bu nedenle tercih edilmiştir.

Kuramsal Modeller

Şekil 4, çalışmada kullanılan model ağını (mesh) göstermektedir. Model ağı, yatayda bir kenarı 300 km uzunluğundaki bir kare alan şeklindedir. Çalışma alanı olarak tabir edilen lacivert alan ise, bir kenarı 100 km uzunluğundaki bir kare şeklinde yerleştirilmiştir. Modelin yaklaşık olarak kuzeye doğru 179'uncu km'sinden itibaren Karadeniz temsili olarak yerleştirilmiştir. Oluşturulan modellerde farklı derinlikler belirlenerek Karadeniz temsil edilmiştir. Çalışma alanının ortasına gelen bir konumda kuzey-güney yönlü bir hat boyunca 16 yapay MT istasyon yerleştirilmiştir. Deniz kıyısına en yakın istasyon 1.5 km uzaklığında yerleştirilmişken, deniz kıyısına en uzak istasyon 46.5 km uzaklığında yerleştirilmiştir. Her bir bloğa, ilgili modeli temsil edecek şekilde özdirenç değerleri atanmak suretiyle çeşitli modeller oluşturulmuş ve MT istasyonlardan MT verileri elde edilmiştir. Burada belirli istasyonlara ait MT verileri gösterilmektedir. Elde edilen veriler değerlendirmeye tabi tutularak periyota karşılık, her bir istasyona ait özdirenç eğrileri, endüksiyon okları ve faz eğrileri çizdirilmiştir.

İleride Düzce bölgesinde yapılacak MT çalışmalara kaynak teşkil etmesi için çalışma sahası mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın modellenmiş ve böylece Düzce bölgesindeki manyetotellürik çalışmalarda Karadeniz'den kaynaklanan deniz etkisinin miktarı daha net ortaya çıkartılmıştır. Denize yakın sahalarda yapılacak bir MT çalışmada farklı deniz ve kara özellikleri için kıyı etkisini daha iyi ortaya koymak amacıyla modeller basitten karmaşığa çeşitlilik göstermektedir. Farklı modellerin etkisini daha net anlamak için tüm modellerden elde edilen özdirenç eğrileri, endüksiyon okları ve faz eğrileri karşılaştırılarak incelenmiştir.

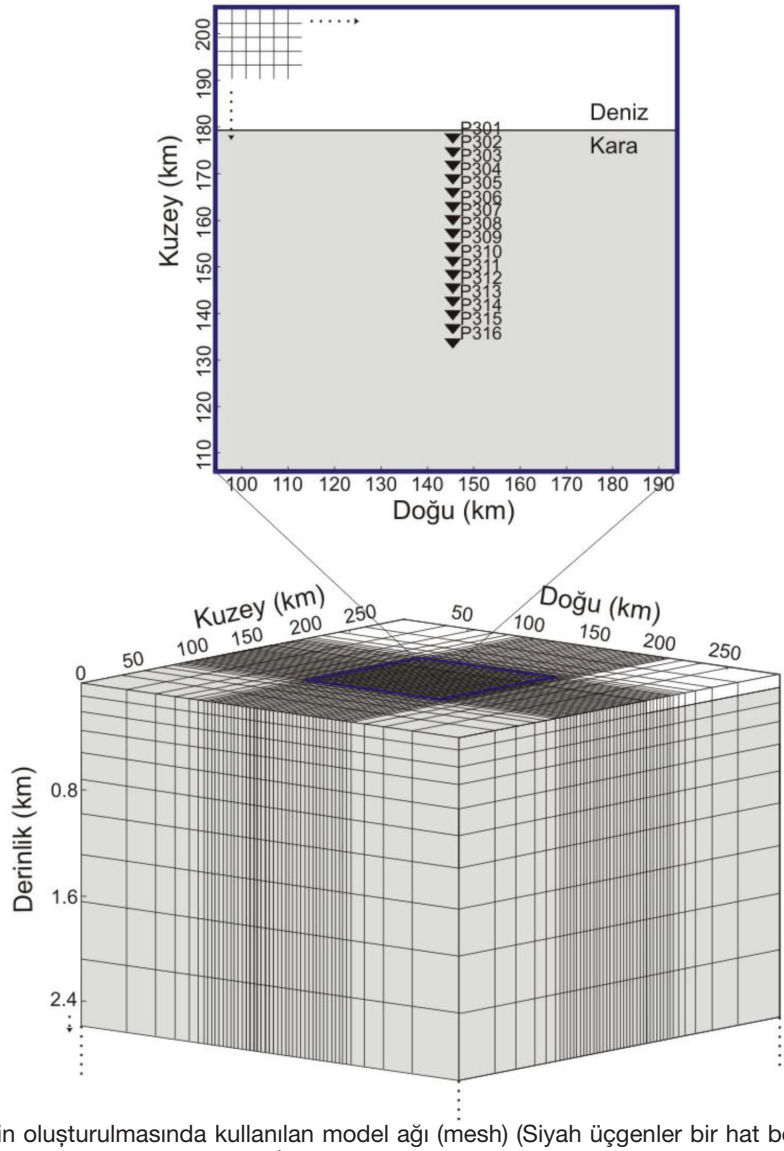
Şekil 5 ve 6, kıyı şeridinin doğrusal kabul edildiği modeller için sırasıyla modellerin üsten görünümü ve kesitidir. Farklı modellerde Çizelge 1'deki özdirenç ve derinlik değerleri kullanılarak modellere ait MT tepkileri elde edilmiştir. Buradaki modeller basit yapılı modeller olup jeolojik ve tektonik birim içermemektedir. Şekil 7 ve 8 Karadeniz kıyı şeridinin basit bir biçimde eklendiği model için sırasıyla modelin üsten görünümü ve kesitidir. Farklı modellerde Çizelge 2'deki özdirenç ve derinlik değerleri kullanılarak ve çeşitli jeolojik ve tektonik özellikler eklenerek modellere ait MT tepkileri elde edilmiştir.

Çizelge 2'de, Çizelge 1'deki modellerden farklı olarak jeolojik ve tektonik birimleri içinde barındıran modellere ve denizin bulunmadığı homojen modele ait özellikler gösterilmiştir. Modellere deniz derinliğinin basamaklı olması, Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolunu temsil eden bir fay ve sediman gibi yapılar basit biçimde eklenmiş ve bölgenin özellikleri temsil edilmiştir. Böylece çalışılan bölgenin tektonik yapısına daha yakın modeller oluşturulmuştur.

Fay kalınlığı farklı modellerde 1 km ve 3 km olarak dikkate alınmıştır. Çünkü faylar, fay doğrultuları boyunca fayın sağında ve solunda çatlaklara sahiptirler. Bu çatlaklara zamanla dolan meteorik sular, fayın yaklaşık 1 km çapındaki özdirenç değerlerinin düşmesine neden olurlar (Ritter vd., 2005). Kuzey Anadolu Fayı'nın Düzce bölgesinde ve bu çalışmaya konu olan sahadaki kuzey kolunun Karedere-Düzce segmentinde, Düzce Depremi (1999) sırasında meydana gelmiş çatlaklar bulunmaktadır (Peng ve Ben-Zion, 2004). Fayın etkisinin daha net belirlenmesi amacıyla fay kalınlığı 1 km yerine 3 km olarak girilmiştir. Ayrıca Karadeniz'in tabanındaki sediman tabakasının kalınlığı (Robinson vd., 1995) da dikkate alınmıştır. Bunun için sediman tabakası basit bir biçimde modellere eklenmiştir. Sediman özdirenci 5 Ω-m (Haak ve Hutton, 1986) olarak atanmıştır. Deniz derinliği ise 1500 m olarak tasarlanmıştır. Kuzey Anadolu Fayı'nın eğimi kuzeye doğru yaklaşık olarak 65°'dir (Konca vd., 2010). Daha gerçeğe yakın bir model elde etmek için Kuzey Anadolu Fayı'nın eğimi de dikkate alınmıştır. Oluşturulan modellerden elde edilen özdirenç eğrileri, endüksiyon okları ve faz eğrileri karşılaştırma tabloları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Görsellerin oluşturulmasında WinGLink® ve CorelDRAW programlarının çıktıları kullanılmıştır.

TARTIŞMA VE YORUMLAR

Düzce bölgesinde yüksek elektrik iletkenliğe sahip Karadeniz'den kaynaklanabilecek olası deniz etkisinin miktarını araştırmak için çeşitli kuramsal modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerde denizin derinliği (z), karanın özdirenci (ρ), kıyının tipi değiştirilerek ve fay, sediman gibi yapılar da eklenerek bu parametrelerin denizden kaynaklanan bozucu etkiye katkıları karşılaştırılmıştır. Bunun için ikili ve üçlü tablolar kullanılmıştır. Karşılaştırma hem aynı modelde denize yakın-uzak istasyon verilerinin ilişkisi hem de farklı modellere ait özdirenç eğrileri, endüksiyon okları ve faz eğrilerinin karşılaştırılması olarak yapılmıştır. Her bir karşılaştırma tablosunda tek bir parametre karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar ve hangi parametrenin incelendiği Çizelge 3'te verilmiştir.

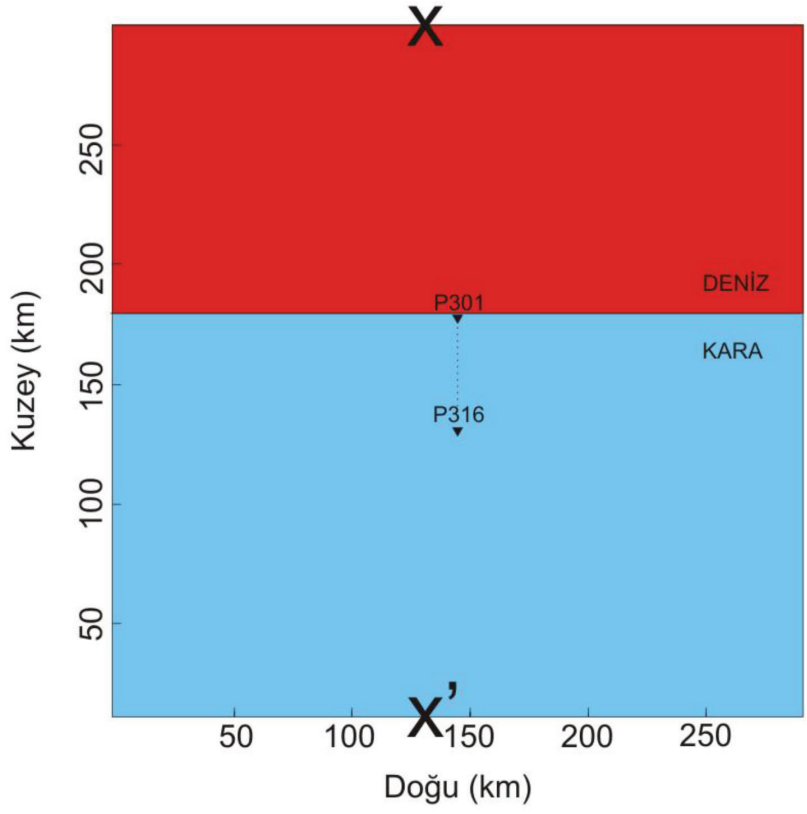


Şekil 4. Modellerin oluşturulmasında kullanılan model ağı (mesh) (Siyah üçgenler bir hat boyunca konumlandırılmış istasyonları temsil etmektedir. İlk istasyonun kıyı çizgisine olan uzaklığı 1.5 km iken, son istasyonun kıyı çizgisine olan uzaklığı 46.5 km'dir).

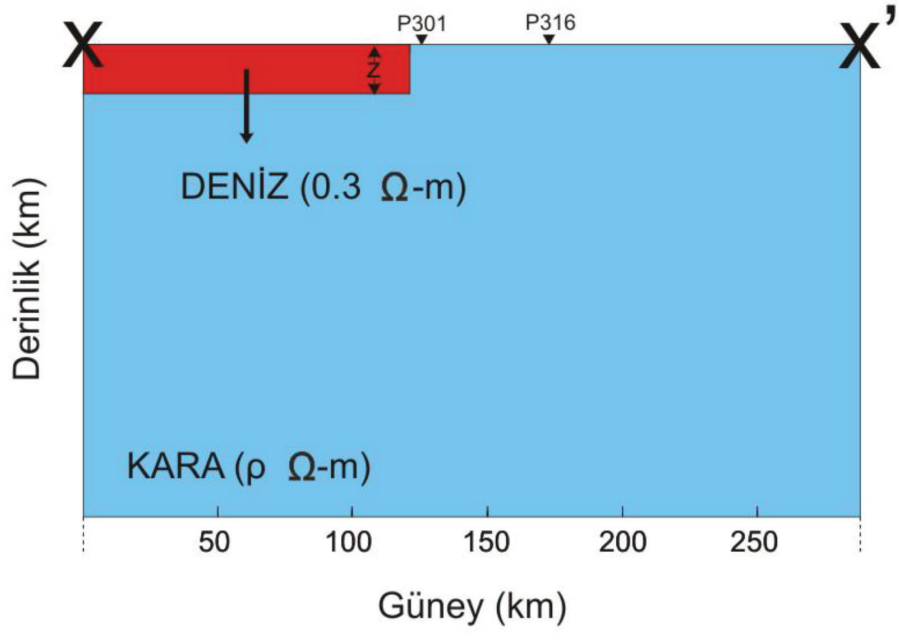
Figure 4. The mesh which is used for forward modelling (Black triangles represent MT stations that are located on a profile. The distances of the first and the last stations from the coastline are 1.5 km and 46.5 km, respectively).

Homojen yarı uzayda deniz-kara sınırı gibi yüksek özdirenç farkının bulunmadığı durumda, özdirenç eğrilerinin başlangıçta verilen özdirenç değerlerini göstermesi gerekir. Endüksiyon okları, büyüklük olarak düşük değerlerde olmalıdır. Faz eğrilerinde bir sapma ile karşılaşılmaması gerekir (Şekil 9). Ancak, modellerde denizin varlığından dolayı oluşan yüksek özdirenç farkının, MT tepkilerini belirli parametrelere (deniz derinliği, özdirenç farklılığı kıyı tipi, fay ve sediman) göre belirli periyotlarda etkilediği saptanmıştır.

Yerin iki-boyutlu olarak incelenmesi durumunda görünür özdirenç denklemindeki (Eşitlik 3) empedans, $\mathbf{Z}_{xy}$ ve $\mathbf{Z}_{yx}$ olmak üzere iki farklı değere sahip olur. Dolayısıyla $\mathbf{Z}$ parametresinin, hem $\mathbf{Z}_{xy}=\mathbf{E}_x/\mathbf{E}_y$ hem de $\mathbf{Z}_{yx}=\mathbf{E}_y/\mathbf{H}_x$ bağıntısı ile hesaplanması gerekir. Elektrik alan ve manyetik alan deniz-kara sınırına yakın bölgelerde kıyının tipine ve özdirenç farklılığına bağlı olarak belirli oranda etkilenir (Santos vd., 2001). $\mathbf{Z}$, kıyı ekseninin konumuna göre ya normal değerinden fazla ya da normal değerinden düşük olarak hesaplanır.



Şekil 5. Kıyı çizgisi doğrusal iken oluşturulan modellerin üstten görünümü.
Figure 5. Map view of the models for linear coastline.

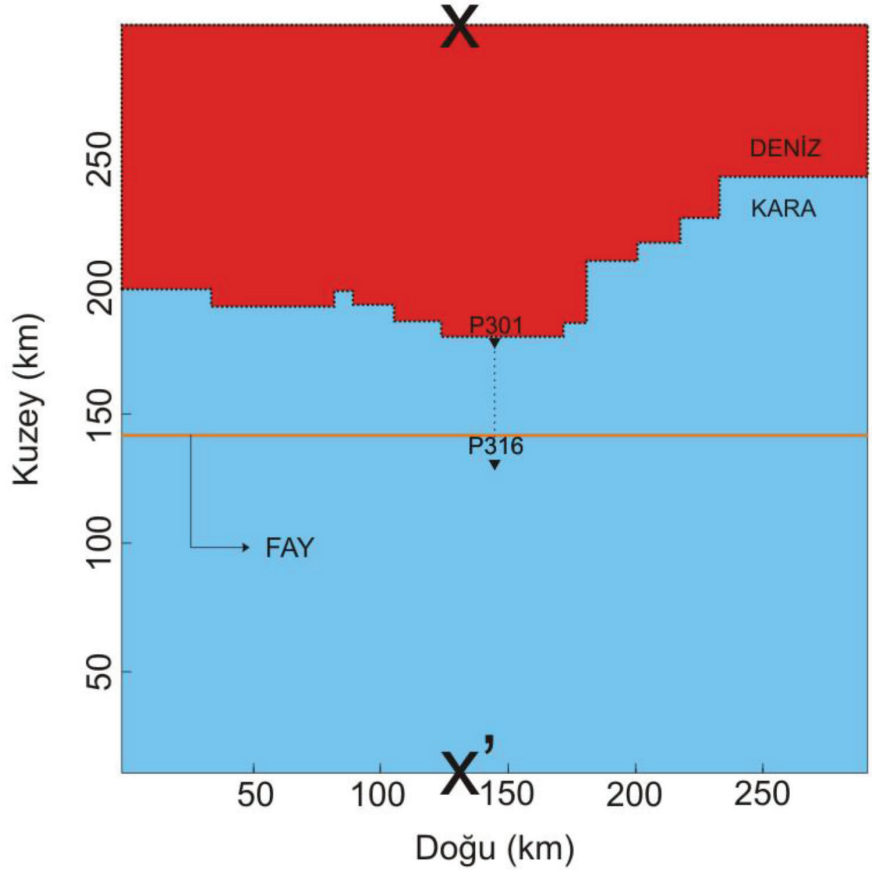


Şekil 6. Kıyı çizgisi doğrusal iken oluşturulan modellerin kesiti.
Figure 6. Cross-section of the models for linear coastline.

Çizelge 1. Oluşturulan modeller ve özellikleri.
Table 1. Different models considered in this study.

ρ ve z	100 m	500 m	1000 m
100 Ω-m	Model 1	Model 2	Model 3
500 Ω-m			Model 4
1000 Ω-m			Model 5

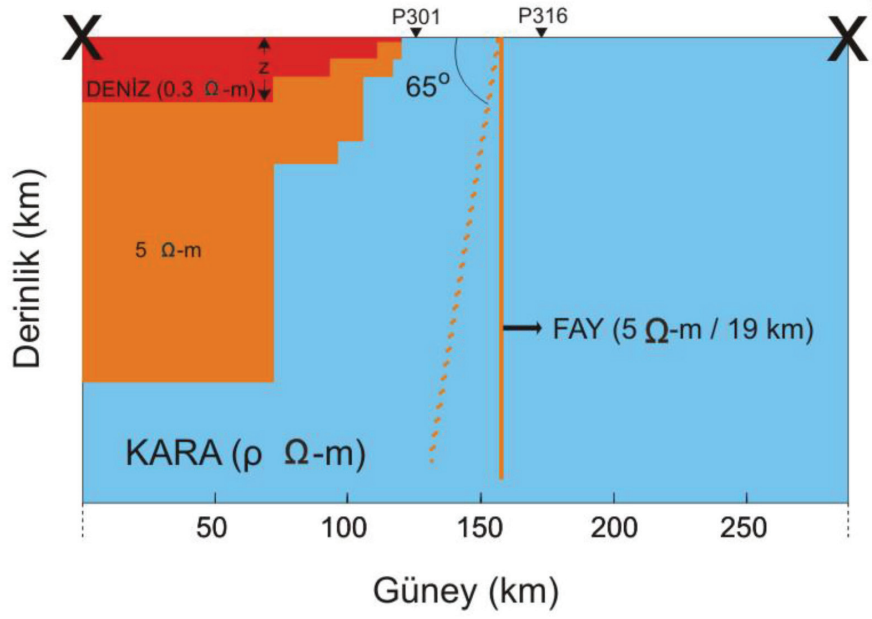
ρ: Kara özdirenci; z: Deniz derinliği.



Şekil 7. Karadeniz kıyı çizgisinin basit biçimde eklenerek ve bölgenin tektonik özelliklerinin de dikkate alınarak oluşturulan modellerin üstten görünümü.
Figure 7. Map view of the models for which a simplified coastline of the Black Sea and the main tectonic features are taken into account.

Bunun nedeni, yüksek iletkenlikli denizin jeomanyetik alan üzerindeki etkisidir (Parkinson, 1959). Ayrıca kıyının konumuna göre yüksek özdirenç farkı ara yüzeyde ikincil elektrik alanları oluşturarak birincil elektrik alanı arttırıcı ya da azaltıcı olarak etkiler (Vozoff, 1972; Jones, 1983). Deniz-kara sınırına yakın bölgelerden toplanan MT verilerinden elde edilen özdirenç eğrilerinin etkilenmesindeki temel fiziksel olgu bu şekildedir. Burada belirleyici parametre kıyı şeridinin yer elektrik doğrultusu (strike) ile olan ilişkisi, deniz derinliği ve yüksek özdirenç farklılığıdır.

Endüksiyon okları düşey manyetik alanın yatay manyetik alana oranı şeklindedir (Simpson ve Bahr, 2005). Deniz gibi iletkenliğin yüksek olduğu yapılarda jeomanyetik alan girdap akımları (eddy current) oluşturur. Oluşan girdap akımları düşey manyetik alanda artışa neden olur. Girdap akımları yatay man-



Şekil 8. Karadeniz kıyı çizgisinin basit biçimde eklenerek ve bölgenin tektonik özelliklerinin de dikkate alınarak oluşturulan modellerin kesiti.

Figure 8. Cross-section of the models for which a simplified coastline of the Black Sea and the main tectonic features are taken into account.

Çizelge 2. Oluşturulan diğer modeller ve özellikleri.

Table 2. Other designed models and their features.

ρ ve z	1000 m	1500 m	
100 Ω-m	Model 6 (Deniz derinliği basamaklı) Model 7 (Deniz derinliği basamaklı) (3 km kalınlıkta bir fay)	Model 8 (Deniz derinliği basamaklı) (Karadeniz kıyı şeridi) (Sediman) (1 km kalınlıkta bir fay) (Fay eğimli)	Model H (Homojen model) (Deniz bulunmamaktadır)

ρ: Kara özdirenci; z: Deniz derinliği.

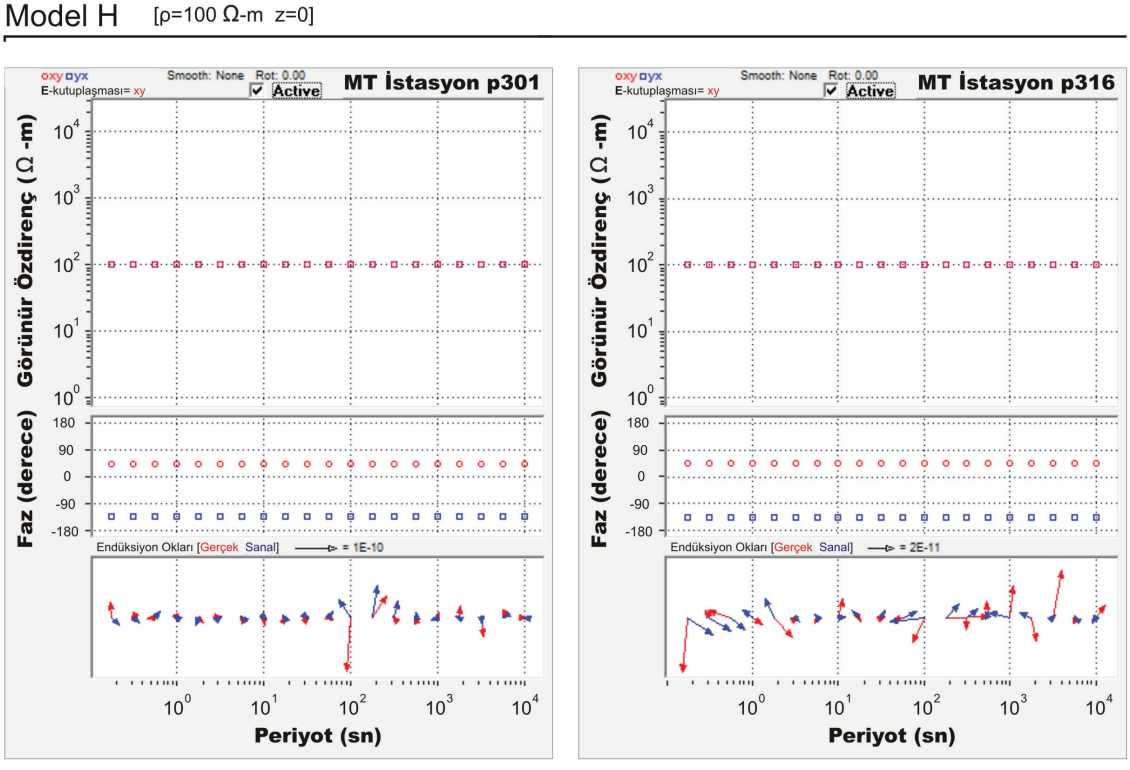
yetik alanı düşey konuma getirerek yatay manyetik alanı azaltıp düşey manyetik alanı arttırır (Parkinson, 1959; Ranganayaki ve Madden, 1980; Jones, 1983; Santos vd., 2001). Yatay yöndeki manyetik alanlar özdirenç farklılığının yüksek olduğu deniz-kara sınırından yüksek oranda etkilenmezler (Santos vd., 2001). Böylece düşey manyetik alan yatay manyetik alana oranlanırsa ve belirli periyotlarda çizdirilirse girdap akımlarının etkisi dolayısıyla deniz etkisi karşılaştırılabilir. Deniz-kara sınırına yakın bölgelerden toplanan MT verilerinden elde edilen endüksiyon oklarının etkilenmesindeki temel fiziksel olgu bu şekildedir. Faz eğrileri ise düşük değerlerde yalıtkanı yüksek değerlerde iletkeni göstermektedir (Jiracek vd., 1995).

Deniz etkisinin net bir şekilde anlaşılabilmesi için Şekil 9' da Model H olarak isimlendirilmiş denizin bulunmadığı modele ait MT tepkileri gösterilmektedir. Burada 100 Ω-m olarak girilen özdirenç değeri ile düz çözümden hesaplanmış elektrik özdirenç eğrilerinden elde edilen özdirenç değeri, deniz etkisi olmadığı için herhangi bir bozulmaya uğramamış ve birbirleri ile uyumludur. Endüksiyon okları incelendiğinde ise, endüksiyon okları büyüklük olarak birim okta oldukça küçük değerler (1E-10 ve 2E-11 gibi) ile MT tepkisini temsil etmektedir. Faz eğrilerinde ise bir sapma görülmemektedir. Denizin varlığı durumunda MT tepkilerinde bozulmalar meydana gelebilmektedir.

Çizelge 3. Karşılaştırma kılavuzu.
Table 3. Comparison guide.

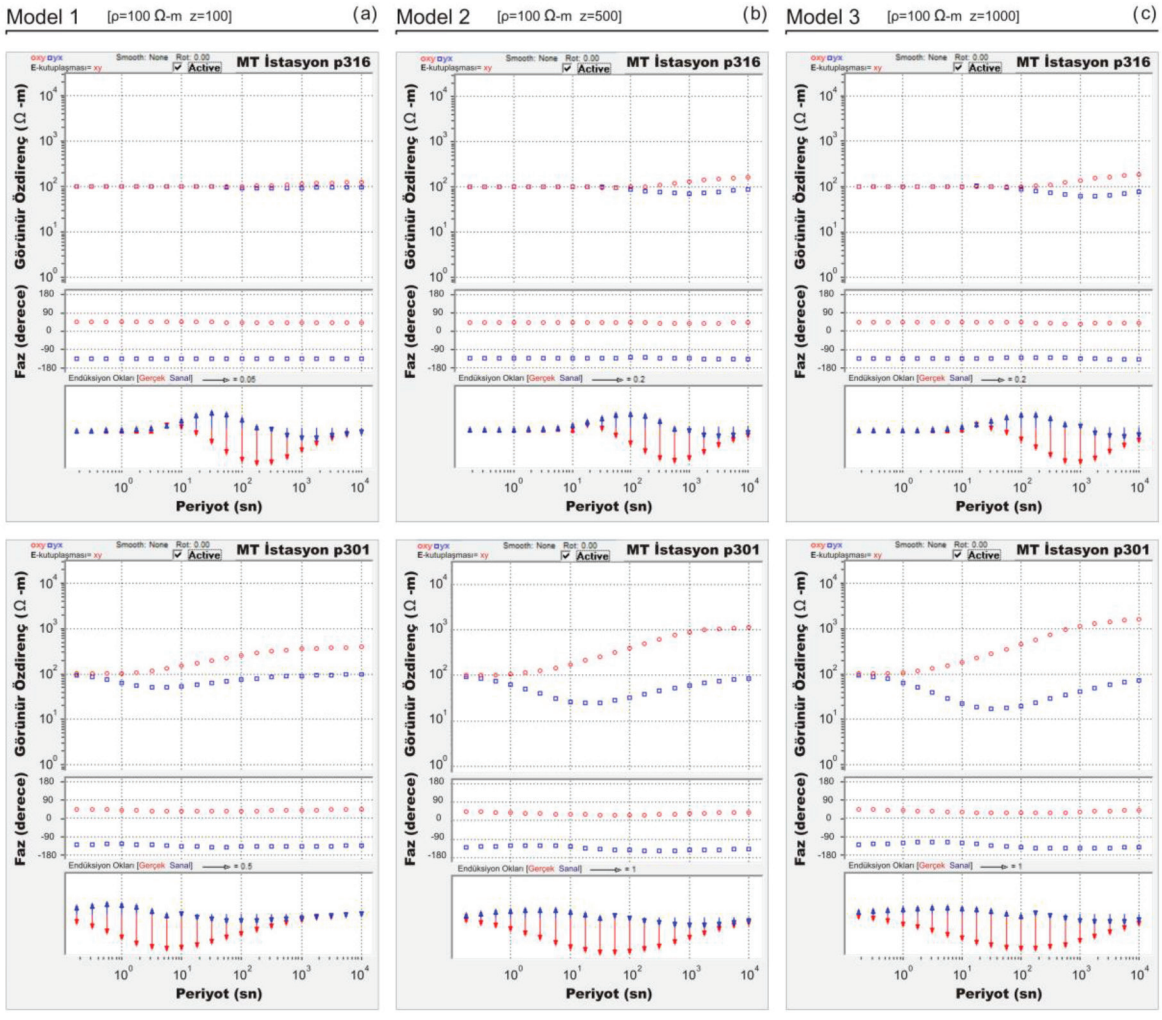
Karşılaştırma	İncelenen Parametre
1	Uzak istasyon – Yakın istasyon ilişkisi (ρ=100 Ω-m)
1	Deniz derinliğinin artması (ρ=100 Ω-m)
2	Özdirenç farklılığının artması (z=1000 m)
3	Deniz derinliğinin basamaklı değişimi (ρ=100 Ω-m)
4	Fay parametresinin bulunması (z=1000 m, ρ=100 Ω-m ve ζ =90°)
5	Homojen model ve tüm parametrelerin bulunduğu model (z=1500 m, ρ=100 Ω-m ve ζ =65°)

ρ: Kara özdirenci; z: Deniz derinliği; ζ: fay eğimi.



Şekil 9. Homojen modele ait MT tepkileri.
Figure 9. MT responses obtained for the homogeneous model.

Şekil 10a'da (Karşılaştırma 1) Model 1'e ait MT İstasyon p301'den (bundan böyle denize yakın istasyon olarak tabir edilecektir) elde edilen **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisinde (lacivert kare ile temsil edilen) ve **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisinde (kırmızı çember ile temsil edilen) artışlar ve azalışlar görülmektedir. **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi üzerinde pozitif yönde bir deniz etkisi görülmekte iken bu etki **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisi üzerinde negatif yönde görülmektedir. **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi üzerindeki deniz etkisinin yaklaşık 1 saniye periyodundan itibaren başladığı görülmektedir. Pozitif yöndeki deniz etkisinin miktarı 1 saniye periyodunda yaklaşık ρ_a-ρ= +3 Ω-m (hesaplanan değerler



Şekil 10. Karşılaştırma 1. Model tepkileri (Hem modellere ait uzak ve yakın istasyon verilerinin karşılaştırması hem de farklı deniz derinliği bulunan modellerin tepkilerinin karşılaştırması gösterilmektedir).

Figure 10. Comparison 1. Model responses (The first comparison is between MT responses which is obtained from both first stations and last stations from the coastline and the second comparison is between responses of models which have different sea depths).

tam sayıya yuvarlanmıştır) olarak hesaplanmıştır. **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi daha uzun periyotlarda daha çok miktarda bozulmaya (100 ve 10000 saniye periyotlarında sırasıyla +158 ve +288 Ω-m) maruz kalmıştır. Buna karşın **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisi üzerindeki negatif yöndeki deniz etkisinin miktarı 0.2 saniye periyodunda daha kısa periyotlardan itibaren (söz konusu periyotlar inceleme aralığında değildir) başlamış olduğu görülmektedir. Negatif yöndeki deniz etkisinin miktarı yaklaşık 0.2 saniye periyodunda -7 Ω-m olarak hesaplanmıştır. **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisi, **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisinden farklı bir davranış sergileyerek yaklaşık 10 saniye periyodundan itibaren asıl değerine dönme eğilimi göstermektedir. **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisi daha uzun periyotlarda daha az miktarda bozulmaya (10, 100 ve 10000 saniye periyotlarında sırasıyla -47, -25 ve -2 Ω-m) maruz kalmıştır. Konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar (Han vd. 2009; Yang vd. 2010; Tank, 2010) denizin özdirenç eğrilerini benzer şekilde değişen miktarlarda etkilediğini göstermektedir. Tank (2010) çalışmasında **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisinin **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisine göre daha az etkilendiği sonucuna varmış ve **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisinin kullanımını önermiştir. Hangi özdirenç eğrisinin kullanılması gerektiği ile ilgili kesin bir yargı yoktur. Singh vd. (1995) çalışmasında, **E**-kutuplaşması eğrisinin

kullanımını önermiştir. Burada belirleyici parametre, kıyının yer elektrik doğrultusu ile olan ilişkisidir.

Şekil 10a'da (Karşılaştırma 1) Model 1'e ait MT İstasyon p316'dan (bundan böyle denize uzak istasyon olarak tabir edilecektir) elde edilen özdirenç eğrileri üzerinde denize yakın istasyondan elde edilen özdirenç eğrilerine göre daha uzun periyotlarda değişen miktarda deniz etkisi görülmektedir. Bir başka önemli nokta ise **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi üzerindeki deniz etkisi yaklaşık 100 saniye periyodundan itibaren başlamakta iken **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi üzerindeki deniz etkisi yaklaşık 10 saniye periyodundan itibaren başlamaktadır. **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi üzerindeki deniz etkisinin miktarı 10, 100, 1000 ve 10000 saniye periyotlarında sırasıyla yaklaşık 0, +1, +15 ve +24 Ω-m olarak hesaplanmıştır. **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisi üzerindeki deniz etkisinin miktarı ise aynı periyotlarda sırasıyla yaklaşık +1, -6, -6 ve -2 Ω-m olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte uzak istasyondan elde edilen özdirenç eğrileri üzerindeki deniz etkisinin başladığı periyot, yakın istasyondan elde edilen özdirenç eğrileri üzerindeki deniz etkisinin başladığı periyota göre daha uzundur. Daha önce yapılmış çalışmalarda (Yang vd. 2010; Tank, 2010) değinildiği gibi istasyon deniz-kara sınırından uzaklaştıkça deniz etkisi daha uzun periyotlara doğru ilerlemektedir.

Şekil 10a'da (Karşılaştırma 1) Model 1'e ait denize uzak istasyondan elde edilen endüksiyon okları uzun periyotlara doğru yaklaşık 20 saniye periyodundan 4000 saniye periyoduna kadar büyüklük olarak yüksek değerlerde görülmektedir. Endüksiyon oklarının büyüklükleri gerçek endüksiyon oklarının yön değiştirdiği periyot olan yaklaşık 5 saniye periyodunda artmaya başlamıştır. Denize yakın istasyondan elde edilen endüksiyon oklarının büyüklükleri ise yaklaşık 0.2 saniye periyodundan itibaren 1000 saniye periyoduna kadar yüksek değerde görülmektedir. Santos vd. (2001) çalışmasında endüksiyon oklarını belirli periyotlara göre çizdirmiş ve deniz-kara sınırına yakınlıkları oranında ve belirli periyotlarda değişen büyüklüklerde oldukları sonucuna ulaşmıştır. Model 1'e ait yakın istasyondan elde edilen faz eğrileri üzerinde deniz etkisinin varlığından dolayı bir miktar dalgalanma görülmektedir. Lacivert kare ile temsil edilen faz eğrisi üzerinde 1 saniye periyodunda pozitif yönde ve 100 saniye periyodunda negatif yönde bir miktar bozulma görülmektedir. Kırmızı çember ile temsil edilen faz eğrisinde ise, inceleme aralığının kısa periyotlarından itibaren bir dalgalanma söz konusudur. Denize uzak istasyondan elde edilen kırmızı çember ile temsil edilen faz eğrisinde yaklaşık 100 saniye periyodundan sonra bir dalgalanma görülmektedir.

Genel olarak tüm modellerde uzak istasyonlardan toplanan MT tepkileri üzerindeki etkinin azaldığı görülmektedir. Etki kıyıya yaklaştıkça kendini daha fazla göstermektedir. Benzer şekilde birçok çalışmada (Singh vd., 1995; Santos vd., 2001; Yang vd., 2010) bu sonuca ulaşılmıştır. Kıyı çizgisine yakın bölgelerdeki çalışmalarda (Parkinson, 1959; Han vd., 2009; Worzewski vd., 2010; Key ve Constable, 2011) kıyıya yakın olan istasyonlardaki özdirenç eğrileri bu çalışmada ulaşılan bu sonuçtan dolayı ya hesaplanamamış ya da eğriler deniz etkisinden yüksek oranda etkilenmiştir.

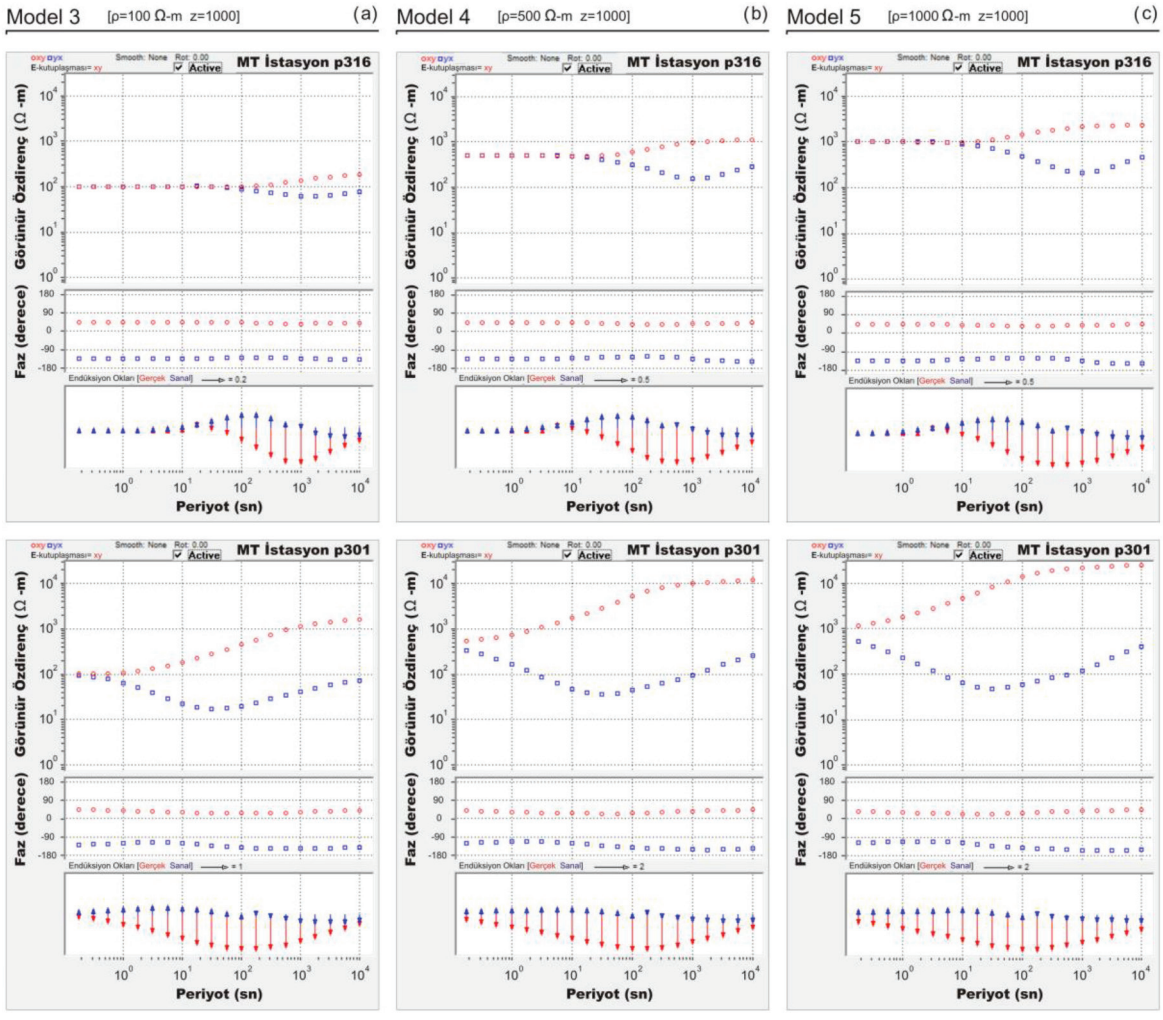
Deniz derinliğinin değişmesi durumunda deniz etkisini karşılaştırmak için kara kısmının özdirenç değerinin 100 Ω-m olduğu ve deniz derinliğinin 100, 500 ve 1000 metre olduğu üç farklı model Şekil 10'da (Karşılaştırma 1) gösterilmiştir. Yakın istasyonlar kendi aralarında ve uzak istasyonlar kendi aralarında incelendiğinde **E**-kutuplaşması özdirenç eğrileri ve **B**-kutuplaşması özdirenç eğrileri arasındaki fark derinlik arttıkça artmaktadır. Model 1, 2 ve 3'de denize yakın istasyonlardan elde edilen özdirenç eğrileri arasındaki fark 100 saniye periyodu için sırasıyla $\rho_{a(xy)}$-$\rho_{a(yx)}$ = +182, +366 ve +422 Ω-m olarak, 10000 saniye periyodu için özdirenç eğrileri arasındaki fark sırasıyla +290, +1073 ve +1503 Ω-m olarak hesaplanmıştır. Denize uzak istasyon özdirenç eğrileri arasındaki fark ise 100 saniye periyodu için sırasıyla +7, +11 ve +11 Ω-m olarak, 10000 saniye periyodu için sırasıyla +26, +78 ve +105 Ω-m olarak hesaplanmıştır. Buradan deniz derinliği arttıkça özdirenç eğrilerinin üzerindeki deniz etkisi miktarının arttığı görülmektedir. Bununla birlikte denize uzak istasyonlardan elde edilen özdirenç eğrileri arasındaki fark uzun periyotlara doğru artış göstermektedir. Önemli bir nokta ise, **B**-kutuplaşması özdirenç eğrileri asıl değerine dönme eğilimi gösterirken **E**-kutuplaşması özdirenç eğrilerinin böyle bir eğilim göstermemesidir. Dolayısıyla **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi, iki eğri arasındaki farka daha çok katkı sağlamaktadır. Key ve Constable (2011) çalışmasında benzer bir model kullanmış ve **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisindeki bozulmanın, **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisindeki bozulmadan daha çok olduğu sonucuna varmıştır. Denize yakın istasyonlardaki endüksiyon okları deniz derinliği 100 m iken 0.2 saniye ve 1000 saniye periyotlarında büyük değerlere sahiptir. Derinlik arttıkça

büyük değerlere sahip endüksiyon okları daha uzun periyotlara doğru genişlemekte, derinlik 100 m iken yaklaşık 300 saniye periyodundan itibaren büyüklük olarak düşük değerlere doğru değişmektedir. Denize uzak istasyonlarda ise, kısa periyotlardaki endüksiyon oklarının büyüklükleri uzun periyotlardaki endüksiyon oklarının büyüklüklerine göre daha düşüktür. Uzak istasyonlarda endüksiyon okları yaklaşık 15 saniye periyodu ve 6000 saniye periyodu aralığında büyük değerlere sahiptir. Buradan, uzak istasyonlarda deniz etkisinin uzun periyotlarda kendini gösterdiği anlaşılmaktadır. Özellikle denizin derinliği burada belirleyici parametredir. Bunun sebebi derinlik arttıkça özdirenç farklılığı olan derinlik artmasıdır. Santos vd. (2001) çalışmasında, denize yakın ve uzak istasyonlardaki endüksiyon oklarını belirli periyotlara göre hesaplamış ve bu çalışmada olduğu gibi deniz-kara sınırına uzak istasyondaki endüksiyon oklarının büyüklüklerinin, kısa periyotlarda uzun periyotlara göre daha düşük olduğu sonucuna varmıştır. Şekil 10a'da (Karşılaştırma 1) denize yakın istasyonlardaki faz eğrileri deniz derinliğinin artmasından etkilenmiştir. Lacivert kare ile temsil edilen faz eğrisi yaklaşık 0.2 saniye ve 100 saniye periyotları arasında artış göstermiştir. Buna karşın uzun periyotlarda yaklaşık 100 saniye ve 10000 saniye periyotları arasında bir azalış göstermiştir.

Şekil 11'de (Karşılaştırma 2) deniz derinliği sabit 1000 metre olarak belirlenip özdirenç değerinin 100, 500 ve 1000 Ω-m olarak atandığı 3 farklı modele ait MT verileri üzerindeki deniz etkisinin miktarı araştırılmıştır. Denize yakın istasyonlardan elde edilen **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisinin inceleme aralığındaki ilk periyotlardan itibaren negatif yönde bir deniz etkisine maruz kaldığı görülmekteyken, orta periyotlardan itibaren etkinin uzun periyotlara doğru azaldığı görülmektedir. Model 3, 4 ve 5'de denize yakın istasyondan elde edilen **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisinin maruz kaldığı deniz etkisinin miktarı yaklaşık 0.2 saniye periyodunda sırasıyla -6, -162 ve -474 Ω-m olarak hesaplanmıştır. Endüksiyon okları incelendiğinde farklı özdirenç atanan modellerin yakın istasyonlarındaki endüksiyon okları özdirenç farklılığı arttıkça büyüklük olarak daha da yüksek değerlerde görülmektedir ancak karşılaştırma yapılan üç modelde de yakın istasyondaki sanal endüksiyon okları aynı periyotta yön değiştirmişlerdir. Şekil 11c'de (Karşılaştırma 2) Model 5'e ait faz eğrileri hem deniz derinliğinin 1000 metre olması hem de modele atanan özdirenç değerinin 1000 Ω-m olması nedeniyle diğer MT tepkilerinde olduğu gibi, yüksek miktarda denizden etkilenmiştir.

Deniz derinliğinin keskin bir şekilde artması yerine, gerçeğe daha uygun olarak basamaklı şekilde artması durumunda deniz etkisinin miktarını araştırmak amacıyla Şekil 12'deki (Karşılaştırma 3) model tepkileri kullanılmıştır. Diğer karşılaştırmalardan elde edilen sonuçlardan farklı olarak Şekil 12b'deki modelde derinliğin basamaklı olarak artması denize yakın istasyonlarda **B**-kutuplaşması özdirenç eğrilerinde bir dalgalanmaya neden olmuştur. Denize yakın istasyonlarda **B**-kutuplaşması özdirenç eğrileri, yaklaşık 2 saniye ve 100 saniye periyot aralığında asıl değerine yaklaşma eğilimi göstermiş fakat periyot arttıkça tekrar uzaklaşmış daha sonra tekrar asıl değerine dönme eğilimi göstermiştir. Model 3'de denize yakın istasyondan elde edilen **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisinin 1, 10, 100 ve 1000 saniye periyotlarında maruz kaldığı negatif deniz etkisinin miktarı sırasıyla -35, -78, -80 ve -60 Ω-m olarak hesaplanmışken, Model 6'da denize yakın istasyondan elde edilen **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisinin aynı periyotlarda maruz kaldığı negatif deniz etkisi sırasıyla -36, -45, -50 ve -48 Ω-m olarak hesaplanmıştır. Buradan deniz derinliğinin basamaklı olarak artması durumunda denize yakın istasyonda periyot arttıkça genel olarak eğriler arasındaki farkın azalmış olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Denize uzak istasyon özdirenç eğrileri arasındaki fark ise, derinliğin basamaklı olması durumunda uzun periyotlarda azalma eğilimi göstermiştir. Model 3'de denize uzak istasyondan elde edilen özdirenç eğrileri arasındaki fark 10000 saniye periyodunda +105 Ω-m iken Model 6'da uzak istasyondan elde edilen özdirenç eğrileri arasındaki fark aynı periyotta +94 Ω-m olarak hesaplanmıştır.

Basamaklı derinlik parametresine ek olarak çalışılan bölgenin tektonik yapısına daha yakın bir model oluşturmak için Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolunu temsil eden bir fay eklenmiş Model 6 ve fayın bulunmadığı Model 7 Şekil 13'te (Karşılaştırma 4) gösterilmektedir. Fayların, fay doğrultuları boyunca, sağında ve solunda çatlaklar bulunmaktadır. Bu çatlaklara zamanla dolan meteorik sular, fayın yaklaşık 1 km çapındaki özdirenç değerlerinin düşmesine neden olurlar (Ritter vd., 2005). Buna karşın, Model 7'de, fay kalınlığının oluşturduğu deniz etkisini daha iyi görebilmek için fay kalınlığı 1 km yerine 3 km olarak alınmıştır. Model 7'de denize uzak istasyondan elde edilen **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisi Model 6'da denize uzak istasyondan elde edilen **B**-kutuplaşması

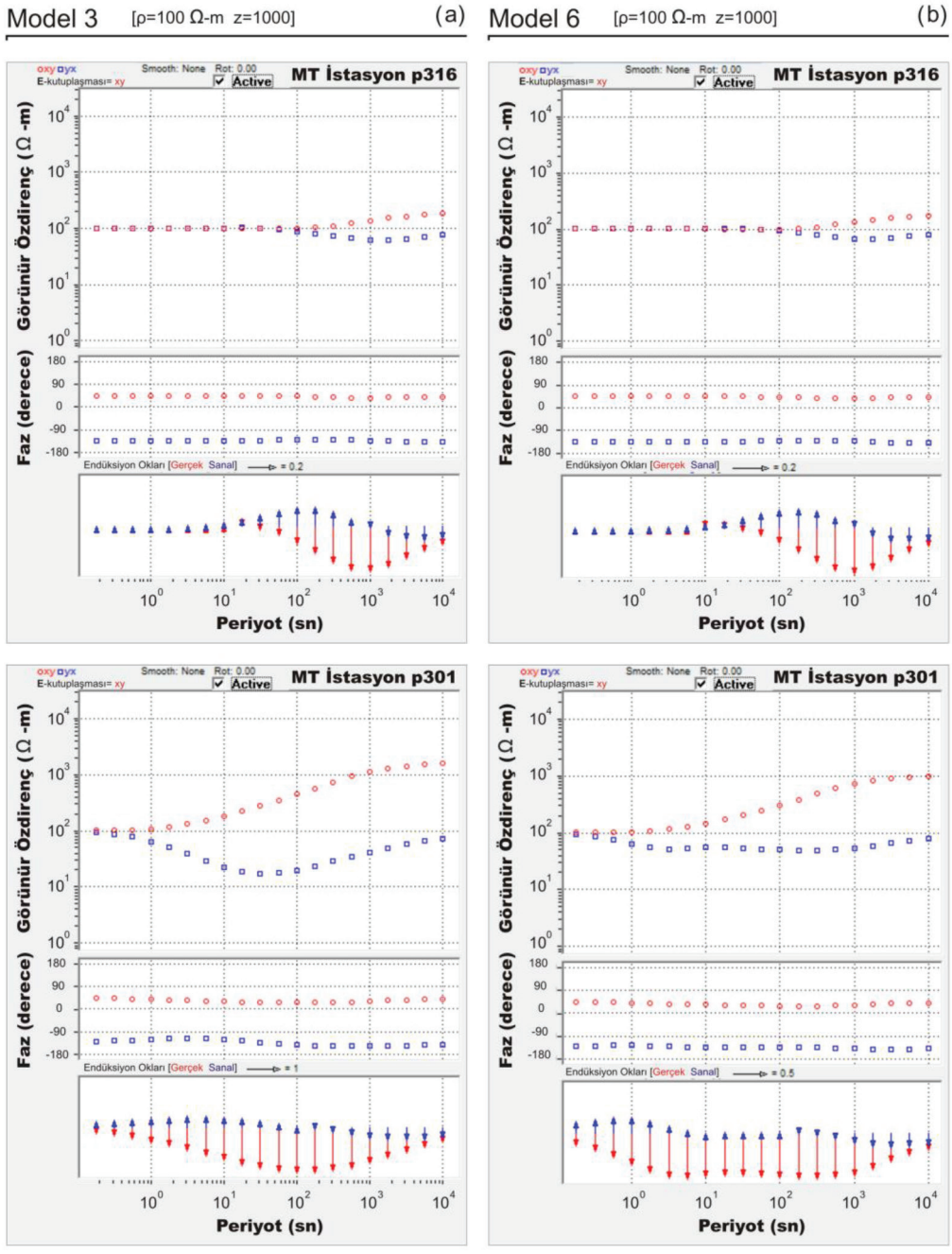


Şekil 11. Karşılaştırma 2. Model tepkileri (Özdirenç farklılığı olduğu durumdaki model tepkilerinin karşılaştırılması gösterilmektedir).

Figure 11. Comparison 2. Model responses (The comparison between responses of models which have different resistivity contrast).

özdirenç eğrisine göre daha kısa periyotlardan başlayan bir deniz etkisine maruz kalmaktadır. Yaklaşık 2 saniye ve 1000 saniye periyot aralığında fayın bulunduğu durumda **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisi negatif yönde artan bir bozulmaya maruz kalmıştır. Bu durumda eğriler arası açıklık söz konusu periyot aralığında artmıştır. Denize yakın istasyondan elde edilen endüksiyon okları incelendiğinde sanal endüksiyon oklarının yönlerinde bir farklılık görülmektedir. Ancak uzak istasyon verilerinden elde edilen sanal endüksiyon oklarında belirgin bir farklılık görülmemektedir. Denize uzak istasyondan elde edilen gerçek endüksiyon oklarının fayın bulunmadığı durumda yaklaşık 10 saniye periyodundan itibaren büyüklük olarak yüksek değerlere doğru artmaya başladığı görülmekteyken fayın bulunduğu durumda gerçek endüksiyon oklarının büyüklüklerinin arttığı bu periyot daha kısa periyotlara doğru kaymıştır.

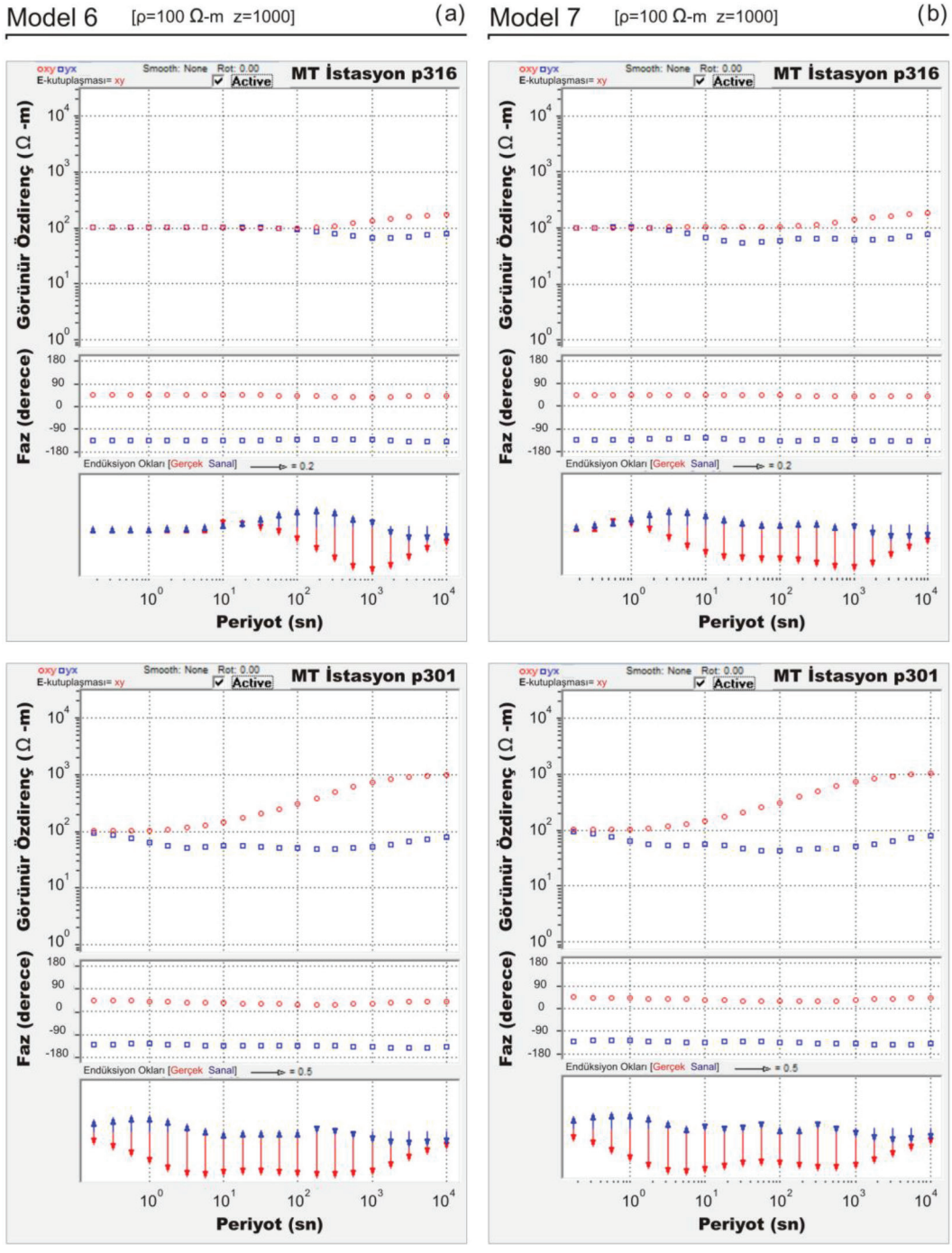
Son olarak Şekil 14'teki karşılaştırmada (Karşılaştırma 5) homojen model ve Düzce bölgesinin tektonik özellikleri temel alınarak oluşturulmuş model tepkileri gösterilmektedir. Modeller üzerindeki MT İstasyon p303 kıyı şeridine 3.5 km uzaklığında, MT İstasyon p316 istasyonu kıyıya 46.5 km uzaklığındadır. Karadeniz kıyı şeridi basit biçimde eklendiğinden dolayı, kıyı şeridine bir miktar daha uzak istasyonların MT tepkileri karşılaştırılmıştır. Denizin bulunmadığı durumda özdirenç eğrileri üzerinde bozulma görül-



Şekil 12. Karşılaştırma 3. Model tepkileri (Deniz derinliğinin basamaklı şekilde olduğu durumda model tepkilerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Model 6'da deniz derinliği basamaklı olacak şekilde tasarlanmışken Model 3'te deniz derinliği keskin olacak şekilde tasarlanmıştır).

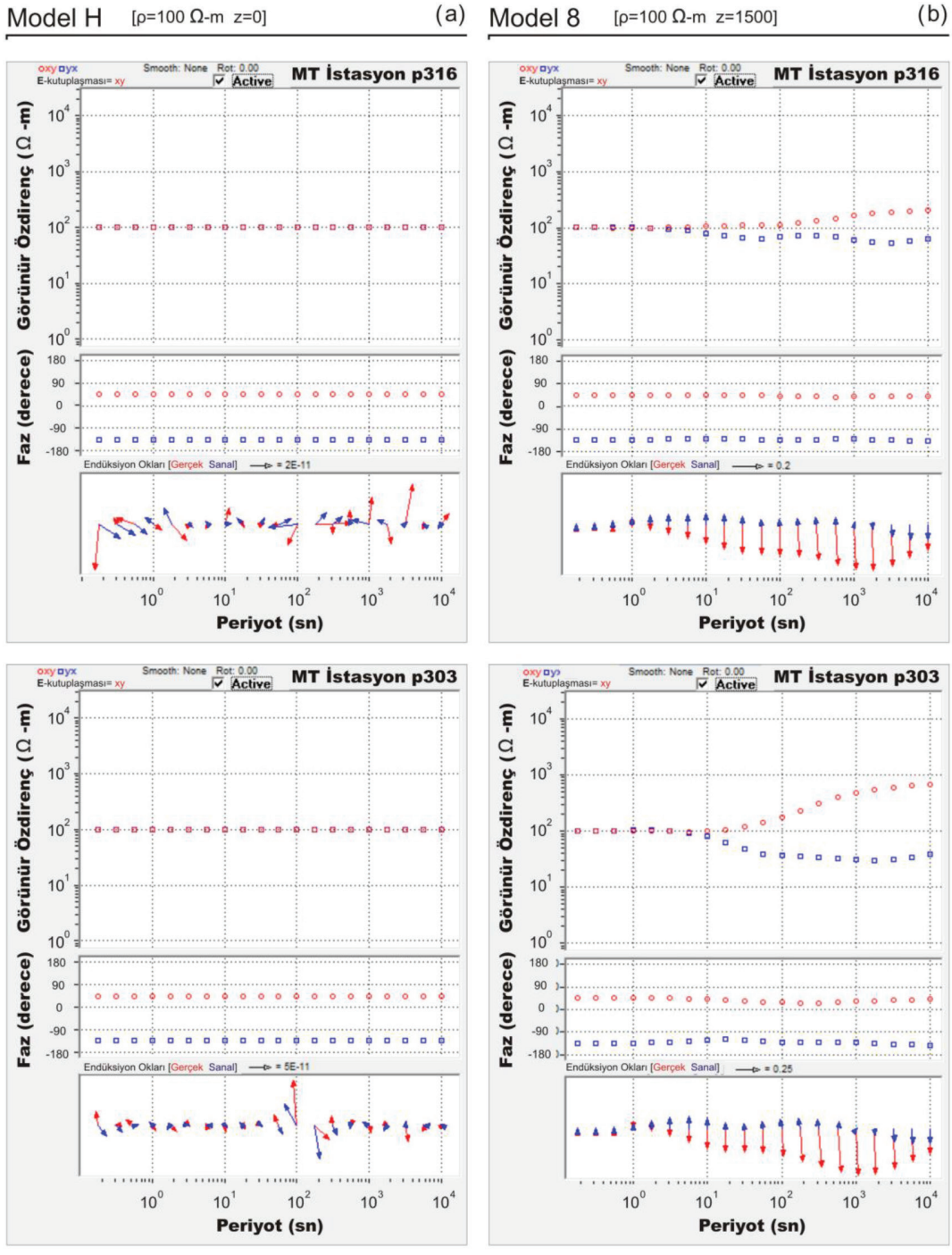
Figure 12. Comparison 3. Model responses (The comparison is between responses of models for which one has steps on the sea floor, while the other one has no steps. Model 6 was designed with steps on the sea floor, but Model 3 was not designed with steps on the sea floor).

mezken denizin, jeolojik ve tektonik birimlerin bulunması nedeniyle özdirenç eğrilerinde, endüksiyon oklarında ve faz eğrilerinde söz konusu parametrelerin varlığından dolayı farklılık görülmektedir. Tüm bu parametrelerin tek bir modelde toplandığı durumda elektrik özdirenç eğrileri, endüksiyon okları ve faz eğrileri üzerindeki deniz etkisinin miktarı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 13. Karşılaştırma 4. Model tepkileri (Fay parametresinin etkisinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Fay özdirenci 5 Ω-m olarak atanmıştır. Fay kalınlığı ve fay derinliği sırasıyla 3 km ve 19 km olarak tasarlanmıştır. Model 6'da fay parametresi bulunmazken Model 7'de fay parametresi bulunmaktadır. İki modelde de deniz derinliği basamaklı olacak şekilde tasarlanmıştır).

Figure 13.Comparison 4. Model responses (The comparison is between responses of models for which one has a fault, while the other one does not. The resistivity of the fault is 5 Ω-m. The thickness and the depth of the fault is 3 km and 19 km, respectively. Model 7 was designed with the fault while model 6 was not designed with a fault. Both of the models were designed with steps on the sea floor).



Şekil 14. Karşılaştırma 5. Model tepkileri (Homojen model ve bölgenin jeolojik ve tektonik özelliklerinin dikkate alınarak oluşturulan modelin karşılaştırılması gösterilmektedir. Model 8'de deniz derinliği basamaklı ve 1500 m'dir. Bununla birlikte 5 Ω-m özdirençli ve 1 km kalınlıklı bir sediman tabakası ve 19 km derinlikli ve 65° eğimli bir fay bulunmaktadır. Ayrıca Model 8'de Karadeniz kıyı şeridi de basit bir biçimde eklenmiştir. p303 MT istasyonu kıyı şeridine 3.5 km uzaklığında, p316 MT istasyonu kıyıya 46.5 km uzaklığındadır).

Figure 14.Comparison 5. Model responses (The comparison is between responses of the models for which one is homogeneous and the other one has geologic and tectonic features. There are steps on the sea floor. There is also sediment with a resistivity of 5 Ω-m and a fault with thickness, depth and slope of 1 km, 19 km and 65°, respectively. Additionally Model 8 was designed with a simplified coastline of the Black Sea. The distances of the stations p303 and p316 from the coastline are 3.5 km and 46.5 km, respectively).

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kısmında manyetotellürik veri üzerindeki deniz etkisi kuramsal olarak araştırılmıştır. Bunun için Düzce bölgesine karşılık gelen alan temel alınarak ve çeşitli kuramsal modeller oluşturularak düz çözüm denemeleri yapılmıştır. Modellerden, özdirenç eğrileri, endüksiyon okları ve faz eğrileri elde edilmiş ve belirli periyotlarda çizilerek karşılaştırılmak suretiyle Karadeniz'den kaynaklanabilecek olası deniz etkisinin miktarı araştırılmıştır. Deniz-kara sınırına yakın olan istasyonların uzak olan istasyonlara göre belirli periyotlarda daha çok deniz etkisine maruz kaldığı görülmektedir. Denize yakın istasyonlarda deniz etkisi kısa periyotlardan itibaren baskın olmaya başlarken denize uzak istasyonlarda deniz etkisinin başlangıcı daha uzun periyotlardadır. Toplanan verilerin, deniz derinliğinin artmasına ve deniz-kara arasındaki özdirenç farklılığının artmasına bağlı olarak değişen bir deniz etkisine, denize uzak ve denize yakın istasyonlarda istasyonların deniz-kara sınırına uzaklığı oranında maruz kaldığı görülmektedir. Deniz etkisini, özdirenç farklılığı parametresinin deniz derinliği parametresine nazaran daha fazla kontrol ettiği görülmektedir. Bu durum sığ denizlerde bile özdirenç farklılığı yüksek ise toplanan verilerin deniz etkisine maruz kalacağını göstermektedir. Tüm modellerde incelenen periyot aralığında **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi asıl değerine dönme eğilimi göstermemiştir. Özdirenç farklılığı ve deniz derinliği arttıkça **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi asıl değerinden uzaklaşmıştır. Buna karşın **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisi uzun periyotlarda asıl değerine dönme eğilimi göstermiştir. Endüksiyon okları ise, deniz etkisinin bulunduğu periyotta düşey manyetik alan arttığından dolayı büyüklük olarak yüksek değerler ile görülmüştür. Yakın istasyonlarda endüksiyon okları üzerindeki bu etki geniş bir periyot aralığında görülmüşken uzak istasyonlarda belirli bir periyot aralığında görülmüştür. Bu periyot aralığı deniz derinliği arttıkça daha uzun periyotlara kayma eğilimi göstermiştir. Özdirenç farklılığının artması durumunda ise, uzak istasyonda endüksiyon okları üzerindeki etkinin değişmediği görülmüştür. Tüm modellerde gerçek endüksiyon okları (kırmızı oklar) deniz etkisinin kendini gösterdiği periyotta yön değiştirmişlerdir. Bu periyotta **E**-kutuplaşması özdirenç eğrisi ve **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisi arasındaki fark artmaya başlamıştır. Sanal endüksiyon okları (mavi oklar) ise **B**-kutuplaşması özdirenç eğrisinin dalgalanma (eğrinin artması azalması) eğilimi gösterdiği periyotlarda yön değiştirme eğilimi göstermiştir. Tüm bu sonuçlar MT istasyonun denizden 46.5 km uzaklıkta olsa bile belirli periyotlarda deniz etkisine maruz kaldığını gösteriyor. Denize daha yakın istasyonlar daha kısa periyotlarda deniz etkisine maruz kalmışlardır. Bu nedenle Düzce bölgesinde toplanan ya da ileride toplanacak olan MT verilerinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için veriler üzerindeki deniz etkisinin giderilmesi gerekmektedir. MT tepkisi üzerindeki deniz etkisini giderebilmek için deniz etkisinin miktarı birçok düz çözüm modellemesi yapılarak tespit edilir. Deniz etkisinin miktarı belirlendikten sonra, ters çözüm aşamasında denizin modelde sabitlenmesi gereklidir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, çalışmanın hazırlanması aşamasında teknik ve program desteklerinden dolayı Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne teşekkür ederler. Ayrıca yayını değerlendirip katkı sağlayan hakemlere de teşekkür ederler. Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP Proje No: 20145001044) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting. Geophysics, 18 (3), 605-635.

Constable, S., Key, K. and Lewis, L., 2009. Mapping offshore sedimentary structure using electromagnetic methods and terrain effects in marine magnetotelluric data. Geophysical Journal International, 176 (2), 431-442.

Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F., 2013. 1/1.125.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi-, Ankara, Türkiye.

Haak, V. and Hutton, V. R. S., 1986. Electrical resistivity in continental lower crust. In The Nature of the Lower Continental Crust, eds. J. B. Dawson, D. A. Carswell, J. Hall, and K. H. Wedepohl. Oxford: Blackwell Scientific Publications. Geological Society Special Publication, 24, 35-49.

Han, N., Nam, M. J., Kim, H. J., Lee, T. J., Song, Y. and Suh, J. H., 2009. Three-dimensional inversion of magnetotelluric data including

sea effects obtained in Pohang, Korea. Journal of Applied Geophysics, 68 (4), 533-545.

Jiracek, G. R., Haak, V. and Olsen, K. H., 1995. Practical magnetotellurics in a continental rift enviroment. Elsevier, 103-129,

Jones, A. G., 1983. The problem of current channelling: A critical review. Geophysical Surveys, 6, 79-122.

Kaya, T., Kasaya, T., Tank, S. B., Ogawa, Y., Tunçer, M. K., Oshiman, N., Honkura, Y. and Matsushima, M., 2013. Electrical characterization of the North Anatolian Fault Zone underneath the Marmara Sea, Turkey by ocean bottom magnetotellurics. Geophysical Journal International, 193 (2), 664-677.

Key, K. and Constable, S., 2011. Coast effect distortion of marine magnetotelluric data: Insights from a pilot study offshore northeastern Japan. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 184 (3-4), 194-207.

Konca, A. O., Leprince, S., Avouac, J. and Helmberger, D. V., 2010. Rupture Process of the 1999 Mw 7.1 Duzce Earthquake from Joint Analysis of SPOT, GPS, InSAR, Strong-Motion, and Teleseismic Data: A Supershear Rupture with Variable Rupture Velocity. Bulletin of the Seismological Society of America, 100 (1), 267-288.

Mackie, R. L., Madden, T. R. and Wannamaker, P. E., 1993. Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations-Theory and comparisons to integral equation solutions. Geophysics, 58 (2), 215-226.

Maxwell, J. C., 1865. A dynamical theory of the electromagnetic field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 155, 459-512.

Nam, M. J., Kim, H. J., Song, Y., Lee, T. J. and Suh, J. H., 2008. Three dimensional topographic corrections of magnetotelluric data. Geophysical Journal International, 174 (2), 464-474.

Parkinson, W. D., 1959. Directions of Rapid Geomagnetic Fluctuations. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2 (1), 1-14.

Parkinson, W., 1962. The influence of continents and oceans on geomagnetic variations. Geophysical Journal of The Royal Astronomical Socciety, 6, 441-449.

Peng, Z. and Ben-Zion, Y., 2004. Systematic analysis of crustal anisotropy along the Karadere–Düzce branch of the North Anatolian fault. Geophysical Journal International, 159 (1), 253-274.

Pous, J., Heise, W., Schnegg, P., Munoz, G., Marti, J. and Soriano, C., 2002. Magnetotelluric study of the Las Canadas caldera (Tenerife, Canary Islands): structural and hydrogeological implications. Earth and Planetary Science Letters, 204, 249-263.

Ranganayaki, R. P. and Madden, T. R., 1980. Generalized thin sheet analysis in magnetotellurics, an extension of Price's analysis. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 60 (3), 445-457.

Rikitake, T., 1948. Notes on the electromagnetic induction within the Earth. Earthquake Research Institute, 24, 1-9.

Rikitake, T., 1959. Anomaly of geomagnetic variations in Japan. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2 (4), 276-287.

Ritter, O., Hoffmann-Rothe, A., Bedrosian, P. A., Weckmann, U. and Haak, V., 2005. Electrical conductivity images of active and fossil fault zones. Geological Society, London, Special Publications, 245 (1), 165-186.

Robinson, A., Spadini, G., Cloetingh, S. and Rudat, J., 1995. Stratigraphic evolution of the Black Sea: inferences from basin modelling. Marine and Petroleum Geology, 12 (8), 821-835.

Santos, F. A. M., Nolasco, M., Almeida, E. P., Pous, J. and Mendes-Victor, L. A., 2001. Coast effects on magnetic and magnetotelluric transfer functions and their correction: application to MT soundings carried out in SW Iberia. Earth and Planetary Science Letters, 186 (2), 283-295.

Santos, F. A. M., Pous, J., Almeida, E. P., Queralt, P., Marcuello, A., Matias, H. and Mendes-Victor, L. A., 1999. Magnetotelluric survey of the electrical conductivity of the crust across the Ossa Morena and South Portuguese Zone suture. Tectonophysics, 313, 449-462.

Santos, F. A. M., Trota, A., Soares, A., Luzio, R., Lourenço, N., Matos, L., Almeida, E., Gaspar, J. L. and Miranda, J. M., 2006. An audio-mag-

netotelluric investigation in Terceira Island. Journal of Applied Geophysics, 59, 314-323.

Simpson, F. and Bahr, K., 2005. Practical Magnetotellurics. Cambridge University Press. Cambridge.

Singh, U. K., Kant, Y. and Singh, R. P., 1995. Effect of coast on magnetotelluric measurements in India. Annali Di Geofisica, 38 (3-4), 331-335.

Tank, B., 2010. Armutlu Yarımadası manyetotellürik verisindeki üç boyutlu deniz etkisinin incelenmesi. İstanbul Yerbilimleri Dergisi, 23 (2), 65-72.

Tikhonov, A. N., 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's Crust. Doklady Akademii Nauk, 73 (2), 295-297.

Vozoff, K., 1972. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. Geophysics, 37 (1), 98-141.

Wessel, P. and Smith, W. H. F., 1995. New version of the generic mapping tools released, EOS 76, 329.

Wiese, H., 1962. Geomagnetisch Tiefentelluric Teil II: die Streichrichtung der Untergrundstrukturen des elektrischen Widerstandes, erschlossen aus geomagnetischen Variationen. Geofisica pura e applicata, 52, 83-103.

Worzewski, T., Jegen, M., Kopp, H., Brasse, H. and Castillo, W. T., 2010. Magnetotelluric image of the fluid cycle in the Costa Rican subduction zone. Nature Geoscience, 4, 108-111.

Yang, J., Min, D.-J. and Yoo, H.-S., 2010. Sea effect correction in magnetotelluric (MT) data and its aplication to MT soundings carried out in Jeju Island, Korea. Geophysical Journal International, 182 (2), 727-740.