ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

DÜZENSİZ AĞ KULLANARAK RADYOMANYETOTELLURİK VE DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ VERİLERİNİN İKİ BOYUTLU TOPOĞRAFYALI BİRLEŞİK TERS ÇÖZÜMÜ

Özcan ÖZYILDIRIM

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2017

Her haklı saklıdır

TEZ ONAYI

Özcan ÖZYILDIRIM tarafından hazırlanan **"Düzensiz Ağ Kullanarak Radyomanyetotellurik ve Doğru Akım Özdirenç Verilerinin İki Boyutlu Topoğrafyalı Birleşik Ters Çözümü"** adlı tez çalışması 29/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR
Ankara Üniversitesi / Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Ayşe KAŞLILAR
İstanbul Teknik Üniversitesi / Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Gökhan GÖKTÜRKLER
Dokuz Eylül Üniversitesi / Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR
Ankara Üniversitesi / Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Ünal DİKMEN
Ankara Üniversitesi / Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Asım Egemen YILMAZ
Ankara Üniversitesi / Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

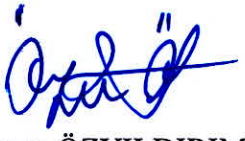
Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

29/06/2017



Özcan ÖZYILDIRIM

ÖZET

Doktora Tezi

DÜZENSİZ AĞ KULLANARAK RADYOMANYETOTELLURİK VE DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ VERİLERİNİN İKİ BOYUTLU TOPOĞRAFYALI BİRLEŞİK TERS ÇÖZÜMÜ

Özcan ÖZYILDIRIM

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

Doğru akım özdirenç (DAÖ) ve radyomanyetotellürik (RMT) verilerinin ters çözümü ile yer altı yapılarının iletkenlikleri elde edilir. DAÖ yöntemi yalıtkan yapılara, RMT yöntemi ise iletken yapılara daha duyarlıdır. Dolayısıyla, DAÖ ve RMT birleşik ters çözüm ile yeraltının iletkenlik dağılımı hakkında daha detaylı sonuçlar elde edilebilir. Bu tez kapsamında, DAÖ ve RMT verilerinin iki-boyutlu topoğrafyalı birleşik ters çözümünü yapan yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın modelleme kısmında, Poisson ve Helmholtz denklemleri, düzensiz üçgen ağ kullanan sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmüştür. Algoritmanın ters çözüm bölümünde, yuvarlatıcı durağanlaştırıcı kullanan düzgünleştiricili ters çözüm yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma ile düzenli ağ temelli geleneksel bir algoritma, hız ve doğruluk bakımından karşılaştırılmıştır. Yapay veri ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda, yeryüzü topoğrafyası ve yeraltı yapılarının yeni algoritma ile görüntülenmesinin düzenli ağ temelli algoritmadan daha az eleman gerektirdiği gösterilmiştir. Ayrıca düzensiz ağ kullanıldığında ağ kalitesi artarken sayısal hataların büyük oranda azaldığı gösterilmiştir. Böylece program, klasik ters çözüm algoritmalarından daha kısa sürede çözümü bulmakta ve karmaşık yüzey topoğrafyasını gerçeğe daha yakın temsil edilebilmektedir. Geliştirilen algoritma bir maden sahasında ölçülen DAÖ ve RMT verileri ile de test edilmiştir. Sonuçta bakır cevheri olduğu düşünülen zonlar sondaj verileri ile doğrulanmıştır. Bu tez çalışmasında geliştirilen algoritma, düzensiz ağ kullanarak DAÖ ve RMT verilerinin topoğrafyalı birleşik ters çözümünü yapma özelliği ile literatürde geliştirilen ilk algoritmadır. Buna ek olarak, bu çalışma geleneksel düzenli ve düzensiz ağ kullanan ters çözüm algoritmalarının karşılaştırılması bakımından da özgün bir çalışmadır. Ayrıca, bu çalışmada düzensiz üçgen ağda yuvarlatma dizeyi elemanlarının hesaplanması için yeni bir yaklaşımı da önerilmiştir.

Haziran 2017, 115 sayfa

Anahtar Kelimeler: Doğru Akım Özdirenç, Manyetotellürik, Radyomanyetotellürik, Düzensiz Ağ, İki Boyutlu, Sonlu Eleman, Modelleme, Birleşik Ters Çözüm, Yuvarlatma Dizeyi, Düzgünleştiricili Ters Çözüm

ABSTRACT

P.h.D. Thesis

TWO DIMENSIONAL JOINT INVERSION OF RADIOMAGNETOTELLURIC AND DIRECT CURRENT RESISTIVITY DATA INCORPORATING SURFACE TOPOGRAPHY USING UNSTRUCTURED MESH

Özcan ÖZYILDIRIM

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geophysical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

Conductivities of the subsurface structures are obtained by inversion of the direct current resistivity (DCR) and radiomagneticotellitic (RMT) data. The DCR method is sensitive to resistive structures, while RMT method is sensitive to conductive structures. Therefore, more detailed results can be obtained about the conductivity distribution of the underground as a result of the joint inversion. In this thesis, a new algorithm has been developed for two-dimensional joint inversion of DCR and RMT data incorporating topography. In the modeling part of the developed algorithm, Poisson and Helmholtz equations have been solved by the finite element method by using unstructured mesh. In the inversion part of the algorithm, regularized inversion procedure with a smoothing stabilizer has been used. The developed algorithm is compared with a conventional structured based algorithm in terms of speed and accuracy. As a result of comparisons by using synthetic data, it has been showed that the imaging of the surface topography and the underground resistivity structures by the new algorithm requires fewer elements than structured grid based algorithm. It has also been shown that the quality of the mesh is increased and the numerical errors are significantly reduced when the unstructured grids are used. Thus, the program finds solutions in a shorter time than classical inversion algorithms and the complex surface topography can simulate closer to real than the classical inversion algorithms. The developed algorithm has been tested by using DCR and RMT data collected in mine site. As a result, the zones those considered copper ore have been verified by drillings. In this thesis, the developed algorithm is the first algorithm in the literature by the feature to make a joint inversion of DCR and RMT data incorporating topography by using unstructured mesh. In addition, this study is an original study in terms of the comparison of inversion algorithms those use conventional structured and unstructured mesh. In this study, a new approach has been also proposed to calculate the elements of the smoothing matrix for the unstructured triangular mesh.

June 2017, 115 page

Key Words: Direct Current Resistivity, Magnetotelluric, Radiomagnetotelluric, Unstructured Mesh, Two Dimensional, Finite Element, Modeling, Joint Inversion, Regularized Inversion

TESEKKÜR

Doktora tez çalışmam sırasında bilgi birikimi, yakın ilgi ve tecrübesi ile beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR'a (Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı) yardımları ve önerileri için teşekkürlerimi sunarım. Kendisinden, sadece tez çalışmam konusunda değil, mütevazı, düşünceli ve yardımsever tavırlarıyla bilim adamı olma konusunda da çok şey öğrendim. Değerli fikirleri ile tez çalışmamın olgunlaşmasında büyük katkıları olan tez izleme komitesinin değerli üyeleri Doç. Dr. Ünal DİKMEN (Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı) ve Doç. Dr. Asim Egemen YILMAZ'a (Ankara Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı) öneri, eleştiri ve katkılarından dolayı ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Özellikle geç saatlere kadar çalıştığım günlerde beni yalnız bırakmayan, bunaldığım anlarda yanımda olan ve moral desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Bu tez çalışması burslu olarak çalıştığım, TÜBİTAK 105G145 nolu "Kuzey Batı Anadolu'nun Kabuk Yapısının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması", TÜBİTAK 110Y343 nolu "Radyomanyetotellürik, Doğru Akım Özdirenç ve Yapay Uçlaşma Verilerinin İki Boyutlu Birleşik Yorumu: Bir Maden Arama Örneği" ve TÜBİTAK 114E076 nolu "Jeofizik Verilerin GPU Üzerinde 2-B Birleşik Ters Çözümü ve 3-B Ters Çözümü" isimli projeler ile desteklenmiştir. Projelerin yöneticisi ve Doktora tez danışman hocam Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR'a (Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı) ağabeyliğinin yanı sıra her türlü desteğinden dolayı tekrar teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora tezi çalışmam boyunca çoğu dönem ihmal etmiş olmama rağmen sabır, sevgi ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim eşim Mine ÖZYILDIRIM, teşekkürlerin en büyüğüne layıktır. Çalışmalarımın ilk dönemlerinde kızım Beren ÖZYILDIRIM'ın ailemize katılımı manevi çalışma kaynağım olmuştur. Ayrıca bugünlere gelmemde üzerimde emeği büyük olan annem ve babama maddi ve manevi destekleri için teşekkür ederim.

Özcan ÖZYILDIRIM
Ankara, Haziran 2017

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK ..... **i**
ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
TESEKKÜR ..... **iv**
SİMGELER DİZİNİ ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xii**
1. GİRİŞ **1**
2. RMT VE DAÖ YÖNTEMLERINDE DÜZENSIZ AĞ ILE 2-B DÜZ ÇÖZÜM **4**
2.1 Helmholtz ve Poisson Denklemlerinin Sonlu Elemanlar ile Çözümü **6**
2.2 Sınır Koşulları **8**
2.3 Genel Dizey Denklemlerinin Çözümü **9**
2.4 MT/RMT Yöntemde Dik Alanların Hesaplanması **10**
2.5 DAÖ Yönteminde Gerilimin (x, k_y, z) Uzayından (x, y, z) Uzayına Dönüştürülmesi **12**
2.6 RMT ve DAÖ Yöntemlerinde Görünür Özdirenç Hesabı **13**
3. RMT VE DAÖ VERİLERİNİN AYRIK VE BİRLEŞİK 2-B TERS ÇÖZÜMÜ **15**
3.1 RMT ve DAÖ Verilerinin Düzgünleştiricili Ayrık Ters Çözümü **16**
3.1.1 Düzgünleyici parametrenin (α) seçilmesi **19**
3.1.2 Yuvarlatma dizeyinin (C) hesaplanması **20**
3.1.3 Kısmi türevler dizeyinin hesaplanması **22**
3.1.4 Veri ağırlık dizeyinin hesaplanması **26**
3.2 Logaritmik Uzayda Ters Çözüm **27**
3.3 Model ayrımlılık Dizeyi ve Üçgen Kalitesi **28**
3.4 RMT ve DAÖ Verilerinin Birleşik Ters Çözümü **29**
4. YAPAY VE GERÇEK VERİ UYGULAMALARI **32**
4.1 Yapay Veri-I **33**
4.2 Yuvarlatma Dizeyi Yaklaşımlarının Karışılaştırılması **43**
4.3 Yapay Veri II **45**
4.4 Yapay Veri III **50**
4.5 Yapay Veri-IV **56**
4.6 Gerçek Veri Uygulaması I **61**
4.7 Gerçek Veri Uygulaması II **66**
4.8 Gerçek Veri Uygulaması III **69**
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA **74**
KAYNAKLAR **76**
EKLER **83**
EK 1 Algoritma Kullanıcı Ara-yüzü, Model Ağının Üçgen Elemanlara Ayrılması, Parametre Uzayı ve Algoritma Giriş Dosyaları **84**
EK 2 Genel Dizey Denkleminin (Kv=S) Elde Edilmesi ve CSR formatı **94**
EK 3 RMT ve DAÖ 2-B Düz Çözüm Algoritmalarının Analitik Çözüm ve Diğer Bilinen Düz Çözüm Algoritmaları ile Karşılaştırılması **98**

EK 4 İngilizce Terimlerin Türkçe Karşılıkları 112
ÖZGEÇMİŞ..... 114

SİMGELER DİZİNİ

ω	Açısal frekans (Radyan/s)
I	Akım (Amper)
δ	Birim İmpuls Fonksiyonu
φ**(m)**	Çakışmazlık (Misfit) Fonksiyoneli
k	Dalga sayısı
ε	Dielektrik geçirgenlik (Farad/m)
$\nabla \times$	Dönel (Rotational)
S**(m)**	Durağanlaştırıcı Fonksiyonel
f(**m**)	Düz Çözüm İşleci
α	Düzgünleyici Parametre
∇	Eğim (Gradient)
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti (V/m)
Z	Empedans
f	Frekans (Hz)
K	Geometrik Faktör
$\Delta\phi$	Gerilim Farkı (Volt)
ϕ	Gerilim(Volt)
ρ_a	Görünür Özdirenç (ohm.m)
$\nabla \cdot$	Iraksama (Divergence)
$\mathbf{m_i}$	i-ninci yinelemede parametre sütun vektörü
A	Kısmi Türevler Dizeyi
Δx	Konumda x- yönünde grid aralığı (m)
Δy	Konumda y- yönünde grid aralığı (m)
Δz	Konumda z- yönünde grid aralığı (m)
∇^2	Laplasiyen İşleci (Laplacian)
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti (A/m)
μ	Manyetik geçirgenlik $\mu = \mu_0 (= 4\pi 10^{-7}$ Henry/m)
R	Model ayrımlılık
ρ	Özdirenç (ohm.m)
σ	Öziletkenlik (Simens/m)
Δ**m**	Parametre Farkları dizeyi
Δ	Üçgen Alanı(m^2)
$\mathbf{W_d}$	Veri Ağırlık Dizeyi
Δ**d**	Veri Farkları dizeyi
C	Yuvarlatma dizeyi

Kısaltmalar

1-B	Bir Boyutlu
2-B	İki Boyutlu
3-B	Üç Boyutlu
AMT	AudioManyetotellürik
CG	Eşlenik Türev (Conjugate Gradient)
CSR	Sıkıştırılmış Seyrek Satır (Compressed Sparse Row)

DAÖ	Doğru Akım Özdirenç
E	Elektrik
EM	Elektromanyetik
GDD	Genel Dizey Denklemi
KTD	Kısmi Türevler Dizeyi
LU	Alt-Üst ayrışım (LU Decomposition)
MT	Manyetotellürik
RMS	Ortalama Karekök (Root Mean Squares)
RMT	Radyomanyetotellürik
SE	Sonlu Elemanlar
SF	Sonlu Farklar
T/TP	Tipper
TE	Elektrik alan Paralel (Transverse Electric)
TM	Manyetik alan Paralel (Transverse Magnetic)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 MT yöntemde TE ve TM modu (Candansayar 2002) 5

Şekil 3.1 Düzenli ağ ile ters çözümde model ağının parametreleştirilmesi (Demirci vd. 2012) 19

Şekil 3.2 Yuvarlatma dizeyi yapısını açıklamak için tasarlanan, dört üçgen eleman ve altı düğüm noktasından oluşan düzensiz SE ağı 21

Şekil 3.3 Karşıtlık ilkesinin gösterimi (DeLugao ve Wannamaker 1996) 25

Şekil 3.4 Üçgen kalite hesabını açıklamak için temsili bir üçgen 29

Şekil 3.5 Birleşik ters çözüm akış şeması. 31

Şekil 4.1 Yapay veri I'i elde etmek için farklı ağlar kullanılarak tasarlanan Model I ve yapay veri I, RMT verisi ters çözüm sonucu elde edilen modeller 35

Şekil 4.2 Yapay veri I, RMT ve DAÖ verisi ayrık ve bileşik ters çözüm sonuçları 36

Şekil 4.3 a-i. Şekil 4.2.a-i'de verilen modeller için model ayrımlılık kesitleri 40

Şekil 4.4 a-c. Şekil 4.2 g-i'de verilen modeller için üçgen kalite kesitleri (aynı sıra ile) 41

Şekil 4.5 Yapay veri I birleşik ters çözümü sonucu Şekil 4.2.g-i modelleri için, yapay DAÖ ve kuramsal veri arası Misfit kesitleri (verilen sıra ile) 41

Şekil 4.6 Yapay veri I birleşik ters çözüm sonucu Şekil 4.2.g-i modelleri için, yapay RMT ve kuramsal veriler arası Misfit kesitleri 42

Şekil 4.7 a. Gerçek model, b. Lelièvre and Farquharson (2013)'ün önerdiği ve c. yeni önerilen yuvarlatma dizeyi yaklaşımı kullanılarak, yapay veri I RMT verisinin ters çözümü sonucu elde edilen özdirenç modelleri 44

Şekil 4.8 Yapay veri II'yi elde etmek için düzensiz ağ ve düzenli ağ kullanılarak tasarlanan Model II ve yapay veri II ters çözümü sonucu elde edilen modeller 46

Şekil 4.9 a. b. Şekil 4.8.e, f'de verilen modeller için model ayrımlılık kesitleri ve c. d. üçgen kalite kesitleri (aynı sıra ile) 48

Şekil 4.10 Yapay veri II ile TE+TM+TP verisi ters çözümü sonucu Şekil 4.8.e, f modelleri için hesaplanan kuramsal veriler arası Misfit kesitleri 49

Şekil 4.11 Yapay veri III için düzensiz ve düzenli ağ ile tasarlanan arkeoloji modeli ve yapay veri III'ün ayrık ve birleşik ters çözüm sonuçları..... 51

Şekil 4.12 Ters çözümde kullanılan a. düzensiz, b. düzenli ağ üçgen kaliteleri, c-h. Şekil 4.11.c-h'de verilen modeller için model ayrımlılık kesitleri (aynı sıra ile)..... 54

Şekil 4.13 Yapay veri III ile DAÖ+RMT verileri birleşik ters çözümü sonucu Şekil 4.11.g, h modelleri için hesaplanan kuramsal veriler arası Misfit kesitleri..... 56

Şekil 4.14 Yapay veri IV için düzensiz ve düzenli ağ ile tasarlanan maden yatağı modeli ve yapay veri IV'ün ayrık ve birleşik ters çözüm sonuçları..... 58

Şekil 4.15 Yapay veri IV ile DAÖ+RMT verileri birleşik ters çözümü sonucu Şekil 4.14.g, h modelleri için hesaplanan kuramsal veriler arası Misfit kesitleri..... 60

Şekil 4.16 Kerpen arazisi jeoloji haritası ve RMT ölçülerin alındığı doğrultu (Streich 2003)..... 62

Şekil 4.17 Kerpen, doğrultu-2'de toplanan RMT verisinin a. düzensiz ağ ve b. düzenli ağ algoritmaları ile ters çözümü sonucu elde edilen özdirenç modelleri..... 63

Şekil 4.18 a. b. Şekil 4.17.a, b'de verilen modeller için model ayrımlılık kesitleri (aynı sıra ile)..... 64

Şekil 4.19 Kerpen RMT verisi, TE- ve TM- modu ölçülen veri ile düzenli ve düzensiz algoritma ile ters çözüm sonucu elde edilen kuramsal görünür özdirenç ve faz profil eğrileri. 65

Şekil 4.20 Gerçek veri II, çalışma alanı haritası ve DAÖ ölçüm doğrultusu (Moisidi vd. 2010, Demirci vd. 2012)..... 66

Şekil 4.21 DAÖ doğrultusunda yarma açılarak çıkarılan jeolojik kesit (Mouslopoulou vd. 2001) 67

Şekil 4.22 Kera fayı üzerinde ölçülen DAÖ verilerinin a. b. c. Düzensiz SE d. e. f. düzenli SF ve g. h. i SE kullanan algoritmalar ile ters çözümü sonucu özdirenç kesitleri, model ayrımlılık kesitleri ve üçgen kalite kesitleri 68

Şekil 4.23 Kera fayı üzerinde ölçülen ve DAÖ verilerinin ters çözümü sonucunda elde edilen kuramsal veri arası Misfit kesitleri 69

Şekil 4.24 Bakır sahasının jeoloji haritası ve DAÖ ve RMT ölçüm doğrultuları (Bekar 2016)..... 70

Şekil 4.25 S1 Mekanik sondaj bilgisi..... 71

Şekil 4.26 Elbistan verisinin düzensiz ve düzenli ağ algoritmaları ile ters çözümü sonucu elde edilen özdirenç modelleri 72

Şekil 4.27 Elbistan verisi ile DAÖ+RMT verileri birleşik ters çözümü sonucu hesaplanan kuramsal veriler arası misfit kesitleri 73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Ayrık ve birleşik ters çözümler sonucu elde edilen modellerde bulunan yapıların özdirenci ile gerçek modeldeki (Model I) değerlerinin karşılaştırılması. 37

Çizelge 4.2 Yapay veri I için modelleme ve ters çözüm CPU zamanı ve parametreleştirme bilgileri..... 38

Çizelge 4.3 Ters çözümler sonucu elde edilen modellerde bulunan yapıların özdirenci ile gerçek modeldeki (Model II) değerlerinin karşılaştırılması..... 47

Çizelge 4.4 Yapay veri II için modelleme ve ters çözüm CPU zamanı ve parametreleştirme bilgileri..... 50

Çizelge 4.5 Ters çözümler sonucu elde edilen modellerde bulunan yapıların özdirenci ile gerçek modeldeki (Model III) değerlerinin karşılaştırılması..... 53

Çizelge 4.6 Yapay veri III için modelleme ve ters çözüm CPU zamanı ve parametreleştirme bilgileri..... 55

Çizelge 4.7 Ters çözümler sonucu elde edilen modellerde bulunan yapıların özdirenci ile gerçek modeldeki (Model IV) değerlerinin karşılaştırılması..... 59

Çizelge 4.8 Yapay veri IV için modelleme ve ters çözüm CPU zamanı ve parametreleştirme bilgileri..... 61

1. GİRİŞ

Elektrik (E) ve Elektromanyetik (EM) yöntemlerde veri toplama teknolojisinin gelişmesi ile yöntemler birçok mühendislik problemin çözümünde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Son yıllarda aynı fiziksel parametreye duyarlı yöntemlerin birlikte yorumlanması (Tezkan vd. 1996, Karlık ve Kaya 2001, Pellerin 2002, Wiik vd. 2013, Sasaki vd. 2014) veya birleşik ters çözümü "Joint inversion" (Sasaki 1989, Santos vd. 2006, Candansayar ve Tezkan 2008, Abubakar vd. 2011, Yogeshwar vd. 2012, Behroozmand vd. 2012, Buland ve Kolbjørnsen 2012, Maqbel ve Ritter 2015) ile daha başarılı sonuçlar elde edilebileceği tartışılmıştır.

Yukarıda bahsi geçen EM yöntemler arasında en yeni jeofizik yöntemlerden biri olan RMT yöntemi konusunda literatürdeki çalışmaların hepsi son 20 yılda yapılmıştır. RMT yönteminin yeraltı suyu araması (Turberg vd. 1994, Stiefelhagen ve Müller 1997, Pedersen vd. 2005, Tullen vd. 2006), atık alanlarının araştırılması (Zacher vd. 1996a, Tezkan vd. 1996, 2000, Newman vd. 2003, Candansayar ve Tezkan 2006), petrol kirlenmelerinin araştırılması (Tezkan vd. 2005), gömülü kırık ve çatlakların araştırılması (Linde ve Pedersen 2004, Candansayar ve Tezkan 2008) ve arkeolojik yapıların araştırılması (Zacher vd. 1996b) gibi birçok kullanım alanı vardır. Ayrıca metalik maden aramasında kullanımı konusunda literatürde tek bir çalışma vardır (Bastani vd. 2009). RMT yöntemde kaynak 10 kHz – 1 MHz frekans aralığında yayın yapan radyo vericileridir. Bu yüzden araştırma derinliği ortamdaki radyo vericilerinin frekans aralığına ve ortamın özdirencine bağlı olarak değişmektedir. RMT yöntemde verici ile ölçü alınan yer arasındaki mesafenin çok büyük olmasından dolayı, manyetotellürik "magnetotelluric" (MT) yöntemde olduğu gibi düzlem dalga kabulü yapılmakta ve MT verilerinin ters çözümünde kullanılan algoritmalar ile yorumlanabilmektedir. DAÖ yöntemi ise sığ jeofizik aramalarda en çok kullanılan jeofizik yöntemdir.

DAÖ ve MT/RMT verileri genelde bir doğru boyunca ölçülmekte ve 2-B ters çözüm algoritmaları ile yorumlanmaktadır (Loke 1994, Tezkan vd. 2000, Candansayar ve Tezkan 2006, Candansayar 2008).

MT/RMT ve DAÖ yöntemleri özdirenç (veya tersi olan iletkenlik) parametresine duyarlıdır. DAÖ yöntemi yalıtkan yapılara, MT/RMT yöntemi ise iletken yapılardan daha çok etkilenir. Dolayısıyla bu iki veri grubunun birleşik ters çözümü sonunda iletken ve yalıtkan yapıların sınırları gerçek yapıya daha yakın elde edilebilir. DAÖ ve MT verilerinin ilk olarak 2-B ters çözümü Sasaki (1989) tarafından yapılmıştır. DAÖ ve AMT verilerinin birleşik ters çözümü Santos vd. (2006) tarafından ve DAÖ ve RMT verilerinin birleşik ters çözümü ise Candansayar ve Tezkan (2008) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda sonlu eleman (SE) veya sonlu fark (SF) ile düzenli (structured) ağ (mesh) kullanarak düz çözüm (forward modeling) yapılmıştır. Ayrıca birleşik ters çözümde yüzey topoğrafyası ters çözüme katılmamıştır.

Son yıllarda SE yönteminde düzensiz (unstructured) ağ kullanan düz ve ayrık ters çözüm algoritmaları her iki yöntem için de geliştirilmiştir (Günther vd. 2006, Ren ve Tang 2010, Key ve Weiss 2006, Franke vd. 2007, Li ve Pek 2008, Key 2016, Özyıldırım vd. 2017). Ancak DAÖ ve RMT/MT verilerinin topoğrafyalı 2-B birleşik ters çözümünü yapan bir algoritma bulunmamaktadır. Ayrıca düzenli ağ ve düzensiz ağ kullanarak yapılan ters çözüm sonuçlarını karşılaştıran bir çalışma da literatürde bulunmamaktadır.

İlk olarak bu tez çalışmasında, RMT ve DAÖ verilerinin 2-B topoğrafyalı birleşik ters çözümünü düzensiz ağ kullanarak yapan yeni bir algoritma FORTRAN90 programlama dilinde geliştirilmiştir. Algoritmada, "yuvarlatıcılı durağanlaştırıcılı düzgünleştiricili ters çözüm (Regularized inversion with smoothing stabilizer)" (Zhdanov 1993, Candansayar 2002) tekniği kullanılmıştır. Düzensiz üçgen eleman kullanımında karşılaşılaşılan sorunlardan en önemlisi, literatürde düzenli dikdörtgen elemanlar için yuvarlatma dizeyi (smoothing matrix) bulunmasına rağmen, düzensiz üçgenler için çok fazla yaklaşım olmamasıdır. Yuvarlatma dizeyinin hesabı için yapılan bir çalışma vardır (Lelièvre ve Farquharson 2013). Bu tez çalışmasında, Lelièvre ve Farquharson (2013)'un çalışmasından farklı yeni bir yuvarlatma dizeyi önerilmiştir. Yeni yuvarlatma dizeyi sayesinde, önceki çalışmadan farklı olarak, parametrenin aşırı büyümesinin ters çözümde parametre ayrımlılığına bozucu etki yapması engellenmiştir.

Tezin ilk bölümlerinde geliştirilen algoritmanın DAÖ ve MT düz çözüm bölümleri tartışılmıştır. Düz çözümde kullanılan düzensiz üçgen elemanların SE yöntem ile çözümü açıklanmıştır. DAÖ ve MT yöntemler için geliştirilen düz çözüm algoritmaları, analitik (analytical) çözümü bilinen modeller ile karşılaştırılmıştır. Yeni algoritma Candansayar (2002) ve Demirci ve Candansayar (2010)'ın geliştirdiği düz çözüm algoritmaları ile topoğrafyalı ve topoğrafyasız birkaç model üzerinden karşılaştırılmıştır. Tezin ikinci bölümünde ayrık ve birleşik ters çözümün matematik temeli ve akış şeması sunulmuştur. Tezin son bölümünde ise öncelikle, geliştirilen RMT/MT ve DAÖ ayrık ve birleşik ters çözüm algoritmaları, farklı modellerden elde edilen veriler üzerinden karşılaştırılmıştır. Modeller seçilirken günümüzde karşılaşılan jeofizik problemler temel alınmıştır. Daha sonra, fay zonları üzerinde ölçülmüş DAÖ ve RMT verileri kullanırak algoritmanın ayrık ters çözüm kısımları ve bir bakır sahasında TÜBİTAK 110Y343 numaralı proje kapsamında ölçülen RMT ve DAÖ veriler kullanılarak birleşik ters çözüm kısmı, düzenli ağ temelli algoritma ile karşılaştırılmıştır. En sonunda geliştrilen algoritmanın avantajları tartışılmıştır.

2. RMT VE DAÖ YÖNTEMLERINDE DÜZENSIZ AĞ ILE 2-B DÜZ ÇÖZÜM

RMT yönteminde, kaynak olarak kullanılan radyo vericileri çok uzakta olduğu için, MT yöntemde olduğu gibi düzlem dalga kabulü yapılır. Dolayısıyla MT yöntemde kullanılan model bağıntıları RMT yöntem için de kullanılır. MT yönteminde Helmholtz denklemlerinin tüm modeller için genelleştirilmiş bir analitik çözümü yoktur. Bu nedenle denklemlerin çözümü için sayısal (numerical) çözüm algoritmaları kullanılmaktadır. Genellikle SF (Jupp ve Vozoff 1977, deLugao vd. 1997, Rodi ve Mackie 2001, Candansayar 2002) ve SE (Sasaki 1989, deGroot-Hedlin ve Constable 1990, Van Beusekom vd. 2011) sayısal çözüm yöntemleri kullanılır.

MT yöntemde 2-B düz çözümde, özdirenç değerlerinin yatay düzlemde bir yönde (aşağıda y-ekseni alınmıştır) değişmediği kabul edilir. Bu durumda, TE-modu (transverse electric) ve TM-modu (transverse magnetic) olmak üzere birbirinden farklı iki elektromanyetik mod ortaya çıkar. TE-modunda Ey bileşeni yer-elektrik doğrultuya (strike direction) paraleldir. TM-modunda ise Hy bileşeni yer-elektrik doğrultuya paraleldir (Şekil 2.1). TE ve TM modları için frekans ortamında Maxwell denklemleri kullanılarak elde edilen Helmholtz denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanır (Maxwell denklemlerinden Helmholtz denklemlerinin elde edilişi için bkz. Candansayar 2002);

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = i\omega\sigma\mu_0 E_y \qquad \text{(TE-modu)} \qquad (2.1)$$

$$\rho\left(\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2}\right) + \frac{\partial \rho}{\partial x}\frac{\partial H_y}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial z}\frac{\partial H_y}{\partial z} = i\omega\mu_0 H_y \qquad \text{(TM-modu)} \qquad (2.2)$$

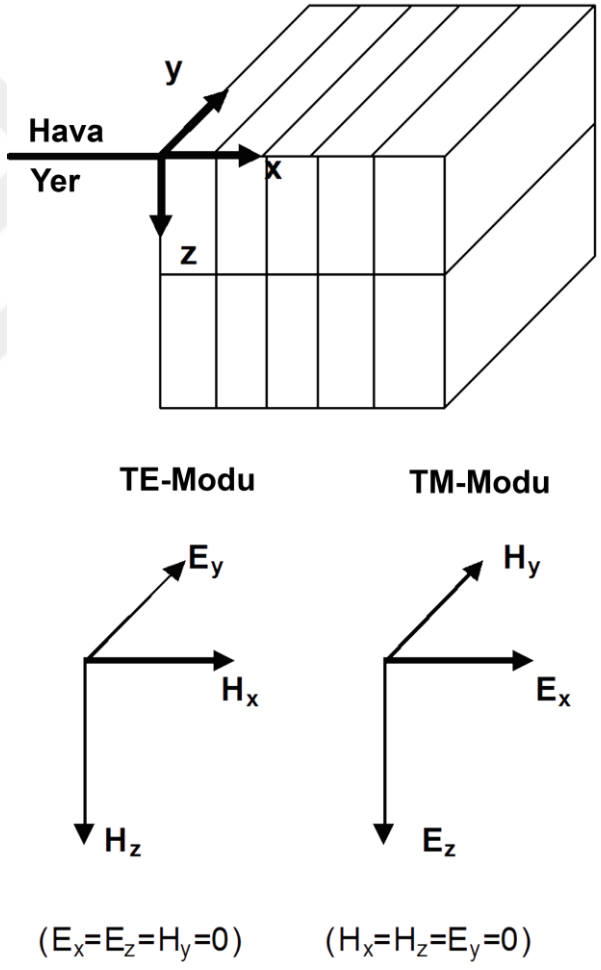
Jeolojik doğrultuya dik (auxiliary) elektrik ve manyetik alan bileşenleri ise aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır.

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega\mu_0 H_x, \qquad (2.3)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -i\omega\mu_0 H_z \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\sigma E_x \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = \sigma E_z \tag{2.6}$$



Şekil 2.1 MT yöntemde TE ve TM modu (Candansayar 2002)

Burada ω açısal frekans, E_x ve E_y, x- ve y- yönünde elektrik alanlar(V/m), H_x, H_y ve H_z, x, y ve z yönünde, manyetik alanlar (A/m), $\mu_0 (= 4\pi 10^{-7} H/m)$ serbest havanın manyetik geçirgenliğini, σ iletkenliği (S/m) ve ρ is özdirençtir (ohm.m). Burada dielektrik geçirgenlik (ε), yarı-duraylı (quasi-static) limit yaklaşımından dolayı ($f \leq 10^5$) ihmal edilmiştir.

DAÖ yönteminde ise 2-B düz çözümde kullanılan model bağıntısı 3-B uzay için elde edilen Poisson denkleminden iletkenlik dağılımının bir yönde değişmediği varsayımı ile x_s, y_s, z_s nokta akım kaynağı konumu olmak üzere aşağıdaki gibi elde edilir (Sasaki 1989, Candansayar 1997).

$$-\nabla.[\sigma(x,z)\,\nabla\phi(x,y,z)] = I.\delta(x-x_S).\delta(y-y_S).\delta(z-z_S) \qquad (2.7)$$

Bu denklemde I akımı (Amper), ϕ gerilimi temsil etmektedir. δ Birim impuls fonksiyonudur ve nokta akım kaynağının konumunu tanımlamak için kullanılır. ∇ ve $\nabla\cdot$ sırası ile eğim (gradient) ve ıraksama (divergence) işleçleridir (Maxwell denklemlerinden Poisson denklemlerinin elde edilişi için bkz. Candansayar 1997). Bu denklemde çözülmek istenen büyüklük, iki boyutlu özdirenç modeli üzerinde, nokta akım kaynağından dolayı oluşacak üç boyutlu uzaya ait gerilim ($\phi(x,y,z)$) değerleridir. Poisson denklemi de genellikle SF veya SE sayısal çözüm yöntemlerinden biri kullanılarak çözülür.

Poisson ve Helmholtz denklemleri eliptik tipte kısmi diferansiyel denklemlerdir ve durağan fiziksel olayları tanımlarlar. Bu tez çalışmasında her iki denklemde aşağıda SE yöntemi ile çözülmüştür.

2.1 Helmholtz ve Poisson Denklemlerinin Sonlu Elemanlar ile Çözümü

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada Helmholtz ve Poisson denklemlerinin çözümü için SE sayısal çözüm tekniği kullanılmıştır. SE sayısal çözüm yöntemi ile denklemin çözülebilmesi için öncelikle alanın sonlu sayıda elemanlara ayrılması gerekmektedir. SE

ağındaki her bir eleman için çözümü varyasyonel veya ağırlıklı artıklar yöntemi ile çözülür. Her iki çözüm yöntemi sonucu eşdeğerdir (Rao 2010). Bu tez kapsamında yeraltının düzensiz üçgenlerden oluştuğu varsayılmıştır. Uygulamada bu amaç için en fazla ilgi gören yöntem Delaunay üçgenleme (Delaunay Triangulation) işlemidir (Schewchuk 1996). Yer altının Delaunay üçgenleme yöntemi ile elemanlara ayırmak için MATLAB programı kullanılmıştır. EK 1.b'de model ağının üçgen elemanlara ayrılması ile ilgili detaylı bilgiler sunulmuştur.

MT/RMT yöntemde her bir üçgen eleman için TE ve TM modu için sırası ile eşitlik 2.1-2'nin çözümü aşağıdaki gibi verilir (Rijo 1977);

$$\left(\frac{-1}{4i\omega\mu_0\Delta}\begin{pmatrix} b_1^2+c_1^2 & b_1b_2+c_2c_1 & b_1b_3+c_3c_1 \\ b_2b_1+c_1c_2 & b_2^2+c_2^2 & b_2b_3+c_3c_2 \\ b_3b_1+c_1c_3 & b_3b_2+c_2c_3 & b_3^2+c_3^2 \end{pmatrix}+\frac{\sigma\Delta}{12}\begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}\right)\begin{bmatrix} E_y^1 \\ E_y^2 \\ E_y^3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \text{(TE)} \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{-1}{4\sigma\Delta}\begin{pmatrix} b_1^2+c_1^2 & b_1b_2+c_2c_1 & b_1b_3+c_3c_1 \\ b_2b_1+c_1c_2 & b_2^2+c_2^2 & b_2b_3+c_3c_2 \\ b_3b_1+c_1c_3 & b_3b_2+c_2c_3 & b_3^2+c_3^2 \end{pmatrix}+\frac{i\mu_0\omega\Delta}{12}\begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}\right)\begin{bmatrix} H_y^1 \\ H_y^2 \\ H_y^3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \text{(TM)} \quad (2.9)$$

DAÖ verilerinin düz çözümünde kullanılan Poisson denklemi eşitlik 2.3'de verilmiştir. Bu denklemin bir doğrusal üçgen eleman için çözümü:

$$\left[\frac{\sigma}{4\Delta}\begin{pmatrix} b_1^2+c_1^2 & b_1b_2+c_2c_1 & b_1b_3+c_3c_1 \\ b_2b_1+c_1c_2 & b_2^2+c_2^2 & b_2b_3+c_3c_2 \\ b_3b_1+c_1c_3 & b_3b_2+c_2c_3 & b_3^2+c_3^2 \end{pmatrix}+\frac{1}{12}\sigma k_y^2\Delta\begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}\right]\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix}=I\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

şeklinde verilir (Candansayar 1997).

Eşitlik 2.8-10'da b ve c üçgen elemanın köşe koordinatlarından hesaplanan katsayılar ve Δ ise üçgen elemanın alanını ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadırlar;

$$b_1 = z_2 - z_3 \qquad c_1 = x_3 - x_2$$

$$b_2 = z_3 - z_1 \qquad c_2 = x_1 - x_3 \qquad \Delta = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{pmatrix}. \qquad (2.11)$$

$$b_3 = z_1 - z_2 \qquad c_3 = x_2 - x_1$$

Eşitlik 2.8-9'da verilen TE-modu için elektrik alan vektörü (E_y) ve TM-modu için manyetik alan vektörünün (H_y) üst indisleri ile b, c ve eşitlik 2.10'da verilen ϕ 'nin alt indisleri üçgen köşelerini ifade etmektedir. Alanı pozitif hesaplayabilmek için elemanın düğüm noktaları (node) saat yönünün tersi yönde numaralandırılmıştır. Eşitlik 2.8-9'un sağ tarafında bulunan S vektörü, kaynak vektörünü ifade etmektedir. Fakat MT ve RMT yöntemde, kaynak çok uzakta olduğu için düzlem dalga kabulü yapılır. Bu yüzden birincil alanlar (primary fields) (TE-modunda E_{yp} TM-modunda H_{yp}) sıfıra eşit kabul edilir. Böylece ortamda sadece ikincil alanlar (secondary fields) (TE modunda E_{ys} TM modunda H_{ys}) vardır. Bu yüzden S vektörü üçgen eleman köşelerinde oluşan ve bilinen ikincil alan değerlerine eşittir. Eşitlik 2.10'un sağ tarafında bulunan vektör nokta akım kaynağının konumunu belirlemektedir. Bu terim kaynağın olduğu düğüm noktası için '1' diğer noktalar için '0' alınmıştır.

Eşitlik 2.8-10 model ağındaki her bir üçgen eleman için elde edilir. Daha sonra tüm bu eleman dizey denklemleri birleştirilerek genel dizey denklemi elde edilir. Genel dizey denkleminin elde edilişi için Candansayar (1997)'a bakılabilir.

2.2 Sınır Koşulları

RMT yöntemde, bilinen değerler, yapay sonsuz sınırlarda 1-B modelleme ile çözülmüş değerler ve bu değerlerden yararlanarak bulunan SE ağının üst ve alt kısmında bulunan düğüm noktalarındaki TE-modu için E_y TM-modu için manyetik alan (H_y) değerlerini ifade etmektedir. Üst ve alt sınırlarda ise E- ve H- alanı değerleri sabit alınmıştır. Bu sabit değerler, sol ve sağ üst ve alt köşedeki düğüm noktalarının 1-B çözümlerinin aritmetik ortalamasından hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında geliştirilen programda

Candansayar (2002) tarafından kullanılan sınır koşulları uygulanmıştır. Model ağının yapay sonsuz sağ, sol, alt ve üstünde elektrik ve manyetik alanların (MT ve RMT için) atanması işlemi başlı başına bir araştırma konusudur. Bu çalışmada kullanılanın dışında asimtotik (asymptotic) Weaver ve Brewitt-Taylor (1978) sınır koşulu da kullanılabilir. Fakat asimtotik sınır koşulunda genel dizey denklemi "Global Matrix Equation" (GDD) band özelliğini kaybetmekte ve düz çözümü yavaşlatmaktadır (Weaver 1994).

DAÖ yönteminde GDD çözümünde model ağı sınırlarında, Dirichlet tipi sınır koşulu, sağ, sol ve tabanda $\phi = 0$ değeri verilerek uygulanmıştır. Uygulamada DAÖ yöntemde model ağı sınırlarında gerilim değerlerinin atanması için Neuman ve Karışık sınır koşulları (Dey ve Morrison 1979, Candansayar 1997, 2002, Demirci 2009, Erdoğan 2009) da kullanılmaktadır. Neuman ve Karışık sınır koşulları düzenli ağda sınırlar çok fazla uzatılmadığı zaman kullanılması elzemdir. Bu çalışmada düzensiz ağ sayesinde sınırların uzatılması eleman sayısını düzenli ağa göre çok fazla değiştirmemektedir. Bu yüzden model ağı ölçüm doğrultusunun 200 katı kadar uzatılmıştır ve Dirichlet tipi sınır koşulu uygulanması uygundur.

2.3 Genel Dizey Denklemlerinin Çözümü

Yukarıda verilmiş olan eşitlik 2.8-10, sadece bir eleman için elde edilmiş Helmholtz ve Poisson denklemlerinin SE çözümüdür ve eleman dizey denklemi olarak isimlendirilir. EK 1.b'de oluşturulması anlatılmış olan SE ağının dizey denklemi, tüm ağ için genelleştirilerek GDD'nin oluşturulması gerekmektedir (GDD oluşturulması için bkz. Candansayar 2002, Demirci 2009, Erdoğan 2009, EK 2.a). GDD, her iki yöntem için de aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\mathbf{Kv = s} \tag{2.12}$$

Burada **K**, katsayı dizeyi (coefficient stiffness matrix), **v**, RMT yönteminde düğüm noktalarında bilinmeyen alan değerleri, DAÖ yöntemi için ise düğüm noktalarında bilinmeyen gerilim değerlerini içerir. Vektör **s**, RMT düz çözümde yapay sonsuz sınırlarda 1-B düz çözüm ile bulunmuş bilinen alan değerlerini, DAÖ yöntemi için ise

kaynak vektörünü ifade eder. Yukarıdaki denklemde K katsayı dizeyi, RMT yöntemi için, karmaşık sayılardan oluşan, simetrik ve bol sıfırlardan oluşan seyrek (sparse) matris formatında saklanabilen bir dizeydir. DAÖ yöntemi için ise reel sayılardan oluşan simetrik ve seyrek dizey formatında saklanabilir bir dizeydir. Uygulamada böyle sistemlerin çözümü için en çok kullanılan yöntemler LU ayrıştırması "LU decomposition" ve eşlenik türev "Conjugate gradient" (CG) yöntemleridir. Fakat CG yöntemi yinelemeli bir yöntem olduğu için, denemelerde istenen hata değerine ulaşmanın oldukça güç olduğu görülmüştür. Bu yüzden çözücünün doğrudan bir çözücü olması gereklidir. Çözücüler üzerinde çalışmalarda ilk olarak "CLU1" isimli hazır FORTRAN kodu kullanılmıştır (Press vd. 1986). Fakat CLU1 programı, sistemin simetrikliğinden ve seyrek matris olabilirliğinden yararlanmadığı için oldukça yavaş çalışmaktadır. Bu yüzden çözücü olarak aranan özellikler, seyrek dizey aritmetiğinde çalışması, simetrik sistemler için tasarlanmış olması, gerçel ve karmaşık sayılarla hesaplamalar yapabilmesi ve doğrudan çözücü olmasıdır. Pratikte bu tür denklemlerin çözümü için birçok algoritma ve kütüphane geliştirilmiştir. Bunlar arasında diğerlerine göre oldukça hızlı ve reel ve karmaşık sayılar için çalışan kütüphanelerden biri olan PARDISO "Paralel Seyrek doğrudan ve Yinelemeli Doğrusal Çözücü (Parallel Sparse Direct and Multi-Recursive Iterative Linear Solvers)" (Schenk ve Gärtner 2004, 2006, 2014) FORTRAN90 kütüphanesi kullanılmıştır. Çözücülerin hızları karşılaştırılırsa, örneğin, 1500x1500 boyutlarında karmaşık sayılardan oluşan bir sistemi CLU1, 28 sn. de, MATLAB 2 sn. de çözerken, PARDISO aynı sistemi 0.1 sn. de çözmektedir. Kütüphanenin çok hızlı çalışmasının bir sebepleri dizeylerin farklı seyrek matris formatlarında çalışabilir olmasıdır. Bu çalışmada dizeyler sıkıştırılmış seyrek satırlar "Compresed Sparse Row" (CSR) formatında saklanmıştır (bkz. EK 2.b).

2.4 MT/RMT Yöntemde Dik Alanların Hesaplanması

MT/ RMT düz çözümde, eşitlik 2.8-9 her frekans için ve mod (TE- ve TM-) için ayrı ayrı çözülmelidir. Böylece bütün düğüm noktalarında her frekans için TE- ve TM-modu alan değerleri (Yer elektrik doğrultusu y yönünde ise; E_y, H_y) bulunur. Bulunan alan değerleri kullanılarak jeolojik doğrultuya dik alan (Auxiliary field) değerleri, sayısal türev yöntemleri ile eşitlik 2.3-5 sayısallaştırılarak hesaplanır. Aşağıda, dik

alanların (Yer elektrik doğrultusu y yönünde ise; H_x, E_x, H_z) hesaplanması için denklemlerin SF sayısal türev alma yöntemleriyle yüksek mertebeden($O(h^2)$ ve $O(h^4)$) hesaplanması gösterilmektedir.

TE- modu için eşitlik 2.3'de verilen dik alanlar, $O(h^2)$ mertebesinde SF sayısal türev alma metodu ile aşağıdaki gibi yazılır (Weaver 1994).

$$H_x(z_i)=\frac{1}{iw\mu_0}\frac{3E_y(z_i)-4E_y(z_{i-1})+E_y(z_{i-2})}{2\Delta z} \tag{2.13}$$

Benzer olarak TM modu için eşitlik 2.5, izleyen şekilde hesaplanmaktadır.

$$E_x(z_i)=-\frac{1}{\sigma}\frac{3H_y(z_i)-4H_y(z_{i-1})+H_y(z_{i-2})}{2\Delta z} \tag{2.14}$$

burada, Δz istasyonların altında düzenli (structured) olarak tasarlanmış üçgenlerin z-yönünde uzunluğudur.

Burada Tipper hesabında kullanılan H_z hesabı için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. H_z bu çalışmada $O(h^4)$ mertebesinde eşit aralıklı olmayan merkezi SF yöntemi ile hesaplanmıştır. Eşitlik 2.4, bu koşullar altında aşağıdaki gibi olur.

$$H_z(x_i)=\frac{1}{i\omega\mu_0}\sum_{\substack{j=i-2\\ j\neq i}}^{i+2}L(x_j)E_y(x_j) \tag{2.15}$$

burada $L(x_j)$ izleyen gibi olur.

$$L(x_j) = \frac{3x_i^2 - 2x_i \sum_{\substack{k=i-2 \\ k\neq j,k\neq i}}^{i+2} x_k + \sum_{\substack{k=i-2 \\ k\neq j,k\neq i}}^{i+2} \frac{\prod_{\substack{l=i-2 \\ l\neq j,l\neq i}}^{i+2} x_l}{x_k}}{\prod_{\substack{k=i-2 \\ k\neq j,k\neq i}}^{i+2} \left(x_j - x_k\right)} \quad j = i-2, i+2 \;\{\; j \neq i \tag{2.16}$$

Düz çözümü yapılan model için dik alanların sadece RMT istasyonlarının bulunduğu düğüm noktası için hesaplanması yeterlidir. Böylece olası ölçülebilecek görünür özdirenç (GÖ) ve empedans faz değerleri ile z-yönü manyetik alan kullanılarak Tipper (T) büyüklüğü hesaplanabilir.

2.5 DAÖ Yönteminde Gerilimin (x, k_y, z) Uzayından (x, y, z) Uzayına Dönüştürülmesi

EK 2.b'de anlatıldığı gibi, Poisson denklemi çözümünde Fourier kosinüs dönüşümü kullanılmış ve bir üçgen eleman için çözümü eşitlik 2.10'da verilmiştir. Eleman dizey denklemi (Eşitlik 2.10), (x, k_y, z) uzayındadır ve GDD'nin (Eşitlik 2.12) çözümünde de (x, k_y, z) uzayında yapılır. Daha sonra, (x, k_y, z) uzayından, (x, y, z) uzayına ters Fourier kosinüs dönüşümü ile 2-B iletkenlik dağılımı nedeni ile oluşan üç boyutlu gerilim dağılımı hesaplanabilir. (x, k_y, z) uzayında GDD çözülürken k_y deneme yanılma yoluyla bulunur. Bu değer sıfır ile dört arasında gerçekleştirilebilir. Fakat herhangi bir yer modeli için ağ boyutunun değişmesi (dikdörtgen bloklar için Δx ve Δz aralıklarının değişmesi) yeni k_y değerlerinin bulunmasını gerektirmektedir. Ayrıca aynı model için her farklı AB/2 değeri içinde k_y değerlerinin yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Eğer modelin sadece iletkenlik değerleri değişirse aynı k_y değerleri ile anomali hesabı yapılabilir. k_y değerleri deneme yanılma yöntemi ile bulunarak homojen bir model için doğru olup olmadığı bütün AB/2 değerlerinde kontrol edilmelidir. k_y değerlerinin kaç adet olması bir kurala bağlı değildir. Örneğin, Dey ve Morrison (1979) yaptıkları programda beş adet k_y değeri kullanmıştır (Candansayar 1997). Ters kosinüs dönüşümü aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

$$\phi(x,y,z)=\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}\tilde{\phi}(x,k_y,z)\cos(yk_y)\,dk_y \tag{2.17}$$

Bu çalışmada k_y, değeri 8 adet değeri kullanılmış ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$k_y=\frac{N_{PS}\times 10^{i}}{a} \qquad i=(-2.40,\ -2.06,\ -1.71,\ -1.37,\ -1.02,\ -0.69,\ -0.34,\ 0.0) \tag{2.18}$$

burada N_{PS}, komşu elektrotlar arasında varsayılan üçgen sayısı, a (m) ise elektrot aralığıdır. Dönüşüm işlemi $\tilde{\phi}(x,k_y,z)$'i uygun bir üstel fonksiyona yaklaştırarak k_y'nin değerleri için ($k_{y1}\leq k_y\leq k_{y2}$) analitik olarak;

$$\int_{k_{y1}}^{k_{y2}} e^{-\alpha k_y}\cos(\beta k_y)\,dk_y=\frac{e^{-\alpha k_y}}{\alpha^2+\beta^2}\left[\beta\sin(\beta k_y)-\alpha\cos(\beta k_y)\right]\Big|_{k_{y1}}^{k_{y2}} \tag{2.19}$$

şeklinde yapılabilir. Farklı nokta kaynak konumlarını için elde edilen $\phi(x,y,z)$ değerleri kullanılarak, görünür özdirenç değerleri hesap edilebilir.

2.6 RMT ve DAÖ Yöntemlerinde Görünür Özdirenç Hesabı

Önceki bölümlerde RMT yöntem için elektrik ve manyetik alan, DAÖ yöntemi için gerilim değerlerinin çözümleri sunulmuştur. Bu bölümde ise elde edilen sayısal değerlerden bazı cebirsel işlemlerle GÖ ve faz değerlerinin hesabı gösterilmiştir. RMT yönteminde, GÖ, empedans fazı ve Tipper hesaplanması aşağıdaki gibi olur.

$$\rho_{aij}=\frac{1}{\omega\mu_0}\left|E_i/H_j\right|,\ i=x,y;\ j=x,y \tag{2.20}$$

$$\phi_{ij}=a\tan\left(\frac{imag(E_i/H_j)}{real(E_i/H_j)}\right) \tag{2.21}$$

$$T_{zx} = H_z / H_x \tag{2.22}$$

DAÖ düz çözümde, Farklı nokta kaynak konumlarını için elde edilen gerilim değerleri $\phi(x, y, z)$ kullanılarak varsayılan elektrot dizilimi için (Schulumberger, Wenner, Pole-Dipole (L, R), Dipole-Dipole, vb.) geometrik faktör ve görünür özdirenç değerleri hesaplanabilir. DAÖ yönteminde görünür özdirenç hesabı;

$$\rho_a = K \frac{\Delta\phi}{I} \tag{2.23}$$

şeklinde hesaplanır. Burada K, geometrik faktör olarak isimlendirilir. Elektrot dizilimine göre K değeri değişmektedir. Geometrik faktör, A ve B akım elektrotları ve M ve N gerilim elektrotları olmak üzere, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} - \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{BN}}\right)} \tag{2.24}$$

eşitlik 2.17'de $\Delta\phi$, elektrotların durumuna göre hesaplanan gerilim farkı değerlerini ifade etmektedir. GDD çözümü sonucu elde edilen gerilim değerlerinden gerilim farklarının elektrot dizilimlerine göre elde edilmesi için Candansayar (1997)'dan yararlanılabilir.

Yukarıdaki kısımlarda verilen matematik temele dayanan düz çözüm algoritması, daha önce analitik çözümü yapılmış bazı modellerin çözümü ile karşılaştırması ve doğruluğunun ispatlanması gerekmektedir. Ayrıca daha önceden yapılmış, düzenli ağ kullanan algoritmalar ile karşılaştırılma yapılması, yeni algoritmanın güvenilirliğini kanıtlar. İzleyen kısımda geliştirilen düz çözüm algoritmasının analitik çözüm ve bilinen (Demirci ve Candansayar 2010) bir düz çözüm algoritması ile karşılaştırılmıştır (EK 3).

3. RMT VE DAÖ VERİLERİNİN AYRIK VE BİRLEŞİK 2-B TERS ÇÖZÜMÜ

Son dönemlerde bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel olarak E ve EM verilerin birleşik ters çözümü üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. DAÖ verilerinin EM verileri ile birleşik ters çözümü, genellikle Magnetotellurik (MT) yöntemi ve benzeri düzlem dalga kabulü yapılabilen RMT ve Audio-Magnetotelluric (AMT) yöntemleri ile yapılmıştır (Sasaki 1989, Santos vd. 2007, Candansayar ve Tezkan 2008). Abubakar vd. (2011), Wiik vd. (2013), MT ve yapay-kaynak elektromanyetik "controlled-source electromagnetic" (CSEM) yöntemlerinin birleşik ters çözümü üzerinde çalışmışlardır. Sasaki vd. (2014), AMT ve Z-Axis Tipper Elektromanyetik (ZTEM) verilerinin birleşik ters çözümü hakkında çalışmışlardır. Yi ve Sasaki (2015), Yatay halka elektromanyetik "Horizontal Loop Electromagnetic" (HLEM) ile DAÖ verilerinin birleşik ters çözümü üzerinde çalışmalar yapmıştır. Maqbel ve Ritter (2015) ise MT, DAÖ ve EM verilerinin ikisini veya üçünü birlikte kullanan birleşik ters çözüm algoritması geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, özellikle yakın yüzey iletkenlik dağılımının ortaya çıkarılmasında kullanılan DAÖ ve RMT yöntemleri kullanılmıştır. Her iki yöntemden de elde edilen parametre yer altı iletkenliği olmasına rağmen, DAÖ yöntemi yalıtkan yapılara, RMT yöntemi ise iletken yapılara daha duyarlıdır. Bu nedenle, Candansayar ve Tezkan (2008) ile Yogeshwar vd. (2012) hem iletken hem de yalıtkan yapıların çözünürlüğünün artırılması için RMT ve DAÖ verilerinin birlikte kullanılmasını önermiştir. Öncel çalışmalar incelendiğinde birleşik ters çözüm algoritmalarının düz çözüm bölümleri SF yöntemi ile düzenli ağ kullanılarak geliştirilmiştir.

Düzenli ağ yapısı kullanımı derinlik yönündeki parametre çözünürlüklerini düşürmekte ve topoğrafyanın temsil edilmesini güçleştirmektedir. Bu problemin üstesinden gelmek için son dönemlerde SE yönteminde düzensiz ağ kullanan düz ve ters çözüm algoritmaları geliştirilmiştir. DAÖ yönteminde düzensiz ağ kullanılarak geliştirilen düz ve ters çözüm (Günther vd. 2006, Ren ve Tang 2010) algoritmaları mevcuttur. Benzer şekilde MT yönteminde de düzensiz ağ kullanarak düz (Key ve Weiss 2006) ve ters çözüm (Franke vd. 2007, Li ve Pek 2008, Key 2016, Özyıldırım vd. 2017) algoritmaları

geliştirilmiştir. Fakat literatürde, DAÖ ve RMT verilerinin 2-B birleşik ters çözümü için hali hazırda düzensiz ağ kullanan algoritma bulunmamaktadır.

Bu bölümde RMT ve DAÖ verilerinin 2-B birleşik ters çözümünü düzensiz ağ kullanarak geliştirilen yeni algoritma anlatılmıştır. FORTRAN90 programlama dilinde geliştirilen algoritma literatürdeki eksikliği giderecek olması nedeniyle önemlidir. Geliştirilen algoritmanın ayrık ve birleşik kısmı kullanılar, yapay ve gerçek veriler ile test edilmiştir. Algoritma test edilirken Candansayar ve Tezkan (2008), Demirci ve Candansayar (2010) tarafından geliştirilmiş birleşik ters çözüm algoritmalarıyla da karşılaştırılmıştır. Düzensiz ağ kullanılarak geliştirilen birleşik ters çözüm algoritmasının, düzenli ağ kullanan birleşik ve ayrık ters çözüm algoritmalarına nazaran avantajları yapay ve gerçek veriler kullanılarak izleyen bölümlerde tartışılmıştır.

3.1 RMT ve DAÖ Verilerinin Düzgünleştiricili Ayrık Ters Çözümü

Ters çözüm en genel ifade ile ölçülen veri kümesini temsil eden modeli bulma işlemi olarak ifade edilebilir. Jeofizik yöntemlerde model, yeraltındaki jeolojik yapının fiziksel ve geometrik sınırlarının tanımlanması olarak değerlendirilir. Jeofizik yöntemlerde ters çözüm problemindeki temel sorun, çözümün durağan ve tekil olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu problemlerin çözümünü ilk ele alan Tikhonov and Arsenin (1977) düzgünleştirme kuramını ortaya atmış ve Çakışmazlık (Misfit) fonksiyoneline bir durağanlaştırıcı terimi eklenerek kötü-durumlu (Ill-posed) problemlerin çözülebileceğini önermiştir (Candansayar 2002). Bu yüzden RMT ve DAÖ verilerinin ayrık ters çözümlerinde genellikle kullanılan düzgünleştiricili ters çözüm algoritmaları kullanılmaktadır. Düzgünleştiricili ters çözüm (regularized inversion) algoritmalarında düzgünleştirme kuramına göre kullanılan Tikhonov parametrik fonksiyonun genel ifadesi;

$$P^{\alpha}(\mathbf{m}) = \varphi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) + \alpha S(\mathbf{m}) \tag{3.1}$$

şeklinde verilebilir. Burada $\varphi(\mathbf{m}, \mathbf{d})$ Çakışmazlık fonksiyoneli, α , düzgünleyici parametre (regularization parameter), $S(\mathbf{m})$ ise durağanlaştırıcı fonksiyoneli (stabilizing

functional) olarak tanımlanır (Candansayar 2002). N, veri sayısı ve M parametre sayısı olmak üzere, **d**, (Nx1) boyutunda ölçülen veriyi (DAÖ için görünür özdirenç, MT/RMT yöntemi için TE- ve TM- modu görünür özdirenç ve empedans faz değerleri) içeren sütun yöneyi, **m** (Mx1) boyutlu bilinmeyen parametreler içeren sütun yöneyidir. Çakışmazlık fonksiyoneli, ölçülen ve kuramsal veri arasındaki yakınlığın bir ölçütü olarak aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\varphi(\mathbf{m})=\|(f(\mathbf{m})-\mathbf{d}\|^2 \tag{3.2}$$

burada, f(**m**) düz çözüm operatörüdür. Verilerin ters çözümünde, ölçü değerlerinin gürültü oranının birbirinden farklı olması nedeniyle çakışmazlık fonksiyoneline ağırlık verilmesi gerekir (Candansayar 2002). Çakışmazlık fonksiyoneline ağırlık atandığında aşağıdaki hali alır:

$$\varphi(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W_d}(f(\mathbf{m})-\mathbf{d})\|^2 \tag{3.3}$$

burada $\mathbf{W_d}$, (NxN) boyutlu veri ağırlık dizeyi (data weighting matrix) olarak adlandırılır. Jeofizik yöntemlerde çözümün durağan ve tekil olmaması nedeniyle eşitlik 3.1'de görüldüğü gibi çakışmazlık fonksiyoneline farklı durağanlaştırıcılar eklenerek çözüm aranmaktadır. Bu çalışmada kullanılan durağanlaştırıcı aşağıdaki gibi model parametrelerininin laplasiyeninin (laplacian) en küçük normudur (Farklı durağanlaştırıcı tanımları için bkz. Candansayar 2002):

$$S(\mathbf{m}) = \|\nabla^2\mathbf{m}\|^2 \tag{3.4}$$

Eşitlik 3.3-4, eşitlik 3.1'de yerine konursa yuvarlatıcı durağanlaştırıcı kullanan düzgünleştiricili ters çözüm için parametrik fonksiyonelin genel formu izleyen şekilde olur:

$$P^{\alpha}(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W_d}(f(\mathbf{m})-\mathbf{d})\|^2 + \alpha\|\nabla^2\mathbf{m}\|^2 \tag{3.5}$$

elde edilir. Eşitlik 3.5'in parametre düzeltme vektörü ($\Delta\mathbf{m}$)'ne göre türevi alınarak sıfıra eşitlenmesi sonucu:

$$\Delta\mathbf{m} = \left(\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{W}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\mathbf{W}_{\mathrm{d}}\mathbf{A} + \alpha\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\right)^{-1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{W}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\mathbf{W}_{\mathrm{d}}\Delta\mathbf{d} - \alpha\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\mathbf{m}_{\mathrm{i}} \tag{3.6}$$

çözümü elde edilir. Burada **A** (NxM) boyutlu kısmi türevler dizeyi (Jacobian dizeyi) Yuvarlatıcılı durağanlaştırıcılı ters çözümde kullanılan parametre düzeltme vektörü her yinelemede bu denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Burada i yineleme (iteration) sayısı, **C**, (MxM) boyutlu yuvarlatma dizeyi, $\mathbf{m_i}$, i-ninci yinelemede (Mx1) boyutlu parametre sütun vektörüdür.

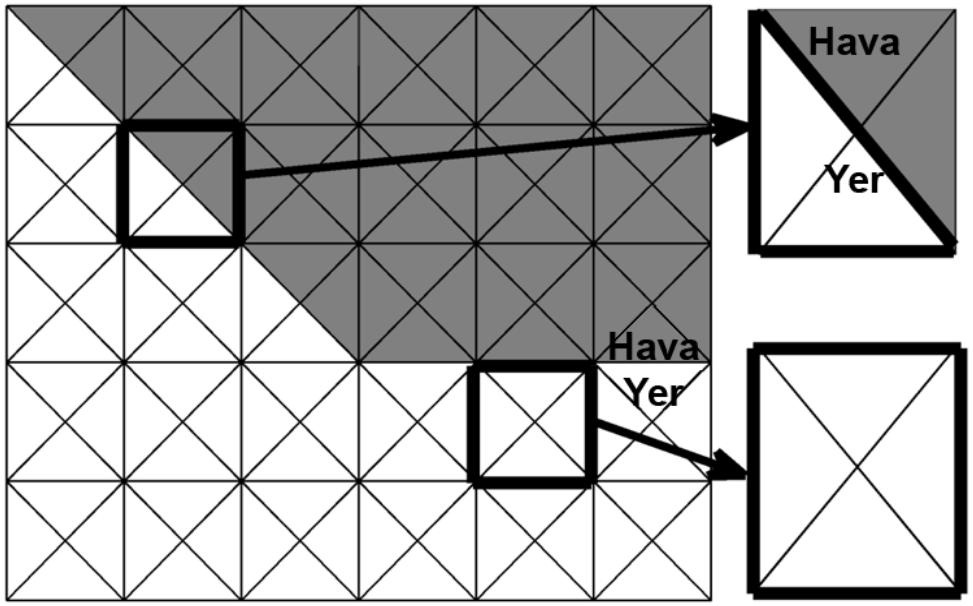
Yukarıdaki dizey denklem sistemi ile aşağıdaki denklemin çözümü eşdeğerdir (Haber ve Oldenburg 2000, Candansayar ve Tezkan 2008):

$$\begin{bmatrix}\mathbf{W}_{\mathrm{d}}\mathbf{A} \\ \sqrt{\alpha}\mathbf{C}\end{bmatrix}\Delta\mathbf{m} = \begin{bmatrix}\mathbf{W}_{\mathrm{d}}\Delta\mathbf{d} \\ -\sqrt{\alpha}\mathbf{C}\mathbf{m}_{\mathrm{i}}\end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Düzenli üçgen veya dikdörtgen elemanların kullanıldığında ve topografyalı ters çözümde, model ağında hava-yer ara-yüzeyinde, üçgen hücreler, yer içinde ise dört üçgenden oluşan dikdörtgen bloklar parametre olarak çözülmektedir (Şekil 3.1). Düzensiz ağda ise ölçüm profili altında kalan alanda her üçgen, bir parametre olarak varsayılmıştır. Düzensiz ağda parametreleştirme hakkında EK 3.b'de bahsedilmiştir.

Parametrelerin çözümü için her yinelemede eşitlik 3.7'da verilen normal eşitliğin çözümü gerekmektedir. Geliştirilen algoritmada eşitlik 3.7 her yinelemede QR-Ayrıklaştırması (Factorization) kullanarak çözülmüştür. Algoritma FORTRAN90 dilinde yazılmıştır ve QR ayrıklaştırması için LAPACK FORTRAN90 kütüphanesi kullanılmıştır (Anderson vd. 1999). Ölçülen ve kuramsal veri arasındaki ortalama karekök hata "Root Mean Squares" (RMS), her yinelemede aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır. Algoritma RMS % 1'den küçük olduğu durumda durmaktadır.

$$RMS = \sqrt{\frac{(\mathbf{W_d}\Delta\mathbf{d})^T(\mathbf{W_d}\Delta\mathbf{d})}{N}} \tag{3.8}$$



Şekil 3.1 Düzenli ağ ile ters çözümde model ağının parametreleştirilmesi (Demirci vd. 2012)

Eşitlik 3.7, RMT ve DAÖ verilerinin ters çözümü için her yinelemede parametre farkları dizeyi çözümü için hesaplanmaktadır. Eşitlikte bulunan değişkenlerin hesaplanması bu bölümde alt başlıklar halinde sunulmuştur.

3.1.1 Düzgünleyici parametrenin (α) seçilmesi

Düzgünleyici parametre (α)'nın seçiminde kullanılan en iyi bir yöntem yoktur. Bu çalışmada 'cooling yaklaşımı' kullanılmıştır (Newman ve Alumbaugh 1997, Candansayar 2008). Bu çalışmada, ($\mathbf{A}^T\mathbf{A}$) dizey çarpımındaki en büyük tekil değer, dizeyin satırlarının toplamı en büyük olan değer olarak alınır (r_{top}). Sonra her yinelemede α aşağıdaki gibi hesaplanır (Candansayar 2002).

$$\alpha_i = \frac{r_{top}}{2^{i-1}} \tag{3.9}$$

burada i yineleme numarasıdır. Bu çalışmada da ilk yinelemede ($\mathbf{A}^T\mathbf{A}$) dizey çarpımındaki en büyük tekil değeri α'nın ilk değeri olarak alınır. Daha sonraki yinelemelerde α;

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} * 0.9 \tag{3.10}$$

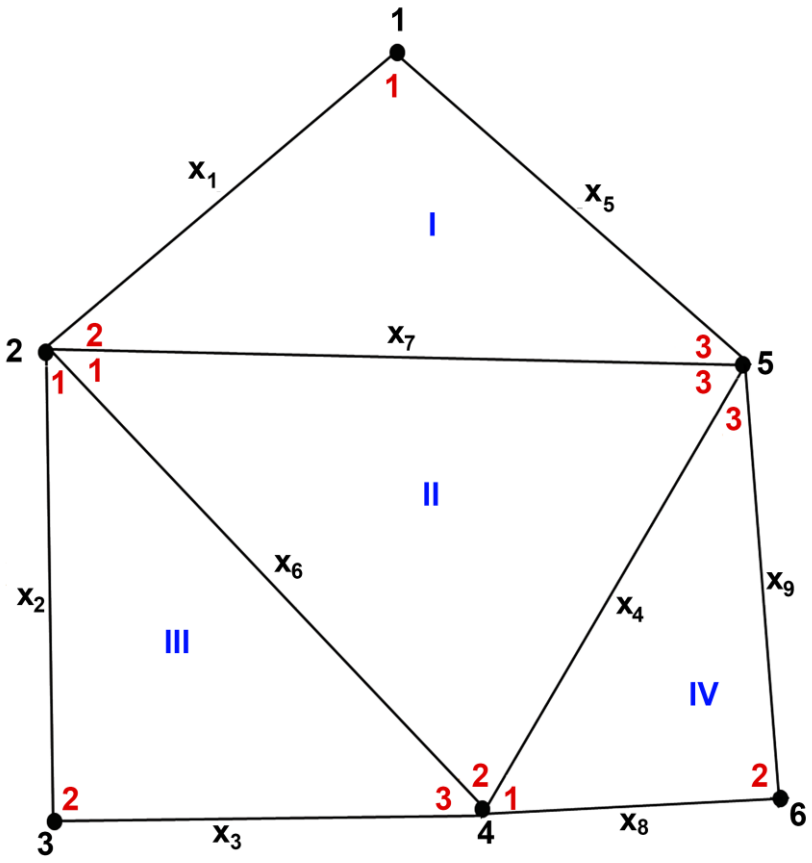
bağıntısıyla hesaplanmıştır.

3.1.2 Yuvarlatma dizeyinin (C) hesaplanması

Uygulamada yuvarlatma dizeyi (C), dörtgen eleman için hesaplanması kolaydır. C dizeyi ikinci dereceden türev operatörü (2-B Laplasiyen) olmasına karşın, operatör değerleri bloğun düşey ve yatay yöndeki boyutlarına bağlı olarak ölçeklenmiştir. Eğer blok dikdörtgen ve x-yönündeki boyutu z-yönündeki boyutundan büyükse ($\Delta x > \Delta z$), bu bloğun üst ve altındaki bloklarla olan ilişkisi, sol ve sağındaki bloklarla olan ilişkisinden daha sıkı olacaktır (Candansayar 1997). Candansayar (2002)'da dikdörtgen parametreler için yuvarlatma dizeyi hesabı verilmiştir. Fakat düzensiz ağ için yuvarlatma dizeyi hesabı hakkında literatürde sadece bir tane çalışma bulunmaktadır (Lelièvre ve Farquharson 2013). Bu yaklaşımda yuvarlatma dizeyi, birbirine komşu üçgenlerin ağırlık merkezlerinin koordinatları farkından yararlanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışma algoritma içerisinde kullanılabilir olsa da geliştirilen ters çözüm algoritması için yeterli doğrulukta sonuçlar bulunamamaktadır. Bu yüzden bu çalışma kapsamında yeni bir yuvarlatma dizeyi hesabı önerilmiştir. Lelièvre ve Farquharson (2013)'un çalışmasından farklı olarak, önerilen yuvarlatma dizeyi, birbirine komşu üçgen parametrelerin kenar uzunluğunun çevresine oranından yararlanılarak hesaplanmaktadır. Lelièvre ve Farquharson (2013)'un önerisi ile bu çalışmada önerilen yuvarlatma dizeyi arasındaki fark, "Yapay veri I" bölümünde her iki yuvarlatma dizeyi kullanılarak, ters çözüm sonucu elde edilen modeller üzerinde karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmadaki öneriyi daha açık bir şekilde anlatabilmek için, dört üçgen elemandan oluşan, düzensiz bir ağ varsayılmıştır (Şekil 3.2). Bu ağ için hesaplanan yuvarlatma dizeyi eşitlik 3.11'de verilmiştir. **C** dizeyinin köşegen olmayan elemanları, üçgen

elemanların kenar uzunluklarının (x) çevrelerine (c) oranları hesaplanarak bulunur. Köşegen elamanları ise aynı satırdaki köşegen olmayan elemanların toplamının negatifi alınarak bulunur. Öneriyi daha açık bir şekilde anlatmak için Şekil 3.2'de verilen II numaralı üçgen eleman ele alınmıştır. Üçgen-II, sınırda olmadığı için diğer üç tane üçgen elemanın (I, III ve IV ile numaralandırılan) her biri ile kenar komşusudur ve birbirleri ile ilişkilidir. Üçgen-II ile diğer üç üçgen arasındaki ilişkiler, **C** dizeyinin ikinci satırında formüle edilir ve her bir elemanla ilişkisi ilgili sütuna atanır. Örneğin, üçgen-II'nin üçgen I ile ilişkisi, x_7'nin c_{II}'ye oranıdır ve C dizeyinde ikinci satır birinci sütuna yerleştirilir. Üçgen-II'nin diğer üçgen elemanlarla ilişkisi de benzer şekilde hesaplanarak ikinci satırın ilgili sütunlarına yerleştirilir. Üçgen-II'nin kendisi ile ilişkisi de diğer üçgen parametrelerle ilişkilerin toplamıdır ve **C** dizeyinin ikinci köşegen elemana yerleştirilir.



Şekil 3.2 Yuvarlatma dizeyi yapısını açıklamak için tasarlanan, dört üçgen eleman ve altı düğüm noktasından oluşan düzensiz SE ağı

$$\mathbf{C}=\begin{bmatrix} \frac{x_7}{c_I} & -\frac{x_7}{c_I} & 0 & 0 \\ -\frac{x_7}{c_{II}} & \left[\frac{x_6}{c_{II}}+\frac{x_7}{c_{II}}+\frac{x_4}{c_{II}}\right] & -\frac{x_6}{c_{II}} & -\frac{x_4}{c_{II}} \\ 0 & -\frac{x_6}{c_{III}} & \frac{x_6}{c_{III}} & 0 \\ 0 & -\frac{x_4}{c_{IV}} & 0 & \frac{x_4}{c_{IV}} \end{bmatrix}_{4x4} \tag{3.11}$$

Eşitlik 3.11'de x, kenar uzunluklarını, c ise üçgen elemanın çevresini ifade eden bir değişkenlerdir. Bu değerler Şekil 3.2 dikkate alınarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$c_I = x_1 + x_5 + x_7 \ , \ c_{II} = x_4 + x_6 + x_7 \ , \ c_{III} = x_2 + x_3 + x_6 \ , \ c_{IV} = x_4 + x_8 + x_9 \tag{3.12}$$

3.1.3 Kısmi türevler dizeyinin hesaplanması

DAÖ ve RMT/MT yöntemde kısmi türevler dizeyinin (KTD) hesaplanması, ters çözümün en çok zaman alan kısmıdır. MT yöntemde kısmi türevler dizeyinin hesaplanması üzerine birçok çalışma yapılmıştır. KTD elde edilmesi için kullanılan iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar duyarlılık denklemi "sensitivity equation" (Jupp ve Vozoff 1977, McGillivray vd. 1994) ve birleştirilmiş denklem "adjoint equation" (Tripp vd. 1984, Sasaki 1989, Oldenburg 1990, Mackie ve Madden 1993, deLugao ve Wannamaker 1996, deLugao vd. 1997, Rodi ve Mackie 2001) yaklaşımlarıdır. Duyarlılık denklemi yaklaşımı, E ve EM yöntemlerin eksik tanımlılığı nedeni ile kullanışlı değildir. Birleştirilmiş denklem yaklaşımda veri sayısı kadar birleştirilmiş denklem çözümü aranır ve genellikle karşıtlılık (reciprocity) yaklaşımından yararlanılır. Bu tezde karşıtlılık ile birleştirilmiş denklem yaklaşımı kullanılmıştır. KTD hesabını açıklamak için, düz çözümde kullanılan 2.12 doğrusal eşitliğinin iletkenliğe görevi türevi alınır ve izleyen şekilde denklemin sağ tarafı sıfır olur.

$$\mathbf{K}\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \sigma}+\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \sigma}\mathbf{v}=0 \tag{3.13}$$

Kısmi türevler dizeyinin hesaplanması için **v**'nin türevini içeren kısım yalnız bırakılırsa:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \sigma} = \mathbf{K}^{-1} \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \sigma} \mathbf{v} \tag{3.14}$$

eşitliği elde edilir. Burada A dizeyinin tersi ($\mathbf{K^{-1}}$) ve v, düz çözüm kısmında zaten hesaplandığı için bilinen değerdir. $\partial \mathbf{K}/\partial \sigma$ terimi ise aşağıdaki helmholtz denklemlerinin bir eleman için sonlu elamanlar çözümünden (Eşitlik 2.8-9) kolaylıkla bulunabilir. Burada v değerinin TE- modu için E_y (eğer yer elektrik doğrultusu y-yönünde ise), TM- modu için Hy olduğuna dikkat çekilirse, buradan sonra düz çözüm bölümünde Ey ve Hy alan değerlerinden dik alanların hesaplanmasına benzer şekilde, türevleri de hesaplanabilir:

$$\frac{\partial Hx}{\partial \sigma} = \frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial Ey}{\partial \sigma} \tag{3.15}$$

$$\frac{\partial Hz}{\partial \sigma} = \frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial Ey}{\partial \sigma} \tag{3.16}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial \sigma} = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial H_y}{\partial \sigma} - \sigma Ex \tag{3.17}$$

Burada TE- ve TM-modu için (yer elektrik doğrultusu y- yönünde), empedans değerleri $Z_{TE}=E_y/H_x$, $Z_{TM}=E_x/H_y$ ve Tipper T= H_z/H_x ise, Empedansın parametreye göre türevleri;

$$\frac{\partial Z_{TE}}{\partial \sigma} = \frac{\dfrac{\partial Ey}{\partial \sigma} - Z_{TE} \dfrac{\partial Hx}{\partial \sigma}}{H_x} \tag{3.18}$$

$$\frac{\partial Z_{TM}}{\partial \sigma} = \frac{\frac{\partial E_x}{\partial \sigma} - Z_{TM}\frac{\partial H_y}{\partial \sigma}}{H_y} \tag{3.19}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \sigma} = -\sigma^2 \left[\frac{\frac{\partial H_z}{\partial \sigma} - T\frac{\partial H_x}{\partial \sigma}}{H_x} \right] \tag{3.20}$$

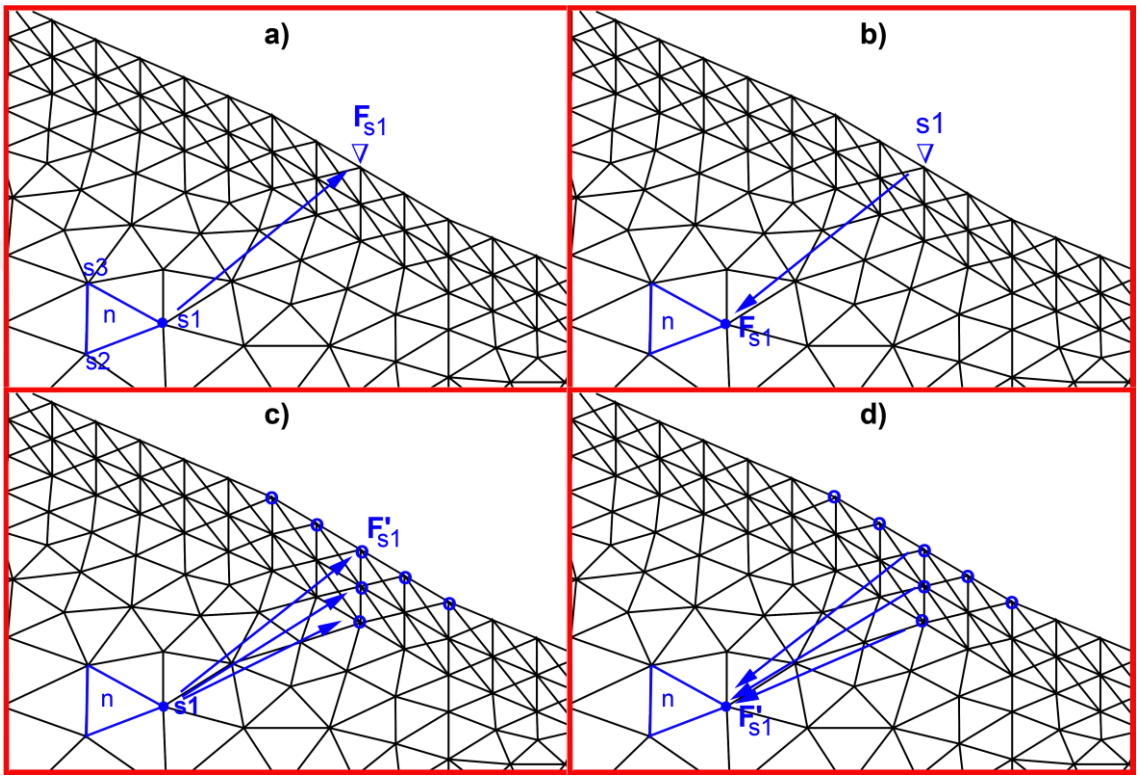
elde edilir. Buradan görünür özdirenç ve faza göre türevler de izleyen şekilde bulunur.

$$\frac{\partial \rho_a^{TE,TM}}{\partial \sigma} = \frac{2\sigma^2}{\omega\mu}\left(\frac{\partial Z_{TE,TM}}{\partial \sigma} Z^*_{TE,TM} + \frac{\partial Z^*_{TE,TM}}{\partial \sigma} Z_{TE,TM} \right) \tag{3.21}$$

$$\frac{\partial \phi^{TE,TM}}{\partial \sigma} = \frac{180\sigma^2}{\pi}\left(\frac{\mathrm{Im}\left(\frac{\partial Z_{TE,TM}}{\partial \sigma}\right) - \mathrm{Re}\left(\frac{\partial Z_{TE,TM}}{\partial \sigma}\right) * \frac{\mathrm{Im}\left(Z_{TE,TM}\right)}{\mathrm{Re}\left(Z_{TE,TM}\right)}}{\left(1 + \left(\frac{\mathrm{Im}\left(Z_{TE,TM}\right)}{\mathrm{Re}\left(Z_{TE,TM}\right)}\right)^2\right) \Big/ \mathrm{Re}\left(Z_{TE,TM}\right)} \right) \tag{3.22}$$

Eşitliklerde görüldüğü gibi, başlangıçta hesaplanan $\partial \mathbf{v}/\partial\sigma$ türev değerinden (TE-modu için $\partial Ey/\partial\sigma$, TM- modu için $\partial Hy/\partial\sigma$) görünür özdirenç ve fazın iletkenliğe göre türevi kolaylıkla hesaplanabilir. Burada en zor hesaplanan büyüklük GDD'de bulunan alan değerlerine göre türevin bulunmasıdır. Bu amaç için yapılması gereken her parametreye göre türevin eşitlik 3.14'de verildiği gibi her parametreye göre türevin bulunmasıdır. Fakat yukarıda da bahsedildiği gibi her parametre için GDD oluşturmak algoritma hızını yavaşlatmaktadır. Bunun için Karşıtlık ilkesine göre hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Karşıtlık ilkesi tanımına göre kaynak ile alıcı yerleri değiştirildiğinde aynı büyüklük değerleri ölçülür (Şekil 3.3). Öyleyse istenen parametre için kısmi türevlerin çözümü, istenen noktadan uygulanacak birim kaynak için

parametrenin düğüm noktalarında oluşacak elektrik veya manyetik alanların ağırlıklı toplamına eşit olacaktır (Sasaki 1989). Bu ağırlıklar eşitlik 2.12'in sağ tarafındaki eşitliği işaret etmektedir. Yani KTD boyutu veri sayısı(N) x parametre sayısı(M) boyutunda ise, M kere GDD çözümü yapmak yerine istasyon sayısı kadar çözüm yaparak KTD hesaplanabilir.



Şekil 3.3 Karşıtlık ilkesinin gösterimi (DeLugao ve Wannamaker 1996)

a. jeolojik doğrultuya paralel alanların hesabı için orjinal durum, b. karşıtlık ilkesi gereği kaynak ile alıcının yer değiştirmiş hali, c. jeolojik doğrultuya dik alanların hesabında kullanılan düğüm noktaları ve d. karşıtlık ilkesi gereği parabol katsayıları kullanılarak elde edilmesi

DAÖ yönteminde, kısmi türevler dizeyi hesabı için farklı yöntemler kullanılmaktadır (Spitzer 1998). Bunlardan en çok kullanılanı karşıtlık ilkesine dayanan kısmi türevler düz çözümüdür (Tripp vd. 1984, Sasaki 1989, Spitzer 1998). DAÖ yönteminde KTD hesabını açıklamak için, düz çözümde kullanılan 2.12 doğrusal eşitliğinin iletkenliğe görevi türevi alınırsa MT/RMT yöntemdekine aynı sonucu elde ederiz ve $\partial \mathbf{v}/\partial \sigma$ türev değeri elde edilir. Fakat DAÖ yönteminde v dizeyi düğüm noktalarında bulunan gerilim farkıdır ve MT'de bulunan elektrik ve manyetik alanlara göre elde edilen türevler

yerine, gerilim farklarına göre türev değeri bulunur ($\partial\phi/\partial\sigma$). DAÖ yönteminde de karşıtlık ilkesi ile türev değerleri hesaplanmıştır. Gerilim değerine göre türevlerden görünür özdirence göre türev değerleri istenilen dizilim için kaynak konumlarına göre, düz çözümde gerilim değerlerinden görünür özdirenç değerleri elde edildiği gibi, öncelikle ters Fourier kosinüs dönüşümü alınarak (x, y, z) uzayına dönüşüm yapılır. Daha sonra buradan varsayılan elektrot dizilimi için ters çözümde de KTD elemanları hesaplanır.

3.1.4 Veri ağırlık dizeyinin hesaplanması

Verideki gürültülerin farklılığı nedeniyle, verinin ters çözüme etkisini dengelemek için veri ağırlık dizeyi kullanılmalıdır. Veri ağırlık dizeyi veriyi normalize ederek ters çözüm ayrımlılığını artırmaktadır. Veri hatalarının birbirinden bağımsız olduğu varsayılarak, ölçülen verinin hata tahminlerinin tersi, $\mathbf{W_d}$'nin köşegen değerleri olarak alınabilir (Sasaki 1989, Candansayar 2002). Veri ağırlık dizeyinin varsayımı jeofizik problemin türüne göre değişmektedir. Bu konuda birçok varsayım yapılmıştır. ξ_i, ölçü hatası (observation error), $d_i^{ö}$, ölçülen veri olmak üzere; $\left(1+d_i^{ö}/\xi_i\right)$, $\left(1/\log\left(\xi_i\right)\right)$, $\left(1/\log\left(\xi_i\right)^2\right)\left(1/\xi_i\right)$, $\left(1/\xi_i^2\right)$ gibi tanımlar, $\mathbf{W_d}$ olarak kullanılmıştır (Candansayar 2002). Örneğin Candansayar (2002) dördüncü tanımlamayı kullanmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen ayrık ve birleşik ters çözüm algoritmalarında farklı ağırlık dizeyleri kullanılmıştır. Ayrık ters çözümlerde dördüncü tanımlama kullanılmıştır. DAÖ ve RMT yöntemde ölçü hataları olarak ölçülen verinin % 2.5'i alınmıştır. Böylece ayrık ters çözümlerde kullanılan ağırlık dizeyi olarak aşağıdaki tanımlama kullanılmıştır:

$$\mathbf{W_d} = diag\left(\frac{1}{0.025d^{ö}}\right) \tag{3.23}$$

Birleşik ters çözüm algoritmasında, DAÖ ve RMT veri sayısaları birbirinden farklı olduğu durumda eşitlik 3.23'de verilen tanımlama, veri sayısı fazla olan yöntemin ayrık

ters çözümüne daha yakın olacaktır. Bu yüzden ağırlık dizeyinin veri sayısına göre de normalize edilmesi gereklidir (Demirci vd. 2017). Demirci vd. (2017), bu sorunun önüne geçebilmek için aşağıda verilen ağırlık dizeyi yaklaşımını önermişlerdir:

$$\mathbf{W}_{\mathbf{d}(DAÖ,\,RMT)} = \frac{\max(N_{DAÖ}, N_{RMT})}{N_{DAÖ,RMT}}\, diag\left(\frac{1}{0.025 d^{ö}_{DAÖ,RMT}}\right) \tag{3.24}$$

burada N, veri sayılarını, x ise yöntemi temsil etmektedir. Bu çalışmada birleşik ters çözümde kullanılanılan ağırlık dizeyi tanımlaması da eşitlik 3.24'de verilen gibidir.

RMT verisinin ayrık ters çözümünde ve birleşik ters çözümde ağırlık dizeyi hesaplanmasında bir diğer sorun ise Tipper verisinin ağırlık dizeyine katkısının hesaplanmasıdır. RMT TE- ve TM- modu görünür özdirenç, faz ve DAÖ görünür özdirenç verileri genellikle logaritma 10 tabanına göre "0" ile "5" arasında değişen bir aralıktadır. Fakat Tipper verisi karmaşık bir sayının reel ve sanal kısmını içermektedir. Bu yüzden sıfıra yakın ondalık bir sayıdır ve eşitlik 3.23-24'de ondalık sayı olduğunda ağırlık dizeyinin elemanları çok yüksek değerler alabilmektedir. Ağırlık dizeyinin çok yüksek değerler alması, ters çözümde diğer veri gruplarının etkisini azaltmaktadır. Bu etkinin azalmaması için tipper verisinin ağırlığı hesaplanırken veri değeri logaritma 10 tabanına göre "0" ile "5" değerleri arasına gelecek şekilde sabit bir sayı ile çarpılması ve normalize edilmesi gerekmektedir.

3.2 Logaritmik Uzayda Ters Çözüm

MT ve DAÖ verilerinin ters çözümünde GÖ, çok geniş aralıklarda değişmektedir. MT yöntemde faz ve Tipper'e göre kısmi türevler GÖ'e göre çok küçük olabilmektedir. Bu yüzden bu çalışmada problemin çözümü logaritmik uzayda aranmaktadır. Görünür özdirenç ve faza göre türevler aşağıdaki gibi alınmaktadır:

$$\frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \sigma} = \frac{\sigma}{\rho_a}\frac{\partial \rho_a}{\partial \sigma} \tag{3.25}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \log \sigma} = \sigma \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \tag{3.26}$$

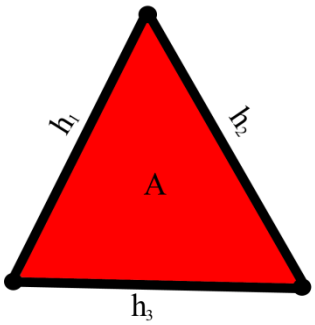
Burada ters çözüm sonucunda amaç dizeyi çözümünde elde edilen parametre de logaritmik ortamda yer altının iletkenliğidir. Bu yüzden ters çözüm sonucunda elde edilen iletkenlik değeri $\exp(\log \sigma)$ şeklinde logaritma dışarısına çıkarılır ve yer altında varsayılan elemana göre parametrelerin iletkenlik değerleri elde edilir.

3.3 Model ayrımlılık Dizeyi ve Üçgen Kalitesi

Çalışmada ters çözüm sonuçlarında parametrelerin ne kadar ayrımlılık kalitesi ile çözüldüğünü göstermek için genellikle kullanılan yöntem model ayrımlılık "model resolution" dizeyinin (**R**) köşegen elemanlarının model kesiti gibi çizdirilmesidir (Newman ve Alumbaugh 2000, Candansayar 2008, Demirci vd. 2012). Böylece ters çözüm sonuçları ile birlikte yorumlanarak daha doğru yorumlar yapılabilir. **R** dizeyi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Menke 1989):

$$\mathbf{R} = (\mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{W}_{\mathbf{d}}^{\mathbf{T}}\mathbf{W}_{\mathbf{d}}\mathbf{A} + \alpha\mathbf{C}^{\mathbf{T}}\mathbf{C})^{-1}\mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{W}_{\mathbf{d}}^{\mathbf{T}}\mathbf{W}_{\mathbf{d}}\mathbf{A} \tag{3.27}$$

Model ayrımlılık dizeyi modelin hangi kısımlarının hassas olarak çözüldüğünü göstermektedir. Veri kalitesi ve frekans gibi etkenler model ayrımlılığını etkileyen etken olduğu gibi model ağının geometrisi de çok önemli bir etkendir. Özellikle düzenli ve düzensiz ağ kullanan algoritmalarda verilerin ters çözümü ile bulunan modeller arasındaki farkı açıklamak için model ağını oluşturulan üçgen kalitelerinin önemli bir etken olduğu düşünülmektedir. Üçgen kalitesi (Triangle Quality) üçgenin eşkenara yakınlığını ifade etmektedir. Şekil 3.4'de üçgen kalitesinin hesabını göstermek için doğrusal bir üçgen elaman verilmiştir. Burada A, üçgen alanını, h değerleri ise üçgenin kenar uzunluklarını ifade eder. Şekil 3.4'de gösterilen bir doğrusal üçgenin kalitesi eşitlik 3.28'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Bank 1990). Eşitlikte, Üçgen kalitesinin (q) '0.6' değerinden büyük olması, kalitenin kabul edilebilir olması anlamına gelmektedir.



Şekil 3.4 Üçgen kalite hesabını açıklamak için temsili bir üçgen

$$q=\frac{4A\sqrt{3}}{h_1^2+h_2^2+h_3^2} \tag{3.28}$$

3.4 RMT ve DAÖ Verilerinin Birleşik Ters Çözümü

Önceki bölümde MT/RMT ve DAÖ yöntemde KTD'nin bulunması anlatılmıştır. Birleşik ters çözümde, kısmi türevler dizeyi (**A**) ve DAÖ ve RMT verileri için **Δd** yöneyi aşağıdaki gibi alınmıştır (Candansayar ve Tezkan 2008):

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}\mathbf{W}_{DAÖ}\mathbf{A}_{DAÖ}\\ \mathbf{W}_{RMT}\mathbf{A}_{RMT}\end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \mathbf{\Delta d}=\begin{bmatrix}\mathbf{\Delta d}_{DAÖ}\\ \mathbf{\Delta d}_{RMT}\end{bmatrix} \tag{3.29}$$

burada, $\mathbf{A}_{DAÖ}$, $\mathbf{W}_{DAÖ}$ ve $\mathbf{\Delta d}_{DAÖ}$ DAÖ verileri için ve $\mathbf{A}_{RMT}$, $\mathbf{W}_{RMT}$ ve $\mathbf{\Delta d}_{RMT}$ ise RMT verileri için önceki bölümde anlatılan kısmi türevler, ağırlık ve veri farkları dizeyleridir. Birleşik ters çözümde, her iki yöntem için elde edilen bu dizeylerin birleştirilmesi ile tanımlanan ortak parametrik uzayda üçgen parametrelerin iletkenlik değerleri elde edilir. Birleşik ters çözümde parametre düzeltme vektörü her yinelemede eşitlik 3.7'de verildiği gibi çözülmektedir. Şekil 3.5'de birleşik ters çözüm algoritmasının akış şeması verilmiştir.

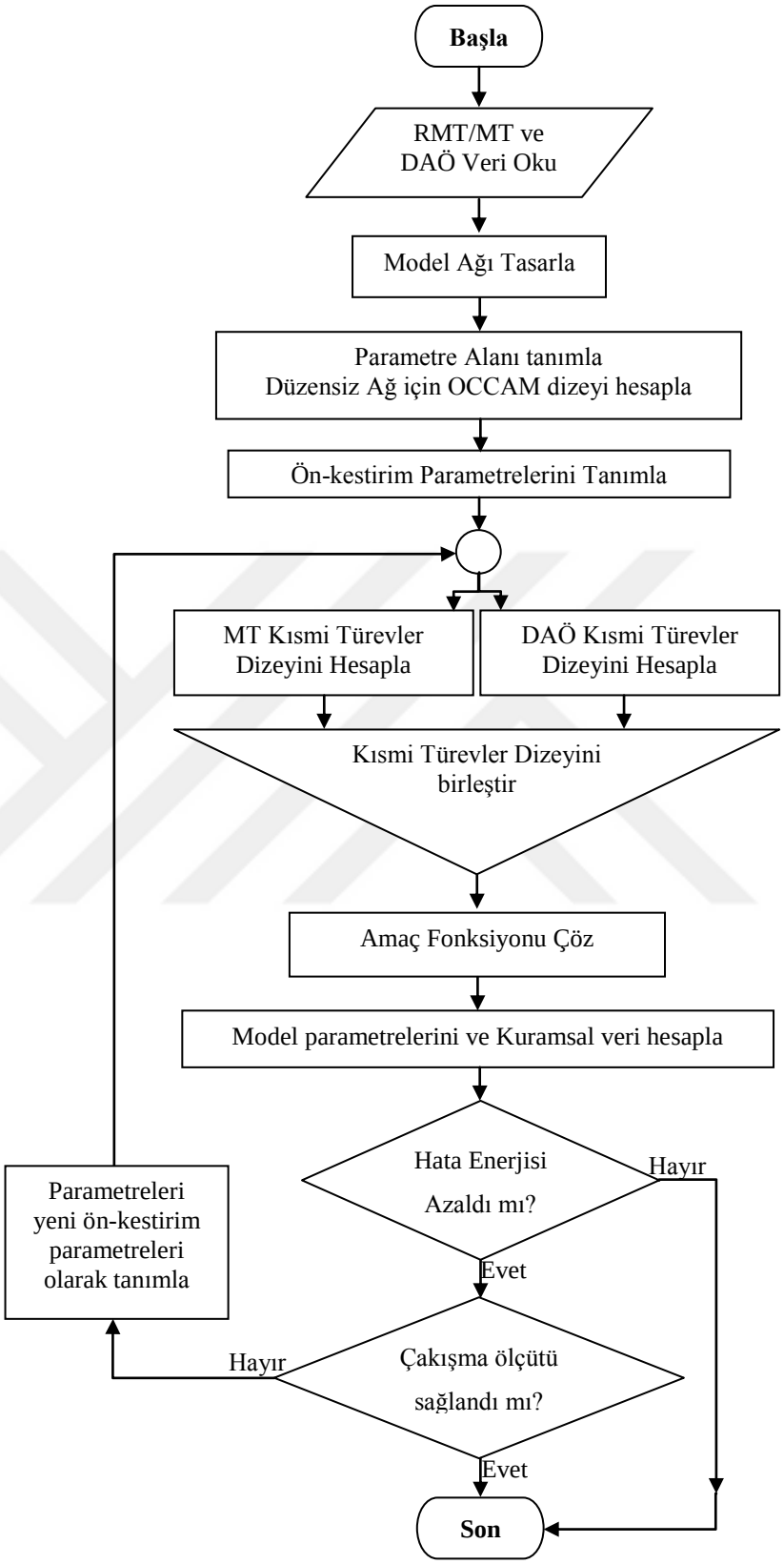
Akış şemasına göre birleşik ters çözümün ilk aşaması verilerin okunmasıdır. Akış şemasında verilen model ağı oluşturulması ve parametreleştirilmesi, otomatik olarak istasyon, elektrot konumlarına 2-B ters çözüm için belirlenen doğrultu uzunluğuna

bağlıdır ve EK 3.b'de anlatılmıştır. KTD ve yuvarlatma dizeyi hesapları ayrık ters çözümle aynıdır. Çakışma ölçütü ise ölçülen ve kuramsal veri arasındaki ortalama karekök hatadır "Root Mean Square"(RMS). Her yinelemede eşitlik 3.8'de verilen RMS hesaplanır. Ayrık ters çözüme benzer şekilde algoritma RMS % 1'den küçük olduğu durumda durmaktadır.

Bu çalışmada verilen yapay ve gerçek uygulamalarda ters çözüm sonucu elde edilen verilerin sunumu Misfit kesitleri şeklinde yapılmaktadır. Misfit kesitlerinde ters çözümde ölçülen ve kuramsal veri arasındaki fark her veri değeri için aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$\text{misfit}_i = \%100 \frac{\left(d_i^{ö} - d_i^{k}\right)}{d_i^{ö}},\ i = 1, 2, ..., N \qquad (3.30)$$

burada $d_i^{ö}$, ölçülen veri ve d_i^{k} ise kuramsal veriyi ifade etmektedir.



Şekil 3.5 Birleşik ters çözüm akış şeması.

4. YAPAY VE GERÇEK VERİ UYGULAMALARI

Algoritmanın avantaj ve dezavantajlarını göstermek amacıyla, geliştirilen yeni algoritma ve daha önceden düzenli ağ kullanılarak geliştirilmiş olan birleşik ters çözüm algoritması yapay veriler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yapay veriler her iki algoritma kullanılarak oluşturulmuştur. Veriler, % 1'in altında Misfit değeri (MisfitM) ile birbirinin aynısı olarak elde edilmiştir. Yapay verileri arasında Misfit değeri hesaplanması Eşitlik 4.1'de sunulmuştur. Her iki algoritmadan elde edilen yapay veriler, yaklaşık olarak birbirinin aynı olması nedeniyle ters çözüm algoritmalarının testinde hangi verinin kullanılacağının bir önemi yoktur. Elde edilen yapay verilere % 5 gaussian gürültü katılmıştır. Yapay veriler, ölçülen veri olarak varsayılıp ters çözüm algoritmaları ile yorumlanmıştır. Bilinen modelin ters çözüm ile tekrar bulunması hedeflenmiştir.

$$\text{MisfitM}=\%100.\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(d_i^{str}-d_i^{unstr})^2}{\sum_{i=1}^{N}(d_i^{str})^2}} \tag{4.1}$$

Algoritmanın testi için dört yapay model kullanılmıştır. Bu modellerden ilk ikisi sırasıyla RMT ve MT verilerinin ayrık ters çözümlerini düzenli ve düzensiz ağ kullanarak karşılaştırma amacı ile kullanılmıştır. RMT ve MT verilerinin ayrık ters çözümlerinin sunulmasının sebebi, Tipper ile ve Tipper eklemeden düzenli ve düzensiz ağ kullanarak ters çözüm sonucu elde edilen modelleri karşılaştırmaktır. Ayrıca birinci yapay model de RMT ve DAÖ birleşik ters çözümü ile ayrık ters çözümler SE, SF'da düzenli ve düzensiz ağ kullanılarak karşılaştırılmıştır. Kalan iki yapay modelde RMT ve DAÖ verilerinin ayrık ve birleşik ters çözümü hem düzenli ağ kullanan hem de düzensiz ağ kullanan algoritmayı karşılaştırmak ve düzensiz ağ kullanan algoritmanın avantaj ve dezavantajlarını göstermek için kullanılmıştır. Bütün modeller gerçek yer altı modelleri ve jeofizik problemler göz önüne alınarak oluşturulmuştur.

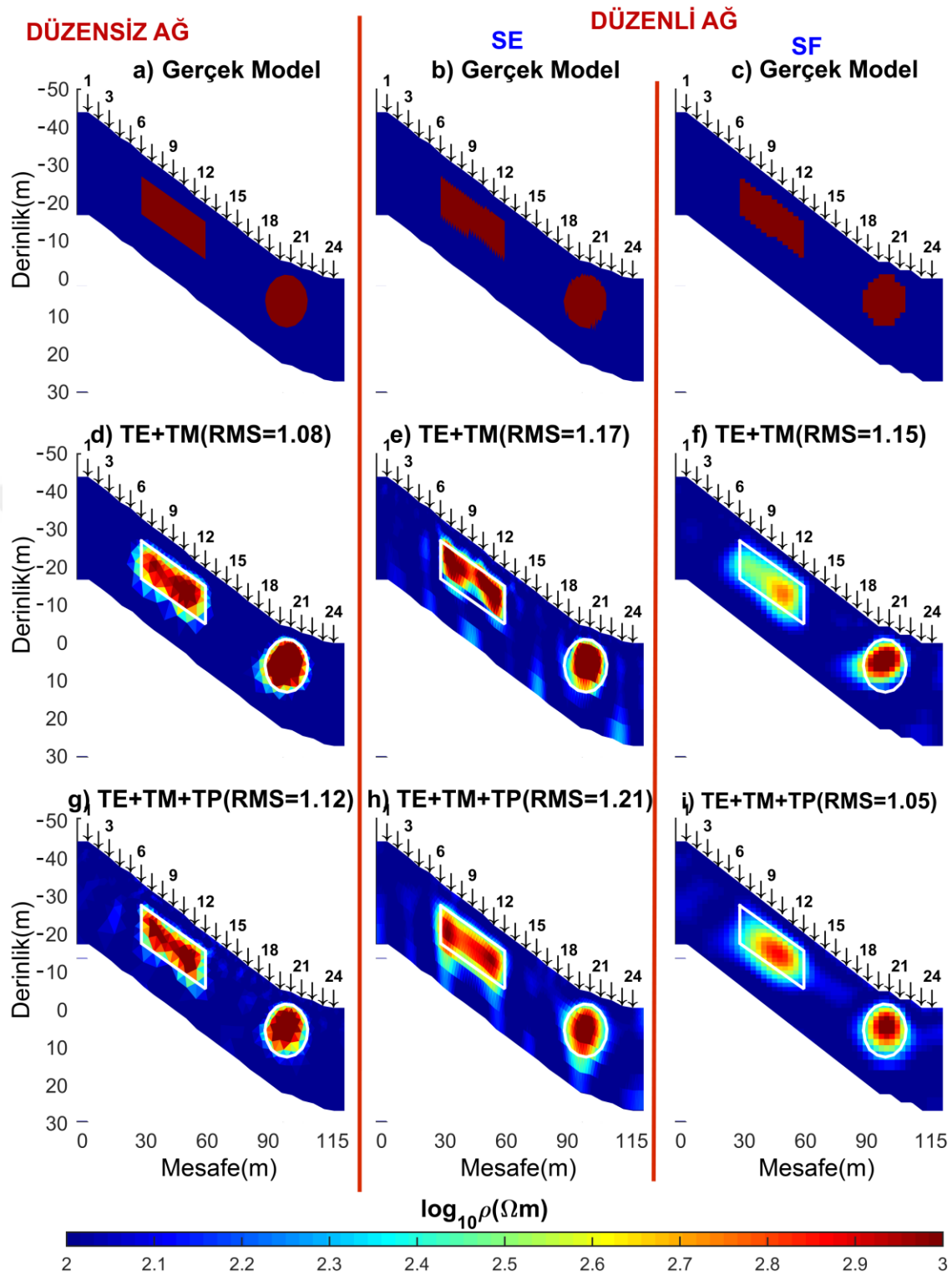
4.1 Yapay Veri-I

İlk model, çoğunlukla Türkiye'nin güneyinde karşılaşılan, yakın yüzey bir karstik boşluk yapısını temsil etmek için oluşturulmuştur. Model, bir kireçtaşı (100 ohm.m özdirencinde) temel ile daire ve paralel kenar şekilli karstik boşluklardan (1000 ohm.m özdirencinde) oluşmaktadır. Yüzey topoğrafyası 32^{o} eğimli tepe şeklindedir. Modelin düz çözümü için 5 m istasyon aralığı ile 24 istasyon varsayılmıştır. Modelin RMT cevabı 10, 30, 100 ve 300 kHz frekansları için, hem düzensiz ağ (Şekil 4.1.a), hem de düzenli ağ (Şekil 4.1.b "SE", Şekil 4.1.c "SF") ile oluşturularak hesaplanmıştır. Düz çözüm sonuçlarını karşılaştırmak için eşitlik 4.1'de verilen Misfit değeri (MisfitM) hesaplanmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda her iki SE cevabı (düzensiz ve düzenli) % 0.13, her iki düzenli algoritma (SE ve SF) % 0.95 ve düzenli (SF) ve düzensiz algoritma % 0.82 Misfit değerleri ile birbirine çakışmaktadır. Bütün düz çözüm sonuçları % 1 Misfit değerinden az olarak birbirinin aynısıdır. Bu yüzden ters çözümde hangi çözümün kullanılacağı ters çözüm sonucu etkilememektedir. Daha adil bir karşılaştırma yapabilmek için parametre alanında, düzenli ve düzenli ağda SE yöntemi kullanılarak yapılan ters çözümlerde her üçgen bir parametre, düzenli ağda SF yöntemi kullanılarak yapılan ters çözümde ise her dikdörtgen eleman bir parametre olarak varsayılmıştır. Başlangıç modeli bütün ters çözümlerde homojen 140 ohm.m (yapay görünür özdirenç değerlerinin aritmetik ortalaması) olarak seçilmiştir.

Yapay veri I, RMT ters çözümü sonuçları Şekil 4.1'de sunulmuştur. Burada öncelikle TE- ve TM- modu görünür özdirenç ve faz verileri kullanılarak ters çözüm yapılmıştır. Daha sonra ise TE-, TM- modu görünür özdirenç ve faz verisi ve Tipper verisi kullanılarak yapılmıştır. Bütün sonuçlar karşılaştırılmıştır. TE+TM verisi kullanılarak yapılan ters çözüm sonuçları, şŞekil 4.1.d'de düzensiz SE ağı için, Şekil 4.1.e'de düzenli SE ağı için ve Şekil 4.1.f 'de düzenli SF ağı için verilmiştir. Benzer şekilde TE+TM+TP verisi kullanılarak yapılan ters çözüm sonuçları ise sırası ile Şekil 4.1.g-i'de verilmiştir. Ters çözüm sonuçları karşılaştırıldığında TP verisi eklenerek yapılan bütün ters çözüm sonuçlarında, sadece TE+TM modu kullanılarak yapılan ters çözüm sonuçlarına göre gerçek değere daha yakın modeller bulunmuştur. Çünkü yapıların yanal sınırları TP verisi ters çözüm işlemine katılırsa daha iyi çözülmektedir

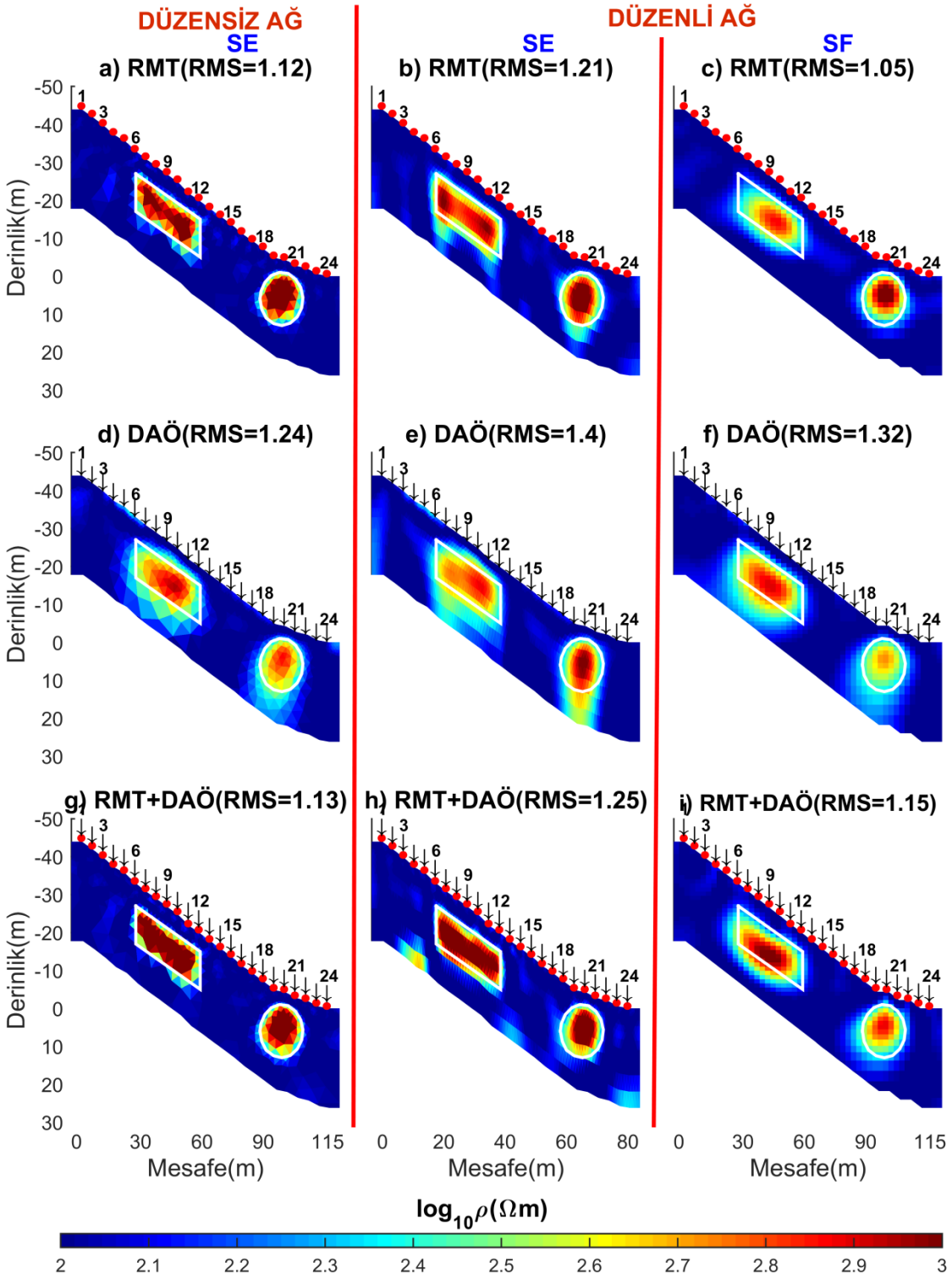
(Berdichevsky vd. 1998, Siripunvaraporn ve Egbert 2000). Şekil 4.1.g-i'de daire ve paralelkenar şekilli yapıların daha iyi çözüldüğü açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.1.a, b'de yüzey topoğrafyası düzenli ve düzensiz SE ağında daha iyi temsil edilebilmektedir. Paralelkenar şekilli yapının sınırları düzenli SF ağında basamaklı şekilde temsil edilebilmektedir (Şekil 4.1.c). Üstelik daire şeklindeki yapı sınırları düzensiz ağda (Şekil 4.1.a) tam olarak temsil edilebilirken, düzenli SE ve SF ağında (Şekil 4.1.b, c) tam olarak temsil edilememektedir. Benzer şekilde ters çözüm sonuçlarında da yapıların temsil edilememesi dikkat çekmektedir. Düzensiz ağ kullanılarak elde edilen modellerde (Şekil 4.1.d, g) daire ve paralelkenar şeklindeki yapıların gerçek değere daha yakın olduğu görülmektedir.

DAÖ verisinin elde edilmesi için 5 m elektrot aralığı ile 24 elektrot (Aşağı yönlü oklar) varsayılmıştır. DAÖ verisi, a=5 ve 10 m dipol aralıklı, 8 er seviye dipol-dipol (ABMN) dizilimi için elde edilmiştir. Verilerden düzenli SF algoritmasından elde edilenler yapay veri I, DAÖ verisi olarak kullanılmıştır. Şekil 4.2.a-c'de verilen modeller, sırasıyla Şekil 4.1.g-i'de verilen her üç algoritmada RMT TE+TM+TP verisi ters çözüm sonucudur. Şekillere burada da yer verilmesinin sebebi ayrık ve birleşik ters çözüm sonuçlarını karşılaştırmaktır. DAÖ verisi kullanılarak yapılan ters çözüm sonuçları Şekil 4.2.d'de düzensiz SE ağı için, Şekil 4.2.e'de düzenli SE ağı için ve Şekil 4.2.f'de düzenli SF ağı için verilmiştir. Benzer şekilde birleşik ters çözüm sonuçları ise sırası ile Şekil 4.2.g-i'de verilmiştir. Üç algoritma sonıçları karşılaştırıldığında, ayrık ve birleşik ters çözüm sonuçlarında SE yönteminde (düzenli veya düzensiz), SF yöntemine göre gerçek modele daha yakın sonuçlar bulunmuştur. Birleşik ters çözüm sonucunda bütün algoritmalarda ayrık ters çözümlere göre gerçek modele yakın sonuçlar bulunmuştur. En iyi sonucun düzensiz ağ kullanılarak yapılan ters çözüm olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 4.1 Yapay veri I'i elde etmek için farklı ağlar kullanılarak tasarlanan Model I ve yapay veri I, RMT verisi ters çözüm sonucu elde edilen modeller

a. Düzensiz ağ kullanarak SE yöntemiyle, düzenli ağ kullanarak b. SE, c. SF yöntemiyle düz çözüm yapılan Model I, Aynı sıra ile yapay veri I, d. e. f. TE+TM modu ve g. h. i. TE+TM+TP verilerin ters çözümü sonuçları



Şekil 4.2 Yapay veri I, RMT ve DAÖ verisi ayrık ve bileşik ters çözüm sonuçları

a. Düzensiz SE, düzenli b. SE ağı, c. SF ağı kullanılarak yapılan RMT verisi ters çözüm sonuçları. Aynı sıra ile d. e. f. DAÖ verisi ayrık ters çözüm sonuçları, g. h. i. birleşik ters çözüm sonuçları (Aşağı yönlü oklar DAÖ elektrotlarını, kırmızı noktalar RMT istasyonlarını göstermektedir)

Çizelge 4.1'de ters çözüm sonucu bulunan modellerdeki yer altı yapıların özdirençleri gerçek değerleri ile nicel olarak karşılaştırılmıştır. Yapıların özdirençleri hesaplanırken, ters çözüm sonucu bulunan modellerde yapıların gerçek sınırları içinde kalan parametrelerin özdirençlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Daire şeklindeki yapının gerçek özdirenç değeri 1000 ohm.m'dir (Şekil 4.1.a). Ancak, bu yapının özdirenci birleşik ters çözüm sonuçlarına bakıldığında, düzensiz ağ ile 996 ohm.m, düzenli SE ağı ile yapılan ters çözüm sonucunda 920 ohm.m ve SF ağı ile yapılan ters çözüm sonucunda 675 ohm.m olarak bulunmuştur (Çizelge 4.1). Çizelge 4.1'de yapılan karşılaştırmalar, düzensiz SE ağı kullanılarak yapılan ters çözüm sonucunun (ayrık ve birleşik ters çözüm sonuçlarında) gerçek değerlere daha yakın olduğunu göstermiştir. Düzensiz ağ kullanılarak yapılan ters çözüm sonuçları ile düzenli ağ kullanılarak yapılan ters çözüm sonuçları karşılaştırıldığında, düzensiz ağ sonuçlarında yapı sınırlarının gerçeğe daha yakın olarak bulunduğu görülmektedir. Ayrıca birleşik ters çözümümün başarısı her üç algoritmada da en iyi çözümü bulunduğu Çizelge 4.1'in son satırlarında görülmektedir.

Çizelge 4.1 Ayrık ve birleşik ters çözümler sonucu elde edilen modellerde bulunan yapıların özdirenci ile gerçek modeldeki (Model I) değerlerinin karşılaştırılması.

Yöntem Mod	**Yapı**	**Gerçek Değer (ohm.m)**	**DÜZENSİZ (SE) (ohm.m)**	**DÜZENLİ (SE) (ohm.m)**	**DÜZENLİ (SF) (ohm.m)**
RMT TE+TM	Paralelkenar	1000	809	881	324
	Daire	1000	995	1676	692
	Temel	10	102	148	105
RMT TE+TM+TP	Paralelkenar	1000	922	686	385
	Daire	1000	965	888	547
	Temel	100	109	125	113
DAÖ	Paralelkenar	1000	530	460	479
	Daire	1000	505	582	390
	Temel	100	200	220	190
RMT+DAÖ	Paralelkenar	1000	996	920	675
	Daire	1000	972	930	507
	Temel	100	103	120	116

Çizelge 4.2'de, Yapay veri I'in elde edilmesi için, farklı ağlar kullanılarak yapılan modelleme işlemlerinde eleman sayıları ve modelleme CPU zamanları

karşılaştırılmıştır. Ayrıca yapay veri I'in farklı ağlar için kullanılarak yapılan ters çözümlerde kullanılan parametre sayıları, CPU zamanları ve yineleme sayıları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1.a-c'de gösterilen modellerde düzensiz ağda kullanılan üçgen sayıları, düzenli ağa göre beş kat daha azdır, bu yüzden düzensiz ağ ile yapılan modelleme ve ters çözümler daha hızlıdır. Ayrıca, üçgen eleman sayılarının az olması sayesinde dizeylerin depolanması için gerekli olan disk kullanımı da azalmaktadır. Düzenli SE ağı kullanılarak yapılan birleşik ters çözümün bir yinelemesinin tamamlanması için gereken CPU zamanı 20.8 sn. ve SF ağı kullanılarak yapılan ters çözümün ki 5.9 sn. iken düzensiz ağ kullanılarak yapılan ters çözüm bir yinelemesi için gerekli CPU zamanı 5.5 sn.'dir. Bu yüzden düzensiz ağ ile yapılan ters çözüm işlemi minimum yinelemede minimum zamanda tamamlanır. Bütün ters çözüm sonuçları % 1.4 RMS hatanın altında elde edilmiştir (Çizelge 4.2).

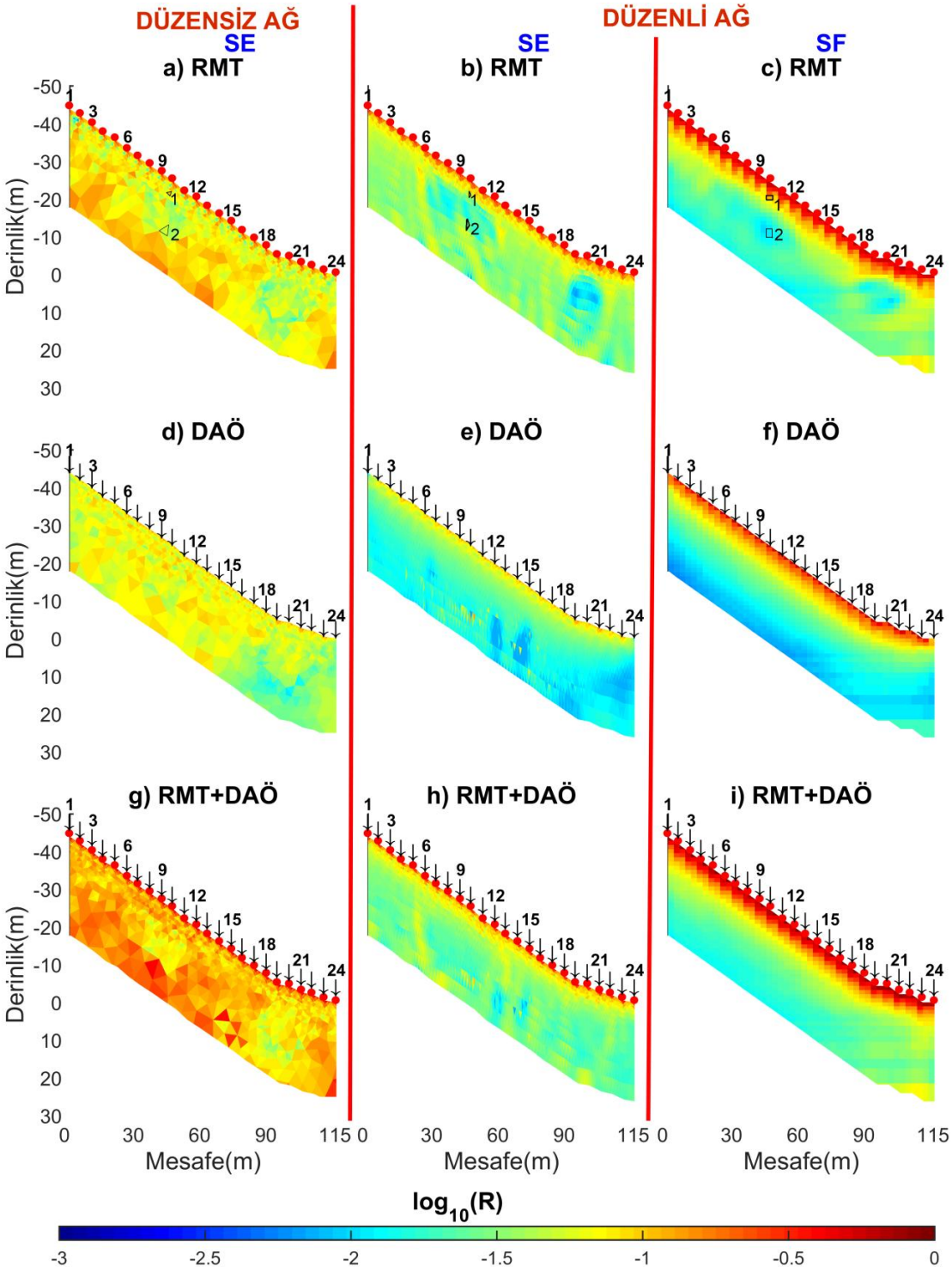
Çizelge 4.2 Yapay veri I için modelleme ve ters çözüm CPU zamanı ve parametreleştirme bilgileri.

	Düzensiz			**Düzenli**					
				SE			**SF**		
Üçgen Sayısı (Tüm Ağ)	3036			15544			24016		
Modelleme CPU zamanı (RMT+DAÖ) (s.)	0.7+1.4			4.5+7.5			0,9+1.5		
Parametre Sayısı	1004 (Üçgen)			4800 (Üçgen)			1612 (Dikdörtgen)		
Ters Çözüm CPU zamanı (s.) (bir yineleme)	**RMT**	**DAÖ**	**RMT +DAÖ**	**RMT**	**DAÖ**	**RMT +DAÖ**	**RMT**	**DAÖ**	**RMT +DAÖ**
	1.9	2.5	5.5	11.6	17.3	20,8	2.3	3.1	5.9
Yineleme Sayısı	12	12	10	18	16	12	16	14	12
RMS (%)	1.12	1.24	1.13	1.21	1.4	1.25	1.05	1.32	1.15

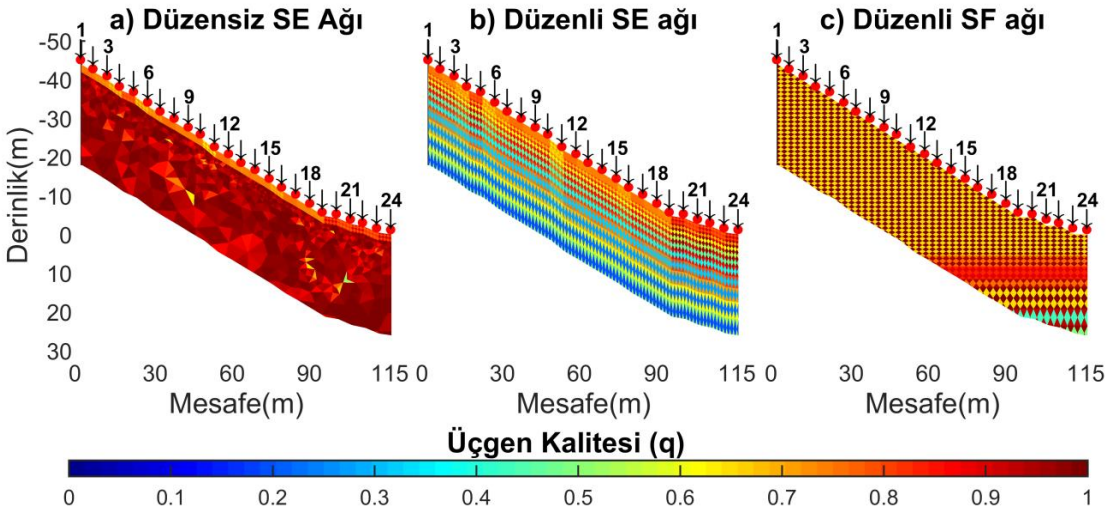
Şekil 4.3'de, Şekil 4.2 a-i'de sunulan modeller için hesaplanan model ayrımlılık dizeyinin köşegen elamanları gösterilmiştir. Model ayrımlılık dizeyinin hesaplanması için ayrık ve birleşik ters çözümlerin son yinelemesinde hesaplanan kısmi türevler dizeyi kullanılmıştır. Model ayrımlılık dizeyinin köşegen elemanları 1'e eşit olduğu ve aynı satırdaki kalan elemanlar sıfıra eşit olduğu zaman, en iyi çözüm elde edilir. Fakat genellikle bu köşegen eleman değerleri MT/RMT verisinin ters çözümünde 1'den küçük

olmaktadır (örneğin, Candansayar ve Tezkan 2008, Demirci vd. 2012). Demirci vd. (2012)'ye benzer şekilde, burada da modeller üzerinde birkaç test yapılmıştır. Testlerde ayrımlılık değerinin logaritmasının ($\log_{10}(R)$) -2'den küçük olduğu durumlarda ilişkili model parametre kötü çözüldüğü (mavi ve koyu mavi renkli), aksi durumda ise iyi çözüldüğü belirlenmiştir (yeşil, sarı ve kırmızı renkli). Örneğin, Şekil 4.2.a-c'de sadece 1 ile numaralandırılan üçgenler veya bloğun özdirencinin % 10 artırılıp, kalan parametrelerin özdirenci değiştirilmediğinde, bütün düz çözüm algoritmalarında modelleme cevabı % 6'dan fazla değiştiği görülür ve bu model parametrelerinin ayrımlılığı da yüksek(kırmızı) olur. 2 ile numaralandırılan üçgenler veya bloğun özdirenci % 10 değiştirilip ve diğer parametrelerin özdirenci sabit bırakıldığında, sırası ile düzensiz ağ kullanan algoritma, düzenli SE ve SF algoritmalarında düz çözüm cevabı, % 6.8, % 1.1 ve % 2.7 değişmektedir. Buna paralel olarak, düzensiz üçgen ayrımlılık değeri yüksek (sarı), diğer algoritmalardaki parametrelerin ayrımlılığı da düşük (mavi koyu mavi) olur. Karşılaştırılan parametrelerin alanı düzensiz ağ, düzenli SE ve SF ağlarında sırası ile $2.7m^2$, $0.9m^2$ ve $1.6m^2$'dir. Buradan çıkarılan sonuç ise model ayrımlılığın derinlerde yüksek olmasının parametrelerinin alanı ile de ilişkili olmasıdır. Bu karşılaştırma ile düzensiz ağda derinlerde neden yüksek ayrımlılık gözlendiği açıklanmaktadır. Şekil 4.3 g-i'de birleşik ters çözümlerde elde edilen model ayrımlılık kesitleri sunulmaktadır. Ayrımlılıkların ayrık ters çözümlere göre yüksek olmasının sebebi, birleşik ters çözümde kullanılan verilerin, yer altında bulunan yapıların bulunması için yeterli bilgiyi kapsamasıdır.

Model ayrımlıklalara paralel olarak, parametreleştirme alnındaki her bir parametrenin çözümü, model ağındaki üçgenlerin kaliteleri de ilişkili olduğu düşünülmüştür. Bu yüzden, Şekil 4.4'de, Şekil 4.2g-i'de bulunan modellerin üçgen kalite kasitleri sunulmaktadır. Burada, düzensiz ağda üçgen kalitelerinin derinler de dahil olmak üzere, parametreleştirilen alanda yüksek olduğu, düzenli ağda (SE ve SF) derinlere doğru üçgen kalitelerinin düştüğü görülmektedir. Şekil 4.2'de gösterilen modellerde, derinlerde düzenli ağ ile ters çözüm sonucunda oluşan istenmeyen etkilerin ve yapıların özdirencindeki sapmaların bir başka sebebi de üçgen kalitelerinin düşmesidir.

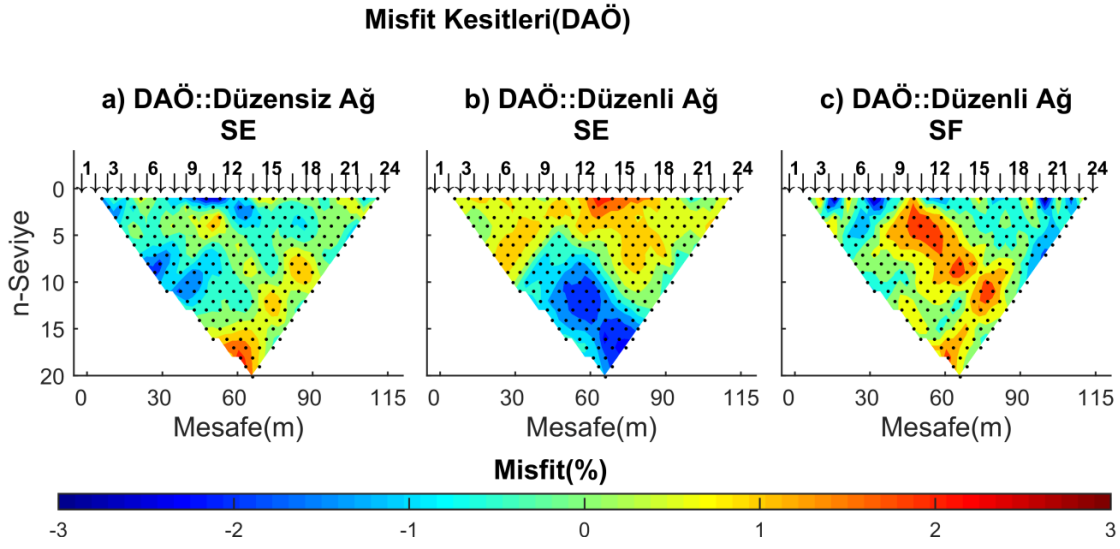


Şekil 4.3 a-i. Şekil 4.2.a-i'de verilen modeller için model ayrımlılık kesitleri

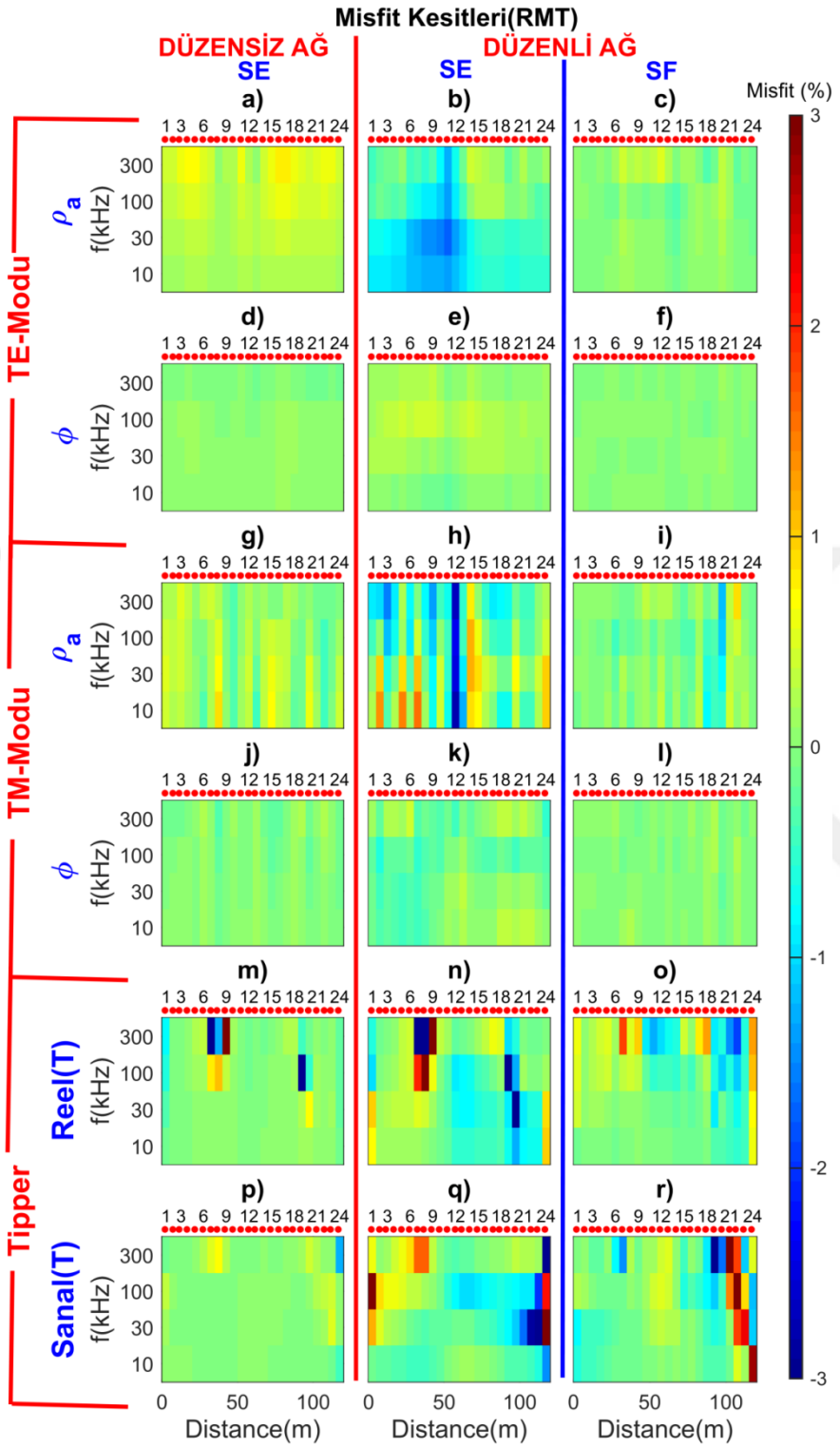


Şekil 4.4 a-c. Şekil 4.2 g-i'de verilen modeller için üçgen kalite kesitleri (aynı sıra ile)

Yapay kuramsal veri arasındaki çakışmayı gösterebilmek için DAÖ ve RMT verilerinin birleşik ters çözümü (Şekil 4.2 g-i) için hesaplanan misfit kesitleri sırası ile Şekil 4.5-6'da sunulmuştur. Misfit kesitindeki değerler eşitlik 3.30 kullanılarak hesaplanmıştır ve Misfit değerleri, bütün algoritmalarda % -3 ve % 3 arasında olduğu görülmektedir. Bu değerler veri çakışmasının kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5 Yapay veri I birleşik ters çözümü sonucu Şekil 4.2.g-i modelleri için, yapay DAÖ ve kuramsal veri arası Misfit kesitleri (verilen sıra ile)



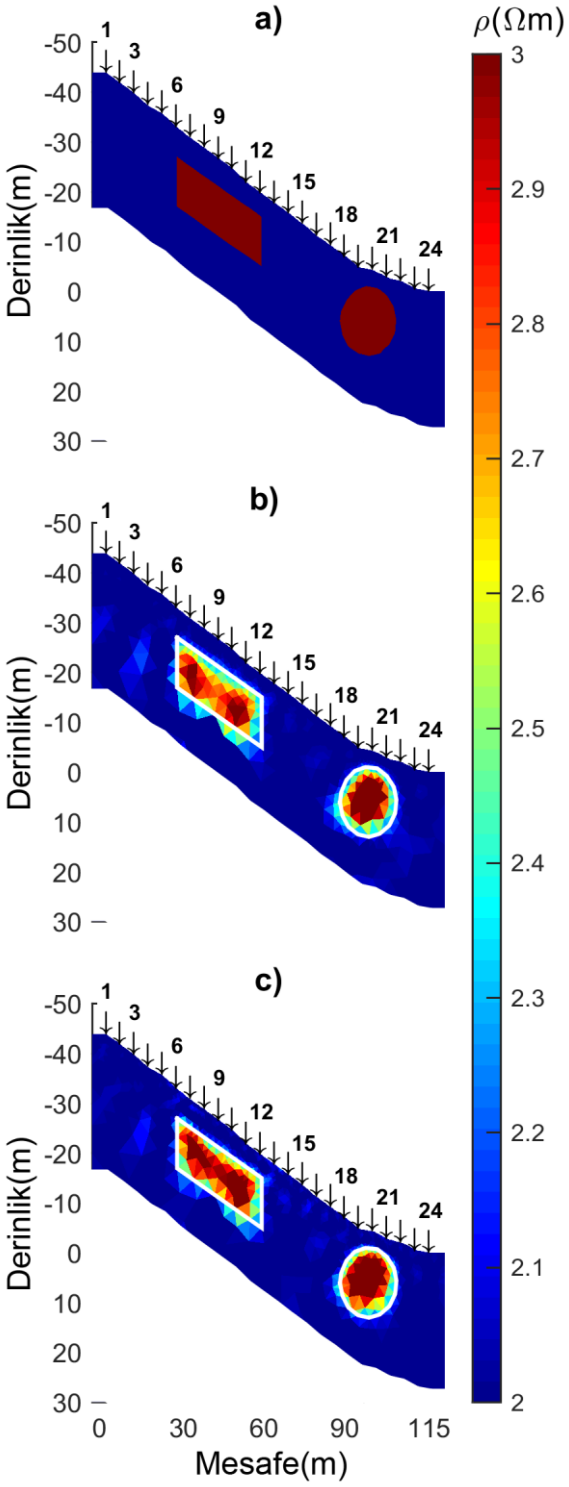
Şekil 4.6 Yapay veri I birleşik ters çözüm sonucu Şekil 4.2.g-i modelleri için, yapay RMT ve kuramsal veriler arası Misfit kesitleri

a. b. c. TE-modu görünür özdirenç, d. e. f. empedans fazı, g. h. i. TM-modu görünür özdirenç, j. k. l. empedans fazı, m. n. o. Tipper gerçel, p. q. r. sanal kısmı (sırası ile Şekil 4.2.g-i modelleri için)

4.2 Yuvarlatma Dizeyi Yaklaşımlarının Karışılaştırılması

Geliştirilen algoritmada düzensiz ağ oluşturulurken, parametre ayrımlılığını artırmak ve parametre sayısını azaltmak için yüzeye yakın üçgenlerin boyutu küçük, derinlerde ve yapay sonsuz sınırlarda daha büyük olarak tasarlanmıştır. Bu yüzden, komşu üçgen parametreler arası ilişki tanımlanırken, komşu oldukları üçgenlerin çevre uzunluğunun hesaba katılması çok önemlidir. Diğer taraftan Lelièvre and Farquharson (2013), model çalışmasında aynı boyutta üçgenler kullandığı için, önerdiği yaklaşımda üçgen parametreler arasındaki ilişki tanımlanırken üçgenlerin ağırlık merkezleri farkı hesaba katılması yeterlidir. Bu durumda üçgenlerin derinlerde ve yapay sonsu sınırlara doğru aşırı büyümesi, ters çözüm algoritmasında parametrelerin çözümünü etkilemektedir.

Şekil 4.7'de yeni yuvarlatma dizeyi ve Lelièvre ve Farquharson (2013)'un yaklaşımı kullanılarak, yapay veri I, RMT verisinin ters çözümünden elde edilen modeller karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda, yuvarlatma dizeyi hesabı için bu çalışma kapsamında önerilen yaklaşımın Lelièvre ve Farquharson (2013)'un yaklaşımına göre gerçek modele daha yakın ve daha doğru sonuç verdiği görülmüştür. Eğer aynı boyutta üçgenler kullanılırsa model ağında her iki yaklaşım için benzer sonuçlar elde edilebilir. Bu çalışmada kullanılan modellerde parametrelerin azaltılması için üçgenlerde büyüme oranı artırılmıştır. Bu yüzden bu çalışmada kullanılan yapay ve gerçek uygulamalarda yuvarlatma dizeyi hesabında yeni yaklaşım kullanılmıştır.

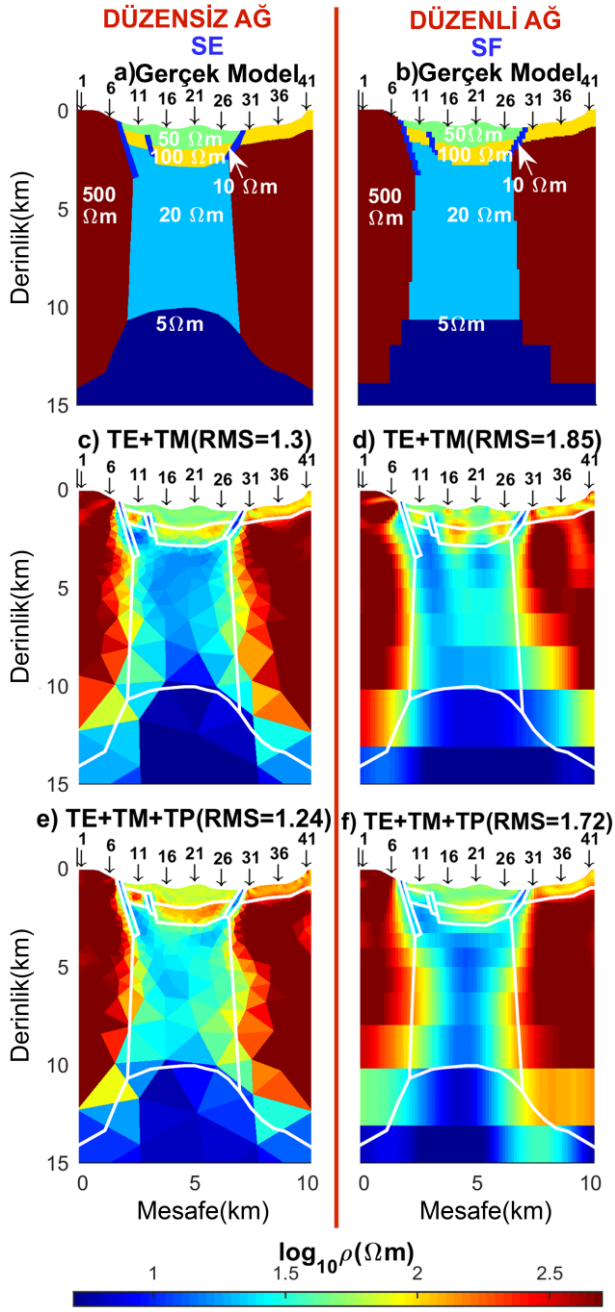


Şekil 4.7 a. Gerçek model, b. Lelièvre and Farquharson (2013)'ün önerdiği ve c. yeni önerilen yuvarlatma dizeyi yaklaşımı kullanılarak, yapay veri I RMT verisinin ters çözümü sonucu elde edilen özdirenç modelleri

4.3 Yapay Veri II

İkinci yapay veri, genellikle Türkiye'nin batı kısımlarında bulunan tipik jeotermal alanı temsil eden modelden MT frekansları kullanılarak düz çözüm yapılarak elde edilmiştir (Şekil 4.8.a, b) (Şimşek vd. 2005). Modelin yüzey topoğrafyası yaklaşık 10^{o} eğimli graben yapısı şeklindedir. Modelde graben kenarları, 500 ohm.m özdirencinde volkanik kayaçları göstermektedir. 100 ohm.m ve 50 ohm.m özdirençleri olan sedimanter birimler, grabenin orta kısımlarını ifade etmek için dizayn edilmiştir. Grabenin oluşmasına neden olan graben ve horst sınırlarını ifade eden fay yüzeyleri ise 10 ohm.m özdirencinde gösterilmiştir. Modelde 20 ohm.m özdirencinde kil tabakası 2.5 km derinlikten başlayarak 10km derinliğe kadar devam etmekte ve yanal olarak graben kenarları ile sınırlandırılmaktadır. 10km derinliğin altında ise 5 ohm.m özdirenç ile temsil edilen alt kabuk gelmektedir. Modeli her iki düzensiz (Şekil 4.8.a) ve düzenli (Şekil 4.8.b) SF algoritması ile modellenerek, MT verileri 41 istasyon ve 300-0.001 Hz frekans aralığında 22 frekans değeri için elde edilmiştir. Her iki algoritma ile elde edilen verilerin % 1.1 Misfit değeri (Eşitlik 4.1) ile birbirinin aynısı olduğu hesaplanmıştır. Ters çözüm çalışmalarında, düzenli ağ kullanılarak yapılan düz çözümden elde edilen veri grubu kullanılmıştır ve başlangıç modeli olarak homojen 200 ohm.m (yapay veri II, görünür özdirenç değerlerinin ortalaması) özdirencinde modeller seçilmiştir.

İlk yapay model çalışmasında düzenli SE ve SF ağı ile düzensiz SE ağları karşılaştırılmıştır. Düzensiz SE ağı kullanarak ters çözüm yapıldığında daha az model parametresi kullanılarak gerçek modele daha yakın sonuçlar üretildiği görülmüştür. Düzenli SF algoritması, düzenli SE ağı kadar doğru sonuçlar ürettiği ve düzenli SE ağına göre daha az CPU zamanında sonuca ulaşabilmektedir. Bu yüzden bu ve bundan sonraki uygulamalarda yeni geliştirilen düzensiz SE ağı kullanan algoritma ile sadece düzenli SF ağı kullanan algoritma karşılaştırılmıştır. Yapay veri II'nin sadece TE + TM verisi kullanılarak her iki algoritma ile ters çözümü sonucu elde edilen modeller, Şekil 4.8.c, d'de ve TE+TM+TP verisi kullanılarak elde edilen modeller ise Şekil 4.8.e, f'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Yapay veri II'yi elde etmek için düzensiz ağ ve düzenli ağ kullanılarak tasarlanan Model II ve yapay veri II ters çözümü sonucu elde edilen modeller

a. düzensiz ağ kullanarak SE yöntemiyle, düzenli ağ kullanarak b. SF yöntemiyle düz çözüm yapılan Model II ve aynı sıra ile yapay veri II, c. d. TE+TM modu ve e. f TE+TM+TP verilerin ters çözümü sonucu elde edilen modeller

İlk yapay verinin ters çözümü sonuçlarına benzer olarak, burada da TE+TM+TP verisi ters çözüm sonucunda gerçek modele daha yakın modeller bulunmuştur. Çünkü tipper değerleri yanal özdirenç geçişlerine daha duyarlıdır (Berdichevsky vd. 1998,

Siripunvaraporn ve Egbert 2000). Düzensiz ağ algoritması ile elde edilen modellerde (Şekil 4.8.c, e) yanal ve düşey özdirenç değişimleri, düzenli ağ algoritması ile elde edilenlere (Şekil 4.8.d, f) göre gerçek modele daha yakın bulunmuştur.

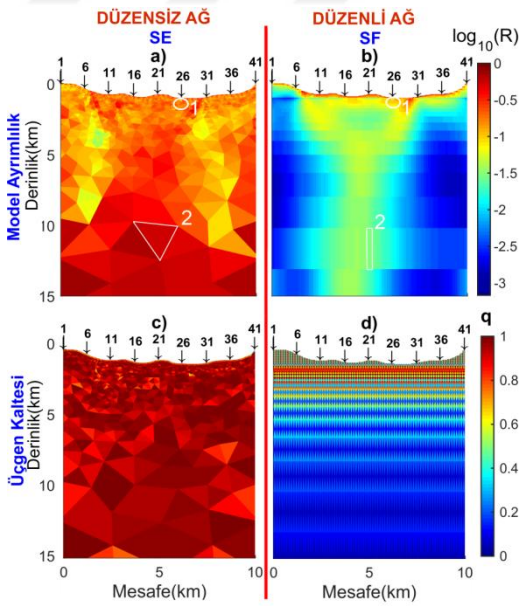
Çizelge 4.3'de ilk veri ters çözümüne benzer şekilde, ters çözüm sonucu bulunan modellerdeki yer altı yapıların özdirençleri gerçek değerleri ile nicel olarak karşılaştırılmıştır. Yapıların özdirençleri hesaplanırken, ters çözüm sonucu bulunan modellerde yapıların gerçek sınırları içinde kalan parametrelerin özdirençlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır (Çizelge 4.3). Çizelge 4.3'de yapılan karşılaştırmalar, düzensiz SE ağı kullanılarak yapılan ters çözüm sonucunun gerçek değerlere daha yakın olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4.3 Ters çözümler sonucu elde edilen modellerde bulunan yapıların özdirenci ile gerçek modeldeki (Model II) değerlerinin karşılaştırılması.

Mod	Yapı	GERÇEK DEĞER (ohm.m)	DÜZENSİZ (ohm.m)	DÜZENLİ (ohm.m)
TE+TM	Volkanik kayaç	500	444	1204
	Sedimanter Tabaka-1	100	98	110
	Sedimanter Tabaka-2	50	50	56
	Kil Tabaka	20	24	27
	Alt kabuk	5	11	9
TE+TM+TP	Volkanik kayaç	500	488	530
	Sedimanter Tabaka-1	100	100	94
	Sedimanter Tabaka-2	50	50	52
	Kil Tabaka	20	23	35
	Alt kabuk	5	6	17

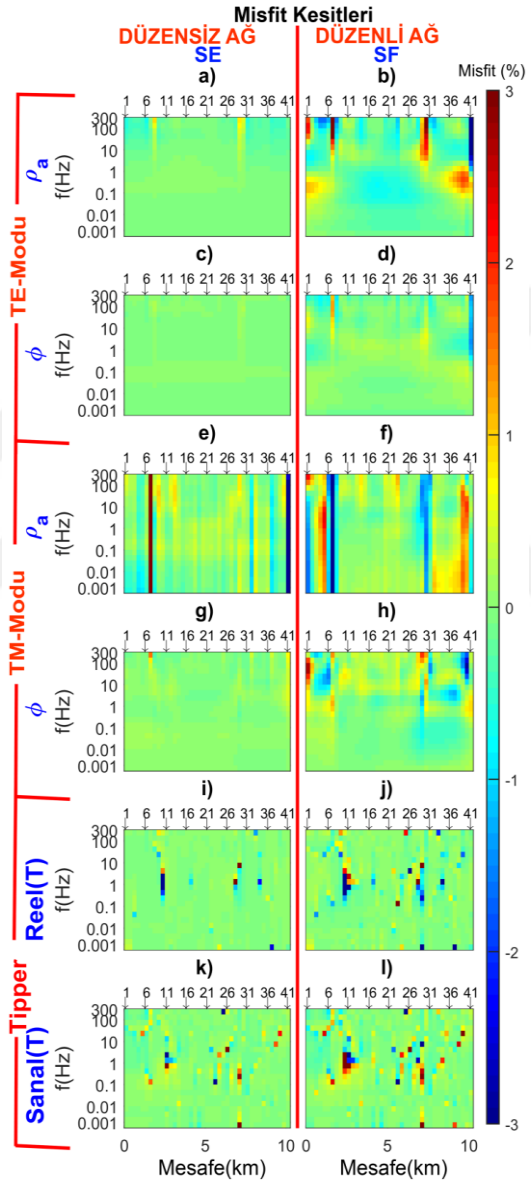
Yapay veri II'nin her iki algoritma ile TE+TM+TP ters çözümü için model ayrımlılık kesitleri Şekil 4.9.a, b'de sunulmuştur. Önceki uygulamaya benzer olarak bu uygulamada da model ayrımlılığı için birkaç test yapılmıştır. Testlerde ayrımlılık değerinin logaritmasının ($\log_{10}(R)$) -2'den küçük olduğu durumlarda ilişkili model parametre kötü çözüldüğü (mavi ve koyu mavi renkli), aksi durumda ise iyi çözüldüğü belirlenmiştir (yeşil, sarı ve kırmızı renkli). Örneğin, Şekil 4.9.a, b'de sadece 1 ile numaralandırılan üçgen ve bloğun özdirencinin % 10 artırılıp, kalan parametrelerin özdirenci değiştirilmediğinde, bütün düz çözüm algoritmalarında modelleme cevabı %

12’dan fazla değiştiği görülür ve bu model parametrelerinin ayrımlılığı da yüksek(kırmızı) olur. 2 ile numaralandırılan üçgen ve bloğun özdirenci % 10 değiştirilip ve diğer parametrelerin özdirenci sabit bırakıldığında, sırası ile düzensiz ağ kullanan algoritma ve düzenli ağ kullanan algoritmanın düz çözüm cevabı, % 10, % 2 değişmektedir. Buna paralel olarak, düzensiz üçgen ayrımlılık değeri yüksek (sarı), düzenli bloğun ayrımlılık değeri ise düşük (mavi koyu mavi) olur. Karşılaştırılan parametrelerin alanı düzensiz ve düzenli ağda sırasıyla, 2.9km^2 ve 1.6km^2’dir. Buradan çıkarılan sonuç ise model ayrımlılığın derinlerde yüksek olmasının parametrelerinin alanı ile de ilişkili olmasıdır. Bu karşılaştırma ile düzensiz ağda derinlerde neden yüksek ayrımlılık gözlendiği açıklanmaktadır. İlk uygulamadaki gibi, derinlerde bulunan model parametrelerinin ayrımlılığının yüksek olması için parametrenin kapsadığı alanının yeterince büyük olması gerektiği söylenebilir. Bu yüzden düzensiz ağda derin parametrelerin de ayrımlılığı yüksektir. RMT uygulamasına benzer şekilde, Şekil 4.8.e, f’in üçgen kalite kesitleri Şekil 4.9.c, d’de aynı sıra ile sunulmuştur. Burada düzenli ağda derinlerde üçgen kalitelerinin düşmesinin model ayrımlılığına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.9 a. b. Şekil 4.8.e, f’de verilen modeller için model ayrımlılık kesitleri ve c. d. üçgen kalite kesitleri (aynı sıra ile)

Şekil 4.10'da TE-, TM verisi ve tipper verilerinin Misfit kesitleri sunulmuştur. Genellikle faz Misfit değerlerinin görünür özdirenç Misfit kesitlerinden daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Tipper Misfit değerleri ise her iki algoritma sonucu için yaklaşık olarak benzer bulunmuştur.



Şekil 4.10 Yapay veri II ile TE+TM+TP verisi ters çözümü sonucu Şekil 4.8.e, f modelleri için hesaplanan kuramsal veriler arası Misfit kesitleri

a. b. TE-modu görünür özdirenç ve c. d. empedans faz, e. f. TM-modu görünür özdirenç ve g. h. empedans faz, i. j. Tipper gerçel ve k. l. sanal kısmı Misfit kesitleri

Geliştirilen yeni algoritma, geleneksel algoritma ile yapay model II için, düz çözümde kullanılan eleman sayısı, ters çözümde kullanılan parametre sayısı, RMS değerleri, yineleme sayısı ve CPU zamanları baz alınarak karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.4). Düzenli ağda düzensiz ağa kıyasla, model II'nin oluşturulması için 7 kat daha fazla üçgen eleman kullanılması gereklidir. Bu yüzden düzensiz ağ ile yapılan ters çözüm ve modelleme işlemi her zaman daha hızlıdır.

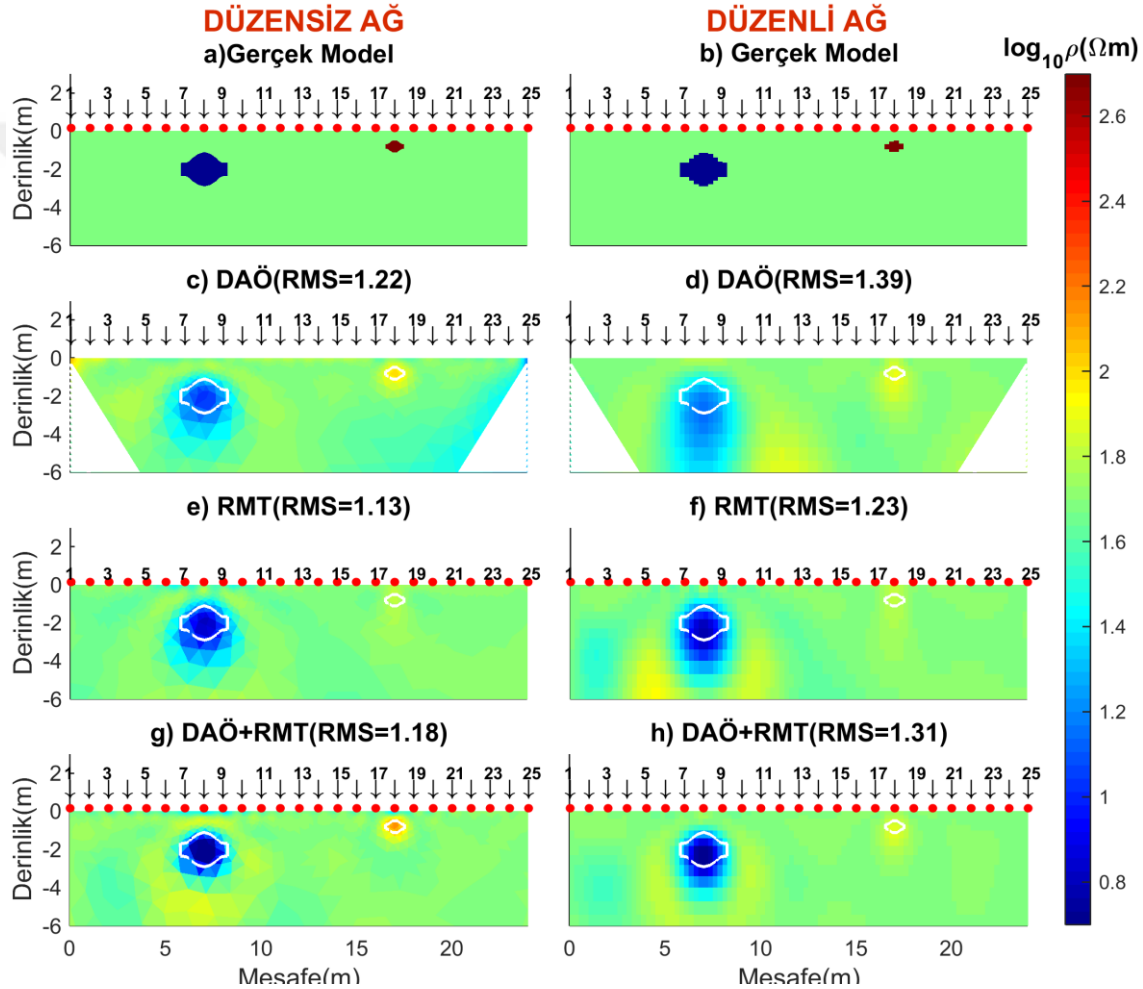
Çizelge 4.4 Yapay veri II için modelleme ve ters çözüm CPU zamanı ve parametreleştirme bilgileri.

	Düzensiz	**Düzenli**
Üçgen Sayısı (Tüm Ağ)	4636	31680
Modelleme CPU zamanı (s.)	4.05	8.7
Parametre Sayısı	3579 (Üçgen)	4934 (Dikdörtgen)
Ters Çözüm CPU zamanı (s.) (bir yineleme için)	35.10	42.12
Yineleme Sayısı	10	15
RMS	1.24	1.72

4.4 Yapay Veri III

Algoritmanın ayrık ve birleşik ters çözüm kısmının test edilmesi için yapay veri III'ün elde edilmesi için tasarlanan model, arkeolojik bir modeli temsil etmektedir. Modelde, içerisinde hava olduğu için çevresine göre daha yüksek özdirenci olan iki antik mezarın bulunduğu düşünülmüştür. Bu tarz antik mezarlar genellikle Türkiye'nin güneyinde bulunmaktadır. Mezarların araştırılması için genellikle DAÖ yöntemi kullanılsa da bu yöntem bazen sonuç verememektedir. Bunun sebebi başlangıçta boşluk olan mezar içinin zamanla su, tuzlu su veya kil gibi bazı iletkenlerle dolmasıdır. Bu yüzden iletkene duyarlı başka bir yöntemin de ek olarak kullanılması, mezarların tamamının yerinin bulunması için önem arz etmektedir. Ayrıca yalıtkan yapının da sadece DAÖ verilerinin ters çözümü ile bulunamamasının söz konusu olduğu durumlar da bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak, yapının model ağında yeterli sayıda elemanla temsil edilememesi ve model ağında oluşturulan üçgenlerin kalitesinin düşük olması verilebilir. Bu tür problemleri göz önünde bulundurarak, çevresindeki malzemeye göre daha iletken ve daha yalıtkan antik mezar vs. yapıların olduğu modelin tasarlanması ile DAÖ ve RMT verilerinin birleşik ters çözümünün önemi vurgulanmaya çalışılmıştır. Bu

problemi tanımlayan model, Şekil 4.11'de verilmiştir. Model hem düzensiz ağ kullanan yeni algoritma hem de düzenli ağ kullanan eski algoritma ile tasarlanmıştır (Şekil 4.11.a, b). Topoğrafyasız bir ortam düşünülerek ortamın özdirenci 50 ohm-m alınmıştır. Ortamda birinci yapı 1.2 metre derinlikte boyutları yaklaşık yatay yönde 2 m., düşey yönde 1.5 m. alınmıştır. İkinci yapı ise 0.5 m derinlikte boyutları yaklaşık yatay yönde 1 m, düşey yönde 0.5 m olarak alınmıştır. Mezarların özdirençleri de sırasıyla 5 ohm-m ve 500 ohm-m alınmıştır. Mezarlar 50 ohm-m özdirenci olan bir ortama yerleştirilmiştir.



Şekil 4.11 Yapay veri III için düzensiz ve düzenli ağ ile tasarlanan arkeoloji modeli ve yapay veri III'ün ayrık ve birleşik ters çözüm sonuçları

a. Düzensiz, b. düzenli ağ kullanılarak düz çözüm yapılan arkeoloji modeli ve aynı sıra ile c. d. DAÖ, e. f. RMT verilerinin ayrık ve g. h. birleşik ters çözümü sonucu elde edilen modeller (Aşağı yönlü oklar DAÖ elektrotlarını, kırmızı noktalar RMT istasyonlarını göstermektedir)

Model ağı oluşturulurken her iki algoritmada da istasyonlar arasında altı elemana bölünmüştür. Düzensiz ağ kullanılan algoritmada mezarların oluşturulması için mezarların kenar koordinatlarının verilmesi yeterlidir. Düzenli ağda aynı modeli oluşturabilmek için ağın daha sık bölünmesi gerekmektedir. Bu sayede her iki algoritma ile modelleme sonucu elde edilen verilerin % 1'in altında misfitM değeri ile birbirinin aynısı olması sağlanmıştır. Düzenli ağda mezarların kenar koordinatları verilerek bu koordinat içerisinde ağırlık merkezi kalan üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. DAÖ verisinin elde edilmesi için 1 m elektrot aralığı ile 25 elektrot (Aşağı yönlü oklar) varsayılmıştır. DAÖ verisi, a=1, 2 ve 3 m dipol aralıklı, 8 er seviye dipol-dipol dizilimi için elde edilmiştir. RMT verisinin elde edilmesi için de benzer şekilde 1 m istasyon aralığı ile 25 istasyon (kırmızı noktalar) varsayılmıştır. Modelin RMT cevabı 100, 300, 500 ve 1000 kHz frekansları için hesaplanmıştır.

Yapay veri III seti olarak, düzenli ağ ile oluşturulan modelin modellemesi sonucu elde edilen veri kullanılmıştır. Bu veriler gerçek veri gibi varsayılarak algoritmaların ayrık ve birleşik ters çözüm kısımları ile değerlendirilmişlerdir. Ters çözümde her iki algoritmanın da otomatik ağ oluşturma kısmı kullanılarak model ağı oluşturulmuştur. Yani bildiğimiz modelin düz çözümünü hesaplarken kullanılan model ağı ile verilerin ters çözümünde kullanılan model ağları birbirinden farklıdır. Bunun sebebi yapay veri oluşturulurken modeli her ne kadar biliyor olsak da gerçek verileri topladığımızda yer altı hakkında bilgimiz olmayacağı düşüncesidir. Şekil 4.11.c, d'de sırası ile yeni algoritma ve eski algoritma ile DAÖ verilerin ayrık ters çözümü sunulmuştur. Her iki algoritmanın buldukları sonuca bakıldığında iletken ve yalıtkan yapılar, olması gereken yerden düşey yönde uzamıştır. Ayrıca düzensiz ağ ve düzenli ağ arasındaki farka bakıldığında, düzensiz ağ hem yalıtkan hem de iletken yapı sınırını düzenli ağa göre daha keskin ve net bulabilmiştir. Yalıtkan yapının düzensiz ağda gerçek özdirencine daha yakın olduğu hem Şekil 4.11.c, d'den hem de Çizelge 4.5'den açıkça görülmektedir. Mezar yapılarının sınırları içerisinde kalan üçgenlerin ortalama özdirenci Çizelge 4.5'de verilmiştir. Çizelge 4.5'e göre DAÖ ters çözümü sonucu düzensiz ağda mezar yapılarının ve ortam özdirencinin gerçek değere daha yakın bulunduğu görülmektedir.

Çizelge 4.5 Ters çözümler sonucu elde edilen modellerde bulunan yapıların özdirenci ile gerçek modeldeki (Model III) değerlerinin karşılaştırılması.

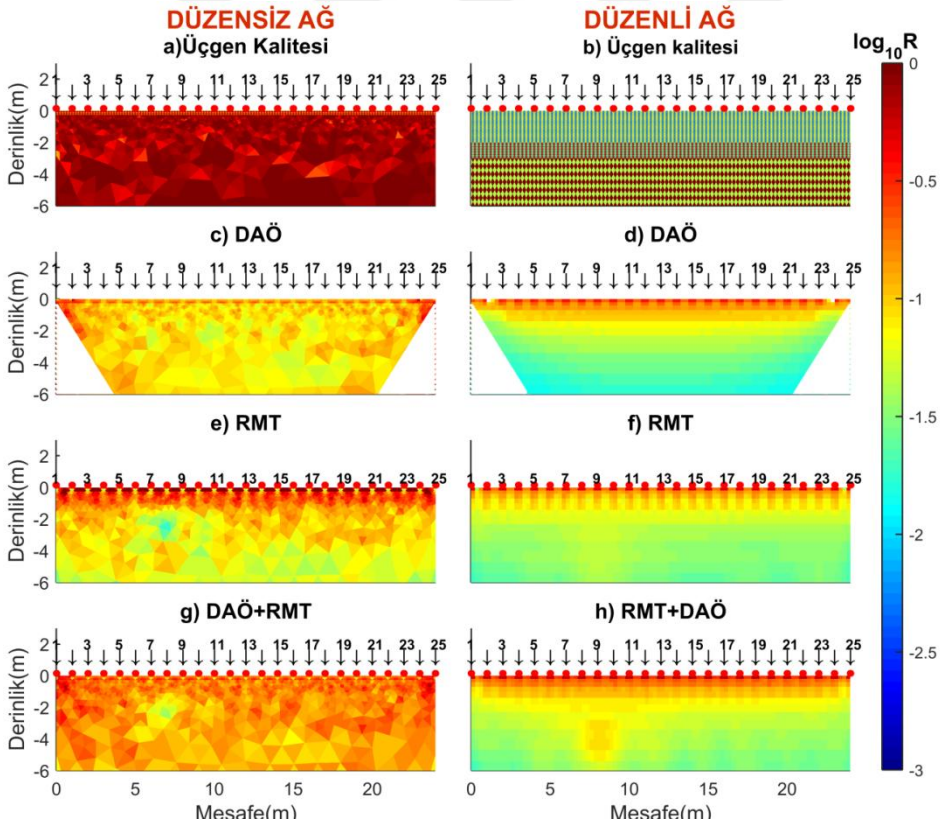
Yöntem	Yapı	GERÇEK DEĞER	DÜZENSİZ	DÜZENLİ
DAÖ	İletken Mezar	5.0 ohm.m	15 ohm.m	23 ohm.m
	Yalıtkan Mezar	500.0 ohm.m	171 ohm.m	81 ohm.m
	Ortam	50.0 ohm.m	52 ohm.m	60 ohm.m
RMT	İletken Mezar	5.0 ohm.m	11 ohm.m	12 ohm.m
	Yalıtkan Mezar	500.0 ohm.m	64 ohm.m	67 ohm.m
	Ortam	50.0 ohm.m	52 ohm.m	60 ohm.m
DAÖ+RMT	İletken Mezar	5.0 ohm.m	5.7 ohm.m	8 ohm.m
	Yalıtkan Mezar	500.0 ohm.m	259 ohm.m	98 ohm.m
	Ortam	50.0 ohm.m	52 ohm.m	54 ohm.m

RMT verisinin ters çözüm sonucu bulunan modeller Şekil 4.11.e, f'de verilmiştir. DAÖ ters çözüm sonucu ile karşılaştırıldığında her iki algoritma ile de RMT verisinin ters çözüm sonucu elde edilen modellerde iletken yapı sınırının gerçek modele daha yakın bulunduğu, yalıtkan yapı sınırının ise DAÖ verisinin ayrık ters çözümüne göre gerçek modele daha az yakın olduğu görülmektedir. RMT verilerin düzenli ve düzensiz ağ ile ters çözüm sonucu arasındaki fark irdelendiğinde Çizelge 4.5'e göre ortamın özdirencinin gerçek modele yakın olduğu ve düzenli ağ ile yapılan ters çözüm sonucunda modelde istenmeyen etkilerin daha çok olduğu dikkat çekmektedir.

Birleşik ters çözüm sonucu bulunan modeller Şekil 4.11.g, h da verilmiştir. Öncelikle ayrık ve birleşik ters çözüm sonuçlarına göre karşılaştırma yapıldığında her iki algoritma sonuçlarının ayrık ters çözümlerine göre, birleşik ters çözüm sonucu elde edilen modellerde hem iletken hem de yalıtkan yapı sınırlarının daha açık bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.5'de Birleşik ters çözüm sonucu elde edilen yapı sınırlarındaki elemanların ortalama özdirençleri gerçek değere daha da yaklaşmıştır. Sonuç olarak bu uygulama ile DAÖ ve RMT verilerinin birleşik ters çözümünün önemi gösterilmiştir.

Model III, parametreleştirme alanı üçgen kaliteleri düzensiz ve düzenli ağ kullanan algoritmalar için sırası ile Şekil 4.12.a, b'de gösterilmiştir. Ayrık ve birleleşik ters çözümler sonucu elde edilen modellerin ayrımlılık kesitleri Şekil 4.12.c-h'da

sunulmuştur. Burada derin parametrelerin ayrımlılığı ile boyutları arasında doğru orantı olduğu dikkat çekmektedir. Birleşik ters çözüm ile veri sayısının faz olması her iki algoritma sonucunda da ayrımlığı artırmıştır. Fakat ağda bulunan üçgen kalitelerinin düşmesi, ayrık ve birleşik ters çözüm sonuçlarında yapıların bulunamamasına sebep olmuştur. Model III'de özellikle 500 ohm-m özdirencinde olan mezar yapısı, düzenli ağda oluşturulan üçgen parametrelerin kalitesinin ve ayrımlılığının düşük olması nedeni ile düzensiz ağa göre gerçek değerinden uzak olduğu düşünülmektedir. Düzensiz ağda üçgen kaliteleri ağın genellikle her yerinde kalitelidir. Üçgen kalitesinin düşük olması ters çözüm içerisinde her yinelemede yapılan, çok az yuvarlama hatalarına neden olmaktadır. Bu sayısal hatalar, verilen örnek modeldeki gibi küçük yapıların bulunması durumunda model yanıtından daha büyük olmaktadır. Böylece ters çözümde yapıların etkisi algoritma ile algılanamayacak kadar az olduğu için, bu yapı bulunamamaktadır.



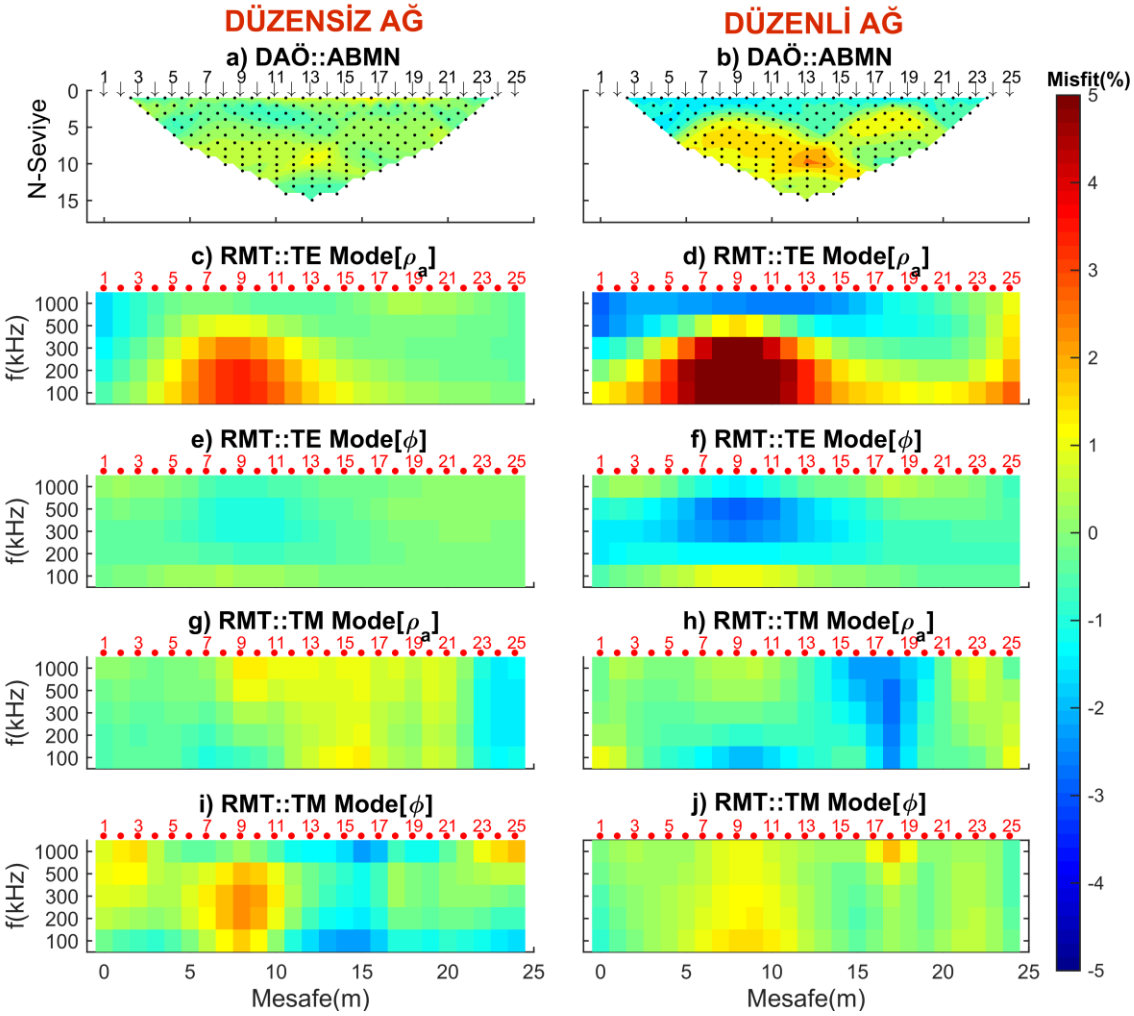
Şekil 4.12 Ters çözümde kullanılan a. düzensiz, b. düzenli ağ üçgen kaliteleri, c-h. Şekil 4.11.c-h'de verilen modeller için model ayrımlılık kesitleri (aynı sıra ile)

Sonuçlara genel olarak bakıldığında ayrık ters çözüm sonucunda birleşik ters çözüme göre daha kötü sonuçlar elde edilmektedir (Her iki algoritmada da). İki algoritmanın (Düzenli ve düzensiz) en önemli farkı, düzensiz ağ algoritmasının yapı sınırlarının temsil edilmesindeki yüksek başarısıdır. Bununla birlikte düzensiz ağ algoritması hız bakımından da düzenli ağ algoritmasına göre daha avantajlıdır. Bunun için Çizelge 4.6'da algoritmaların modelleme ve ters çözüm CPU zamanları ayrık ve birleşik ters çözüm için karşılaştırılmıştır. Düzensiz ağda hem modelleme hem de ters çözümde eleman veya parametre sayısı daha az kullanılarak model temsil edilebildiği için modelleme ve ters çözüm CPU zamanları her zaman daha azdır. Bu hızlılığın yanı sıra, ters çözümde daha az yinelemede sonuca ulaşılmıştır. Toplam harcanan zaman düşünüldüğünde yeni algoritmanın hızlılığı dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.6 Yapay veri III için modelleme ve ters çözüm CPU zamanı ve parametreleştirme bilgileri.

	DÜZENSİZ			**DÜZENLİ**		
Üçgen Sayısı (Tüm Ağ)	4126			27840		
Modelleme CPU Zamanı(DAÖ+RMT)	0.59 s.			4.09 s.		
Parametre Sayısı	2346(Üçgen)			4340 (Dikdörtgen)		
Ters Çözüm CPU Zamanı (bir yineleme için)	**DAÖ**	**RMT**	**DAÖ+RMT**	**DAÖ**	**RMT**	**DAÖ+RMT**
	5.3 s.	3.0 s.	9.7 s.	11.2 s.	5.3 s.	17.5 s.
Yineleme Sayısı	6	6	5	8	9	8
RMS	1.22	1.13	1.18	1.39	1.23	1.31

Kuramsal ve ölçülen veri arasındaki çakışmayı göstermek için kullanılan DAÖ ve RMT verileri için Misfit kesitleri Şekil 4.13'de verilmiştir. Her veri arasında hesaplanan Misfit'in (Eşitlik 3.30), düzensiz ağ kullanılarak yapılan ters çözüm sonucunda maksimum % 3, düzenli ağda ise % 5 değerinin üzerine çıkmadığı dikkat çekmektedir. Bu değerler, veri çakışmasının kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.13 Yapay veri III ile DAÖ+RMT verileri birleşik ters çözümü sonucu Şekil 4.11.g, h modelleri için hesaplanan kuramsal veriler arası Misfit kesitleri

a. b. DAÖ verisi görünür özdirenç, RMT TE-modu c. d. görünür özdirenç ve e. f. empedans fazı, TM-modu g. h. görünür özdirenç ve i. j. empedans fazı Misfit kesitleri (verilen sıra ile)

4.5 Yapay Veri-IV

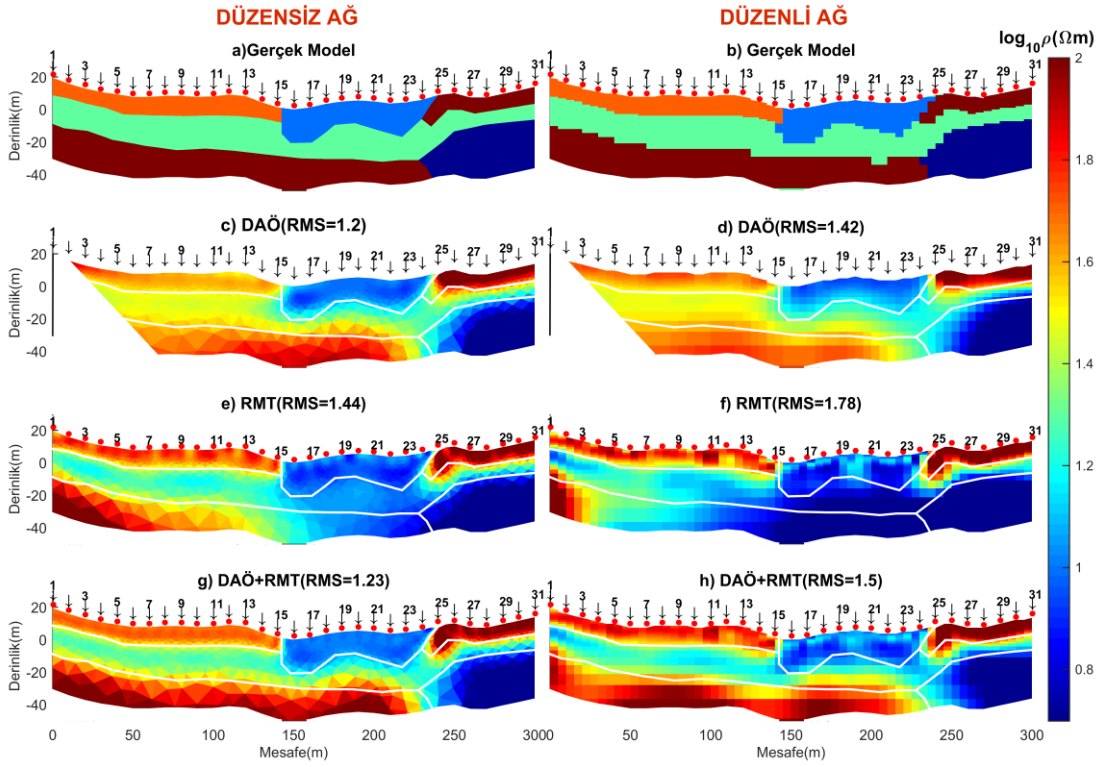
Son yapay veri örneği bir bakır madeni yatağını temsil etmek için oluşturulmuştur. Yapay veri IV, daha sonraki bölümlerde anlatılacak olan arazide ölçü almadan önce jeolojik ve mekanik sondaj bilgileri ile arazinin topoğrafya bilgisi kullanılarak beklenen modelden hesaplanmıştır. Bu sayede gerçek veriler toplanmadan önce yöntemlerin yeterliliği ve duyarlılığı hakkında ön bilgi elde edilmiştir. Ayrıca ters çözüm algoritmalarının karşılaştırılması yapılarak hem düzenli hem düzensiz ağ kullanan

algoritmada ne kadar başarılı sonuçlar elde edebileceğimizi ölçü toplamadan önce ön-kestirmek mümkün olmuştur.

Şekil 4.14.a, b'de düzensiz ve düzenli ağ ile tasarlanan modeller sunulmaktadır. Modelde açık yeşil ile gösterilen kısım, 20 ohm-m özdirencinde damarcıklar halinde içerisinde bakır cevheri kesilen fillik dasiti ifade etmektedir. Kırmızı ile temsil edilen kısım ise 50-100 ohm-m özdirencinde bakır içermeyen ve altere olmuş dasiti ifade etmektedir. Açık mavi ile temsil edilen 10 ohm-m özdirençli yapı ise düşük özdirençli bir akarsu ve göl çökelleri ile kil tabakasını ve 5 ohm-m özdirencinde gösterilen kısım ise porfiri dokulu potasik dasit ve bol pirit içeren tabakadır. Modelin tasarlanabilmesi için 10 m aralıklı 31 elektrot (Şekil 4.14, aşağı yönlü oklar) ve 10 m aralıklı 31 RMT istasyonu (Şekil 4.14, kırmızı noktalar) varsayılmıştır. Düz çözümde, RMT yöntemi için 10 kHz - 300 kHz frekans aralığında 4 frekans değeri kullanılmıştır. DAÖ yöntemi için ise AMN elektrot dizilimi varsayılarak iki (10 ve 20) elektrot aralığı için 7 şer seviyede model yanıtları hesaplanmıştır.

Şekil 4.14'de verilen sonuçlara bakıldığında önceki örnekteki gibi birleşik ters çözüm sonuçlarının ayrık ters çözüm sonuçlarına göre gerçek modele daha yakın sonuçlar ürettiği açık bir şekilde görülmektedir. Gözle görülen bu sonuçların yanı sıra Çizelge 4.7'de verilen, yapıların gerçek özdirenci ile ters çözüm sonucu elde edilen modellerde bulunan özdirençlerinin birbirine yakınlığına dikkat edilirse, birleşik ters çözümün her iki algoritmada da başarısı göze çarpmaktadır.

Şekil 4.14.c, d'de Yapay veri IV, sadece DAÖ verileri kullanılarak sırası ile düzensiz ve düzenli ağ algoritmaları ile ters çözüm yapılmıştır. Burada her iki algoritmanın da yüzeye yakın kısımlarda yalıtkan yapıların benzer doğrulukta bulunduğu görülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.7'de sunulan özdirenç değerlerinden de aynı sonuç sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Sığ kısımlardan daha derinlere bakıldığında iki yalıtkan tabakanın arasında bulunan iletken yapının DAÖ verisi ayrık ters çözümünde, gerçek değerinden biraz farklı bulunduğu fakat sınırların net olduğu görülmektedir. En altta bulunan yalıtkan tabaka ise düzensiz ağda gerçek değerine daha yakın bulunmuştur.



Şekil 4.14 Yapay veri IV için düzensiz ve düzenli ağ ile tasarlanan maden yatağı modeli ve yapay veri IV'ün ayrık ve birleşik ters çözüm sonuçları

a. Düzensiz, b. düzenli ağ kullanılarak düz çözüm yapılan maden yatağı modeli ve aynı sıra ile c. d. DAÖ, e. f. RMT verilerinin ayrık ve g. h. birleşik ters çözümü sonucu elde edilen modeller (Aşağı yönlü oklar DAÖ elektrotlarını, kırmızı noktalar RMT istasyonlarını göstermektedir)

Şekil 4.14.e, f'de Yapay veri IV, sadece RMT verilerinin ayrık ters çözüm sonucu elde edilen modeller sunulmuştur. Sığ yapıların özdirenç değerleri her iki algoritmada da gerçek değerine yakın olarak bulunmuştur. Düzenli ağ kullanılarak yapılan ters çözümde yüzeye yakın kısımlarda iletken ve yalıtkan yapıların özdirençleri her ne kadar gerçek değerine yakın bulunsa da istenmeyen etkilerin (art efekt) olduğu görülmektedir. İki yalıtkan arasında kalan iletken yapının DAÖ verisi ayrık ters çözümüne göre gerçek değerine daha yakın olduğu ve bu durumun düzensiz ağda daha net olduğu görülmektedir. En altta bulunan yalıtkan yapı sınırı düzensiz ağ kullanılarak yapılan ters çözümde gerçek değerine daha yakınken, düzenli ağ kullanılarak yapılan ters çözüm sonucunda yalıtkan yapı etkisi çok az görülmektedir.

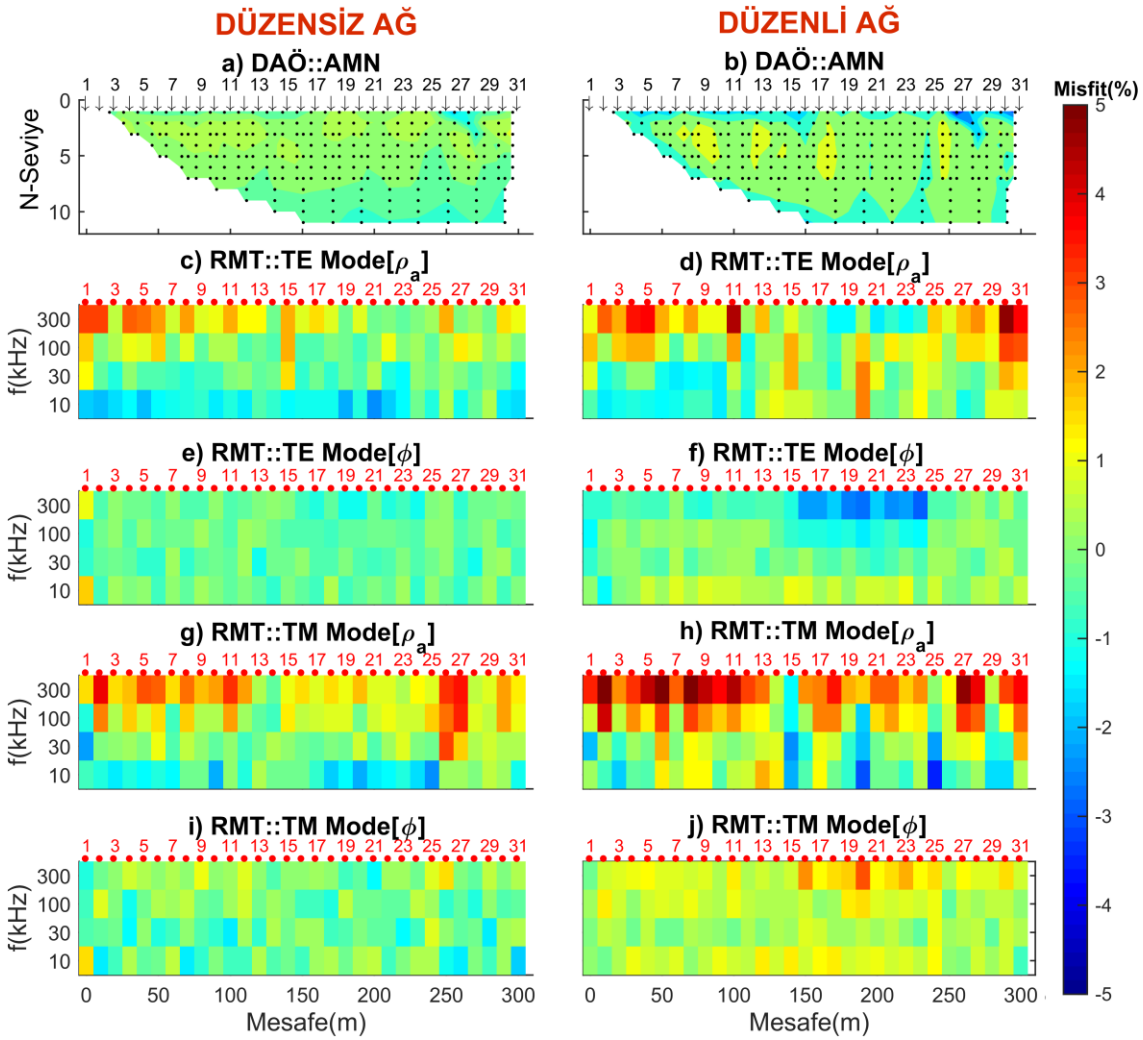
Şekil 4.14.g, h'de Yapay veri IV, DAÖ ve RMT verilerinin birleşik ters çözüm sonucu elde edilen modeller gösterilmiştir. Burada gerçek modeldeki bütün yapı sınırları ve

özdirençleri hemen hemen aynı olarak bulunmuştur. Düzenli ağda düzensiz ağa göre istenmeyen etkiler (art efektler) daha fazladır. Çizelge 4.7'de düzensiz ağ temelli ters çözüm algoritmasında bulunan özdirenç değerlerinin gerçek değere daha yakın olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 Ters çözümler sonucu elde edilen modellerde bulunan yapıların özdirenci ile gerçek modeldeki (Model IV) değerlerinin karşılaştırılması.

Yöntem	Yapı	GERÇEK DEĞER (ohm.m)	DÜZENSİZ (ohm.m)	DÜZENLİ (ohm.m)
DAÖ	Altere Dasit I	50	40	40
	Altere Dasit II	100	74	65
	Fillik dasit	20	28	31
	Potasik dasit	5	6	6
	Kil	10	13	15
RMT	Altere Dasit I	50	63	66
	Altere Dasit II	100	64	55
	Fillik dasit	20	16	13
	Potasik dasit	5	5	4
	Kil	10	9	8
DAÖ+RMT	Altere Dasit I	50	47	64
	Altere Dasit II	100	87	84
	Fillik dasit	20	19	15
	Potasik dasit	5	6	6
	Kil	10	10	12

Şekil 4.15'de birleşik ters çözümde ölçülen ve kuramsal veri arasındaki farklar sunulmuştur. Şekil 4.15.a, b'de DAÖ verileri arasında Misfit kesitleri, Şekil 4.15.c, d'de TE-modu görünür özdirenç verileri, Şekil 4.15.e, f'de ise faz verileri arasındaki Misfit kesitleri sunulmuştur. Benzer şekilde Şekil 4.15.g, j'de TM-modu verileri arasında Misfit kesitleri sunulmuştur. Misfit kesitlerinde, yapay veri ile hesaplanan veri arasındaki misfitin maksimum % 5 olduğu dikkat çekmektedir. Bu Misfit değerinin birleşik ters çözüm sonucu elde edilen modellerin gerçek modele yakınlığı ve eklenen % 5 gürültü dikkate alındığında kabul edilebilir olduğu söylenebilir.



Şekil 4.15 Yapay veri IV ile DAÖ+RMT verileri birleşik ters çözümü sonucu Şekil 4.14.g, h modelleri için hesaplanan kuramsal veriler arası Misfit kesitleri

a. b. DAÖ verisi görünür özdirenç, RMT TE-modu c. d. görünür özdirenç ve e. f. empedans fazı, TM-modu g. h. görünür özdirenç ve i. j. empedans fazı Misfit kesitleri (verilen sıra ile)

Çizelge 4.8'de algoritmaların modelleme ve ters çözüm CPU zamanları ayrık ve birleşik ters çözüm için önceki örnekteki gibi karşılaştırılmıştır. Düzensiz ağda modeli temsil etmek için kullanılan üçgen elemanlar, düzenli ağa göre 6 kat daha azdır. Bu yüzden modellemede hız açısından daha avantajlıdır. Üçgen eleman kullanılması nedeni ile modele eklenen yapının şekli ne olursa olsun, elemanların artışı çok fazla olmayacaktır. Fakat düzenli ağda model tasarlanırken, modelde bulunan yapının ve topoğrafyanın şeklini temsil edecek şekilde ağ elemanları küçültülmelidir. Verilerin ters çözümde oluşturulan ön-kestirim model ağı her iki algoritmada da modeli bilmiyormuş gibi sadece topoğrafya bilgisinden ve ölçülmüş varsayılan yapay görünür özdirenç

verilerinin ortalamasından yararlanarak tasarlanmıştır. Ters çözümde düzensiz ağda yer altını temsil eden üçgen parametre sayısı, düzenli ağdaki dikdörtgen parametre sayısından azdır. Bu yüzden ayrık ve birleşik ters çözümde her yinelemede harcanan CPU zamanları düzensiz ağ kullanan yeni algoritmada daha azdır. Önceki örneğe benzer şekilde toplam harcanan zaman düşünüldüğünde yeni algoritma daha hızlıdır denilebilir.

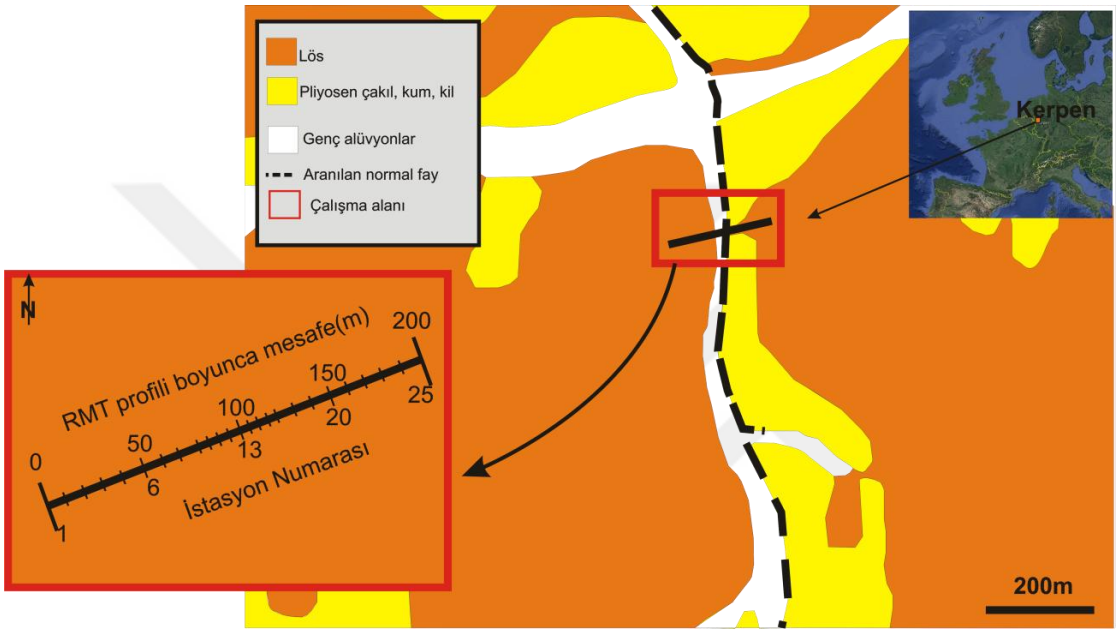
Çizelge 4.8 Yapay veri IV için modelleme ve ters çözüm CPU zamanı ve parametreleştirme bilgileri.

	DÜZENSİZ			**DÜZENLİ**		
Üçgen Sayısı (Tüm Ağ)	3611			21240		
Modelleme CPU Zamanı DAÖ+RMT (s.)	0.51			3.01		
Parametre Sayısı	2377(Üçgen)			4333 (Dikdörtgen)		
	DAÖ	**RMT**	**DAÖ+RMT**	**DAÖ**	**RMT**	**DAÖ+RMT**
Ters Çözüm CPU Zamanı (s.) (bir yineleme için)	3.2	2.9	6.9	8.3	3.3	12.4
Yineleme Sayısı	7	7	5	10	12	8
RMS	1.20	1.44	1.23	1.42	1.78	1.50

4.6 Gerçek Veri Uygulaması I

Tez kapsamında değerlendirilen gerçek veri uygulamalarından birincisi, geliştirilen algoritmanın RMT ayrık ters çözümünün avantajlarını göstermek amacı ile eklenmiştir. RMT verisi Almanya'nın Köln kentinin 20 km kuzeyinde yer alan Kerpen kasabasında toplanmıştır (Candansayar ve Tezkan 2008). Arazinin jeoloji haritası Şekil 4.16'de gösterilmiştir. Jeoloji haritasında RMT ölçüm doğrultusunu kesen, yaklaşık kuzey doğrultulu bir normal fay olduğu daha önceki çalışmalardan bilinmektedir (Candansayar ve Tezkan 2008, Streich 2003). Burada görülen fay, bölgedeki Erft Fay sisteminin bir parçasıdır ve RMT doğrultusunun yaklaşık 3 km doğusunda sistemin ana fayı olan Horrem fayı geçmektedir. Detaylı jeoloji bilgisi ve fay yerleri, Streich (2003) tarafından farklı jeofizik yöntemler (DAÖ, Yer Radarı ve sismik) kullanılarak bulunmuştur. Candansayar ve Tezkan (2008), Şekil 4.16'de gösterilen doğrultu boyunca gömülü fay yapısını çıkarmak için, RMT verileri ölçerek bu verileri kendi algoritmalarında yorumlamışlardır. Önceki çalışmalara (Streich 2003, Candansayar ve Tezkan 2008)

göre RMT profilinin altında, yüksek özdirençli çakıl biriminin üzerini örten daha düşük özdirençli lös (loess)[1] bulunmaktadır. Ayrıca lös biriminin fayın batı tarafında daha ince yapıda olduğu düşünülmektedir. Çoğu normal fay zonunda olduğu gibi (McCalpin 1996), fay yapısının özdirencinin de kestiği çakıllı birime nazaran daha düşük özdirençlidir. Fay zonu sadece çakıl tabakasının içerisinde görülebilmektedir (Şekil 4.16.a, b).

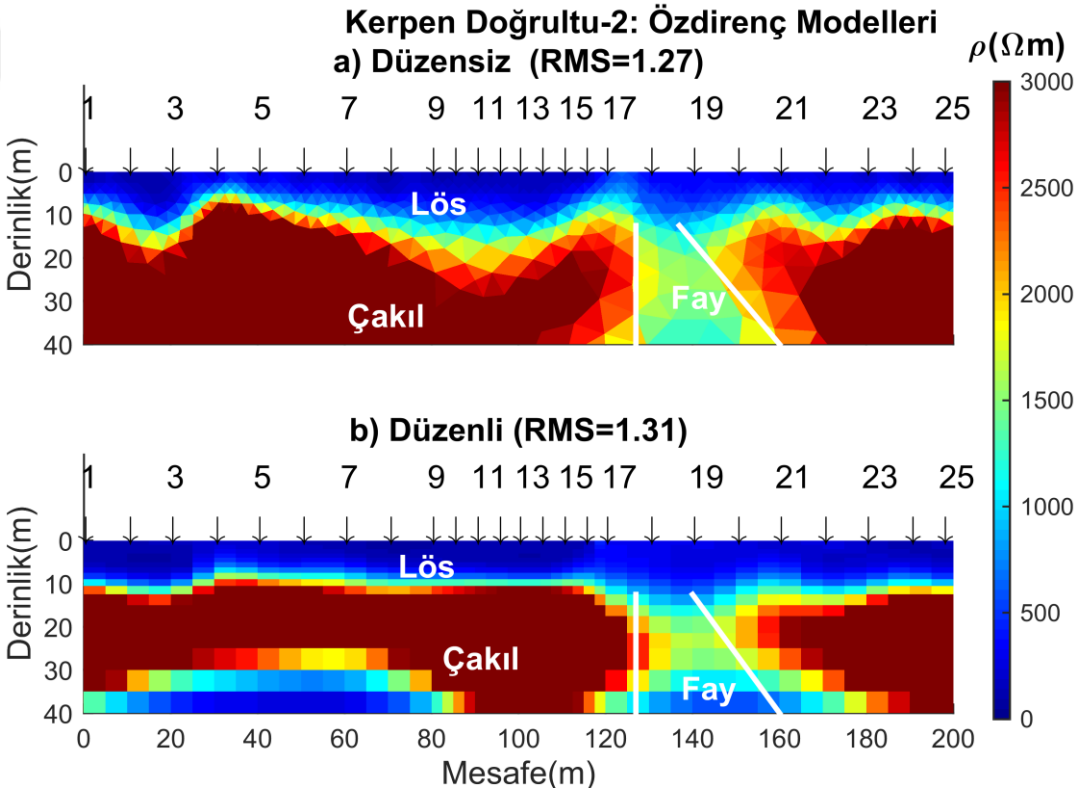


Şekil 4.16 Kerpen arazisi jeoloji haritası ve RMT ölçülerin alındığı doğrultu (Streich 2003)

RMT verisi, TE modunda dört frekansta (234,183, 75 ve 16.4 kHz), TM modunda üç frekansta (198, 65.8 ve 12.1 kHz), görünür özdirenç ve empedans fazı olarak toplanmıştır. İstasyonlar arası mesafe doğrultunun başında ve sonunda 10m, önceki çalışmalara (Streich 2003) göre fay beklenen kısımlarda ise daha detaylı bilgi elde etmek için 5m'dir. Başlangıç modeli olarak homojen 120 ohm.m özdirençli bir ortam seçilmiştir. Bu özdirenç değeri ölçülen görünür özdirenç değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Ters çözüm sonuçları geleneksel algoritma ve yeni geliştirilen düzensiz ağ temelli algoritma ile Şekil 4.17.a, b'de sunulmuştur. Her iki algoritmada yedi yinelemede düşük bir RMS değerine ulaşabilmiştir. Şekil 4.17'de Candansayar ve Tezkan 2008 tarafından bulunan fay sınırları, beyaz çizgi ile gösterilmiştir. RMS değeri

[1] Lös (Loess), Akarsuyun getirdiği killi ve kumlu balçıktan oluşan birimdir.

her iki algoritmada da yaklaşık 1.3 civarında olmasına karşın, yeni algoritma ile fay sınırları ve jeolojik birim sınırları çok az farklı bulunmuştur. Şekil 4.17.b'de lös ve çakıl birimi sınırı çok keskin geçişli ve Şekil 4.17.a'da fay sınırları ve birimler düzensiz ağ sayesinde daha yumuşak ve anlamlı şekilde bulunmuştur. Düzenli SF ağı kullanılarak yapılan ters çözüm sonucunda (Şekil 4.17.b) derin kısımlarda parametreler ayrımlılığın düşmesinden dolayı, daha düşük özdirenç değerlerine yakınsamış ve istenmeyen etkiler oluşmuştur. Ters çözümler sonucunda yüzeyde bulunan lös tabakasının özdirenci 100 ohm.m, çakıl tabakası 2000 ohm.m'den fazla ve fay yapısı ise 1500 ohm.m özdirencinden düşük bulunmuştur.

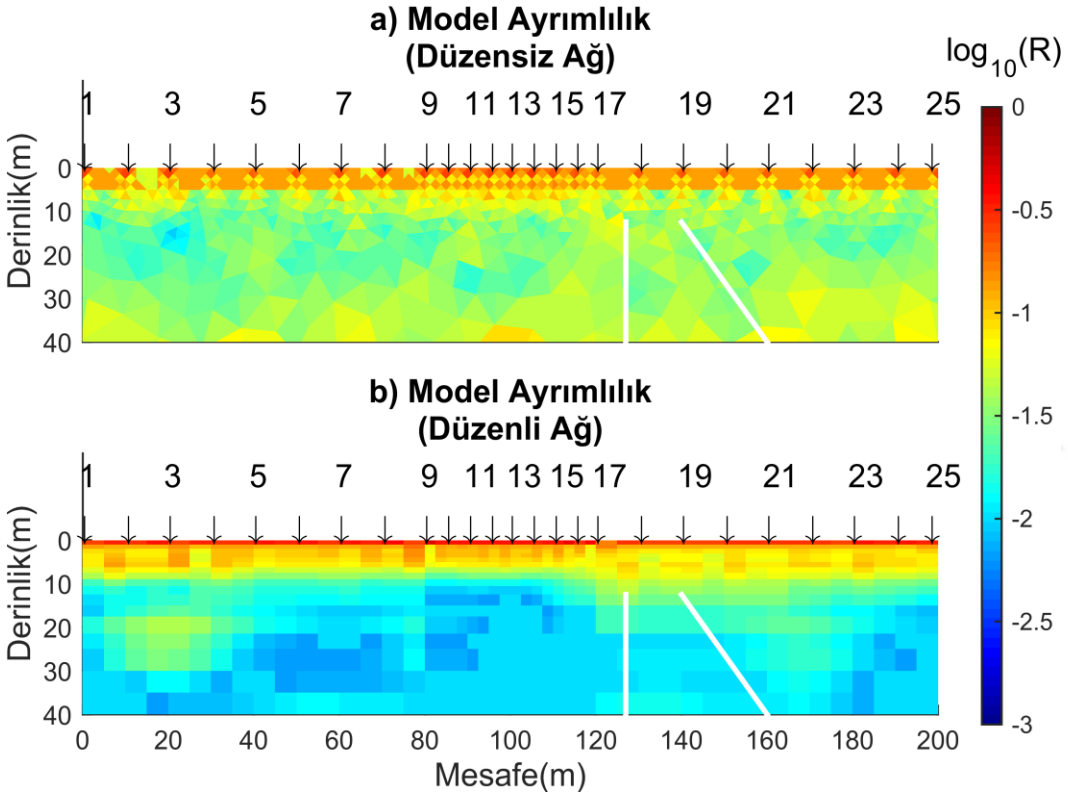


Şekil 4.17 Kerpen, doğrultu-2'de toplanan RMT verisinin a. düzensiz ağ ve b. düzenli ağ algoritmaları ile ters çözümü sonucu elde edilen özdirenç modelleri

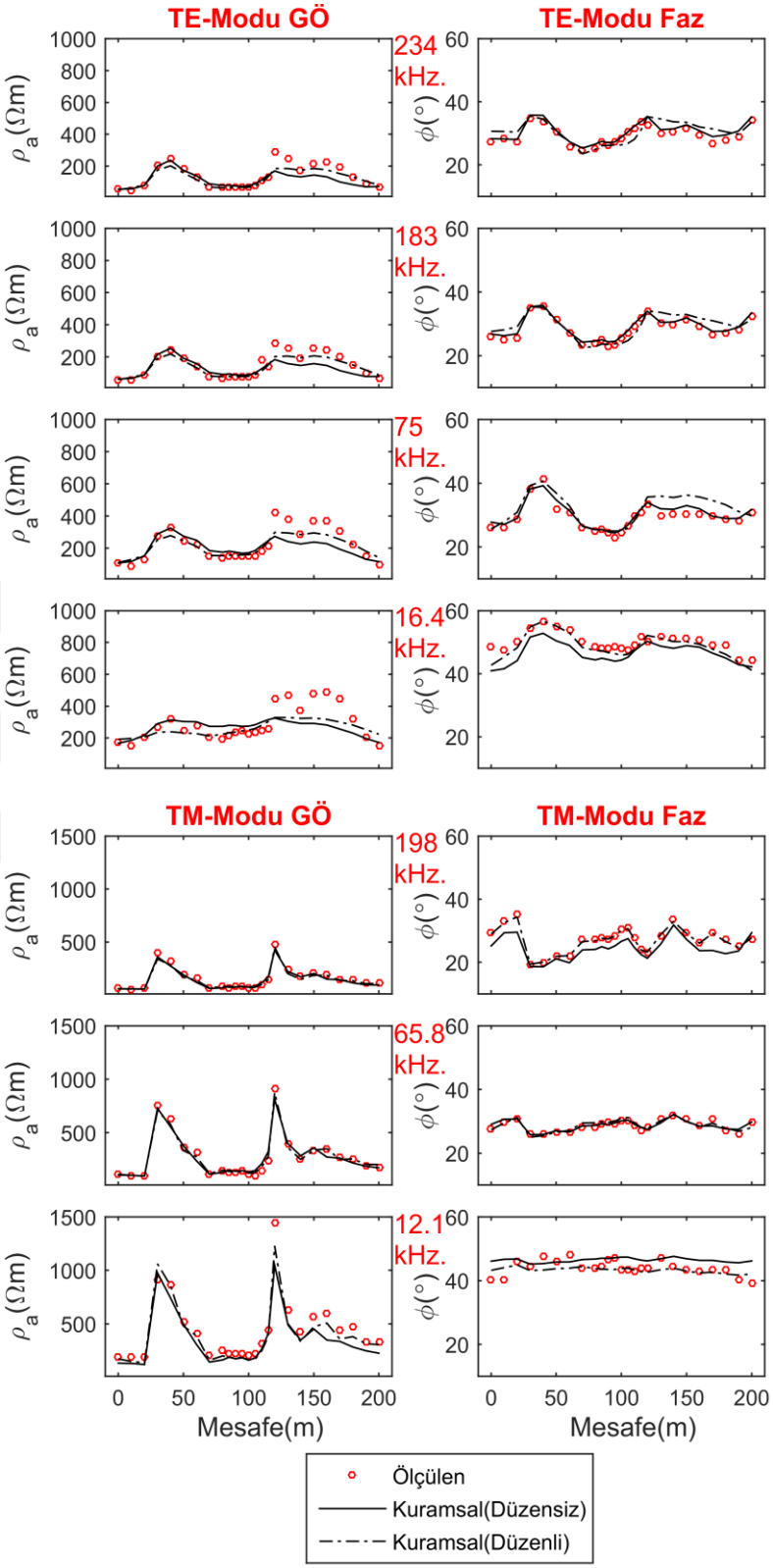
Beyaz çizgiler Candansayar ve Tezkan (2008) tarafından bulunan fay sınırlarını göstermektedir. Lös (Loess), akarsuyun getirdiği killi ve kumlu balçıktan oluşan birimdir.

Model ayrımlılık kesitleri Şekil 4.18.a, b'de sunulmuştur. Yapay veri I ve II uygulamalarına benzer şekilde, model ayrımlılığının logaritmanın -2'den küçük olduğu durumlarda ilişkili parametrelerin kötü çözüldüğü, aksi durumda iyi çözüldüğü

görülmektedir. Model ayrımlılık değerleri yakın yüzeyde genellikle yüksektir ve parametreler iyi çözülmüştür. Önceki çalışmalar ile karşılaştırıldığında yüzey tabakasının (lös) her iki algoritma sonucunda da bulunduğu görülmektedir. Düzenli SF algoritması sonucunda, model ayrımlılık değeri derin parametrelerde ve fayın bulunduğu yerlerde düşüktür, buna karşın düzensiz SE algoritması sonucunda bu parametrelerin ayrımlılığı yüksektir. Bu durum fay yerinin önerilen algoritma ile daha iyi bulunduğunu göstermektedir. Ölçülen ve kuramsal veri arasında çakışma her iki algoritma için de kabul edilebilir olduğu Şekil 4.19'de sunulmuştur.



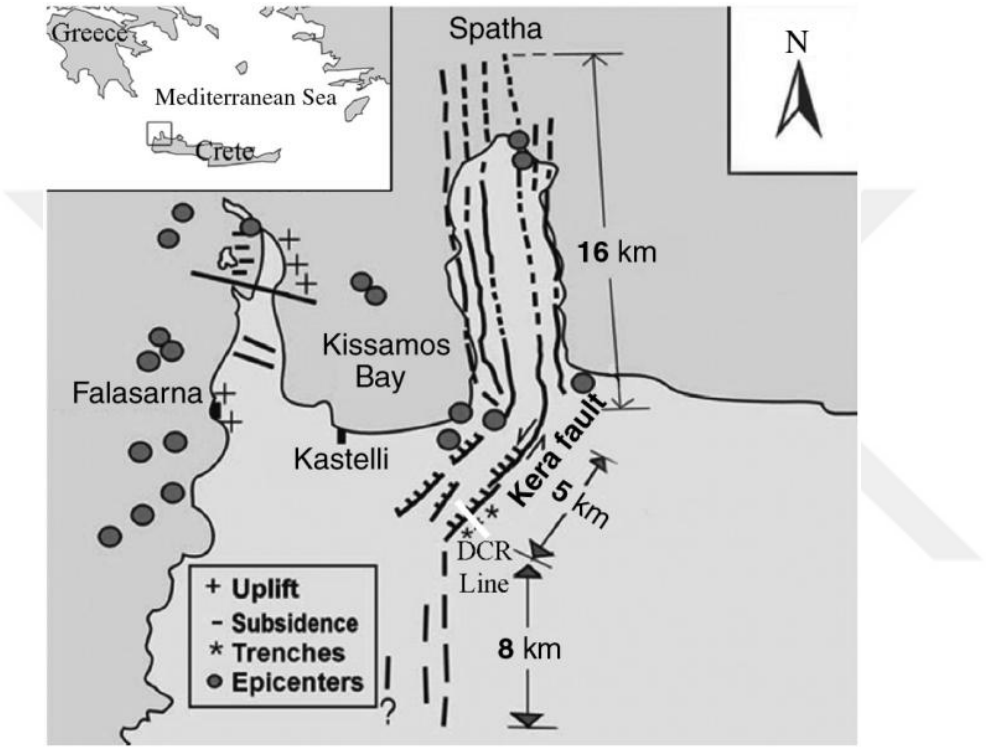
Şekil 4.18 a. b. Şekil 4.17.a, b'de verilen modeller için model ayrımlılık kesitleri (aynı sıra ile)



Şekil 4.19 Kerpen RMT verisi, TE- ve TM- modu ölçülen veri ile düzenli ve düzensiz algoritma ile ters çözüm sonucu elde edilen kuramsal görünür özdirenç ve faz profil eğrileri.

4.7 Gerçek Veri Uygulaması II

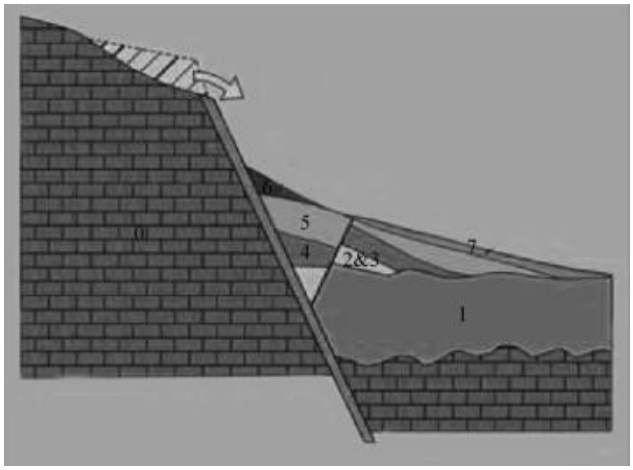
Tez kapsamında değerlendirilen gerçek veri uygulamalarından diğeri, geliştirilen algoritmanın DAÖ ayrık ters çözümünün avantajlarını göstermek amacı ile eklenmiştir. DAÖ verisi, Moisidi vd. (2010) tarafından Yunanistan batı Girit'de, Kasstelli'nin güney doğusunda bulunan, Kera fayının bir kısmını kesecek şekilde toplanmıştır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 Gerçek veri II, çalışma alanı haritası ve DAÖ ölçüm doğrultusu (Moisidi vd. 2010, Demirci vd. 2012)

Beyaz çizgi, DAÖ verisinin toplandığı doğrultuyu göstermektedir

DAÖ verisi 3.5 m. elektrot aralığı ile 24 elektrot kullanılarak ölçülmüştür. 3.5 ve 7 m. dipol aralıkları ile Wenner-Shulumberger elektrot dizilimi kullanılarak 10'ar seviyede ölçülmüştür. DAÖ verilerinin toplandığı doğrultuda, daha önceden Mouslopoulou vd. (2001) tarafından yarma açılarak doğrultunun jeolojik kesit çıkarılmıştır (Şekil 4.21).



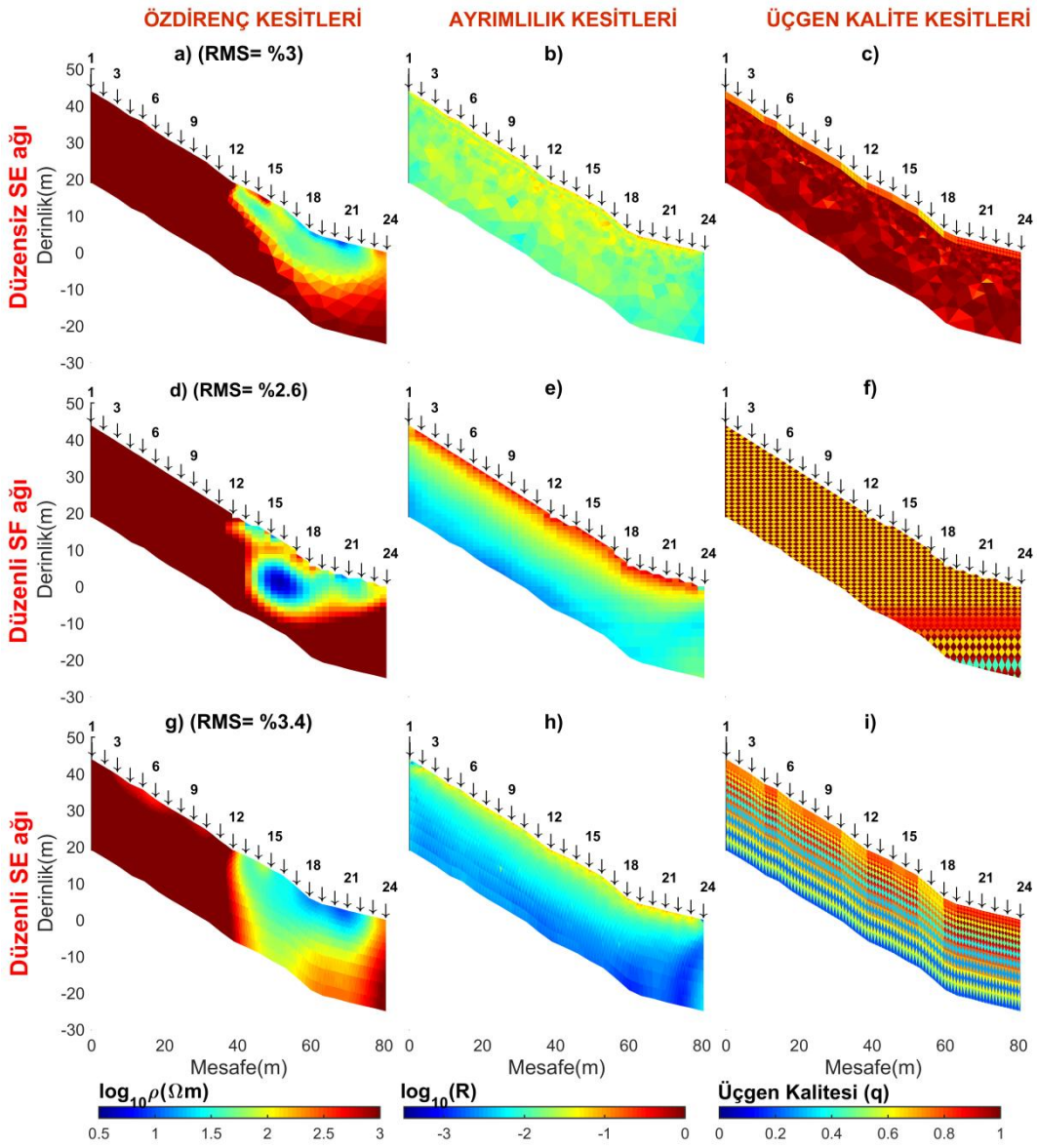
Şekil 4.21 DAÖ doğrultusunda yarma açılarak çıkarılan jeolojik kesit (Mouslopoulou vd. 2001)

Şekil 4.21'de verilen jeolojik kesite göre, fay dolgusu sediman birimler ile dolmuştur (1 ve 7 ile numaralandırılmıştır). Fay yüksek özdirençli (>1000 ohm-m) kalker tabakasını kesmektedir (0 ile numaralandırmıştır). Fay dolgusunu oluşturan sedimanter birimlerin yaklaşık 100 ve 200 ohm.m özdirenci aralığında olduğu ve birimlerin marn, konglomera ve bitkisel toprak örtüsü ve bu birimlerin ardalanmasından oluştuğu tahmin edilmektedir (Demirci vd. 2012).

Ölçülen DAÖ verisi, Demirci vd. (2012) tarafından kendi düzenli ağ ile SF ve SE algoritmalarının karşılaştırılması için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, topoğrafyalı SF algoritmasının sonucunda elde edilen modelde fayın kestiği yüksek özdirençli kalker tabakasının sınırlarını SE algoritmasına göre daha iyi kestirebilmişlerdir. Bu çalışmada geliştirilen algortma ile SE yönteminde gösterilen dezavantajın üstesinden gelindiği gösterilmektedir.

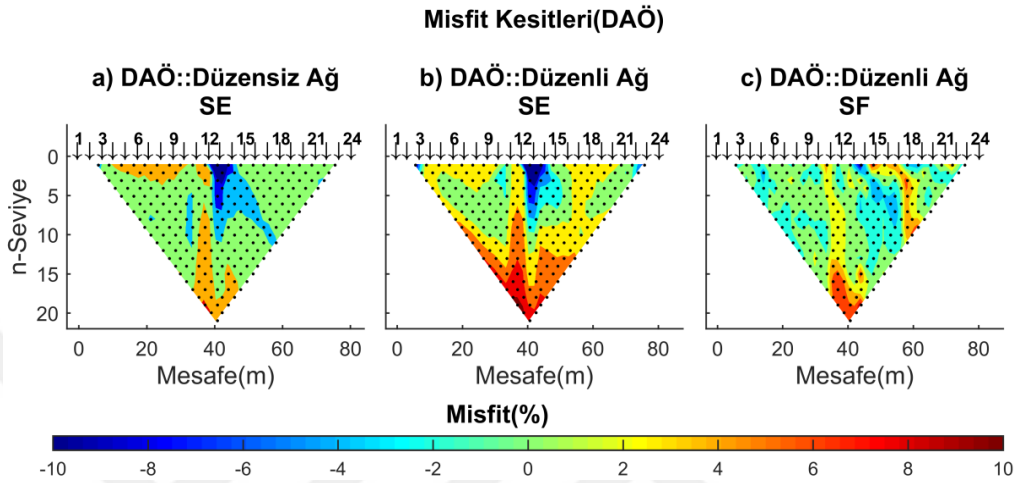
Şekil 4.22'de, bu çalışmada geliştirilen algoritmanın düzenli ve düzensiz parametreleştirme kısmı ile Demirci vd. (2012)'nin sonuçları karşılaştırılmıştır. Onların çalışmalarına benzer şekilde düzenli SF ve SE algoritmaları sonucu elde edilen ters çözüm sonuçları Şekil 4.21'de verilen jeolojik kesit ile karşılaştırıldığında SF algoritmasının derinlerdeki yüksek özdirençli kalker birimini bulabilirken düzenli SE algoritmasının bulamadığı görülmüştür. Şekil 4.22.e, h'de verilen model ayrımlılıkları ve Şekil 4.22.f, i'de verilen üçgen kaliteleri dikkate alındığında, düzenli SE

algoritmasının başarısızlığının sebebinin derinlere doğru düşen ayrımlılık ve üçgen kalitesi olduğu söylenebilir. Ayrımlılığın ve üçgen kalitelerinin yüksek olduğu düzensiz ağ kullanıldığında Şekil 4.22.a'da verilen özdirenç kesiti elde edilmiş ve düzenli SE ağı kullanılması ile bulunamayan yüksek özdirençli kalker biriminin derinlerde gözlemlenebildiği gösterilmiştir.



Şekil 4.22 Kera fayı üzerinde ölçülen DAÖ verilerinin a. b. c. Düzensiz SE d. e. f. düzenli SF ve g. h. i SE kullanan algoritmalar ile ters çözümü sonucu özdirenç kesitleri, model ayrımlılık kesitleri ve üçgen kalite kesitleri

Şekil 4.23'de düzenli ve düzensiz ağ kullanan algoritmalar ile kera fayı üzerinde ölçülmüş DAÖ verileri ters çözmü sonucu, kuramsal ve ölçülen veriler arası misfit kesitleri sunulmuştur. Ölçülen ve kuramsal verileri arası çakışmanın kabuledilebilir olduğu söylenebilir.

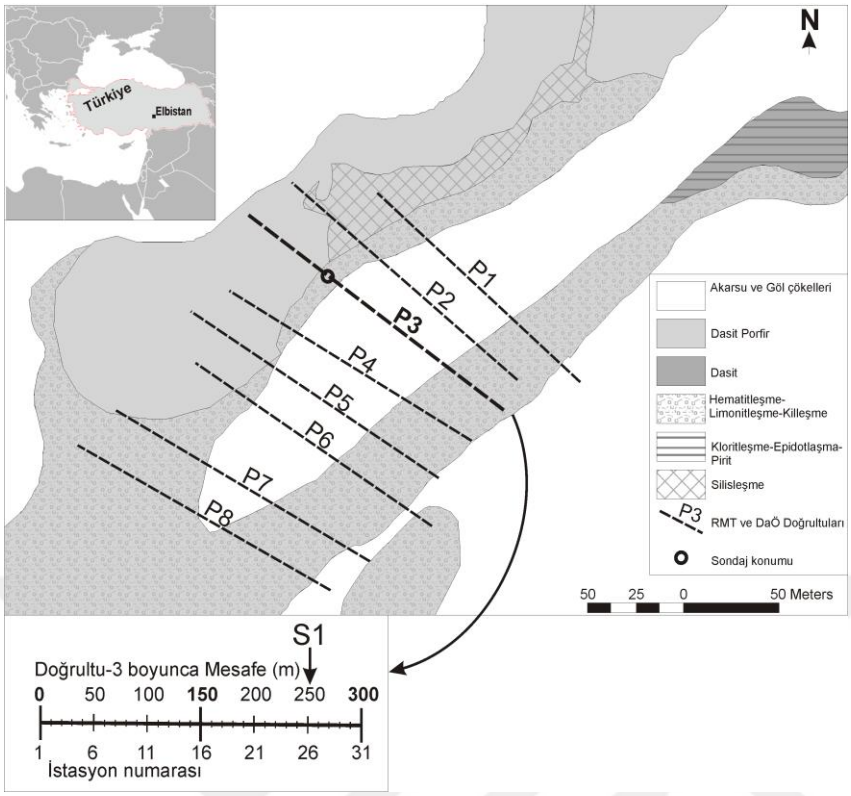


Şekil 4.23 Kera fayı üzerinde ölçülen ve DAÖ verilerinin ters çözümü sonucunda elde edilen kuramsal veri arası Misfit kesitleri

a. b. c. Şekil 4.22.a, g, d modelleri için hesaplanan kuramsal veriler arası görünür özdirenç Misfit kesitleri (verilen sıra ile)

4.8 Gerçek Veri Uygulaması III

Birleşik ters çözüm algoritmasının testi için RMT ve DAÖ verileri Türkiye'nin Güney doğusunda, doğu torosların batı kısmında Kahramanmaraş ili Elbistan ilçesinde yer alan bir sahada ölçülmüştür. RMT yöntemi, kullanılan frekans aralığı düşünüldüğünde genellikle sığ yapıların bulunmasında kullanılmaktadır. RMT verisinde bir maden anomalisini görebilmek için, anomali, RMT frekansları ile tepkisi ölçülecek şekilde sığ olmalıdır. Seçilen arazide bakır madeni hem RMT hem de DAÖ yönteminin araştırma derinliği aralığında olmasından dolayı bu arazi seçilmiştir. RMT frekanslarında bu bölgedeki madenin yataklanma şeklinin görülebileceği ve birleşik ters çözümün avantajları ile düzensiz ağ kullanan yeni algoritmanın avantajlarının test edilebilmesi için ideal bir alandır. Bakır madeninin bu arazide derinlerden sığ kesimlere kadar ulaştığı bilgisi, 2012 yılında yapılan mekanik sondajlardan anlaşılmıştır.



Şekil 4.24 Bakır sahasının jeoloji haritası ve DAÖ ve RMT ölçüm doğrultuları (Bekar 2016)

Arazide madenin sığ kesimlerde olduğunu tahmin ettiğimiz bölgede RMT ve DAÖ verileri 8 profilde toplanmıştır. Bu bölgenin jeoloji haritası ve hatların konumları Şekil 4.24'da verilmiştir. Arazinin jeolojisi incelendiğinde Dasit olarak isimlendirilen kayaç, az altere olan bölümlerde, grimsi yeşilimsi renkte olup porfirik doku göstermektedir. Bu haliyle porfiri tipte bir cevherleşme içermesi muhtemel görünmektedir. Alterasyona uğramış bölümlerde ise gri-beyaz renklidir. Yoğun olarak limonitleşmiş bölgelerde ise sarımsı beyaz renk sunmaktadır. Arazide taze dasitten, altere dasite tedrici olarak geçiş görülmektedir. Alterasyonun yoğunlaşması ile birlikte kuvars dışındaki tüm minerallerin silisleştiği, serizit ve kil minerallerine dönüştüğü belirlenmiştir. Altere dasitler, yer yer breşik görünümlü izlenmektedir (Bekar 2016).

Araziye çıkmadan önce bir tanesi iki önceki bölümde verilen model gibi, modeller tasarlanarak maden yatağının en iyi ve en ucuz şekilde hangi yöntemlerle görüntülenebileceği araştırılmıştır. Bu yüzden bütün profil boyutları yaklaşık olarak 300 m ve DAÖ yönteminde elektrot aralığı 10'ar m, RMT verileri de istasyon aralıkları

10’ar metre olacak şekilde seçilmiştir. DAÖ verileri AMN elektrot dizilimi kullanılarak iki (10 ve 20 m) elektrot aralığı için 7 şer seviyede toplanmıştır. RMT verileri toplamak için yeni geliştirilmiş bir RMT aleti (Tezkan ve Saraev 2008) kullanılmıştır. DAÖ verilerinin toplanması için ise ZONGE firmasının cihazı kullanılmıştır. Bu tezde, toplanan verilerden sadece bir doğrultuya yer verilmiştir. Bu çalışmada sunulacak olan doğrultu seçimi yapılırken, üzerinde mekanik sondaj olmasına dikkat edilmiş ve Profil III, RMT ve DAÖ verilerinin yorumu sunulmuştur. Profil III’de 250. metrede S1 olarak isimlendirilen mekanik sondaj bilgileri mevcuttur ve Şekil 4.25’da litoloji bilgisi verilmiştir. S1 sondajına göre, ilk 0.5m bitkisel toprak, 0.5m ve 8 metre arasında altere dasit, 8 ile 15 metre arasında fillik dasit ve 15-40m arasında potassik dasit vardır. Potasik dasit porfiri dokulu bol pirit içermektedir. Bu yüzden bu kısmın özdirenç kesitlerinde düşük özdirençli bu kısmın kolaylıkla ayırt edileceği düşünülmektedir.

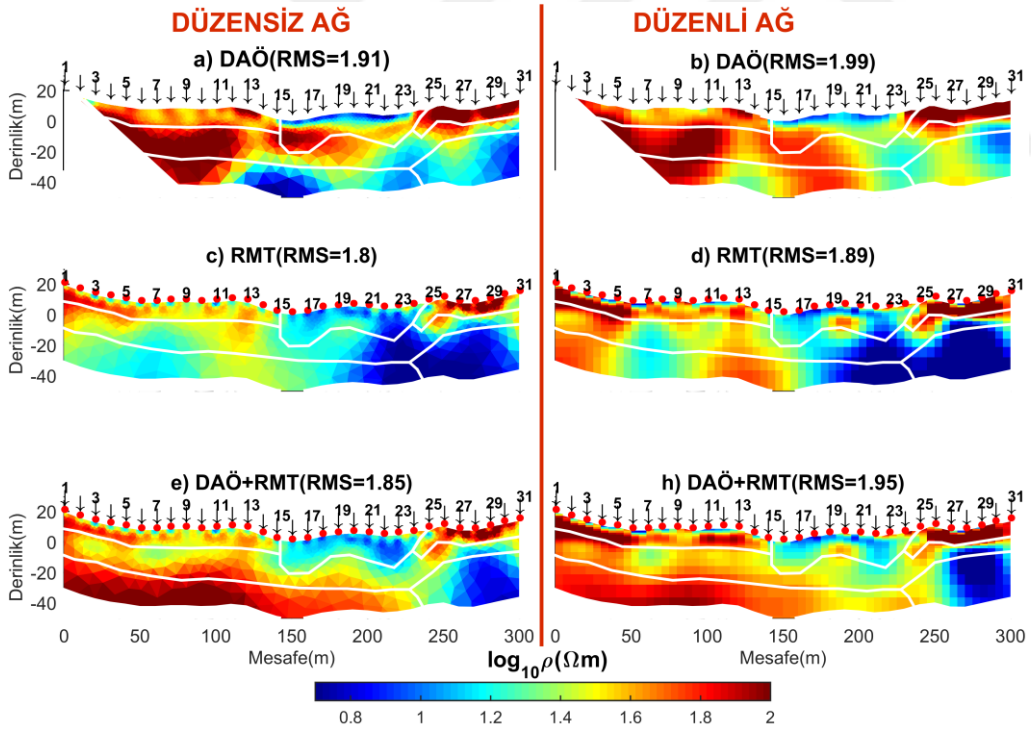


Şekil 4.25 S1 Mekanik sondaj bilgisi

Toplanan verilerin düzensiz ve düzenli ağ kullanan algoritmalar ile ayrık ve birleşik ters çözümleri yapılmıştır. Elde edilen modeller Şekil 4.26’de verilmiştir. Şekil 4.26.a, b de DAÖ verilerinin ters çözümü sunulmuştur. Modellerde iletken ve maden içeren kısımlar genellikle daha derinlerde görülmektedir. Yüzeye yakın kısımlarda özdirenci yüksek olan altere dasit tabakası ve 15. ve 23. istasyonlar arasında kil tabakası görülmektedir. Daha derinlerde tahmin edilen (Beyaz çizgiler ile verilmiştir) fillik dasit tabakasının görülmediği, modelin daha çok yalıtkan derinlerde bulunan altere dasit tabakasının sığlara doğru yoğunlaştığı görülmektedir. Yukarıdaki yapay veri IV örneğinde de benzer şekilde DAÖ verisi ayrık ters çözümünde iki yalıtkan arasında kalan iletken tabaka görülmemiştir. Bu yüzden DAÖ verilerinin ayrık ters çözümünde beklenen sonuç elde edilmiştir. S1 sondajının bulunduğu 25. istasyondan 30. istasyon arasına

odaklanıldığında fillik dasit ardından, daha iletken potassik dasit geldiği için tahmin edilen modele ve sondaj bilgisine daha yakın sonuçlar elde edildiği söylenebilir.

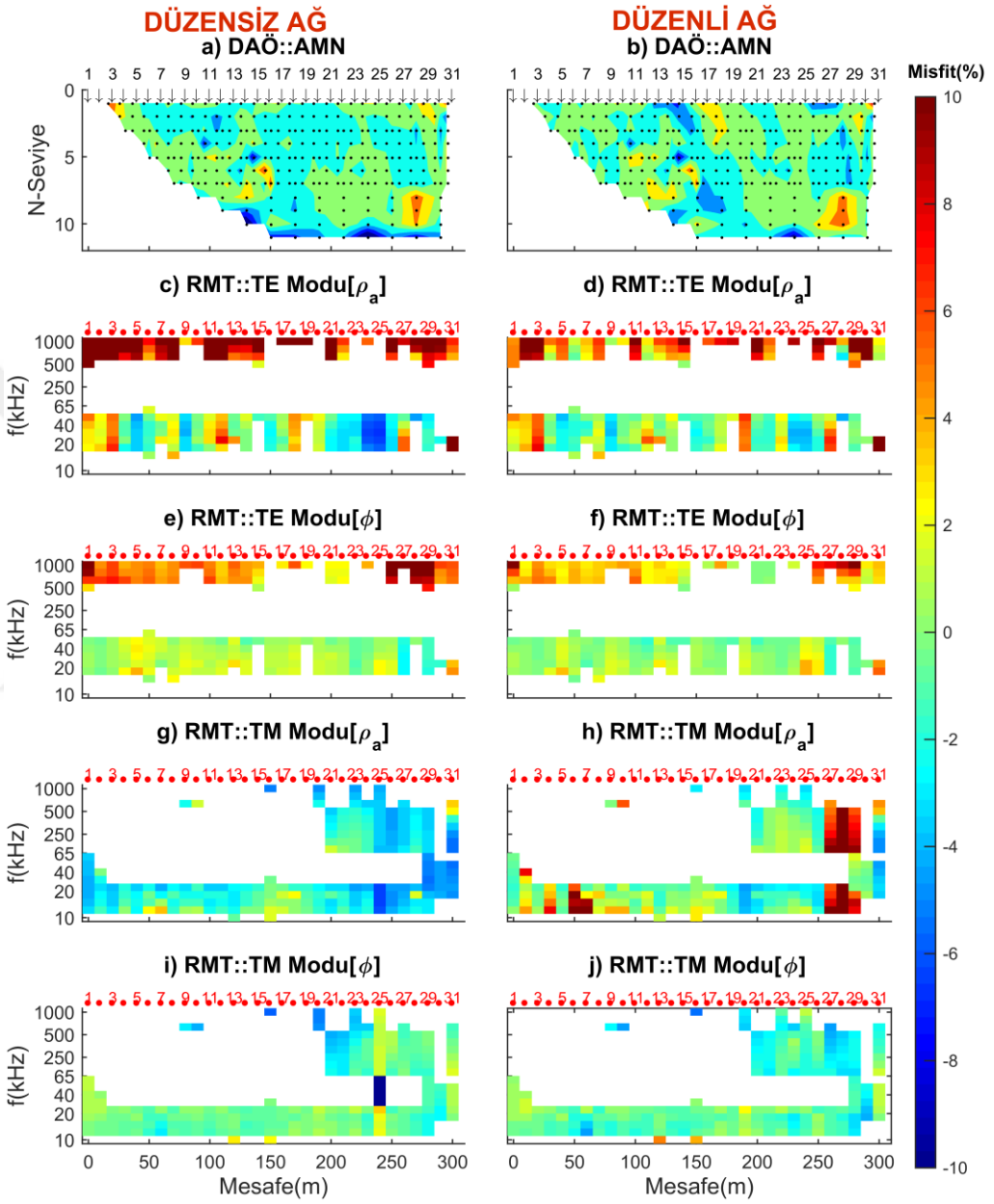
RMT verilerin ayrık ters çözümü Şekil 4.26.c, d'de sunulmaktadır. RMT verisi ters çözümü sonucu bulunan modeller yine yapay veri örneğine benzer şekilde alttaki yalıtkan yapının bulunmasında başarısız kalmıştır. Fakat fillik ve potassik dasit gibi daha iletken yapı sınırların bulunmasında DAÖ yöntemine göre daha başarılır. Şekil 4.26.e, f'de verilen modeller birleşik ters çözüm sonuçlarıdır. Modelden beklenen sınırlar ile karşılaştırıldığında, birleşik ters çözüm sonucu hem iletken hem de yalıtkan yapıların yerlerinin ayırt edilmesinde daha başarılıdır. Özelikle düzensiz ağ kullanan yeni algoritmada kil-fillik dasit sınırı, fillik dasit potasik dasit sınırı açık bir şekilde bulunmuştur. Sondaj bilgileri ile de uyum içerinde olması birleşik ters çözümün, düzensiz ağ ile yapılmasındaki avantajı ve başarısını göstermiştir.



Şekil 4.26 Elbistan verisinin düzensiz ve düzenli ağ algoritmaları ile ters çözümü sonucu elde edilen özdirenç modelleri

a. b. DAÖ ve c. d. RMT verilerinin ayrık ve e. f. birleşik ters çözümü sonucu elde edilen modeller

Şekil 4.27'da ölçülen ve kuramsal veriler arasında hesaplanan Misfit kesitler sunulmaktadır. Misfit değerlerinin veri grupları arasında çakışmanın kabul edilebilir olduğu görülmüştür.



Şekil 4.27 Elbistan verisi ile DAÖ+RMT verileri birleşik ters çözümü sonucu hesaplanan kuramsal veriler arası misfit kesitleri

Şekil 4.26.e, f modelleri için hesaplanan kuramsal veriler arası Misfit kesitleri (verilen sıra ile): a. b. DAÖ verisi görünür özdirenç, RMT TE-modu c. d. görünür özdirenç ve e. f. empedans fazı, TM- modu g. h. görünür özdirenç ve i. j. empedans fazı Misfit kesitleri

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada DAÖ ve RMT verilerinin ayrık ve birleşik ters çözümü için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Yeni algoritmada, hem modellemede model ağının temsil edilmesinde hem de ters çözümde parametreleştirmede düzensiz üçgen parametreler kullanılmıştır. Algoritma bu yönü ile RMT ve DAÖ verilerin birleşik ters çözümü hakkında bir ilk niteliği taşımaktadır. Algoritmanın düz çözüm kısmında SE yöntemi kullanılmıştır. SE yöntemi kullanılarak yapılan düz çözüm algoritmalarının literatürdeki SF algoritmalarına göre zaman bakımından daha yavaş fakat daha hassas hesaplamalar yapılabildiği bilinmektedir. Geliştirilen algoritmada kullanılan düzensiz ağ sayesinde hızlı, SE yöntemi ile modelleme yapılarak da hassas düz çözüm yapılmıştır. Yeni geliştirilen algoritma daha önceden yapılan ve düzenli ağ temelli (Candansayar ve Tezkan 2008) başka bir algoritmayla karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan bütün yapay ve gerçek veriler, her iki algoritma ile yorumlanmıştır. Düzensiz ağ yapısında, üçgenler dikey ve yatay yönde ölçüm doğrultusundan uzaklaştıkça büyümektedir. Böylece ağ kalitesi artarken sayısal hatalar azalmaktadır. Düzenli ağ yapısında, üçgen kalitesiden kaynaklı sayısal hatalar ile orantılı olarak derinlik yönünde parametre çözünürlüğünü düşürdüğü ve topoğrafya basamaklı şekilde temsil edildiği için yeni geliştirilen düzensiz ağ algoritmasına göre parametre çözüm gücü açısından daha zayıftır. Düzensiz ağda azaltılan elemanlar sayesinde aşırı parametreleştirme sorununun da üstesinden gelinerek, parametrelerin ayrımlılığı gelişmektedir. Böylece, yapay modeller dikkate alındığında, düzensiz ağ temelli ters çözüm algoritmada düzenli ağ temelli algoritmalara göre gerçek modele daha yakın özdirenç değerleri elde edilmektedir. Burada üçgen kalitesinin de parametre çözünürlüğü açısından önemli bir etken olduğu görülmüştür.

Düzensiz üçgen eleman kullanılması nedeni ile modellere eklenen yapının şekli ne olursa olsun, model ağındaki elemanların artışı çok fazla olmamaktadır. Fakat düzenli ağda model tasarlanırken, modellerde bulunan yapıların ve topoğrafyanın temsil edilebilmesi için model ağındaki elemanların küçültülmesi gereklidir. Bu yüzden düzensiz ağda kullanılan parametre sayısı düzenli ağa göre daha az olmaktadır ve düz çözümde genel dizey denkleminin elemanları da daha az olur. Böylece ters çözüm

süresi kısalır. Yeni algoritmanın FORTRAN90'da geliştirilmesi de hız açısından büyük bir etkendir.

E ve EM verilerin ayrık yorumu, problemlerin doğası gereği eksik tanımlı olması nedeni ile bazen yer altı iletkenlik dağılımının tam olarak kestirilmesini zorlaştırmaktadır. RMT yöntemi iletken altında kalan yalıtkan ve DAÖ yönteminde yalıtkan altında kalan iletkenin çözümünde başarılı olmadığı görülmüştür. Ayrıca çevresindeki malzemeye göre iletken veya daha yalıtkan antik mezar ve boşluk aramalarında da DAÖ ve RMT verilerinin ayrık ters çözümlerinin sonuç veremeyeceği de görülmüştür. Aynı parametreye duyarlı başka yöntemlerin birleştirilmesi, iletkenlik dağılımının tam olarak bulunabilmesine yardımcı olmaktadır. E ve EM verilerin birleştirilmesi model yorumunu daha doğru ve güvenilir olmasını sağlamaktadır. Bu yüzden, özellikle maden aramalarında ve arkeolojik çalışmalarda RMT ve DAÖ yöntemin birleşik ters çözümü önerilmektedir.

Bu çalışmada algoritmayı test etmek için kullanılan yapay verilerin yanı sıra, bir fay sisteminde ölçülmüş RMT verisi, önerilen algoritma kullanılarak tekrar yorumlanmıştır. Bilinen fay sınırlarının önerilen algoritmada daha açık şekilde bulunmuştur. Ayrıca birleşik ters çözümde düzensiz ağın avantajlarını göstermek için bir bakır sahasında ölçülmüş RMT ve DAÖ verileri, önerilen ve karşılaştırılan algoritmalar ile yorumlanarak, algoritmanın avantajları tartışılmıştır.

Algoritmanın avantajlarına ek olarak, bu tez kapsamında kullanılan yuvarlatıcılı durağanlaştırıcılı düzgünleştiricili ters çözümde, düzensiz ağ için tasarlanmış yeni bir yuvarlatma dizey formatı önerilmiştir. Bu yuvarlatma dizeyinde üçgen parametrelerin çevre uzunlukları da hesaba katılmıştır. Uygulamalarda önerilen yeni yuvarlatma dizeyi sayesinde, düzensiz üçgenlerin aşırı büyümesinden kaynaklanan parametre ayrımlılığının azalması probleminin önüne geçilmiştir.

KAYNAKLAR

Abubakar, A., Li, M., Pan, G., Liu, J. and Habashy, T. M. 2011. Joint MT and CSEM data inversion using a multiplicative cost function approach. Geophysics, 76(3); F203-F214.

Anderson, E., Bai, Z., Bischof, C., Blackford, L. S., Demmel, J., Dongarra, J. and Sorensen, D. 1999. LAPACK Users' guide. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Bank, R.E. 1990. PLTMG: A Software Package for Solving Elliptic Partial Differential Equations, User's Guide 6.0, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA.

Bastani, M., Malehmir, A., Ismail, N., Pedersen, L.B. and Hedjazi, F. 2009. Delineating hydrothermal stockwork copper deposits using controlled-source and radio-magnetotelluric methods: A case study from northeast Iran. Geophysics, 74(5); B167-B181.

Behroozmand, A.A., Auken, E., Fiandaca, G. and Christiansen, A.V. 2012. Improvement in MRS parameter estimation by joint and laterally constrained inversion of MRS and TEM data. Geophysics, 77(4); WB191-WB200.

Bekar, K. 2016. Hüyüklü (Kahramanmaraş - Afşin) sahasinin sülfür potansiyelinin jeofizik (Gravite-Manyetik ve IP) Araştirmasi. Doğal Kay. ve Eko. Bült. 21, 95-104.

Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. and Pozdnjakova, E.E. 1998. On two-dimensional interpretation of magnetotelluric soundings. Geophysical Journal International, 133(3); 585-606.

Buland, A. and Kolbjørnsen, O. 2012. Bayesian inversion of CSEM and magnetotelluric data. Geophysics, 77(1); E33-E42.

Brameller, A., Allan, R.N. and Hamam, Y.M. 1976. Sparsity. Pitman, New York.

Candansayar, M.E. 1997. Doğru akım özdirenç yönteminde modelleme ve iki-boyutlu sığ yapıların aranmasında elektrod dizilimlerinin ayrımlılıklarının karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Candansayar, M.E. 2002. Sönümlü En-Küçük Kareler Ve Eşlenik Türev Algoritmalarının Ardışık Kullanımı İle Manyetotellürik Verilerin Düzgünleştiricili İki-Boyutlu Ters Çözümü. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Candansayar, M.E. and Tezkan, B. 2006. A comparison of different radiomagnetotelluric data inversion methods for buried waste sites. Journal of applied geophysics, 58(3); 218-231.

Candansayar, M.E. 2008. Two dimensional individual and joint inversion of three-and four-electrode array dc resistivity data. Journal of Geophysics and Engineering, 5(3); 290.

Candansayar, M.E. and Tezkan, B. 2008. Two dimensional joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data. Geophysical Prospecting, 56(5); 737-749.

Candansayar, M.E., Başokur, A.T., Tezkan, B., Özyıldırım, Ö., Adrian, J., Gündoğdu, N.Y. ve Demirel C. 2014 Radyomanyetotellurik, doğru akım özdirenç ve yapay uçlaşma verilerinin iki boyutlu birleşik yorumu; bir maden arama örneği. TÜBİTAK Proje No: 110Y343; Ankara.

de Lugão, P.P. and Wannamaker, P.E. 1996. Calculating the two-dimensional magnetotelluric Jacobian in finite elements using reciprocity. Geophysical Journal International, 127(3); 806-810.

de Lugão, P.P., Portniaguine, O. and Zhdanov, M.S. 1997. Fast and stable two-dimensional inversion of magnetotelluric data. Journal of geomagnetism and geoelectricity, 49(11-12); 1469-1497.

deGroot-Hedlin, C. and Constable, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. Geophysics, 55(12); 1613-1624.

Demirci, İ. 2009. Sonlu farklarda üçgen gridler kullanarak doğru akım özdirenç ve manyetotellürik iki-boyutlu ters çözüme topoğrafya etkisinin eklenmesi. Yüksek lisans tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Demirci, İ. and Candansayar, M.E. 2010. Two dimensional inversion of magnetotelluric and radiomagnetotelluric data incorporating topography by using finite difference method with triangle cells. IAGAWG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop.

Demirci, İ., Erdoğan, E. and Candansayar, M.E. 2012. Two-dimensional inversion of direct current resistivity data incorporating topography by using finite difference techniques with triangle cells: Investigation of Kera fault zone in western Crete. Geophysics, 77(1); E67-E75.

Demirci, İ., Candansayar, M.E., Vafidis, A. and Soupios P. 2017. Two dimensional joint inversion of direct current resistivity, radio-magnetotelluric and seismic refraction data: An application from Bafra Plain, Turkey. Journal of Applied Geophysics, 139, 316-330

Dey, A. and Morrison, H.F. 1979. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. Geophysics, 44(4); 753-780.

Erdoğan, E. 2009. Doğru akım özdirenç ve manyetotellürik yöntemlerde sonlu elemanlar ile iki-boyutlu düz çözüme topoğrafya etkisinin eklenmesi. Yüksek lisans tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Franke, A., Börner, R.U. and Spitzer, K. 2007. Adaptive unstructured grid finite element simulation of two dimensional magnetotelluric fields for arbitrary surface and seafloor topography. Geophysical Journal International, 171(1); 71-86.

Günther, T., Rücker, C. and Spitzer, K. 2006. Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography—II. Inversion. Geophysical Journal International, 166(2); 506-517.

Haber, E. and Oldenburg, D. 2000. A GCV based method for nonlinear ill-posed problems. Computational Geosciences, 4(1); 41-63.

Jupp, D.L. and Vozoff, K. 1977. Two-dimensional magnetotelluric inversion. Geophysical Journal International, 50(2); 333-352.

Karlık, G. and Kaya, M.A. 2001. Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: a case study from Isparta, Turkey. Environmental Geology, 40(6); 725-731.

Key, K. and Weiss, C. 2006. Adaptive finite-element modeling using unstructured grids: The 2D magnetotelluric example. Geophysics, 71(6); G291-G299.

Key, K. 2016. MARE2DEM: a 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data. Geophysical Journal International, 207(1); 571-588.

Lelièvre, P.G. and Farquharson, C.G. 2013. Gradient and smoothness regularization operators for geophysical inversion on unstructured meshes. Geophysical Journal International, 195, 330-341.

Li, Y. and Pek, J. 2008. Adaptive finite element modelling of two-dimensional magnetotelluric fields in general anisotropic media. Geophysical Journal International, 175(3); 942-954.

Linde, N. and Pedersen, L.B. 2004. Characterization of a fractured granite using radio magnetotelluric (RMT) data. Geophysics, 69(5); 1155-1165.

Loke, M.H. 1994. The inversion of two-dimensional resistivity data. Ph.D. Thesis. University of Birmingham, Birmingham.

Mackie, R.L. and Madden, T.R. 1993. Three-dimensional magnetotelluric inversion using conjugate gradients. Geophysical Journal International, 115(1); 215-229.

McCalpin, J.P. 1996, Paleoseismology. Academic Press.

McGillivray, P.R., Oldenburg, D.W., Ellis, R.G. and Habashy, T. M. 1994. Calculation of sensitivities for the frequency-domain electromagnetic problem. Geophysical Journal International, 116(1); 1-4.

Meqbel, N. and Ritter, O. 2015. Joint 3D inversion of multiple electromagnetic datasets. Geophysical Prospecting, 63(6); 1450-1467.

Menke, W. 1989, Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic Press.

Moisidi, M., Kershaw, S., Rust, D., Collins, P., Soupios, P. and Vallianatos, F. 2010. Geological and electrical resistivity tomography surveys applied to model the tectonic environment of the Kastelli-Kissamou basin, northwestern Crete, Greece. Proceedings of the 5th IASME/WSEAS International Conferences On Water Resources, Hydraulics and Hydrology.

Mouslopoulou, V., Andreou, C., Atakan, K. and Fountoulis, I. 2001. Paleoseismological investigations along the Kera fault zone, western Crete: Implications for seismic hazards assessment. Proceedings of the 9th International Congress, Bulletin of the Geological Society of Greece.

Newman, G.A. and Alumbaugh, D.L. 1997. Three-dimensional massively parallel electromagnetic inversion—I. Theory. Geophysical journal international, 128(2); 345-354.

Newman, G.A., Recher, S., Tezkan, B. and Neubauer, F.M. 2003. 3D inversion of a scalar radio magnetotelluric field data set. Geophysics, 68(3); 791-802.

Oldenburg, D. 1990. Inversion of electromagnetic data: An overview of new techniques. Surveys in Geophysics, 11(2); 231-270.

Özyıldırım, Ö., Candansayar, M.E., Demirci, İ. and Tezkan, B. 2017. Two dimensional inversion of MT/RMT data by using unstructured mesh. Geophysics, 82(4); E197-E210

Pedersen, L.B., Bastani, M. and Dynesius, L. 2005. Groundwater exploration using combined controlled-source and radiomagnetotelluric techniques. Geophysics, 70(1); G8-G15.

Pellerin, L. 2002. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations. Surveys in Geophysics, 23(2-3); 101-132.

Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T. 1986. Numerical recipes.

Rao, S.S. 2010. The finite element method in engineering. Elsevier.

Ren, Z. and Tang, J. 2010. 3D direct current resistivity modeling with unstructured mesh by adaptive finite-element method. Geophysics, 75(1); H7-H17.

Rijo, L. 1977. Modeling of electric and electromagnetic data. Ph. D. Thesis, University of Utah, Salt Lake City, 242 p.

Rodi, W. and Mackie, R.L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. Geophysics, 66(1); 174-187.

Rose, D.J. and Willoughby, R.N. 1972. Sparse Matrix and its Applicatios. Plenum Pres, New York.

Santos, F.A.M., Afonso, A.R.A. and Dupis, A. 2006. 2D joint inversion of dc and scalar audio-magnetotelluric data in the evaluation of low enthalpy geothermal fields. Journal of Geophysics and Engineering, 4(1); 53.

Sasaki, Y. 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. Geophysics, 54(2); 254-262.

Sasaki, Y., Yi, M.J. and Choi, J. 2014. 2D and 3D separate and joint inversion of airborne ZTEM and ground AMT data: Synthetic model studies. Journal of Applied Geophysics, 104, 149-155.

Schenk, O. and Gärtner, K. 2004. Solving Unsymmetric sparse systems of linear equations with PARDISO. Journal of Future Generation Computer Systems, 20(3); 475-487.

Schenk, O. and Gärtner, K. 2006. On fast factorization pivoting methods for sparse symmetric indefinite systems. Electronic Transactions on Numerical Analysis, 23(1); 158-179.

Schenk, O. and Gärtner, K. 2014. PARDISO user's guide version 5.0.0.

Shewchuk, J. 1996. Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator. Applied computational geometry towards geometric engineering, 203-222.

Spitzer, K. 1998. The three dimensional DC sensitivity for surface and subsurface sources. Geophysical Journal International, 134(3); 736-746.

Siripunvaraporn, W. and Egbert, G. 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. Geophysics, 65(3); 791-803.

Stiefelhagen, W. and Müller, I. 1997. Radio Frequency Electromagnetics (RF-EM) Extended VLF Applied to Hydrogeology. May 1997, 59th EAGE Conference and Exhibition.

Streich, R., 2003. Geophysical prospecting of suspected Holocene fault activity in the Lower Rhine Embayment. Ph.D. thesis, Potsdam University.

Şimşek, Ş., Yıldırım, N. and Gülgör, A. 2005, Developmental and environmental effects of the Kızıldere geothermal power project, Turkey. Geothermics, 34, 234–251,

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. 1990. Applied geophysics (Vol. 1). Cambridge university press.

Tezkan, B., Goldman, M., Greinwald, S., Hördt, A., Müller, I., Neubauer, F.M. and Zacher, G. 1996. A joint application of radiomagnetotellurics and transient

electromagnetics to the investigation of a waste deposit in Cologne (Germany). Journal of Applied Geophysics, 34(3); 199-212.

Tezkan, B., Hördt, A. and Gobashy, M. 2000. Two-dimensional radiomagnetotelluric investigation of industrial and domestic waste sites in Germany. Journal of Applied Geophysics, 44(2); 237-256.

Tezkan, B., Georgescu, P. and Fauzi, U. 2005. A radiomagnetotelluric survey on an oil- contaminated area near the Brazi Refinery, Romania. Geophysical Prospecting, 53(3); 311-323.

Tezkan, B. and Saraev, A. 2008. A new broadband radiomagnetotelluric instrument: applications to near surface investigations. Near Surface Geophysics, 6(4); 245-252.

Tikhonov, A.N. and Arsenin, V.Y. 1977. Solution of ill-posed problems. VH Winston, Washington DC., 258 p.

Tullen, P., Turberg, P. and Parriaux, A. 2006. Radiomagnetotelluric mapping, groundwater numerical modelling and 18-Oxygen isotopic data as combined tools to determine the hydrogeological system of a landslide prone area. Engineering geology, 87(3); 195-204.

Turberg, P., Müller, I. and Flury, F. 1994. Hydrogeological investigation of porous environments by radio magnetotelluric-resistivity (RMT-R 12–240 kHz). Journal of Applied Geophysics, 31(1-4); 133-143.

Tripp, A.C., Hohmann, G.W. and Swift Jr, C. M. 1984. Two-dimensional resistivity inversion. Geophysics, 49(10); 1708-1717.

Van Beusekom, A.E., Parker, R.L., Bank, R.E., Gill, P.E. and Constable, S. 2011. The 2-D magnetotelluric inverse problem solved with optimization. Geophysical Journal International, 184(2); 639-650.

Weaver, J.T. and Brewitt-Taylor, C.R. 1978. Improved boundary conditions for the numerical solution of E-polarization problems in geomagnetic induction. Geophysical Journal International, 54(2); 309-317.

Weaver, J.T., Le Quang, B.V. and Fischer, G. 1985. A comparison of analytic and numerical results for a two-dimensional control model in electromagnetic induction-I. B-polarization calculations. Geophysical Journal International, 82(2); 263-277.

Weaver, J.T., LeQuang, B.V. and Fischer, G. 1986. A comparison of analytical and numerical results for a 2-D control model in electromagnetic induction-II. E-polarization calculations. Geophysical Journal International, 87(3); 917-948.

Weaver, J.T. 1994. Mathematical methods for geo-electromagnetic induction (Vol. 7). Research Studie.

Wiik, T., Hokstad, K., Ursin, B. and Mütschard, L. 2013. Joint contrast source inversion of marine magnetotelluric and controlled-source electromagnetic data. Geophysics, 78(6); E315-E327.

Yi, M.J. and Sasaki, Y. 2015. 2-D and 3-D joint inversion of loop–loop electromagnetic and electrical data for resistivity and magnetic susceptibility. Geophysical Journal International, 203(2); 1085-1095.

Yogeshwar, P., Tezkan, B., Israil, M. and Candansayar, M.E. 2012. Groundwater contamination in the Roorkee area, India: 2D joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data. Journal of Applied Geophysics, 76, 127-135.

Zacher, G., Tezkan, B., Neubauer, F.M. and Hordt, A. Muller. I. 1996. Radiomagnetotelluric; a powerful tool for waste-site exploration. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1, 139-159.

Zacher, G., Tezkan, B., Neubauer, F.M. and Zilkens, J. 1996. Application of radiomagnetotellurics to archaeology–reconstruction of a monastery in volkenroda (Thuringia); extended abstract. In 2nd Meeting, Environmental and Engineering Geophysical Society, Nantes (212-215).

Zhdanov, M.S. 1993. Tutorial: Regularization in inversion theory. Colorado School of Mines.

EKLER

EK 1 Algoritma Kullanıcı Ara-yüzü, Model Ağının Üçgen Elemanlara Ayrılması, Parametre Uzayı ve Algoritma Giriş Dosyaları 84

EK 2 Genel Dizey Denkleminin (Kv=S) Elde Edilmesi ve CSR formatı 94

EK 3 RMT ve DAÖ 2-B Düz Çözüm Algoritmalarının Analitik Çözüm ve Diğer Bilinen Düz Çözüm Algoritmaları ile Karşılaştırılması 98

EK 4 İngilizce Terimlerin Türkçe Karşılıkları 112

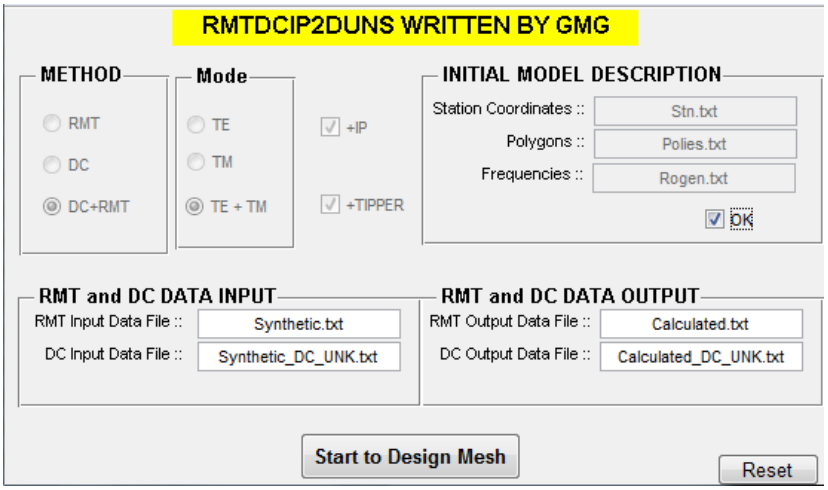
EK 1 Algoritma Kullanıcı Ara-yüzü, Model Ağının Üçgen Elemanlara Ayrılması, Parametre Uzayı ve Algoritma Giriş Dosyaları

Tezde yer alan EK 1-3 bölümleri tezin desteklendiği TÜBİTAK 110Y343 no'lu proje raporundan (Candansayar vd. 2014) alınmıştır.

a. Algoritma Kullanıcı Ara-yüzü

MATLAB' da ağ tasarlamanın yanı sıra, FORTRAN90 'da geliştirilen algoritma için modeli ve ters çözüm giriş parametrelerini okuyan ve kullanıcıya kolaylık sağlamak için yapılan bir ara-yüz program yazılmıştır. Ara-yüzde modelleme ve ters çözüm yapılabilmesi için gerekli olan giriş parametreleri ve tasarlanan ağ, 'txt' uzantılı dosyaya yazdırılıp, FORTRAN90 'da yazılan algoritma tarafından okutulmaktadır. Algoritmanın bu şekilde yapılmasının sebebi, MATLAB 'da yazılan kullanıcı ara-yüzlü algoritmadan 'exe' olarak çağırmak ve kullanıcıya kolaylık sağlamaktır.

Aşağıda, yazılan ara-yüzün görüntüsü sunulmaktadır. Şekilde, giriş modeli tanımlama kısmında giriş olarak verilen dosya isimlerinin açıklamasına EK 2.c'den bakılabilir. Diğer giriş parametreleri, ters çözüm veya modellemede hangi metodun ve hangi modun kullanılacağı, YU verilerinin ve TIPPER(H_z/H_x) büyüklüğünün eklenip eklenmeyeceği ve RMT ve DAÖ veri giriş ve çıkış dosyalarının ismini göstermektedir.

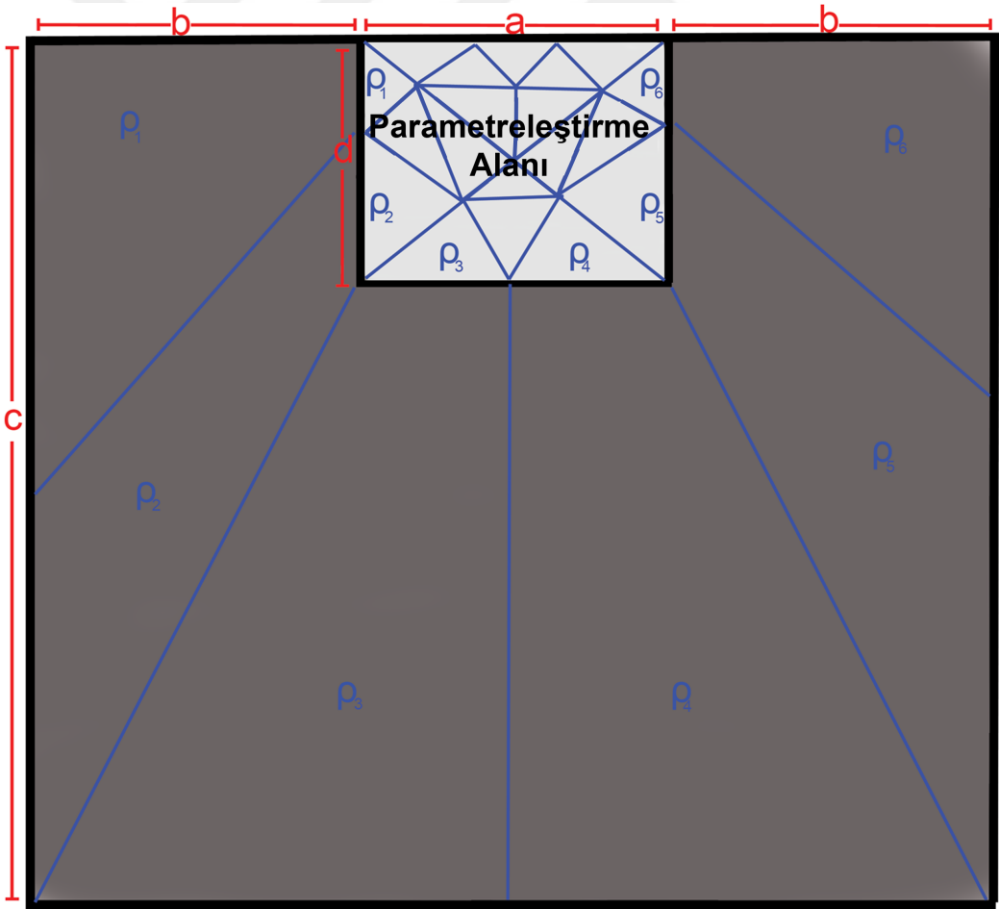


Şekil 1 Giriş parametrelerinden model ağı oluşturmak için yazılan MATLAB ara-yüzü.

b. Model Ağının Üçgen Elemanlara Ayrılması ve Parametreleştirme Alanı

Algoritma modeli tanımlayan giriş dosyalarından model parametrelerini okuyarak ters çözüm veya modelleme için gerekli model ağını tasarlamaktadır. Ağ tasarlama işlemi izleyen kısımda açıklanmaktadır.

Model ağı, iki bölüme ayrılır (EK1 Şekil 2). Bunun sebebi, ters çözümde sadece profil altında kalan kısmın parametreleştirilmesidir. Ters Çözümde Parametreleştirme alanında bulunan her bir üçgen eleman, parametre olarak çözülmektedir. Diğer kısımlarda bulunan üçgenlerin özdirençleri, parametreleştirme alanının kenarlarında bulunan üçgen parametrelerin özdirençlerine göre değer alır. Özdirenç değerlerinin atanması sembolik olarak EK 1 şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2 Model ağı sınırlarının hesabı ve Parametreleştirme alanı

EK 1 şekil 2'de iki bölüme ayrılan model ağı gösterilmektedir. Burada yapay sonsuz sınırlar profil boyuna bağlı olarak değiştirilmiştir EK 1 şekil 2'de profil boyu 'a' olarak verilmektedir. Diğer sınırlar a'ya bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$b = 50a \text{ ve } c = 200a \tag{1.1}$$

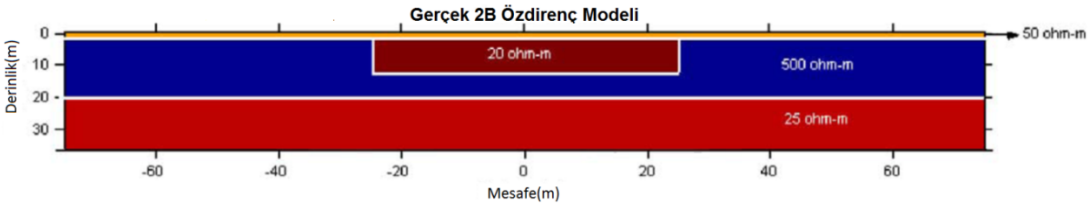
Yapay sonsuz sınırlarda üçgenlerin çok küçük veya aşırı büyük alanlara yayılmasını engellemek için MATLAB komutu olan 'initmesh' kullanılmıştır. Böylece üçgenlerin sınırlarda alabileceği maksimum alan değeri ve üçgenlerin büyüme oranı kolaylıkla ayarlanabilmektedir.

Model ağı oluşturulmasında en önem arz eden kısmı ise şekilde gösterilerilen 'd' uzunluğunun belirlenmesidir. Genellikle minimum frekansa bağlı olarak eşitlik 1.2'ye göre ayarlandığında modelleme ve ters çözümde hiçbir problemle karşılaşılmamıştır. Ayrıca uzunluğu, kullanıcı tarafından da belirlenebilir.

$$\mathrm{d} = 503.2\sqrt{\rho_{\mathrm{ort}}/\mathrm{f}_{\mathrm{min}}} \tag{1.2}$$

burada, ρ_{ort} , ortamın ortalama özdirenç değerini, f_{min}, ise minimum frekans değerini ifade etmektedir.

Düzensiz ağ oluşturma işlemi, bir örnek üzerinden aşağıda, Candansayar ve Tezkan (2006)'ın geliştirdikleri ters çözüm algoritmasını denemek için kullandıkları model (EK 1 Şekil 1) tasarlanarak anlatılmıştır.



Şekil 3 Tasarlanmak istenen 2-B özdirenç modeli (Candansayar ve Tezkan 2006)

Modeli düzensiz ağ ile tasarlamak için, istasyon koordinatlarını içeren 'Stn.txt' dosyası, model içerisindeki yapı sınırlarının poligon şeklinde saklandığı 'Polies.txt' dosyası ve düz çözümde kullanılan frekansları içeren 'Rogen.txt' dosyası hazırlanmalıdır. Dosyaların içerdiği bilgilere EK 2.c'den bakılabilir. Algoritmada MATLAB'da 'initmesh' komutu programda aşağıdaki gibi çağırılmaktadır.

```
[p,e,t]=initmesh(dl1,'hmax',abs(min(min(pdegd)))/6,'Hgrad',1.3);
```

Şekil 4 SE ağı oluşturulması için kullanılan komut

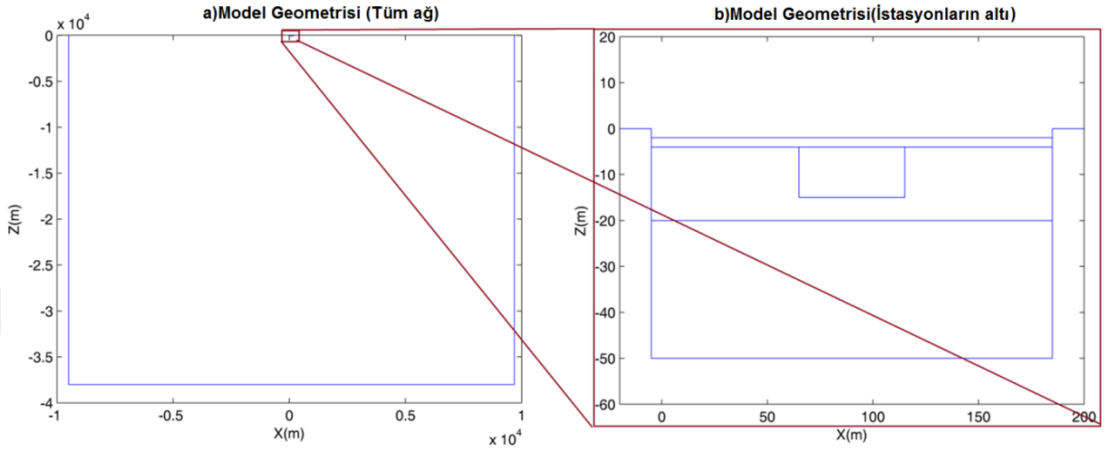
Burada çıkış parametresi p, komut ile oluşturulan ağda üçgenlerin x- ve z- koordinatları, e, üçgen kenarlarını tanımlayan dizey ve t dizeyi ise üçgenlerin nokta numarasını tanımlayan dizeydir. Oluşturulan çıkış parametreleri, SE ile modelleme ve ters çözümde istediğimiz bilgileri içermektedir. Giriş parametresi 'hmax' ın ardından gelen değer, sınırlarda maksimum üçgen kenar boyutunu tanımlamaktadır. 'Hgrad' ın ardından gelen değer, ise ağda üçgenlerin büyüme oranını tanımlamaktadır. Böylece üçgenlerin anormal şekilde büyümesi engellenmektedir. dl11, ağın geometrik özelliğini tanımlayan dizeydir ve geometri tanımlama fonksiyonu (geometry specification function) olarak isimlendirilmektedir. Aşağıdaki komut ile oluşturulmaktadır. Burada giriş parametresi 'pdegd' dizeyinin düzgün bir şekilde oluşturulması önemlidir. 'pdegd', geometri açıklama dizeyi (Geometry Description Matrix) olarak isimlendirilir. Dizey, ağ içerisindeki tanımlanan poligonların ve modelin sınırlarını x- ve z- koordinatı olarak saklamaktadır.

```
[dl1,bt1,pdedl,bt,msb]=decsg(pdegd)
```

Şekil 5 Geometriyi tanımlayan dizeyi oluşturan komut

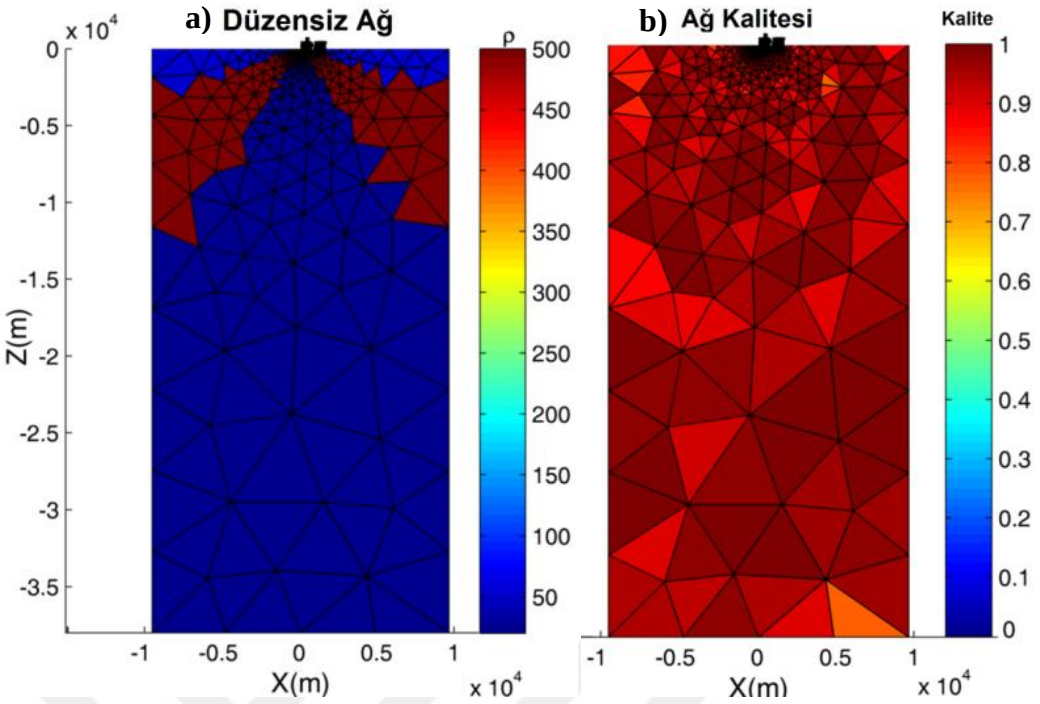
EK 1 şekil 3'de gösterilen örnek model için tanımlanan geometri dizeyi çizdiğinde ağ geometrisi EK 1 şekil 6'da ki gibi olur. EK 1 şekil 6.a, Tüm ağın geometrisini, EK 1 şekil 6.b ise parametreleştirme alanını göstermektedir. EK 1 şekil 6.b'de modelin

üstünde bulunan boşluk düzensiz ağ oluşturma kısmından bağımsızdır ve bu kısımda düzenli ağ oluşturulmaktadır. Profil alanının üs kısmında oluşturulan düzenli üçgenlerin sebebi, ikincil elektrik ve manyetik alan değerlerinin sayısal türev alma yöntemiyle kolaylıkla hesaplanmaya çalışılmasıdır.



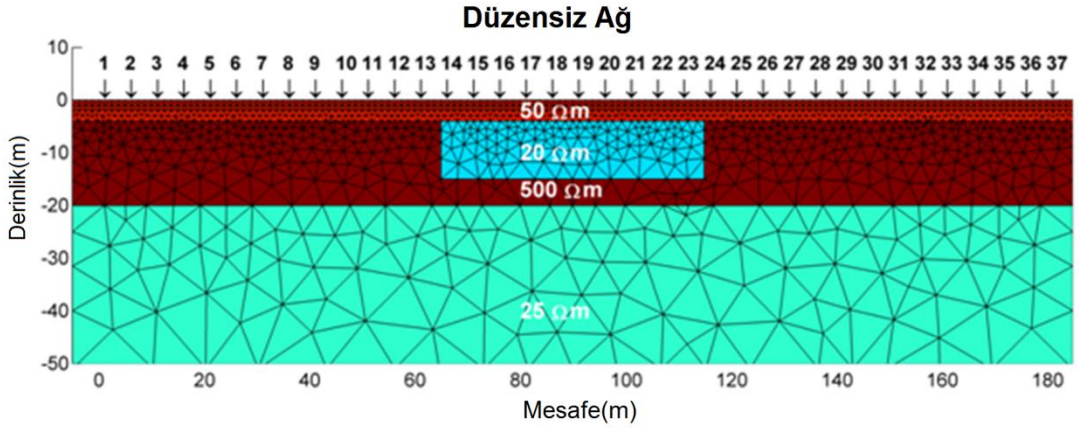
Şekil 6 a. Tüm ağın geometrisi, b. parametreleştirme alanının geometrisi.

Model ağının geometrisinin oluşturulduktan sonra EK 1 şekil 4'de gösterilen komut ile alan düzensiz üçgenlere ayrılmaktadır. EK 1 şekil 7.a, şekil 8'de oluşturulan SE ağının, hepsinin ve parametreleştirme alanının görüntüsü sunulmaktadır. EK 1 şekil 8.b'de tüm ağın üçgen kaliteleri EK 1 şekil 9'da ise parametreleştirme alanının üçgen kaliteleri sunulmaktadır. Ağda bulunan çok küçük üçgenlerin orantısız şekilde aniden büyümesi de yuvarlatma hatasına neden olur. Bu koşullar algoritmada kontrol altına alınmıştır.

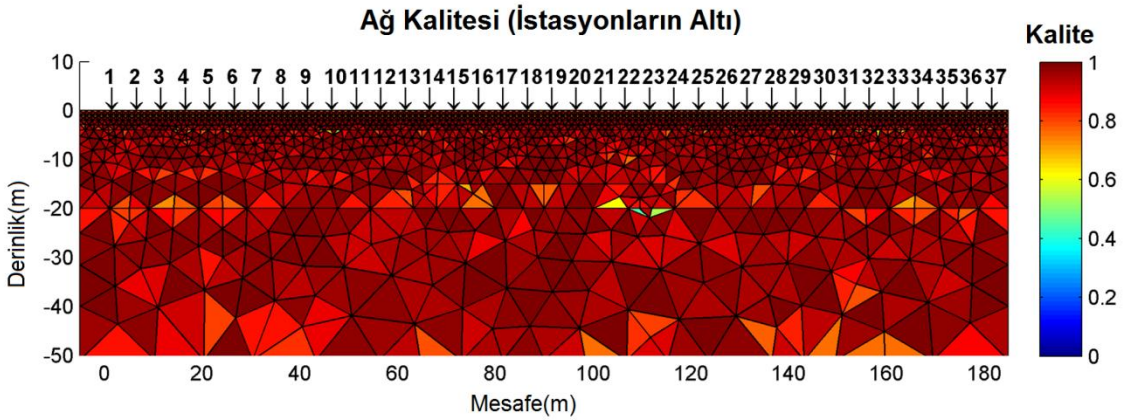


Şekil 7 a. Tasarlanan SE ağı (Tüm ağ) ve b. üçgen kalitesi

EK 1 şekil 7.a'da tüm ağda, özdirenç değerleri yapay sonsuz sınırlara doğru büyüyerek değişmektedir. Özdirenç değerlerinin değişimi, EK 1 şekil 8'de gösterilen modelin sınırlarındaki özdirenç değerlerinin yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir.

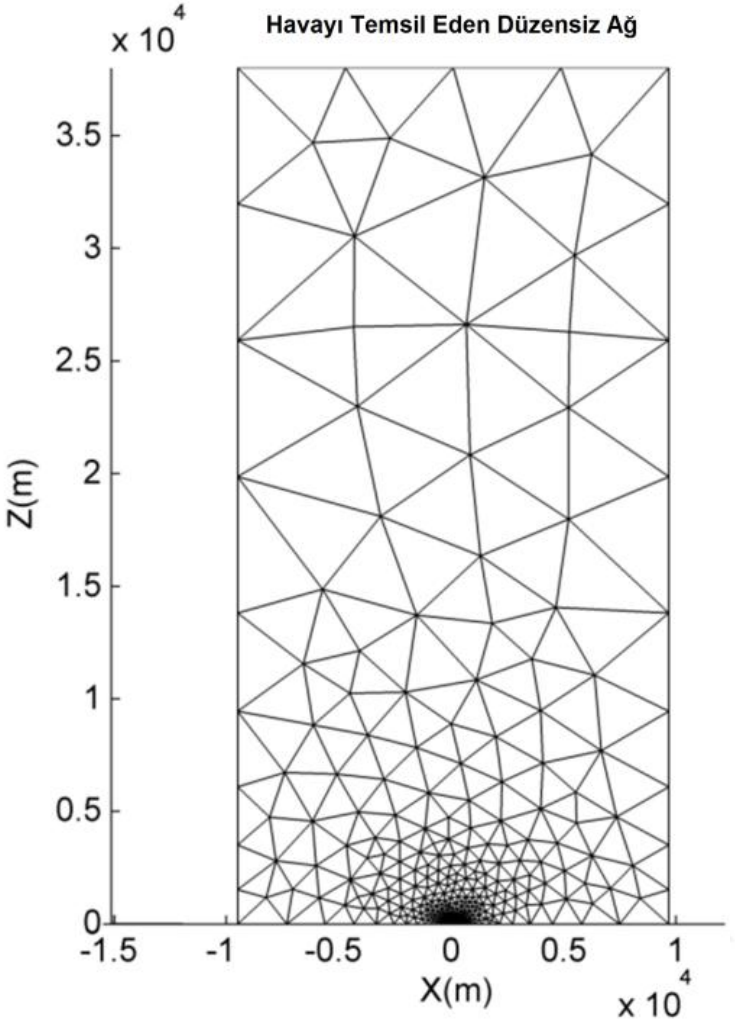


Şekil 8 Tasarlanan SE ağı (Parametreleştirme alanı)



Şekil 9 SE ağı üçgen kalitesi(Parametreleştirme alanı)

RMT yönteminde TM- modu düz çözümünde sadece yeraltı model ağı kullanılması yeterlidir, çünkü TM modu iletkene duyarlıdır ve havanın etkisi yok varsayılacak kadar azdır. Fakat TE- modu yalıtkanada duyarlı olduğu için yer altı ağına havayı temsil edecek ağın da eklenmesi gereklidir. Model ağı oluşturma algoritmasına göre, yeraltını temsil eden düzensiz ağda hava-yer arayüzeyindeki nokta koordinatları kullanılarak hava için geometri matrisi oluşturulmuştur. Yer için oluşturulan ağa benzer olarak 'initmesh' komutu ile havayı temsil eden ağ tasarlanmıştır. Havanın özdirenci 10^{21} ohm-m gibi çok yüksek seçilmiştir. EK 1 şekil 10'da hava için tasarlanan ağ sunulmuştur.



Şekil 10 Hava için tasarlanan SE ağı

Hava ve yer için oluşturulan ağların birleştirilirken nokta numaraları ve eleman numaraları simetrik bir şekilde artmadığı için, hava için oluşturulan ağın nokta numarasında ve eleman numarasında bazı düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. NN1, yeraltında oluşturulan ağda bulunan tüm noktaların sayısı, NN2 havada oluşturulan ağda bulunan tüm noktaların sayısı ve NNX hava-yer ara yüzeyinde bulunan nokta sayısı olmak üzere toplam,

$$NN=NN1+NN2-NNX \tag{1.3}$$

tane nokta bulunmaktadır. Havada bulunan ve hava-yer arayüzeyinde bulunmayan noktalar numaralandırılırken, yerde bulunan en son nokta sayısından sonra başlanır.

NT1, yeraltında oluşturulan ağda bulunan tüm elemanların sayısı, NT2 havada oluşturulan ağda bulunan tüm elemanların sayısı olmak üzere birleştirilmiş ağda

$$NT=NT1+NT2 \tag{1.4}$$

tane eleman bulunmaktadır. Havada bulunan elemanlar numaralndırılırken yerde bulunan en son eleman sayısından sonra başlanır. Dolayısı ile RMT yönteminde düz çözüm yapılırken, TM modu için NT1 eleman ve NN1 nokta kullanılarak işlemler yapılırken, TE modunda NT eleman ve NN nokta kullanılır.

c. Algoritma Giriş Dosyaları

EK 1 şekil 11'de, EK 1 şekil 3'de verilen modeli düzensiz üçgen elemanlarla oluşturmak için gerekli giriş parametreleri verilmektedir. EK 1 şekil 11.a, 'stn.txt' dosyasını göstermektedir. EK 1 şekil 11 ise 'stn.txt' dosyasının formatını açıklamaktadır. Burada ilk satırda gösterilen Ns, modelde varsayılan istasyon sayısını göstermektedir. İzleyen satırlar ise istasyonların numarasını ve x- ve z- koordinatlarını ifade etmektedir. EK 1 şekil 11.c, d, sırası ile 'rogen.txt' dosyasını ve dosya formatını göstermektedir. 'Rogen.txt' dosyasında ilk satır, model homojen ise '1', modelde farklı özdirençte yapı/yapılar varsa '2' değerini alır. İkinci satır modelin oluşturulacağı ortalama özdirenci ifade eder. Üçüncü satırda Nf ile simgelenen kısma frekans sayısı yazılır. İzleyen satırlar ise frekans değerlerini içerir. 'Rogen.txt' dosyasında ilk satır '2' seçilirse, yani model homojen değilse, EK 1 şekil 11.e'de gösterilen 'Polies.txt' dosyasının oluşturulması gerekmektedir. EK 1 şekil 11.f, 'polies.txt' dosya formatını östermektedir. Burada ilk satır ortalama özdirençten farklı özdirençte olacak yapıların sayısını ifade etmektedir. Daha sonraki satırlarda, yapıların özdirençleri, köşe sayılarını ve köşelerin x- ve z- koordinatlarını ifade etmektedir. Model ağı oluşturma algoritmasında, ilk olarak yukarıda açıklanan giriş parametreleri okunarak bahsedilen 'pdegd', geometri açıklama dizeyi oluşturulur.

a) **b)**

37	**Ns**
1 0.0 0	**İstNo(1) X(1) Z(1)**
2 5.0 0	**İstNo(2) X(2) Z(2)**
3 10.0 0	**İstNo(3) X(3) Z(3)**
4 15.0 0	**İstNo(4) X(4) Z(4)**
5 20.0 0	**İstNo(5) X(5) Z(5)**
6 25.0 0	**İstNo(6) X(6) Z(6)**
7 30.0 0	.
8 35.0 0	.
9 40.0 0	.
10 45.0 0	.
11 50.0 0	.
12 55.0 0	.
13 60.0 0	.
14 65.0 0	.
15 70.0 0	.
16 75.0 0	.
17 80.0 0	.
18 85.0 0	.
19 90.0 0	.
20 95.0 0	.
21 100.0 0	.
22 105.0 0	.
23 110.0 0	.
24 115.0 0	.
25 120.0 0	.
26 125.0 0	.
27 130.0 0	.
28 135.0 0	.
29 140.0 0	.
30 145.0 0	.
31 150.0 0	.
32 155.0 0	.
33 160.0 0	.
34 165.0 0	.
35 170.0 0	.
36 175.0 0	.
37 180.0 0	**İst. No(37) X(37) Z(37)**

c) **d)**

2	**Farklı özdirencte yapı varmı?(1 veya 2)**
100	**Rho(ort)**
5	**Nf**
100000	**F(1)**
300000	**F(2)**
100000	**F(3)**
30000	**F(4)**
10000	**F(5)**

e) **f)**

4	**Poligon sayısı**
20 4	**Rho(1) Poligon-1 köşe sayısı**
65 115 115 65	**XP(1,1) XP(1,2) XP(1,3) XP(1,4)**
-2.5 -2.5 -12.5 -12.5	**ZP(1,1) ZP(1,2) ZP(1,3) ZP(1,4)**
500 4	**Rho(2) Poligon-2 köşe sayısı**
-5 185 185 -5	**XP(2,1) XP(2,2) XP(2,3) XP(1,4)**
-2.5 -2.5 -20 -20	**ZP(2,1) ZP(2,2) ZP(2,3) ZP(1,4)**
50 4	**Rho(3) Poligon-3 köşe sayısı**
-5 185 185 -5	**XP(3,1) XP(3,2) XP(3,3) XP(3,4)**
0 0 -2.5 -2.5	**ZP(3,1) ZP(3,2) ZP(3,3) ZP(3,4)**
25 4	**Rho(4) Poligon-4 köşe sayısı**
-5 185 185 -5	**XP(4,1) XP(4,2) XP(4,3) XP(4,4)**
-20 -20 -50.3 -50.3	**ZP(4,1) ZP(4,2) ZP(4,3) ZP(4,4)**

Şekil 11 EK 1 şekil 3'de gösterilen model tasarımı için giriş parametreleri, a) Stn.txt, b) Stn.txt dosya formatı, c) Rogen.txt d) Rogen.txt dosya formatı, e) Polies.txt f) Polies.txt dosya formatı

EK 2 Genel Dizey Denkleminin (Kv=S) Elde Edilmesi ve CSR formatı

a. Genel Dizey Denkleminin (Kv=S) Elde Edilmesi

Helmholtz ve Poisson denklemlerinin bir üçgen elaman için Bölüm 2, eşitlik 2.8-10'da verilmiştir. Elemanlar düğüm noktaları ile birbirine bağlı olduğundan, düğüm noktalarındaki alan değerleri (TE- modu için elektrik alan TM modu için manyetik alan) ve gerilim değerleri bir eleman için dizey denkleminin çözümü ile bulunamaz. Elektrik, manyetik alanlar ve gerilim değerlerinin hesaplanması için elemanlar için oluşturulan dizey denklemleri, SE ağına bağlı birleştirilerek genel dizey denklemi oluşturulmalıdır. Oluşturulan doğrusal genel dizey denklemi çözülerek düğüm noktalarındaki alan değerleri hesaplanır. Aşağıda bir i elemanı için eleman dizey denklemi gösterilmiştir.

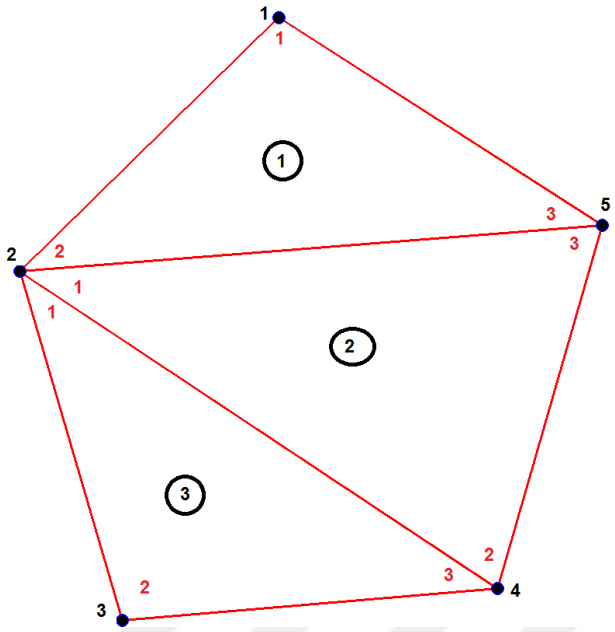
$$\begin{bmatrix} k_{11}^i & k_{12}^i & k_{13}^i \\ k_{21}^i & k_{22}^i & k_{23}^i \\ k_{31}^i & k_{32}^i & k_{33}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^i \\ v_2^i \\ v_3^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1^i \\ s_2^i \\ s_3^i \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

Bu denklem kısaca izleyen şekilde,

$$k^i v^i = s^i \tag{2.2}$$

Burada k^i, koordinatlara ve elemanın iletkenliğine bağlı katsayı dizeyi, v^i, TE modu için elektrik alan vektörünü (E_y), TM modu için ise manyetik alan vektörünü (H_y), DAÖ yöntemi için ise gerilim (ϕ) değerlerini ifade eder. s^i, bilinen alan değerleri veya DAÖ yöntemi için kaynaktır.

Sonlu elemanlarda amaç bütün elemanların katsayı dizeylerini toplayarak, tüm yapıların katsayı dizeyine dönüştürmektir. Bunu göstermek için EK 1 şekil 1'deki gibi SE ağı ele alınabilir.



Şekil 1 Üç üçgen eleman ve beş düğüm noktası olan düzensiz SE ağı.

Burada ağın 3 elemanı yukarıdan aşağıya doğru numaralandırılmış 5 düğüm noktası vardır. Bütün elemanlar için eşitlik 2.1 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{matrix} & 1 & 2 & 5 \\ 1 & & & \\ 2 & & & \\ 5 & & & \end{matrix}\begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & k_{13}^1 \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 & k_{23}^1 \\ k_{31}^1 & k_{32}^1 & k_{33}^1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1^1 \\ v_2^1 \\ v_3^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1^1 \\ s_2^1 \\ s_3^1 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

$$\begin{bmatrix} k_{11}^2 & k_{12}^2 & k_{13}^2 \\ k_{21}^2 & k_{22}^2 & k_{23}^2 \\ k_{31}^2 & k_{32}^2 & k_{33}^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1^2 \\ v_2^2 \\ v_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1^2 \\ s_2^2 \\ s_3^2 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$\begin{bmatrix} k_{11}^3 & k_{12}^3 & k_{13}^3 \\ k_{21}^3 & k_{22}^3 & k_{23}^3 \\ k_{31}^3 & k_{32}^3 & k_{33}^3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1^3 \\ v_2^3 \\ v_3^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1^3 \\ s_2^3 \\ s_3^3 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

Yukarıdaki dizey denklemlerinde görüldüğü gibi, bir eleman üzerinde üç düğüm noktası olduğundan katsayı dizeyleri de (3×3) boyutundadır. Bu dizeyleri birleştirerek tüm ağın katsayı dizeyi haline getirmek için düğüm noktası sayısı boyutunda (5×5) bir kare

dizeye gereksinim vardır. Katsayı dizeyini oluşturarak genel dizey denklemini elde etme işlemine "Doğrudan Rijitlik Yöntemi" denir. Burada bir elemana ait dizey denkleminde dizey ve vektörün satır ve sütun numarası (SE ağında elemanın düğüm noktalarının numarası), dizey ve vektörün kenarlarına yazılır. Sonra SE ağındaki düğüm noktası sayısı boyutunda bir kare dizey (katsayı dizeyi "coefficient stiffness matrix") oluşturulur ve dizeyin bütün elemanlarına sıfır değeri atanır. Bundan sonra, her eleman için yazılmış denklemlerde dizeyin kenarına kırmızı renkte yazılan düğüm noktası numarası, katsayı dizeyinin satır ve sütun numarası olacak şekilde değerler yerleştirilir. Bu işlem bütün elemanlar için yapılır. Numaralandırma işlemi 1 numaralı eleman için yazılan dizey denkleminde görülmektedir. Elemanların SE ağı için yazılan denkleme katkısı aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & 0 & 0 & k_{13}^1 \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 + k_{11}^2 + k_{11}^3 & k_{12}^3 & k_{12}^2 + k_{13}^3 & k_{23}^1 + k_{13}^2 \\ 0 & k_{21}^3 & k_{22}^3 & k_{23}^3 & 0 \\ 0 & k_{21}^2 + k_{31}^3 & k_{32}^3 & k_{22}^2 + k_{33}^3 & k_{23}^2 \\ k_{31}^1 & k_{32}^2 + k_{31}^2 & 0 & k_{32}^2 & k_{33}^1 + k_{33}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^1 \\ v_2^1 + v_1^2 + v_1^3 \\ v_2^3 \\ v_2^2 + v_3^3 \\ v_3^1 + v_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1^1 \\ s_2^1 + s_1^2 + s_1^3 \\ s_2^3 \\ s_2^2 + s_3^3 \\ s_3^1 + s_3^2 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Yukarıdaki dizey denklemi bütün elemanların katkısı toplanarak,

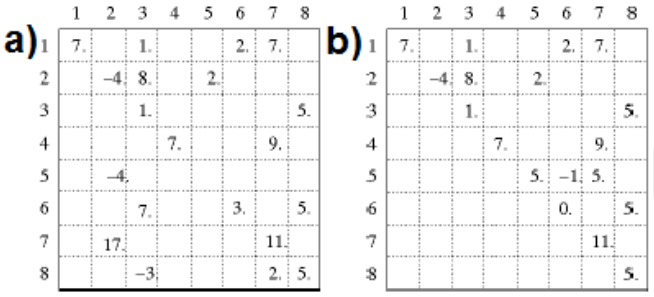
$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 & 0 & K_{15} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} \\ 0 & K_{32} & K_{33} & K_{34} & 0 \\ 0 & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} \\ K_{51} & K_{52} & 0 & K_{54} & K_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

şeklinde yazılabilir. Buna göre eşitlik 2.7, dizey denklemi genel olarak tanımlanan bir SE ağı, için aşağıdaki gibi yazılabilir. Ağ üzerinde bulunan düğüm noktası sayısı N olmak üzere genel dizey denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$K_{NxN} \times V_{N\times 1} = S_{N\times 1} \tag{2.8}$$

b. CSR Formatı

CSR format, Rose ve Willoughby (1972) ve Brameller vd. (1976) tarafından önerilmiş, büyük seyrek (sparse) dizeylerin saklanmasında kullanılan oldukça popüler bir formattır. Boyutları nxn olan simetrik ve simetrik olmayan B dizeyleri, CSR formatta saklanmak istenirse, m, B dizeyinin sıfır olmayan eleman sayısı olmak üzere, üç tane vektör ile temsil edilerek saklanabilir. Bu vektörler A, JA, IA ise, boyutları sırası ile nz, nz ve n+1 olur. Örneğin EK 2 şekil 2.a'da simetrik olmayan bir B dizeyi ve EK 2 şekil 2.b'de simetrik bir B dizeyi verilmektedir. Bu dizeylerin seyrek formatı EK 2 şekil 2.c'de gösterildiği gibi hesaplanır.



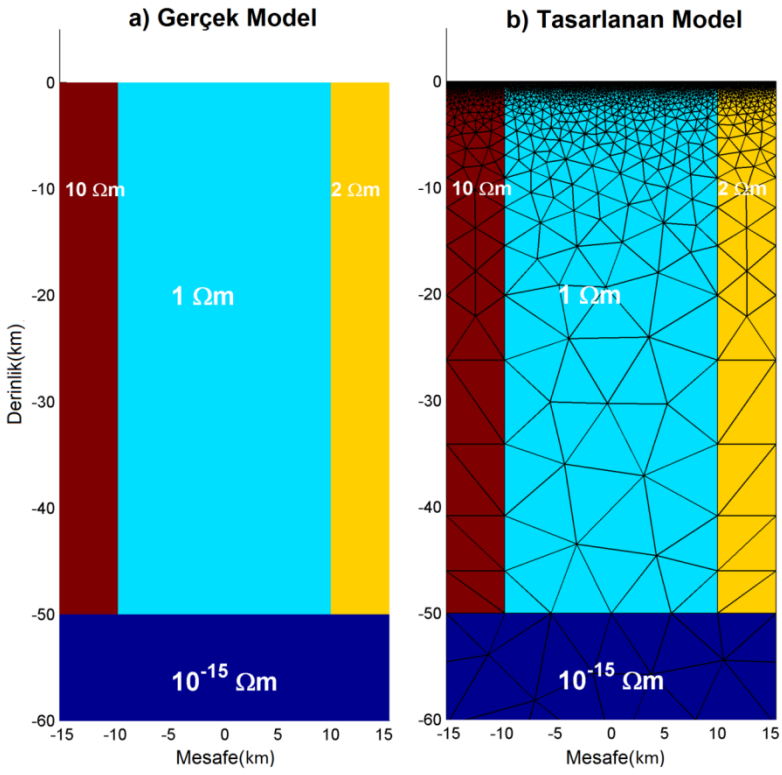
c)

K	Nonsymmetric Matrix IA(K)	JA(K)	A(K)	Symmetric Matrix IA(k)	JA(K)	A(K)
1	1	1	7.	1	1	7.
2	5	3	1.	5	3	1.
3	8	6	2.	8	6	2.
4	10	7	7.	10	7	7.
5	12	2	-4.	12	2	-4.
6	13	3	8.	15	3	8.
7	16	5	2.	17	5	2.
8	18	3	1.	18	3	1.
9	21	8	5.	19	8	5.
10		4	7.		4	7.
11		7	9.		7	9.
12		2	-4.		5	5.
13		3	7.		6	-1.
14		6	3.		7	5.
15		8	5.		6	0.
16		2	17.		8	5.
17		7	11.		7	11.
18		3	-3.		8	5.
19		7	2.			
20		8	5.			

Şekil 2 a. Simetrik olmayan ve b. simetrik dizeylerin c. CSR formatı (Schenk ve Gärtner 2014)

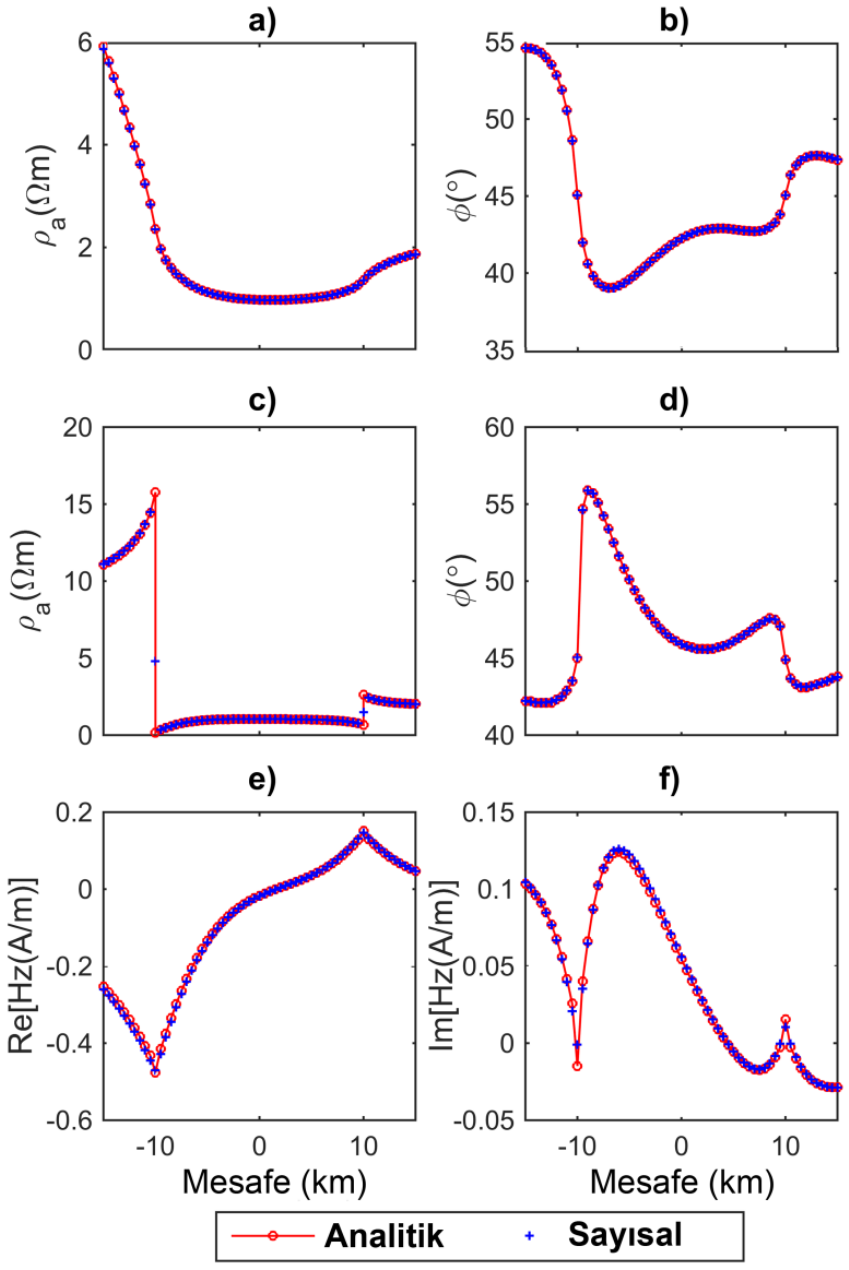
EK 3 RMT ve DAÖ 2-B Düz Çözüm Algoritmalarının Analitik Çözüm ve Diğer Bilinen Düz Çözüm Algoritmaları ile Karşılaştırılması

Geliştirilen RMT düz çözüm algoritmasının doğruluğunu test etmek amacıyla Weaver vd. (1985,1986) tarafından geliştirilen analitik çözüm kullanılmıştır. Analitik çözümde kullanılan model EK 3 şekil 1.a'da gösterilmiştir. Modelde 50 km derinliğinde çok düşük özdirençli bir ana kaya ve sırası ile 10,1 ve 2 ohm-m özdirençli üç farklı yapı şeklindedir. TE- ve TM- modu için analitik çözümün karşılaştırılması için 0.01 Hz. frekansı kullanılmıştır. Düşük frekansta karşılaştırılma yapılmasının sebebi analitik çözümün RMT frekanslarında çalıştırılamamasıdır. Düzensiz üçgenler kullanılarak yapılan model, EK 3 şekil 1.b'de sunulmaktadır. Modeli tasarlamak için 500m istasyon aralığı olan 61 istasyon varsayılmıştır. Model, EK 3 şekil 1.a ile aynı olarak tasarlanmıştır. Böylece program ile analitik sonuç karşılaştırması kolaylıkla yapılabilmektedir.



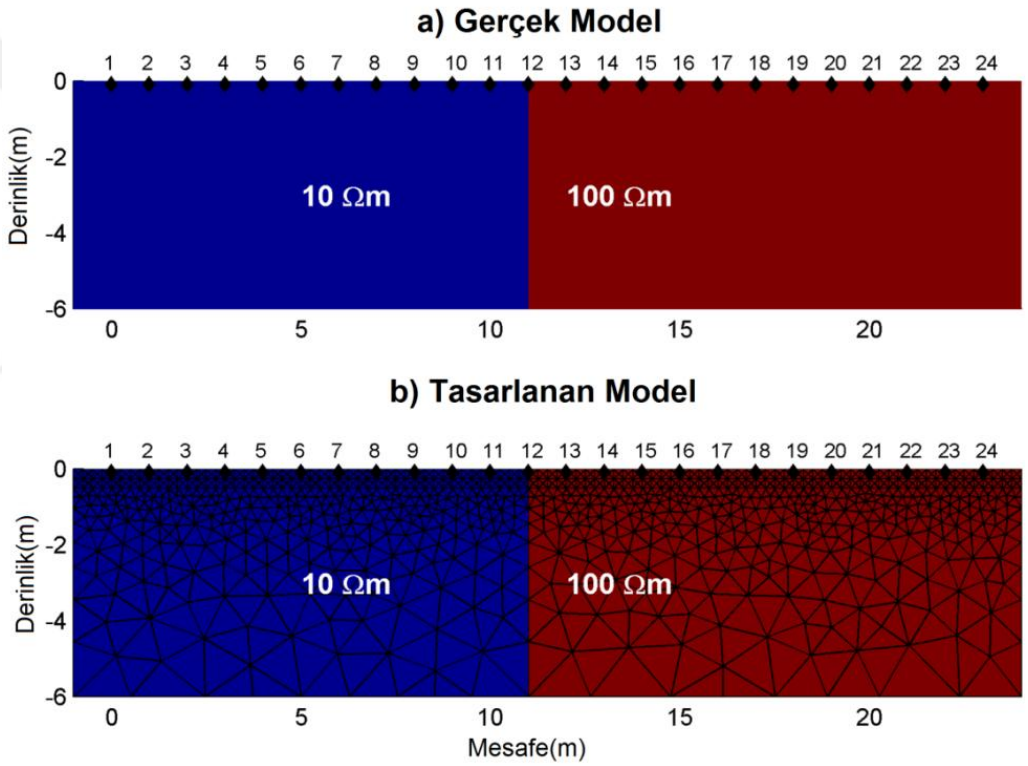
Şekil 1 a. Analitik çözümü bilinen model (Weaver vd. 1985) ve b. Geliştirilen programda tasarlanması

Her iki analitik ve modelleme sonucu sırası ile TE- ve TM- modu için 100 sn periyotta görünür özdirenç ve faz eğrileri EK 3 şekil 2'de sunulmaktadır. Her iki modda görünür özdirenç eğrilerinin uyum içinde olması programın kullanılabilirliğinin kanıtıdır.

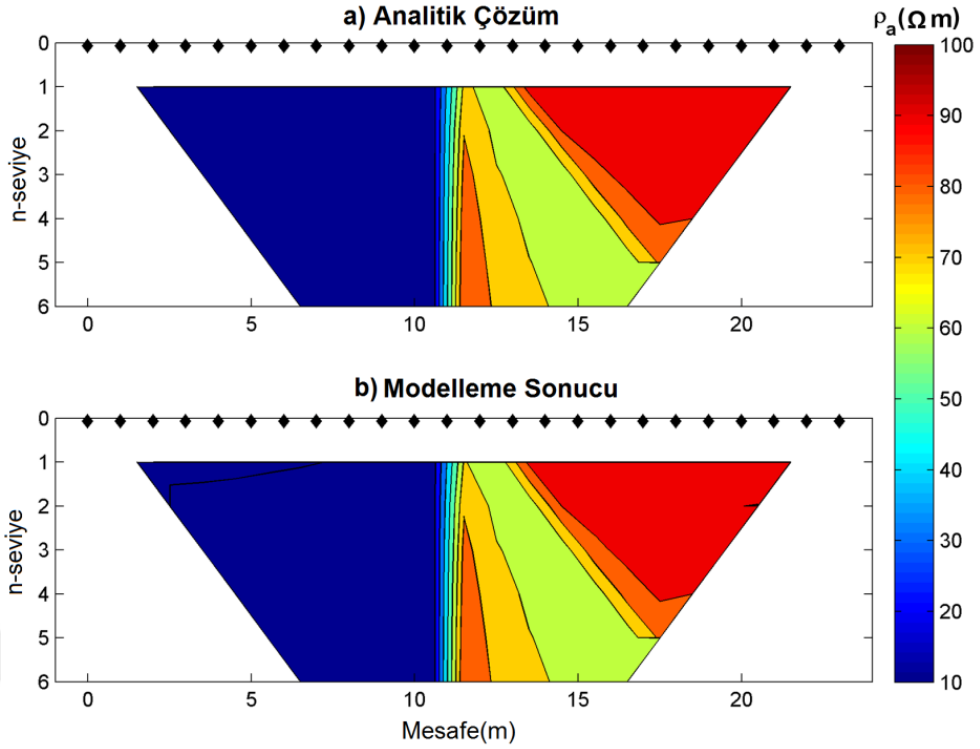


Şekil 2 Fay modelinin analitik çözümü ile düzensiz ağ kullanarak düz çözümünün karşılaştırılması

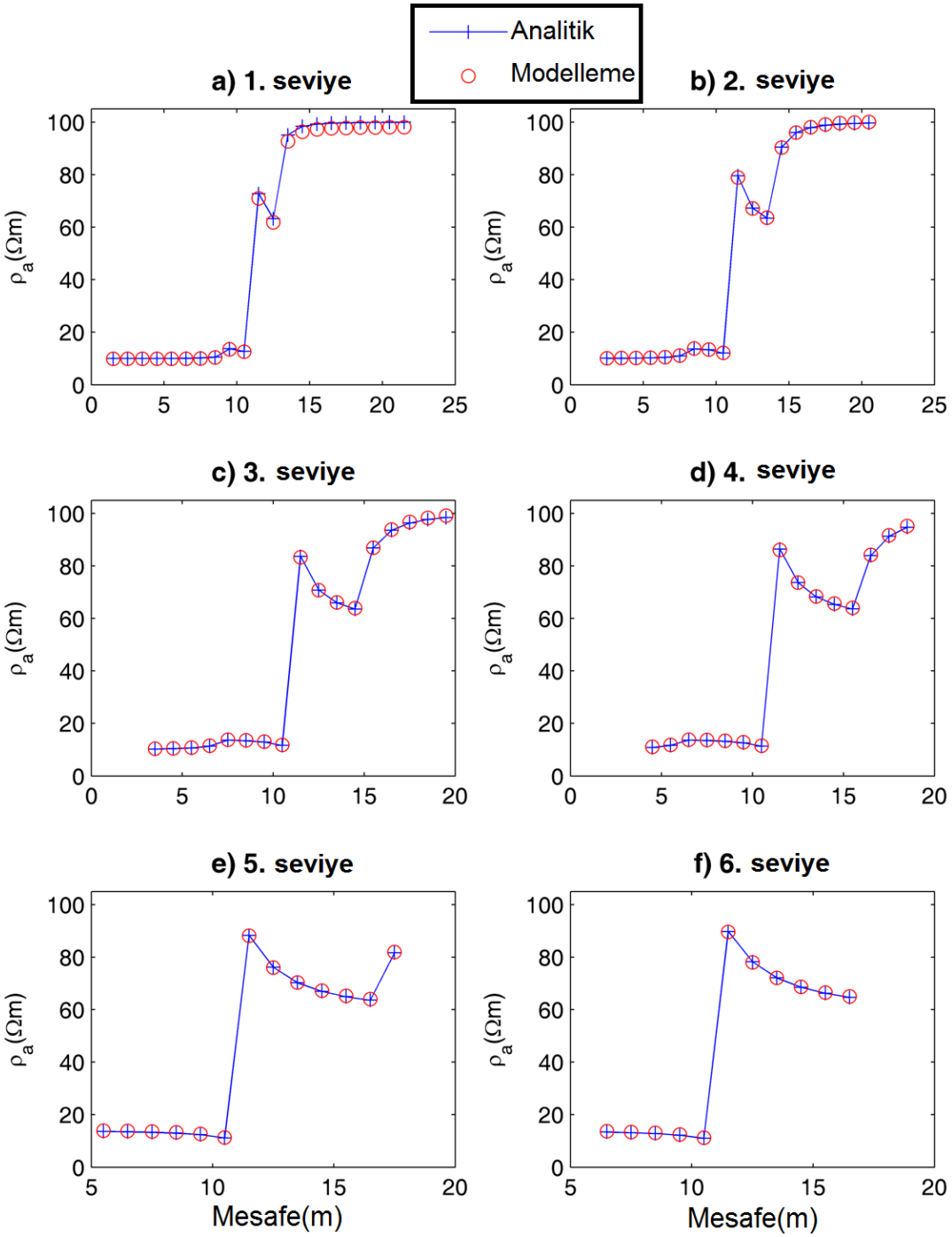
Geliştirilen DAÖ düz çözüm algoritması doğruluğunu test etmek amacıyla Telford vd. (1990)'da bir fay modeli için kullanılan formüller MATLAB ile hesaplanmıştır. Analitik çözümde kullanılan model EK 3 şekil 3.a'da gösterilmiştir. Model, 10 ohm-m ve 100 ohm-m özdirençli iki jeolojik birimi temsil etmektedir. Modelin düzensiz ağ ile tasarlanabilmesi için 24 elektrot ve elektrot aralığı 1 m. olarak varsayılmıştır. Wenner-Schulumberger elektrot dizilimi için görünür özdirençler hesaplanarak yapma kesitlerle (EK 3 Şekil 4) ve profil eğrileriyle (EK 3 Şekil 5) analitik çözüm ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında analitik çözüm ile uyum sağlayan sonuçlar elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3 a. Analitik çözümü bilinen model (Telford vd. 1990) ve b. geliştirilen programda tasarlanması



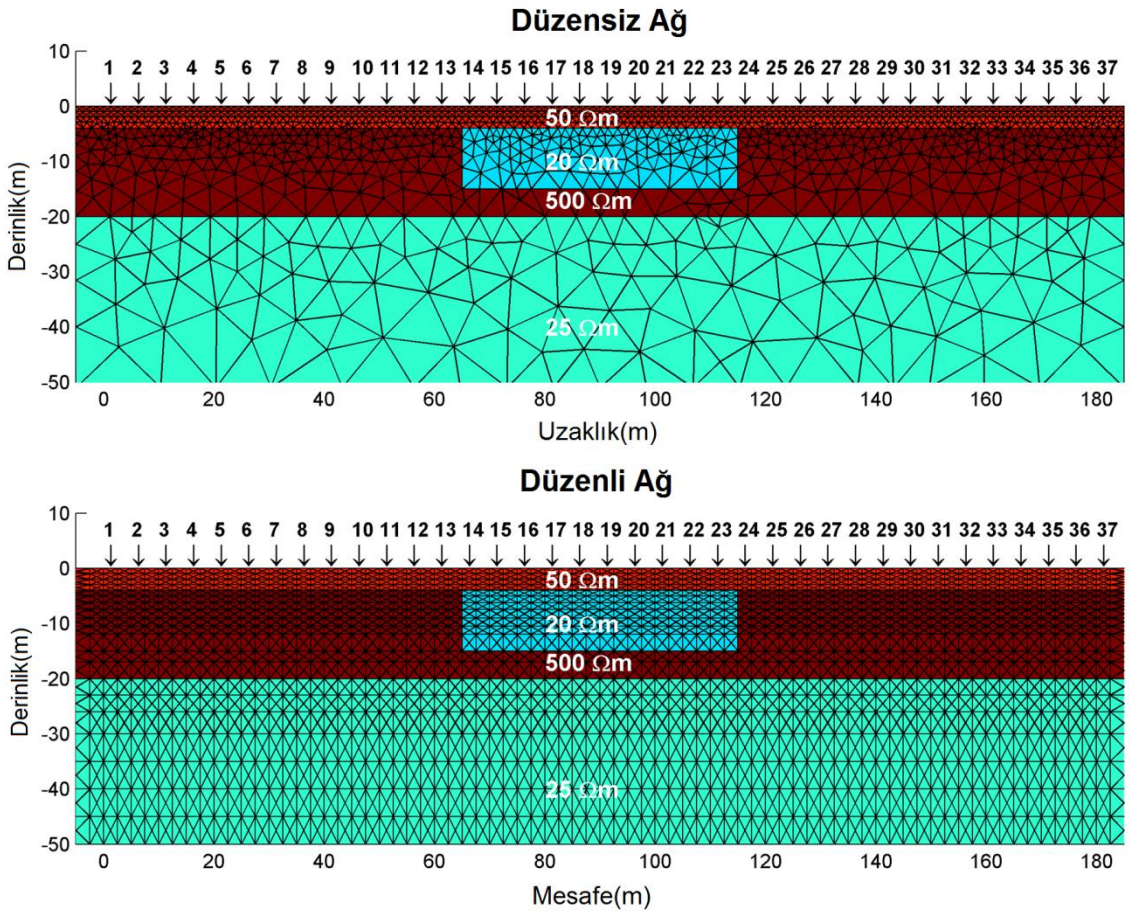
Şekil 4 Fay modelinin analitik çözümü ve düzensiz ağ kullanarak düz çözümünün yapma kesitler ile karşılaştırılması



Şekil 5 Fay modelinin analitik çözümü ve düzensiz ağ kullanarak düz çözümünün profil eğrileri ile karşılaştırılması

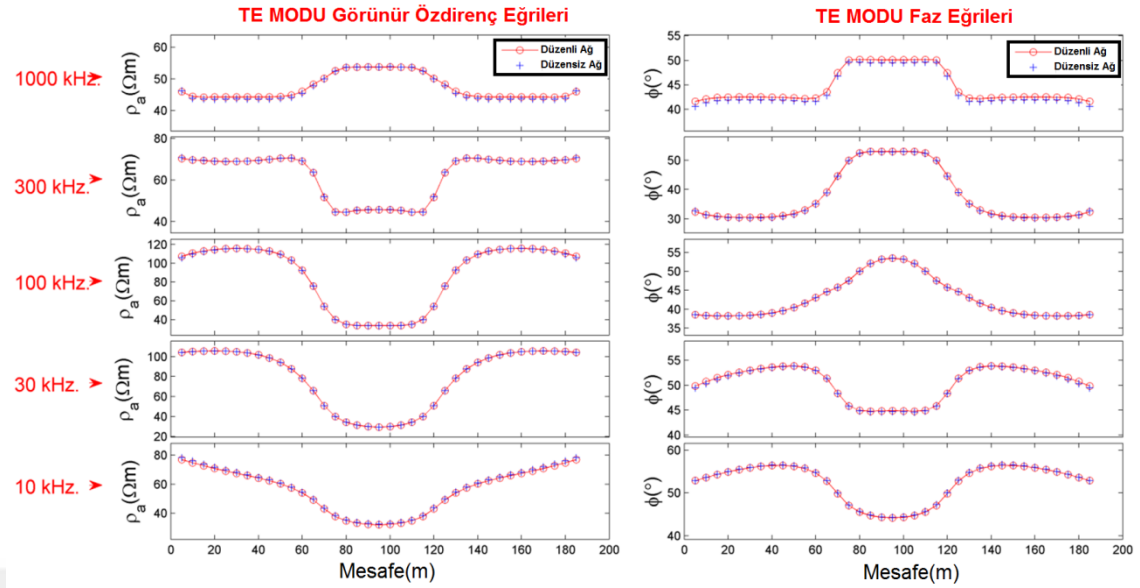
Programın kullanılabilirliğini test etmek için yapılan karşılaştırmalardan bir diğeri ise var olan 2-B düz çözüm algoritmaları ile karşılaştırmaktır. Bu kısımda önceden yapılmış olan yayınlarda kullanılan modeller, var olan SF algoritması ve bu çalışmada yapılan algoritma sonuçları ile modellenerek sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

Diğer algoritmalarla karşılaştırmalarda ilk olarak EK 3 şekil 6.a'da verilen, Candansayar ve Tezkan (2006)'da kullanılan model tasarlanmıştır. Aynı model var olan SF algoritmasıyla da tasarlanmıştır (EK 3 şekil 6.b). Her iki algoritma da modelin tasarlanabilmesi için 5m. istasyon aralığı ile 37 istasyon varsayılmıştır.

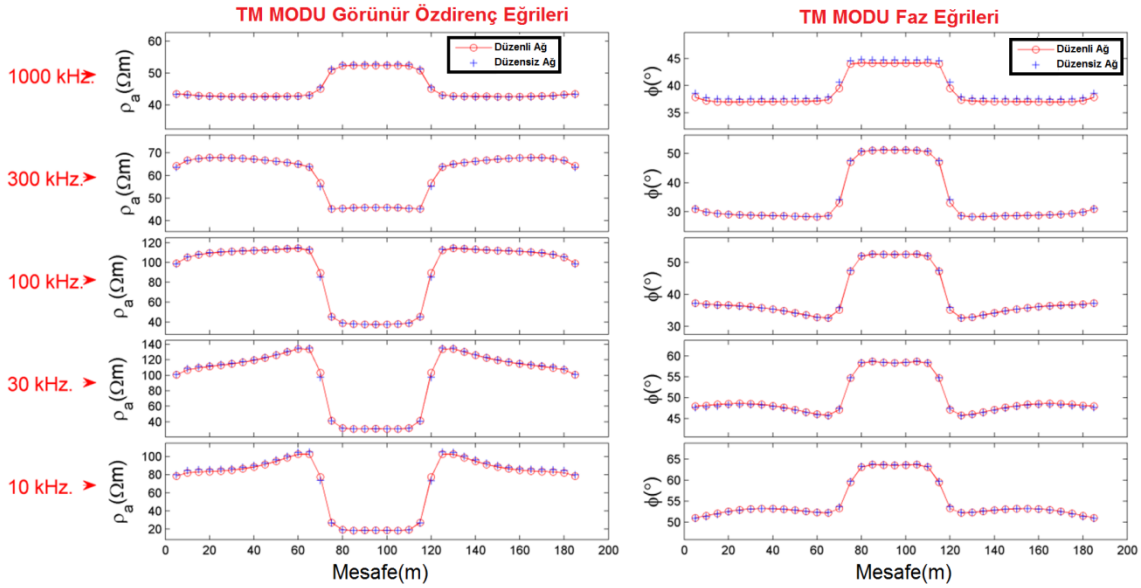


Şekil 6 a. Düzensiz ağ ile tasarlanan ve b. düzenli ağ ile tasarlanan atık alan modeli.

RMT Düz çözümünde 10kHz-1000kHz frekans aralığında 5 frekans kullanılmıştır. Belirlenen frekanslarda elde edilen TE- ve TM- modu görünür özdirenç ve faz eğrileri EK 3 şekil 7 ve 8'de sunulmaktadır.



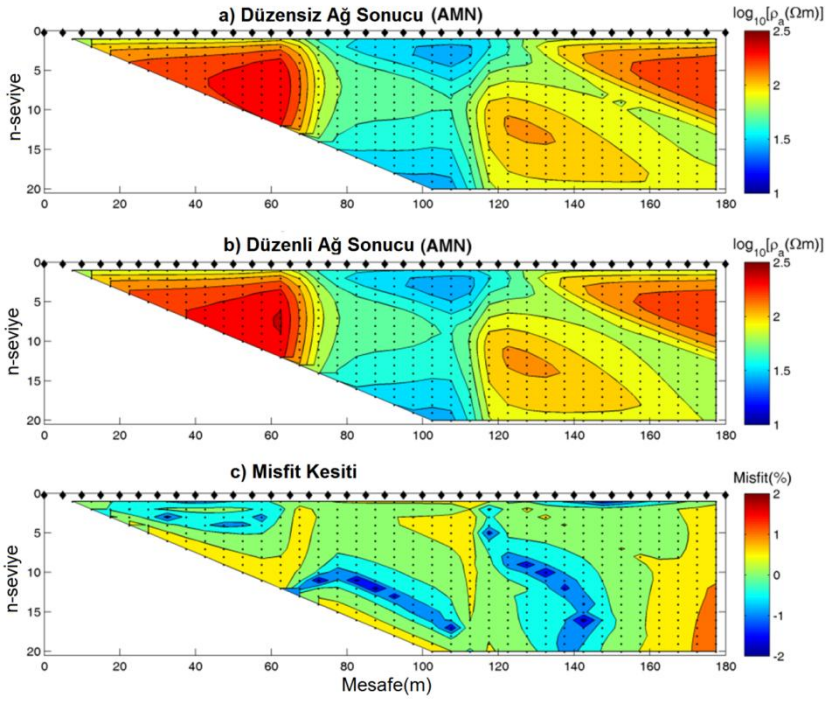
Şekil 7 Atık alan modelinin düz çözümü sonucu elde edilen TE- modu görünür özdirenç ve faz eğrilerinin karşılaştırılması.



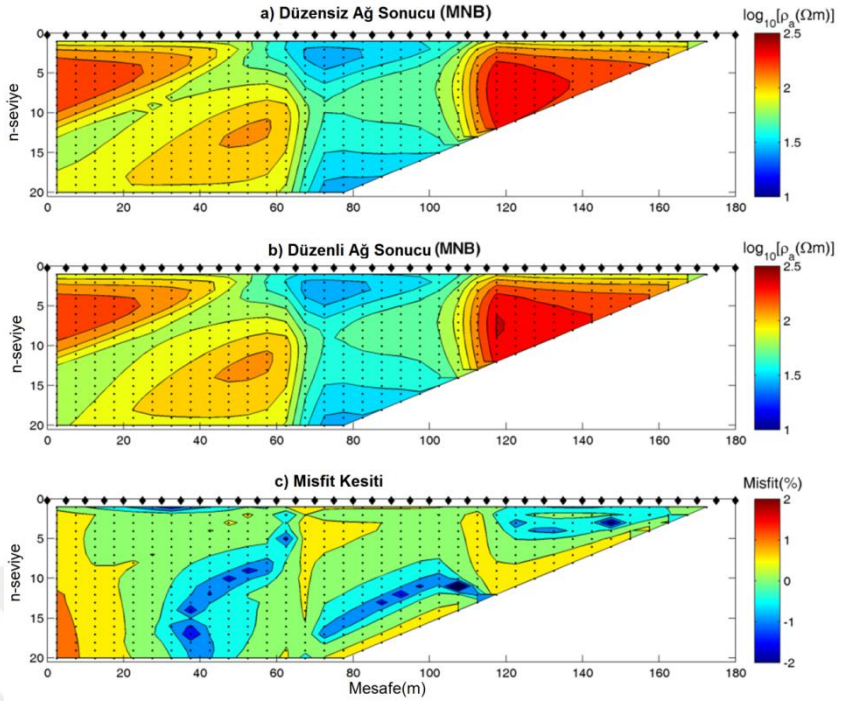
Şekil 8 Atık alan modelinin düz çözümü sonucu elde edilen TM- modu görünür özdirenç ve faz eğrilerinin karşılaştırılması.

EK 3 şekil 7, 8'de yapılan karşılaştırmada kırmızı yuvarlak ile gösterilen eğri var olan SF algoritması sonuçlarını, mavi asteriks ile ifade edilen eğri ise düzensiz ağ kullanılarak yapılan SE algoritmasının sonuçlarını göstermektedir.

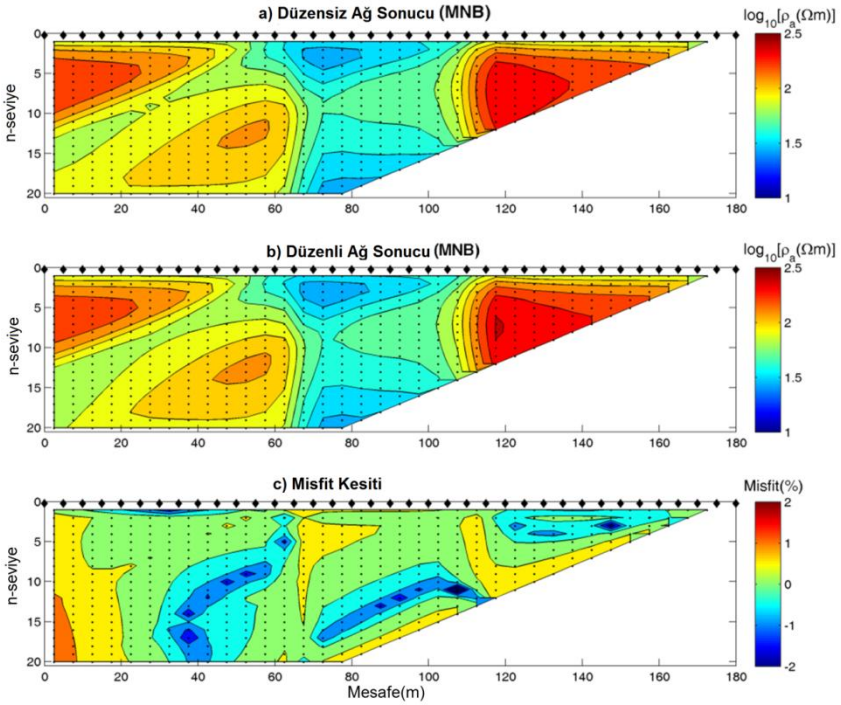
DAÖ modeli de RMT modeli ile aynı şekilde 5 m. elektrot aralığı ile 37 elektrot varsayılarak tasarlanmıştır. Görünür özdirenç değerlerinin hesaplanması için 20 seviyede AMN (Sağ Yönlü Pol-Dipol), MNB (Sol Yönlü Pol-Dipol) ve ABMN (Dipol-Dipol) elektrot dizilimleri kullanılmıştır. Sırası ile AMN, MNB ve ABMN elektrot dizilileri ile elde edilen görünür özdirenç yapma kesitleri EK 3 şekil 9-11'de sunulmaktadır. Bütün şekillerde a şıkkı, düzensiz ağın modellenmesi ile elde edilen görünür özdirenç yapma kesitlerini, b şıkkı, düzenli ağın modellenmesi ile elde edilen görünür özdirenç yapma kesitlerini ve c şıkkı ise iki sonuç arasındaki Misfit yüzde (%) olarak göstermektedir.



Şekil 9 a. Düzensiz ağ ve b. düzenli ağ kullanılarak atık alan modelinin, düz çözümü sonucu elde edilen AMN elektrot dizilimi için görünür özdirenç yapma kesitleri ve c. Misfit kesiti



Şekil 10 a. Düzensiz ağ ve b. düzenli ağ kullanılarak atık alan modelinin, düz çözümü sonucu elde edilen MNB elektrot dizilimi için görünür özdirenç yapma kesitleri ve c. Misfit kesiti



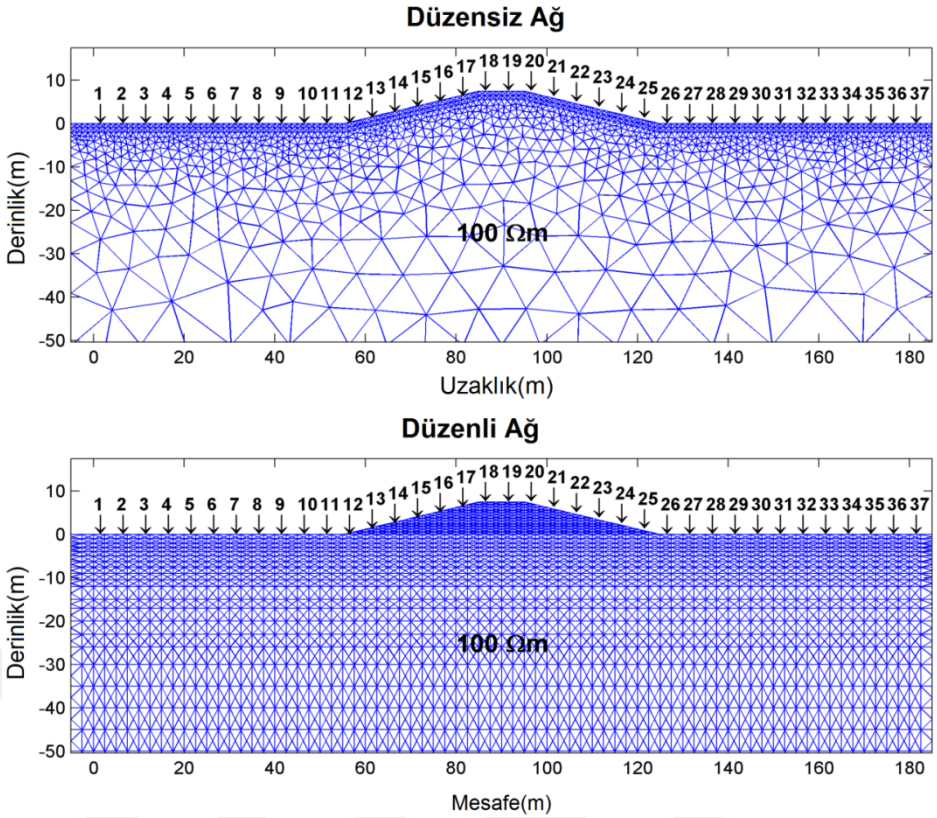
Şekil 11 a. Düzensiz ağ ve b. düzenli ağ kullanılarak atık alan modelinin, düz çözümü sonucu elde edilen ABMN elektrot dizilimi için görünür özdirenç yapma kesitleri ve c. Misfit kesiti

DAÖ yapma kesitlerine bakıldığında, yapma kesitlerin birbiri içinde uyumlu olduğu görülmektedir. Misfit kesitlerinde her iki sonuç arası farkın % 2'nin altında olduğu dikkat çekmektedir.

Düzenli ve düzensiz ağ arasında dikkat çeken bir diğer ayrıntı ise düzensiz ağda modelin tasarlanması için daha az üçgen ve düğüm noktasından oluşturulmasıdır. Bu modelde düzenli ağı tasarlarken 6938 düğüm noktası ve 13616 üçgen oluşturulmuştur. Düzensiz ağı tasarlarken ise 2136 düğüm noktası ve 4043 üçgen eleman oluşturulmuştur. Bu durum modellemede GDD'nin boyutlarının düzenli ağa göre düzensiz ağda daha ufak olduğunu göstermektedir. GDD'nin daha ufak boyutta olması modelleme sırasında düzensiz ağ ile yapılan modellemenin daha kısa sürede olmasına sebep olmaktadır.

Geliştirilen algoritmaları sınamak için kullanılan diğer bir model ise homojen tepe modelidir. Burada tepe modeli homojen kullanılarak topografya etkisinin düz çözüm algoritmalarında etkisi gözlemlenmektedir. Tepe modelinin düzensiz ve düzenli ağ ile tasarlanmış halleri EK 3 şekil 12'de verilmektedir. Modelde, 24 derece yamaç eğimi olan bir tepe altında 100 ohm-m homojen ortam tasarlanmıştır. Modelin tasarlanabilmesi için 5m. istasyon aralığı ile 37 istasyon varsayılmıştır.

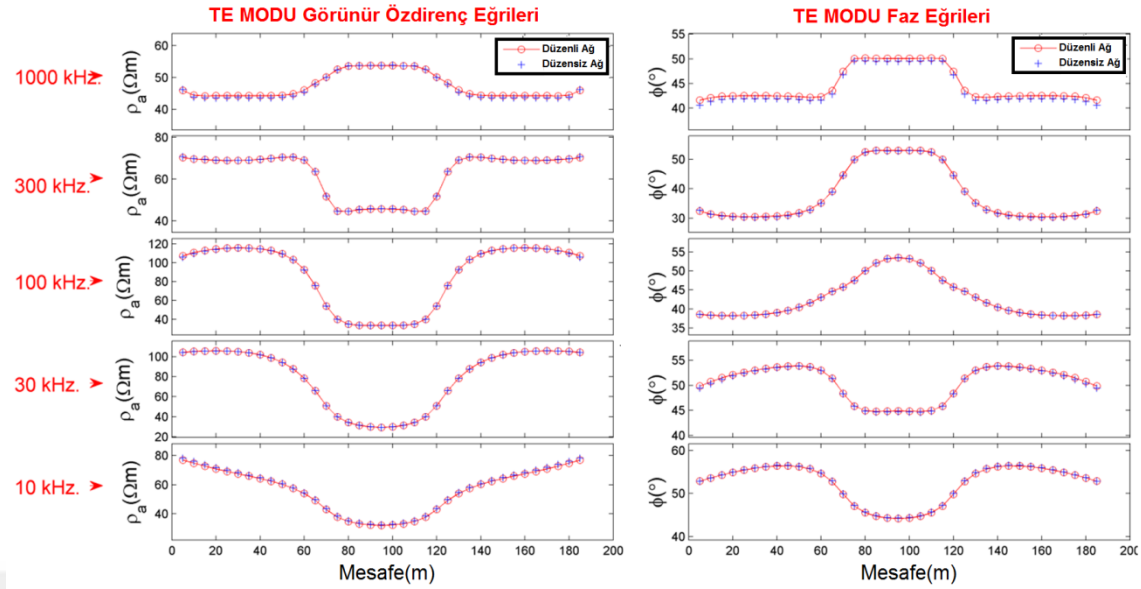
Önceki örneğe benzer şekilde bu modelde de düzenli ağın üçgen ve düğüm sayıları düzensiz üçgene göre daha fazladır. Düzenli ağı tasarlarken 9158 düğüm noktası ve 14384 üçgen oluşturulmuştur. Düzensiz ağı tasarlarken ise 2093 düğüm noktası ve 3957 üçgen eleman oluşturulmuştur. Düzenli ağda topografyayı temsil edebilmek için düğüm noktası sayısının aşırı arttığı görülmektedir, fakat düzensiz ağda topografya temsil edilebilmesi için fazladan düğüm noktası ve üçgen oluşturmaya gerek kalmamıştır. Düzensiz ağın bu avantajı, modellemede topografyalı modellerde açıkça görülmektedir.



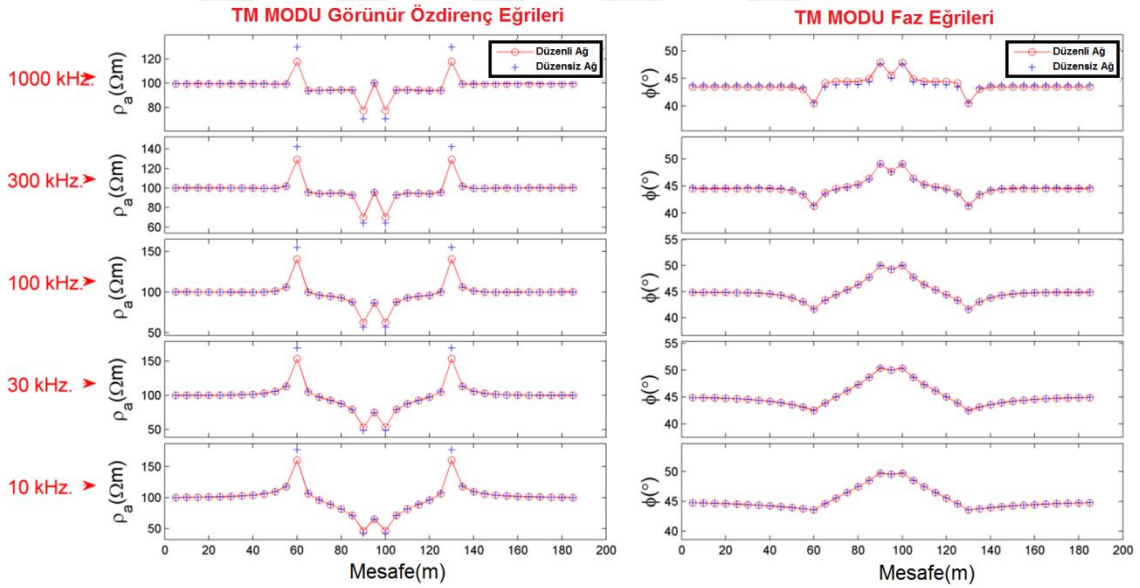
Şekil 12 a. Düzensiz ağ ile tasarlanan ve b. düzenli ağ ile tasarlanan homojen tepe modeli.

RMT düz çözümünde 10kHz-1000kHz frekans aralığında 5 frekans kullanılmıştır. Belirlenen frekanslarda elde edilen TE- ve TM- modu görünür özdirenç ve faz eğrileri EK 3 şekil 13-14'de sunulmaktadır.

EK 3 şekil 13-14'de yapılan karşılaştırmada kırmızı yuvarlak ile gösterilen eğri var olan SF algoritması sonuçlarını, mavi asteriks ile ifade edilen eğri ise düzensiz ağ kullanılarak yapılan SE algoritmasının sonuçlarını göstermektedir. Her iki çözümde GÖ ve faz değerlerinin birbiri ile aynı olduğu görülmektedir. Topografyanın ani değişim yaptığı kısımlarda TM- modu özdirenç değerlerinin her iki düz çözüm sonucunda da ani değişimler yaptığı dikkat çekmektedir. Bu durumun sebebi TM- modunun, topografyadan TE- moduna göre daha çok etkilenmesidir.

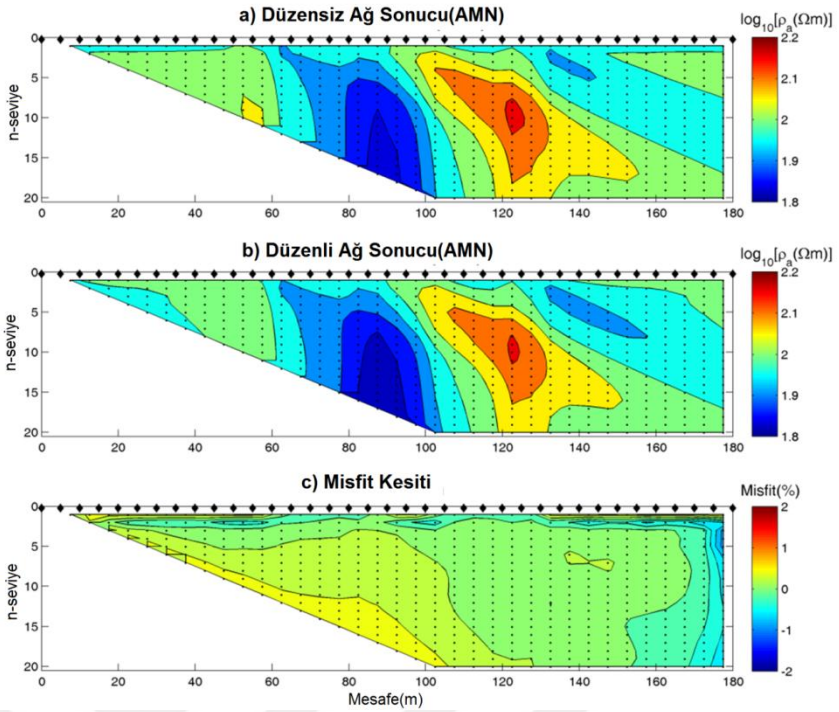


Şekil 13 Homojen tepe modelinin düz çözümü sonucu elde edilen TE- modu görünür özdirenç ve faz eğrilerinin karşılaştırılması.

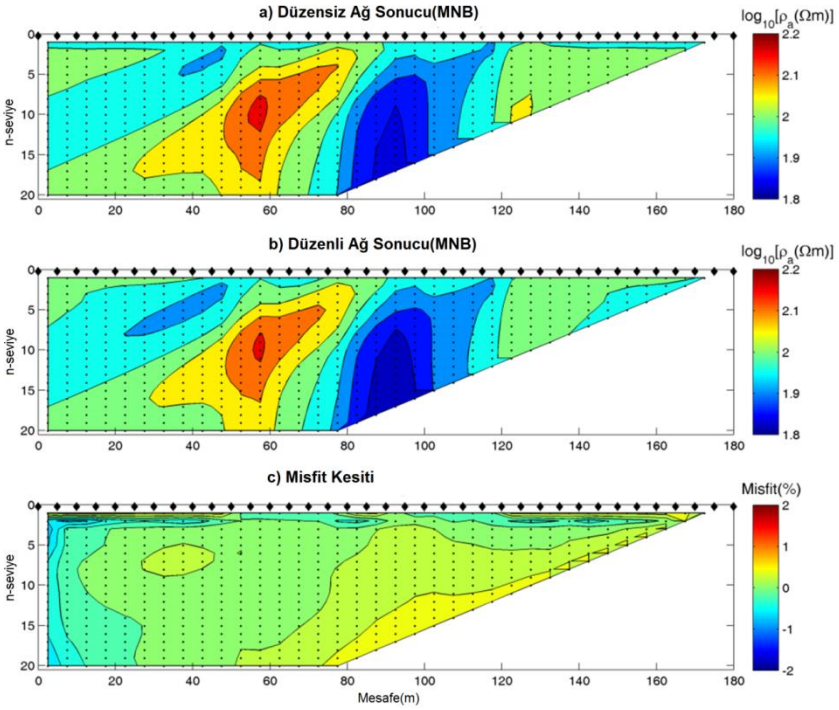


Şekil 14 Homojen tepe modelinin düz çözümü sonucu elde edilen TM- modu görünür özdirenç ve faz eğrilerinin karşılaştırılması.

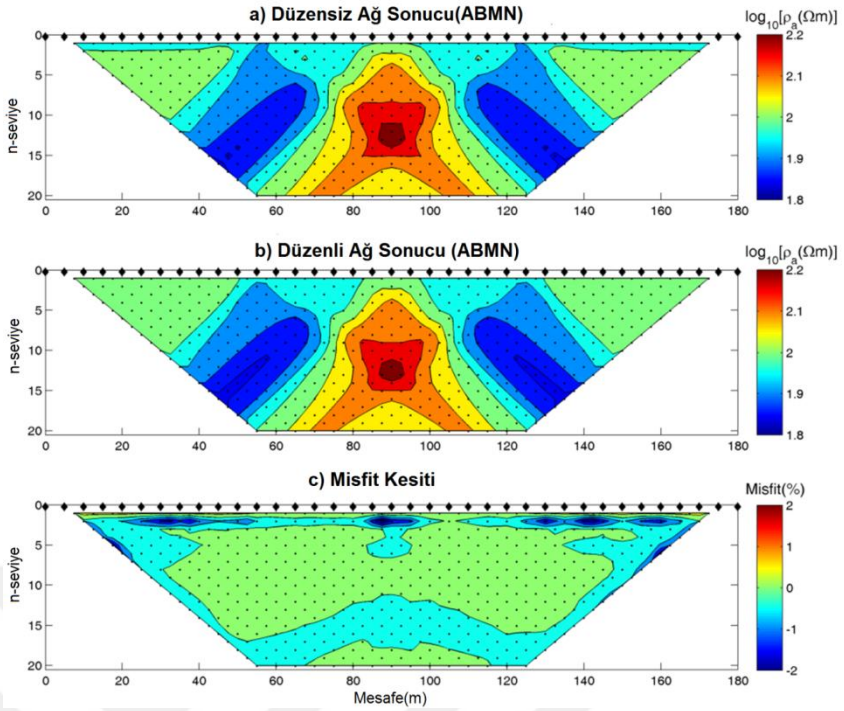
Aynı model DAÖ düz çözümü için de 5 m. elektrot aralığı ile 37 elektrot varsayılarak tasarlanmıştır. Görünür özdirenç değerlerinin hesaplanması için 20 seviyede AMN, MNB ve ABMN elektrot dizilimleri kullanılmıştır. Aynı sıra ile elde edilen görünür özdirenç yapma kesitleri EK 3 şekil 15-17'de sunulmaktadır.



Şekil 15 a. Düzensiz ağ ve b. düzenli ağ kullanılarak homojen tepe modelinin, düz çözümü sonucu elde edilen AMN elektrot dizilimi için görünür özdirenç yapma kesitleri ve c. Misfit kesiti.



Şekil 16 a. Düzensiz ağ ve b. düzenli ağ kullanılarak homojen tepe modelinin, düz çözümü sonucu elde edilen MNB elektrot dizilimi için görünür özdirenç yapma kesitleri ve c. Misfit kesiti.



Şekil 17 a. Düzensiz ağ ve b. düzenli ağ kullanılarak homojen tepe modelinin, düz çözümü sonucu elde edilen ABMN elektrot dizilimi için görünür özdirenç yapma kesitleri ve c. Misfit kesiti.

EK 4 İngilizce Terimlerin Türkçe Karşılıkları

İngilizce	Türkçe
Adjoint equation	Birleştirilmiş denklem
Analytical	Analitik
Asymptotic	Asimtotik
Auxiliary field	Yardımcı(dik) alan
Coefficient stiffness matrix	Katsayı dizeyi
Compresed Sparse Row	Sıkıştırılmış Seyrek Satır
Conjugate Gradient	Eşlenik Türev
Controlled-Source Electromagnetic	Yapay-Kaynak Elektromanyetik
Data Weighting matrix	Veri ağırlık dizeyi
Direct Current Resistivity	Doğru Akım Özdirenç
Divergence	Iraksama
Finite Difference	Sonlu Fark
Finite Element	Sonlu Eleman
Forward Modeling	Düz Çözüm
Geometry description matrix	Geometri açıklama dizeyi
Geometry specification function	Geometri tanımlama fonksiyonu
Global Matrix Equation	Genel Dizey Denklemi
Gradient	Eğim
Horizontal Loop Electromagnetic	Yatay Halka Elektromanyetik
Ill-Posed	Kötü-durumlu
Iteration	Yineleme
Jacobian Matrix	Kısmi Türevler Dizeyi
Joint Inversion	Birleşik Ters Çözüm
Laplacian	Laplasiyen
Loess	Lös
Magnetotelluric	Manyetotellürik
Mesh	Ağ
Misfit	Çakışmazlık
Model resolution	Model ayrımlılık
Node	Düğüm noktası

Nonlinear	Doğrusal olmayan
Numerical	Sayısal
Observation Error	Ölçü Hatası
Parameterization Space	Parametreleştirme alanı
Parallel Sparse Direct and Multi-Recursive	Paralel Seyrek doğrudan ve
Iterative Linear Solver	Yinelemeli Doğrusal Çözücü
Primary fields	Birincil Alanlar
Quasi-Static	Yarı-Duraylı
Reciprocity	Karşıtlılık
Rediomagnetotelluric	Radyomanyetotellürik
Regularization parameter	Düzgünleyici parametre
Regularized Inversion	Düzgünleştiricili Ters Çözüm
Root Mean Squares	Ortalama karekök
Rotational	Dönel
Secondary Fields	İkincil Alanlar
Sensitivity-Equation	Duyarlılık-Denklemi
Smoothing matrix	Yuvarlatma Dizeyi
Smoothing stabilizer	Yuvarlatıcılı durağanlaştırıcı
Sparse	Seyrek
Stabilizing functional	Durağanlaştırıcı fonksiyonel
Strike Direction	Yer-Elektrik Doğrultusu
Structured	Düzenli
Triangle Quality	Üçgen kalitesi
Triangulation	Üçgenleme
Unstructured	Düzensiz

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özcan ÖZYILDIRIM

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 03.12.1984

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Keçiören Lisesi (2001)

Lisans : Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Jeofizik Mühendisliği Bölümü (2006)

Yüksek Lisans : Cumhuriyet Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü,
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2007 – Ağustos 2010)

Yayınlar (SCI)

Özyıldırım, Ö., Candansayar, M.E., Demirci, İ. and Tezkan, B. 2017. Two dimensional inversion of MT/RMT data by using unstructured mesh. Geophysics, 82(4); E197-E210

Uluslararası Kongre Sunum

Özyıldırım Ö., 2006. Gravite yönteminde 3 Boyutlu modelleme ve ters çözüm. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi, Ankara.

Candansayar, M.E., Kaya, C., Gürer, A., KiliÇ, A.R., Dikmen, Ü., Kadioğlu, Y.K., Ulugergerli, E.U, Akin, U., Arslan, S., Konak, R., Yilmaz, H., Başokur, A.T., Demirci, i., Erdoğan, E., Kaçmaz, F., **Özyıldırım, Ö.,** Okay, H., Kaypak, B., 2008. NW_ANATOLIA_CSGM Project: an İnvestigation of N-W Anatolian Crust Structure by Using Geophisal Methods.Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Beijing, China.

Kaya, C., Candansayar, M.E., KiliÇ, A.R., Gürer, A., Dikmen, Ü., Yilmaz, H., Kadioğlu, Y.K., Ulugergerli, E.U, Akin, U., Arslan, S., Konak, R., Başokur, A.T., Demirci, i., Erdoğan, E., Kaçmaz, F., **Özyıldırım, Ö.,** Kaypak, B., Okay, H., 2008. NW_ANATOLIA_CSGM Project: an Investigation of N-W Anatolian Crust Structure by Using Geophisal Methods: Profile 1.Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Beijing, China.

Özyıldırım, Ö., Kaya, C., 2010. Frequency Normalized Impedance tensor decomposition. Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Giza, Egypt.

Candansayar, M.E., Kaya, C., Dikmen, Ü., Gürer A., Konak, N., Başokur, A.T., Kılıç, A.R., Erdoğan, E., Demirci, İ., **Özyıldırım Ö.,** Akın, U., Arslan, S., Kadıoğlu, Y.K., Yılmaz, H., Ulugergerli, E.U., Okay, H., 2010. Crustal structure of Northwestern Turkey, revealed by magnetotelluric surveys with the help of Seismology, Gravity and Magnetic Data.Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Giza, Egypt.

Özyıldırım, Ö, Candansayar M.E., Demirci İ, Tezkan B., 2013. Manyetotellürik ve Radyomanyetotellürik yöntemde düzensiz ağ kullanarak sonlu elemanlarla iki boyutlu modelleme, 20. Uluslararasi Jeofizik Kongre ve Sergisi, Antalya.

Özyıldırım, Ö, Candansayar M.E., Demirci İ, Tezkan B., 2014. Two Dimensional Inversion of Magnetotelluric and Radiomagnetotelluric data by using unstructured mesh, 22nd EM Induction Workshop Weimar, Germany 24 - 30 August 2014.

Özyıldırım, Ö, Candansayar M.E., Demirci İ, 2016. 2D joint inversion of DCR and MT/RMT data by using structured and unstructured mesh: comparison study, 23rd EM Induction Workshop Chiang Mai Thailand, 14 - 20 August 2016.

<u>Ulusal Kongre Sunum</u>

Özyıldırım, Ö., Kaya, C., Candansayar, M.E. 2012. Manyetotellürik yönteminde ayrıştırma analizi yöntemlerinin karşılaştırılması ve yeni bir açık kaynak kodu (FNIDEC). IV. Yer Elektrik Çalıştayı, İzmir.

Özyıldırım, Ö, Candansayar M.E., Demirci İ, Tezkan B. 2014. Düzensiz ağ kullanarak Manyetotellürik ve Radyomanyotellürik verilerin iki boyutlu ters çözümü, V. Yer elektrik çalıştayı, Edirne.

Özyıldırım, Ö, Candansayar M.E., Demirci İ. 2016. DAÖ ve RMT verilerin düzensiz ağ kullanılarak 2B birleşik ters çözümü: ilk sonuçlar, VI. Yer Elektrik Çalıştayı, Kocaeli.