ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KUZEYBATI ANADOLU'DA ÖLÇÜLEN UZUN PERİYOD MANYETOTELLÜRİK VERİLER KULLANILARAK EMPEDANS TAHMİN YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

M. Doğukan OSKAY

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2023

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KUZEYBATI ANADOLU'DA ÖLÇÜLEN UZUN PERİYOD MANYETOTELLÜRİK VERİLER KULLANILARAK EMPEDANS TAHMİN YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

M. Doğukan OSKAY

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

Manyetotellürik (MT) yöntem, yer içinin derin özdirenç yapısını araştırmada kullanılan başlıca jeofizik yöntemlerdendir. Günümüzde MT yöntemde geliştirilen yeni ölçü sistemleri ile audio, geniş bant ve uzun periyot aralıklarını kapsayan 0.0001 – 10.000 saniye periyot aralığında elektrik ve manyetik alanın zamana bağlı değişimleri ölçülebilmektedir. MT veri toplama sırasında, veriler gerçek zamanlı olarak ofise aktarılarak veri analizi yapılabilmektedir.

MT veri yorumunun ilk aşamasında; zaman ortamında ölçülen elektrik ve manyetik alanların hızlı Fourier dönüşümü yapılarak, frekans ortamında empedans kestirimi yapılır. Empedans kestirimindeki hatalar, MT verilerinin ters çözümünde büyük gürültülere ve yer altını temsil etmeyen modellerin elde edilmesine neden olacaktır. Bu tezin amacı, "0.0001 – 10.000 saniye" periyot aralığında ölçülen MT verilerini kullanarak, farklı empedans kestirimi yöntemlerinin birbirine göre avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmaktır. Çalışma sonucunda, veri işlem aşamasında kullanılan ön-işlem süzgeçlerinin ve elle elemenin kaliteli bir MT zaman serisi veri kümesi oluşturulabilmesi açısından çok önemli olduğu kanıtlanmıştır.

Temmuz 2023, 87 sayfa

Anahtar Kelimeler: Uygulamalı Jeofizik, Manyetotellürik Yöntem, Zaman Serisi Analizi, Empedans Kestirim Yöntemleri

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

COMPARISON OF THE IMPEDANCE ESTIMATION METHODS BY USING LONG PERIOD MAGNETOTELLURIC DATA MEASURED IN NORTHWEST ANATOLIA

Musa Doğukan OSKAY

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

Supervisor: Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

Magnetotelluric (MT) method is one of the main geophysical methods used to investigate the deep resistivity structure of the earth. Nowadays, with the new data acquisition systems developed in the MT method, the time-dependent changes of the electric and magnetic field can be measured in the period range of 0.0001 - 10.000 seconds covering audio, broadband and long period ranges. During MT data collection, the data can be transferred to the office in real time for data analysis.

In the first stage of MT data interpretation; impedance estimation is performed in frequency domain by performing fast Fourier transform of the measured electric and magnetic fields in time domain. Errors in impedance estimation will cause large noise in the inversion of MT data and will result in models that do not represent the subsurface. The aim of this thesis is to compare the existing impedance estimation methods and the methods used in impedance estimation from MT data measured in the period range "0.0001 - 10.000 seconds" and to compare the advantages and disadvantages of these methods compared to each other. As a result of this thesis, it is proved that the pre-processing filters used in the data processing and manual elimination are very important for the generation of a quality MT time series dataset.

July 2023, 87 pages

Key Words: Applied Geophysics, Magnetotelluric Method, Time Series Analysis, Impedance Estimation Methods

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Öncelikle, bu zorlu süreçte maddi ve manevi yardımını benden hiç esirgememiş olan, bana her daim destek olan aileme teşekkür ederim. Bu dönemde tez çalışmamı başarıyla ilerletip tamamlayabilmem konusunda bana bilgi birikimi ve rehberliğiyle yardımcı olan Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR'a teşekkür ederim. Yönlendirmelerini ve yardımlarını benden hiç esirgemeyen Dr. İsmail DEMİRCİ'ye çok teşekkür ederim. EMPower yazılımı ve diğer konularda her zaman vakit ayırarak yardımcı olmaya çalışan Dr. Erhan ERDOĞAN'a teşekkür ederim. Yazılımda yüzleştiğim sorunları aşabilmem amacıyla bana yardım eden Dr. Arseny Shlykov'a teşekkür ederim. Tez çalışması boyunca benden yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Emre AŞKAN, Oğuzhan BÜYÜKYENEREL, İrem BAYSAL ve Osman Batur ÇELİK'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında kullanılan veriler; yüksek lisans bursiyeri olduğum, Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR'ın yürütücülüğünde tamamlanan TÜBİTAK 119Y197 numaralı, "Jeofizik Uzun Periyod Manyetotellürik Verilerin 2B ve 3B Ters Çözümü ile Kuzeybatı Anadolu'nun Litosfer Yapısının İncelenmesi" başlıklı projesi kapsamında toplanmıştır. Desteklerinden dolayı proje ekibine ve TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Musa Doğukan OSKAY
Ankara, Temmuz 2023

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK ..... **i**
ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR ..... **iv**
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
2. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEM **7**
2.1 Manyetotellürik Yöntemde Kaynak Türleri ve Frekans Aralığı **8**
2.2 Manyetotellürik Yöntemde Ölçü Düzeneği ve Ölçülen Veriler **10**
2.3 Manyetotellürik Yöntemde Veri-İşlem Aşamaları ve Hesaplanan Veriler **12**
3. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE ZAMAN SERİSİ **15**
3.1 Zaman Serisinde Karşılaşılabilen ve Tespit Edilebilen Problemler **15**
4. ZAMAN SERİSİ ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER **22**
4.1 Regresyon M-Kestirim Yöntemi **22**
4.2 Tutarlılık ve Kararlı Kestirim **23**
4.2.1 Sıradan, kısmi ve çoklu tutarlılığın karşılaştırılması **26**
4.3 Uzak Referans Yöntemi **31**
4.4 Sınırlı Etki Uzak Referans İşleme Yöntemi **32**
4.5 Tek İstasyon Ağırlıklı Kademeli Eleme **33**
5. ÇALIŞMA ALANI VE MT VERİLERİNİN ÖLÇÜMÜ **35**
5.1 Empedans Kestiriminde Kullanılan Yazılımlar **42**
5.1.1 EMPower **42**
5.1.2 Razorback **45**
5.2 Empedans Kestirim Yöntemlerinin Karşılaştırılması **49**
6. KARARLI OTOMATİK KESTİRİM SONRASINDA YAPILABİLECEK İYİLEŞTİRMELER **67**
6.1 Genlik ve Faz Süzgeci **67**
6.2 Zaman Maskesi **69**
6.3 Kutup Diyagramı **70**
6.4 MT Zaman Serisi Analizi Sonucu **72**

7. SONUÇLAR 78
KAYNAKLAR 81
EK 1 İngilizce – Türkçe Sözlük 86
ÖZGEÇMİŞ 87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

E	Elektrik Alan ($\mu V/m$)
H	Manyetik Alan (nT)
∂	Kısmi Türev
σ	Ortamın İletkenliği
ε	Ortamın Dielektrik Katsayısı
T	Transfer Fonksiyon
T_{ij}	Tipper
ω	Açısal Frekans
Z_{ij}	Empedans
ρ	Özdirenç
ρ_a	Görünür Özdirenç
$\emptyset$	Empedans Fazı
w_i	Ağırlık Fonksiyonu
X	Çıkış Kanalı
Y_i	Giriş Kanalı
r	Tutarlılık
ψ	Etki Fonksiyonu
h_{ii}	Kaldıraç Noktaları
s	Ölçek Faktörü
Ω	Ohm
nT	Nanotesla
μV	Mikrovolt
mV	Milivolt

Kısaltmalar

AEKK	Ağırlıklandırılmış En-Küçük Kareler
AMT	Audio-Manyetotellürik
ARX	Dışsal Değişkenlerle Otoregresif
BIRRP	Sınırlı Etki Uzak Referans İşleme
CWE	Tutarlılık Ağırlıklandırma Kestirimi
EKK	En-Küçük Kareler
EMP	ElectroMagnetic Processor
EM	Elektromanyetik
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
GPR	Yer Radarı
Hz	Hertz
KHz	Kilohertz
MT	Manyetotellürik
NMR	Nükleer Manyetik Rezonans
RME	Regresyon M-Kestirimi
RMEV	Değişkenlerde Kararlı Çok Değişkenli Hatalar
RR	Uzak Nokta Referans
RRR	Kararlı Uzak Nokta Referans
RSS	Kararlı Tek İstasyon
RMT	Radyo-Manyetotellürik
SSWCD	Tek İstasyon Ağırlıklı Kademeli Eleme
TEM	Geçici Elektromanyetik
VLF	Çok Düşük Frekans
YHEM	Yatay Halka Elektromanyetik
YKAMT	Yapay Kaynaklı Audio-Manyetotellürik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 MT Kaynak Türleri, Frekans Aralığı ve MT Ölü Bölge 9
Şekil 2.2 MT Ölü Bölgenin Gerçek Arazi Verisinde Gösterimi 10
Şekil 2.3 MT Ölçü Düzeneği (+) 11
Şekil 2.4 MT Ölçü Düzeneği (L) 11
Şekil 2.5 MT Zaman Serisi Verisi 12
Şekil 3.1 Elektrik Alan Kablo Kopmasının Zaman Serisinde Tespiti 15
Şekil 3.2 Elektrik Alan Kablo Kopmasının Zaman Serisinde Etkisi 16
Şekil 3.3 Elektrik Alan Kablo Kopmasının Sinyal Genliği Değişiminde Tespiti 17
Şekil 3.4 Sinyal Genliği Değişiminde Beklenen Elektrik Alan Davranışı 17
Şekil 3.5 Manyetik Alan Kablo Kopmasının Zaman Serisinde Tespiti 18
Şekil 3.6 Manyetik Alan Kablo Kopmasının Sinyal Genliği Değişiminde Tespiti 18
Şekil 3.7 Elektrik ve Manyetik Alandaki Bozucu Etkilerin Zaman Serisinde Tespiti 19
Şekil 3.10 H_x Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi 20
Şekil 3.11 H_y Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi 20
Şekil 3.12 H_z Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi 20
Şekil 3.13 H_x Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi 20
Şekil 3.14 H_z Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi 21
Şekil 4.1 Kestirim Yöntemlerinin Kıyaslanması (Egbert ve Booker, 1986) 23
Şekil 4.2 Sıradan Tutarlılık 27
Şekil 4.3 Kısmi Tutarlılık 28
Şekil 4.4 Çoklu Tutarlılık 28
Şekil 4.5 Tutarlılık Türlerinin Kıyaslanması (Sıradan) 29
Şekil 4.6 Tutarlılık Türlerinin Kıyaslanması (Kısmi) 29
Şekil 4.7 Tutarlılık Türlerinin Kıyaslanması (Çoklu) 30
Şekil 4.8 Tutarlılık Türlerinin Kıyaslanması 30
Şekil 4.9 Ortalama Çapraz Güçlerdeki Kaldıraç Noktalarının Etkisi 31
Şekil 5.1 MT İstasyonları 36
Şekil 5.2 Pot Çamuru 39
Şekil 5.3 Bobin Çukuru 39
Şekil 5.4 Kayıt Cihazı 40
Şekil 5.5 MT İstasyonu 41
Şekil 5.6 MT İstasyonunun İçeriği 41
Şekil 5.7 EMPower - Elektrik ve Manyetik Referans Seçimi 43
Şekil 5.8 EMPower - Elektrik Şebeke Frekansı Seçimi 43
Şekil 5.9 EMPower – Otomatik Kestirim Sonucu 43

Şekil 5.10 EMPower – Otomatik Kestirim ve Elle Eleme 45
Şekil 5.11 Razorback – Otomatik Geleneksel En-Küçük Kareler Kestirimi 46
Şekil 5.12 Razorback – Otomatik RME Kestirimi 47
Şekil 5.13 Razorback – Otomatik BIRRP Kestirimi 48
Şekil 5.14 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1004 - XY) 50
Şekil 5.15 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1004 – YX) 51
Şekil 5.16 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1005 - XY) 52
Şekil 5.17 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1005 - YX) 53
Şekil 5.18 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1006 - XY) 54
Şekil 5.19 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1005 - YX) 55
Şekil 5.20 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1012 - XY) 56
Şekil 5.21 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1012 - YX) 57
Şekil 5.22 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (2005 - XY) 58
Şekil 5.23 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (2005 - YX) 58
Şekil 5.24 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (2010 - XY) 60
Şekil 5.25 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (2010 - YX) 60
Şekil 5.26 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4011 - XY) 62
Şekil 5.27 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4011 - YX) 62
Şekil 5.28 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4012 - XY) 64
Şekil 5.29 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4012 - YX) 64
Şekil 5.30 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4015 - XY) 66
Şekil 5.31 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4015 - YX) 66
Şekil 6.1 EMPower- Genlik ve Faz Süzgeci 67
Şekil 6.2 Genlik ve Faz Süzgecinin Etkisi 68
Şekil 6.3 Zaman Maskesinin Uygulanışı 69
Şekil 6.4 Kutup Diyagramı 70
Şekil 6.5 Kutup Diyagramı ile Saçılmaların Giderilmesi 71
Şekil 6.6 Ortalama Çapraz Güçlerdeki Kaldıraç Noktalarının Etkisinin Giderilmesi 72
Şekil 6.7 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (1004) 73
Şekil 6.8 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (1005) 73
Şekil 6.9 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (1006) 74
Şekil 6.10 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (1012) 74
Şekil 6.11 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (2005) 75
Şekil 6.12 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (2010) 75
Şekil 6.13 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (4011) 76
Şekil 6.14 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (4012) 76
Şekil 6.15 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (4015) 77

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 MT İstasyon Bilgileri ve Ölçü Süreleri.....37
Çizelge 5.2 Toplam İstasyon Sayıları ve Ölçü Süreleri.....38

1. GİRİŞ

Elektromanyetik (EM) yöntemler, doğal ve yapay olarak üretilen elektrik veya manyetik alanların yüzeyden veya kuyu içinden ölçülmesiyle elde edilen elektromanyetik verileri, bir veri-işlem zincirinden geçirerek yeryüzünün özdirenç özelliklerindeki değişimleri ile yer altını incelemek amacıyla kullanılan jeofizik yöntemlerdir. Jeofizik EM yöntemler başlıca; Manyetotellürik (MT), Audio-Manyetotellürik (AMT), Yapay Kaynaklı Audio-Manyetotellürik (YKAMT), Yatay Halka Elektromanyetik (YHEM), Çok Düşük Frekans Elektromanyetik (Very Low Frequency, VLF), Radyo-Manyetotellürik (Radio-Magnetotelluric, RMT), Geçici Elektromanyetik (Transient Electromagnetic, TEM), Yer Radarı (Ground Penetrating Radar, GPR) ve Nükleer Manyetik Rezonans (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) olarak sıralanabilir.

Jeofizik EM yöntemler, 1900'lü yılların başından itibaren geliştirilmektedir. Bu yöntemler derin ve sığ yer altı incelemelerinde 1950'li yıllardan itibaren yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte birbirinden farklı üstünlüklere sahip bu EM yöntemler geniş bir frekans aralığıyla ve buna bağlı olarak değişen araştırma derinliği ve ilgili derinlikteki çözünürlüğü ile, birbirinden farklı mühendislik sorunlarının çözüm arayışında yaygın olarak kullanılmaktadır. EM yöntemlerin uygulamasında saha çalışmalarının uygulanabilir ve düşük maliyetli olması bir üstünlük iken, veri-işlem aşamasında gereken karmaşık ve ayrıntılı hesaplamalar, karmaşık kuram bilgisine gerek duyar.

Manyetotellürik (MT) yöntem, yakın yüzeyden geçiş bölgesine (yaklaşık 400km) ve ötesine kadar yerkürenin elektrik iletkenliğini ve yapısını görüntülemek için kullanılan bir jeofizik elektromanyetik yöntemdir (Chave ve Jones, 2012). MT yönteminin, derin kabuk ve litosfer aramaları, maden ve jeotermal aramaları, hidrokarbon aramaları gibi geniş uygulama alanları vardır. MT yöntemi, kaynak olarak güneş patlamaları ve yıldırım düşmelerini kullandığından, yapay kaynaklı yöntemlere kıyasla uygulaması kolay bir yöntem olmasıyla kolaylık sağlamaktadır. Ancak bütün doğal kaynaklı yöntemlerde olduğu gibi MT yönteminde de denetimli bir kaynak olmadığından, gürültülerden daha fazla etkilenir. Bu durum veri işlem aşamasında birtakım sorunlara yol açar.

MT ölçülerinde, her istasyonda elektrik ve manyetik alanın değişimleri zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilerek yer altının düşey yöndeki iletkenlik değişimleri incelenir. Bir profil boyunca konumlandırılmış istasyonlarda alınan ölçüler birleştirilerek MT verilerinin iki boyutlu ters çözümü yapılabilir. Ayrıca bir alanda x ve y-yönünde MT verileri toplanarak, bu verilerin üç boyutlu ters çözümü de yapılabilir. Çok boyutlu MT çalışmaları için yer altı bilgisini koruyup, yüksek çözünürlüklü modelleyebilmek amacıyla, arazi koşulları ve veri kalitesi üzerindeki bozucu etkilere neden olabilecek etkenler de göz önünde bulundurarak MT istasyonlarının bir profil doğrultusunda mümkün olduğunca eşit aralıklarla konumlandırılması tercih edilir. Günümüzde bilgisayar teknolojisinin oldukça ilerlemesiyle çok çekirdekli ve güçlü işlemcilerin ortaya çıkması sonucunda MT verilerinin 3B ters çözümü yapılabilmektedir. Jeofizik yorum, ters çözüm işlemi sonucunda elde edilen özdirenç modeli üzerinden yapılmaktadır. Jeofizik yorumun tutarlı olması ve gerçek jeolojiyle örtüşebilmesi için, veri toplama ve veri-işlem adımlarında duyarlı davranmak gerekmektedir. Çevresel gürültüler, operatör hataları, mevsimsel etkiler gibi etkenler, toplanan MT verilerinin kalitesine oldukça etki etmektedir. MT verileri bu etkilerden hassas bir veri-işlem zinciri ile arındırılmaz ise ters çözüm sonucu elde edilen model gerçek jeolojiyi temsil etmeyecektir. Dolayısıyla jeofizik yorumun yanlış yapılmasına neden olacaktır. Bu sebepten, MT zaman serisi verilerinin analizi sağlıklı ve tutarlı bir jeofizik yorum için çok önemlidir. Geçmişten günümüze, MT zaman serisi verilerinin analizinde karşılaşılan birbirinden farklı mühendislik sorunlarına yanıt aramak amacıyla birçok yöntem önerilmiş ve geliştirilmiştir.

MT yönteminde ölçü alınan bölgede bir gürültü kaynağı varsa, bu gürültü kaynağı empedans kestirimlerinde bir sapma (biase) etkisine neden olacaktır (Sims vd., 1971; Kao ve Rankin, 1977). Ölçülerin çok gürültülü olması durumunda uzak referans yöntemi (Remote Reference, RR) kullanılır (Gamble, 1978; Gamble vd., 1979). RR yöntemi, aynı anda ikinci bir uzak bölgede kaydedilmiş yatay manyetik alanların, yerel elektromanyetik alanlarıyla ilişkilendirildiği ölçüm tekniğidir. Ölçü istasyonu ve RR noktalarında sinyalin ilişkili olması ve uzak noktanın gürültüden etkilenmeyen bir nokta olması gerekir. RR yöntemini geliştirebilmek adına, kararlı uzak referans tekniği (Robust Remote Reference,

RRR), 1980'lerin ortalarından itibaren farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (ör. Jones ve Jödicke, 1984; Egbert ve Booker, 1986; Chave vd., 1987; Egbert, 1997).

"Tek İstasyon Ağırlıklı Kademeli Eleme (Single-Station Weighted Cascade Decimation, SSWCD)" yöntemi, kademeli eleme şemasının (Wight vd., 1977; Bostick ve Smith, 1979; Wight ve Bostick, 1980) Jones ve Jödicke (1984) tarafından geliştirilerek transfer fonksiyonu kestirimini iyileştirecek bir şema olarak güncellenmesiyle ortaya çıkmıştır.

MT zaman serisi analizinde kullanılan yaklaşımlar; en-küçük kareler (EKK), ağırlıklandırılmış en-küçük kareler (AEKK) ve geliştirilen kararlı M-kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması Egbert ve Booker (1986) çalışmasında yapılmıştır. MT zaman serisi verilerinin analizinde, veriler Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile zaman ortamından frekans ortamına aktarılarak transfer fonksiyonu ya da empedans tensörü hesaplanmaktadır. EKK çözümleri, verinin genel davranışı üzerinde bozucu etkilere sahip saçılmalar çok ise ciddi şekilde yanıltıcı sonuçlar vermektedir. Bu durumun önüne geçebilmek amacıyla, "Ağırlıklandırılmış En-Küçük Kareler (AEKK)" yöntemini kullanarak saçılmış verilerin etkisini azaltmayı amaçlamışlardır. Transfer fonksiyonunun EKK ve AEKK çözümlerine alternatif olarak "Kararlı M-Kestirim Yöntemi", "Regression M-Estimate (RME)" türetilmiştir. Aykırı verilerin etkisini azaltabilmek adına, geleneksel EKK yönteminin aksine, geliştirilen RME yönteminin tutarlı bir şekilde, gerçekçi hatalarla güvenilir transfer fonksiyonu kestirimi yaptığını göstermişlerdir.

MT ölü bölgesinde çok düşük sinyal/gürültü oranından kaynaklanan problemleri aşabilmek için tutarlılığa dayalı bir yöntem olan "Tutarlılık Ağırlıklandırma Kestirimi (Coherence Weighted Estimate, CWE)" ile RME yöntemlerinin melez bir kullanımı, Egbert ve Livelybrooks (1996) çalışmasında önerilmiştir. Tek istasyonlu MT ölü bölge verileri için RME ile birleştirilmiş CWE yönteminin, diğer bir deyişle iki yöntemin melez bir kullanımının önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Egbert ve Booker (1986) çalışmasından kısa bir süre sonra, RME kestirim kuramının gözden geçirilmesi için çalışılmıştır (Chave vd., 1987). Güç spektrumlarının,

tutarlılıkların ve transfer fonksiyonlarının jeofizik veri-işlemde otomatik ve veriye uyarlanabilir bir tarzda kararlı kestirimlerini elde etmek için pencere ortalamalı spektral tekniklerle birleştirilmesi gerektiği gösterilmiştir. Sınırlı Etki Uzak Referans İşleme (Bounded Influence Remote Reference Processing, BIRRP) yöntemi, RR yönteminde karşılaşılabilen problemleri aşabilmek amacıyla geliştirilmiştir (Chave ve Thomson, 1994; Chave, 2003; Chave ve Thomson, 2004).

MT zaman serisi verilerinin analizi için geliştirilen, değişkenlerde kararlı çok değişkenli hatalar (robust multivariate errors-in-variables, RMEV) ve RRR yöntemleri kıyaslanarak, hangi tekniğin daha iyi sonuç verdiği tartışılmıştır (Egbert, 1997). Çoğu zaman RR verilerinin sağlıklı bir şekilde hesaplanmasında bile, yararlı sonuçların alınamadığı kritik alanlar ve/veya frekans aralıkları vardır. Bu zorluklar en çok MT ölü bölge aralığını temsil eden 0.1 – 10Hz frekanslarında ve kültürel elektromanyetik gürültünün önemli olduğu bölgelerde görülmektedir. Çalışmanın sonucunda, genellikle aykırı verilere çok hassas olan RRR kestiriminden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmıştır.

MT zaman serisi analizinde, yapay sinir ağı kullanan birçok çalışma vardır (Manoj ve Nagarajan, 2003; Uluocak vd., 2013; Carbonari vd., 2018; Chen vd., 2020). Egbert ve Chave'nin çalışmalarının ışığında (Egbert ve Booker, 1986; Chave vd., 1987) ileri-beslemeli yapay sinir ağı yöntemi (Feed-forward artificial neural network, FANN) kullanılarak MT zaman serisi analizi yapay sinir ağı ile yapılmıştır (Manoj ve Nagarajan, 2003). Başka bir çalışma olarak, MT verisindeki gürültülü bileşenlerini sınıflamak amacıyla çok katmanlı, ileri beslemeli ve geri yayılımlı bir model kullanılmıştır (Uluocak vd., 2013).

MT empedans tensörü kestirimi için çıktı hatası tabanlı parametrik yöntem kullanılan bir çalışma, Butala ve Xu (2015) tarafından yapılmıştır. USArray MT arazi verilerine önerilen parametrik yöntem, RRR ve kararlı tek istasyon (Robust Single Station, RSS) yöntemleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda parametrik yöntemin kısa ve uzun periyotlarda, yüksek ve düşük sinyal/gürültü oranları durumlarında avantajları vurgulanmıştır.

Günümüzdeki çalışmalara örnek olarak, MT elektromanyetik transfer fonksiyonu kestirimi üzerine bir çalışma, Xu ve Butala (2021) tarafından yapılmıştır. Çalışma kapsamında, MT elektromanyetik transfer fonksiyonu kestirimi için kararlı uzak nokta referans ve parametrik yöntemler kullanılmıştır. MT elektromanyetik transfer fonksiyonunun davranışını modellemek amacıyla "Dışsal Değişkenlerle Otoregresif" (Auto-Regressive with Exogenous Variables, ARX) model kullanılmıştır. Parametrik yöntem, MT arazi verilerinde bulunan gürültüyü azaltabilir, geleneksel RR yönteminin aksine, ek bir referans istasyonunda toplanan veriye ihtiyaç duymadan makul tepki fonksiyonu kestirimi yapabilir. Ayrıca parametrik yaklaşım kullanarak, kabul edilebilir bir performans elde etmek ve bir MT elektromanyetik transfer fonksiyonunu yeterince karakterize etmek için nispeten kısa bir eğitim süresinin (1 günlük ölçü) yeterli olduğunu açıklamışlardır.

Çin'de yapılan bir çalışmada 10 yıl boyunca sürekli ölçü alan 40 elektrik ve 36 manyetik ölçü istasyonundan elde edilen verileri kullanarak çok uzun periyotlu bir MT çalışması yapılmıştır (Wang vd., 2020). Çalışma kapsamında RR ve günlük değişimlerin kaynak etkisi ile empedans kestirimi, sıralı uzaysal modlardan empedans kestirimi ve farklı manyetik alan istasyonlarından yarı-empedans kestirimi olmak üzere, MT empedans kestirimi için üç farklı yöntem kullanılmış ve hangi yöntemin daha iyi sonuç verdiği tartışılmıştır.

Bu çalışmanın ilk kısmında MT zaman serisi verilerinin kestiriminde kullanılan yöntemlerden; geleneksel EKK yöntemi ile tutarlılığa bağlı kestirim yöntemleri olan RME (Egbert ve Booker, 1986), BIRRP (Chave, 2003; Chave ve Thomson, 2004), SSWCD (Jones ve Jödicke, 1984) yöntemleri incelenmiş ve derlenmiştir. İzleyen bölümlerde sırasıyla MT yöntemi hakkında genel bilgiler verilmiş, MT yöntemde zaman serisi ve zaman serisi analizinde karşılaşılabilecek sorunları kısaca açıklanmıştır. İncelenen çalışmalarda kullanılan analiz yöntemlerini kavrayabilmek amacıyla ihtiyaç duyulan bilgiler kısaca derlenmiştir.

Tezin ikinci kısmında bursiyeri olduğum TÜBİTAK 119Y197 numaralı, "Jeofizik Uzun Periyod Manyetotellürik Verilerin 2B ve 3B Ters Çözümü ile Kuzeybatı Anadolu'nun

Litosfer Yapısının İncelenmesi" başlıklı projesi kapsamında kurulan MT istasyonlarında toplanan gerçek arazi verilerinden dokuz adet istasyonda ölçülen MT zaman serisi verileri kullanılarak otomatik empedans kestirimi için; SSWCD yöntemini kullanan EMPower yazılımından elde edilen kestirim sonuçları ile açık kaynak kodlu bir Python kütüphanesi olan Razorback'in bünyesinde bulunan geleneksel EKK, RME ve BIRRP yöntemlerinin kestirim sonuçları birbirleriyle kıyaslanarak hangi yöntemin daha iyi sonuç verdiği yorumlanmıştır. Ayrıca MT zaman serisi verilerinin analizinde dikkat edilmesi gereken hususlar açıklanmış, kararlı kestirim sırasında kullanılabilecek ön-işlem süzgeçleri ve elle eleme yöntemlerinin veri kalitesi ve verinin genel davranışı üzerine olan etkileri ayrıntılıca yorumlanmıştır.

2. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEM

Elektromanyetik yöntemler, doğal ve yapay olarak üretilen elektrik veya manyetik alanların yüzeyden veya kuyu içinden ölçülmesiyle elde edilen elektromanyetik verileri bir veri-işlem zincirinden geçirerek yer altının özdirenç (1/iletkenlik) özelliklerindeki değişimlerinin ışığında yer altını incelemek, haritalamak ve yorumlayabilmek amacıyla kullanılan bir takım jeofizik yöntemlerdir.

Jeofizik elektromanyetik yöntemler olan Manyetotellürik (MT) yöntem konusunda ilk çalışmalar 1950'li yıllarda yayınlanmıştır (ör. Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953). Bu araştırmacılar, elektrik ve manyetik alan değişimlerinin eş zamanlı olarak ölçülmesi halinde, elektromanyetik alanların yeryüzüne nüfuzunu tanımlayan karmaşık oranların (empedans) elde edilebileceğini fark etmiştir. Elektromanyetik alanların yeryüzüne nüfuz etme derinlikleri, elektromanyetik ölçüde kullanılan frekansa (1/periyot) ve yer altının özdirenç yapısına bağlıdır. Bu, MT yönteminin temelini oluşturmaktadır (Simpson ve Bahr, 2005). MT yöntemi, yakın yüzeyden geçiş bölgesine (yaklaşık 400km) ve ötesine kadar yerkürenin elektrik iletkenliğini ve yapısını görüntülemek için kullanılan bir jeofizik yöntemdir (Chave ve Jones, 2012). MT yönteminde, zaman ortamında ölçülen elektrik ve manyetik alanlar kullanılarak, frekans ortamında elde edilen empedans ve Tipper verilerinin 1B, 2B ya da 3B özdirenç modeli elde edilerek, yer altının özdirenç yapısı incelenir.

Doğal kaynaklı bir yöntem olan MT yöntemi; veri toplama, veri işlem ve 2B ve 3B ters çözüm algoritmalarının geliştirilmesi nedeniyle, gün geçtikçe farklı alanlarda kullanılmaya başlamıştır. MT yöntemi, derin kabuk yapısının incelenmesi ve tektonik çalışmalarında (Wannamaker vd., 1989; Stanley vd., 1990; Ulugergerli vd., 2007; Candansayar vd., 2008, 2010), hidrokarbon veya jeotermal kaynakların araştırılmasında (Orange, 1989; Munõz, 2014; Erdoğan ve Candansayar, 2018) yaygın olarak kullanılmaktadır.

MT yöntemi, yapay kaynaklı yöntemlere kıyasla, harici verici kullanılmaması nedeni ile uygulaması daha kolaydır. Ancak bütün doğal kaynaklı yöntemlerde olduğu gibi MT

yöntemi de kontrollü bir kaynak kullanılmamasından dolayı, gürültü seviyeleri oldukça değişken olduğundan çevresel ve operasyonel gürültülerden aktif kaynaklı yöntemlere göre daha fazla etkilenir. Bu nedenle, sinyal-gürültü oranı üzerinde çok az kontrol olduğundan, veri-işlem aşamasında birtakım problemlerle karşılaşılmaktadır.

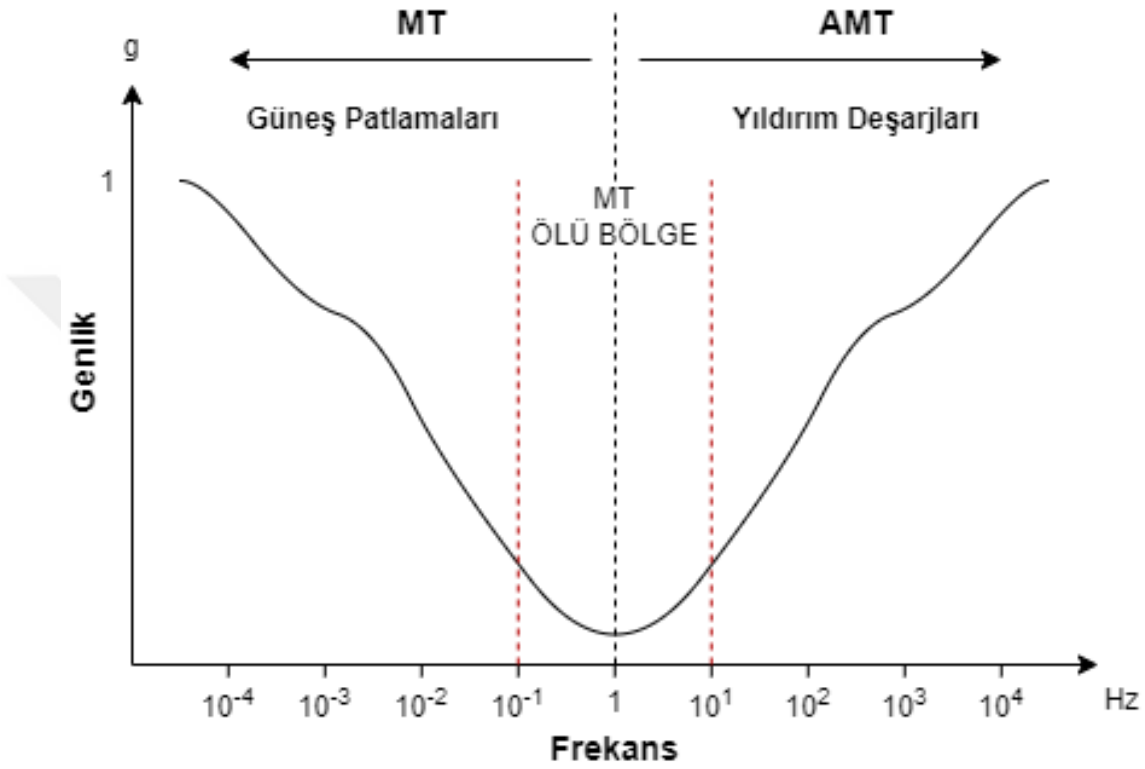
Dünya'nın zamanla değişen manyetik alanı, genlik ve zamana bağlı davranışları bakımından büyük ölçüde farklılık gösteren iki farklı kaynak tarafından üretilir. Bunun birincil nedeni Dünya'nın dış çekirdeğindeki "manyeto hidrodinamik" süreçlerdir (Siscoe, 2005). Bununla birlikte, MT yöntemi için harici, küçük genlikli yer manyetik değişimler, geçici davranışları nedeniyle Dünya'da Eddy akımlarına ve ikincil manyetik alanlara neden olur.

2.1 Manyetotellürik Yöntemde Kaynak Türleri ve Frekans Aralığı

Manyetotellürik olaylar, dünyayı çevreleyen atmosfer, iyonosfer ve manyetosfer katmanlarında meydana gelen ve dünyanın manyetik alanında değişikliklere neden olan birtakım doğal olaylardır. MT yöntemi iç ve dış kaynak olarak adlandırılan iki farklı doğal kaynağı kullanmaktadır. Dış kaynak olarak güneş patlamalarını ve iç kaynak olarak yıldırım deşarjlarının yer kürede meydana getirdiği yer manyetik dalgalanmalar, kökenlerine bağlı olarak 0,00001sn ile 10,000sn periyotları, başka bir deyişle 10^{-5}Hz ile 10^{4}Hz frekansları arasında değişmektedir. Güneş patlamaları 1 saniyeden daha uzun periyotlu, yani 10^{-5}Hz ve 1Hz aralığındaki alçak frekanslarda kaydedilen EM alanlarını üretirken, yıldırım deşarjları gibi meteorolojik faaliyetler 1 saniyeden daha kısa periyotlu, yani 1Hz ve 10^{4}Hz aralığındaki yüksek frekanslarda kaydedilen EM alanlarını üretir.

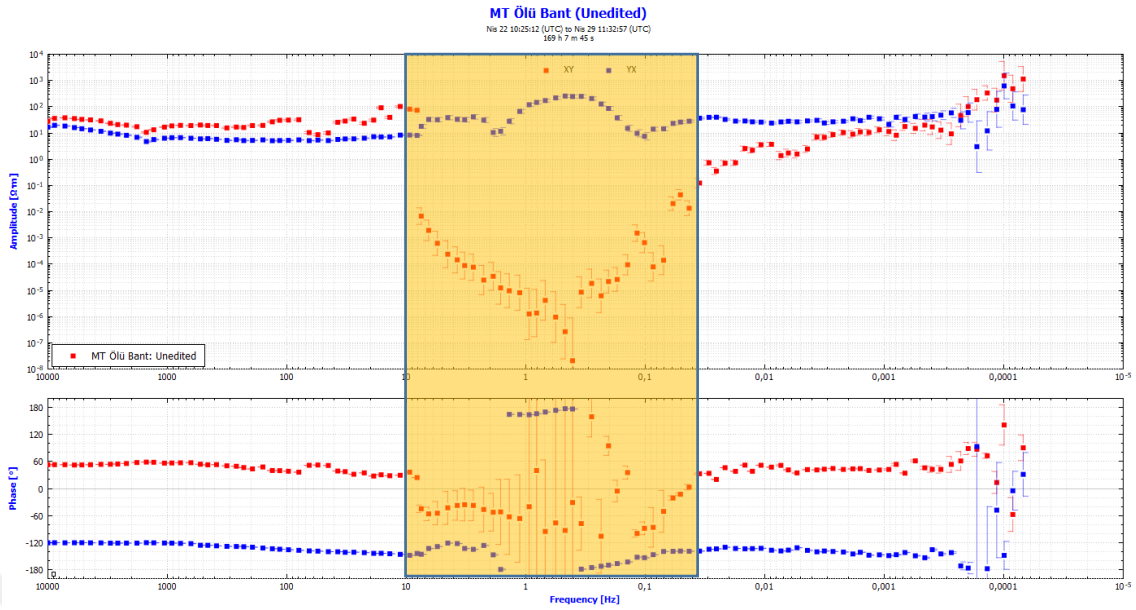
MT yönteminde, yer kürenin elektrik ve manyetik alanındaki değişimler zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilerek zaman serileri oluşturulur. İç kaynaklı alanların neden olduğu 1Hz ve üstü frekansların meydana getirdiği veri kümesi, AMT verisi olarak adlandırılırken, dış kaynaklı alanların neden olduğu 1Hz ve altı frekansların meydana getirdiği veri kümesi, MT verisi olarak adlandırılır. Ancak günümüz teknolojisinde iki farklı kaynak alanından meydana gelen veri kümelerini tek bir cihazla, tek seferde toplamak ve birleşik bir zaman serisi elde etmek mümkündür. Sözü edilen iki kaynağın

sinyal gücünün genliği, 1Hz frekansına yaklaşırken alçalır. MT yönteminde kaynak türleri ve frekanslara göre sinyal genliğinin değişimi **Şekil 2.1**'de gösterilmiştir. İki kaynak türünün sinyal genliğinin düştüğü ve iç içe geçtiği bu bölge, MT verileri için ölü bölge ya da ölü bant (MT dead-band) olarak adlandırılır (**Şekil 2.1**).



Şekil 2.1 MT Kaynak Türleri, Frekans Aralığı ve MT Ölü Bölge

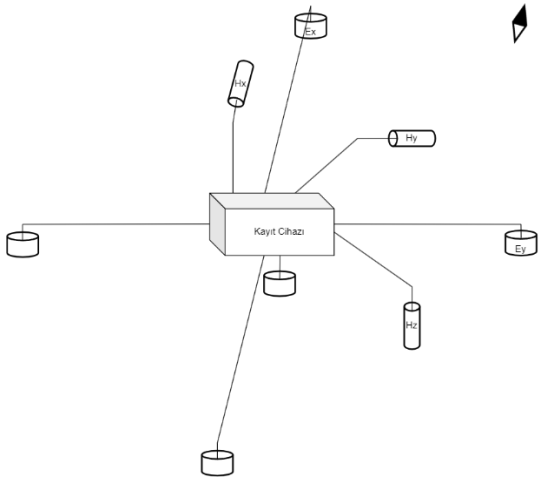
MT ölü bölgesi, ham arazi verisi üzerinde **Şekil 2.2**'de gösterilmiştir. MT ölü bölgedeki veri, gürültülerden fazla etkilenebilen ve veri-işlemi zor bir veri kümesidir. MT zaman serisi verilerinin işlenmesinde, farklı bilim insanları tarafından geliştirilen birbirinden farklı veri kestirim yöntemleri kullanılması durumunda dahi, bu periyot aralıklarında (0.1sn-10sn) veriler saçılmış şekilde elde edilebilir. Kültürel elektromanyetik gürültünün fazla olduğu bölgelerde de veriler saçılmış olarak elde edilmektedir. MT ölü bölgesindeki verilerden anlamlı sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla zaman serisi kestirim yöntemlerini geliştirebilmek amacıyla bazı çalışmalar yapılmıştır (Jones ve Jödicke, 1984; Egbert ve Livelybrooks, 1996; Egbert, 1997; Chave ve Thomson, 2004).



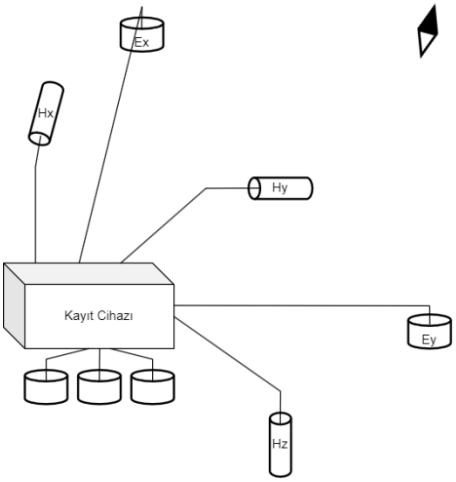
Şekil 2.2 MT Ölü Bölgenin Gerçek Arazi Verisinde Gösterimi

2.2 Manyetotellürik Yöntemde Ölçü Düzeneği ve Ölçülen Veriler

MT ölçülerinde kullanılan standart ölçü düzeneği **Şekil 2.3**'te gösterilmiştir. Bir MT istasyonunda, klasik bir ölçü düzeneği ile E_x ve E_y olmak üzere elektrik alanın iki bileşeni ve H_x, H_y ve H_z olmak üzere manyetik alanın üç bileşeni, zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülür. MT ölçülerinde potlar, arazi koşulları göz önünde bulundurularak, istenilen dipol açıklığına göre "+" (**Şekil 2.3**) veya "L" (**Şekil 2.4**) dizilimi olacak şekilde yerleştirilebilir. "L" diziliminde, E_x bileşeninin güney yönündeki potu ile E_y bileşeninin batı yönündeki potu, merkez potu ile aynı çamura gömülür.



Şekil 2.3 MT Ölçü Düzeneği (+)

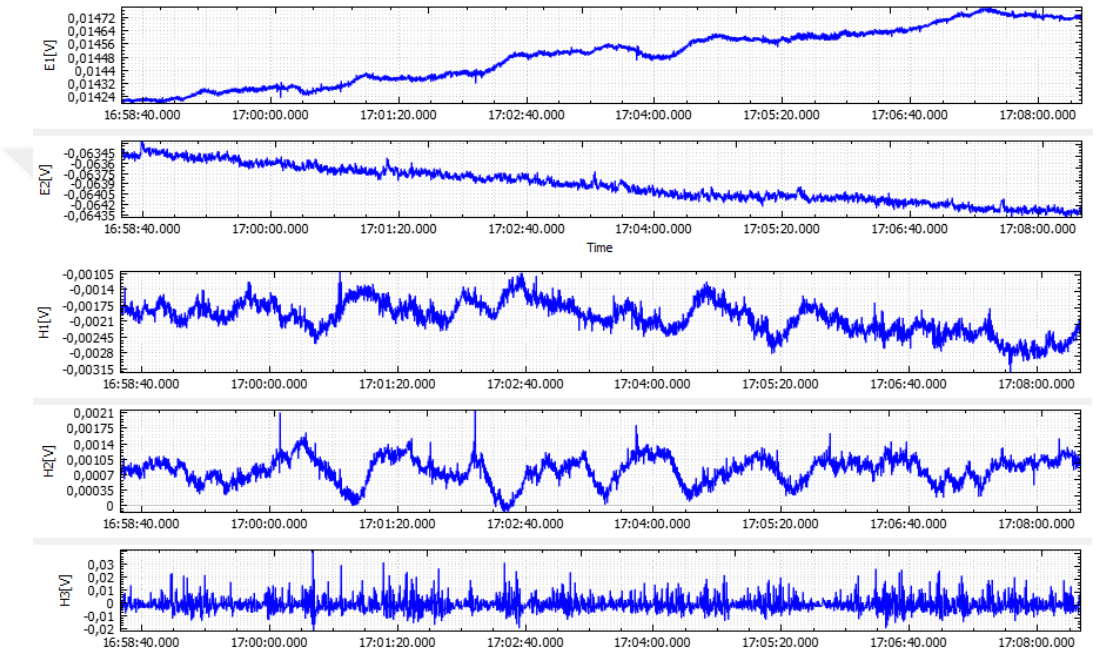


Şekil 2.4 MT Ölçü Düzeneği (L)

Standart ölçü düzeneğinde elektrik alan bileşenleri merkezde bulunan kayıt cihazından kuzey-güney ve doğu-batı yönlerinde eşit uzaklıkta, yaklaşık 0.3 metre derinliğinde bir çamur çözeltisinin içerisinde bulunan, üstü toprakla örtülmüş polarize olmayan potlar ile ölçülürken; manyetik alan bileşenleri kuzey-güney (H_x), doğu-batı (H_y) ve düşey (H_z) yönde olmak üzere eşit uzaklıkta, doğrultu boyunca kazılmış çukurların içerisinde bulunan, üstü toprakla örtülmüş üç farklı indüksiyon bobini ile ölçülür. Manyetik bobinler gün içindeki ısı değişimi, yağmur ve rüzgâr gibi gürültülerden etkilenmemesi için en az 30cm derinliğe gömülürler. Z-yönündeki bobin ise düşey yönde boyu kadar açılan çukura dikey olarak gömülür.

Standart ölçü düzeneğiyle yapılacak MT ölçüleri için; kayıt cihazı, akü, üç adet indüksiyon bobini ve bobinleri kayıt cihazına bağlamak amacıyla üç adet kablo, biri merkezde ve dördü coğrafik yönlerde olmak üzere beş adet polarize olmayan fincan pot ve potları kayıt cihazına bağlamak amacıyla dört adet elektrik kablosu, pot ve bobinlerin gömüleceği çukur kazımı için kürek ve kazma, pot çamuru için su, doğru yönlendirme amacıyla pusula, pot ve bobinlerin eşit uzaklıkta olabilmesi amacıyla şerit metre, bobinlerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla su terazisi ve koordinat ölçümleri için GPS olmak üzere ekipmanlara ihtiyaç vardır. Fincan elektrot olarak, kurşun-kurşun klorür fincan elektrotlar kullanılır. Bu elektrotlar, bakır-bakır sülfat elektrotlara göre daha az gürültü ile düşük genlikli gerilim farklı ölçülmesini sağlamaktadırlar.

MT yöntemde, elektrik ve manyetik alanların zamana bağlı değişimlerinden oluşan veri seti, zaman serisi verisi olarak isimlendirilir. MT yöntemde ölçülen her bir veri (E_x, E_y, H_x, H_y ve H_z), zamanın bir fonksiyonu olarak çizilir ve zaman serisi grafiği olarak adlandırılır (**Şekil 2.5**). Burada, ölçülen elektrik alanın birimi mikrovolt/metre ($\mu V/m$) veya milivolt/metre (mV/m) iken; ölçülen manyetik alanın birimi Nanotesla (nT)'dır. Zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilen bu değişimler, MT veri kümesini oluşturur.



Şekil 2.5 MT Zaman Serisi Verisi

Şekil 2.5'te x ekseni zamanı temsil ederken, y ekseninde bulunan H1, H2 ve H3 sırasıyla; H_x, H_y ve H_z'de zamana bağlı meydana gelen değişimleri, E1 ve E2 sırasıyla; E_x ve E_y'de zamana bağlı meydana gelen değişimleri temsil etmektedir.

2.3 Manyetotellürik Yöntemde Veri-İşlem Aşamaları ve Hesaplanan Veriler

MT zaman serisi verileri zamanın bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünden, frekans içeriği bilgisinin elde edilebilmesi amacıyla "Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT)" ile ölçülerin frekans ortamına aktarılması gerekmektedir (Chave ve Jones, 2012).

Arazide zaman ortamında ölçülen x-yönündeki elektrik alanın ve ona karşılık gelen manyetik alan değerlerinin Fourier dönüşümleri,

$$E_x(t) \rightarrow E_x(f) = |E_x(f)|e^{(i\emptyset_E(f))} \tag{2.7}$$

$$H_y(t) \rightarrow H_y(f) = \left|H_y(f)\right|e^{(i\emptyset_H(f))} \tag{2.8}$$

şeklinde yazılır.

Sabit bir frekanstaki periyodik kaynaklar için düzlem dalga kabulü, kaynakların iki basit modun doğrusal kombinasyonları olarak ifade edilebileceğini ima eder. Birim büyüklükteki tekdüze kaynaklar doğrusal olarak Kuzey-Güney ve Doğu-Batı olarak kutuplanır. Bu durum, tek bir bölgede ölçülen yatay elektrik ve manyetik alan bileşenleri arasında frekans ortamında doğrusal bir ilişki olduğu anlamına gelir (Egbert, 2021).

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx}(\omega) & Z_{xy}(\omega) \\ Z_{yx}(\omega) & Z_{yy}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \tag{2.9}$$

Burada $H_x(\omega)$, $H_y(\omega)$, $E_x(\omega)$ ve $E_y(\omega)$ elektrik (**E**) ve manyetik (**H**) alanın Fourier dönüşümleridir. Frekans ortamında, elektrik ve manyetik alanların yatay bileşenlerinin oranları empedans olarak isimlendirilir ve aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$Z_{ij} = \frac{E_i}{H_j}, \qquad i,j = x,y \tag{2.10}$$

Arazide ölçülen yatay elektrik ve manyetik alanlar kullanılarak eşitlik (2.9)'da verilen dört empedans bileşeninden aşağıdaki gibi verilen "Empedans tensörü (Z)" elde edilir.

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}. \tag{2.11}$$

Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx} ve Z_{yy} MT verilerinin Fourier dönüşümünde her bir frekans (1/periyot) için empedans kestirimi yapılırken belirli frekans aralığındaki veri grubunun özilişki (auto-correlation) ve çapraz ilişkileri (cross-correlation) kullanılarak empedans tensörü bileşenleri aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır.

$$Z_{xx} = \frac{(E_x H_x^*)\left(H_y H_y^*\right) - (E_x H_y^*)(H_y H_y^*)}{(H_x H_x^*)\left(H_y H_y^*\right) - (H_x H_y^*)(H_y H_x^*)} \tag{2.12}$$

$$Z_{xy} = \frac{\left(E_x H_y^*\right)(H_x H_x^*) - (E_x H_x^*)(H_x H_y^*)}{(H_x H_x^*)\left(H_y H_y^*\right) - (H_x H_y^*)(H_y H_x^*)} \tag{2.13}$$

$$Z_{yx} = \frac{\left(E_y H_x^*\right)\left(H_y H_y^*\right) - (E_y H_y^*)(H_y H_x^*)}{(H_x H_x^*)\left(H_y H_y^*\right) - (H_x H_y^*)(H_y H_x^*)} \tag{2.14}$$

$$Z_{yy} = \frac{\left(E_y H_y^*\right)(H_x H_x^*) - (E_y H_x^*)(H_x H_y^*)}{(H_x H_x^*)\left(H_y H_y^*\right) - (H_x H_y^*)(H_y H_x^*)} \tag{2.15}$$

MT verilerinin yorumlanmasında, genellikle empedans tensörünün köşegen dışı elemanları olan xy ve yx bileşenleri kullanılır. Empedansın bileşenleri kullanılarak, istenilen moda göre görünür özdirenç (ρ_a) ve faz (Ø) değerlerinin hesaplanması izleyen bağıntılarla yapılır (Chave ve Jones, 2012).

$$\rho_{ij}(f) = \frac{1}{2\pi f \mu_0} |Z_{ij}(f)|^2 \tag{2.16}$$

$$\emptyset_{ij}(f) = arctan \frac{\text{sanal}[Z_{ij}(f)]}{\text{gerçel}[Z_{ij}(f)]} \tag{2.17}$$

Burada μ_0, serbest havanın manyetik geçirgenliğidir ($\mu_0 = 4pi * 10^{-7}\ Henry/metre$) Hesaplanan empedans, görünür özdirenç (GÖ) ve faz verilerine yapılan bir zaman serisi analizi sonucunda ölçülen MT verisi, ters çözüme uygun hale getirilir.

MT yöntemde, zaman serisi analizi sonrası hesaplanan diğer büyüklük ise Tipper verileridir. Tipper, düşey manyetik alanın (H_z), yatay manyetik alanlara (H_x ve H_y) oranlarından aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$T_{zx} = \frac{H_z}{H_x}, \qquad T_{zy} = \frac{H_z}{H_y} \tag{2.18}$$

Tipper büyüklüğü düşey manyetik alanın yatay yönde sapma miktarını verir. Bu büyüklük özellikle yanal yöndeki özdirenç değişimlerinden fazla etkilenir. Bu iki Tipper bileşeni aşağıda verilen Tipper tensörünün (T) bileşenleridir.

$$T = \begin{bmatrix} T_{zx} & T_{zy} \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

Empedans ve Tipper tensörlerinin tüm bileşenleri karmaşık sayıdır.

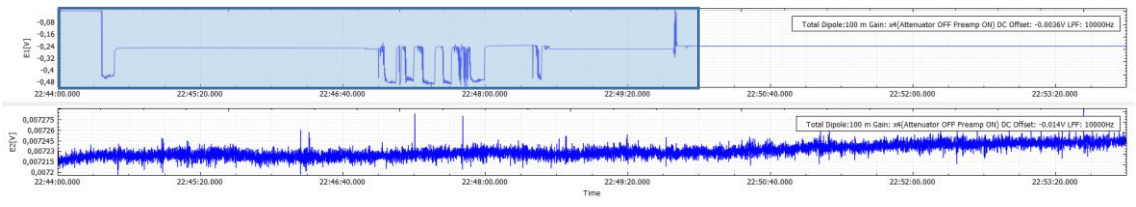
3. MANYETOTELLÜRİK YÖNTEMDE ZAMAN SERİSİ

MT yöntemde zaman serisi verileri, zamanın fonksiyonu olarak kaydedilen MT veri kümesine verilen addır. MT veri kümesi, bölüm **2.3**'te ayrıntılıca açıklanmıştır. MT yönteminde zaman serileri incelenerek; periyodik gürültüler, kablo kopmaları, şehir gürültüsü gibi veride bozucu etkilere neden olan ve veri kalitesinin düşmesine yol açan sinyaller tespit edilebilmektedir.

3.1 Zaman Serisinde Karşılaşılabilen ve Tespit Edilebilen Problemler

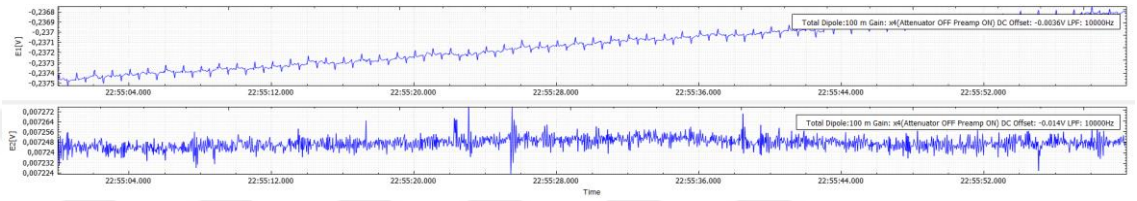
MT yöntemde veriler zaman ortamında ve zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedildiğinden, zaman serileri incelenerek; kablo kopmaları, periyodik ve sistematik gürültüler, çevresel gürültüler gibi problemler tespit edilebilmektedir.

Şekil 3.1'de gerçek arazi verisinde, elektrik alanın iki bileşeninin (E_x-E_1 ve E_y-E_2) olmak üzere zaman serisinden on dakikalık bir kesit görülmektedir. Burada E_x bileşeni için, saat 22:44 ile 22:50 aralığındaki altı dakikalık mavi bir dikdörtgen ile taralı sürede beklenmeyen bir davranış gerçekleşmektedir. Verilen zaman penceresinde E_x bileşeninin kablosunun koptuğu görülmektedir. MT istasyonları, şehir gürültüsü ve çevresel gürültülerden olabildiğince az etkilenmesi amacıyla doğada uygun görülen noktalara kurulmaktadır. Ancak istasyonlar doğanın içinde olduğu için, yaban hayatının engellenmesi söz konusu değildir. Burada E_x bileşeninin kablosunu yaban hayatından bir canlının kopardığı düşünülmektedir.



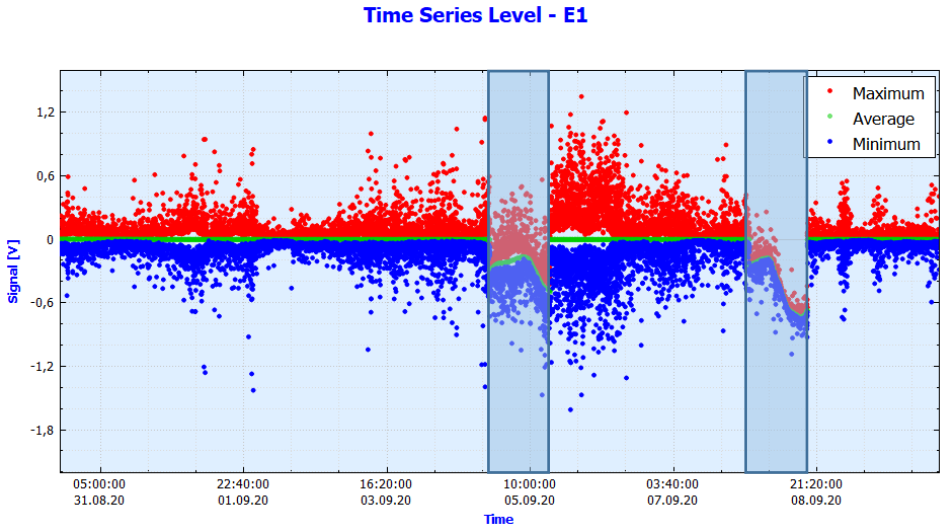
Şekil 3.1 Elektrik Alan Kablo Kopmasının Zaman Serisinde Tespiti

Şekil 3.2'de, **Şekil 3.1**'de gösterilen E_x bileşeninin kablo kopmasının sonucunda E_x bileşeninin genlik davranışını görebilmek amacıyla, bir dakikalık bir zaman serisi verilmiştir. Burada, E_x bileşeninin genlik değişiminde periyodik bir hareket olduğu görülmektedir. Kopan elektrik alan kablosunun toprakla temas etmesi, bu tarz bir yanıltıcı verinin kaydedilmesine neden olabilir. Bu ve benzeri durumların anlık olarak tespit edilip en kısa zaman içerisinde düzeltilmesi, uzun periyot MT çalışmalarında sağlıklı ve güvenilir bir veri kümesi elde edebilmek amacıyla oldukça önemlidir.

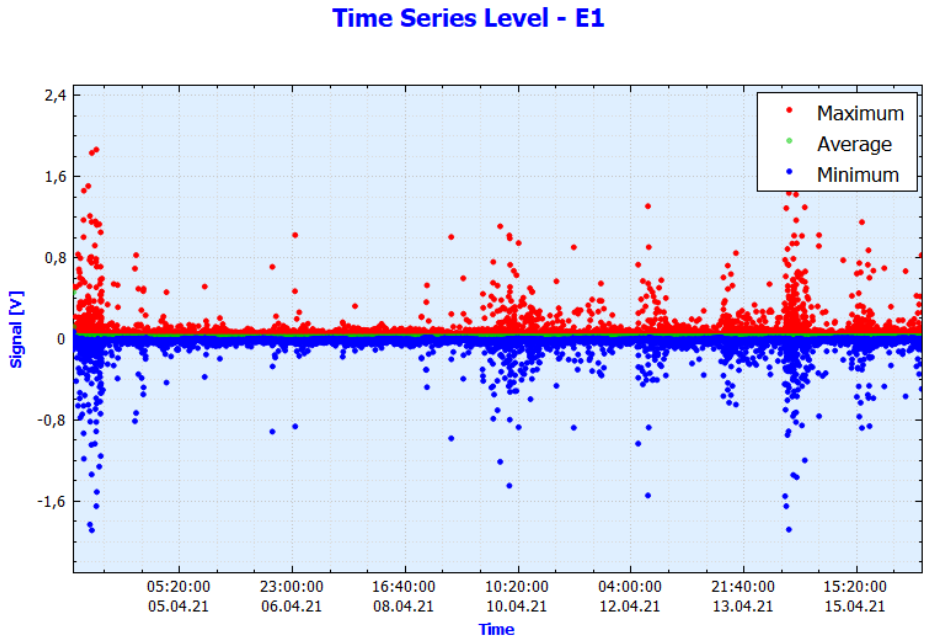


Şekil 3.2 Elektrik Alan Kablo Kopmasının Zaman Serisinde Etkisi

Şekil 3.3'te, E_x bileşeninin sinyal genliğinin zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Şekilde mavi, kırmızı ve yeşil noktalar sırasıyla; 10 dakikalık pencerelerle örneklenmiş en küçük, en büyük ve ortalama sinyal genliği değerlerini temsil eder. Bu değerler elektrik ve manyetik alanların, yatay eksendeki ilgili zaman dilimlerindeki genlik değerlerinden elde edilmektedir. Anlatım kolaylığı açısından, bu ve izleyen bölümlerde "sinyal genliği değişimi" olarak adlandırılacaktır. Burada, mavi dikdörtgenler ile taralı zaman dilimleri içerisinde sinyal genliğinde beklenmeyen bir değişim olduğu net bir şekilde görülebilmektedir. Sinyal genliği davranışını daha iyi anlamak amacıyla; gürültülerden olabildiğince az etkilenmiş ve herhangi bir kablo kopmasının meydana gelmediği bir istasyondan E_x bileşeninin sinyal genliği değişimi **Şekil 3.4**'te verilmiştir.

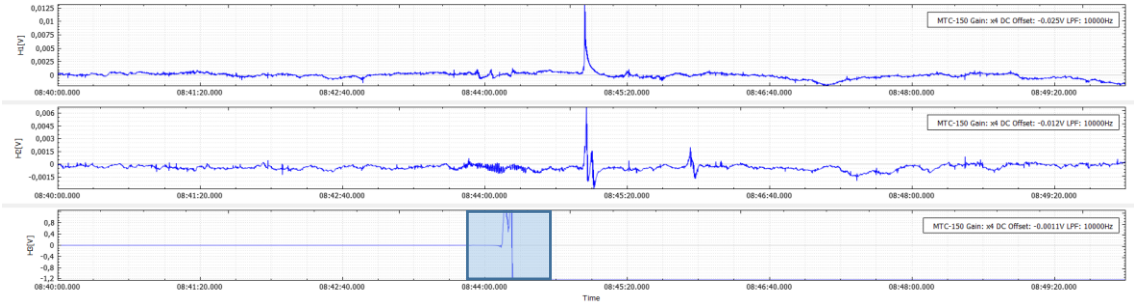


Şekil 3.3 Elektrik Alan Kablo Kopmasının Sinyal Genliği Değişiminde Tespiti



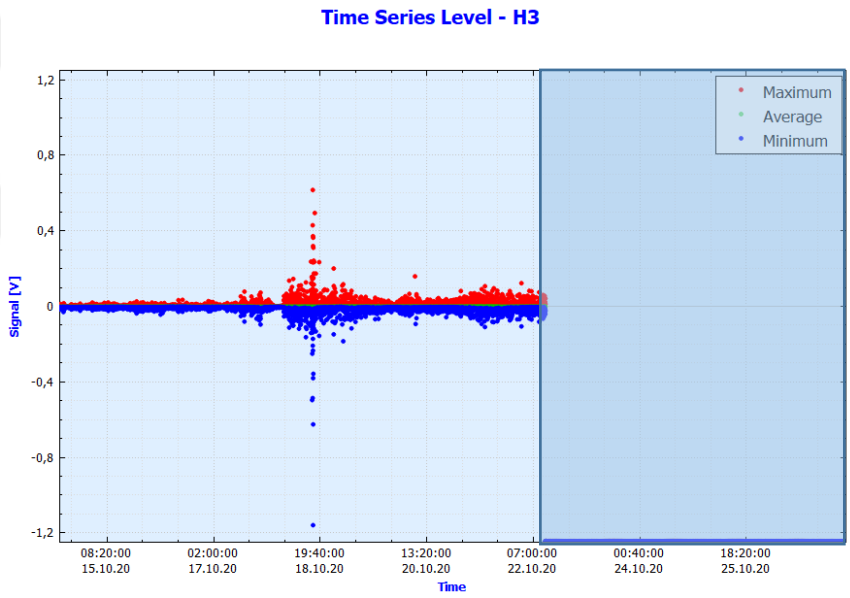
Şekil 3.4 Sinyal Genliği Değişiminde Beklenen Elektrik Alan Davranışı

Şekil 3.5'te gerçek arazi verisinde H_x, H_y ve H_z olmak üzere, manyetik alanın üç bileşeninin zaman serisinden on dakikalık bir kesit görülmektedir. Burada H_z bileşeni için, saat 08:44 ile 08:45 aralığındaki bir dakikalık mavi bir dikdörtgen ile taralı sürede bozucu bir etkinin gerçekleştiği ve sonrasında genliğin düz bir çizgi şeklinde ilerlediği görülmektedir. Verilen zaman penceresinde H_z bileşeninin kablosunun koptuğu görülmektedir.



Şekil 3.5 Manyetik Alan Kablo Kopmasının Zaman Serisinde Tespiti

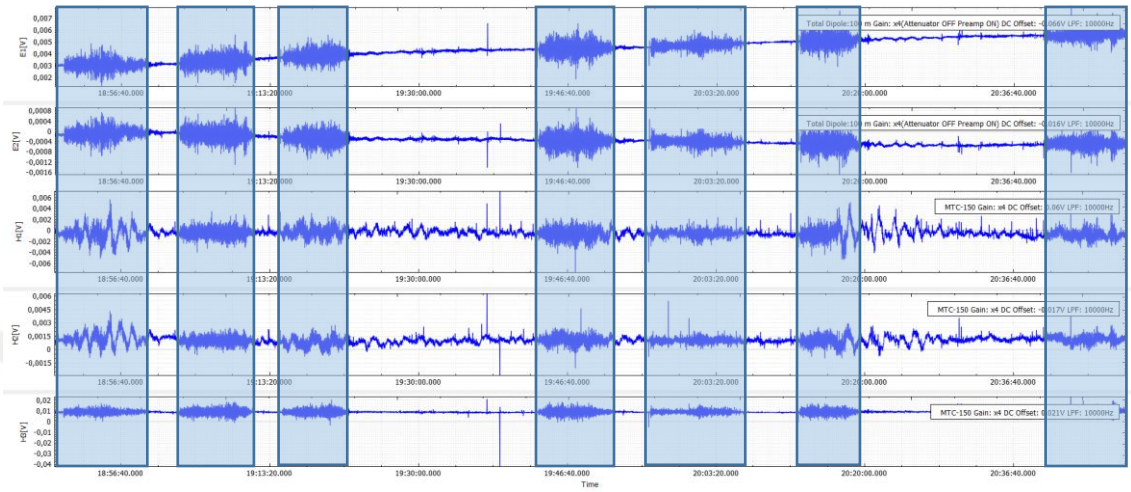
Şekil 3.6'da, $\mathbf{H_z}$ bileşeninin sinyal genliği değişimindeki davranışı görülmektedir. Burada, mavi dikdörtgen ile taralı zaman dilimleri içerisinde sinyal genliğinde bir anomali olduğu ve kablo bağlantısının koptuğu net bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 3.6 Manyetik Alan Kablo Kopmasının Sinyal Genliği Değişiminde Tespiti

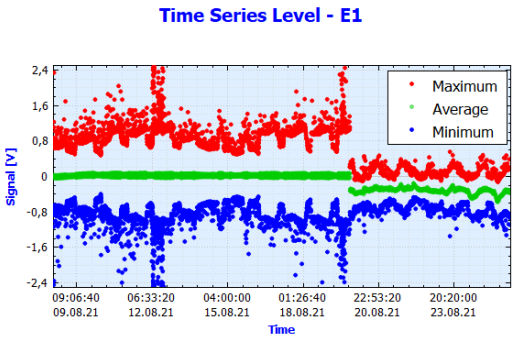
Şekil 3.7'de, zorlu arazi koşullarında kurulan bir MT istasyon verilerinin, bütün elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin genlik değişimi iki saatlik bir zaman serisi şeklinde verilmiştir. İlgili istasyonda, pot ve bobin çukurları zemin yapısından ötürü oldukça zor kazılmıştır, istasyona çok yakın bir konumda su deposu vardır ve batı yönünde görece yakın konumda bir baz istasyonu mevcuttur. Ayrıca periyodik gürültülere ek olarak; gece gündüz döngüsüyle indüksiyon bobinlerindeki sıcaklık değişimleri, kar ve yağmur yağışları, sert rüzgarlar gibi zorlayıcı arazi koşulları; bobinleri, potları ve bağlantı

kablolarını etkilediğinden ötürü MT verilerinin kalitesi üzerine olumsuz etkileri vardır. Bu tip gürültü kaynaklarının veri üzerindeki bozucu etkisi mavi dikdörtgenlerle taralı alanlar içerisinde gösterilmiştir.

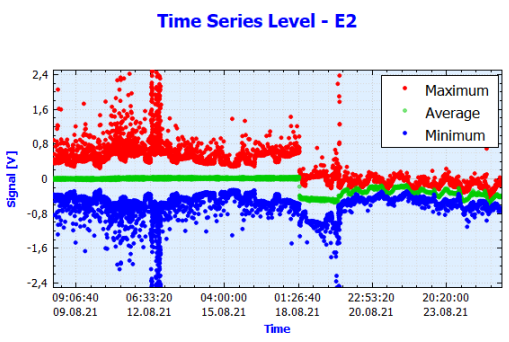


Şekil 3.7 Elektrik ve Manyetik Alandaki Bozucu Etkilerin Zaman Serisinde Tespiti

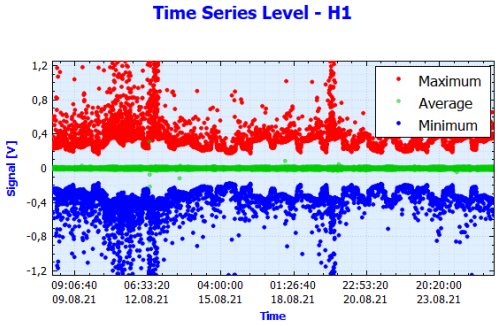
Şekil 3.7'de verilen zaman serilerine ait istasyonun sinyal genliği değişimindeki davranışı E_x, E_y, H_x, H_y ve H_z sırasıyla; **Şekil 3.8**, **Şekil 3.9**, **Şekil 3.10**, **Şekil 3.11** ve **Şekil 3.12**'de verilmiştir. Bozucu etkiler sinyal genliği değişimlerinde de net bir şekilde görülmektedir.



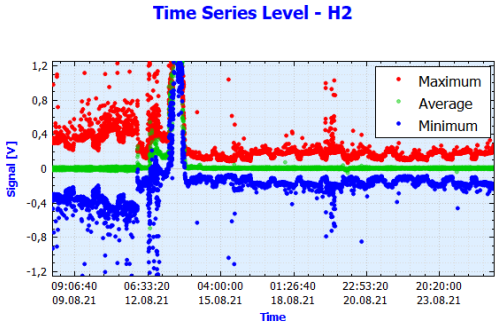
Şekil 3.8 E_x Bileşeninin Sinyal Genliği Değişimi



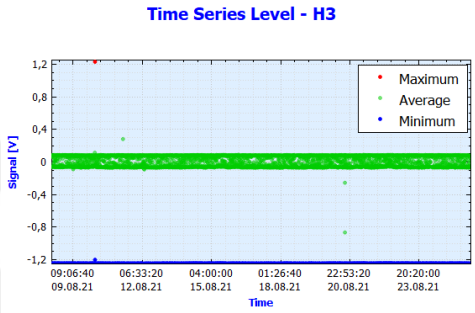
Şekil 3.9 E_y Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi



Şekil 3.10 H_x Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi

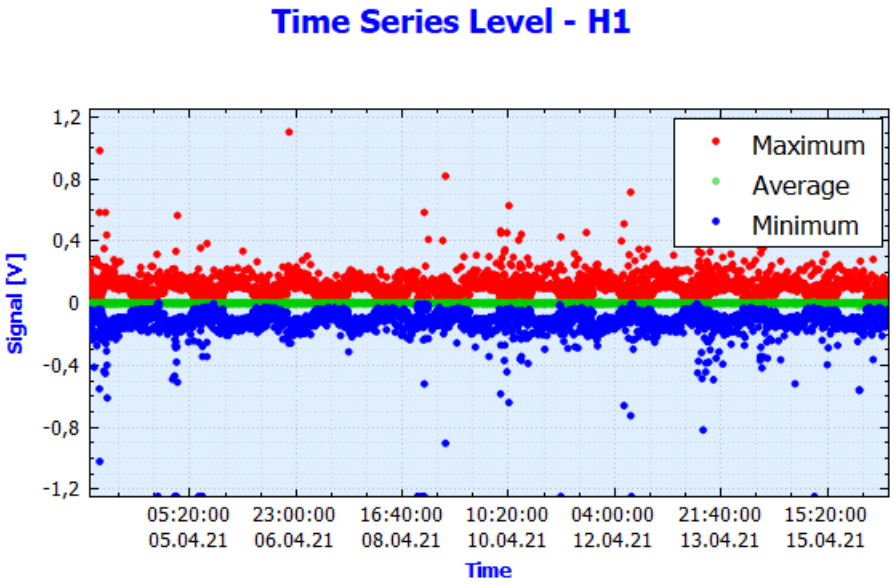


Şekil 3.11 H_y Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi

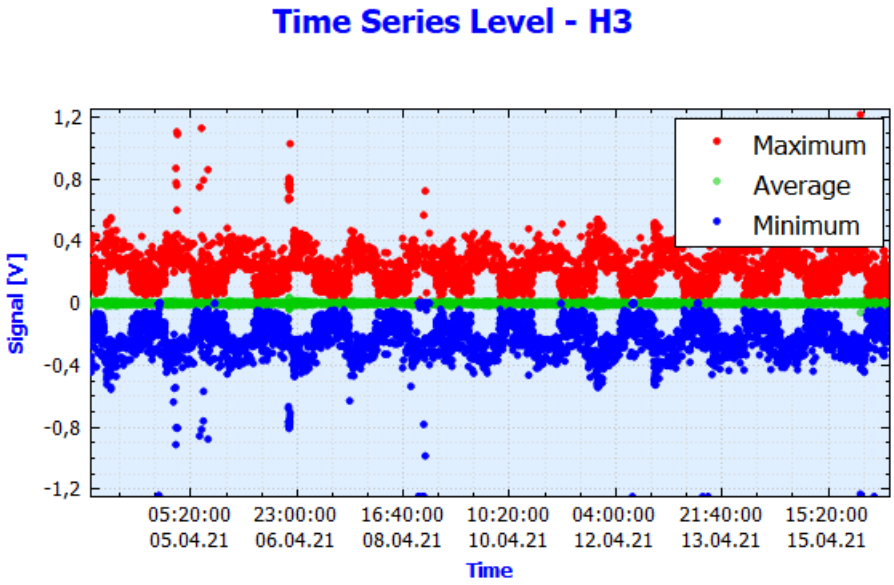


Şekil 3.12 H_z Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi

Şekil 3.13 ve **Şekil 3.14**'te bir MT istasyonunda meydana gelen periyodik gürültülerin manyetik alanın bileşenleri olan H_x ve H_z üzerindeki etkisi net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.13 H_x Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi



Şekil 3.14 H_z Bileşenin Sinyal Genliği Değişimi

4. ZAMAN SERİSİ ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Sağlıklı ve güvenilir bir MT veri kümesi için, transfer fonksiyonunun ve empedansın kestirimi oldukça önemlidir. Geçmişten günümüze birçok araştırmacı MT verilerinde transfer fonksiyonu ve empedans kestirimi üzerine farklı yaklaşımlar geliştirmiştir. Geleneksel empedans kestiriminde başlıca üç strateji; kararlı yaklaşım (robust approach), uzak referans (remote reference) ve ön-işlem (pre-processing) yaklaşımıdır. Kararlı yaklaşımda aykırı noktaların etkisi azaltılır (Egbert ve Booker, 1986; Chave vd., 1987). Regresyon M-Kestirimi (RME) yöntemi en büyük olabilirlik prensibini kullanır. Bu yöntemde çok sayıda örnek veri olmak zorundadır (Egbert ve Booker, 1986, 1996). Ölçülerin çok gürültülü olması durumunda RR yöntemi kullanılır (Gamble, 1978). Ancak RR yaklaşımında, ölçü istasyonu ve RR noktalarında sinyalin ilişkili olması ve uzak noktanın gürültüden etkilenmeyen bir nokta olması gerekir. RR yöntemini geliştirebilmek adına, RRR tekniği, 1980'lerin ortalarından itibaren farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (ör. Jones ve Jödicke, 1984; Egbert ve Booker, 1986; Chave vd., 1987; Egbert, 1997). Tezin bu bölümünde otomatik empedans kestirim yöntemlerini kıyaslayabilmek amacıyla kullanılan yazılımlarda bulunan transfer fonksiyonu ve empedans kestirimi yöntemleri anlatılmıştır.

4.1 Regresyon M-Kestirim Yöntemi

M-Kestirimi, maksimum olabilirlik kestiriminin (Maximum Likelihood Estimator) genelleştirilmiş bir halidir (Huber, 1967). Normal dağılımda yer alan bir değişkenin olasılığını tahmin etmek için önerilmiştir. Bu yöntem, aykırı değerlerden etkilenebilir.

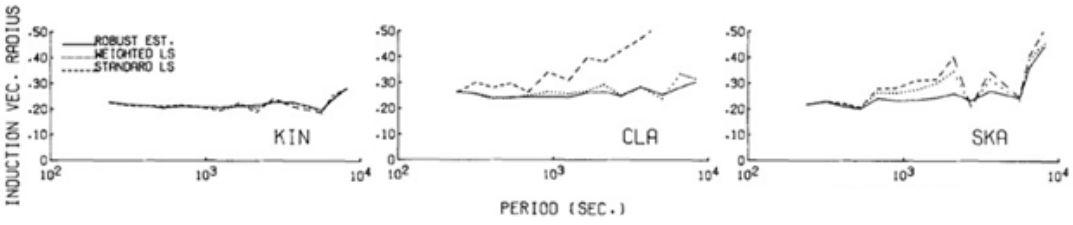
Egbert ve Booker (1986), kararlı kestirim tekniğini önermişler ve çalışmalarında önerdikleri bu yöntem ile EKK ve AEKK tekniklerini karşılaştırmışlardır. Yer manyetik indüksiyon verileri için transfer fonksiyonlarının tahmininde kullanılan tüm istatistiksel varsayımların, yer manyetik orta enlemlerde beş dakikadan birkaç saate kadar olan periyotlarda başarısız olduğunu öne sürmüşlerdir. Aykırı verilerin etkisini azaltabilmek adına, sıradan en küçük kareler yönteminin aksine, geliştirilen kararlı kestirim yönteminin

tutarlı bir şekilde gerçekçi hatalarla güvenilir transfer fonksiyonu kestirimi yaptığını göstermişlerdir. Geliştirilen kararlı kestirim tekniği, "Regression M-Estimate (RME)" olarak adlandırılmıştır ve izleyen bağıntı ile verilmiştir (Egbert ve Booker, 1986):

$$\sum_i w(r_i)\,(Z_i - H_i^T T)^2 \tag{4.5}$$

Burada; Z_i gerçek empedans değerini, H_i^T model tarafından tahmin edilen empedans değerinin transpozunu, T transfer fonksiyonunu ve w_i ağırlık fonksiyonunu temsil eder. $w(r_i) = w_i$ olduğunda, RME bağıntısı AEKK ile aynıdır. Ancak RME yönteminde ağırlıklar verilerden belirlenir ve zayıf uyum gösteren noktalara daha küçük ağırlıklar verilir.

RME, kestirim ve gözlemler arasındaki farkı en aza indirmesi bakımından EKK kestirimine benzerdir. Ancak saçılmış verilerin bütün veri üzerindeki bozucu etkisine izin vermeyecek şekilde tanımlanmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda EKK, AEKK ve RME yöntemlerinin kıyaslanabilmesi açısından, üç farklı MT istasyonunda toplanan zaman serisi verilerinin kestirim sonuçları **Şekil 4.1**'de kıyaslanmıştır. Saçılmış verilerin etkisini en aza indirgeyen yöntemin RME yöntemi olduğunu öne sürmüşlerdir. Daha ayrıntılı bilgi için ilgili çalışmaya bakılabilir (ör. Egbert ve Booker, 1986).



Şekil 4.1 Kestirim Yöntemlerinin Kıyaslanması (Egbert ve Booker, 1986)

4.2 Tutarlılık ve Kararlı Kestirim

MT zaman serisi verilerinin analizinde tutarlılık kullanımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Stodt, 1983, 1986; Jones ve Jödicke, 1984; Egbert ve Livelybrooks, 1996). MT ölü bölgede çok düşük sinyal/gürültü oranından kaynaklanan problemleri aşabilmek

amacıyla, tutarlılığa (coherency) dayalı bir yöntem olan "Tutarlılık Ağırlıklandırma Kestirimi (Coherence Weighted Estimate, CWE)" ile RME yöntemlerinin melez bir kullanımı, Egbert ve Livelybrooks (1996) tarafından önerilmiştir. Tek istasyonlu MT zaman serisi verilerinin analizi için, RME ile birleştirilmiş CWE yönteminin özellikle MT ölü bölgesinde olmak üzere önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular ışığında, RME yöntemi tutarlılığa bağlı bir yöntem olarak güncellenmiştir. Ayrıntılı bilgi için ilgili çalışmaya bakılabilir (ör. Egbert ve Livelybrooks, 1996).

Tek bir bölgede ölçülen yatay elektrik ve manyetik alan bileşenleri arasında frekans ortamında doğrusal bir ilişki bağıntı **2.9**'da verilmiştir. Benzer bir ilişki dikey manyetik alan için de varsayılabilir (Schmucker, 1970):

$$H_z = \begin{pmatrix} T_x & T_y \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \tag{4.6}$$

T_x ve T_y yer manyetik transfer fonksiyonlarını temsil eder. Bu ilişkiler daha genel bir biçimde aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir (Weckmann vd., 2005):

$$X = Z_1 . Y_1 + Z_2 . Y_2 \tag{4.7}$$

Genellikle, X çıkış kanalı E_x, E_y veya H_z ile ve Y_1 ve Y_2 giriş kanalları sırasıyla H_x ve H_y ile ilişkilendirilir (bkz. bağıntı **2.9** ve **4.6**); Z_1 ve Z_2 doğrusal bir denklem sisteminin yanıt fonksiyonlarıdır. Giriş ve çıkış kanallarının spektral güç yoğunluğu izleyen bağıntıyla tanımlanır (Jenkins ve Watts, 1968):

$$pow(A) = \frac{\sqrt{[A\ A^*]^2}}{\Delta T} \tag{4.8}$$

Burada A = X, Y_1 veya Y_2'yi temsil eder ve ΔT zaman penceresinin saniye cinsinden uzunluğudur. Bağıntı **4.8**'deki parantezler, A^*, A'nın karmaşık eşleniği olmak üzere düzleştirilmiş ve istiflenmiş çapraz ilişkilerini gösterir (Weckmann vd., 2005). Çoklu tutarlılıklar (Jones, 1979) ve kısmi tutarlılıklar (Jenkins ve Watts, 1968) sırasıyla izleyen biçimde verilir:

$$r_b^2 = \frac{Z_1.[Y_1X^*] + Z_2.[Y_2X^*]}{[X\,X^*]} \tag{4.9}$$

$$r_{p(X\,Y_1)}^2 = \frac{r_b^2 - r_{u(X\,Y_2)}^2}{1 - r_{u(X\,Y_2)}^2} \tag{4.10}$$

$$r_{p(X\,Y_2)}^2 = \frac{r_b^2 - r_{u(X\,Y_1)}^2}{1 - r_{u(X\,Y_1)}^2} \tag{4.11}$$

Burada $r_{u(X\,Y)}^2$ "sıradan tutarlılığı" temsil eder ve izleyen biçimde verilir:

$$r_{u(X\,Y)}^2 = \frac{|[X\,Y^*]|^2}{[X\,X^*][Y\,Y^*]} \tag{4.12}$$

Çoklu tutarlılık, aralarında doğrusal bir ilişki olduğu varsayımı ile giriş ve çıkış kanalları arasında tahmin edilen sinyal enerjisinin ölçülen sinyal enerjisine oranıdır. Doğal bir elektromanyetik sinyalin aksine, gürültülü veriler genellikle bu ilişkiyi yerine getirmez. Bunun bir nedeni, MT istasyonlarının genellikle gürültü kaynaklarının yakınlarında yer alması ve dolayısıyla düzlem dalga varsayımının yanı sıra elektrik ve manyetik alanın dikliği (ortogonalliği) ve orantılılığının ihlal edilmesi olabilir (Boerner vd., 1993). İkincisi daha düşük çoklu tutarlılık değerleriyle sonuçlandığından, bu parametre genellikle veri kalitesinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Tutarlılıklar normalize edilmiş büyüklükler olduğundan, değerleri 0 ile 1 aralığında yer alır. Konu hakkında daha kapsamlı bilgi için Weckmann (2005)'a bakılabilir.

"Kısmi tutarlılığa" örnek olarak izleyen bağıntılar verilebilir. Örneğin, empedansın Z_{yx} bileşeni için; H_x etkisi olmadan, E_x ve H_y arasındaki tutarlılık izleyen bağıntı ile hesaplanabilir,

$$Coh_{H_yE_x.H_x}^2 = \frac{|[H_yE_x.H_x]|^2}{[H_yH_y.H_x][E_xE_x.H_x]} \tag{4.13}$$

Empedansın Z_{xy} bileşeni için; H_x etkisi olmadan, E_x ve H_x arasındaki tutarlılık izleyen bağıntı ile hesaplanabilir,

$$Coh^2_{H_xE_x.H_y} = \frac{|[H_xE_x.H_y]|^2}{[H_xH_x.H_y][E_xE_x.H_y]} \quad (4.14)$$

"Çoklu tutarlılığa" örnek olarak izleyen bağıntı verilebilir. Örneğin, empedansın Z_{xx} ve Z_{xy} bileşenleri için; E_x, H_x ve H_y arasındaki tutarlılık izleyen bağıntı ile hesaplanabilir,

$$Coh^2_{E_xH_xH_y} = \frac{Coh^2_{E_xH_x} + Coh^2_{E_xH_y}}{1 - Coh^2_{H_xH_y}} - \frac{2Re([E_x^*H_x][H_x^*H_y][H_y^*E_x])}{[E_x^*E_x][H_x^*H_x][H_y^*H_y](1 - Coh^2_{H_xH_y})} \quad (4.15)$$

Verilen örnek bağıntılar, Arseny Shlykov'un veri işlem kodundan alınmıştır (Shlykov, 2023). Güncel çalışmalarda, MT zaman serisi verilerinin analizinde tutarlılık büyük bir öneme sahiptir. Empedans kestirimi için kullanılan popüler yöntemlerin çoğu tutarlılığa bağlıdır.

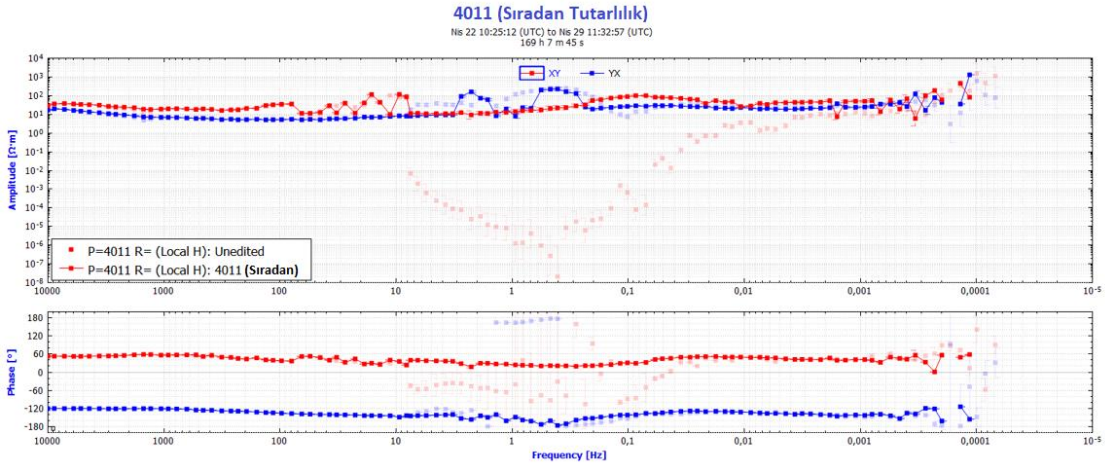
Çalışma kapsamında kullanılan açık kaynak kodlu bir Python kütüphanesi olan Razorback ile Phoenix Geophysics firmasının yazılımı olan EMPower'da kullanılan tutarlılık türleri; sıradan, kısmi ve çoklu tutarlılık olmak üzere üç alt başlıkta incelenebilir. Tutarlılık türlerinin karşılaştırması, EMPower yazılımı üzerinden yapılmıştır.

4.2.1 Sıradan, kısmi ve çoklu tutarlılığın karşılaştırılması

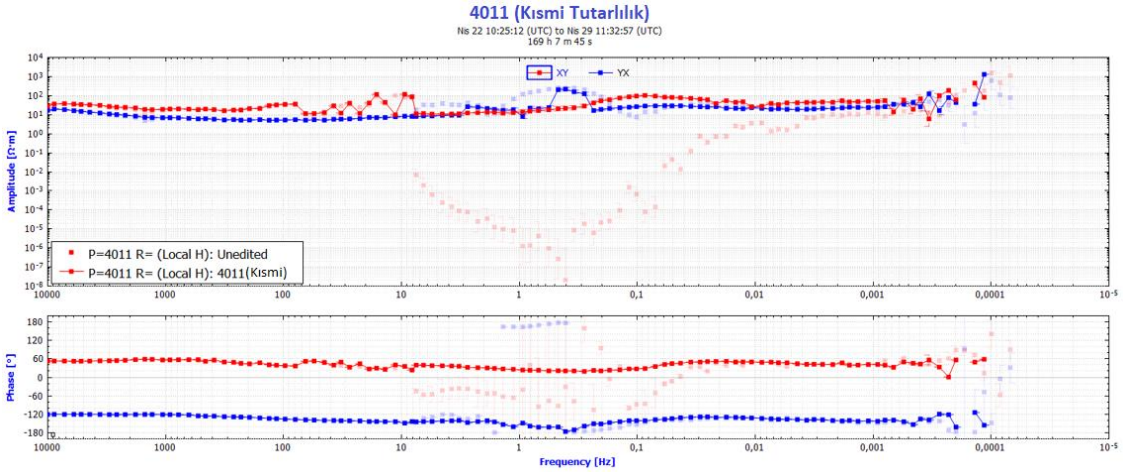
EMPower programı kullanılarak sözü edilen üç tutarlılık türü aşağıda karşılaştırılmıştır. Sıradan tutarlılığın veri üzerine olan etkisi, ham veri ile kıyaslanarak **Şekil 4.2**'de gösterilmiştir. Benzer şekilde, kısmi tutarlılığın veri üzerine olan etkisi, ham veri ile kıyaslanarak **Şekil 4.3**'te gösterilmiştir. Çoklu tutarlılığın veri üzerine olan etkisi, ham veri ile kıyaslanarak **Şekil 4.4**'te gösterilmiştir. İlgili şekiller tutarlılığa bağlı kararlı otomatik kestirim sonuçlarının; görünür özdirenç ve empedans faz açısının ortalama çapraz güçlerinin frekansa karşılık çizimlerini temsil eder. Her üç tutarlılık türü de çoğu frekans değeri için kabul edilebilir sonuçlar üretmiştir. MT verisinin genel davranışını bozan saçılmalar çoğunlukla giderilmiştir. Ancak otomatik kararlı kestirimde kullanılan tutarlılık türlerinin hiçbiri 1-100Hz frekans aralığında gözlemlenen, verinin genel

davranışına aykırı bozucu etkileri gidememiştir. Bu frekanslardaki aykırı davranışa başka bir deyişle yukarı yönlü sapmaya, hesaplamaya dahil edilen birkaç çapraz gücün ortalama üzerindeki büyük etkisi, yani bir kaldıraç noktası görevi görmesi olarak açıklanabilir. Ortalama üzerindeki sözü edilen etkinin daha iyi anlaşılabilmesi adına, sapmanın meydana geldiği frekans değerlerinden birisine (79Hz) ait çapraz güçler **Şekil 4.8**'de gösterilmiştir. Şekil, ilgili frekans değeri için ölçü süresi boyunca bütün kullanılan zaman pencerelerinin orta noktaları için hesaplanan bütün çapraz güçleri içermektedir. Ayrıca, siyah çizgi ile xy modu (kırmızı) ve açık mavi çizgi ile yx moduna (mavi) ait çapraz güçlerin ortalama değerini göstermektedir. İlgili frekans değerindeki ortalama değer için hesaplanan 432 adet çapraz güç vardır, ancak mavi ile taralı çapraz güçler birer kaldıraç noktası görevi görerek özellikle xy modunda yukarı yönde aşırı düzeyde sapmaya neden olmuşlardır. Otomatik kararlı kestirim sonuçları, sözü edilen sapmanın önüne geçememiştir. Bu sorunun nasıl aşılacağı, bölüm 6.3'te detaylıca açıklanmıştır.

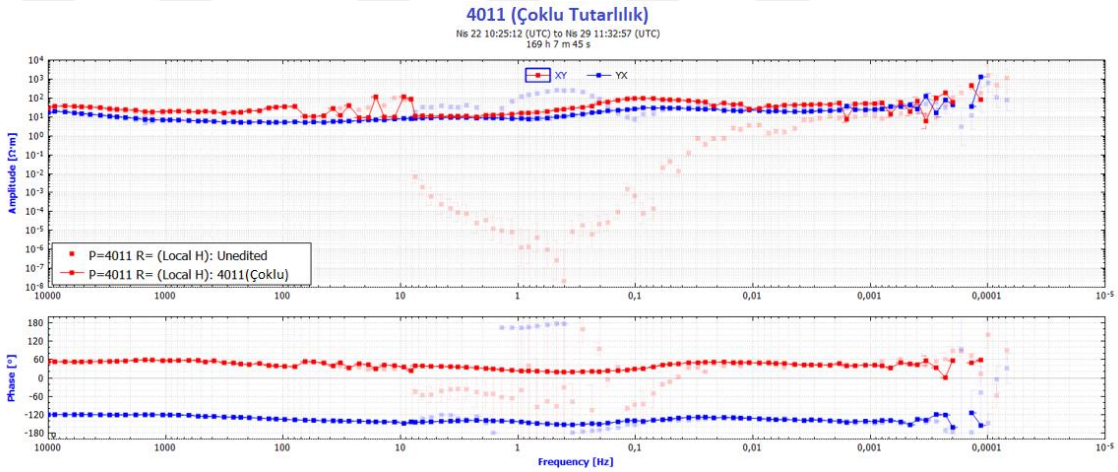
Ek olarak, "sıradan" ve "kısmi" tutarlılık çözümünde MT ölü bölgesinde saçılmalar tam olarak giderilmemiştir. Sadece "çoklu" tutarlılık çözümünde ölü bölgedeki aykırı davranışlar tamamen giderilmiştir.



Şekil 4.2 Sıradan Tutarlılık



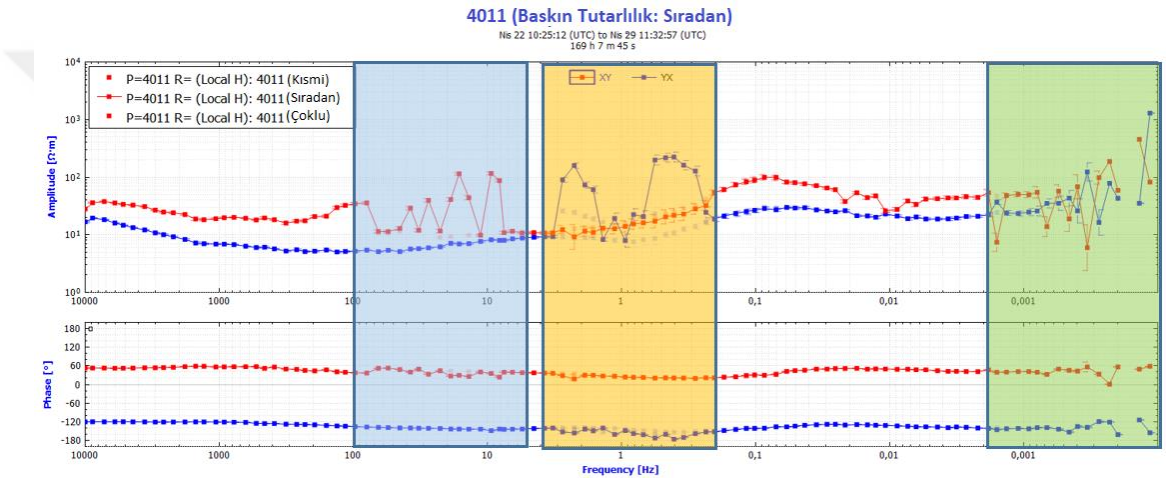
Şekil 4.3 Kısmi Tutarlılık



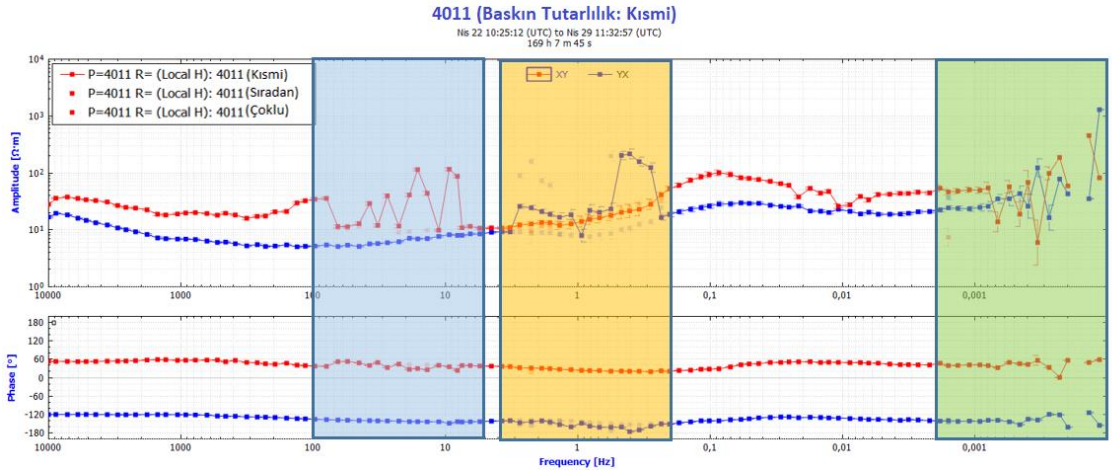
Şekil 4.4 Çoklu Tutarlılık

Sıradan, kısmi ve çoklu tutarlılık türleri; gerçek arazi verisi kullanılarak, izleyen şekillerde sırasıyla birbirine baskın olacak şekilde gösterilmişlerdir (**Şekil 4.4**, **Şekil 4.5** ve **Şekil 4.6**). Her üç tutarlılık türünde de 5Hz – 100Hz frekans aralığındaki mavi dikdörtgen ile taralı alanda başarısız bir çözüm üretmiştir. Yeşil renkle taralı, 0,001 Hz'in altındaki çok düşük frekanslarda, görünür özdirenç verilerinde de saçılmalar meydana geldiği net bir şekilde görülmektedir. Her üç şekilde görünür özdirenç verisinin tutarlılık türlerine göre davranışı, turuncu dikdörtgenler ile taranmıştır. Bu istasyon için, ölü bölgedeki saçılmaları tamamen giderip güvenilir sonuçlar üreten tek tutarlılık türünün çoklu tutarlılık olduğu açıkça görülmektedir. Ancak bu durum çoklu tutarlılığın her

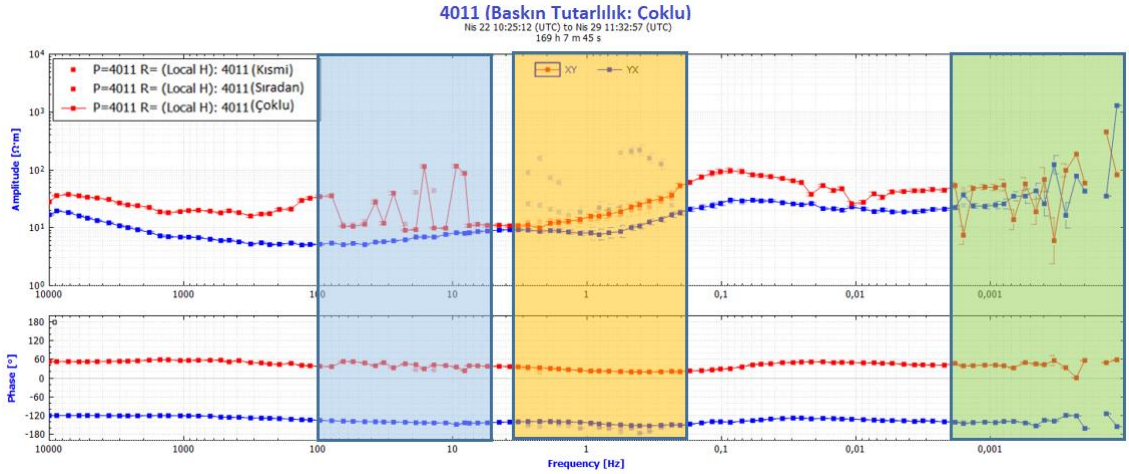
istasyon için her zaman en iyi sonucu vereceğini göstermez. Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin veri kalitesi, kullanılacak tutarlılık türü için oldukça önemlidir. Sözü edilen konunun daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, elektrik alanın E_x bileşeninde problem olan bir MT istasyon verisinde tutarlılık türleri **Şekil 4.7**'de kıyaslanmıştır. Burada baskın olarak gösterilen tutarlılık türü, sıradan tutarlılıktır. Bu veri kümesi için sıradan tutarlılığın; görünür özdirenç verisinde kısmi ve çoklu tutarlılık türlerine oranla, verinin davranışına daha uygun bir seçim yaptığı görülmektedir. Kısaca, kararlı kestirim için kullanılacak tutarlılık türünün seçiminde, veri kalitesine göre tutarlılık türüne karar verilmelidir.



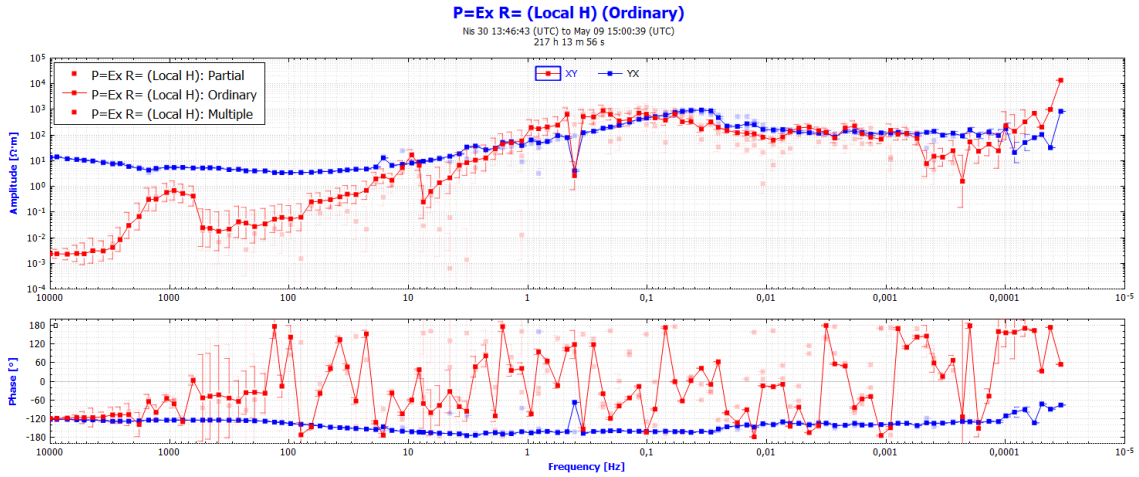
Şekil 4.5 Tutarlılık Türlerinin Kıyaslanması (Sıradan)



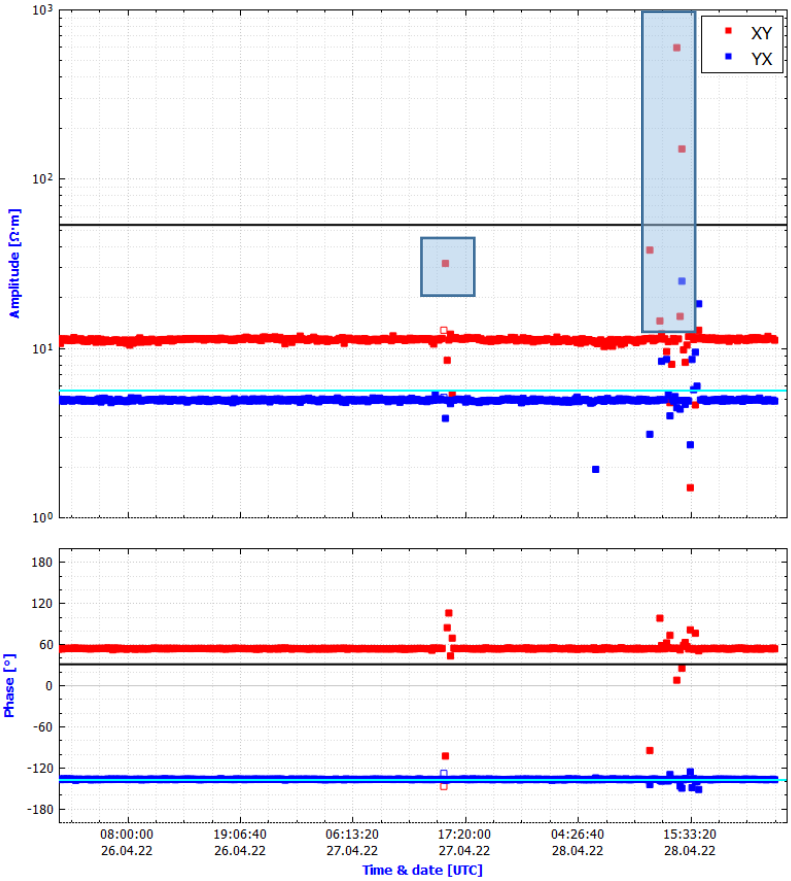
Şekil 4.6 Tutarlılık Türlerinin Kıyaslanması (Kısmi)



Şekil 4.7 Tutarlılık Türlerinin Kıyaslanması (Çoklu)



Şekil 4.8 Tutarlılık Türlerinin Kıyaslanması



Şekil 4.9 Ortalama Çapraz Güçlerdeki Kaldıraç Noktalarının Etkisi

4.3 Uzak Referans Yöntemi

MT yönteminde, empedans tensörünün $\mathbf{Z_{xy}}$ bileşeni bağıntı **2.12** ile hesaplanabilir. Ölçü alınan bölgede, bir gürültü kaynağı varsa, empedans kestirimlerinde kaynak etkisine neden olacaktır (Sims vd., 1971; Kao ve Rankin, 1977). Bu durumun önüne geçebilmek amacıyla, "uzak referans" (Remote Reference, RR) yöntemi önerilmiştir (Gamble, 1978; Gamble vd., 1979). RR yöntemi, aynı anda ikinci bir uzak bölgede kaydedilmiş yatay manyetik alanların, yerel elektrik alanlarıyla ilişkilendirildiği referans yöntemidir. RR yöntemi; manyetik alanın büyük ölçekli mesafelerde çok bir değişim göstermediği kabulüne dayanır. Geçmişten günümüze, RR yöntemiyle birçok farklı çalışma yapılmıştır (Gamble vd., 1979; Jones vd., 1989; Chave ve Smith, 1994; Tarakura vd., 1994; Larsen vd., 1996; Egbert vd., 1997). Bu çalışmalarda uzak nokta sırasıyla; 4.8km, 20km, 100km, 135km ve 147km uzaklıklara konulmuş ve bütün bu çalışmalarda, referans noktasının

optimum uzaklığı üzerine birbirinden farklı görüşler sunulmuştur. Güncel çalışmalarda, yaklaşık 500 kilometre uzaktaki bir referans noktasının bile kullanılabileceği ve bu uzaklıktaki bir referans noktası ile kaliteli transfer fonksiyonu ve empedans kestirimi yapılabileceği öne sürülmüştür (Wang vd., 2020).

RR yöntemi için empedans tensörünün Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx} ve Z_{yy} olmak üzere dört bileşeni, izleyen bağıntılar ile hesaplanır (Gamble vd., 1979).

$$Z_{xx} = \frac{(E_x H_{xr}^*)(H_y H_{yr}^*) - (E_x H_{yr}^*)(H_y H_{yr}^*)}{(H_x H_{xr}^*)(H_y H_{yr}^*) - (H_x H_{yr}^*)(H_y H_{xr}^*)} \tag{4.11}$$

$$Z_{xy} = \frac{(E_x H_{yr}^*)(H_x H_{xr}^*) - (E_x H_{xr}^*)(H_x H_{yr}^*)}{(H_x H_{xr}^*)(H_y H_{yr}^*) - (H_x H_{yr}^*)(H_y H_{xr}^*)} \tag{4.12}$$

$$Z_{yx} = \frac{(E_y H_{xr}^*)(H_y H_{yr}^*) - (E_y H_{yr}^*)(H_y H_{xr}^*)}{(H_x H_{xr}^*)(H_y H_{yr}^*) - (H_x H_{yr}^*)(H_y H_{xr}^*)} \tag{4.13}$$

$$Z_{yy} = \frac{(E_y H_{yr}^*)(H_x H_{xr}^*) - (E_y H_{xr}^*)(H_x H_{yr}^*)}{(H_x H_{xr}^*)(H_y H_{yr}^*) - (H_x H_{yr}^*)(H_y H_{xr}^*)} \tag{4.14}$$

Burada ek olarak H_{xr} ve H_{yr}, uzak bölgede kaydedilmiş yatay manyetik alanları temsil eder. RR yöntemini geliştirebilmek adına, kararlı uzak referans tekniği (Robust Remote Reference, RRR), 1980'lerin ortalarından sonra farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (ör. Jones ve Jodicke, 1984; Egbert ve Booker, 1986; Stodt, 1986; Chave vd., 1987; Chave ve Thomson, 1989; Larsen, 1989; Sutarno ve Vozoff, 1991).

4.4 Sınırlı Etki Uzak Referans İşleme Yöntemi

Sınırlı Etki Uzak Referans İşleme (Bounded Influence Remote Reference Processing, BIRRP) yöntemi, RR yönteminde karşılaşılabilen problemleri aşabilmek amacıyla geliştirilmiştir (Chave, 2003; Chave ve Thomson, 2004). Bu problemler arasında ölçüm hataları, veri eksikliği ve veri yoğunluğu farklılıkları bulunmaktadır. MT transfer

fonksiyonunun ve dolayısıyla empedansın güvenilir bir şekilde kestirilebilmesi için bu zorlukları dikkate alınmalıdır. İstastistiksel bir yöntem olan BIRRP'de izleyen bağıntı kullanılır (Sutarno, 2005):

$$\sum_{i=1}^{n} \sqrt{1-h_{ii}}\psi\left(\frac{r_1}{s\sqrt{1-h_{ii}}}\right)u_{ij} = 0, \;\; j = 1, \ldots, p. \tag{4.15}$$

Burada; ψ etki fonksiyonunu, h_{ii} kaldıraç noktalarını, s ölçek faktörünü temsil eder. Bu bağıntı ile, her bir r artık değeri, değiştirilmiş ölçek faktörü, s'ye böler, böylece ψ daha yüksek kaldıraç noktasında, daha büyük artık değerleri, daha hızlı azaltabilir (Sutarno, 2005).

Chave ve Thomson (1994), RME yönteminin sınırlı bir etkiye sahip olmadığından ötürü saçılmış verilerin ağırlığını düşürme konusunda başarısız olabileceğini öne sürmüştür. Bu kapsamda, veri düzleştirme ve RME yöntemini birleştirerek MT transfer fonksiyonunun kestirimini geliştirmeyi amaçlamıştır. BIRRP algoritması, bu sorunu sınırlayarak, eksik referans fazının sonuçlara olan etkisini minimize etmeye çalışır. Ayrıntılı bilgi için ilgili çalışmalara bakılabilir (ör. Chave ve Thomson, 1994; Chave, 2003; Chave ve Thomson, 2004; Sutarno, 2005).

4.5 Tek İstasyon Ağırlıklı Kademeli Eleme

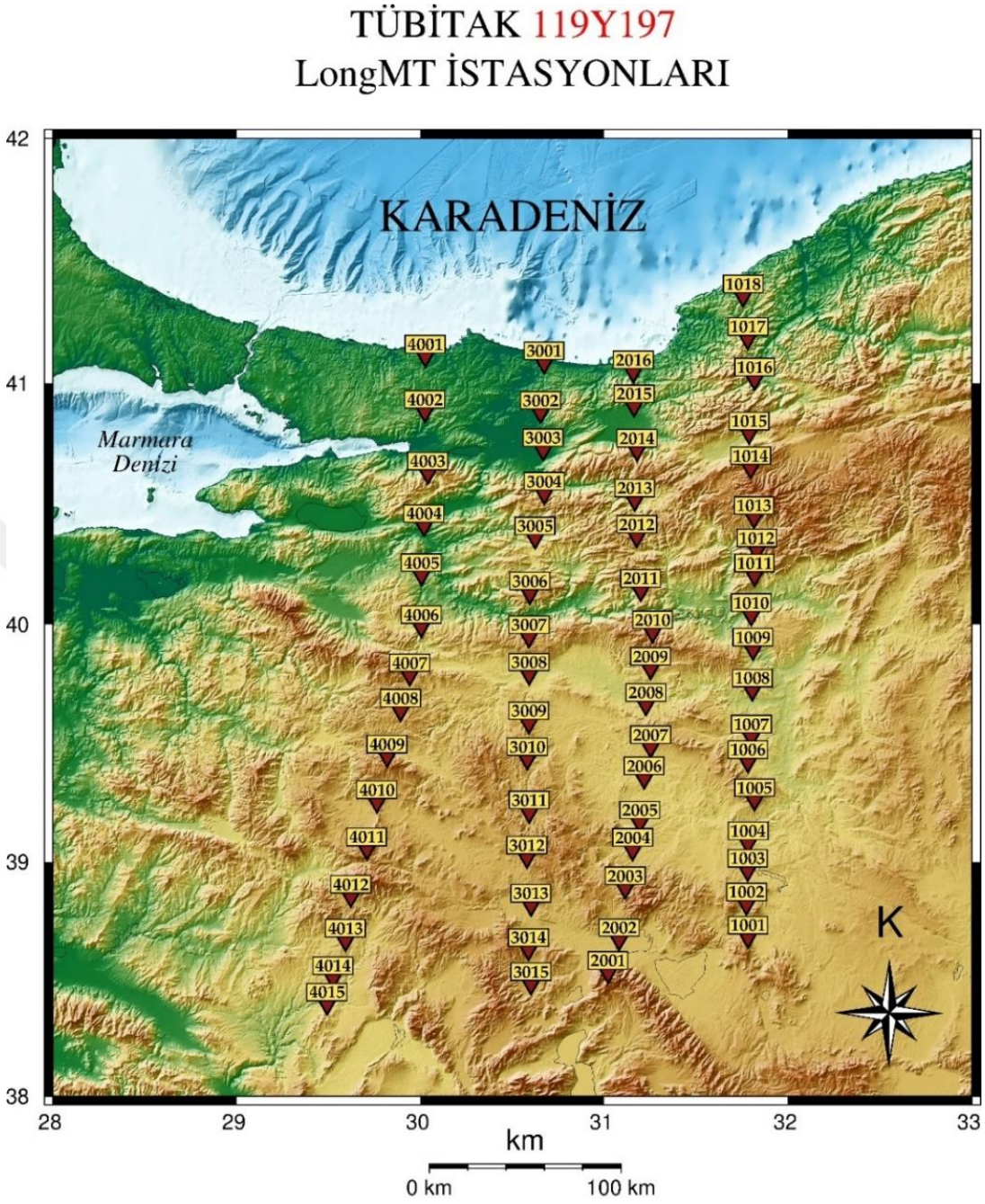
Kademeli eleme (cascade decimation), tek veya çok kanallı zaman serisi verileri için güç spektrumu tahminlerinin hesaplanmasına yönelik bir tekniktir (Wight vd., 1977). Başlangıçta geniş bant ve düşük frekans jeofizik verileri gerçek zamanlı olarak işlemek amacıyla geliştirilmiştir (Wight ve Bostick, 1980). Gerçek zamanlı yapılan bu işlemde iki ayrı veri toplama belleği kullanılır; ilk bellekte 32 örnek toplandığında üzerine işlem uygulanmaya başlanır ve yeni gelen veri ikinci belleğe yönlendirilir (Özurlan ve Ulugergerli, 2005). Ham veriye Nyquist frekansının yarısı olacak şekilde alçak geçişli süzgeç uygulanır ve iki operatör tarafından eleme uygulanarak elde edilen veri kümesine sinüs ve kosinüs dönüşümleri uygulanır. Kademeli eleme yönteminde elde edilen spektrumlar, zamandan bağımsız olan ve sabit yüzdeli bant genişliklerini temsil eden

kestirimlerin ortalamasıdır. Bu nedenle, logaritmik frekans ölçeğinde belirginleşen hataları elemek için kullanışlı bir yöntemdir. Ayrıntılı bilgi için ilgili çalışmalara bakılabilir (ör. Wight vd., 1977; Wight ve Bostick, 1980).

Wight ve Bostick (1980) şeması, gerçek zamanlı kademeli eleme ve verilerin çeşitli alt yığınlarından elde edilen spektral tahminlerin ağırlıklı ortalamasından oluşmaktadır (Jones vd., 1989). Sekiz spektral tahminden oluşan her bir alt yığının ağırlığı, MT empedans tensörünün iki köşegen dışı elemanının (Z_{xy} ve Z_{yx}) varyanslarının parametrik bir tahminine dayandırılmış ve ağırlığı bir eşik değerinin altına düşen yığınlar elenmiştir. "Tek İstasyon Ağırlıklı Kademeli Eleme (Single-Station Weighted Cascade Decimation, SSWCD)" yöntemi, kademeli eleme şemasının (Wight vd., 1977; Bostick ve Smith, 1979; Wight ve Bostick, 1980) Jones ve Jödicke (1984) önerilen transfer fonksiyonu kestirimini iyileştirecek bir şema ile geliştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Ayrıntılı bilgi için ilgili çalışmalara bakılabilir (ör. Wight vd., 1977; Bostick ve Smith, 1979; Wight ve Bostick, 1980; Jones ve Jödicke, 1984; Jones vd., 1989). Phoenix Geophysics firmasının aygıt yazılımı olan EMPower, SSWCD şemasının çeşitli geliştirmeler yapılarak, çağı yakalamış güncel bir versiyonunu kullanır.

5. ÇALIŞMA ALANI VE MT VERİLERİNİN ÖLÇÜMÜ

Bu çalışmada, TÜBİTAK 119Y197 numaralı, "Jeofizik Uzun Periyod Manyetotellürik Verilerin 2B ve 3B Ters Çözümü ile Kuzeybatı Anadolu'nun Litosfer Yapısının İncelenmesi" başlıklı proje kapsamında; güney doğuda Konya'nın Yunak ilçesine bağlı Kuzuören köyü, kuzey doğuda Zonguldak'ın Kozlu ilçesine bağlı Örencik köyü, kuzey batıda Kocaeli'nin Kandıra ilçesine bağlı Bağırganlı köyü ile güney batıda Uşak'ın Karahallı ilçesine bağlı Karayakuplu köyleri arasında kalan bir dikdörtgen alanda, dört profil boyunca 64 MT istasyonunda toplanan MT verilerinin bir kısmı kullanılmıştır. Çalışma alanı ve istasyon konumları, **Şekil 5.1**'de verilmiştir. Proje kapsamında ölçülerin yapılması ve MT zaman serisi verilerinin toplanması yaklaşık olarak iki yıl sürmüştür. Kurulan MT istasyonları arasındaki mesafe yaklaşık olarak 15 km'dir. Proje kapsamında sürekli ölçü yapan bir RR istasyonu bulunmamaktadır, ancak ihtiyaç duyulduğu takdirde eş zamanlı ölçü toplayan başka bir istasyonun manyetik alan bileşenleri referans olarak kullanmıştır.



Şekil 5.1 MT İstasyonları

Çizelge 5.1 MT İstasyon Bilgileri ve Ölçü Süreleri

TÜBİTAK 119Y197 NUMARALI PROJE İSTASYON BİLGİLERİ					
1. PROFİL			2. PROFİL		
İstasyon Numarası	Bölge	Ölçü Süresi	İstasyon Numarası	Bölge	Ölçü Süresi
1001	Kuzuören	366:54:30	2001	Çay	311:23:20
1002	Karataş	459:02:59	2002	Bolvadin	313:17:32
1003	Çeltik	380:47:28	2003	Kemerkaya	163:54:01
1004	Torunlar	211:05:07	2004	Karaağaç	142:14:34
1005	Kayakent	256:00:09	2005	Yusufağa	159:48:45
1006	Çardaközü	255:37:28	2006	Körhasan	306:14:04
1007	Demirci	257:48:21	2007	Karakaya	303:44:50
1008	Gençali	238:51:32	2008	Akköprü	290:54:38
1009	Kapullu	307:50:09	2009	Beylikova	355:36:23
1010	Tahirler	291:41:44	2010	Yalımkaya	335:44:30
1011	Kaplan	334:30:07	2011	Aşağıkavacık	355:03:06
1012	Sarıkaya	307:26:12	2012	Bostancılar	327:56:22
1013	Kökez	379:34:28	2013	Kılözü	310:17:29
1014	Bürnük	241:54:59	2014	Çınardüzü	308:19:19
1015	Taşçılar	206:38:17	2015	Düzköy	284:35:36
1016	Devrek	191:54:21	2016	Doğancılar	218:52:59
1017	Akilli	365:15:08			
1018	Örencik	420:25:59			
3. PROFİL			4. PROFİL		
İstasyon Numarası	Bölge	Ölçü Süresi	İstasyon Numarası	Bölge	Ölçü Süresi
3001	Yalı	259:29:41	4001	Bağırganlı	306:08:36
3002	Kocadöngel	125:07:59	4002	Sarışeyh	292:27:29
3003	Yayalar	309:17:59	4003	Örnek	307:03:59
3004	Taşyatak	305:11:59	4004	Mekeler	332:24:53
3005	Karacalar	331:20:43	4005	Vezirhan	334:06:50
3006	Yukarıçaylı	336:33:01	4006	Demirköy	315:07:41
3007	Mihalgazi	330:41:43	4007	Dodurga	233:09:04
3008	Muhtalip	271:00:43	4008	Eskiüreğil	217:13:56
3009	Karapazar	309:03:54	4009	Serikören	222:06:20
3010	Yukarısöğüt	289:21:29	4010	Pazarcık	206:09:59
3011	Karaören	259:41:29	4011	Çamdibi	169:07:45
3012	Ayazini	169:45:07	4012	Karacahisar	208:04:03
3013	Beyyazı	263:33:16	4013	Karlık	304:14:22
3014	Halımoru	142:59:50	4014	Hacım	263:16:33
3015	Hallaç	292:29:27	4015	Karayakuplu	142:50:59

Çizelge 5.1'de ilgili proje kapsamında toplanan 64 MT istasyonunun sırasıyla; istasyon numaraları, istasyonların bulunduğu bölge ve ölçü süresi olmak üzere bilgileri verilmiştir. **Çizelge 5.2**'de her bir profil için, toplam istasyon sayısı ve toplam ölçü süresi verilmiştir. 64 istasyonda, her bir istasyon için ortalama ölçü süresi yaklaşık olarak 12 gündür.

Çizelge 5.2 Toplam İstasyon Sayıları ve Ölçü Süreleri

Profil Numarası	İstasyon Sayısı	Toplam Ölçü Süresi
1	18	228 gün 1sa 18dk 58sn
2	16	186 gün 23sa 57dk 48sn
3	15	166 gün 3sa 38dk 20sn
4	15	186 gün 18sa 31dk 28sn

MT istasyonlarında veriler çoğunlukla, standart dizilim olan "+" dizilimiyle toplanmıştır. İlgili dizilim, **Şekil 2.2**'de gösterilmiştir. Bazı istasyonlarda, arazi şartları elverişli olmadığından "L" dizilimi kullanılmıştır. "+" diziliminde, polarize olmayan potlar arasındaki dipol açıklığı 100 metre iken; "L" diziliminde, polarize olmayan potlar arası dipol açıklığı 50 metre olarak belirlenmiştir. Potlar, yaklaşık yarım metre derinliğinde kazılmış ve içinde çamur bulunan çukurlara (**Şekil 5.2**) gömülmüş ve üstü toprakla örtülmüştür.



Şekil 5.2 Pot Çamuru



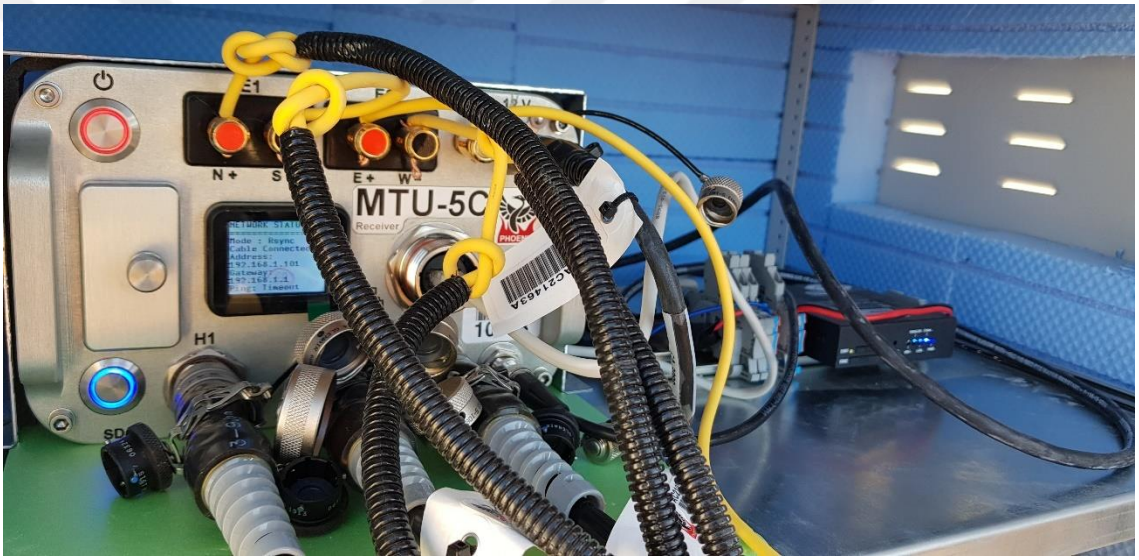
Şekil 5.3 Bobin Çukuru

Manyetik alanın yatay bileşenleri H_x ve H_y'yi ölçen indüksiyon bobinleri, 1,5 metre uzunluğundayken, manyetik alanın düşey bileşeni H_z'yi ölçen indüksiyon bobini 1 metre uzunluğundadır. Bütün dizilimlerde manyetik alanın bileşenlerini ölçen indüksiyon bobinleri (MTC-150) merkezden yaklaşık 25 metre uzaklıkta konumlandırılmıştır. Manyetik alanın yatay bileşenlerini ölçen indüksiyon bobinleri kuzey-güney ve doğu-batı yönlerine bakacak şekilde yaklaşık 2 metre uzunluğunda, 30-50cm derinliğinde çukurlara gömülmüştür. Manyetik alanın düşey bileşenini ölçen indüksiyon bobini ise bobin boyu kadar çukur kazılarak dikey konumda gömülmüştür. Tüm bobinler yağmur ve rüzgâr gibi çevresel faktörlerden etkilenmemesi amacıyla PVC borular içerisinde üstü bol toprak ile örtülerek gömülmüştür (**Şekil 5.3**). İndüksiyon bobinlerinin yönü hassas bir pusula ile belirlenmiş, eğim olmaması amacıyla su terazisi kullanılmıştır.

Ölçülerde kullanılan kayıt cihazı "Phoenix Geophysics" firmasının ürettiği MTU-5C cihazıdır (**Şekil 5.4**). Cihaz ile 30Hz, 2400Hz ve 24kHz olmak üzere üç farklı örnekleme frekansı ile MT verileri toplanmıştır. MT istasyonları uzun süre arazide duracağından, kayıt cihazı ve aküler için alüminyum bir kutu kullanılmıştır (**Şekil 5.5**). Kutu içerisinde

kayıt cihazı, modem ve üç adet akü vardır (**Şekil 5.6**). GPS ve modem anteni ise alüminyum kutuya monte edilmiş plastik bir kutu içerisindedir. Akülerden ikisi ölçü süresi boyunca kayıt cihazının ihtiyaç duyduğu gücü sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Üçüncü akü ise ölçü süresi boyunca aletin sunucu bilgisayara altı dakikalık paketler halinde veri göndermesi için modemi açık tutmak amacıyla kullanılmaktadır.

Sunucuya aktarılan veriler, yüksek kapasiteli bilgisayarlarda işlenerek 64 MT istasyonu zaman serisi verileri için "*.EDI" dosyaları oluşturulmuş ve ters çözüme hazırlanmıştır.



Şekil 5.4 Kayıt Cihazı



Şekil 5.5 MT İstasyonu



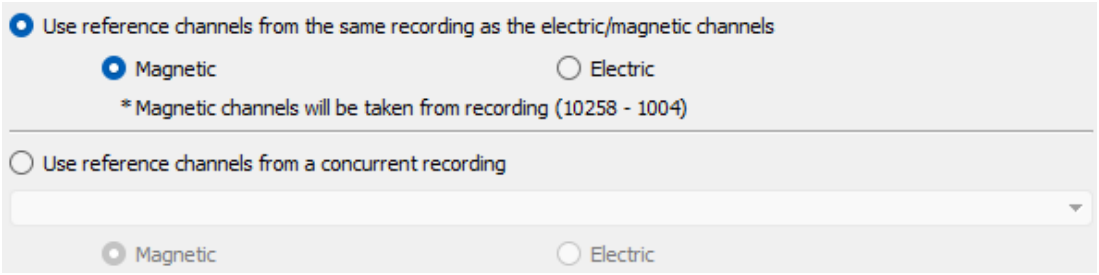
Şekil 5.6 MT İstasyonunun İçeriği

5.1 Empedans Kestiriminde Kullanılan Yazılımlar

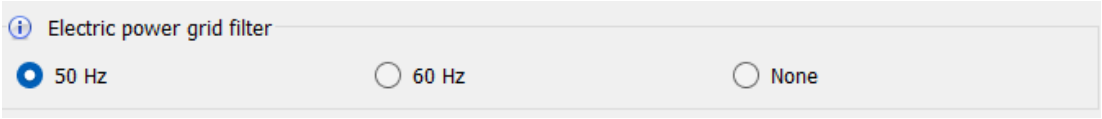
Bu çalışmada empedans kestirimi için açık kaynak kodlu bir Python kütüphanesi olan "Razorback" kütüphanesi ile "EMPower" yazılımı kullanılmıştır. Razorback kütüphanesinin içerisinde geleneksel EKK, RME (Egbert ve Booker, 1986) ve son olarak BIRRP (Chave, 2003; Chave ve Thomson, 2004) yöntemleri yer alırken; EMPower yazılımında ise SSWCD yöntemi kullanılmıştır (Jones ve Jödicke, 1984; Jones vd., 1989). EMPower yazılımında ek olarak; elektrik şebeke frekansının MT verileri üzerine bozucu etkisini giderebilmek amacıyla kullanılan çentik süzgeci, zaman maskesi, genlik ve faz süzgeci gibi bir takım ön-işlem süzgeçleri ve elle eleme olanakları mevcuttur. Çalışma kapsamında, yazılımların nasıl kullanıldığını ve otomatik kestirim yöntemlerinin ham veri üzerine olan etkisini inceleyebilmek amacıyla TÜBİTAK 119Y197 numaralı proje kapsamında toplanan MT verilerinden, 1004 numaralı istasyona ait 72 saatlik bir zaman serisi verisi kullanılmıştır. İlerleyen bölümlerde, kestirim türlerinin kıyaslanması amacıyla 9 farklı MT zaman serisi verisi kullanılacaktır.

5.1.1 EMPower

EMPower, Kanada menşeili Phoenix Geophysics firmasının bir aygıt yazılımıdır (firmware software). Yazılım, kararlı kestirim sırasında "tutarlılık ağırlıklandırma" yöntemini de kullanmaktadır. Kalibrasyon dosyalarını otomatik olarak okuyarak kalibrasyon işlemini gerçekleştirmektedir. Yazılımda tutarlılık türü olarak; sıradan, kısmi ve çoklu tutarlılık türleri bulunmaktadır. Veri-işlem aşamasında elektrik ve manyetik kanallarda uzak referans kullanılıp kullanılmayacağı seçiminin (**Şekil 5.7**) yanı sıra, ön-işlem süzgeci olarak kayıt tarafında bölgesel elektrik şebeke frekansını süzgeçlemek için 50Hz ya da 60Hz olmak üzere çentik süzgeci (**Şekil 5.8**) mevcuttur. Türkiye'de elektrik şebeke frekansı 50Hz olduğundan, 50Hz çentik süzgeci uygulanmıştır.

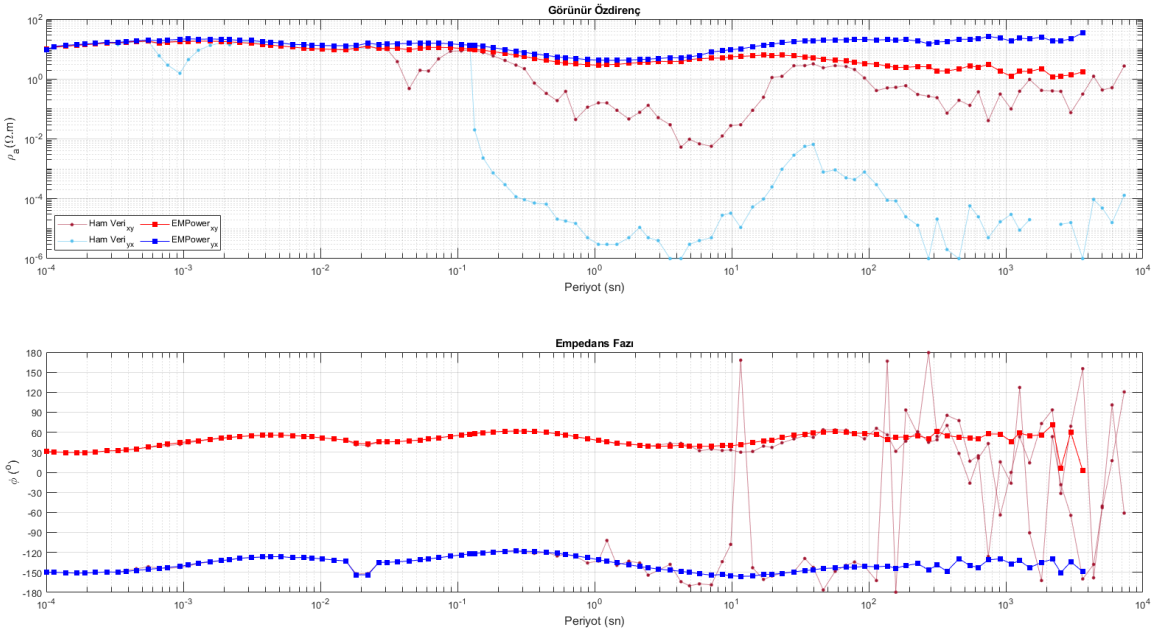


Şekil 5.7 EMPower - Elektrik ve Manyetik Referans Seçimi



Şekil 5.8 EMPower - Elektrik Şebeke Frekansı Seçimi

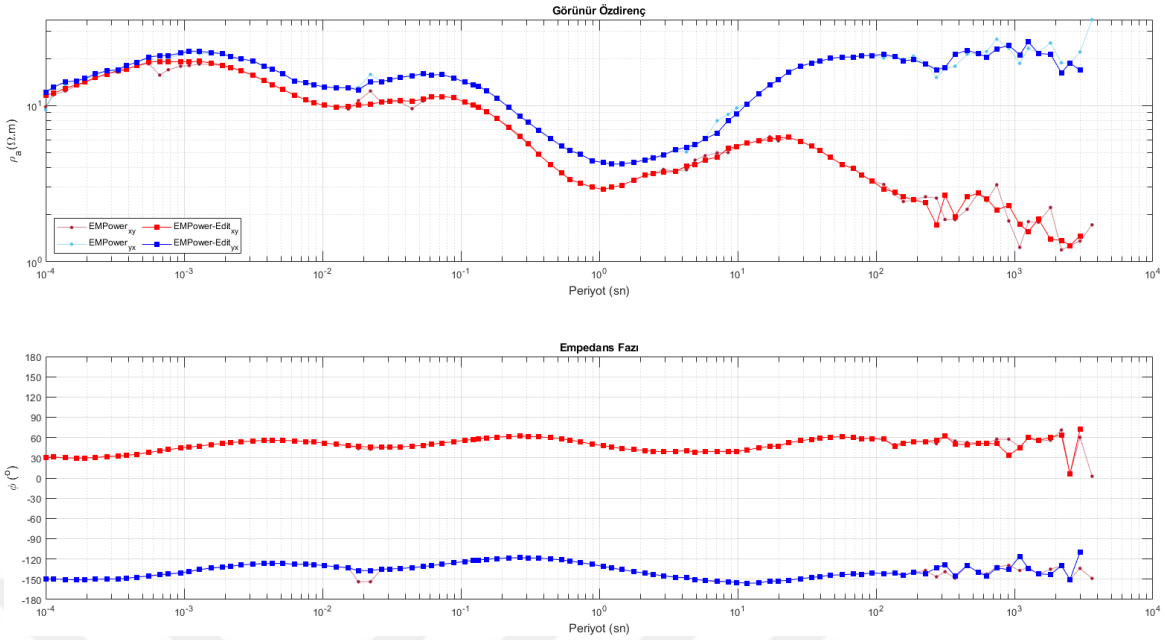
Otomatik kestirim sırasında tutarlılık türü olarak çoklu tutarlılık seçilmiştir. Minimum tutarlılık değeri bu istasyon için 0,8 olarak belirlenmiştir. Tutarlılık seçimi ile kararlı kestirim sonrası; ham veri ile kestirim sonucu izleyen şekilde verilmiştir.



Şekil 5.9 EMPower – Otomatik Kestirim Sonucu

Kararlı kestirim sonucu görünür özdirenç ve faz eğrilerinin ham veri ile üst üste gösterilerek kıyaslanması **Şekil 5.9**'da verilmiştir. Şekilde net bir biçimde görülebileceği gibi otomatik empedans kestirimi; MT ölü bölgesinden itibaren başlayan ve uzun periyotlara doğru devam eden saçılmaların önüne geçmiş ve xy ve yx modları olmak üzere her iki mod için de başarılı bir empedans kestirimi yapmıştır. Ancak, bu görselleştirmede özdirenç eğrisinde logaritmik eksende y-ekseninin ham verinin saçılmasından ötürü 10^{-6} ile $10^{2}\Omega$.m aralığında olduğu dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla empedans kestirimi sonucu elde edilen GÖ eğrisi 1-35 Ω.m aralığında olduğu için düz bir çizgi gibi görülmektedir.

EMPower ile yapılan otomatik kestirim sonucunda 300 saniyenin üzerindeki periyotlarda, verinin genel davranışını bozan bazı saçılmalar mevcut olsa da başarılı bir kestirim gerçekleştirilmiştir. Burada, EMPower yazılımı bir takım ön-işlem süzgeçlerinin uygulanmasına ve verilerin elle elenmesine olanak sağladığından, bütün periyotlarda meydana gelen saçılmaların büyük miktarda önüne geçilebilmektedir. Otomatik kestirim ile ön-işlem süzgeçleri ve elle eleme sonucu elde edilen çözümler **Şekil 5.10**'da üst üste çizdirilmiştir. Burada saçılmalardaki değişimlerin daha iyi anlaşılması ve daha tutarlı bir yorum yapılabilmesi amacıyla ham veri çizdirilmemiştir. Böylece, görünür özdirenç değerlerinin 1Ω.m ile 35Ω.m aralığında olduğundan, büyük periyot değerleri için saçılmalar olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10 EMPower – Otomatik Kestirim ve Elle Eleme

Ön-işlem süzgeçleri ve elle eleme ile 300 saniyeye kadar olan periyotlardaki bütün saçılmaların önüne geçilmiştir. Ancak, uzun periyotlarda çok az veri olduğundan 300 saniyeden uzun periyotlarda, otomatik kestirim sonucundan daha iyi olsa da halen saçılmalar mevcuttur. Bu saçılmaların nedeni, izleyen bölümlerde açıklanacaktır.

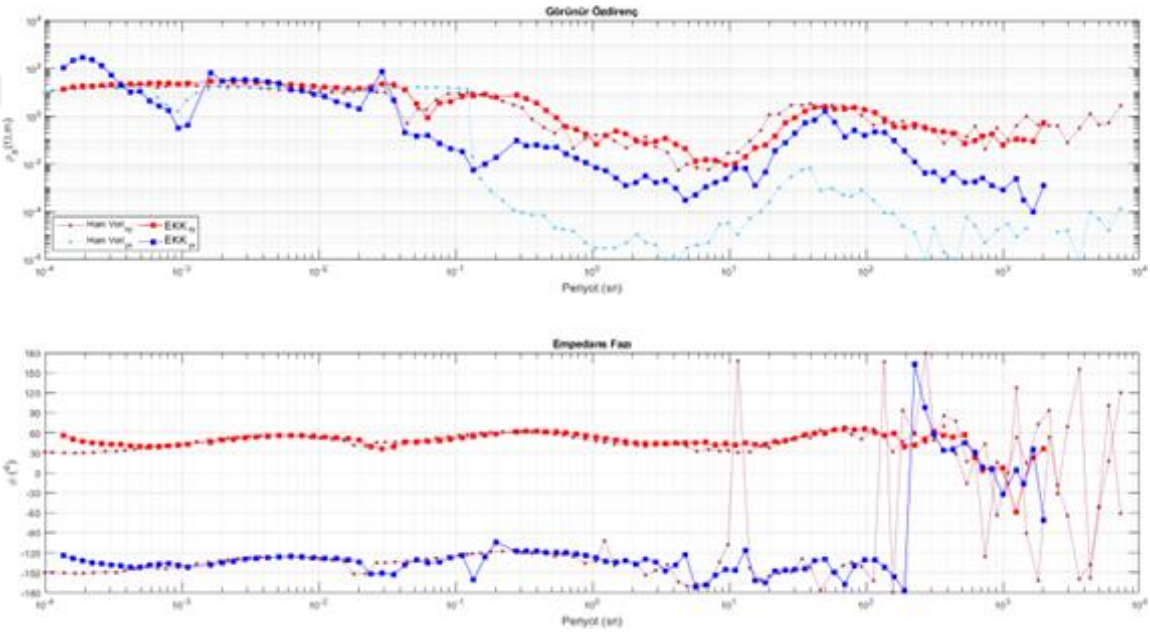
5.1.2 Razorback

Razorback; MT zaman serisi verilerinin kararlı kestirimi geliştirilen açık kaynak kodlu bir Python kütüphanesidir (Smaï ve Pierre, 2020). Razorback kütüphanesinde; EKK, RME ve BIRRP olmak üzere yukarıda sözü edilen üç empedans kestirim yöntemi bulunmaktadır.

MTU-5C kayıt cihazı; MT ölçüsü sırasında toplanan elektrik ve manyetik alan bileşenlerindeki değişimleri 30Hz, 2400Hz ve 24kHz olmak üzere üç farklı örnekleme frekansı ile örnekleyerek kaydeder. Bu sistem ile toplanan MT verilerini Razorback kütüphanesinde işleyebilmek için, üç farklı veri kümesi içe aktarılır ve her veri kümesi için bir sinyal grubu oluşturulur. Veri kümelerinin otomatik kestirimi uygun frekans

aralığı ve Fourier pencereleri seçilerek yapılır ve empedans değerleri kestirilir. Görünür özdirenç ve faz değerleri kestirilen empedans değerleri üzerinden hesaplanır ve kalibrasyon değerleri bu aşamada kullanılır.

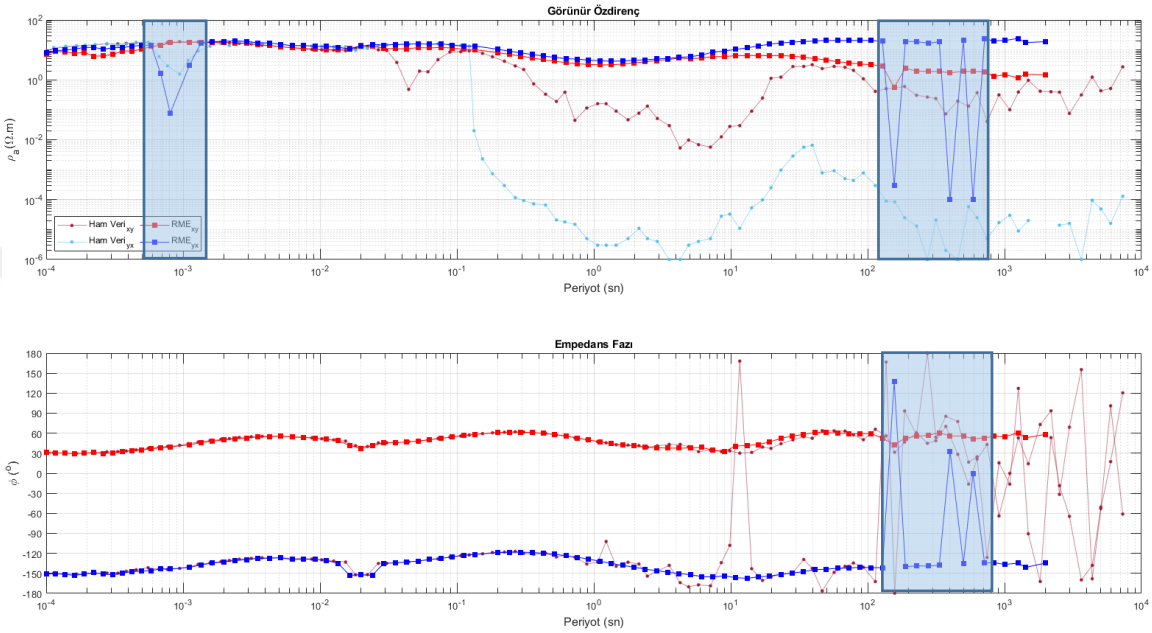
Geleneksel EKK kestirimi, Razorback kütüphanesi içerisinde bulunan modüllerden birisidir. 1004 numaralı istasyon için ham veri ve geleneksel en-küçük kareler kestirimi sonuçlarının üst üste gösterimi **Şekil 5.11**'de verilmiştir.



Şekil 5.11 Razorback – Otomatik Geleneksel En-Küçük Kareler Kestirimi

Geleneksel EKK kestirimi, saçılmış verilerden çok etkilenen bir yöntemdir. EKK kestirimi, bu istasyon için neredeyse bütün periyot değerleri için başarısız bir çözüm üretmiştir. Yöntem, xy modunda yaklaşık 0.1 saniyelik periyot değerine kadar kabul edilebilir bir çözüm üretse de MT ölü bölgesi ve sonrasını kapsayan bütün periyotlarda ham veriye yakın bir sonuç üretmiştir. Yöntem, yx modunda bütün periyotlar için başarısız bir çözüm üretmiştir.

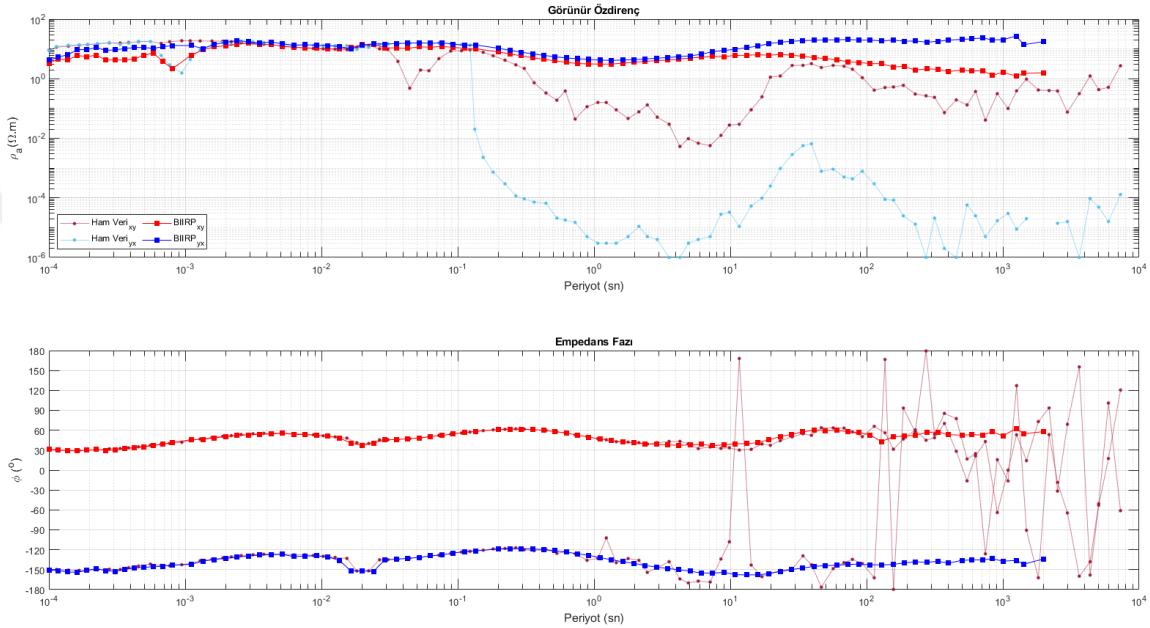
RME yöntemi, Razorback kütüphanesi içerisinde bulunan modüllerden bir diğeridir. Minimum tutarlılık değeri kıyaslamanın adil olabilmesi açısından, EMPower yazılımında kullanılan değer ile aynı değer olan 0,8 olarak belirlenmiştir. 1004 numaralı istasyon için ham veri ve RME kestirimi sonuçlarının üst üste gösterimi **Şekil 5.12**'de verilmiştir.



Şekil 5.12 Razorback – Otomatik RME Kestirimi

Razorback kütüphanesinde bulunan RME yöntemi ile yapılan otomatik kestirim sonucunda, görünür özdirenç ve faz eğrilerinde mavi dikdörtgenler ile işaretlenmiş periyotlarda, yx modu için verinin genel davranışını bozan bazı saçılmalar mevcut olsa da her iki mod için de başarılı bir kestirim gerçekleştirerek güvenilir sonuçlar üretmiştir. **Şekil 5.12**'de net bir biçimde görülebileceği gibi otomatik empedans kestirimi; MT ölü bölgesinden itibaren başlayan ve uzun periyotlara doğru devam eden saçılmaların işaretlenen periyot aralığı hariç önüne geçmiş ve xy ve yx bileşenleri için başarılı bir empedans kestirimi yapmıştır.

BIRRP yöntemi, Razorback kütüphanesi içerisinde bulunan diğer bir modüldür. Minimum tutarlılık değeri kıyaslamanın adil olabilmesi açısından, önceki kestirim yöntemlerinde kullanılan tutarlılık değeri ile aynı değer olan 0,8 olarak belirlenmiştir. 1004 numaralı istasyon için ham veri ve BIRRP kestirimi sonuçlarının üst üste gösterimi **Şekil 5.13**'te verilmiştir.



Şekil 5.13 Razorback – Otomatik BIRRP Kestirimi

Şekil 5.13'te net bir biçimde görülebileceği gibi BIRRP otomatik kestirim sonuçları; düşük periyotlarda saçılmalar mevcut olmasına rağmen, MT ölü bölgesinden itibaren başlayan ve uzun periyotlara doğru devam eden saçılmaların önüne geçmiş ve xy ve yx modları olmak üzere her iki mod için de başarılı bir empedans kestirimi yaparak bütün periyot değerleri için güvenilir sonuçlar üretmiştir.

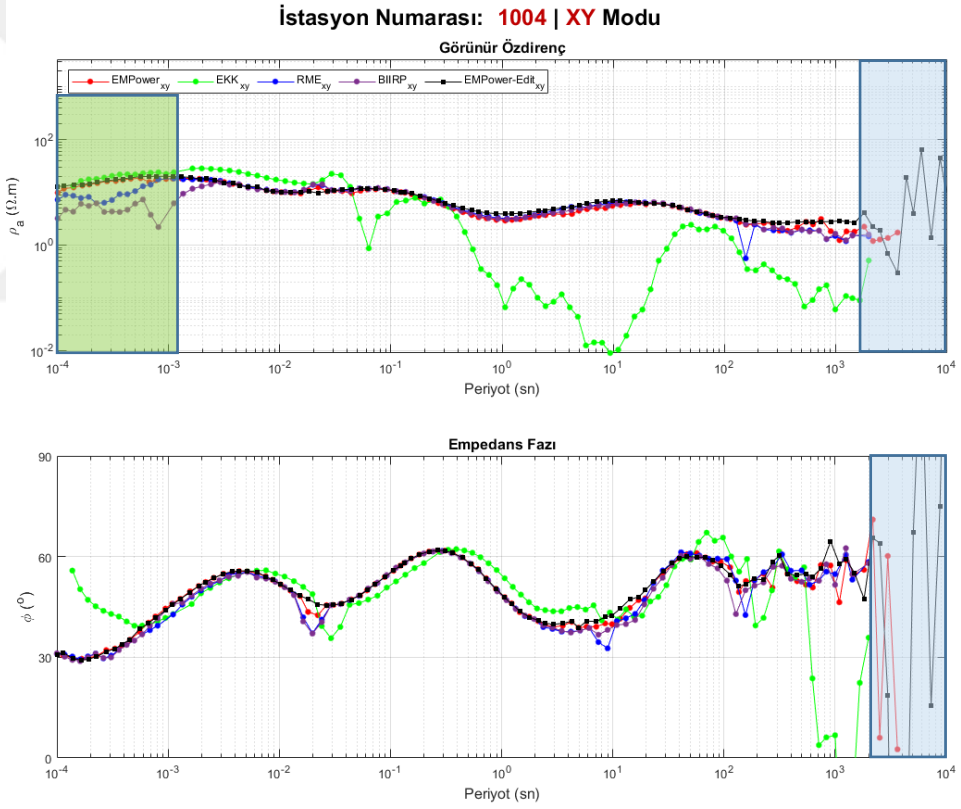
5.2 Empedans Kestirim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde; Razorback kütüphanesi ve EMPower yazılımında kullanılan otomatik empedans kestirim yöntemleri sonucunda elde edilen MT verileri, MATLAB'da üst üste çizdirilerek görünür özdirenç ve faz davranışları üzerinden birbirleriyle kıyaslanmıştır. TÜBİTAK 119Y197 numaralı proje kapsamında 64 adet MT istasyonundan seçilen dokuz adet istasyonda toplanan MT zaman serisi verileri üzerinden kıyaslama yapılmıştır. Grafiklerde görünür özdirenç ve faz eğrileri için; Razorback kütüphanesi kullanılarak yapılan EKK otomatik kestirim sonuçları yeşil, RME otomatik kestirim sonuçları mavi, BIRRP otomatik kestirim sonuçları mor, EMPower kullanılarak yapılan otomatik kestirim sonuçları kırmızı, EMPower yazılımında ön-işlem süzgeçleri kullanılmış ve elle elemesi yapılmış çözümler siyah renk ile temsil edilmektedir. Sonuçların daha anlaşılır olabilmesi adına xy ve yx modlarının görünür özdirenç ve faz açısı davranışları ayrı grafikler halinde çizdirilmiştir ve 1004, 1005, 1006, 1012, 2005, 2010, 4011, 4012 ve 4015 numaralı istasyonlar için izleyen sırada verilmiş ve her bir grafik ayrı ayrı yorumlanmıştır. Ayrıca sonuçlar kısmında bütün karşılaştırmalar üzerine genel bir yorum yapılmıştır.

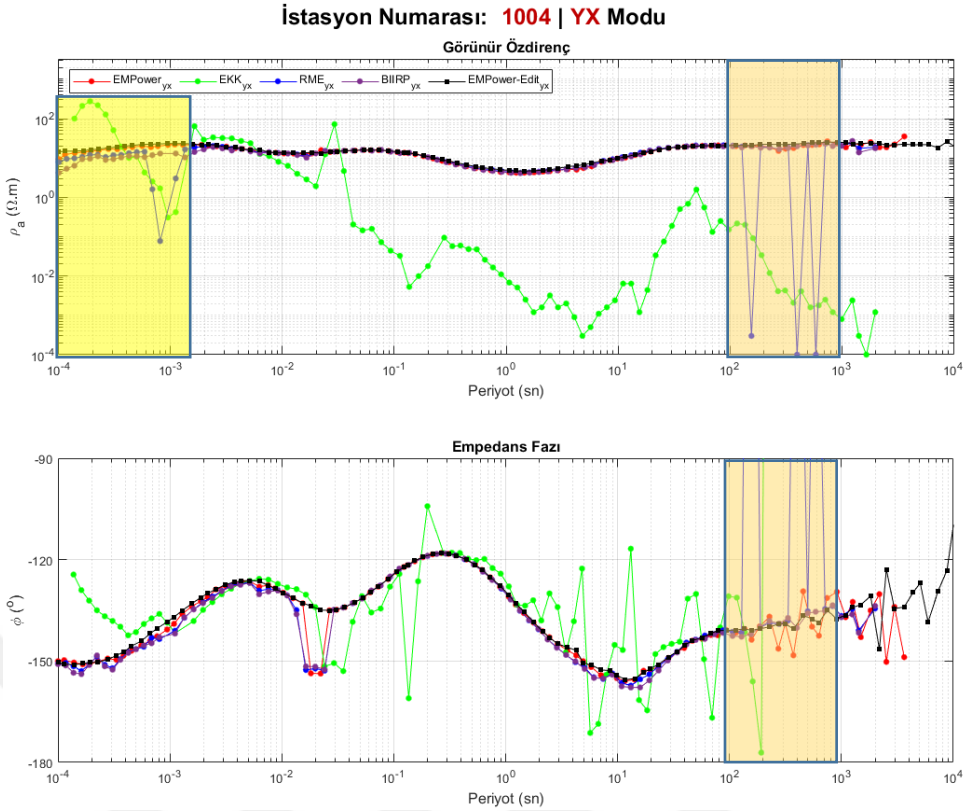
1004 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.14**'te verilmiştir. Bu şekil ve diğer şekillerde; EMPower (SSWCD) çözümü kırmızı daire ve çizgi ile, EMPower düzenlenmiş veri siyah kare ve çizgi ile, Razorback EKK çözümü yeşil daire ve çizgi ile, Razorback RME çözümü mavi daire ve çizgi ile ve Razorback BIRRP çözümü mor daire ve çizgi ile gösterilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde yeşil dikdörtgen ile taralı 10^{-4} ile 10^{-3} saniye aralığındaki düşük periyotlarda EMPower ve EKK sonuçlarında başarılı bir kestirim görülürken, BIRRP ve RME sonuçlarında saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. Ancak EKK kestirimi geriye kalan bütün periyot aralıklarında başarısız bir çözüm gerçekleştirirken; diğer kestirim yöntemlerinin çoğu periyot değeri için başarılı bir kestirim yaparak xy modu için güvenilir sonuçlar verdiği görülmektedir. Düzenlenmiş EMPower sonucunda görünür özdirenç ve faz açısı eğrilerinde mavi dikdörtgenlerle taranmış uzun periyotlu alanda saçılmasının nedeni; derinlik bilgisini korumak adına uzun periyotların da işlenmesinin tercih edilmesi ve uzun

periyotlarda az sayıda veri bulunduğundan ötürü elle eleme aşamasında elenen her bir verinin, verinin genel davranışı üzerinde çok büyük bir etkisi olmasıdır.

1004 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.15**'te verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde sarı dikdörtgen ile taralı 10^{-4} ile 10^{-3} saniye aralığındaki düşük periyotlarda EKK, BIRRP ve RME yöntemlerinde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, RME yönteminde turuncu dikdörtgenlerle taranmış 100 ile 1000 saniye aralığındaki periyotlarda saçılmalar meydana gelmiştir. EKK kestirimi bütün periyot aralıklarında başarısız bir çözüm gerçekleştirirken; diğer kestirim yöntemlerinin çoğu periyot için başarılı bir kestirim yaparak güvenilir sonuçlar verdiği görülmektedir. Kestirim yöntemleri, genel olarak birbirine benzer davranışlar gerçekleştirmiştir.



Şekil 5.14 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1004 - XY)

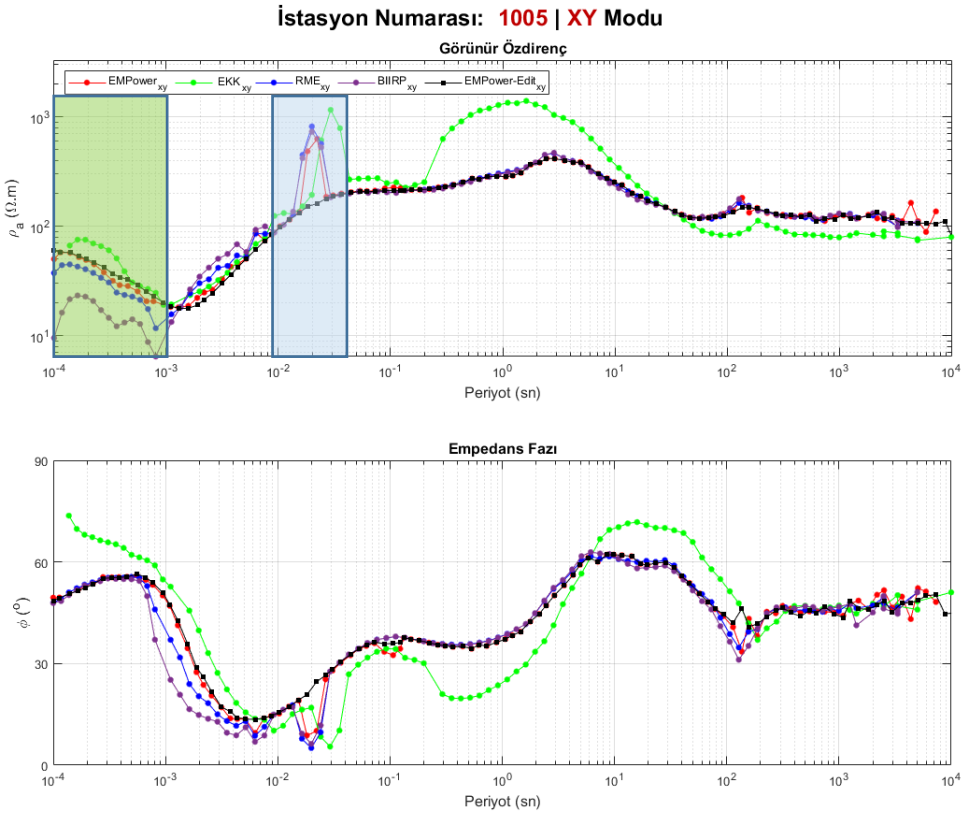


Şekil 5.15 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1004 – YX)

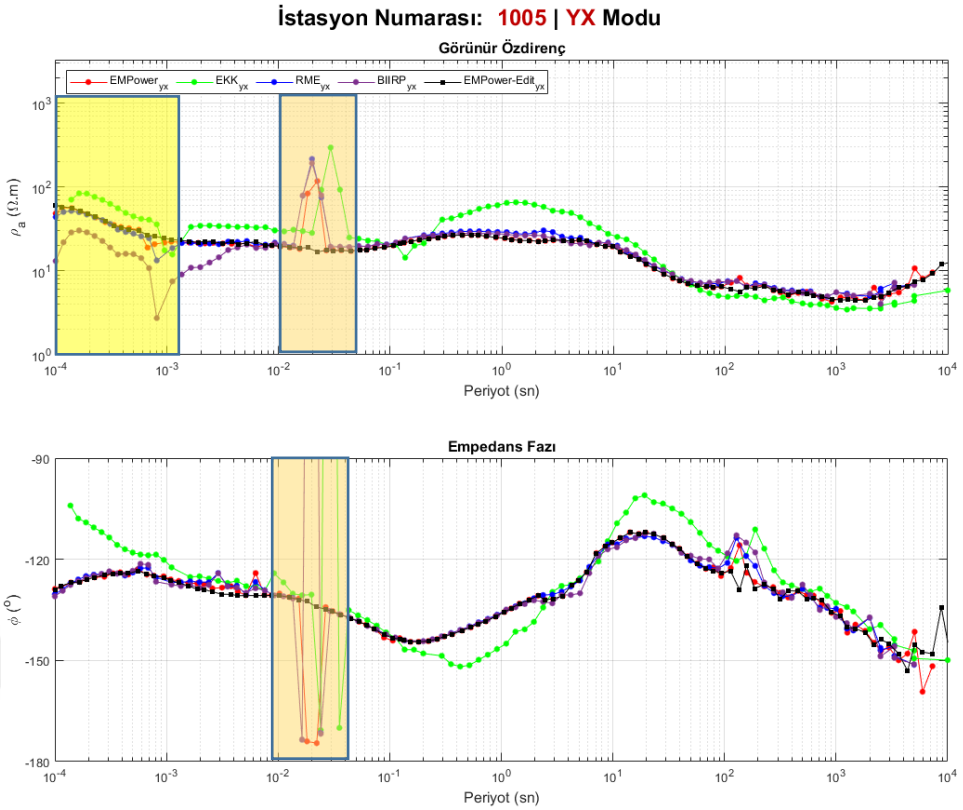
1005 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.16**'da verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde yeşil dikdörtgen ile taralı 10^{-4} ile 10^{-3} saniye aralığındaki düşük periyotlarda EMPower ve RME sonuçları birbirine yakın bir davranış gösterirken, BIRRP ve EKK yöntemlerinde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. EKK kestiriminde, farklı periyot değerlerinde saçılmalar mevcut olsa da MT ölü bandı dışındaki periyotlarda tutarlı bir sonuç vermiştir. Diğer kestirim yöntemleri çoğu periyot için benzer bir davranış göstermiştir, başarılı bir kestirim yaparak güvenilir sonuçlar vermiştir. Mavi dikdörtgen ile taralı periyotlarda; EKK, RME, BIRRP ve EMPower sonuçları benzer bir davranış ile saçılmıştır. Bu saçılmanın nedeni bölüm 4.2.1'de ve çözümü bölüm 6.3'te açıklanmıştır.

1005 numaralı istasyonun yx modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.17**'de verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde sarı dikdörtgen ile taralı 10^{-4} ile 10^{-3} saniye aralığındaki düşük periyotlarda EMPower ve RME sonuçları birbirine yakın bir davranış gösterirken, BIRRP ve EKK yöntemlerinde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. EKK

kestiriminde, yx modunda MT ölü bandındaki saçılmalardan daha az etkilenerek bütün periyot aralıklarında diğer yöntemlere yakın bir sonuç vermiştir. Kestirim yöntemleri, genel olarak birbirine benzer davranışlar gerçekleştirmiştir. Diğer kestirim yöntemleri çoğu periyot için benzer bir davranış göstermiştir, başarılı bir kestirim yaparak güvenilir sonuçlar vermiştir. Turuncu dikdörtgen ile taralı periyotlarda; EKK, RME, BIRRP ve SSWCD sonuçları benzer bir davranış ile saçılırken, düzenlenmiş EMPower sonucunda bu saçılmanın giderilmesi elle veri elemenin önemine başka bir örnektir.



Şekil 5.16 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1005 - XY)

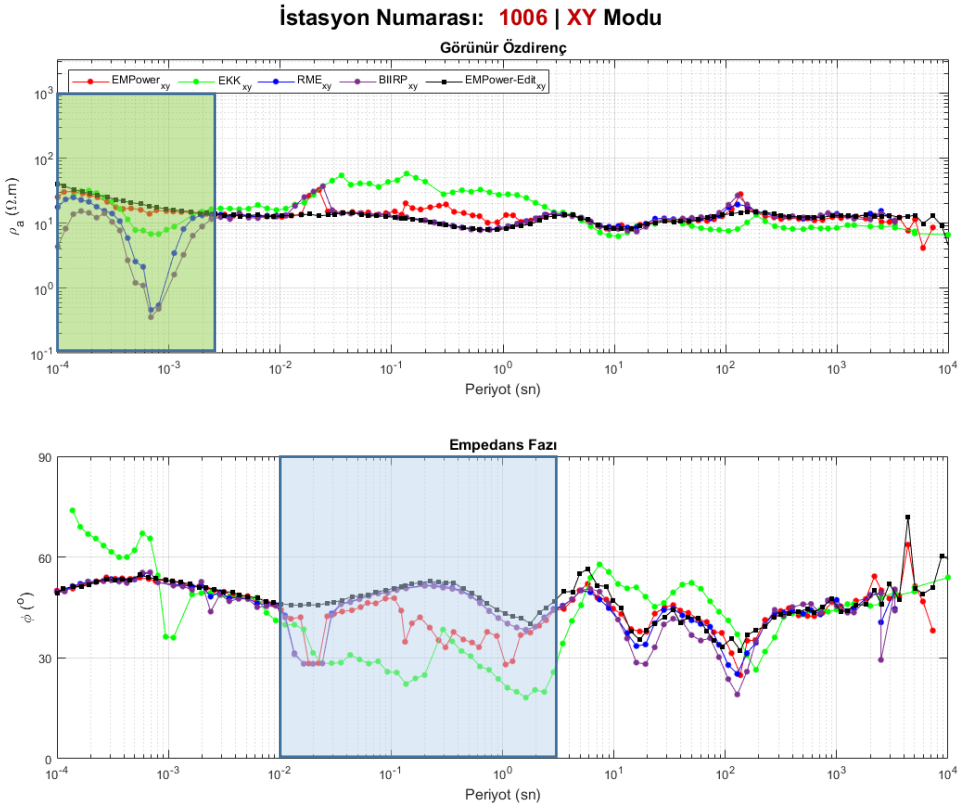


Şekil 5.17 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1005 - YX)

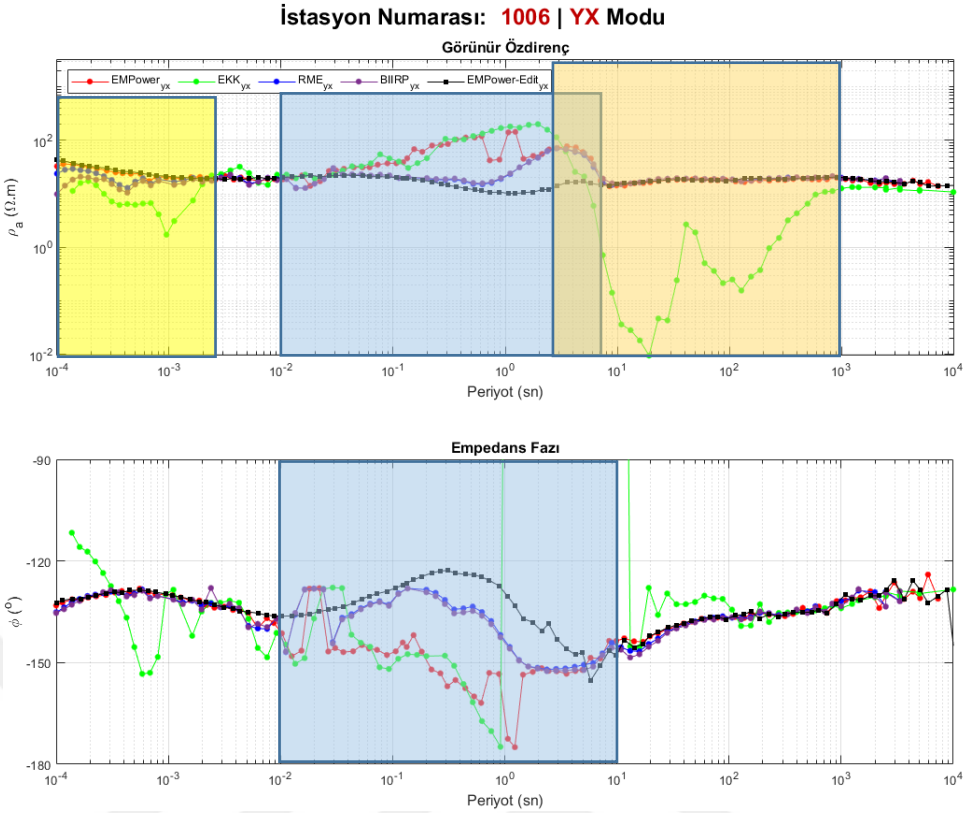
1006 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.18**'de verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde yeşil dikdörtgen ile taralı 10^{-4} ile 10^{-3} saniye aralığındaki düşük periyotlarda EMPower ve EKK sonuçları birbirine yakın bir davranış gösterirken, RME ve BIRRP yöntemlerinde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. EMPower, RME ve BIRRP sonuçları çoğu periyot değerinde benzer davranış göstermiş, başarılı bir kestirim yaparak güvenilir sonuçlar vermiştir. EKK kestirimi diğer yöntemlere kıyasla saçılmalar gerçekleştirse de kabul edilebilir bir sonuç vermiştir. Faz açısı çiziminde mavi dikdörtgen ile taralı periyotlarda; otomatik EMPower sonucundaki saçılmalar, düzenlenen EMPower sonucuyla kıyaslandığında, elle elemenin önemi bir kez daha anlaşılmaktadır.

1006 numaralı istasyonun yx modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.19'**da verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde sarı dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda EKK sonuçlarında saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. EKK yöntemi turuncu dikdörtgen ile taralı periyot aralığında saçılmış verilerden çok etkilenmiştir. Faz

açısındaki davranışıyla birlikte yorumlandığında, EKK yönteminin başarısız bir çözüm gerçekleştirerek güvenilir sonuçlar vermediği görülmektedir. Diğer kestirim yöntemleri çoğunlukla birbirine yakın ve güvenilir sonuçlar üretmiştir. Otomatik EMPower çözümlerinde; görünür özdirenç ve faz açısında mavi dikdörgenlerle taralı alanın kapsadığı MT ölü bölgesi ve çevresinde saçılmalar görülmektedir, ancak bu saçılmalar düzenlenmiş EMPower çözümünde giderilmiştir. Bu durum MT zaman serisi analizinde otomatik kestirimin tek başına yetersiz olduğunu, hassas bir biçimde elle eleme yapılmasının önemini kanıtlar niteliktedir.



Şekil 5.18 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1006 - XY)

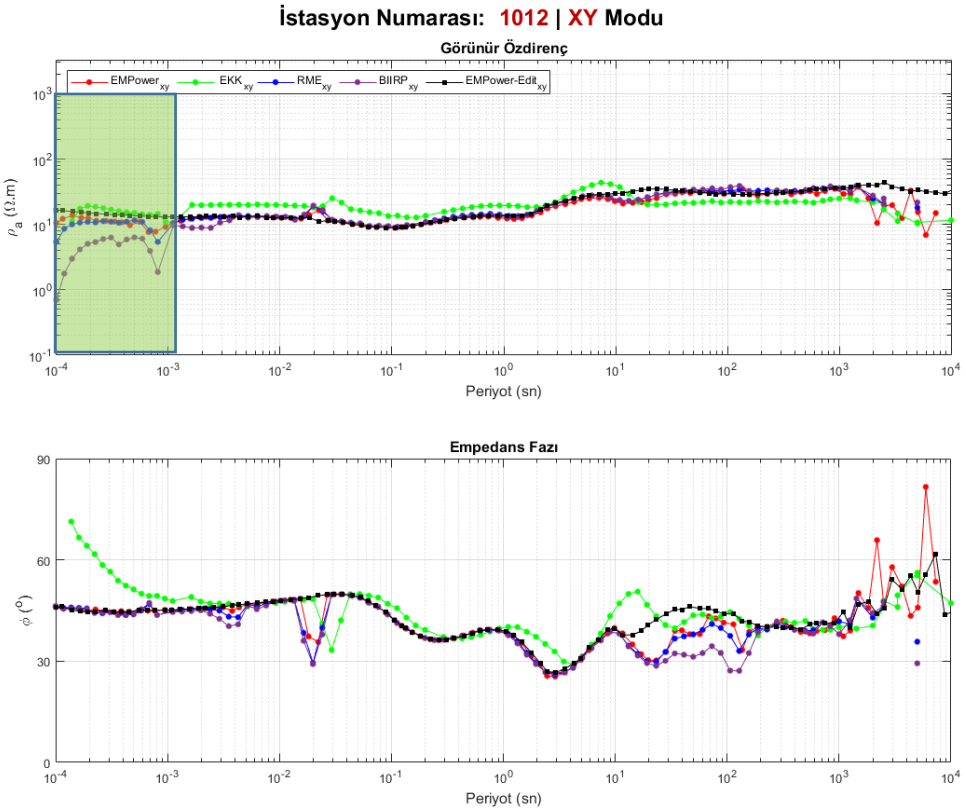


Şekil 5.19 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1005 - YX)

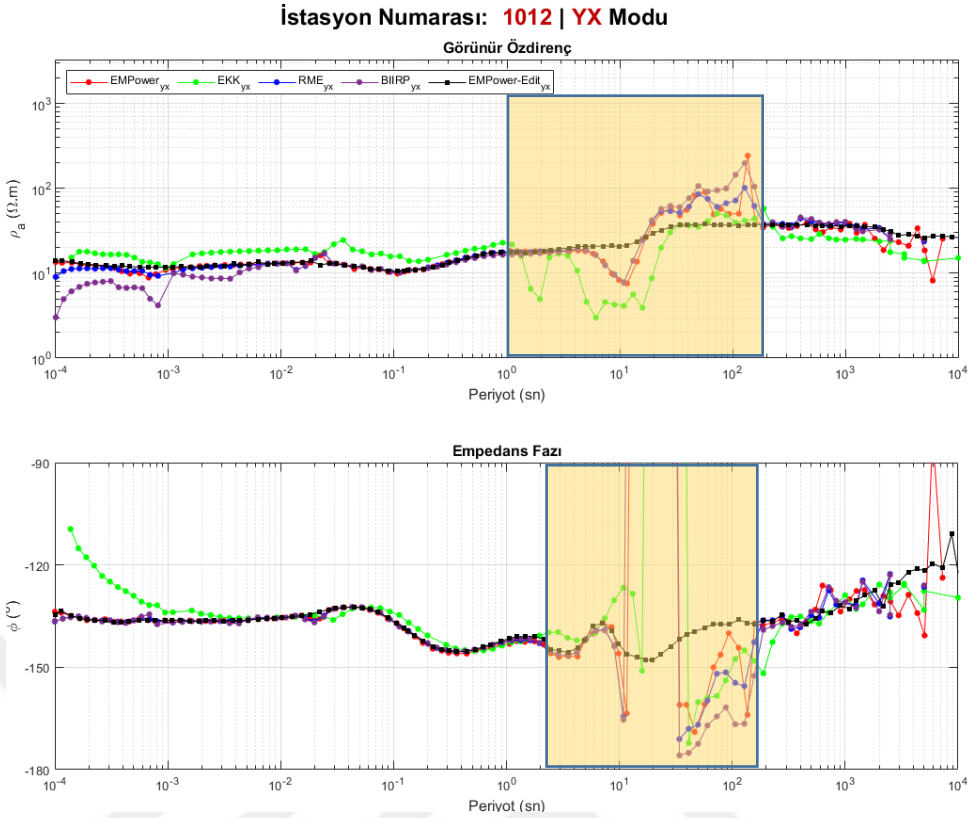
1012 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.20**'de verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde yeşil dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda EMPower, EKK ve RME sonuçları birbirine yakın bir davranış gösterirken, BIRRP yöntemlerinde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. Faz açısı davranışlarında farklılıklar mevcut olsa da xy modu için bütün kestirim yöntemlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği, başarılı çözüm yaptığı, kabul edilebilir ve güvenilir sonuçlar verdiği görülmektedir.

1012 numaralı istasyonun yx modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.21'**de verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde düşük periyotlarda yöntemlerin xy modundakine benzer bir davranış yaptığı görülmektedir. Yöntemler genel olarak benzer bir davranış sergilemişlerdir. Ancak, görünür özdirenç ve faz açısı grafiklerinde turuncu dikdörtgenler ile taralı periyotlardaki davranışına baktığımızda; EMPower, RME ve BIRRP sonuçlarının benzer şekilde saçıldığını, faz açılarının güvenilir aralığın dışında kestirildiği görülmektedir. Otomatik RME, BIRRP ve EMPower sonuçları düzenlenmiş EMPower sonuçlarıyla kıyaslandığında, görünür özdirenç ve özellikle faz açısındaki saçılmaların

tamamen giderildiği, faz açısının güvenilir aralığa taşındığı net bir şekilde görülmektedir. Bu durum otomatik kestirimin her zaman yeterli olmadığını, duyarlılıkla yapılan bir veri elemenin sağlıklı bir jeofizik yorum için güvenilir veri kümesi oluşturabilmek adına önemini kanıtlar.



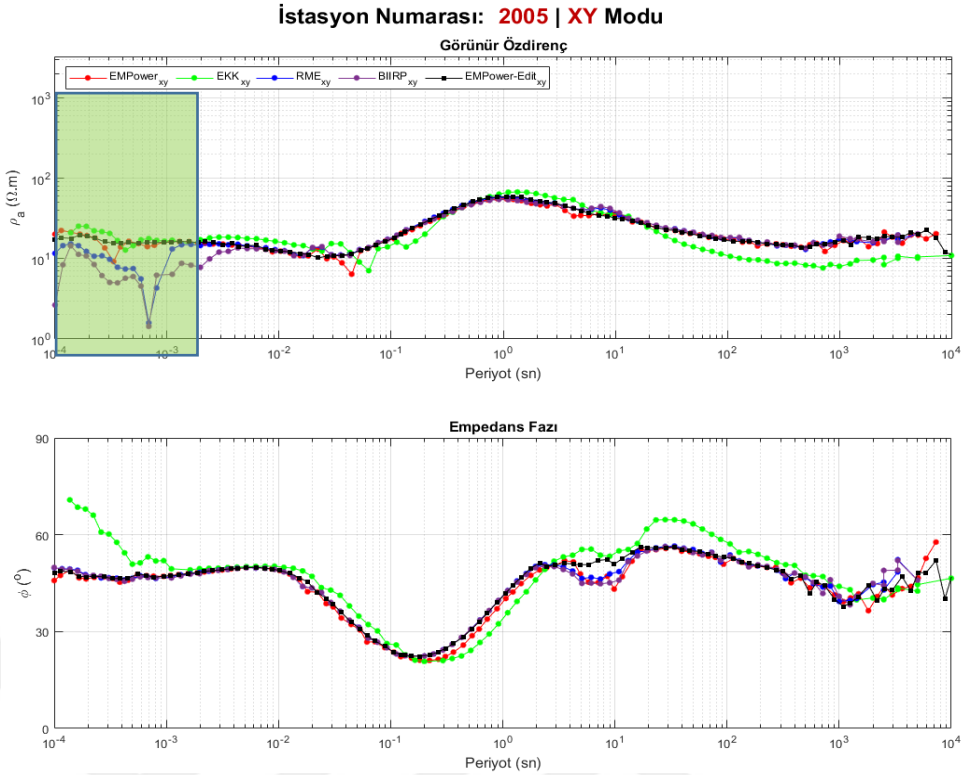
Şekil 5.20 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1012 - XY)



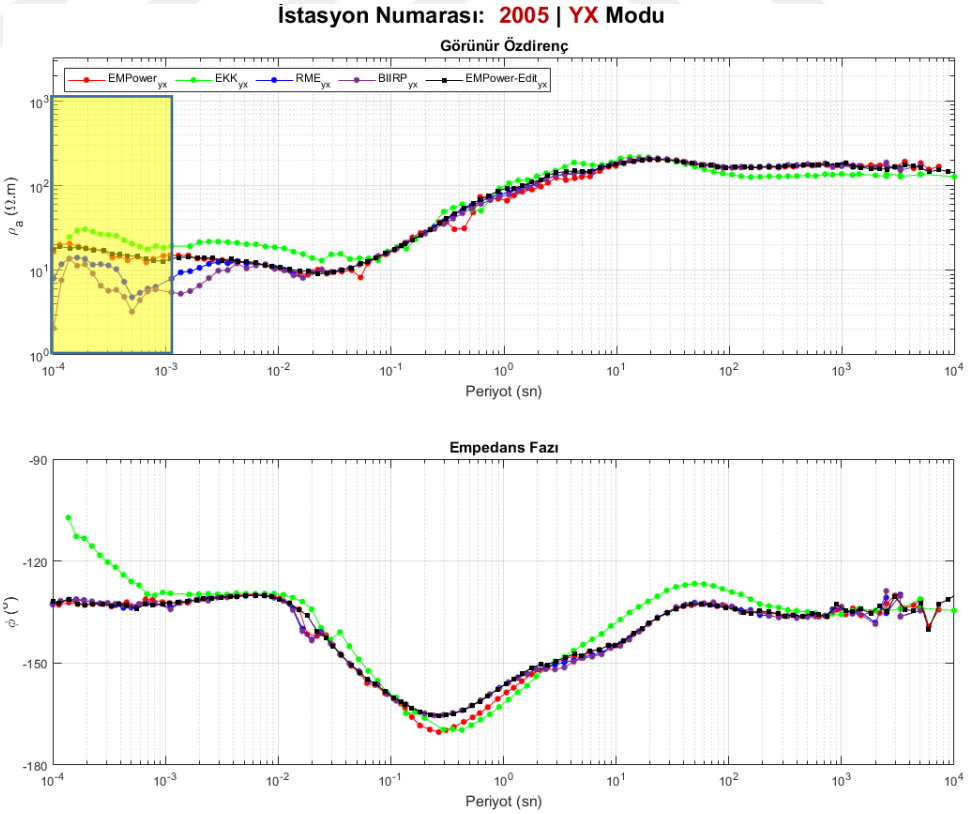
Şekil 5.21 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (1012 - YX)

2005 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.22**'de verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde yeşil dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda, BIRRP ve RME yönteminde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, bütün yöntemlerin birbiriyle örtüşen sonuçlar sunduğu anlaşılmaktadır. Kullanılan kestirim yöntemleri genel olarak bütün periyotlar için başarılı bir çözüm gerçekleştirmiş ve güvenilir sonuçlar vermiştir.

2005 numaralı istasyonun yx modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.23**'te verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde sarı dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda, BIRRP ve RME yönteminde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, bütün yöntemlerin birbiriyle örtüşen sonuçlar sunduğu anlaşılmaktadır. Bütün yöntemler, genel olarak bütün periyotlar için başarılı bir çözüm gerçekleştirmiş ve güvenilir sonuçlar vermiştir.



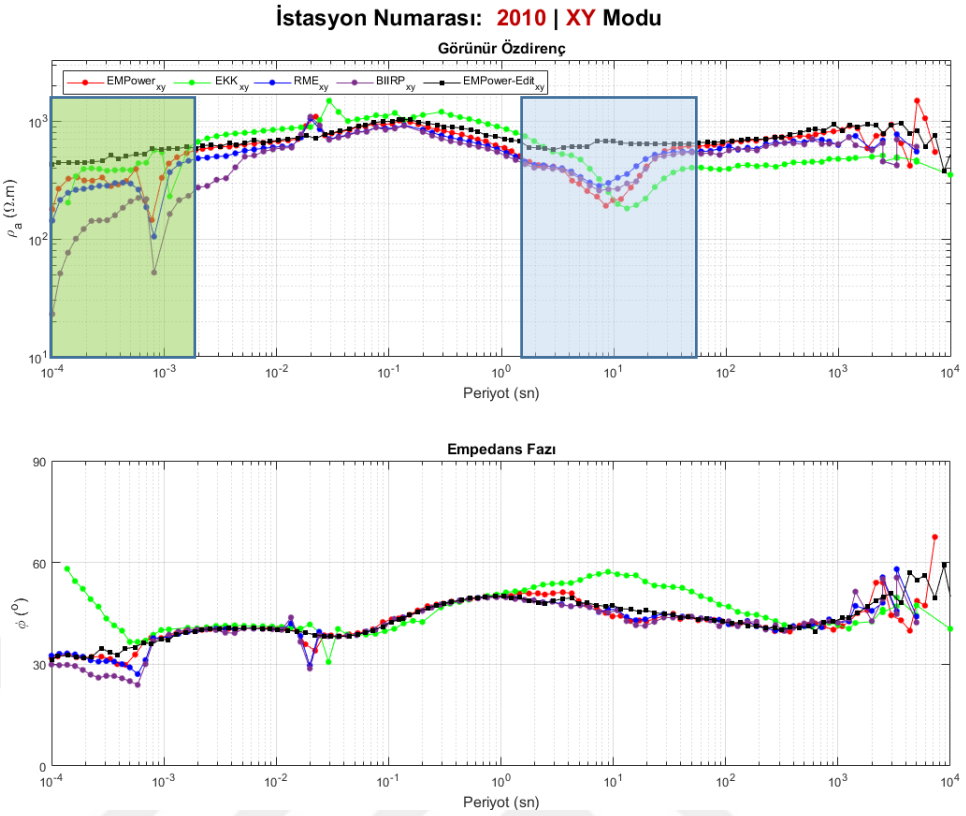
Şekil 5.22 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (2005 - XY)



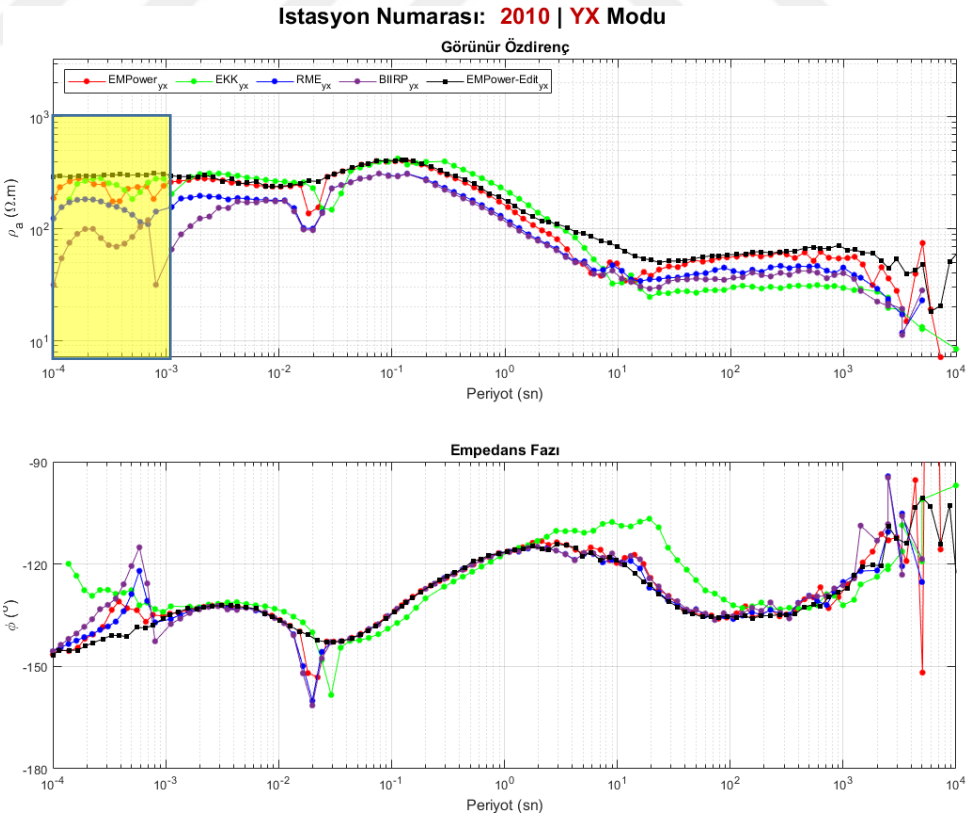
Şekil 5.23 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (2005 - YX)

2010 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.24**'te verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde yeşil dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda bütün yöntemlerde saçılmalar mevcuttur. EKK yöntemi, diğer yöntemlere oranla daha fazla saçılmıştır. Her ne kadar EMPower, RME ve BIRRP otomatik kestirim sonuçları birbirleriyle yakın davranışlar gösterse de özellikle mavi dikdörtgen ile taralı periyot aralığında görünür özdirenç değerleri açısından, düzenlenmiş EMPower sonuçlarıyla arasında birkaç katlık bir fark olduğu göz ardı edilmemelidir. Bu durum, otomatik kestirimin yanı sıra yapılan düzenlemelerin sağlıklı ve güvenilir bir jeofizik yorum için önemini göstermektedir.

2010 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.24**'te verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde sarı dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda özellikle RME ve BIRRP yöntemlerinde saçılmalar mevcuttur. Taralı alanda EKK ve EMPower sonuçları birbirine yakındır. Grafikler incelendiğinde, bütün yöntemlerin birbiriyle örtüşen sonuçlar sunduğu anlaşılmaktadır. Kullanılan kestirim yöntemleri, genel olarak bütün periyotlar için başarılı bir çözüm gerçekleştirmiş ve yx modu için güvenilir sonuçlar vermiştir.



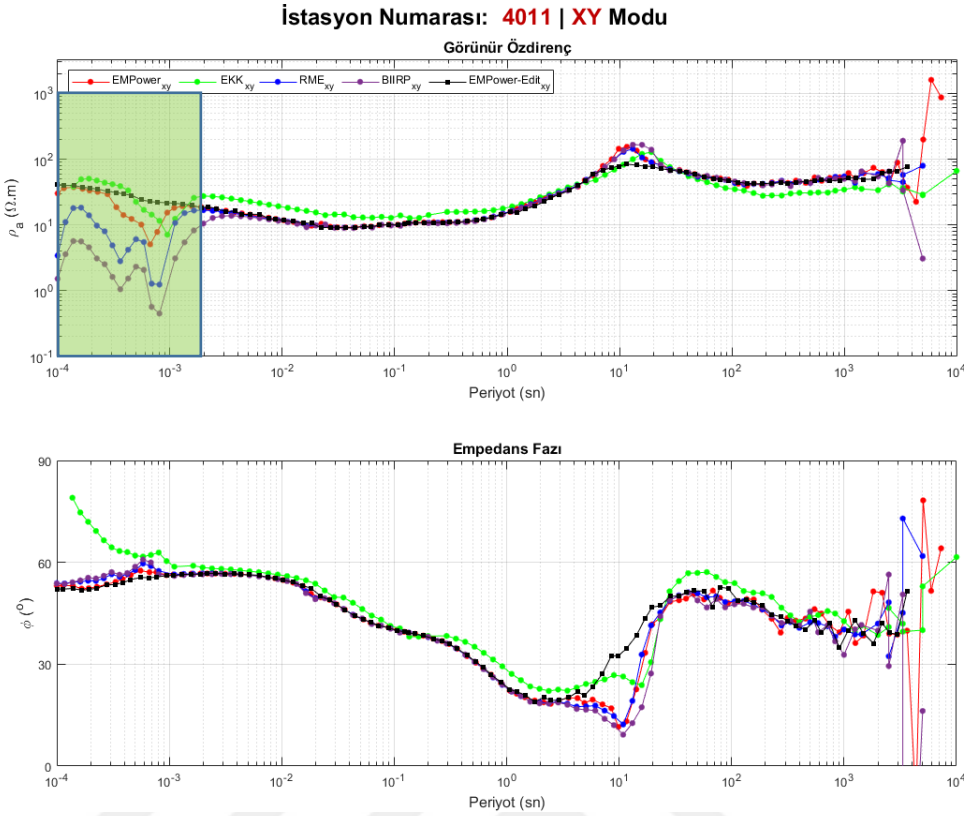
Şekil 5.24 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (2010 - XY)



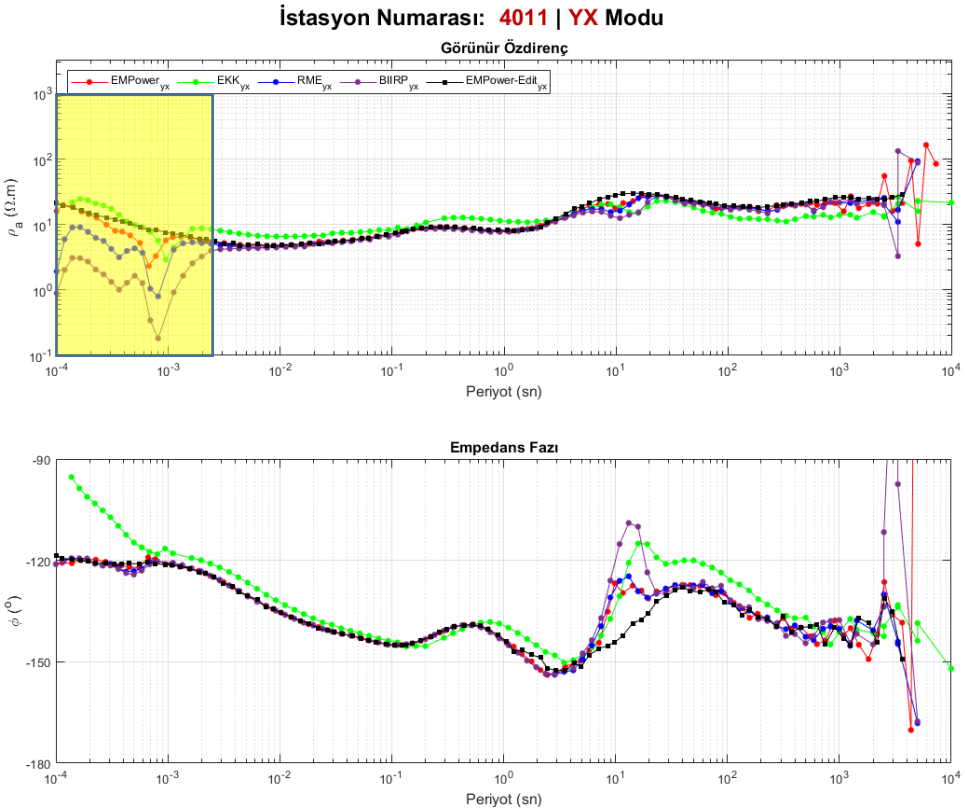
Şekil 5.25 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (2010 - YX)

4011 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.26**'da verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde yeşil dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda, BIRRP ve RME yönteminde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. Aynı alanda EMPower ve EKK sonuçlarında düşük miktarda saçılmalar mevcuttur. Grafikler incelendiğinde, bütün yöntemlerin birbiriyle örtüşen sonuçlar sunduğu anlaşılmaktadır. Kullanılan kestirim yöntemleri, genel olarak bütün periyotlar için başarılı bir çözüm gerçekleştirmiş ve xy modu için güvenilir sonuçlar vermiştir.

4011 numaralı istasyonun yx modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.27**'de verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde sarı dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda, BIRRP ve RME yönteminde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. Aynı alanda EMPower ve EKK sonuçlarında düşük miktarda saçılmalar mevcuttur. Grafikler incelendiğinde, bütün yöntemlerin birbiriyle örtüşen sonuçlar sunduğu anlaşılmaktadır. Kullanılan kestirim yöntemleri, genel olarak bütün periyotlar için başarılı bir çözüm gerçekleştirmiş ve yx modu için güvenilir sonuçlar vermiştir.



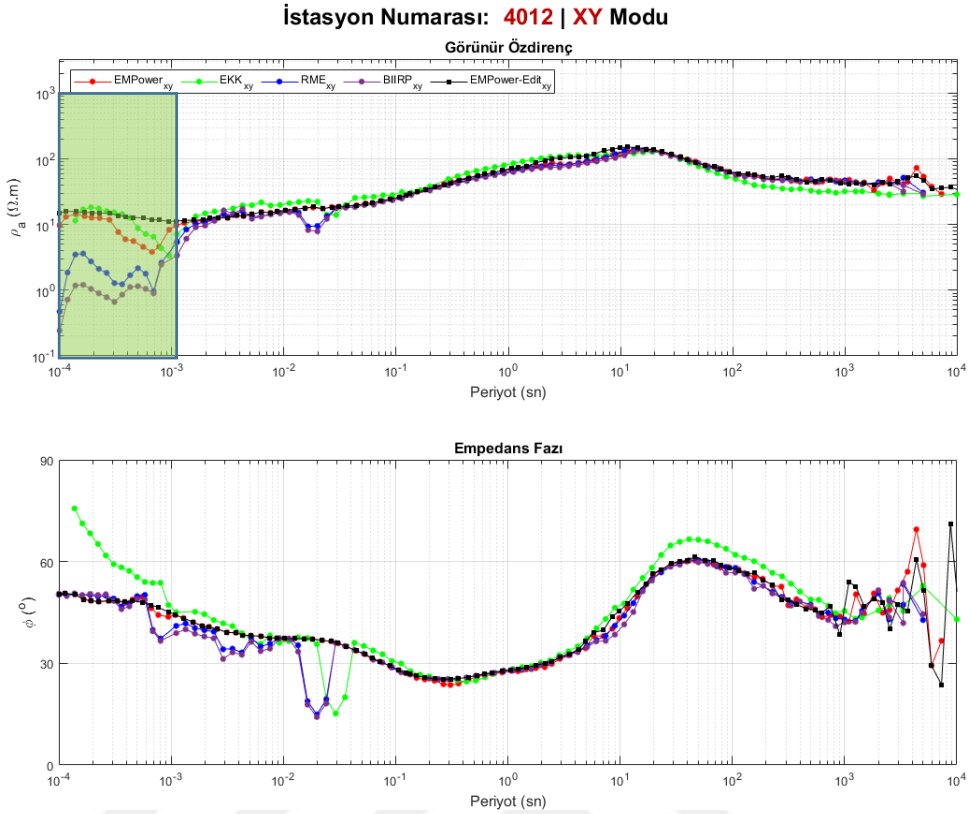
Şekil 5.26 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4011 - XY)



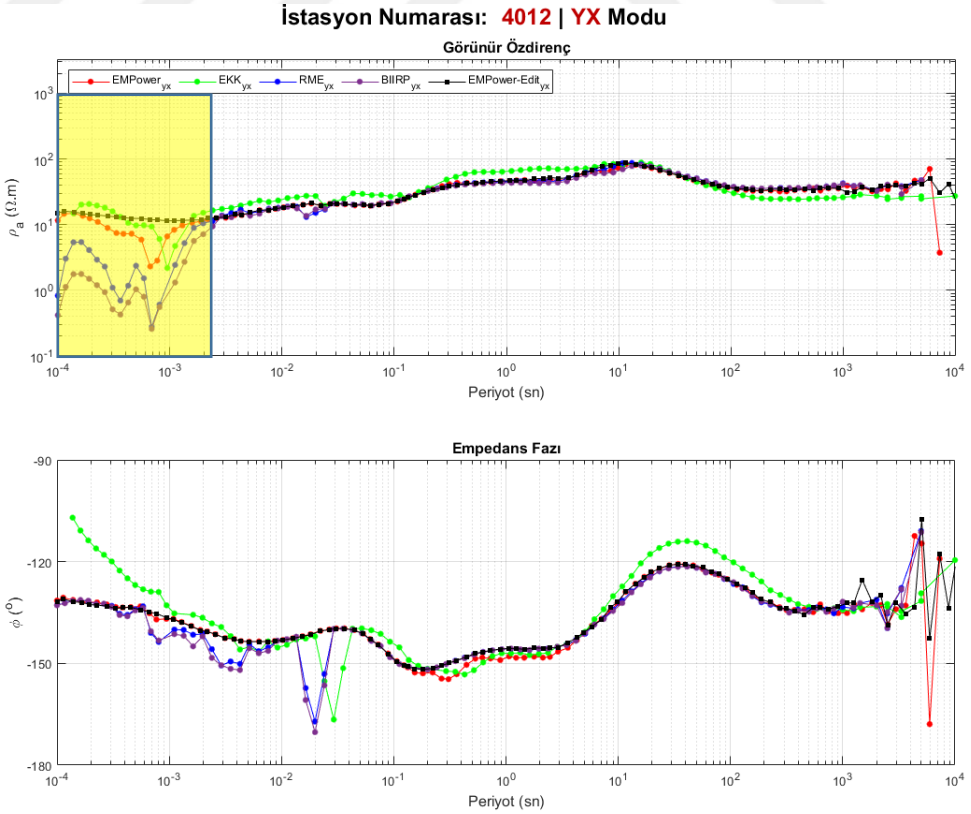
Şekil 5.27 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4011 - YX)

4012 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.28**'de verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde yeşil dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda, BIRRP ve RME yönteminde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. Aynı alanda EMPower ve EKK sonuçlarında düşük miktarda saçılmalar mevcuttur. Grafikler incelendiğinde, bütün yöntemlerin birbiriyle örtüşen sonuçlar sunduğu anlaşılmaktadır. Kullanılan kestirim yöntemleri, genel olarak bütün periyotlar için başarılı bir çözüm gerçekleştirmiş ve xy modu için güvenilir sonuçlar vermiştir.

4012 numaralı istasyonun yx modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.29**'da verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde sarı dikdörtgen ile taralı düşük periyotlarda, BIRRP ve RME yönteminde saçılmalar meydana geldiği görülmektedir. Aynı alanda EMPower ve EKK sonuçlarında düşük miktarda saçılmalar mevcuttur. Grafikler incelendiğinde, bütün yöntemlerin birbiriyle örtüşen sonuçlar sunduğu anlaşılmaktadır. Kullanılan kestirim yöntemleri, genel olarak bütün periyotlar için başarılı bir çözüm gerçekleştirmiş ve yx modu için güvenilir sonuçlar vermiştir.



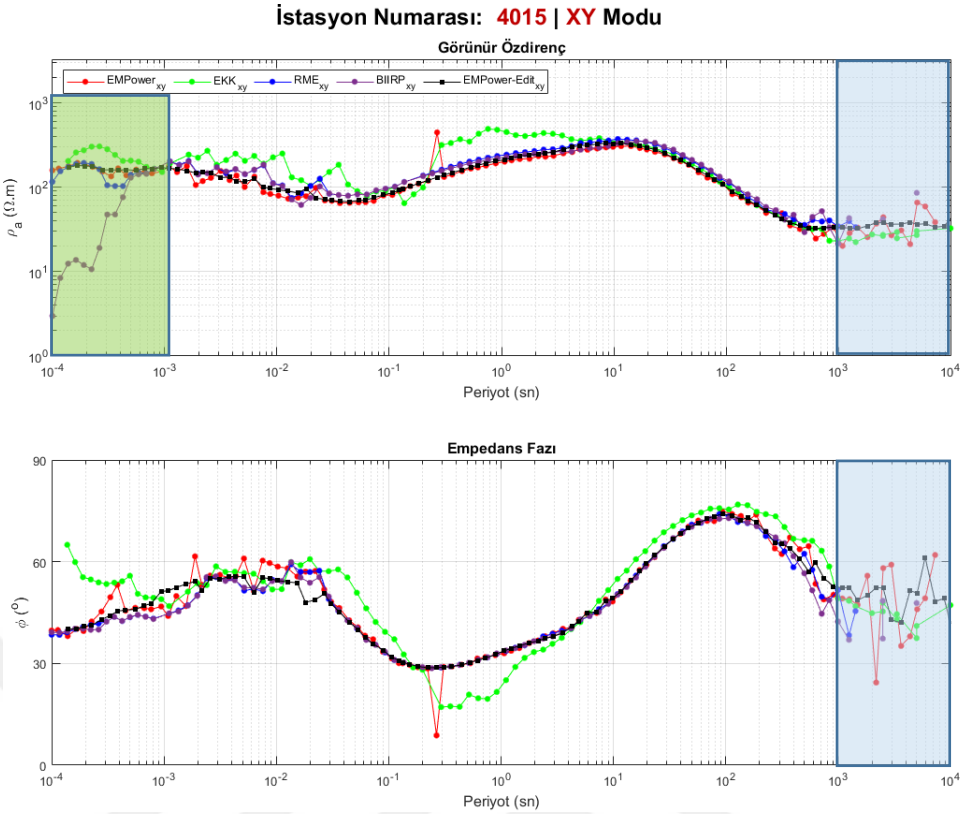
Şekil 5.28 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4012 - XY)



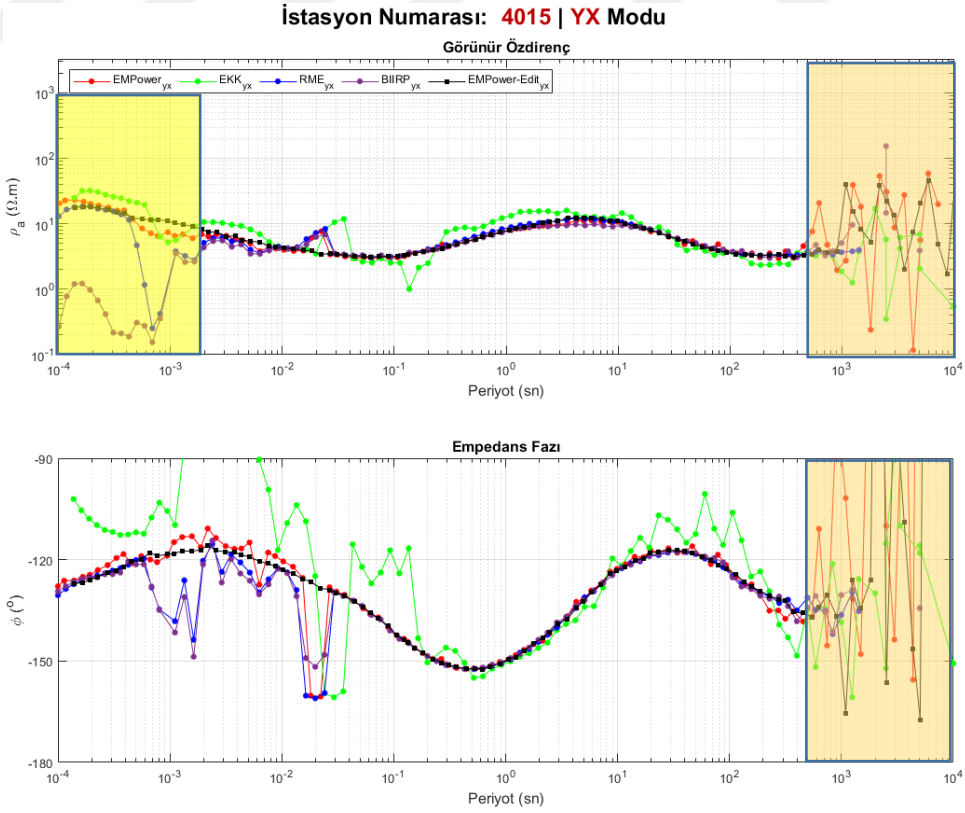
Şekil 5.29 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4012 - YX)

4015 numaralı istasyonun xy modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.30**'da verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde yeşil dikdörtgen ile düşük periyotlarda özellikle BIRRP yönteminde çok fazla saçılma olduğu görülmektedir. Diğer periyotlarda, EKK sonuçlarında bir miktar saçılma mevcut olsa da bütün yöntemler genel olarak benzer sonuçlar vermiştir. Yöntemlerin başarılı bir kestirim yaparak xy modu için güvenilir sonuçlar verdiği görülmektedir. Mavi dikdörtgenlerle taranmış uzun periyotlu alanda sonuçların saçılmasının nedeni; taralı alanda az sayıda veri bulunduğundan ötürü elle eleme aşamasında elenen her bir verinin, verinin genel davranışı üzerinde çok büyük bir etkisi olmasıdır.

4015 numaralı istasyonun yx modu için kestirim sonuçları **Şekil 5.31**'de verilmiştir. Görünür özdirenç grafiğinde sarı dikdörtgen ile düşük periyotlarda özellikle BIRRP yönteminde çok fazla saçılma olduğu görülmektedir. Diğer periyotlarda, EKK görünür özdirenç sonuçlarında bir miktar saçılma mevcuttur. EKK sonuçlarındaki saçılma, faz açısı grafiğinde daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Yöntemlerin başarılı bir kestirim yaparak yx modu için güvenilir sonuçlar verdiği görülmektedir. Turuncu dikdörtgenlerle taranmış uzun periyotlu alanda sonuçların saçılmasının nedeni; taralı alanda az sayıda veri bulunduğundan ötürü elle eleme aşamasında elenen her bir verinin, verinin genel davranışı üzerinde çok büyük bir etkisi olmasıdır. Düzenlenmiş EMPower sonuçlarında bir miktar düzelme olsa bile saçılmaların önüne tam olarak geçilememiştir.



Şekil 5.30 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4015 - XY)



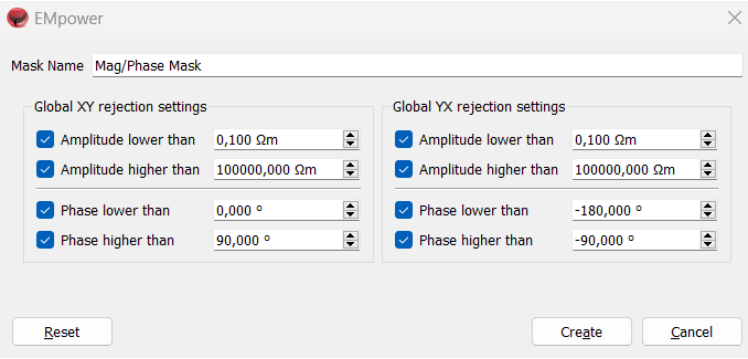
Şekil 5.31 Kestirim Sonuçlarının Kıyaslanması (4015 - YX)

6. KARARLI OTOMATİK KESTİRİM SONRASINDA YAPILABİLECEK İYİLEŞTİRMELER

Geçmişten günümüze, zaman serisi analizi geleneksel yöntemlere alternatif olabilmesi amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Bir önceki bölümde görüldüğü gibi; zaman serisi analizinde kullanılan otomatik kestirim yöntemleri, en iyi sonucun alınması için tek başına yeterli değildir. Veri kalitesini ve güvenilirliğini arttırabilmek amacıyla; ön-işlem süzgeçlerinin, elle eleme yönteminin de kullanılması gerekmektedir. EMPower yazılımı; genlik ve faz süzgeci, zaman maskesi gibi ön-seçim süzgeçlerine ve bunun yanı sıra elle eleme için kutup diyagramına sahip olduğundan, sözü edilen iyileştirme yöntemleri ilgili yazılım üzerinden anlatılmıştır.

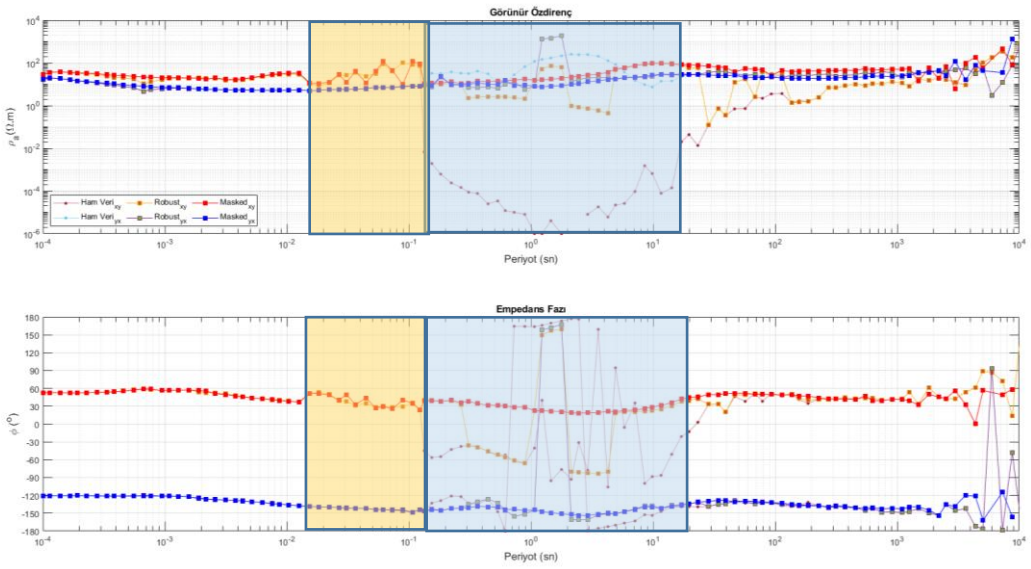
6.1 Genlik ve Faz Süzgeci

EMPower yazılımında, görünür özdirenç ve faz değerlerinin süzgeçlenmesi amacıyla kullanılan bir genlik ve faz süzgeci **Şekil 6.1**'de gösterilmiştir. Süzgeç, her bir FFT penceresinde bulunan xy ve yx verileri için aralık verilen görünür özdirenç genliği ve faz açısı değerlerinin dışındaki verilerin atılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, empedans ve dolayısıyla görünür özdirenç kestirim sonuçlarının daha iyi olmasını sağlamaktadır.



Şekil 6.1 EMPower- Genlik ve Faz Süzgeci

Genlik ve faz süzgecinin etkisinin görselleştirilmesi açısından; ham veri, kararlı otomatik kestirim uygulanmış veri ve süzgeçlenmiş verinin üst üste çizimi **Şekil 6.2**'de verilmiştir. Burada, ρ_a görünür özdirenci ve $\emptyset$ empedans fazını temsil etmektedir. Şekilde mavi dikdörtgenlerle taralı alanda net bir şekilde görüldüğü gibi; otomatik kestirim özellikle MT ölü bandındaki görünür özdirenç ve faz açısı grafiklerinde saçılmış verilerin etkisini büyük ölçüde giderse de tamamen düzeltememiştir. Ancak kullanılan genlik ve faz süzgeci bütün saçılmaları gidererek, kaliteli ve güvenilir bir veri kümesi vermiştir. Fakat turuncu dikdörtgenlerle taralı alan incelendiğinde; otomatik kestirim ve süzgecin buradaki saçılmanın önüne geçemediği görülmektedir. Yazılımların yetersiz kaldığı bu gibi alanlardaki saçılmaları düzenleyip veri kalitesini arttırabilmek amacıyla, elle veri eleme yöntemi uygulanmalıdır.

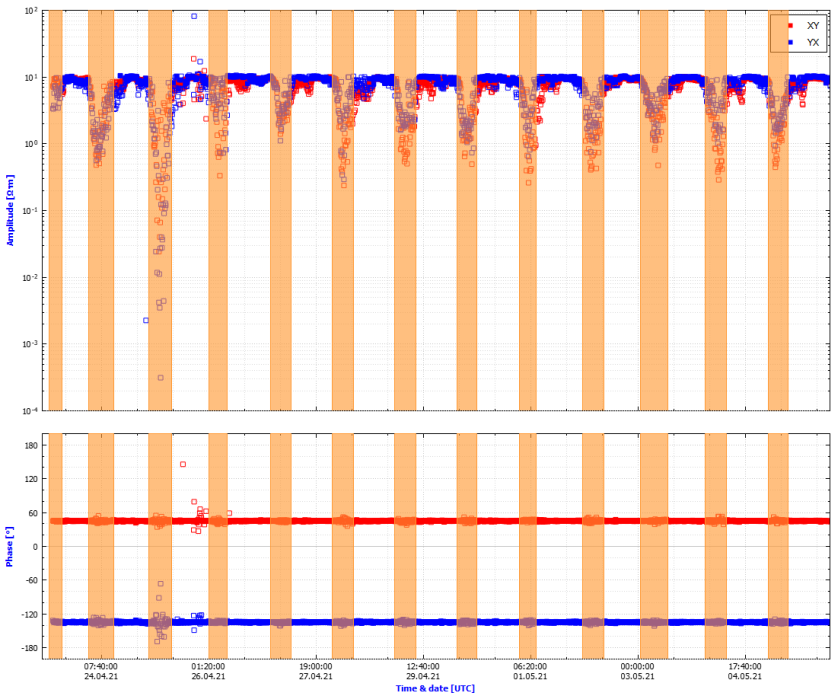


Şekil 6.2 Genlik ve Faz Süzgecinin Etkisi

Ayrıca, genlik ve faz süzgeci sadece belirli bir alan içindeki verileri işleme aldığından bazı durumlarda uzun periyotlardaki, başka bir deyişle alçak frekanslardaki verileri tamamen elemektedir. Jeofizik yöntemlerde uzun periyot ile derinlik bilgisi doğru orantılı olduğundan, derinlere doğru bilgi kaybı yaşanmasına yol açabilir. Derinlik bilgisini korumak ve yüksek periyotlardaki veri kaybını azaltmak amacıyla, bazı durumlarda kullanılmayabilir.

6.2 Zaman Maskesi

Sabit bir frekans için FFT penceresinin içinde bulunan görünür özdirenç genlik değerlerine bakıldığında, periyodik aralıklarla görünür özdirenç değerlerinin düştüğü görülmektedir. Örnek olarak bu duruma civarda elektrik gücüyle belirli saatler aralığında çalışan bir su pompası neden olabilir. Bu durum MT verilerinde sistematik gürültü olarak adlandırılır. MT verilerinde sistematik gürültülerin ayırt edilip veriden atılabilmesi için, veri kalitesine negatif etkide bulunan zaman dilimleri atılır. **Şekil 6.3**'te turuncu renkle taralı alanın içinde bulunan bütün verileri atan zaman maskeleri görülmektedir.



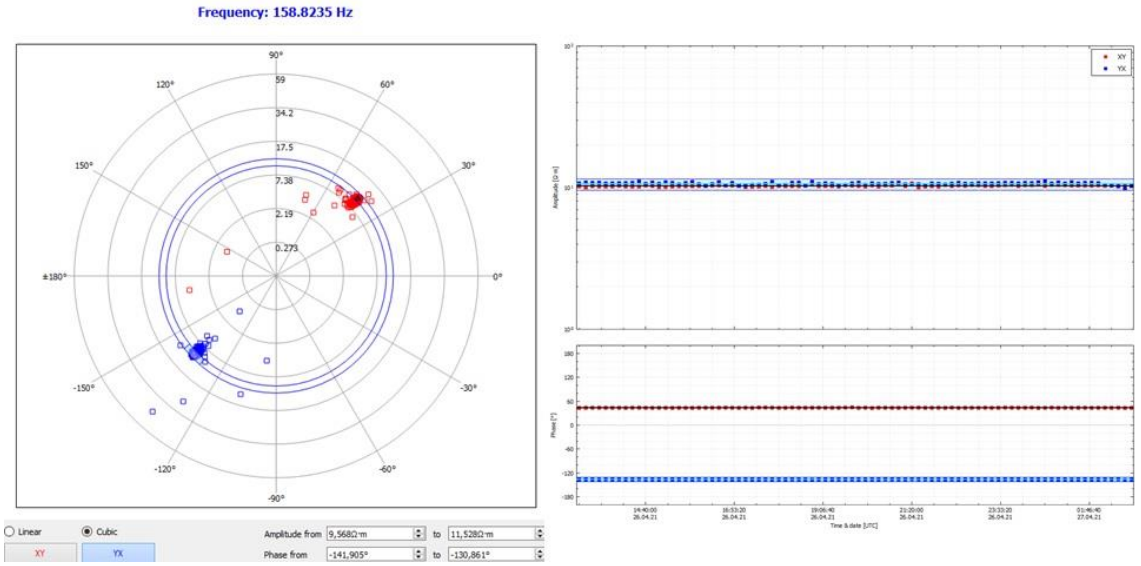
Şekil 6.3 Zaman Maskesinin Uygulanışı

Ancak, genlik ve faz süzgeci kullanıldığında görünür özdirenç değerlerinde bir alt ve üst limit olduğundan, periyodik aralıklarla değerlerin düştüğü yerler süzgeçlenir. Bu nedenle genlik ve faz süzgecinin ardından kullanılan zaman maskesinin veri üzerine çok bir etkisi olmamaktadır. Derinden gelen verilerin korunması amacıyla genlik ve faz süzgeci kullanımından kaçınılsa da zaman maskesi daha etkili bir sonuç verecektir. Ayrıca uzun

periyot MT çalışmalarında kablo kopması, olumsuz hava koşulları gibi veri kalitesini olumsuz etkileyebilecek olayların yaşandığı zaman aralığını maskeleme amacıyla kullanılması tercih edilir.

6.3 Kutup Diyagramı

Kutup diyagramında her bir frekans değerine karşılık gelen veriler, artan özdirenç değerlerine göre orijinden uzaklaşan bir konumda sahip oldukları fazın derecesine göre kutupsal koordinat sistemi üzerine açısal olarak dağılmaktadırlar (**Şekil 6.4**). Genlik ve faz süzgeci, zaman maskesiyle birlikte kullanılabileceği gibi, duyarlı bir veri işlem süreci için tek başına da kullanılabilir. Genlik ve faz süzgeci kullanıldığında, süzgeçte kullanılan değerler kutup diyagramının doğal sınırlarını belirler. İnteraktif kutup diyagramı; xy ve yx modlarında her bir frekans değeri için veri elemeye olanak tanır.

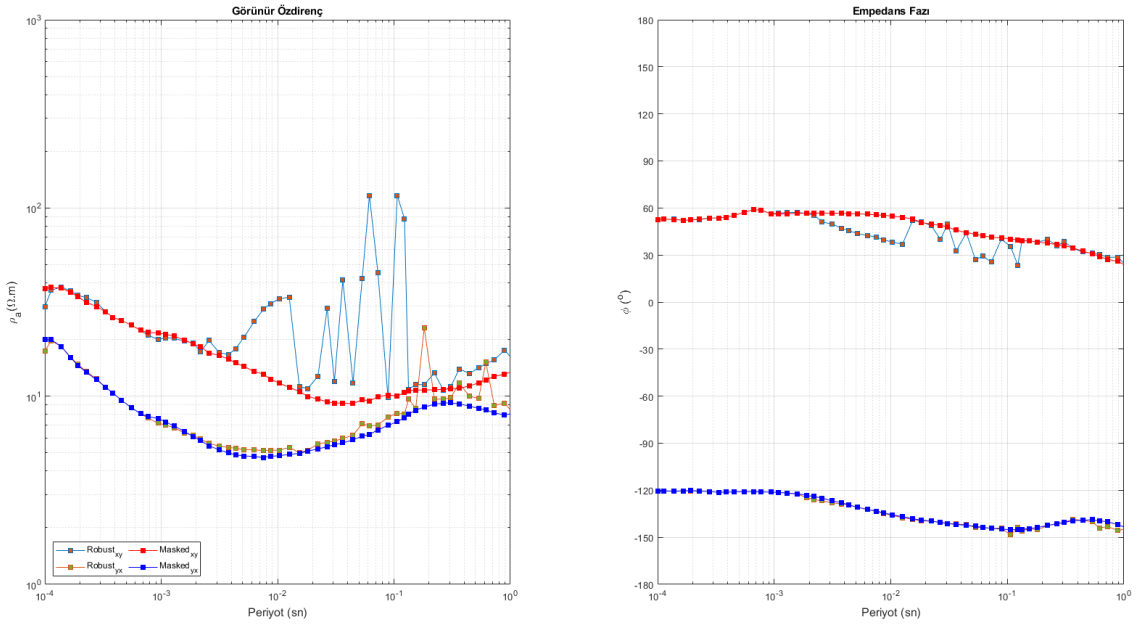


Şekil 6.4 Kutup Diyagramı

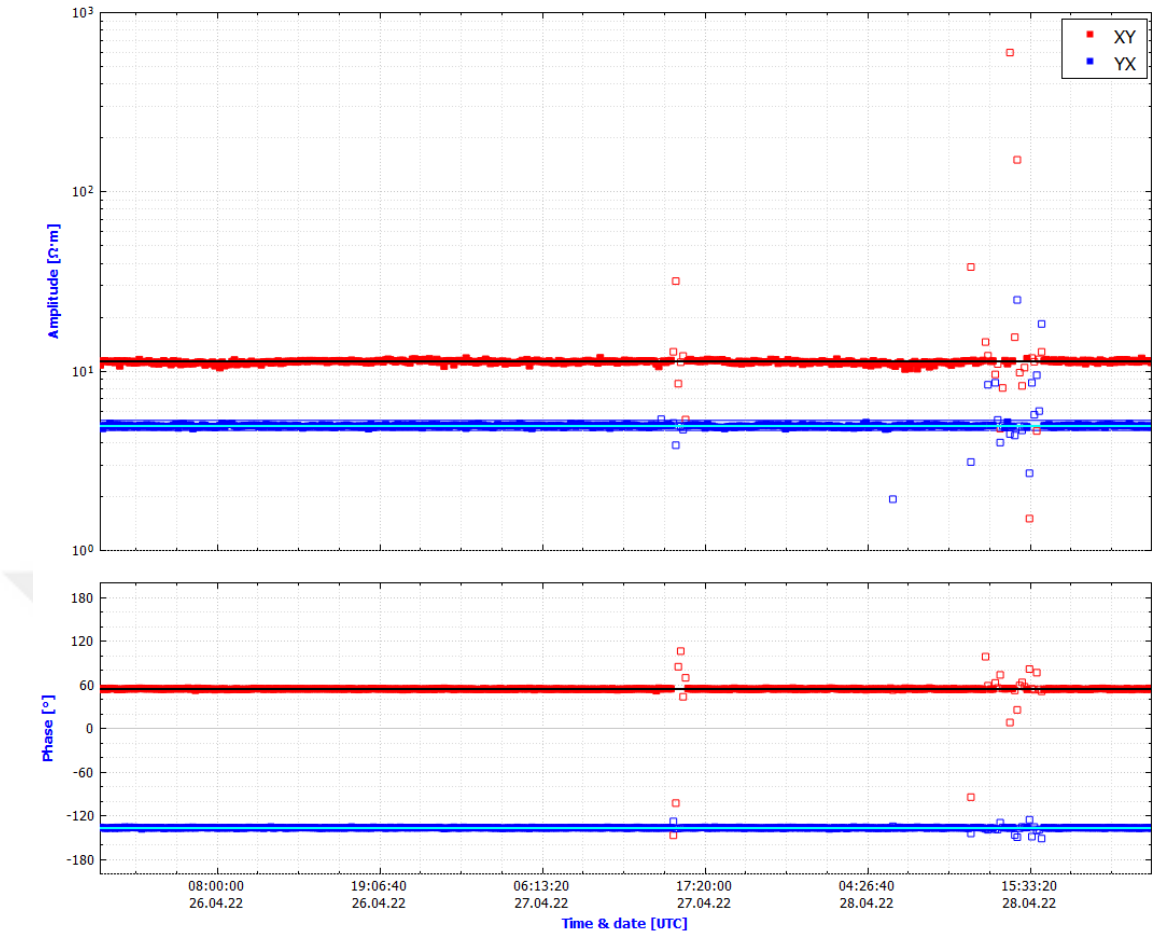
Kutup diyagramı üzerinde görünür özdirenç aralığı ve empedans fazı açısı interaktif seçim pencereleriyle belirlenebilmektedir. Taralı alanın dışında kalan bütün veriler elenmektedir. Kutup diyagramı üzerinden seçim aralıkları ve seçilen veri kümesi ile bu seçimin görünür özdirenç ve faz açısı değerleri üzerine olan etkisi **Şekil 6.4**'te

gösterilmiştir. Örnek olarak yaklaşık 158 Hz'te bulunan veri kümesi gösterilmiştir. Bu araç ile ters çözüm işlemi için hazırlanan veri kümesi duyarlılıkla seçilmektedir.

Kutup diyagramında elle eleme yapılarak, her bir FFT penceresindeki saçılmış verilerin ilgili frekanstaki verilerin temsil ettiği görünür özdirenç ve empedans faz açısı değerlerine ve bütün verinin trendine olan etkisi oldukça azaltılmaktadır. Bu işlem sonucunda 10^{-4}sn ile 1sn aralığındaki periyotlarda saçılmış verilerin etkisinin nasıl giderildiğini görselleştirebilmek amacıyla; elle eleme sonucu elde edilen görünür özdirenç ve empedans fazı açısı grafikleri **Şekil 6.5**'te verilmiştir. Bu veri kümesi, bölüm 4.2.1'de sözü edilen ve **Şekil 4.8**'de gösterilen; otomatik kararlı kestirim çözümlerinin başarısız olduğu frekans aralığındaki sapma etkisinin anlatıldığı veri kümesiyle aynıdır ve elle eleme yapılarak xy modunda bariz bir şekilde görülse de her iki modda da bütün saçılmalar giderilmiş ve güvenilir bir çözüm elde edilmiştir. Kıyaslama ve anlaşılabilirlik açısından Şekil 4.8'de örnek olarak konulan 79Hz frekansındaki çapraz güçlerin, elle eleme yapıldıktan sonraki çapraz güçlerin ortalama değerleri **Şekil 6.6**'da verilmiştir. Bu durum, elle elemenin güvenilir bir MT veri kümesi oluşturabilmek için önemini kanıtlar niteliktedir.



Şekil 6.5 Kutup Diyagramı ile Saçılmaların Giderilmesi

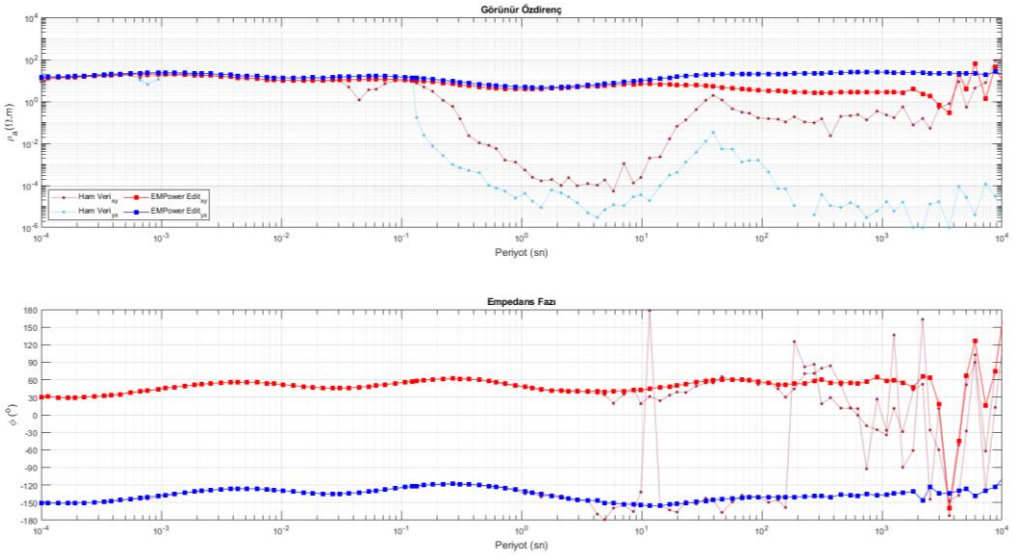


Şekil 6.6 Ortalama Çapraz Güçlerdeki Kaldıraç Noktalarının Etkisinin Giderilmesi

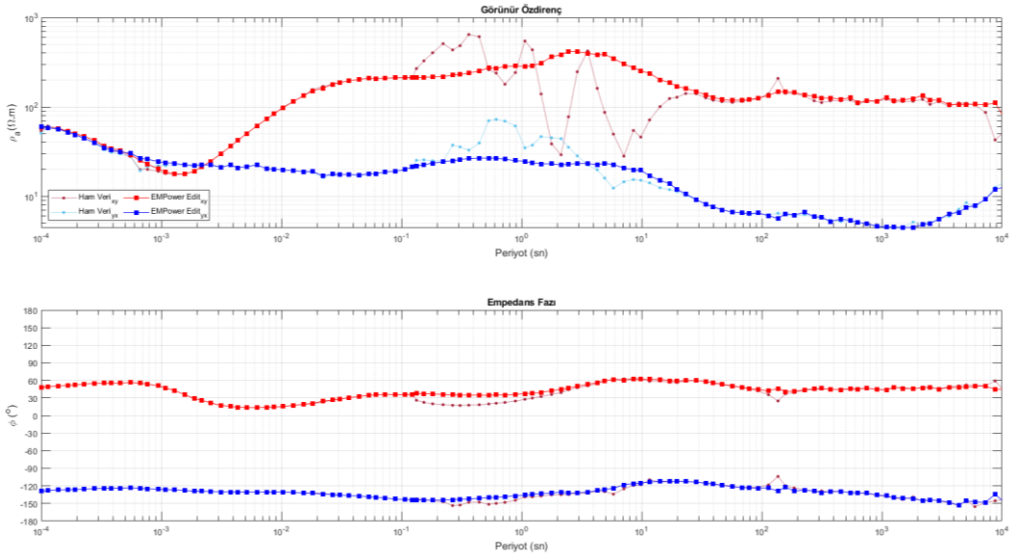
6.4 MT Zaman Serisi Analizi Sonucu

Veri kalitesini ve güvenilirliğini arttırabilmek amacıyla; ön-işlem süzgeçlerinin, elle eleme yönteminin de kullanılması gerekmektedir. Empedans kestirim yöntemlerinin kıyaslandığı başlıkta, düzenlemeleri yapılmış veriler siyah renkle çizdirilmişti. Çalışmanın bu kısmında ise önceki bölümde kullanılan istasyonlar için (1004, 1005, 1006, 1012, 2005, 2010, 4011, 4012 ve 4015) EMPower yazılımında duyarlılıkla düzenlemeleri yapılarak işlenmiş ve zaman serisi analizi tamamlanarak güvenilir sonuçlar elde edilmiş MT verilerinin ham veri ile üst üste çizimleri izleyen sırada **Şekil 6.7**, **Şekil 6.8**, **Şekil 6.9**, **Şekil 6.10**, **Şekil 6.11**, **Şekil 6.12**, **Şekil 6.13**, **Şekil 6.14** ve **Şekil 6.15**'te verilmiştir. 1004 numaralı istasyonun xy, 4015 numaralı istasyonun yx modlarında uzun periyotlardaki veriler saçılmalardan ötürü güvenli değildir. Bunun dışındaki bütün

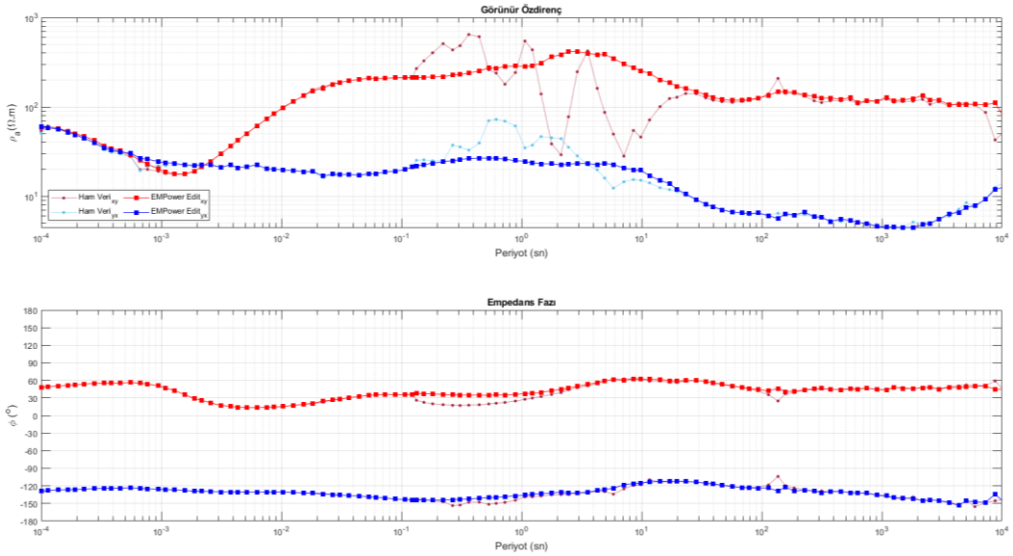
istasyonlarda; özellikle MT "ölü bölgesi" ve uzun periyotlarda görülen bütün saçılmalar giderilmiştir. Bütün periyot değerleri için frekans ortamında sağlıklı ve güvenilir MT veri kümeleri oluşturulmuştur.



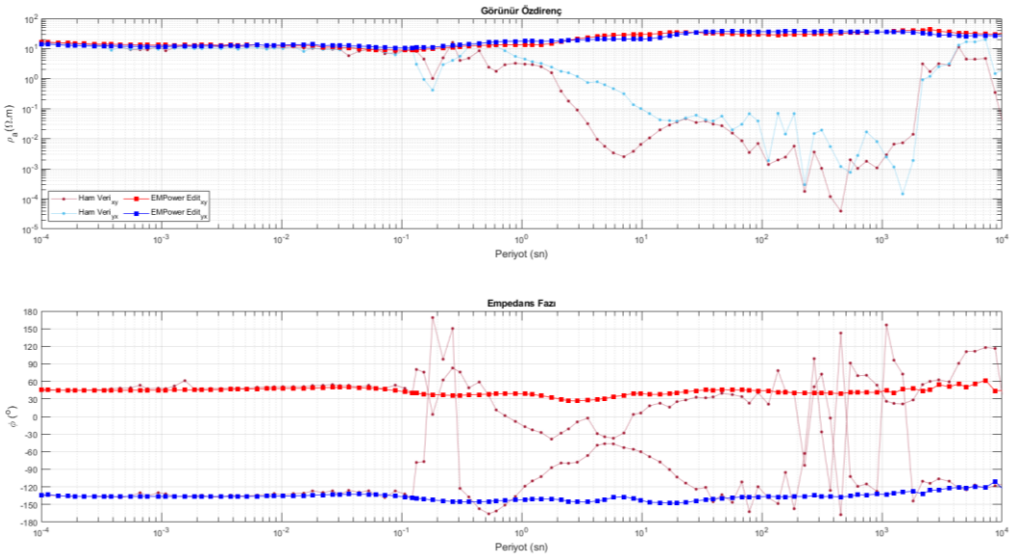
Şekil 6.7 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (1004)



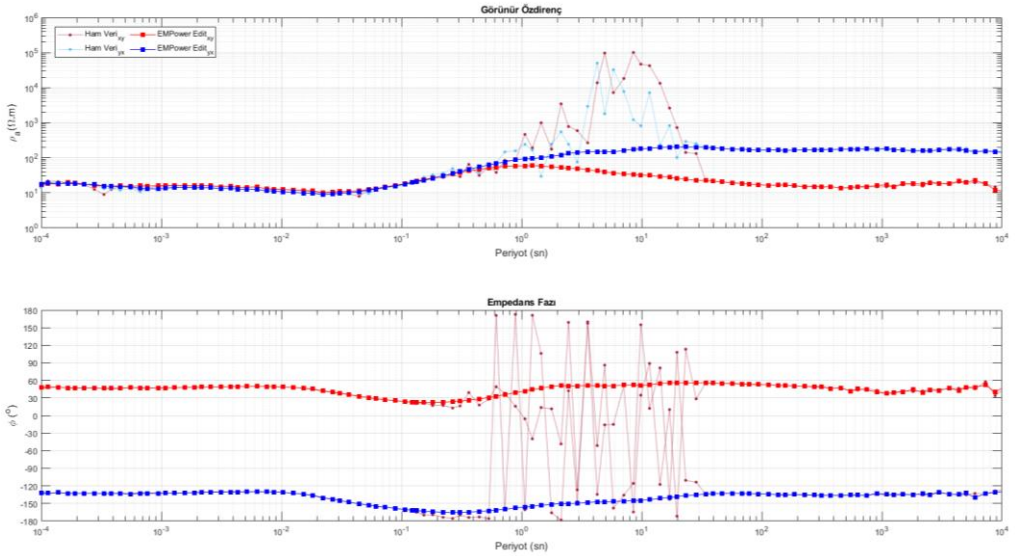
Şekil 6.8 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (1005)



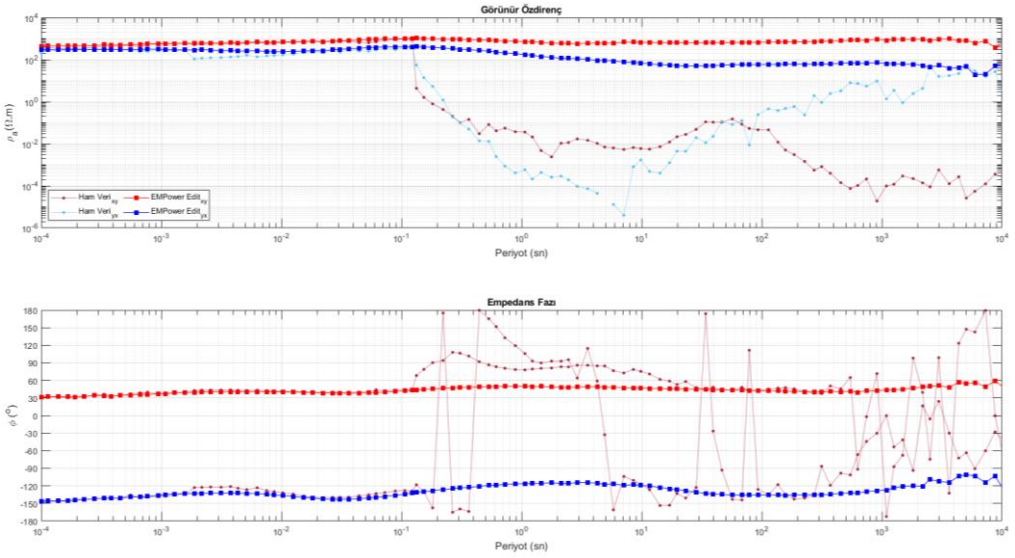
Şekil 6.9 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (1006)



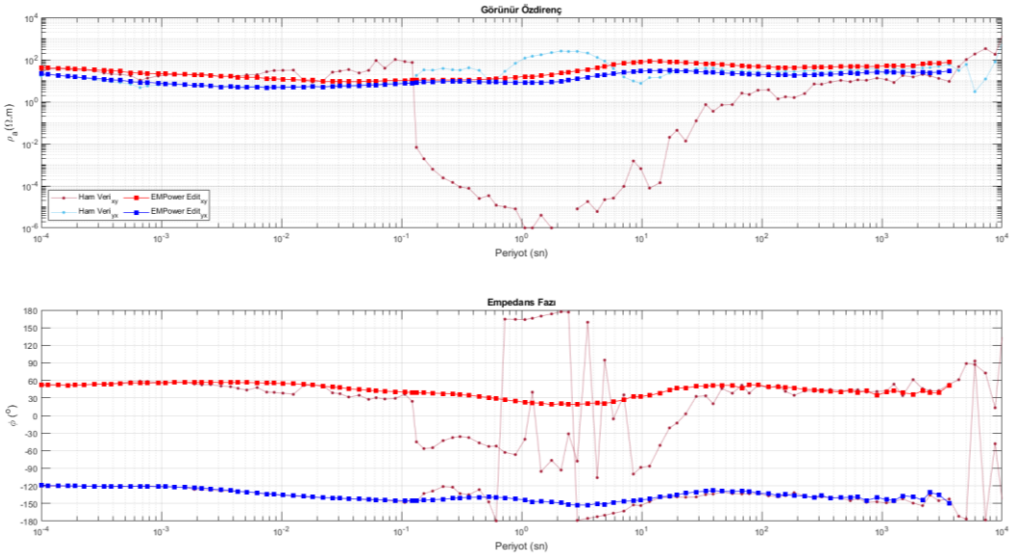
Şekil 6.10 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (1012)



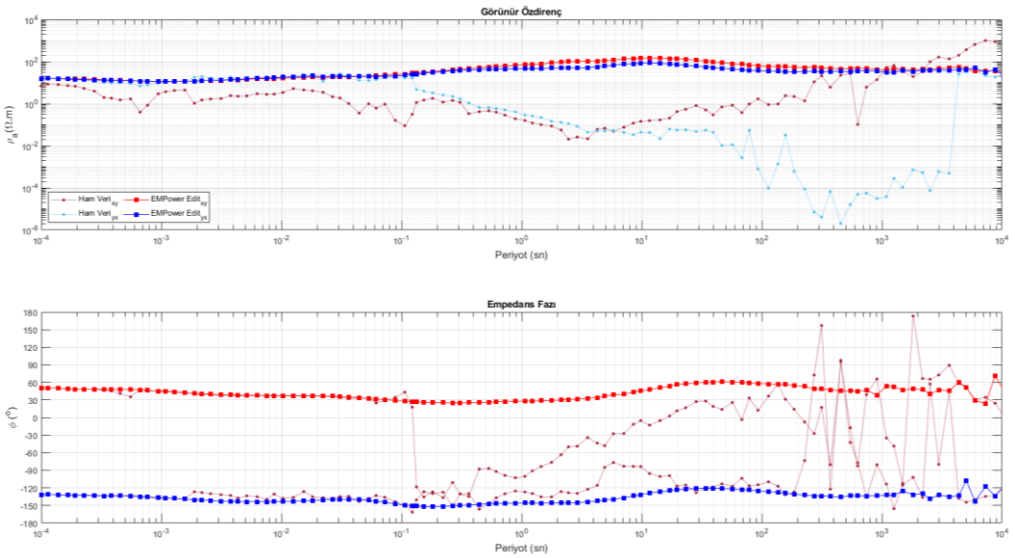
Şekil 6.11 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (2005)



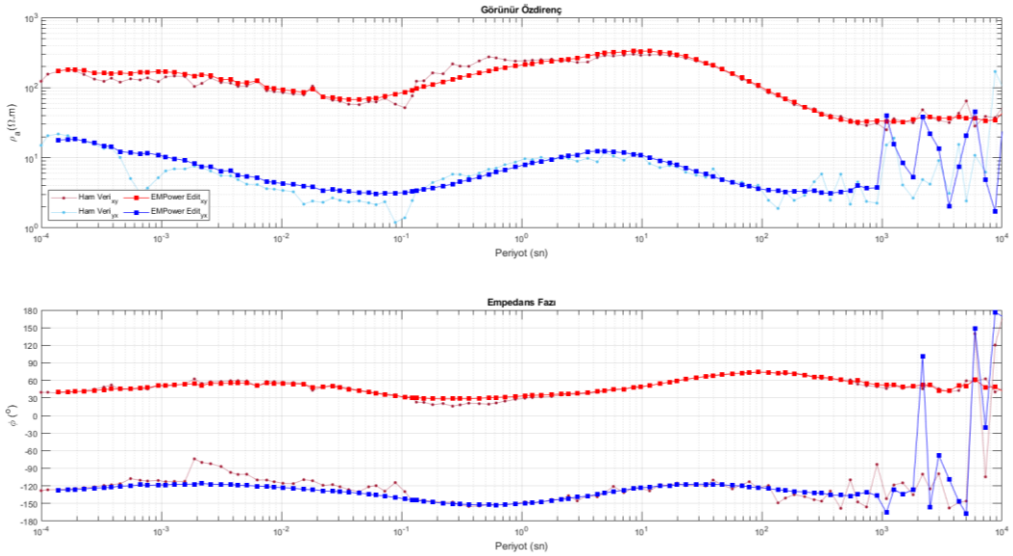
Şekil 6.12 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (2010)



Şekil 6.13 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (4011)



Şekil 6.14 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (4012)



Şekil 6.15 Düzenlenmiş Veri ile Ham Verinin Kıyaslanması (4015)

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada; çevresel gürültülerin, operatör hatalarının, mevsimsel etkiler gibi etkenlerin toplanan MT zaman serisi verilerinin kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri gösterilmiştir. Jeofizik yorumun tutarlı olması ve gerçek jeolojiyle örtüşebilmesi için veri toplama ve veri-işlem adımlarında dikkat edilmesi gereken hususlar ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Birbirinden farklı kestirim yöntemlerinin dokuz adet MT istasyonunda toplanan zaman serisi verileri için otomatik kullanımı, Razorback kütüphanesi ve EMPower yazılımı aracılığıyla elde edilen sonuçlar üzerinden karşılaştırılmıştır.

EKK kestiriminde saçılmış veriler, verinin genel davranışı üzerinde çok etkili olduğundan ciddi bir şekilde yanıltıcı sonuçlar vermiştir. Zaman serisi analizi yapılmış istasyonların neredeyse hepsinde, sağlıklı bir jeofizik yorum için güvenilir bir veri kümesi sunamamıştır. Bu durum, zaman serisi analizi geleneksel EKK kestirimine neden alternatif arandığını hatırlatıcı niteliktedir.

Sığ yüzeyi temsil eden 10^{-4}sn ile 10^{-3}sn, başka bir deyişle 0,0001sn ile 0,001sn aralığını kapsayan kısa periyotlarda; Razorback kütüphanesindeki RME ve BIRRP kestirimleri ile EMPower yazılımında kullanılan SSWCD kestirim yöntemi karşılaştırıldığında, BIRRP kestiriminde çok daha fazla olsa da RME ve BIRRP kestirimlerinde verinin genel davranışına aykırı saçılmalar mevcutken, SSWCD ile güvenilir sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu çalışma kapsamında, bütün karşılaştırmalar 72 saatlik kesintisiz MT zaman serisi verileri üzerinden yapılmıştır. MT verileri yüksek frekanslar ($f > 1$Hz) için iç kaynakları kullandığından, 72 saat içerisinde meydana gelen yüzlerce hava olayı, bu periyotlarda RME ve BIRRP yöntemlerinde bozucu etkilere neden olduğundan, verinin genel davranışına aykırı çözümler üreterek yanıltıcı sonuçlar üretmiştir.

Gürültü ve operasyonel hatalardan en az düzeyde etkilenmiş ideal koşullarda toplanan MT zaman serisi verilerinin analizinde, RME ve BIRRP kestirimleri 10^{-3}sn ile yaklaşık olarak 3.000sn aralığını kapsayan periyotlarda birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. İlgili periyot aralığında SSWCD sonuçları da RME ve BIRRP kestirim

yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Yöntemler güvenilir bir veri kümesi sunmuşlardır. Ancak bir miktar gürültü içeren 1006 numaralı istasyonun yx bileşeni çözümünde (**Şekil 5.19**) mavi dikdörtgen ile taralı alanda, RME ve BIRRP otomatik kestirimlerinin SSWCD otomatik kestiriminden daha güvenilir bir sonuç ürettiği görülmektedir.

Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde bütün otomatik kestirim yöntemlerinin yaklaşık 1-100Hz frekansları aralığındaki verinin genel davranışına aykırı bozucu etkileri gideremediği ve güvenilir bir çözüm üretemediği, fakat elle elemesi yapılan sonuçlarda sözü edilen bozucu etkilerin giderildiği net bir şekilde görülmektedir. Sözü edilen durum **Şekil 6.5**'te açıkça gösterilmiştir. Bu durum sağlıklı ve güvenilir bir MT zaman serisi veri kümesi oluşturabilmek için, elle eleme yönteminin günümüzde halen çok önemli olduğunu kanıtlar niteliktedir.

RME ve BIRRP yöntemleri yaklaşık 4.000sn'lik uzun periyotlara kadar bir çözüm sağlarken, SSWCD çoğu istasyon için yaklaşık 10.000sn'lik uzun periyot bilgilerini de koruyarak çözüm yapmayı başarmıştır. Bütün yöntemlerde yaklaşık 2.000sn ve üzerindeki uzun periyotlarda, verinin genel davranışına aykırı saçılmaların (**Şekil 5.20**, **Şekil 5.24**, **Şekil 5.25**, **Şekil 5.26**, **Şekil 5.27**, **Şekil 5.30**) artmasının nedeni birkaç şekilde açıklanabilir. Bütün jeofizik yöntemlerde; frekans azaldıkça yani periyot uzadıkça bilgi alınan derinlik artmaktadır. Jeofizik yöntemlerin en büyük zayıflığı, derinlik arttıkça sinyal genliğinin azalmasından kaynaklı yaşanan çözünürlük kaybıdır. Sinyal genliğinin azalması sinyal/gürültü oranının düşmesine neden olduğundan, uzun periyot verileri gürültülerden daha çok etkilenmektedir. Ayrıca periyot süresi ile toplanan veri sayısı ters orantılı olduğundan, otomatik kestirim sırasında elenen her bir veri, verinin genel davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Ancak bütün bu dezavantajlara rağmen, ideal koşullarda toplanan MT zaman serisi verilerinin analizinde kullanılan kestirim yöntemleri uzun periyotlarda birbirlerine oldukça yakın ve güvenilir sonuçlar üretmiştir.

Kullanılan otomatik kestirim yöntemleri; kısa ve uzun periyotlarda olduğu gibi, gürültüden etkilenen istasyonlarda özel ya da geniş bir aralığı kapsayan periyot

değerlerinde verinin genel davranışına aykırı saçılmaların önüne tamamen geçememiştir. Sözü edilen duruma örnek olarak **Şekil 5.16**, **Şekil 5.17**, **Şekil 5.18**, **Şekil 5.19**, **Şekil 5.21**, **Şekil 5.24**'te gösterilen görünür özdirenç ve faz açısı grafikleri verilebilir. İlgili grafiklerde otomatik kestirim sonuçları, siyah çizgi ve karelerle temsil edilen, duyarlılıkla düzenlenen SSWCD sonuçlarıyla kıyaslandığında bu durum açık bir şekilde görülmektedir. MT zaman serisi verilerinin analizinde kullanılan otomatik kestirim yöntemlerinin sağlıklı bir jeofizik yorum için güvenilir veri kümesi oluşturulması açısından tek başına yeterli olmadığı açıkça görülmektedir.

Otomatik kestirim sonuçlarının kalitesini arttırmak amacıyla birkaç farklı yol izlenebilir. Çalışmada bütün karşılaştırmalar 72 saatlik kesintisiz MT zaman serisi verileri üzerinden yapıldığından, 72 saat içerisinde meydana gelen yüzlerce hava olayının ilgili periyotlardaki bozucu etkisi açıkça görülmektedir. Bazı çalışmalar, özellikle yüksek frekanstaki MT zaman serisi verilerinin kalitesinin gece saatlerinde arttığını göstermektedir (Garcia ve Jones, 2005, 2008). Veri kalitesini arttırmak amacıyla farklı uzunluklardaki MT zaman serisi verileri birlikte kullanılabilir. Örneğin, MT istasyonundaki ölçü süresi arttığında yüksek frekanslarda çok fazla veri olacaktır. Zaman serisi analizi için düşük frekanslar için bütün veri kümesi kullanılırken, yüksek frekanslar için gece saatlerinden birkaç dakikalık kesitler birleştirilebilir. Farklı uzunluktaki veri kümelerinin birleşiminden elde edilen otomatik kestirim sonuçları, kesintisiz veri kümesinden üretilen sonuçlardan daha iyi olabilir. Buna ek olarak, yöntemlerin birbirine göre üstün ve zayıf yönleri göz önünde bulundurularak melez bir kullanım gerçekleştirilebilir.

İdeal bir MT ölçüsü için her zaman uygun koşullar oluşmayabilir ve MT zaman serisi verileri bozucu etkilere maruz kalabilir. MT verileri bu etkilerden duyarlı bir veri-işlem zinciri ile arındırılmaz ise ters çözüm sonucu elde edilen model gerçek jeolojiyi temsil etmeyecektir. Dolayısıyla jeofizik yorumun yanlış yapılmasına neden olacaktır. Bu sebepten, MT zaman serisi verilerinin analizi sağlıklı ve tutarlı bir jeofizik yorum için çok önemlidir.

KAYNAKLAR

Boerner, D., Kurtz, R. ve Craven, J., 1993. Orthogonality in CSAMT and MT measurements, Geophysics, 58, 924–934.

Bostick, F.X., Smith, H.W., 1979. Development of real-time, on-site methods for analysis and inversion of tensor magnetotelluric data, report, Electr. Geophys. Res. Lab., Univ] Tax. at Austin.

Cagniard L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, Geophysics, V.18, P. 605-635.

Candansayar, M.E., 2008. Two-dimensional inversion of magnetotelluric data with consecutive use of conjugate gradient and least-squares solution with singular value decomposition algorithms. Geophys. Prospect. 56, 141–157.

Candansayar, M. E., Kaya, C., Dikmen, Ü., 2010. "Crustal structure of Northwestern Turkey, revealed by magnetotelluric surveys with the help of Seismology, Gravity and Magnetic Data". IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop Abstract, Giza, Egypt, September 18-24.

Carbonari, R., Maio, R. D., Piegari, E., D'auria, L., Esposito, A., Petrillo, Z., 2018. Filtering of noisy magnetotelluric signals by SOM neural networks, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 285, 12-22.

Chave, A. D., Thomson, D. J., Ander, M. E., 1987. On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions, Journal of Geophysical Research, 92, B1, 633-648

Chave, A. D., Thomson, D. J., 1989. Some comments on magnetotelluric response function estimation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94. 14215-14225.

Chave, A. D., Smith, J. T., 1994. On electric and magnetic galvanic distortion tensor decomposition, J. Geophys. Res., 99, 4669 – 4682.

Chave, A.D., and Thomson,D. J., 2003. A bounded influence regression estimator based on the statistics of the hat matrix. J. R. Stat. Soc. Ser. C Appl. Stat. 52, 307–322.

Chave, Alan D., Thomson, David J., 2004. Bounded influence magnetotelluric response function estimation. Geophysical Journal International, 157 (3). 988-1006.

Chave, A. D., Jones, A. G., 2012. The Magnetotelluric Method: Theory and Practice. Cambridge: Cambridge University Press.

Chen, H., Guo, R., Liu, J., Wang, Y., Lin, R., 2020. Magnetotelluric data denoising with recurrent neural network, Society of Exploration Geophysicists.

Egbert, G., Booker, J., R., 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions, Geophysical Journal International, 87, 173-194.

Egbert G., Livelybrooks, W., 1996. "Single station magnetotelluric impedance estimation: Coherence weighting and the regression Mestimate," Geophysics, vol. 61, no. 4, pp. 964–970.

Egbert, G., 1997. Robust multiple-station magnetotelluric data processing, Geophysical Journal International, 130, 475-496.

Egbert, G., 2021. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics 2nd Edition, ENCYCLOPEDIA OF EARTH SCIENCES SERIES, Springer, 1036-1042.

Erdoğan, E. 2018. Gediz Grabeni Jeotermal Yapısının Manyetotellürik Verilerin 2B ve 3B Ters Çözümü ile Araştırılması. 12-17.(Doktora Tezi, Yayınlanmamış).

Gamble T. D., 1978. "Magnetotellurics with a remote reference," Geophysics, vol. 81, no. 1, pp. 87–94.

Gamble, T. D., Clarke, J., Goubau, W. M., 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference, Geophysics, 44, 53-68

Garcia, X., Chave, A.D., Jones, A.G., 1997. Robust Processing of Magnetotelluric Data from the Auroral Zone, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 49,1451-1468.

Garcia, X., Jones, A. G., 2005. Electromagnetic image of the Trans-Hudson orogen THO94 transect. Canadian Journal of Earth Sciences, 42 (4). 479-493.

Garcia, X., Jones, A. G., 2008. Robust processing of magnetotelluric data in the AMT dead band using the continuous wavelet transform. Geophysics, 73.

Huber, P.J., 1967. The behavior of maximum likelihood estimates under nonstandard conditions. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1, 221-233.

Jenkins, G. ve Watts, D., 1968. Spectral Analysis and Its Applications, Holden-Day, San Francisco.

Jones, A.G., ve Jödicke, H., 1984. Magnetotelluric transfer function estimation improvement by a coherence-based rejection technique. Seg Technical Program Expanded Abstracts.

Jones, A. G. et al, 1989. A comparison of techniques for magnetotelluric response function estimation, J. Geophys. Res., 94, 14,201 – 14,214.

Kao, Dominic W., Rankin, David, 1977. Enhancement Of Sıgnal-To-Noıse Ratıo In Magnetotellurıc Data. Geophysics, 42.

Larsen, J.C., 1989. Transfer functions: smooth robust estimates by least-squares and remote reference methods, Geophysics Journal International, 99, 645-663.

Larsen, J. C. et al, 1996. Robust smooth magnetotelluric transfer functions, Geophysical Journal International, 124, 3, 801–819.

Manoj, C., Nagarajan, N., 2003. The application of artifical neural networks to magnetotelluric time-series analysis, Geophysics Journal International, 153, 409-423.

Muñoz, G., 2014. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods. Surveys in Geophysics, 35, 101–122.

Orange, A.S., 1989. Magnetotelluric exploration for hydrocarbons. Proceedings of the IEEE, 77. 287-317.

Özürlan, G., Ulugergerli, E., 2005. Jeofizik Mühendisliğinde Elektromanyetik Yöntemler, Birsen Yayınevi.

Schmucker, U., 1970. Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern united states, in Bull. Scripps Inst. Oceanogr., 13, 1–165.

Shlykov, A., 2023. ElectroMagnetic Processor (EMP) Software, Version: 1.04, Web Sitesi: https://www.csrmt.info. (https://www.csrmt.info/csrmt-main-eng) Erişim Tarihi: 12.03.2023

Sims, W. E., Bostick, F. X., Smith, H. W., 1971. The Estımatıon Of Magnetotellurıc Impedance Tensor Elements From Measured Data. Geophysics, 36 (5). 938-942.

Smaï, F., Wawrzyniak, P., 2020. Razorback, an Open Source Python Library for Robust Processing of Magnetotelluric Data. Frontiers in Earth Science, Vol. 8.

Smirnov, M. Y., 2010. "Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point," Geophysical Journal International, vol. 152, no. 1, pp. 1–7.

Siscoe, G. L., McPherron, R. L., Jordanova, V. K. (2005) Diminished contribution of ram pressure toDstduring magnetic storms. Journal of Geophysical Research, 110.

Stanley, William D., Mooney, Walter D., Fuis, Gary S., 1990. Deep crustal structure of the Cascade Range and surrounding regions from seismic refraction and magnetotelluric data. Journal of Geophysical Research, 95.

Stodt, J A., 1983. Bias removal for conventional magnetotelluric data. Utah Univ., Salt Lake City (USA). Earth Science Lab.

Stodt, J.A., 1986. Weighted averaging and coherence sorting for leastsquares magnetotel]uric estimates, paper presented at Eigth Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth and Moon, sponsor, Internat. Assoc. Geomag. Acton., Neuchatal, Switzerland, 24-31.

Sutarno, D., Vozoff, K., 1989. “Robust M-estimation of magnetotelluric impedance tensors,” Exploration Geophysics, vol. 20, no. 3, pp. 383–398.

Sutarno, D. ve Vozoff, K., 1991. Phase-smoothed robust M-estimation of magnetotelluric impedance functions, Geophysics, 56, 1999-2007.

Sutarno, D., 2005. Development of Robust Magnetotelluric Impedance Estimation: A Review, Indonesian J. Phys., 16, 79–89.

Tarakura, S., M. Takeda, K. Matsu, 1994. Effects of regional noise of magnetotellurics and their removal by far remote reference method, Butsui-Tansa, 47, 24 – 35.

Tikhonov, A. N., 1950. Determination of the electrical characteristics of the deep strata of the earth‟s crust: Dok. Akad. Nauk. SSSR, 73, 295-297.

Travassos J.M., and D. Beamish, “Magnetotelluric data processing — a case study,” Geophysical Journal International, pp. 377–391, 1988.

Ulugergerli, E. U., Seyitoğlu, G., Başokur, A. T., Kaya, C., Dikmen, U., Candansayar, M. E., 2007. The geoelectrical structure of northwestern Anatolia, Turkey. Pure and Applied Geophysics, 164(5), 999-1026.

Uluocak E. Ş., Ulugergerli, E. U., Göktaş, H., 2013. Yapay sinir ağı yöntemi ile manyetotellürik veride sinyal ve gürültü ayrımı, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 34(1), 53-72.

Wang, Z., Xianguo, T., Xuben, W., Song, G., Huailiang, L., Nian, Y., Yong, L., Tong, S., 2017. Remote reference magnetotelluric processing algorithm based on magnetic field correlation, Acta Geodaetica et Geophysica, 53

Wang, H., Egbert, G., Yao, Y., Cheng, J., 2020. Array analysis of magnetic and electric field observatories in China: estimation of magnetotelluric impedances at very long periods, Geophysical Journal International, 222, 305-326.

Wannamaker, P. E. et al., 1989. Magnetotelluric observations across the Juan de Fuca subduction system in the EMSLAB project. J. Geophys. Res.: Solid Earth 94, 14111–14125.

Weckmann, U. et al, 2005. Effective noise separation for magnetotelluric single site data processing using a frequency domain selection scheme. Geophysical Journal International, 161, 635–652.

Wight, D.E., Bostick, F.X.,Smith H.W., 1977. Real time Fourier transformation of magnetotelluric data, report, Electr. Geophs. Res. Lab., Univ. of Tex. at Austin.

Wight, D.E., Bostick, F.X., 1980. Cascade decimation- Atechnique for real time estimation of power spectra, Proc. IEEE Intern. Conf. Acoustic, Speech, Signal Processing, Denver, Co!orado, April 9-11,626, 629.

Xu, X., Butala, M. D., 2015. Parametric Magnetotelluric Impedance Tensor Estimation, Journal of Latex Class Files, 14

Xu, X., Butala, M. D., 2021. An Evaluation Of Robust Remote Reference and Parametric Magnetotelluric Transfer Function Estimation, 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

EK 1 İngilizce – Türkçe Sözlük

Auto-correlation: Özilişki

Auto-Regressive with Exogenous Variables: Dışsal Değişkenlerle Otoregresif

Biase: Sapma

Bounded Influence Remote Reference Processing: Sınırlı Etki Uzak Referans İşleme

Cascade Decimation: Kademeli Eleme

Coherency: Tutarlılık

Coherence Weighted Estimate: Tutarlılık Ağırlıklandırma Kestirimi

Cross-correlation: Çapraz İlişki

Dead-band: Ölü Bölge

Fast Fourier Transform: Hızlı Fourier Dönüşümü

Firmware Software: Aygıt Yazılımı

Ground Penetrating Radar: Yer Radarı

Maximum Likelihood Estimator: Maksimum Olabilirlik Kestirimi

Nuclear Magnetic Resonance: Nükleer Manyetik Rezonans

Pre-processing: Ön-işlem

Radio-Magnetotelluric: Radyo-Manyetotellürik

Regression M-Estimate: Regresyon M-Kestirimi

Remote Reference: Uzak Referans

Robust Approach: Kararlı Yaklaşım

Robust Estimation: Kararlı Kestirim

Robust Multivariate Errors-in-Variables: Değişkenlerde Kararlı Çok Değişkenli Hatalar

Robust Remote Reference: Kararlı Uzak Referans

Robust Single Station: Kararlı Tek İstasyon

Single-Station Weighted Cascade Decimation: Tek İstasyon Ağırlıklı Kademeli Eleme

Transient Electromagnetic: Geçici Elektromanyetik

Very Low Frequency: Çok Düşük Frekans