

TÜNEL ETÜTLERİNDE AMT (AUDIO MAGNETOTELLURIC) YÖNTEMİ

Erhan İÇÖZ¹, Ecevit G. YURTKAL², Metin ALTAY³, Nuh DEMİRBAŞ⁴

ÖZET

Tünel yapımı sırasında, yanal süreksizliklerin önceden bilinmesi, yapım güvenliği ve maliyetleri açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tür yapıları belirlemek amacıyla gerçekleştirilen jeolojik araştırmalar, her koşulda yapılabilirken araştırma sondajları için sarp yüzey topografyası ulaşım zorluklarına neden olur. Diğer yandan, derin sondajların maliyetleri de yüksektir. Jeofizik etütler ise güzergah boyunca yapılabilirdiğinden, tünel seviyesindeki jeolojik yapının sürekliliğini araştırabilmektedir. Ancak, uygulana gelen özdirenç ve sismik etütler de sarp topografyadan kısmen etkilenmektedir. Ekipmanların kolay taşınabilirliği, topografyadan etkilenmemesi, hızlı, güvenilir sonuçlar vermesi nedeniyle AMT yöntemi ise bu olumsuzlukları büyük oranda gidermektedir.

1. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEM (MT/AMT)

Derin bir jeolojik model tanımı, özellikle topografik olarak çalışılması zor ortamlarda, dağlık veya uzak bölgelerde (Şekil 1), sondaj kuyularının açılabilmesi için yüksek maliyetler ve sondaj işlemleri için genellikle çok uzun süreler gerektirir.

Derin jeofizik yüzey araştırması teknikleri arasında, Audio manyetotellürik (AMT) yönteminin özellikle dağlık zor alanlarda derin jeolojik yapıyı belirlemede etkili olduğu birçok çalışmada kanıtlanmıştır. Özellikle elektromanyetik ekipmanların küçük boyutlu olması, mobilizasyon kolaylığı, düşük maliyet avantajları ve zaman kazanımı ile araştırmaların yapılabilmesi bu tür çalışmaları oldukça değerli bir seçenek haline getirmiştir. AMT yöntemi, orta derinlikli (0-1500 m) çalışmalarda jeolojik birimler ile düzgün kalibre olmuş zemin elektrik özdirenç modeli sağlar.

Geçmiş yıllarda genellikle derin petrol veya jeotermal aramalar için kullanılan bu yöntem, son yıllarda gelişen sensör teknolojisi ile birlikte daha sığ amaçlı çalışmalarda yaygın olarak kullanılmıştır. Tünel kotu ve altına kadar jeolojik modelin oluşturulması, tünel kotunu kesen fay, süreksizlik, kritik bölgelerin belirlenmesi amacıyla başarıyla uygulanmaktadır.

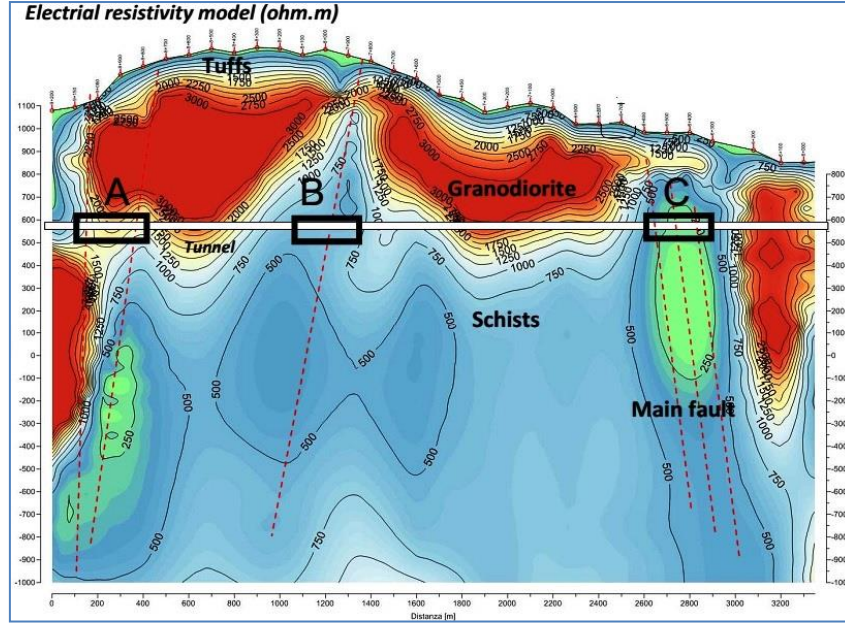
MT ve AMT yöntemi, atmosferde ve iyonesfer kökenli doğal olayların yer manyetik alanının değiştirmesinden kaynaklanan olayların, zamanın fonksiyonu olarak kayıt edilmesine dayanır. Yer manyetik ve elektrik alanındaki değişimler birbirine dik bileşenler olarak kayıt edilir. İlerleyen bölümlerde ayrıntısının anlatıldığı gibi kayıt edilen verilerden, frekansın fonksiyonu olarak, görünür özdirenç (GÖ) ve faz eğrileri elde edilir.

¹ Jeofizik Y. Mühendisi, Sumet Yerbilimleri Ltd. Şti, İzmir

² Jeofizik Mühendisi, Sumet Yerbilimleri Ltd. Şti, İzmir

³ Jeofizik Y. Mükendisi Karayolları Genel Müdürlüğü AR-GE Daire Başkanı

⁴ Jeofizik Y. Mühendisi Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü



Şekil 1. Tünel araştırmaları için Örnek bir AMT kesiti

1.1. Manyetotellürik Alanlar ve Kökenleri

MT yöntem, çoğunlukla güneşten kaynaklanan, belirli geniş aralıktaki (genellikle düşük frekanslı) manyetik alanları ve bu alanların oluştuğu (indüklediği) akım sistemlerini kaynak olarak kullanan, doğal kaynaklı bir araştırma yöntemidir.

MT alanın kaynağı, değişik olaylara bağlı olarak atmosferde, iyonosferde veya manyetosferde bulunur. Frekansı 1 Hz' den küçük elektromanyetik dalgalar, güneşten gelen yükler ile manyetosfer sınırındaki girişimlerden oluşur (Başokur, A.T. 2008 ve 2009).

Doğal elektromanyetik alan çok geniş bir spektruma sahiptir. Düşük frekanslar (0.00001-10Hz) onlarca ve yüzlerce km derinliklerdeki yerin yapısının araştırılmasında (MT metot), yüksek frekanslar (10-1000Hz) ise sığ araştırmalarda kullanılır (AMT metot).

Günümüzde manyetotellürik yöntem, kabuk ve üst mantoyu hedefleyen çok derin ve çok geniş ölçekteki çalışmalardan, petrol ve jeotermal sistemlerini ortaya çıkarmaya yönelik çok çeşitli uygulamalara ve maden yataklarının, endüstriyel ham maddelerinin, tünel ve yeraltı sularının aranması uygulamalarını da içine alabilecek kadar değişiklik göstermektedir. MT yöntem, yukarıda bahsedilen uygulamaların birçoğunda, diğer başka bir metodun uygulanması ile elde edilemeyen birçok parametreyi de araştırmacıya sağlamaktadır.

1.1.2. Tellürik Bileşenler

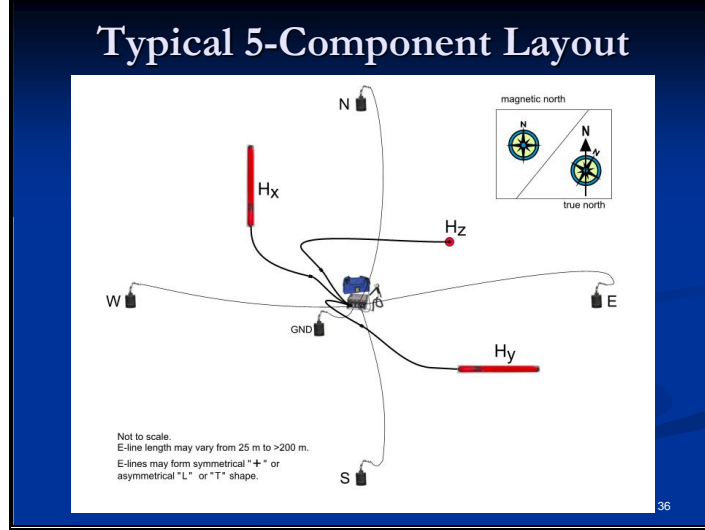
Potansiyel doğrudan ölçülebilen bir büyüklük olmadığından, yüzeyin birkaç on cm aşağısına kadar gömülmüş potansiyel elektrotları kullanılarak bu iki potansiyel elektrotu arasındaki potansiyel farkı ölçülmektedir. Tellürik sinyal Kuzey-Güney ve Doğu-Batı yönlerinde yerleştirilmiş birbirlerine dik doğrultularda iki elektrot çifti kullanılarak ölçülür. Böylece her istasyonda elektrik alanının iki yatay bileşenin (E_x ve E_y) sürekli zaman serileri kaydedilmiş olur. Elektrotların açıklıkları ölçü alanındaki gürültü seviyesine ve sinyal şiddetine bağlı olarak değişir.

1.1.3. Manyetotellürik Bileşenler

Manyetik bileşenler, tellürik bileşenlere nazaran daha karmaşık bileşenlerdir. 0.00001 Hz - 1 Hz arasındaki uzun periyotları ölçmek için 50 000 veya daha fazla sarmaldan oluşmuş bobinler kullanılır (PHOENIX Geophysics Journal (2011)). 1 Hz ile 10 kHz arasındaki periyotları kaydetmek için tasarlanmış manyetik alan kaydedici düzeneklerde ise daha kısa boylu ve daha az sarmaldan oluşturulmuş bobinler kullanılır (PHOENIX Geophysics Journal (2011)).

1.2. AMT Ölçü Düzenegi

AMT yöntemde dik koordinat sisteminde doğal elektrik alanının iki bileşeni (E_X , E_Y) ve manyetik alanın üç bileşeni (H_X , H_Y ve H_Z) ölçülür. AMT ölçü düzenegi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. AMT yöntemin arazi yerleşimi (E_X , E_Y tellürik alanlar, H_X , H_Y ve H_Z manyetik alanlar)

Manyetotellürik bileşenler ile her bir istasyonda manyetik alanın üç bileşeni (H_X , H_Y ve H_Z) ölçülür. Yataydaki iki bileşen (H_X , H_Y) tellürik bileşenler ile aynı doğrultulardadır. Üçüncü bileşen (H_Z) düşey konumda yerleştirilir.

Bu bobinler AMT düzeneginin en kritik parçalarıdır. Çoğunlukla sığ bir çukura gömülmeleri gereklidir, çünkü, rüzgar, ağaçlık alanlar ve trafik gibi çok küçük partikül hareketlerine neden olan olaylar bile gürültüye yol açmaktadır.

Manyetik alanın yatay veya düşey bileşenlerinin oranından yer altında var olan iletkenlik süreksizliklerinin (çatlak, fay, dayk vb.) yerleri saptanabilir (Ercan, A. 1981). MT verisi, bir boyutlu (1D) veya iki boyutlu (2D) değerlendirilerek gerçek derinlik ve öz direnç değerlerine bağlı son yer elektrik modelleri elde edilir.

1.3. Kullanılan Alet:

Arazi çalışmaları sırasında, Kanada Phoenix firması tarafından üretilen MTU-5A ekipman kullanılmıştır. Manyetik sensör olarak AMT ölçümlerinde, AMTC30 tipi bobinler kullanılmıştır. Bu bobinler 10000 Hz ve 1 Hz arasındaki frekanslarda yüksek kaliteli manyetik verileri ölçebilen yaklaşık 3 kg ağırlığında ve 82.5 cm boyutlarındadır (PHOENIX Geophysics Journal (2011)).

Burada H_Z (düşey) bileşeni, jeolojik doğrultu (strike) hakkında bilgi almak için kaydedilir. Diğer bileşenler ise yeraltı elektrik öz dirençleri hakkında bilgi edinmek için ölçülmektedir.

1.4. Değerlendirme aşamaları

1.4.1. Zaman Serileri

Doğrusal trentlerin, saçılmış verilerin ve veri setlerinin son kısımlarından kaynaklanan bozucu etkilerin tesirinden kaçınmak maksadı ile pencereleme işlemlerinden sonra zaman ortamından frekans ortamına geçiş hızlı fourier dönüşümü (fast fourier transfor) kullanılarak yapılır. Veri, genellikle geniş ve üzerleyen frekans bantları halinde toplanır. Sürekli zaman serilerinin veri işlemine yönelik kademeli ayıklama yöntemi (cascade decimation) uygulanır (Wight and Bostick, 1977).

1.4.2. . Audio Manyetotellürik Veri İşlem

Toplanan AMT verilerinin spektral analizi, PHOENIX firması tarafından geliştirilen SSMT2000 ve MT Editör yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Her bir istasyondaki veri paketlerine (uzak-referans istasyonları da dahil) aşağıdaki veri işlem adımları sıra ile uygulanmıştır.

1. Kademeli ayıklama (cascade decimation),
2. Hızlı Fourier Dönüşümü,
3. Yığılma ve görünür özdirenç eğrisini elde edilmesi.
4. 2 boyutlu ters çözüm

1.4.3. Ayrıştırma (Decomposition)

Empedans tensörü, istendiği gibi ideal iki boyutlu değildir. Yani, empedans tensörünü döndürerek Z_{xx} ve Z_{yy} 'leri sıfır yapan bir koordinat absisi yoktur (Groom ve Bailey, 1989). Bu duruma neden olarak veri hataları veya yeryüzünde var olan "galvanic akımlar" gösterilebilir. Elektrik yükleri, yüzeye yakın olan üç boyutlu iletken yapıların içinde, yalıtkan yapıların ise dışında kümelenirler. Bu durumların giderilmesinde ayrıştırma yöntemi kullanılır. Bu ortamın veri ayrıştırma işleminde Ankara üniversitesine ait yazılımlar kullanılmıştır.

1.4.4. Döndürme İşlemi (Rotation)

Arazi çalışmalarında AMT verileri, her istasyon için manyetik veya coğrafik kuzey doğrultusunda alınır. Bu ölçümler, daha sonra istenilen doğrultuya döndürülebilir. Bu döndürme işlemi, ölçülen doğrultu ile jeolojik doğrultu arasındaki açı kadar eksenleri döndürme işlemidir. Döndürme işleminden sonra; TE (elektrik alan jeolojik doğrultuya paralel) ve ona dik TM modları belirlenmektedir.

1.4.5. Durağan Kayma (Static Shift)

MT verilerinin analizinde karşılaşılan en büyük sorun durağan kaymadır. Bu olay, doğrudan olarak görünür özdirenç eğrilerinde gözlemlenir. Bu etki nedeniyle görünür özdirenç eğrileri y-ekseni boyunca aşağı veya yukarı kayar. Problemin nedeni, ölçüm yapılan elektrotların hemen yakınlarında olan bozucu cisimler ve elektrotların farklı jeolojik birimlerde olmasından kaynaklandığı şeklinde açıklanır. Çalışılan alanda, elimizde bulunan başka bir veri kaynağı bulunmadığından kayma etkileri birbirlerin göre otomatik olarak yapılmıştır.

1.4.6. İki Boyutlu Ters Çözüm

Yeraltındaki gerçek özdirenç dağılımının hesaplanması için 2-Boyutlu ters çözüm işlemi uygulanır ve ölçüm profili boyunca yeraltı yapısını temsil edebilecek 2-Boyutlu yerelektrik modeli elde edilir. 2-Boyutlu yerelektrik kesitindeki özdirenç dağılımından, tünel sahasının jeolojik yapısına ait bilgiler elde edilmiştir.

MT/AMT yönteminde ters çözüm problemi doğrusal değildir. Bu nedenle, MT verilerinin ters çözümünde, Yinelemeli-Doğrusallaştırılmış (YD) (iterated-linearized) yöntem kullanılır (Rodi and Mackie 2001). Bu çözüm, doğrusal olmayan problemlerin Levenberg-Marquard (Levenberg 1944, Marquard 1963, 1970) veya SEKK çözümü olarak bilinir. Bu denklemlerde çözüm, yinelemeli olarak yapılır. Ters çözüm işlemine bir başlangıç modeli ile başlanır. MT verilerinin 2B ters çözümünde genelde homojen ortam başlangıç modeli alınır. Daha sonra her yinelemede, model düzeltme vektörü model parametre vektörüne eklenecek ters çözüm işlemine devam edilir.

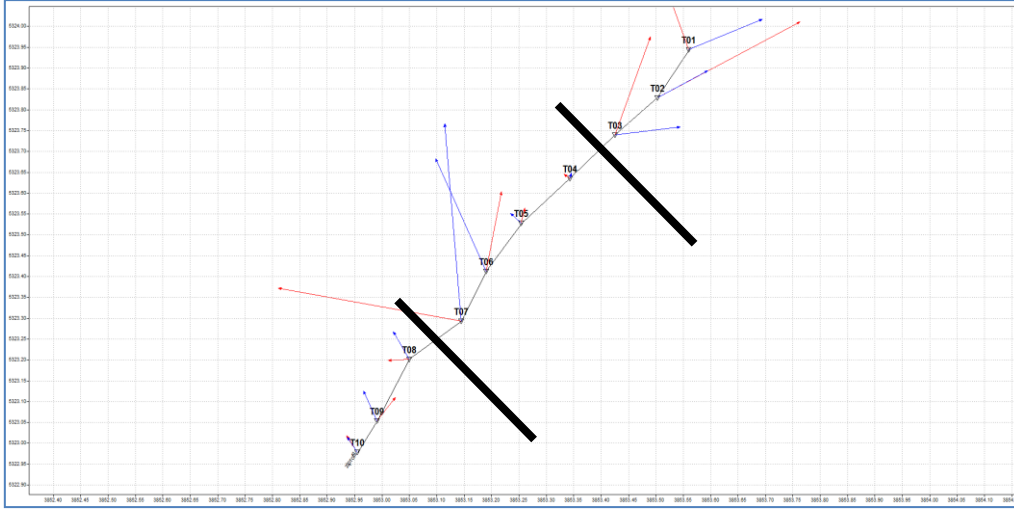
Burada IMAX en büyük yineleme sayısıdır. Ters çözüm işlemi, bu yinelemeye kadar devam eder. Algoritma, her yinelemede aşağıdaki gibi hesaplanan karekök hata (RMS Root mean square error) değerinin bir tolerans değerine ulaşmasıyla veya IMAX' a ulaşılmadan sonlandırılır.

1.4.7. TE – TM Modlar

Tabakalı bir ortamda ölçülen görünür özdirenç değerleri, elektrik ve manyetik alanlarının yönlerine bağımlı değildir. İki-boyutlu ve üç-boyutlu ortamlarda ise durum tabakalı ortamlara göre değişiklik gösterir. Eğer bir yatay eksen boyunca (burada x eksenini alınmıştır) ortamın özdirenç sabit ise birbirinden ayrı iki elektromanyetik mod vardır Bunlar TE modu (TE-Transverse Electric veya E-paralel) ve TM modudur (TM-Transverse Magnetic veya H-paralel).

1.4.8. İndüksiyon Vektörleri

Bir indüksiyon vektörünün teorik maksimum genliği, 2-D durumu için 1.0'dır. İndüksiyon vektörü büyüklüğünün, anomali öz direncinin art alan öz direncine oranına bağlı olan bağıl bir değer olduğu dikkate alınmalıdır. Yatay katmanlı bir toprakta, indüksiyon vektörünün büyüklüğü sıfırdır. İletken gövdeler ve faylar, indüksiyon vektörünün genliğinde anomaliler yaratır. Fay ya da yanal süreksizliklerin yeri için indüksiyon vektörlerindeki terslenmeden yararlanılır. İndüksiyon vektörleri, 1 HZ için hazırlandığında derindeki ve 10 Hz için hazırlandığında, yüzeye daha yakın süreksizlikler hakkında bilgi vermektedir.



İndüksiyon Vektörleri ve olası faylar

2. Audio Manyetotellirik (AMT) Arazi Çalışmaları

2.1. Zigana Tünelindeki uygulama: Türkiye'nin en uzun tünellerinden Zigana tüneli, yaklaşık 800 metre derinlikten geçecektir. Bu amaçla, bir kaç sondaj açılarak tünel güzergahının yapısı aydınlatılmaya çalışılmıştır. Ancak, 13 km uzunluğundaki tünelin ortalarına yakın bölümü, tünel derinliğinin 800 metre dolayında olması ve topografik koşulların elverişsizliği nedenleriyle yeterince aydınlatılamamıştır.



Şekil 3. Ölçü noktalarının konumu

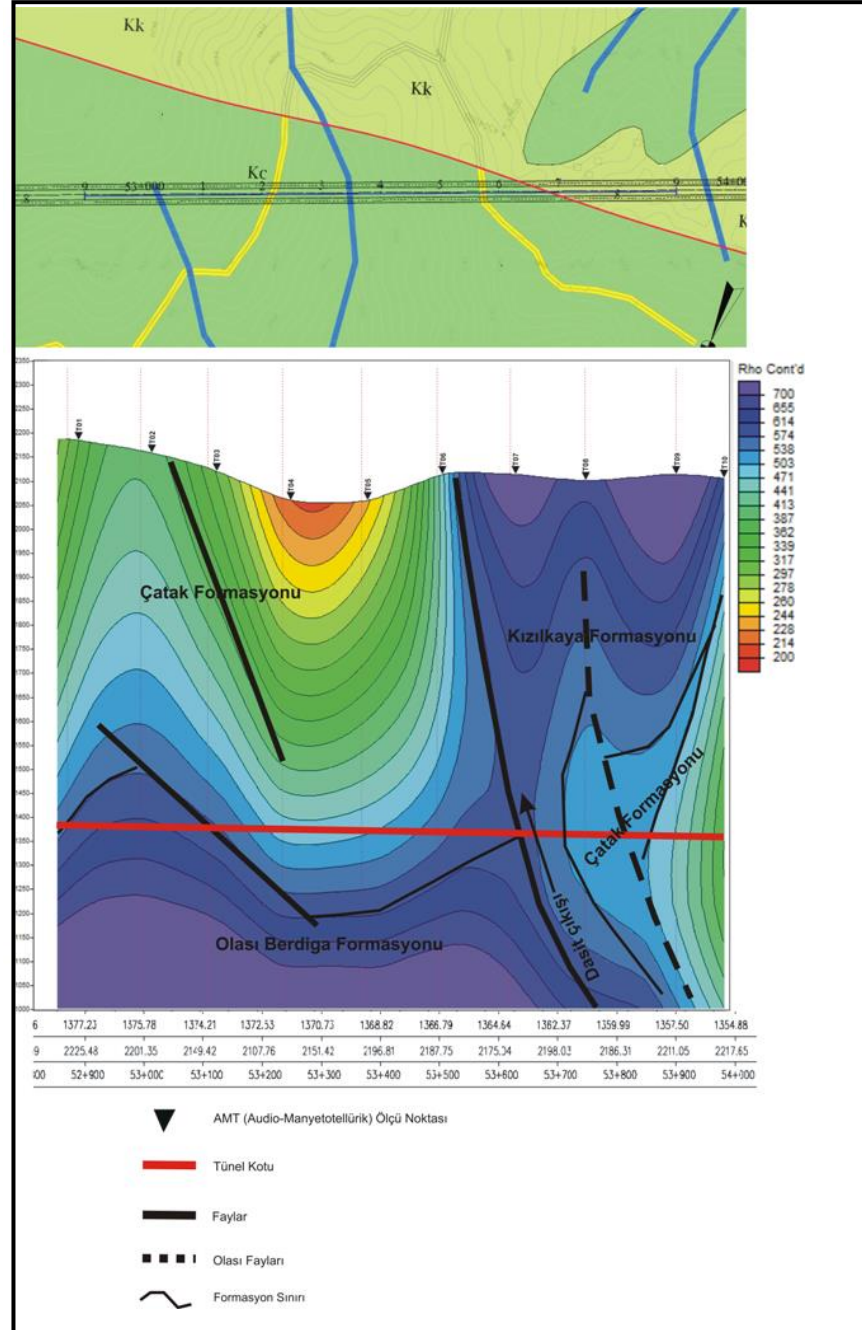
Topografyanın çok engebeli olması, topografik hatalara yol açacağı için öz direnç ölçülerinin sağlıklı sonuç verme olasılığı da bu derinlik için oldukça azdır. Sismik araştırmalar ise yüksek maliyetleri nedeniyle tercih

edilmemiştir. Bu bölümdeki tünel güzergahı seviyesinin jeolojik yapısının çözümlenebilmesi için en uygun yöntem olarak AMT yöntemi uygulanmıştır.

Çalışmalarda, tünel profil üzerinde, 110 metre aralıklarla toplam 10 istasyonda AMT ölçüleriyle, veri toplanmıştır (Şekil 3). Arazi yerleşimi sırasında, elektrik alan x ve y dipolleri arasındaki uzaklık 50 m olarak seçilmiştir.

2.1.1. Zigana AMT Kesitinin Yorumu

Zigana Tünel profili için 10^0 döndürme açısı hesaplanarak her AMT istasyonu için, TE ve TM modları belirlenmiştir (İçöz, E ve Yurtkal, E. G. 2014).



Şekil 4. Zigana Tünel AMT Kesiti

Tüm kesitler için bu çalışmada başlangıç modeli olarak homojen ortamı ifade eden 100 ohm m değeri alınmıştır. Yineleme sayısı olarak ise 50 iterasyon alınmıştır. 50 iterasyon sonucu oluşan 2 boyutlu Zigana Tünel kesitindeki hata oranları yüzde 3'ten düşüktür.

Zigana kesiti, AMT1 nolu ölçüden başlayarak AMT10 ölçüsüne yaklaşık doğu-batı doğrultulu ve 1150 m'lik bir hat üzerinde 115 metrelik ölçü aralığıyla oluşturulmuştur. Ölçü noktalarının en yüksek kotu 1 no'lu noktada olmak üzere 2203 metredir. Oluşturulan öz direnç kesiti, en yüksek 2203 ile 1000 m seviyesi aralığını göstermektedir. Böylece, 1200 metre kalınlığında bir kesit oluşturulmuştur. Yapımı planlanan tünel kotu ise 1350m -1400 m seviyesi arasında ve hafifçe batıya doğru eğimlidir.

1 Hz için oluşturulan indüksiyon vektör yön ve büyüklükleri incelendiğinde 3-4 nolu ve 7-8 nolu ölçüler arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Bunun, derinde bulunan faylanmanın etkisi olduğu düşünülmüştür.

10 Hz için oluşturulan indüksiyon vektör yön ve büyüklükleri incelendiğinde 2-3 nolu ve 6-7 nolu ölçüler arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Bunun, yüzeye yakın bulunan faylanmanın etkisi olduğu düşünülmüştür. İki farklı frekanstan elde edilen sonuç, saptanan her iki fayın da kuzeybatıya eğimli olduğunu göstermektedir.

Ters çözüm sonucu, 2 boyutlu öz direnç model kesitinde oluşan öz direnç aralığı 200-700 ohmm arasındadır. Kırmızı renkler en düşük öz direnci, yeşil renk orta yüksek öz direnci ve mor renkler en yüksek öz direnci temsil etmektedir.

Kesiti incelediğimizde, tünel kotunu, yaklaşık 53+100, 53+650 ve 53+850 m'lerde kesen 3 fay görülmektedir. Bu fayların tümü, batı-kuzeybatı eğimlidir. Bu eğimler, gerçek eğim olmayıp, kesit doğrultularındaki izdüşümleridir.

Öz direnç dağılımlarına göre, kesit boyunca üç farklı formasyon ayrımlanmıştır. En düşük öz dirençlerle temsil edilen Çatak formasyonu ve her ikisi de yüksek öz dirençle temsil edilen, üstte Kızılkaya Formasyonu ve altta (olası) Berdiga Formasyonu.

Berdiga formasyonu, kesitin tabanında ve doğu bölgesinde görülür. Yataya yakın dalgalı bir üst topografya sergiler. Bir bölümü, tünel kotuna kadar yükselmiş görünümündedir. Doğuda ve batıda bulunan iki fay ile, batı blokları düşmüş ve tünel kotunun altına itilmiştir.

Yüzeyde ve kesitin batı kesimi dışındaki büyük bölümünde görülen Çatak formasyonu, yüzeyden tünel kotuna kadar devam eder. Doğru bölgesinde, kendi içinde gelişmiş bir faylanma bulunan bu formasyonun batı bölümünde bulunan diğer bir fay ile kesildiği ve Kızılkaya formasyonu ile faylı bir dokanak oluşturduğu izlenir. Kızılkaya formasyonu ise, aynı zamanda Berdiga formasyonunu da kesen bu fay boyunca yükselip yayılmıştır.

Kesitin batı ucunda, olası bir fayla yeniden Çatak formasyonu yükselmektedir. Ancak, bu kesit sınırları içerisinde yüzeye ulaşamamıştır. Kesitin iki ucunda görülen dik yükselimler, sınır koşullarından oluşan sanal yükselimler de olabilir.

3. Sonuç ve Öneriler

Bu örneklerden de anlaşılacağı üzere, özellikle topografyanın çok bozuk olduğu ve tünel derinliğinin fazla olduğu durumlarda, AMT yöntemi, hızlı, güvenilir çözüm üretmesi nedeniyle diğer yöntemlere oranla tercih edilmeli ya da diğer yöntemlerle birlikte kullanılmalıdır. Yöntemin uygulanması ile, sondaj sayısının azalacak olması, araştırma maliyetlerini büyük oranda (derin tünellerde % 90 a kadar) düşürecek ve sondajlar arası korelasyonu sağlayacak çözümler üretilebilecektir.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

AN ZHİGUO, Dİ QİNGYUN, WANG GUANGJİE (2008) Analytical Study on Rock Property of Long-Deep Tunnel with Csam Method, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

BAŞOKUR, A. T. (2009), Manyetotellürik Yöntem ve Jeotermal Aramalarda Kullanımı TMMOB Jeotermal Kongresi

BAŞOKUR, A.T. 2008, Manyetotellürik Yöntemde Temel kavramlar, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü.

CHEN Z., CHEN D., ZHANG Z., YE X. (2010) Application of High Frequency Magnetotelluric Method in Chimushan Tunnels (Chongqing Civicism Exploration arul Design Research Institu)

DİNÇER, Y (2007) Petrol arama Amaçlı Ölçülen Manyetotellürik Verilerin Sönümlü En küçük Kareler Yöntemi ile 2 Boyutlu Melez Ters Çözümü (Yüksek Lisans Tezi AÜ)

ERCAN, A. 1981, Manyetotellürik Yöntem İTÜ Maden Fakültesi Ders Notları

İÇÖZ E., YURTKAL E. G. (2014) Zigana tünel AMT çalışması (Sumet Yerbilimleri-yayımlanmamış)

İÇÖZ E., YURTKAL E. G., KIRICI M. (2015) Artvin- Borçka-Camili tüneli, AMT Raporu (Zimer Mühendislik-yayımlanmamış)

MUNOZ, G. (2013) Exploring for Geothermal Resources with Electromagnetic

PHOENIX GEOPHYSICS JOURNAL (2011) Phoenix AMT for Tunnel Survey

OOSKOİ, B. (2005) 1 D İnterperation of the magnetotelluric data from Travale Geothermal Field in Italy Institute of Geophysics, University of Tehran,

ST. Petersburg State University - Application of the AMT method to study of railway tunnel route, Geological faculty Center of Electromagnetic methods

TMMOB JEOTERMAL KONGRESİ BİLDİRİLER KİTABI (2010)

ULUGERGERLİ E.U. ve BAŞOKUR, A.T. (1994) manyetotellürik ters çözümde veri türlerinin katman parametrelerinin veri türlerine etkileri (1994) Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Jeofizik Mühendisliği