

# MANYETİK REZONANS KULLANILARAK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ MUTLAK EMPEDANS GÖRÜNTÜLEME

Özlem BİRGÜL<sup>1</sup>

B. Murat EYÜBOĞLU<sup>2</sup>

Y. Ziya İDER<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü 06531, Ankara

<sup>3</sup> Bilkent Üniversitesi

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü 06533, Ankara

<sup>1</sup>e-posta : obirgul@metu.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: meyub@metu.edu.tr

<sup>3</sup>e-posta: ider@ee.bilkent.edu.tr

## ABSTRACT

*In this study, a new magnetic resonance-electrical impedance tomography modality for high-contrast absolute conductivity imaging is proposed. Both surface potentials and the magnetic field generated by the internal distribution of injected currents are measured. The surface potentials are measured using conventional electrical impedance tomography techniques and the magnetic fields are measured using magnetic resonance imaging techniques. An iterative reconstruction algorithm, which is based on minimising the difference between two current density distributions calculated separately using the two sets of measurements, is used. The performance of the proposed algorithm is tested using simulated noisy data.*

*Anahtar sözcükler : elektriksel empedans görüntüleme, akım yoğunluğu görüntüleme, manyetik rezonans-elektriksel empedans görüntüleme*

## 1. GİRİŞ

Biyolojik dokuların elektriksel özellikleri değişik dokular için farklılık göstermektedir. Bu farklılığa dayanarak elektriksel empedans dağılımı elde edilmesi ile dokuların görüntülenmesi mümkündür. Geleneksel *Elektriksel Empedans Görüntüleme* (EIT) tekniğinde, görüntülenecek bölgede akım uygulama veya akım indükleme yoluyla bir akım dağılımı yaratılır ve yüzeyden ölçülen gerilimler kullanılarak içerideki iletkenlik dağılımı bulunur [1]. Bu teknikte kullanılan yüzey ölçümlerinin iç bölgelerdeki iletkenlik değerlerine duyarlılığı azdır. Bu nedenle görüntüleme bölgesinin her yerinde aynı çözünürlük seviyesi elde edilememekte, nokta yayılım işlevi (PSF) konuma bağımlı olmaktadır. Ayrıca, uygulamada yüzeyden alınabilecek bağımsız gerilim ölçümlerinin sayısı sınırlı olduğundan oluşturulan görüntülerin çözünürlüğü özellikle iç bölgelerde düşüktür.

EIT veri alımı sırasında iletken cismin içinde oluşan akımların yarattığı manyetik alan ve akımların içerideki dağılımı *manyetik rezonans görüntüleme* (MRI) teknikleri kullanılarak ölçülebilir. Bu şekilde akım görüntülemeye *manyetik rezonans - akım yoğunluğu görüntüleme* (MR-CDI) denir. Bu teknikte dc [2-4], radyo frekansı [5] veya düşük ac frekanslardaki akımların [6] dağılımı görüntülenebilir. Manyetik alan ölçümleri kullanılarak iletkenlik dağılımı görüntüsü elde etmek de mümkündür. Bu tekniklere de genel olarak *manyetik rezonans-elektriksel empedans görüntüleme* (MR-EIT) tekniği denilmektedir [7]. MR sayesinde iç bölgelerden de manyetik alan ölçümü yapmak mümkündür. Ayrıca yapılan ölçümlerin bütün görüntüleme bölgesinde duyarlılığı aynıdır. Manyetik alan ölçümleri kullanılarak elde edilen MR-EIT görüntülerinde çözünürlük yüksek ve konumdan bağımsızdır fakat sadece manyetik alan ölçümleri kullanması durumunda ancak görece iletkenlik görüntüleri oluşturulabilmektedir [8].

Bu çalışmada, yüzey gerilim ve manyetik alan ölçümlerini birlikte kullanan iki boyutlu yeni bir MR-EIT tekniği geliştirilmiş ve çeşitli benzetim verileri ile denenmiştir. İki ayrı ölçüm kümesi kullanılarak, yüksek çözünürlüklü mutlak iletkenlik görüntüleri oluşturulması amaçlanmıştır. Ölçümler ve bilinen yüzey koşulları ile içerideki iletkenlik dağılımının hesaplanması *geri problem* olarak tanımlanmıştır. İki ölçüm seti ayrı ayrı kullanılarak hesaplanan iç akım dağılımları arasındaki farkı en aza indiren tekrarlamalı bir yöntemle, iletkenlik değerleri hesaplanmıştır.

Algoritmanın başarısının sınanması için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve Biot-Savart kanunu kullanılarak çeşitli benzetim verileri ile görüntüler elde edilmiştir. Benzetim verilerine çeşitli genliklerde

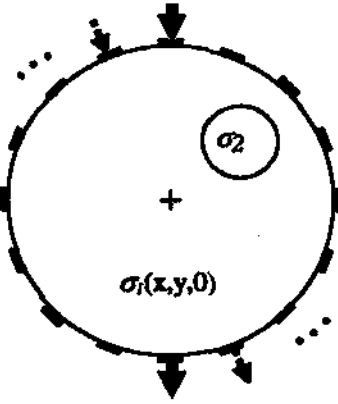
gürültü eklenerek görüntüler oluşturulmuş ve yöntemin gürültülü verilerdeki başarısı sınamıştır.

## 2. YÖNTEM

Önerilen algoritmada iletkenlik dağılımını bulmak için yüzey gerilimleri ve manyetik alan ölçümleri kullanılmıştır.

### 2.1. Gerilim ölçümleri

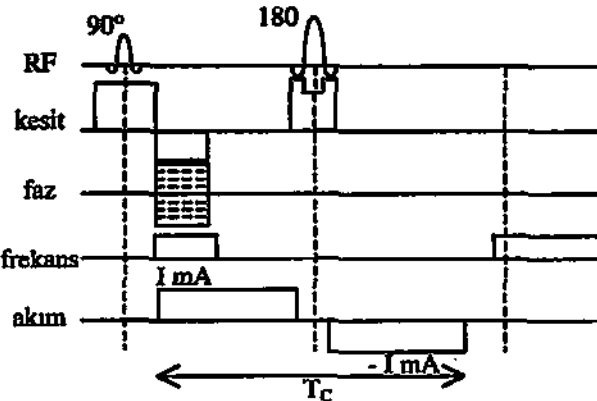
Bu çalışmada, 16 elektrotlu karşıt akım basma EIT ölçüm tekniği kullanılmıştır (Şekil 1). Tüm karşıtlık elektrot çiftlerine sırasıyla akım uygulanarak ve her bir uygulama için 13 ölçüm alınarak toplam 104 birbirinden bağımsız gerilim ölçümü yapılabilir.



Şekil 1. Akım uygulama yöntemi

### 2.2. Manyetik alan ölçümleri

Her akım uygulama durumu için MR kullanılarak içeriden manyetik alan ölçümü yapılır. Manyetik alan ölçüm sayısı geri problemde kullanılacak ağ yapısındaki eleman ve düğüm sayısı ile belirlenir. Yapılacak en fazla ölçüm sayısı MRI çözünürlüğünün yarısı ile sınırlıdır.



Şekil 2. Manyetik akım ölçümü için kullanılan MR darbe dizisi

MR kullanılarak manyetik alan değerlerinin bulunabilmesi için kullanılan darbe dizisi Şekil 2.'de verilmiştir. Bu darbe dizisinde standard spin echo darbe dizisine ek olarak iki kutuplu doğru akım uygulanmıştır. Bu darbe dizisi uygulandığı sırada kaydedilen sinyal aşağıdaki gibidir :

$$S = \iint_{x,y} M(x,y) \exp\{j\gamma(G_x x + G_y y + B'_z T_c)\} dx dy \quad (1)$$

Yukarıdaki ifadede,  $M(x,y)$  enine mıknatıslanma (transverse magnetization) dağılımı,  $G_x$  ve  $G_y$ ,  $x$  ve  $y$  yönünde uygulanan manyetik alan gradyanları,  $t$  ve  $t_z$  bu gradyanların uygulanma süreleri,  $\gamma$  gyromagnetic oran sabiti,  $B'_z$  uygulanan akıma bağlı olarak yaratılan manyetik alanın ana manyetik alan yönünde olan bileşeni ve  $T_c$  toplam akım uygulama süresidir [4]. Kaydedilen  $S$  sinyaline geri Fourier dönüşümü uygulanarak karmaşık MR görüntüsü,  $M'_c$  elde edilir.

$$M'_c(x,y) = M(x,y) \exp\{j\gamma(G_x x + G_y y + B'_z T_c)\} \quad (2)$$

Burada  $J$  üst simgesi akım uygulandığı için eklenmiştir. Aynı darbe dizisi doğru akım uygulanmadan kullanılırsa elde edilecek MR görüntüsü aşağıdaki gibi olacaktır.

$$M_c(x,y) = M(x,y) \exp\{j\gamma(G_x x + G_y y)\} \quad (3)$$

Akım uygulanarak elde edilmiş görüntü, uygulanmayan durumda elde edilen görüntüye göre normalize edilirse,

$$\frac{M'_c(x,y)}{M_c(x,y)} = \exp\{j\gamma B'_z(x,y) T_c\} \quad (4)$$

ifadesi elde edilir. Bu durumda normalize edilmiş faz görüntüsü ile, ölçülmek istenen manyetik alan değeri arasındaki ilişki

$$\Phi_{IN} = \gamma B'_z(x,y) T_c \quad (5)$$

olarak elde edilir. Buradan,  $B'_z$  çekilerek  $z$  yönündeki manyetik alan hesaplanır. Akım dağılımının bulunabilmesi için manyetik alanın üç yöndeki bileşeni de gereklidir. Bu durumda görüntülenecek cismin üç ortogonal eksenini ana manyetik alana paralel konuma gelecek şekilde döndürülerek aynı deney üç kere tekrarlanır.

### 2.3 Geri Problem Çözüm Algoritması

Geri problem çözümünde, üç aşamalı tekrarlanmalı bir yöntem kullanılarak, yüzey gerilimleri ve manyetik alan ölçümlerinden içerideki iletkenlik dağılımı hesaplanmıştır :

- Birinci basamakta manyetik alan ölçümlerinden içerideki akım dağılımı hesaplanır:

$$\vec{J}_{MR} = \frac{\nabla \times \vec{B}_{MR}}{\mu_0} \quad (6)$$

- İkinci aşamada, varsayılan ilk iletkenlik dağılımı, yüzey gerilim ölçümleri ve bilinen yüzey akımları kullanılarak, içerideki akım dağılımı farklı bir yöntemle hesaplanır. Akım dağılımını bulmak için öncelikle bilinen iletkenlik dağılımı ve yüzey koşulları için Laplace denklemi çözülür :

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi)(x, y) = 0 \quad (x, y) \in S \quad (7)$$

$$\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = J_i \quad i. \text{ elektrotta} \quad (8)$$

$$\phi_j = \phi_{içtüm} \quad j. \text{ elektrotta} \quad (9)$$

Yukarıdaki denklemlerde, denklem (8) Neumann, denklem (9) Dirichlet yüzey koşullarını göstermektedir. Denklem (7) çözülerek bulunan potansiyel değerleri,  $\phi_{EIT}$  kullanılarak

$$\vec{J}_{EIT} = -\sigma \nabla \phi_{EIT} \quad (10)$$

denklemi ile içerideki akım dağılımı bulunur.

- Son aşamada, ilk iki basamakta hesaplanan akım yoğunlukları arasındaki farkı en aza indirecek şekilde yeni bir iletkenlik dağılımı bulunur. Farklı akım uygulama durumları için toplam fark aşağıdaki gibi tanımlanmıştır :

$$R = \sum_X \int_S \|\vec{J}_{MR} - \vec{J}_{EIT}\| dS \quad (11)$$

Yukarıdaki denklemde  $X$  farklı akım uygulama sayısıdır. Görüntüleme bölgesi SEY ağındaki elemanların toplamı olarak yazıldığında ve  $j$ 'inci elemandaki iletkenlik  $\sigma_j$  olarak alındığında denklem (11) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

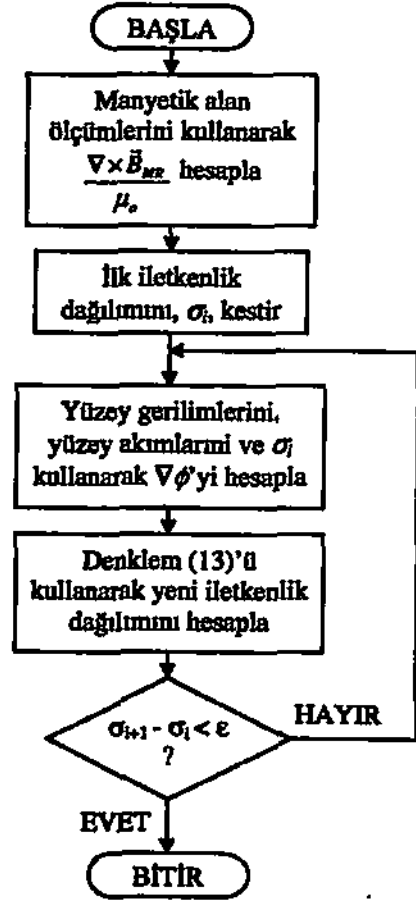
$$R = \sum_X \sum_j \int_S \|\vec{J}_{MR} + \sigma_j \nabla \phi_{EIT}\| dS \quad (12)$$

Toplam farkı her elemana göre en aza indirecek eleman iletkenlik değeri,  $R$ 'nin türevi sıfıra eşitlenerek ve denklem (6) kullanılarak aşağıdaki gibi bulunmuştur :

$$\sigma_j = \frac{\sum_X \int_S \nabla \phi_{EIT} \cdot \nabla \times \vec{B}_{MR} dS}{\mu_0 \sum_X \int_S \nabla \phi_{EIT} \cdot \nabla \phi_{EIT} dS} \quad (13)$$

Yukarıdaki basamaklardan ilki iletkenlik dağılımı bilgisi içermediğinden sadece bir kere hesaplanır. İkinci ve üçüncü basamaklar, bulunan yeni iletkenlik

dağılımı ile tekrarlanır. İki tekrar arasındaki değişim belli bir seviyenin altına inene kadar tekrarlama devam ettirilir. Algoritmanın akış şeması Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Akış şeması

### 3. BENZETİM SONUÇLARI

Algoritmanın başarımlı sınaması için bilinen iletkenlik dağılımları için hesaplanmış yüzey gerilimleri ve manyetik alan değerleri kullanılmıştır. Benzetim değerlerinin hesaplanmasında sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve Biot-Savart kanunu kullanılmıştır. SEY çözümlerinde 1089 düğüm noktasından ve 2048 üçgen elemandan oluşan bir ağ yapısı kullanılmıştır. Bilinen iletkenlik dağılımı ve yüzey akım koşulları için Neumann yüzey koşul problemi çözülerek potansiyel alan dağılımı ve gerilim ölçümleri bulunmuştur. Potansiyel alan dağılımı kullanılarak içerideki akım dağılımı elde edildikten sonra Biot-Savart kanunu

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{\vec{J} dS \times \vec{R}}{R^3} \quad (14)$$

ile istenilen noktalardaki manyetik alan değerleri hesaplanmıştır.

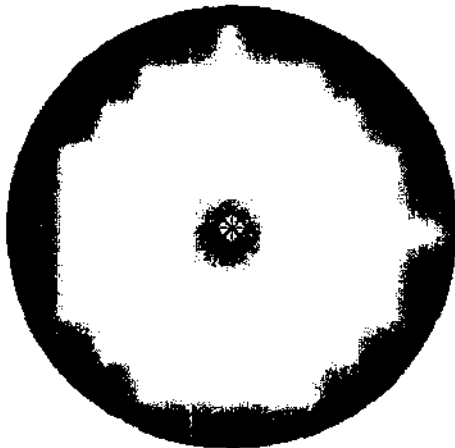
Yöntemin başarısını sınıma ve yakınsama özelliklerini anlamak üzere iki ayrı hata tanımı yapılmıştır. Bunlardan ilki ölçülen yüzey gerilimleri ve ile yüzeyde hesaplanan gerilimler arasında aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\epsilon_\phi = \sum_x \frac{|\phi_s - \phi_h|}{|\phi_s|} \times 100\% \quad (15)$$

Bu ifadede  $\phi_s$  ve  $\phi_h$  ölçülen ve hesaplanan yüzey gerilimleridir. Ayrıca, sadece benzetim verileri ile kullanılmak üzere bilinen gerçek iletkenlik dağılımı,  $\sigma_s$  ile bulunan iletkenlik,  $\sigma_h$  arasındaki hata. denklem (16)'da tanımlanmıştır:

$$\epsilon_\sigma = \sum_x \frac{|\sigma_s - \sigma_h|}{|\sigma_s|} \times 100\% \quad (16)$$

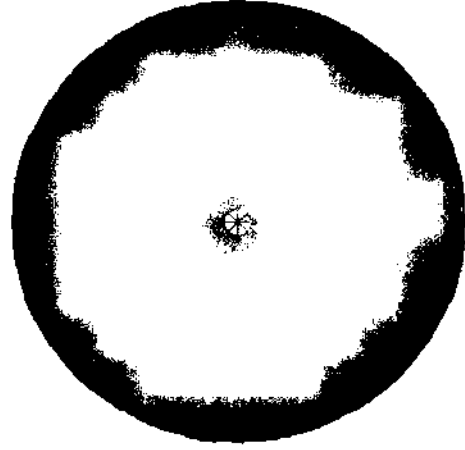
Görüntüleme bölgesinin tam merkezine yerleştiren yüksek iletkenlikli bir cisim için elde edilen görüntü Şekil 4'de verilmiştir. Arka alan iletkenlik değeri  $2 \times 10^{-3}$  S/cm, merkezdeki cismin iletkenliği  $4 \times 10^{-3}$  S/cm olarak atanmıştır. Görüntüleme bölgesinin ve yerleştirilen cismin yarıçapları sırasıyla 12cm ve 0.75cm'dir. Başlangıç iletkenlik değerleri her yerde  $1 \times 10^{-3}$  S/cm olarak alınmış, önerilen tekrarlamalı yöntem ile görüntü oluşturulurken 20 tekrar yapılmıştır. Elde edilen görüntü için  $\epsilon_\phi$  ve  $\epsilon_\sigma$  değerleri %24.05 ve %5.43 olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan iletkenlik görüntüsündeki hatanın en çok yüzeye yakın, elektrot altındaki elemanlarda olduğu gözlenmiştir. iletkenlik değerlerindeki toplam hata %5.43 gibi düşük bir değer olmasına rağmen elektrot altlarındaki iletkenlik değeri hataları, yüzey gerilimlerindeki hatanın daha yüksek seviyede olmasına neden olmaktadır.



Şekil 4. Eş merkezli yuvarlak cisim için elde edilen iletkenlik görüntüsü.

min =  $6.78 \times 10^{-3}$  S/cm max =  $4.33 \times 10^{-3}$  S/cm

Yöntemin gürültülü ortamdaki başarısını sınamak için, kullanılan veriye, standard sapması verinin standard sapmasının % 20'si olacak şekilde Gaussian gürültü eklenmiş ve görüntü oluşturulmuştur (Şekil 5). Bu durumda iletkenlik hata değeri %11.32 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Eş merkezli yuvarlak cisim için gürültülü veri ile elde edilen iletkenlik görüntüsü.

min =  $4.95 \times 10^{-4}$  S/cm max =  $4.36 \times 10^{-3}$  S/cm

Aynı cisim, merkezi (6cm,0) koordinatına gelecek şekilde yerleştirilip görüntü oluşturulduğuna gürültüsüz ve gürültülü durumlar için elde edilen görüntülerdeki iletkenlik hata değerleri sırasıyla %5.44 ve % 12.26 olarak hesaplanmıştır.

Nokta yayılım işlevinin (PSF) konuma bağlı olarak değişimini anlamak üzere yüksek kontrastlı küçük bir cisim merkezden yüzeye çizilen bir hat üzerinde kaydırılarak 14 değişik durum için görüntü elde edilmiştir. Cismin büyüklüğü SEY ağındaki bir elemanın büyüklüğü olarak alınmıştır. Oluşturulan görüntülerdeki yayılım miktarını anlamak için en yüksek değer yarısına karşılık gelen genişlik (FWHM) değerlerine bakılmıştır. FWHM değeri, konumdan bağımsız olarak SEY ağıının bir elemanına eşit çıkmıştır. Kullanılan ağ yapısı için bu değer görüntüleme bölgesinin %1.5'ine eşittir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, geleneksel elektriksel empedans görüntüleme ve manyetik rezonans görüntüleme tekniklerini birlikte kullanan yeni bir iletkenlik görüntüleme tekniği geliştirilmiş ve sınanmıştır. Gürültüsüz ve gürültülü benzetim verileri ile yapılan çalışmalarda konumdan bağımsız olarak, diğer iletkenlik görüntüleme yöntemlerinden daha iyi bir çözünürlükte görüntü elde edilmiştir. Devam eden çalışmalarda, yöntemin gerçek veri ile sınanması ve problemin üç boyutlu olarak çözülmesi düşünülmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK EEEAG-198006 no'lu araştırma projesi tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] K. Boone, D. C. Barber ve B. Brown, "Imaging with Electricity: Report of the European Concerted Action on Impedance Tomography", *Journal of Medical Engineering & Technology*, vol. 21, no. 6, 201-232, 1997.
- [2] G. C. Scott, M. L. G. Joy, R. L. Armstrong ve R. M. Henkelman, "Measurement of Nonuniform Current Density by Magnetic Resonance", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol.10, no. 3, September 1991.
- [3] B. M. Eyüboğlu, R. Reddy ve J. S. Leigh, "Measurement of Electric Current Density with Magnetic Resonance Imaging", *IEEE Annual Medical Imaging Conference*, 1472-3, 1996.
- [4] B. M. Eyüboğlu, R. Reddy ve J. S. Leigh, "Imaging Electrical Current Density Using Nuclear Magnetic Resonance", *Elektrik, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 6, no.3, 201-214, 1998.
- [5] G. C. Scott, M. L. G. Joy, R. L. Armstrong ve R. M. Henkelman, "Rotating Frame RF Current Density Imaging", *Magnetic Resonance in Medicine*, 33, 355-369, 1995.
- [6] Y. Z. İder ve L. T. Müftüçler, "Measurement of Magnetic Field Generated by Non-Uniform AC Current Density Using Magnetic Resonance Imaging", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 16, no.15, 617 - 622, Ekim 1997.
- [7] Ö. Birgül ve Y. Z. İder, "Electrical Impedance Tomography Using the Magnetic Field Generated by Internal Currents", *Proc. Of IEEE Engineering Medicine and Biology, 18<sup>th</sup> Conference, CD-ROM*, 1996.
- [8] Y. Z. İder ve Ö. Birgül, "Use of Magnetic Field Generated by the Internal Distribution of Injected Currents for Electrical Impedance Tomography (MR-EIT)", *Elektrik, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol.6, no. 3, 215-225, 1998.