



## SLINGRAM YÖNTEMİYLE ELEKTROMANYETİK ANALOG MODELLEME ÇALIŞMALARI: ÇİZGİSEL İLETKEN MODEL

### (ANALOGUE MODELING EXPERIMENTS USING ELECTROMAGNETIC SLINGRAM METHOD: A LINEAR CONDUCTIVE MODEL)

Derman DONDURUR\*

#### ÖZET/ABSTRACT

Yeraltında sığ derinliklerde gömülü metal boru ve kablolar çizgisel iletkenler olarak adlandırılır ve belirli bazı jeofizik yöntemlerle araştırılabilirler. Bu tür hedeflerin aranması problemiyle genelde şehirsiz alanlarda karşılaşıldığı için, ortamların statik gürültü seviyesi yüksek olmakta ve beklenen anomalilerde farklılıklar gözlenebilmektedir. Ayrıca, yeraltı çizgisel iletkenleri, genellikle plastik veya beton borular içine konular ve bu durum elde edilen anomalilerin doğasını bozabilir. Arazide elde edilen anomalilerin yorumlanması, bu tür iletkenlerin klasik tepkilerinin modellenerek belirlenmesi durumunda doğru şekilde yapılabilir. Ancak Elektro Manyetik (EM) yöntemler için bu işlemi analitik veya sayısal olarak yapmak birçok durumda mümkün değildir. Böyle durumlarda EM analog modellemelere başvurulabilir. Bu çalışmada, EM Slingram yöntemi kullanılarak çizgisel iletken hedeflerin EM Slingram tepkileri analog olarak modellenmiştir. İki ayrı frekansta ve iki ayrı bobin aralığı için analog tepkiler elde edilmiştir. Ayrıca Slingram ile kullanılabilen üç farklı maksimum etkileşimli bobin sisteminin anomalileri birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bunların yanı sıra, çizgisel iletkenin yalıtım malzemesinin anomaliler üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Karşılaştırma için, tüm anomaliler ard-arda ve paralel-hat profilleri için elde edilmiştir.

*Metallic pipes and cables buried in a shallow depth are called linear conductors and can be explored by certain geophysical methods. Since the detection of these linear targets is generally desired in urban areas in which the cultural noise and static electrical perturbation effect are excessive and complex, the nature of the anomalies expected will probably change. The interpretation of field anomalies can correctly be made if the classical anomalies arising from such linear conductive targets are readily determined by modeling. However, this process can not be easily realized by analytically or numerically in electromagnetic (EM) methods. This problem can be achieved using EM analogue modeling experiments. In this study, the EM Slingram response of a linear conductive target was modeled in the laboratory and conventional analogous EM anomalies were obtained for two different frequencies and coil separations. Furthermore, the anomalies from three different maximum-coupled coil configurations which can be used with Slingram method, were compared against in pairs. The effect of insulator covering the linear conducting targets was also examined. All type of anomalies were obtained for in-line tandem and broadside arrays for comparison purposes.*

#### ANAHTAR KELİMELELER/KEY WORDS

EM analog modelleme, Slingram, Çizgisel İletken Model  
*EM analogue modeling, Slingram, Linear Conductive Model*

## 1. GİRİŞ

Yeraltında sığ derinliklerde gömülü metal boru ve kablolar çizgisel iletkenler olarak adlandırılmakta olup, bunların araştırılması, jeofizikte jeoteknik ve çevresel amaçlı çalışmalar grubuna girmektedir. Bu tür çalışmalarda en çok elektrik özdirenç, indüksiyon polarizasyonu ve zaman-frekans ortamı EM yöntemler ile yeraltı radarı (GPR) ve manyetometre ölçümleri kullanılır (Huiming vd., 1992).

Şimdiye dek jeofizikte daha geniş çapta çalışılmış olan maden yataklarıyla karşılaştırıldığında, çizgisel iletkenler şu genel özellikleri göstermektedir: Çok büyük uzanımlar (birkaç km veya daha fazla), sığ derinlik (genelde yüzeyin birkaç metre altında), küçük kesit yüzey alanı, iyi iletkenlik ve yalıtımsız çizgisel iletkenler için polarize olabilir yüzeyler (Guiging ve Yanzhong, 1992).

Bu tür hedeflerin aranması problemiyle genelde şehir merkezlerinde ve kültürel etkileşimin yüksek olduğu bölgelerde karşılaşıldığı için, aşağıdaki etkenleri göz ardı etmemek gerekir:

- (a)Şehir ortamında özdirenç yöntemi uygulanırken, binalar ve beton kaplamalar nedeniyle elektrotların yere çakılması zordur.
- (b)Elektriksel gürültü karmaşık ve büyüktür. Yer akımları, güç dağıtım ağından oluşan akımlar ve diğer gürültü kaynakları büyük ve düzensizdir.
- (c)Yer haberleşme kabloları ve metal borular, genellikle birçok kablo kanallı (multiple-duet) beton borular içine konulur. Bu borular, içlerinde iletken bulunsa bile, elektriksel olarak oldukça dirençlidir. Bu durum elde edilen anomalilerin doğasını bozabilir.

Bu aşamada EM yöntem/yöntemlerin kullanılması, genelde özdirenç ve IP çalışmalarında ortaya çıkan yukarıdaki problemlerin çözümünde oldukça etkili olacaktır (Huiming vd., 1992).

Arazide elde edilen anomalilerin yorumlanması, bu tür iletkenlerin klasik tepkilerinin bilinmesi durumunda oldukça kolay ve doğru şekilde yapılabilecektir. Birçok araştırmacı kültürel etkileşim konusuna dikkat çekmişlerse de, yatay çizgisel elektronik iletkenlerden oluşan EM anomalilerinin davranışı ve bunların uygulanması henüz tam olarak anlaşılabilmiş değildir (Wynn vd., 1978). Bu nedenle, kablo türü iletkenlerin EM tepkilerinin ayrıntılı analog modellemelerine ihtiyaç duyulmuştur.

Bu çalışmada, EM Slingram yöntemi kullanılarak çizgisel iletken hedeflerin EM tepkileri analog olarak modellenmiştir. İki ayrı frekansta ve iki ayrı bobin aralığı için analog tepkiler elde edilmiştir. Ayrıca yatay eş-düzlemli, düşey eş-eksenli ve düşey eş-düzlemli bobin sistemlerinin anomalileri birbiri ile karşılaştırılmıştır. Tüm ölçümler ard-arda ve paralel-hat profilleri üzerinde yapılarak, yöntemin bu her iki dizilime verdiği tepkiyi karşılaştırmak da mümkün olmuştur. Bunların yanı sıra, çizgisel iletkeni çevreleyen yalıtım malzemesinin anomaliler üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

## 2. ELEKTROMANYETİK ANALOG MODELLEME ÇALIŞMALARI

EM yöntemlerde analog modelleme çalışmalarına, arazi ölçümlerinden elde edilen verinin yorumuna yardımcı olmak amacıyla başvurulmaktadır. Özellikle EM yöntemlerde bu konu üzerinde sıkça durulmuştur. EM yöntemlerde, bir yeraltı yapısının tepkisinin hesabı, diğer jeofizik yöntemlere göre oldukça karmaşık olup, matematik analizi de güç olmakta, bu yüzden yapının EM tepkisinin hesabında güçlükler yaşanmaktadır. EM yöntemlerde analitik çözümü yapılabilen yapılar da oldukça kısıtlıdır. Düşey veya eğimli levha, küre ve dairesel şekilli halka türü yapılar dışındaki daha karmaşık yapıların analitik tepkileri literatürde yer almamaktadır (Grant ve West, 1965). Buna karşın EM analog modelleme çalışmalarında,

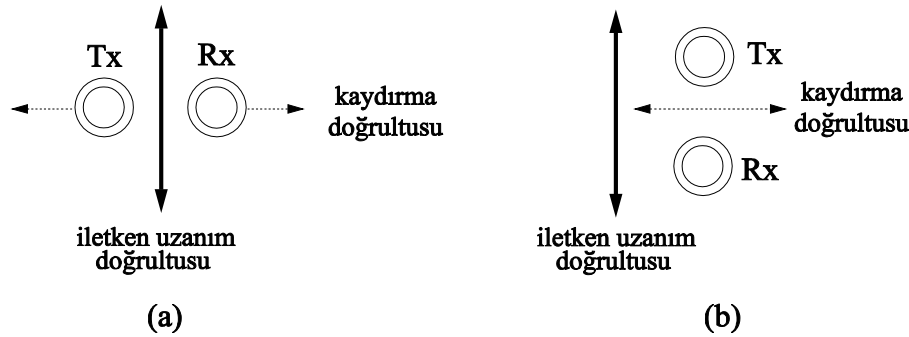
gelişigüzel şekilli birçok iletken yapının modellenmesi mümkün olmaktadır. Tüm bu nedenlerle, EM yöntemlerde yorumlama için bir temel temin etmek amacıyla analog model çalışmaları yapılmıştır.

Yukarıda anlatılan amaçlarla (Sarma ve Maru, 1971), düşey dayk ve halka türü iletkenlerin analog modellemesini yaparak, standart Slingram anomalilerini elde etmişlerdir. Ayrıca bu modelleri tuzlu su içerisine koyarak, iletken örtü tabakasının anomali üzerindeki etkisini de araştırmışlardır. (Lowrie ve West, 1965)'de, iletken örtü tabakasının etkisini ortaya koymak için analog model çalışmalarına başvurmuşlardır. (Gaur, 1963), havadan EM yöntemlerle ilişkilendirmek amacıyla EM analog model çalışmaları yapmıştır.

(Fraser ve Ward, 1967) ise, düşey ortogonal bobin çiftleri kullanarak analog modellemeler yapmışlar ve yöntemin bitişik iletkenler üzerindeki ayrımlılığını incelemişlerdir. Bunların dışında, zaman ortamı EM yöntemlerle de (Time Domain Electromagnetic Methods, TDEM) analog modellemeler yapılmıştır. (Spies, 1976), havada asılı iletken bir silindirin TDEM tepkisini laboratuarda elde etmiştir. Düzgün şekilli dayk türü yapıların TDEM tepkileri ise (Becker vd., 1972) tarafından verilmiştir.

### 3. SLİNGRAM ELEKTROMANYETİK YÖNTEMİ

Slingram sistemi, 1900'lü yılların başlarında, diğer birçok EM yöntem gibi İsveç'te geliştirilmiş, 1950'li yıllarda oldukça yaygın bir yöntem haline gelmiştir. Sistem frekans ortamı EM bir yöntem olup, aynı boyutlardaki alıcı ve verici bobinler, iletkenin uzanımına (strike) dik bir doğrultu boyunca, ard-arda (in-line profile) veya paralel hatlar üzerinde (broadside profile) hareket ettirilirlir (Şekil 1a-b). Uygulamada daha yaygın olarak ard-arda dizilim kullanılmaktadır (Ward, 1965).

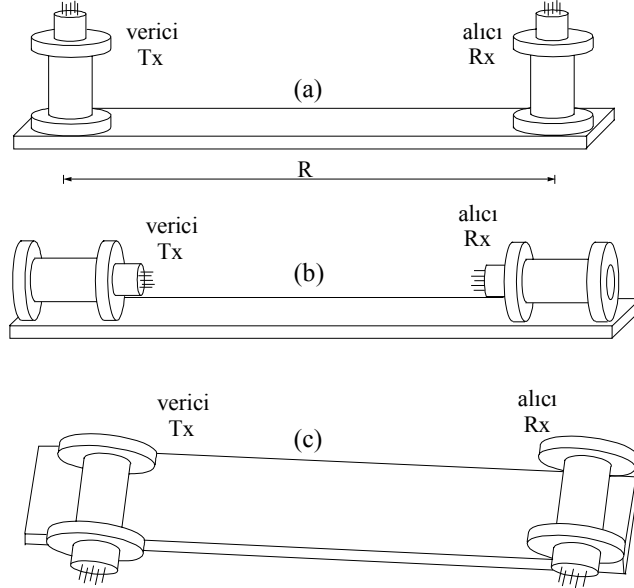


Şekil 1. Slingram sisteminde alıcı-verici bobin kaydırma hattının görünümü, (a) Ard-arda, (b) Paralel hat dizilimi (Tx verici, Rx ise alıcı bobini göstermektedir)

Sistem maksimum etkileşimlidir. Alıcıdaki ölçüm, gerçel (in-phase) ve sanal (quadrature) voltajlarının oranı cinsinden elde edilir ve vericiye monte edilen ve genelde tek bir sarımdan oluşan referans bobininde indüklenen voltaj ile ilişkilidir. Slingram sisteminin önemli bir avantajı, sistemin simetrik olması, aynı bir istasyon için alıcı ve verici yer değiştirildiğinde aynı okumanın yapılmasıdır. Bu özellik, Slingram eğrilerinin yorumlanmasında oldukça kolaylık sağlar.

Slingram sisteminin en büyük dezavantajı ise alıcı-verici aralığı iletken derinliğine eşit olduğunda anomali vermemesidir. Bunun yanı sıra, sistemin tepkisinin genliği, iletken derinliğinin alıcı-verici arası mesafeye olan oranına doğrudan bağlıdır. Bu oran ne kadar küçük olursa (iletken derinliği ne kadar az ve/veya bobinler arası mesafe ne kadar fazla olursa) o kadar büyük genlikte anomali elde edilir. Genellikle bobin düzlemlerinin yer

yüzeyine paralel olduğu alıcı-verici bobin düzeni kullanılmasına rağmen, diğer maksimum etkileşimli alıcı-verici sistemleri de kullanılabilir (Ercan, 1982). Maksimum etkileşimli sistemler, alıcı ve verici bobinlerin sarım düzlemlerinin ya da bobin eksenlerinin birbirine paralel olduğu (co-planar ve co-axial) bobin sistemleridir (Şekil 2). Bu sistemlerden herhangi birisinin Slingram ölçümlerinde kullanılması mümkün olmakla birlikte, her bir sistemin aynı bir iletken yapıya vereceği EM tepkinin farklı olacağı açıktır. Bu nedenle, her üç sistemin iletken hedefe vereceği klasik tepkinin bilinmesi arazi çalışmasından en büyük kazancın eldesi için önem taşır. Bu işlem, farklı yapıdaki iletken modeller için analog modelleme çalışmaları ile yapılabilir.

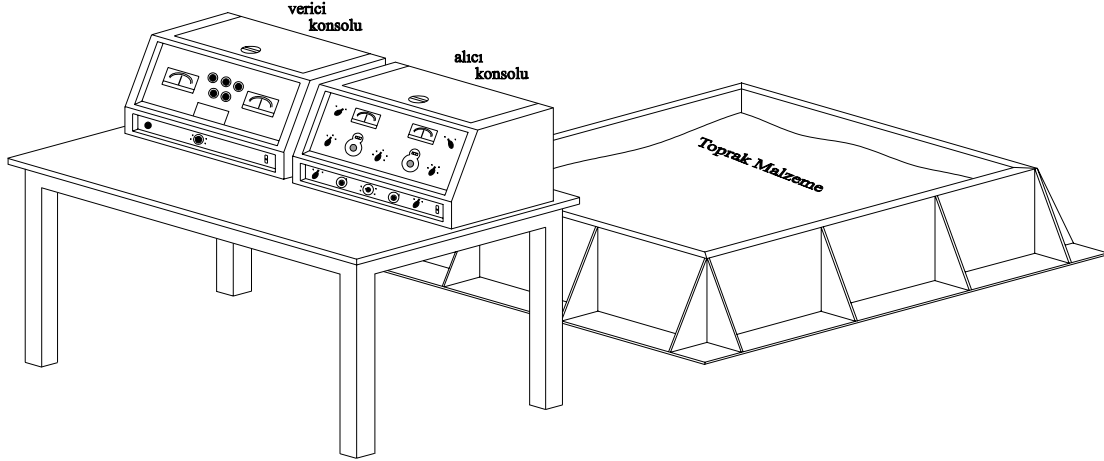


Şekil 2. Slingram EM sisteminde kullanılan alıcı-verici bobin sistemleri, (a) Yatay eş-düzlemli (horizontal co-planar), (b) Düşey eş-eksenli (vertical co-axial), (c) Düşey eş-düzlemli (vertical co-planar) sistemler

#### 4. ELEKTROMANYETİK ANALOG MODELLEME EKİPMANI (MK-II)

Kullanılan MK-II<sup>®</sup> modelleme ekipmanı, sadece laboratuarda analog modellemeler yapmak için geliştirilmiştir. Sistem, bir alıcı ve bir de verici konsoldan oluşur. Normalde tepkisi modellenecek iletken hedef havada asılı tutulur ve alıcı-verici bobinler hedefle ilişkili bir doğrultu boyunca (Traverse line) kaydırılarak ölçüm alınır. MK-II modelleme ekipmanı kullanılarak yatay bobin (Slingram) ve düşey bobin (Vertical Loop Electromagnetic, VLEM) yöntemleriyle modelleme yapmak mümkündür. Ekipman, 200 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 25 kHz ve 200 kHz olmak üzere beş ayrı frekansta ölçüm yapabilecek şekilde tasarlanmış olup, herdir frekans için ayrı alıcı-verici bobin çifti kullanılır. Slingram yöntemi için, sistemin duyarlılığı 1/10 olup, ölçüm, virgülden sonra 1 basamak duyarlılığa sahiptir.

Bu çalışmada, kullanılan çizgisel iletken model havada asılı tutulmamış, içerisine killi malzeme doldurularak modelleme yapılmasına izin veren bir analog modelleme tankı üretilmiş ve model bu tankın içine gömülmüştür (Şekil 3). Alıcı ve verici bobinler ise, aralarında sabit bir mesafe olacak şekilde, metalik olmayan bir çubuğa sabitlenmiş ve sistem tank üzerinde kaydırılarak ölçümler alınmıştır.



Şekil 3. Gömülü metal boru ve kabloların EM Slingram tepkilerini modellemekte kullanılan MK-II modelleme ekipmanı ve modelleme tankı

## 5. ÖLÇÜMLERDE KULLANILAN ÇİZGİSEL İLETKEN MODEL

EM analog modellemelerde kullanılan çizgisel iletken model, 60 cm uzunluğunda ve  $\phi \approx 0.25$  cm çapında, yüksek iletkenlikli alüminyum bir çubuktur. Yeraltında yüksek özdirençli bir yalıtım materyalinin içinde uzanan çizgisel iletkenleri modellemek amacıyla, modelin çevresi 1 mm kalınlığında, yumuşak plastik malzemeyle kaplanmıştır. Bu plastik kaplama malzemesi, doğadaki yüksek özdirençli yalıtım malzemesini yeterli derecede temsil edebilmekte olup özdirençli sonsuz yüksek olarak alınabilir. Ayrıca, iç kısımdaki iletken malzemenin girişimini önlemek amacıyla, modelin her iki ucu da yalıtılarak modellemeler yapılmıştır. Ayrıca sistemin yalıtım malzemesinden etkilenip etkilenmediğinin incelenmesi amacıyla, aynı model yalıtımsız olarak da denenmiştir.

## 6. ÖLÇEKLEME KATSAYISI (SCALING FACTOR)

İletken kütlelerin, yapay kaynaklı EM yöntemlere verdiği tepkiler, küçük ölçekli materyaller bu iletken kütlere benzetilerek laboratuarda elde edilebilir. Büyük boyutlardaki iletken kütlelerin modellenebilmeleri için “Ölçekleme Katsayısına (Scaling Factor)” ihtiyaç duyulur. Bu nedenle EM analog modelleme çalışmalarına “Ölçekli Model Çalışmalar” da denilmektedir. Uygun bir ölçekleme ile, arazideki EM kuvvet çizgilerinin dağılımını, laboratuarda doğru bir şekilde yapmak olanaklıdır.

EM modelleme çalışmalarında, ölçekleme faktörünün tanımı için, boyut farkı dışında birbirinin tamamen aynısı olan iki ayrı sistem düşünülür. Buna göre, birbiri ile aynı geometriye sahip, ancak birisi diğerinden  $n$  kez daha küçük doğrusal boyutlara sahip iki sistem ele alalım. Eğer bir sistemin EM tepkisi diğeriyle eşdeğer ise, bu durumda  $\sigma$  (iletkenlik),  $\mu$  (permeabilite),  $\varepsilon$  (geçirgenlik) ve  $t$  (zaman) parametreleri arasında, bu iki sistem için bir ilişki türetilir.

Arazi sisteminde  $p(x,y,z)$  noktasının model koordinatlarında karşılığı  $p'(x',y',z')$  ise, bu iki boyut arasındaki ilişki

$$x = n.x' \quad y = n.y' \quad z = n.z' \quad (1)$$

olup buradan “Mekanik Ölçekleme Katsayısı”dır. Maxwell’in EM dalga denklemleri

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

olup, burada  $\mathbf{E}$  elektrik,  $\mathbf{H}$  ise manyetik alan şiddetidir. Maxwell'in bu diferansiyel denklemleri doğrusaldır ve aynı zamanda doğrusal bir ölçeklemeye de izin vermektedir. Eğer küçük sistemdeki (model sistem) EM tepkiyi  $\mathbf{H}'$  ve  $\mathbf{E}'$  ile, büyük sistemdekini de (arazi sistemi)  $\mathbf{E}$  ve  $\mathbf{H}$  ile gösterirsek, model ve arazi sistemlerinin her ikisi de Maxwell'in dalga denklemini sağlamalıdır. Buna göre

$$\left( \nabla'^2 - \sigma' \mu' \frac{\partial}{\partial t'} - \varepsilon' \mu' \frac{\partial^2}{\partial t'^2} \right) \mathbf{H}' = 0 \quad (4)$$

$$\left( \nabla^2 - \sigma \mu \frac{\partial}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (5)$$

Aynı zamanda, eğer küçük sistem büyüğün bir modeli ise, boyutlar ve zaman uygun olarak ölçeklendiğinde  $\mathbf{H}'$  ve  $\mathbf{E}'$  Denklem 5'de sağlamalıdır.

$$\left( \nabla^2 - \sigma \mu \frac{\partial}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{H}' = 0 \quad (6)$$

$$\frac{x}{x'} = \frac{y}{y'} = \frac{z}{z'} = n^2 \quad \text{ve } f \text{ frekans olmak üzere } \frac{t'}{t} = \frac{f'}{f} \text{ dir ve}$$

$$n^2 = \frac{\sigma' f' \mu'}{\sigma f \mu} \quad (7)$$

olup, model ortamda ferromanyetik materyal yoksa, permeabilite serbest havanınkinden pek farklı olmayacaktır ( $\mu=4\pi 10^{-7}$  H/m). Bu durumda  $\mu'/\mu=1$  alınarak, boyutları ölçeklemek için (Grant ve West, 1965)

$$\frac{\sigma' f'}{\sigma f} = n^2 \quad \text{veya} \quad \frac{\rho' f'}{\rho f} = n^2 \quad (8)$$

elde edilir. Denklem 8'e göre, boyutlardaki  $n$  oranında bir azalma iletkenlik ( $\sigma'$ ) veya frekansın ( $f'$ )  $n^2$  kadar artırılmasıyla dengelenebilir. Bundan başka,  $\sigma'$  ve  $f'$  nün her ikisi de, çarpımları  $n^2$  ye eşit olacak şekilde artırılarak bu denge sağlanabilir. Buna göre, model seçiminde aşağıdaki koşullara uyulmalıdır.

$$\begin{aligned} x' &= x/n & f' &= nf \\ y' &= y/n & \sigma' &= n\sigma \\ z' &= z/n & \mu' &= \mu \end{aligned}$$

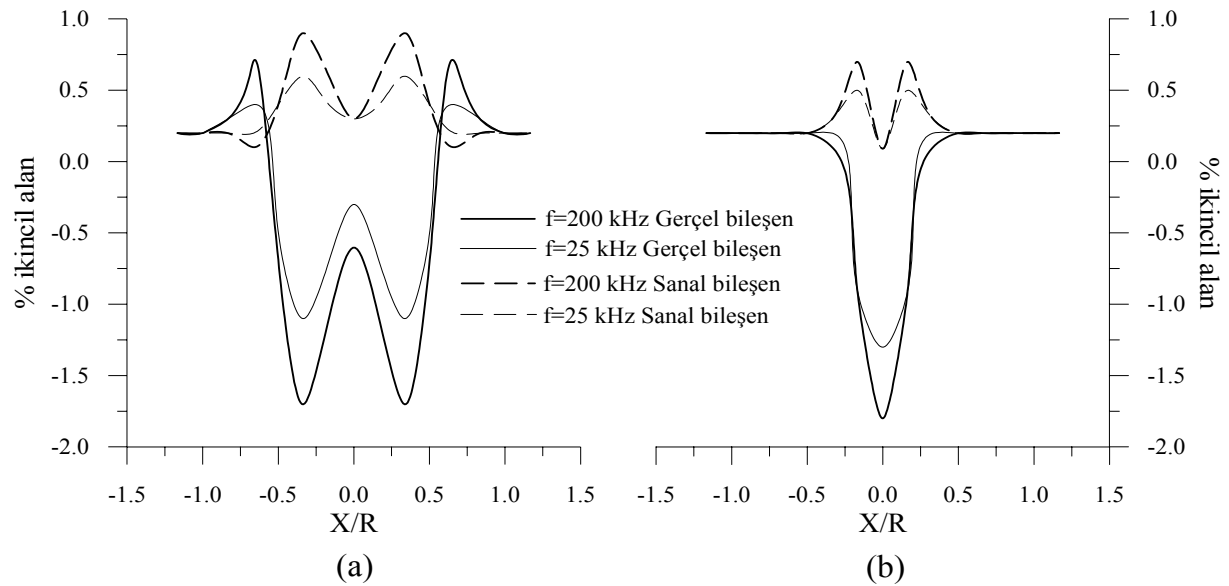
Bu çalışmada yapılan ölçümler için bobinler arası mesafe  $R=20$  cm ve  $R=30$  cm, iletken kablunun derinliği ise  $Z=2.5$  cm olarak alınmıştır. Bu durumda  $Z/R$  oranı,  $R=30$  cm için  $\cong 0.08$  ve  $R=20$  cm için  $\cong 0.13$  olmaktadır. Frekans tepkilerinin eldesi için ise  $f=200$  kHz ve  $f=25$  kHz'lik frekanslar kullanılmış olup ölçekleme faktörü olarak  $n=50$  mertebesinde bir değer göz önünde bulundurulduğu taktirde, modelde kullanılan boyut ve frekans parametreleri ölçeklenerek gerçek arazi parametrelerine dönüştürülürse,  $R=20$  cm'lik alıcı-verici aralığı 10 m,  $R=30$  cm'lik alıcı-verici aralığı 15 m ve 2.5 cm olarak alınan gömülü çizgisel iletkenin derinliği ( $Z$ ) ise arazide 1.25 m'ye karşılık gelmektedir. Benzer şekilde kullanılan frekanslar da ölçeklenirse,  $f=25$  kHz, arazide 500 Hz'e ve  $f=200$  kHz ise arazide 4 kHz'e karşılık gelmektedir. İletken modelin yaklaşık 0.25 cm olan çapı ise arazide yaklaşık  $\phi=10$  cm olacaktır.

Bu ölçeklemeye göre, yaklaşık 1.25 m derinlikte gömülü, 10 cm yarıçaplı iletken boru üzerinde, yukarıda verilen frekanslar ve bobin aralıkları için Slingram ölçümleri yapıldığında, burada verilen model eğriler elde edilecektir.

## 7. ANALOG MODELLEME İLE ELDE EDİLEN EM TEPKİLER

### 7.1. Kullanılan Frekansın Anomalilere Etkisi

Slingram sisteminde genellikle yatay eş-düzlemlili bobin sistemi kullanıldığı için, frekans ve bobin aralığı seçiminin ve yalıtım malzemesi etkisinin karşılaştırmalarında da bu sistem seçilmiştir. Şekil 4'de yatay eş-düzlemlili bobin sistemi kullanılarak,  $R=30$  cm sabit alıcı-verici aralığı için,  $f=200$  kHz ve  $f=25$  kHz frekansları ile elde edilen anomaliler görülmektedir.



Şekil 4. Kullanılan frekansın, (a) ard-arda ve, (b) paralel-hat Slingram anomalilerine etkisi (Çizimler, 200 kHz yüksek ve 25 kHz düşük frekans için gerçel ve sanal bileşenleri göstermektedir)

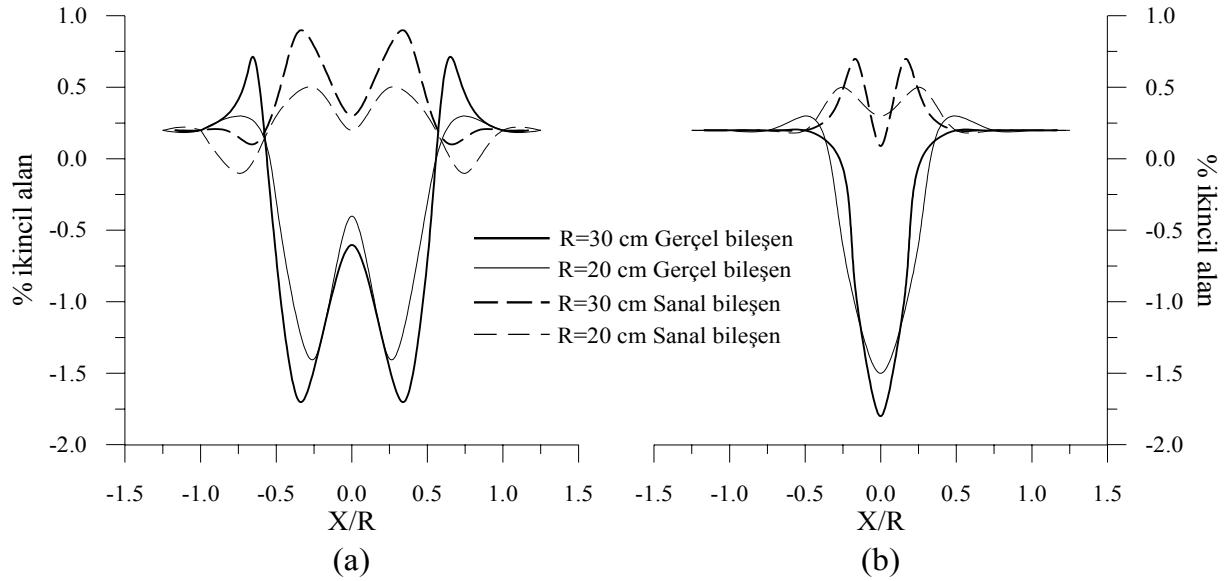
Şekil 4 incelendiğinde, yatay eş-düzlemlili bobin düzeneği ile elde edilen anomalilerin negatif ve büyük genlikli bir gerçel bileşen ve pozitif ve küçük genlikli bir sanal bileşenden oluştuğu görülür. Ard-arda dizilim için her iki frekansta da, iletken hedefin tam üzerinde ( $X/R=0$ ), eğrilerde, gerçel bileşen için pozitif doğru bir yükselme ve sanal bileşen için ise negatif doğru bir azalma mevcuttur. Özellikle gerçel bileşen anomalilerinin bu şekilde ikiye

ayrılarak iki ayrı anomali gibi davranması, yorumlamada hatalara yol açabilir. Paralel-hat diziliminin yüksek genlikli gerçel bileşen anomalilerinde bu durum gözlenmez ancak bu dizilimin sanal bileşeninin davranışı ard-arda dizilim ile benzerdir (Şekil 4b). Ayrıca paralel-hat anomalilerinin hem gerçel ve hem de sanal bileşen anomalilerinin genişliği, ard-arda dizilim anomalilerine oranla daha azdır. Bu durum sistemin ayrımlılığını artırır.

Bunların dışında, eğriler genlikleri açısından incelendiğinde, frekans değişiminin anomali şeklinde değişiklik yapmadığı ancak  $f=200$  kHz için elde edilen anomali genliklerinin,  $f=25$  kHz için elde edilenlere oranla daha yüksek oldukları görülür. Bunun iki nedeni olup, birincisi, yüksek frekanslarda indüktif etkileşimin (inductive coupling) daha fazla olmasıdır. İkincisi ise, bilindiği gibi yüksek frekanslı sinyal sığ derinliklerde yayınabilirken, düşük frekanslı sinyal daha derinlere etki edebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan modelin derinliği, alıcı-verici aralığına oranla oldukça küçük olduğundan, sığ derinlikteki bu hedefin tepkisi, yüksek frekanslı EM alan tarafından daha iyi algılanacak ve bu frekanstaki genlik daha yüksek olacaktır.

## 7.2. Alıcı-Verici Bobin Aralığının Anomalilere Etkisi

Şekil 5,  $f=200$  kHz frekans için  $R=20$  cm ve  $R=30$  cm bobin aralığı seçiminin Slingram anomalilerine etkisini göstermektedir. Anomalilerin biçimi Şekil 4'de verilenlerle oldukça benzerdir. Ancak ard-arda dizilimin, küçük bobin aralığı için biraz daha dar bir eğri verdiği söylenilebilir (Şekil 5a).



Şekil 5. Alıcı - verici bobin aralığının, (a) ard - arda ve, (b) paralel - hat Slingram anomalilerine etkisi (Çizimler, 200 kHz frekans için  $R=30$  cm ve  $R=20$  cm bobin aralığı kullanılarak elde edilen gerçel ve sanal bileşenleri göstermektedir)

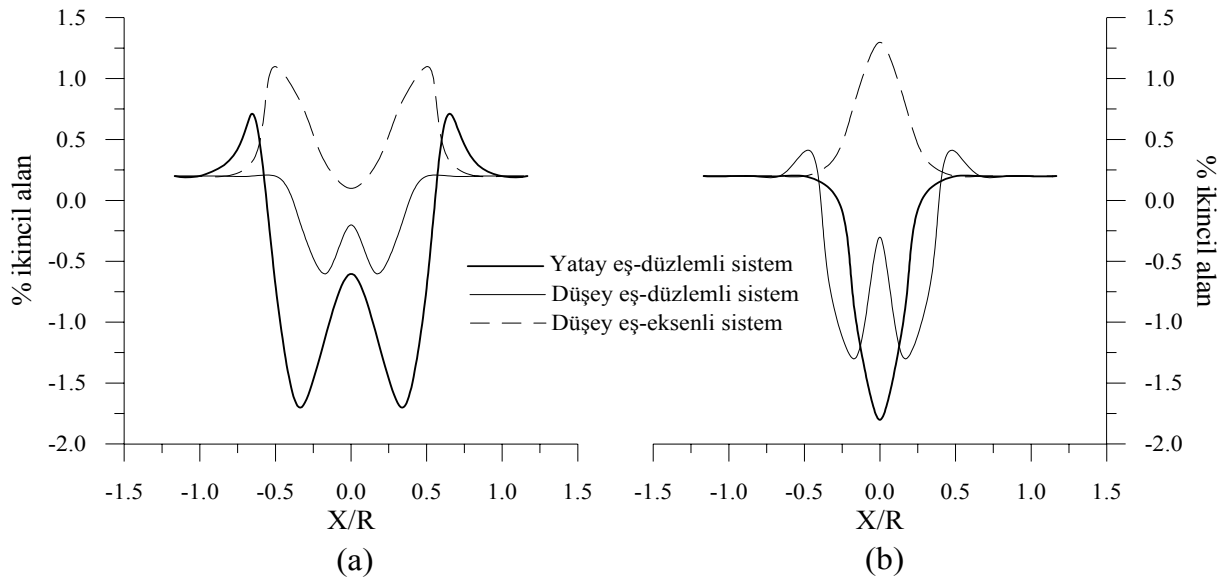
Ayrıca, alıcı-verici bobin aralığı arttıkça anomali genliğinde de yükselme gözlenmektedir. Bunun nedeni, Slingram sisteminin, iletken hedef derinliği/bobin aralığı ( $Z/R$ ) oranı küçüldükçe daha büyük genlikli anomaliler vermesidir. Burada kullanılan  $R=30$  cm bobin aralığı,  $Z/R$  oranını  $R=20$  cm'ye oranla daha küçük yaptığından 30 cm bobin aralığı için daha büyük genlikli anomaliler elde edilmiştir.



### 7.3. Kullanılan Bobin Sisteminin Anomalilere Etkisi

200 kHz frekans altında,  $R=30$  cm için bobin düzeneklerinin karşılaştırıldığı grafikler Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, ard-arda ve paralel-hat dizilimlerinin her ikisi için, en büyük genlikli anomaliyi yatay eş-düzlemlili bobin sistemi vermektedir. Bu dizilimin anomali negatif olup, paralel hat dizilimi için tek bir negatif anomali verdiği halde, ard-arda dizilim için anomalinin ikiye ayrıldığı görülmektedir. Düşey eş-düzlemlili sistemin tepkisi de bu dizilimle benzer olup, genlik olarak daha küçük bir negatiftir. Ayrıca paralel hat dizilimi için verdiği anomali, diğer sistemlerden farklı olarak tek bir pik değil, iki ayrı negatif anomali şeklindedir.

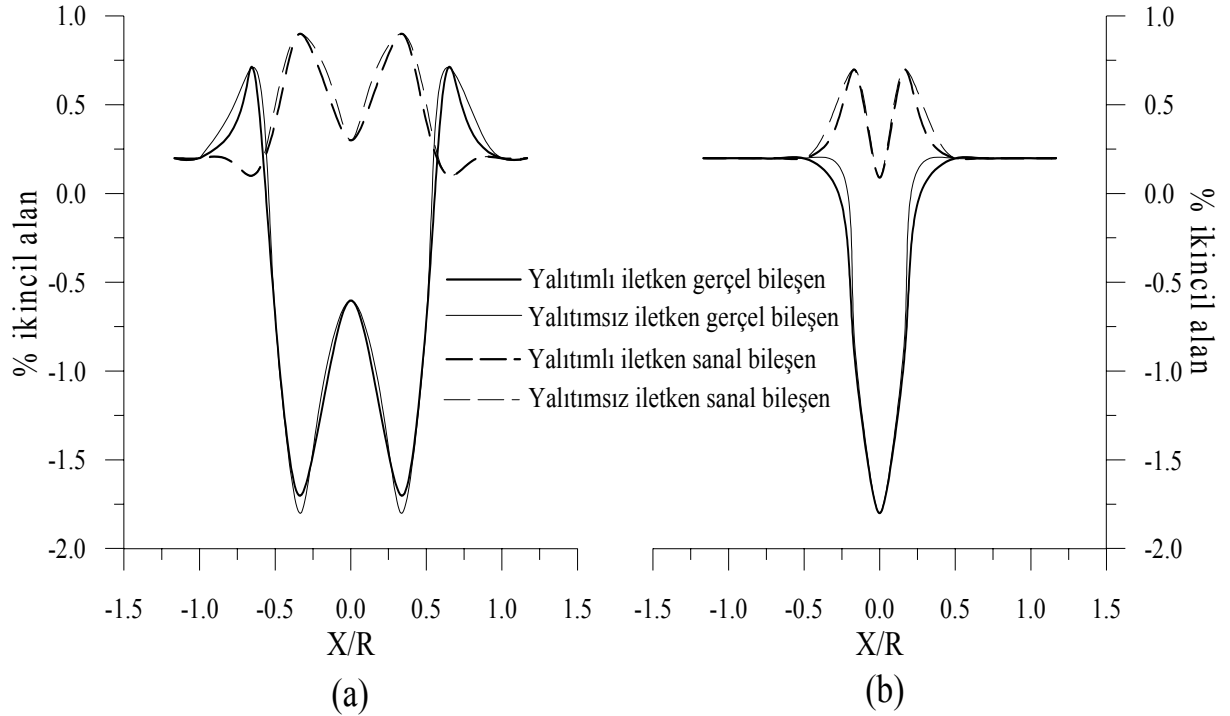
Düşey eş-eksenli sistem anomalilerinin ise, her durumda pozitif ve yine göreceli olarak küçük genlikli olduğu görülmektedir. Ard-arda dizilim için bu eğri, iki ayrı pozitif anomali görünümündeyken, paralel hat için tek bir pozitif şeklindedir. Diğer eğrilerde de gözlemlendiği üzere, paralel-hat diziliminin anomalileri, tüm bobin sistemleri için, ard-arda dizilim anomalilerine oranla daha dardır.



Şekil 6. Kullanılan bobin sisteminin anomalilere etkisi, (a) ard-arda ve (b) paralel-hat dizilim (Çizimler,  $f=200$  kHz frekans için,  $R=30$  cm bobin aralığı kullanılarak elde edilen gerçel bileşen eğrilerini göstermektedir)

### 7.4. Yalıtım Materyalinin Anomalilere Etkisi

Çizgisel iletkenleri çevreleyen yüksek öz dirençli yalıtım materyalinin, EM Slingram anomalileri üzerindeki etkisini de görmek amacıyla, kullanılan çizgisel iletken model, bu kez yalıtımsız olarak modellenmiştir. Modellemede  $f=200$  kHz ve 30 cm bobin aralığı kullanılmıştır. Şekil 7'de verilen eğrilerden görüldüğü gibi, iletken hedefi çevreleyen yalıtım materyalinin, Slingram anomalilerinin şekline ve genliğine herhangi bir etkisi olmamaktadır. Bu durum, elektrik öz direnç ve IP yöntemleri dikkate alındığında, önemli bir avantaj olarak görülebilir.



Şekil 7. Yalıtım materyali varlığının anomalilere etkisi, (a) ard-arda ve, (b) paralel-hat dizilimi (Çizimler,  $f=200$  kHz frekans, için  $R=30$  cm bobin aralığı kullanılarak elde edilen gerçel ve sanal bileşen eğrilerini göstermektedir)

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, EM Slingram sisteminin çizgisel iletken hedeflere verdiği tepki, frekans, bobin aralığı, yalıtım malzemesi ve kullanılan bobin sistemi yönünden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Slingram sisteminde, her bir dizilimin ve alıcı-verici bobin düzeneğinin aynı bir model yapıya vereceği tepkinin farklı olduğu, yapılan analog modellemelerle ortaya konulmuştur.

Tüm anomaliler için sanal bileşen genlikleri, gerçel bileşenlere oranla çok daha küçüktür. Gerçel bileşenin büyümesi iletkenliğin, sanal bileşenin büyümesi ise yalıtıkanlığın yüksek olduğunu gösterdiğinden, bu durum, tepkisi ölçülen modelin yüksek iletkenliğe sahip olduğunu göstermektedir. Slingram sisteminde, aynı yeraltı modeli için frekans veya bobin aralığının artırılması anomali genliğini de artırmıştır. Bunlardan birincisi, indüksiyonun frekansla doğru, ikincisi ise  $Z/R$  oranının bobin aralığıyla ters orantılı olarak değişmesinden ileri gelmektedir. Ayrıca, EM alanın etki derinliği frekansla ters orantılı olduğundan, yüksek frekanslarda mutlak olarak daha büyük genlikli anomali elde edilmesi, iletken hedefin derinliğinin oldukça az olduğunu da gösterir.

Bu çalışmada, yeraltı çizgisel iletkenlerinin çok yüksek öz dirence sahip yalıtım materyalleri içerisinde olduğu kabul edilmiş ve yalıtımlı iletken model için yüksek öz dirençli yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Slingram sistemi, çizgisel iletken modelin yüksek öz dirençli yalıtım malzemesine karşı duyarsızdır. Gömülü iletken ister yalıtımlı ister yalıtımsız olsun, EM Slingram sistemiyle yeryüzünde hemen hemen aynı tepki ölçülecektir. Bu durum EM yöntemler için bir avantaj olarak kabul edilebilir.

Hedefin yeraltı suyu veya kil içeren vb. iletken ortamlarda gömülü olabilmesi durumunda, sistemin hedef iletkene vereceği tepki ise, ayrı bir inceleme konusu olabilir. Bunun yanı sıra, hedefin yakınlarında bulunan diğer iletken yapıların, özellikle yakın veya bitişik diğer çizgisel iletkenlerin bozucu etkisi de ayrıca modellenilebilir. Sistemin böyle durumlardaki ayrırlılığının bilinmesi önemlidir. Şehir ortamında, elde edilmesi beklenen anomalinin doğasını oldukça değiştirebileceğinden, şehir şebekesinden kaynaklanan 50 Hz'lik girişimlerin modellenmesi de önem taşımaktadır.

Çizgisel iletkenlerin aranmasında en yüksek genlikli anomaliyi verdiği için yatay eş-düzlemlili bobin sisteminin kullanılması önerilebilir. Ancak bu sistemin ard-arda dizilim anomalisi ikiye ayrılmış bir negatif olup,  $X/R=0$  noktasında bir yükselme gösterdiğinden, bu anomali iki ayrı iletken şeklinde yorumlanabilir. Bu nedenle tek bir negatif pik veren paralel-hat dizilimi tercih edilmelidir. Bu durum, birbirine paralel hatlarda, sistemin bitişik veya yakın iletkenler üzerindeki ayrırlılığını artıracaktır. Kullanılan bobin ara mesafesi ve iletkenin derinliğine bağlı olarak- frekans arttıkça anomali genliği de arttığı için mümkün olan en yüksek frekans ve bobin açılımı tercih edilmelidir.

Genel olarak, Slingram bobin sistemleri göz önüne alındığında, tüm dizilimler arasında en avantajlısının paralel hat, tüm bobin düzenekleri arasında en avantajlısının da düşey eş-eksenli bobin sistemi olduğu söylenilebilir.

## 9. KAYNAKLAR

- Becker A., Gauvreau G., Collett L.S., (1972): "Scale Model Study of TDEM Response of Tabular Conductors", Can. Min. and Met. Bull., v.65, p:90-96.
- Ercan A., (1982): "Yapay Kaynaklı Dalgalı Akım EM Değerlendirme Çift Sargı Yöntemi (Slingram)", İTÜ Yayınları, İstanbul.
- Fraser D.C., Ward S.H., (1967): "Analytic and Model Studies of a Rotatable Field EM Prospecting System", Geophysics, v.32, p:899-917.
- Grant F.S., West G.F., (1965): "Interpretation Theory in Applied Geophysics", McGraw Hill Book Co., New York, 583 p.
- Gaur V.K., (1963): "Electromagnetic Model Experiments Simulating an Airborne Method of Prospecting", Bull. of National Geophysics Research Inst., v.1, p:167-174.
- Guiging Z., Yanzhong L., (1992): "The Application of IP and Resistivity Methods to Detect Underground Metal Pipes and Cables", Geotechnical and Environmental Geophysics, v. 3, p:239-248.
- Huiming C., Honghai X., Xu Y., (1992): "Detecting Underground Cables and Metal Conducting Pipes by Using EM Methods" Geotechnical and Environmental Geophysics, v. 3, p:229-237.
- Lowrie W., West G.W.,(1965): "The Effect of Conducting Overburden on Electromagnetic Prospecting Measurements", Geophysics, v.30, p:624-632.
- Sarma D.G., Maru V.M., (1971): "A Study of Some Effects of a Conducting Host Rock with a New Modelling Apparatus" Geophysics, v.36, p:166-183.
- Spies B.R., (1976): "The Derivation of Absolute Units in EM Scale Modeling", Geophysics, v.41, p:1042-1047.
- Ward S.H., (1965): "Mining Geophysics, Vol:2", Elsevier Sci. Pub.
- Wynn J.C., Zonge K.C., (1978): "Electromagnetic Coupling, its Intrinsic Value, its Removal and Cultural Coupling Problem" Geophysics, v.40, p:831-850.