

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MANYETİK ANOMALİLERİN SINIR GÖRÜNTÜLEME ANALİZLERİ
VE TERS ÇÖZÜMÜ İLE ALABANDA ANTİK KENTİ'NDE GÖMÜLÜ
ARKEOLOJİK YAPILARIN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Hasan KARAASLAN

Enstitü Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Günay BEYHAN

Ekim 2020

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MANYETİK ANOMALİLERİN SINIR GÖRÜNTÜLEME ANALİZLERİ
VE TERS ÇÖZÜMÜ İLE ALABANDA ANTİK KENTİ'NDE GÖMÜLÜ
ARKEOLOJİK YAPILARIN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Hasan KARAASLAN

Enstitü Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 09/10/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Üye

Üye

Jüri Başkanı

Üye

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hasan KARAASLAN

09.10.2020

TEŞEKKÜR

Rahman ve Rahim olan Allah'ın adıyla. Allah azze ve celleye hamdü sena ve Rasulü Hz. Muhammed (sallallahu aleyhi ve sellem) Efendimize ve O'nun aile efradına ve cemi ashabına salatu selamdan sonra, bilinsin ki “İnsanlara teşekkür etmeyen Rabbisine şükredemez.” kavli şerifi mucibince evvelen uhdeme teşekkür hakkı lazım olan insanlara teşekkür etmeyi arzu ederim. Buna binaen, metin bir müstened olarak evvel emirde mülaki olduğum ve bu fakire, hocalıkla beraber ağabeylik de yapan hocam Can KARAVUL'a ziyadesiyle müteşekkir olduğumu ilam ederim. Akabinde, fakire gösterdiği müsamaha ile müsveddesinin itmama ermesine vesile olan, hocam Günay BEYHAN'a teşekkürlerimi arz ediyorum. Her daim suallerime cevapla mukabelede bulunarak beni talebe kabul etmesiyle teallüm eylediklerimde büyük bir pay sahibi olan hocam Bülent ORUÇ'a teşekkür ederim. Nihayeten, tezi yazarken zahmetlerime sabır gösteren kıymetli aileme ve kendisiyle inam olunduğum, ahiret yoldaşım, viladeti müjdesiyle mesrur olacağımız evladımızın annesine ziyadesiyle teşekkür ederim. Rabbim'den mezkûrinin bu fakire teveccüh eyledikleri güzel niyetlerin ve amellerin ecirlerini en zor zamanlarında karşılarına çıkarmasını niyaz ederim.

Hâlihazırda bu fende sermayemin kalil olmasına rağmen karşıma çıkan türkçe merci kıtlığından dolayı takatim ölçüsünde kolu paçayı sıvadım. Sahasında ecnebi lisanlarda ketbedilmiş en mühim merciler üzerine sayu gayret ile az da olsa bir şeyleri fehmetmek müyesser oldu. Buna binaen, kendi fehmettiğim tarik ile mufassal ve suhuletle fehmettiklerimi kaydetmek istedim. Milletimizin ilmi varlığına âcizane bir hizmette bulunmak nimetine mazhar olmak ümidiyle Hak Teâlâ Hazretlerinden muvaffakiyetler niyaz eylerim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	9
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. Jeofizikte Potansiyel Alan Kavramı ve Manyetik Potansiyel.....	16
3.2. Yer Manyetik Alanı ve Bileşenleri.....	22
3.3. Manyetik Anomalilerin Sınır Görüntüleme Analizleri.....	28
3.3.1. Tilt açısı tekniği.....	28
3.3.2. Euler dekonvolüsyonu tekniği.....	35
3.3.3. Manyetik gradyent tensör (MGT) bileşenleri ve gradyent tensör özdeğer sınır görüntüleme analizi.....	44

BÖLÜM 4.

SAHA UYGULAMASI VE TARTIŞMA.....	57
----------------------------------	----

BÖLÜM 5.

SONUÇ VE ÖNERİLER	76
-------------------------	----

KAYNAKLAR	78
-----------------	----

ÖZGEÇMİŞ	86
----------------	----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A/m	: Amper/metre
B	: Manyetik indüksiyon (manyetik alan)
div	: Diverjans
e	: Hata miktarı
ERT	: Elektrik rezistivite (özdirenç) tomografisi
F	: Kuvvet
F	: Kuvvet alanı (vektörel)
$\mathcal{F}$	: Fourier dönüşümü
$\mathcal{F}^{-1}$	: Ters fourier dönüşümü
Fe ₂ O ₃	: γ Maghemit – α Hematit
Fe ₃ O ₄	: Manyetit minerali kimyasal bileşimi
GGT	: Gravite gradyent tensör
GPR	: Ground penetrating radar (Yer radarı)
k	: Dalga sayısı
m	: metre
MGT (M)	: Manyetik gradyent tensör
nT	: Nanotesla
N	: Yapısal indeks
Ohm.m	: Özdirenç birimi (Ohm.metre)
rad	: Radyan
rot	: rotasyonel (curl)
$\hat{t}$	: Jeomanyetik alan (rejyonal alan) yönündeki birim vektör
T	: Skaler toplam alan şiddeti
T	: Toplam alan vektörü
tan	: Tanjant
TMA	: Toplam manyetik alan

T_0	: Jeomanyetik alan (yerin asıl manyetik alanı)
U	: Manyetik potansiyel
W	: İş (skaler potansiyel)
ve ark.	: ve arkadaşları
YTG	: Yatay türevlerin genliği
2-B	: İki boyutlu
3-B	: Üç boyutlu
$^{\circ}$	: Derece (açı)
ψ	: Akı
λ	: Özdeğer
ΔT	: Anomali alanı vektörünün jeomanyetik alan vektörü üzerine izdüşümü (toplam alan anomalisi)
ΔT_a	: Anomali alanı
ΔT_d	: Anomali alanının jeomanyetik alana dik olan bileşeni

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yer bulduru haritası	3
Şekil 1.2. Alabanda Antik Kenti şehir planı	4
Şekil 1.3. Alabanda antik kenti ve çevresinin jeoloji haritası.....	5
Şekil 1.4. Çalışma alanının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti.....	6
Şekil 3.1. Bir F kuvvet alanı içinde a noktasından b noktasına olan herhangi bir yol çizgisi ve x ekseninde Δx mesafesi kadar hareket	17
Şekil 3.2. Toplam manyetik alan vektör sunumu.....	23
Şekil 3.3. Toplam alan vektörü (T) ve bileşenleri için rejyonal alanla (T₀) aynı yönde uzanan anomali alanı (toplam alan anomalisi, $\Delta\mathbf{T}$) kabulüne dayanan gösterim.....	23
Şekil 3.4. Herhangi bir noktada manyetik alanın yatay türevlerinin ve düşey türevinin doğrultuları ve tilt açısının (TA) tanımı.....	29
Şekil 3.5. Düşey kontak modelinin oluşturduğu manyetik anomali ve tilt açısı değerleri.....	31
Şekil 3.6. (a) 3-Boyutlu yapay model (b) prizmalardan üretilen toplam manyetik alan anomalisi.....	32
Şekil 3.7. Prizmalardan elde edilen anomalinin tilt açısı haritası.....	33
Şekil 3.8. Gürültü içeren yapay veri (üstte) ve elde edilen gürültülü verinin tilt açısı haritası (altta).....	34
Şekil 3.9. P gözlem noktası için koordinatlar ve r uzaklığı.....	36
Şekil 3.10. Gürültülü yapay verinin Euler dekonvolüsyon çözümleri.....	42
Şekil 3.11. Manyetik gradyent tensör bileşenlerinin şematik gösterimi.....	46
Şekil 3.12. Gürültülü yapay veriden hesaplanan MGT bileşenleri (a) $\mathbf{M}_{xx}$, (b) $\mathbf{M}_{xy}$, (c) $\mathbf{M}_{xz}$, (d) $\mathbf{M}_{yy}$, (e) $\mathbf{M}_{yz}$, (f) $\mathbf{M}_{zz}$	51
Şekil 3.13. Yapay verinin özdeğer analizleri (a) λ_1 , (b) λ_2 , (c) λ_3 , (d) K, (e) NK, (f) Tilt açısı.....	55

Şekil 3.14. Gürültülü yapay verinin özdeğer analizleri (a) λ_1 , (b) λ_2 , (c) λ_3 , (d) K, (e) NK, (f) Tilt açısı.....	55
Şekil 4.1. Elektrik rezistivite tomografisi (ERT) için ölçüm noktaları için hazırlanan karelej.....	58
Şekil 4.2. Kutba indirgeme işlemi yapılmış verinin radyal ortalama genlik spektrumu ve doğruların eğimlerinden hesaplanan ortalama derinlikler.....	60
Şekil 4.3. Gömülü antik sarnıca ait anomali haritaları. (a) Ham veri, (b) toplam alan anomali haritası, (c) kutba indirgenmiş toplam alan anomali haritası, (d) band geçişli süzgeçlenmiş harita.....	62
Şekil 4.4. Tilt haritaları. (a) Kutba indirgenmiş toplam alan anomali haritasından elde edilen tilt haritası, (b) band geçişli süzgeçlenmiş harita kullanılarak elde edilen tilt açısı.....	63
Şekil 4.5. Gömülü antik sarnıç binasının kazı çalışmalarıyla ortaya çıkarılan kısımları.....	64
Şekil 4.6. 3-B elektrik özdirenç tomografi verilerinin ters çözümünden elde edilen rezistivite derinlik kesitleri.....	65
Şekil 4.7. Gözlenen ve hesaplanan anomaliler ve 2-B ters çözüm işlemi sonucunda elde edilen manyetik suseptibilite kesiti.....	66
Şekil 4.8. Kutba indirgenmiş veriden elde edilen Euler dekonvolüsyon çözümleri	67
Şekil 4.9. Band geçişli süzgeçlenmiş veriden elde edilen Euler dekonvolüsyon çözümleri.....	69
Şekil 4.10. Kutba indirgenmiş anomali haritasından hesaplanan MGT bileşenleri (a) M_{xx} , (b) M_{xy} , (c) M_{xz} , (d) M_{yy} , (e) M_{yz} , (f) M_{zz}	72
Şekil 4.11. Band geçişli süzgeçlenmiş anomali haritasından hesaplanan MGT bileşenleri (a) M_{xx} , (b) M_{xy} , (c) M_{xz} , (d) M_{yy} , (e) M_{yz} , (f) M_{zz}	72
Şekil 4.12. Kutba indirgenmiş anomali haritasından hesaplanan özdeğer analizleri (a) λ_1 , (b) λ_2 , (c) λ_3 , (d) K, (e) NK, (f) Tilt açısı.....	73
Şekil 4.13. Band geçişli süzgeçlenmiş anomali haritasından hesaplanan özdeğer analizleri (a) λ_1 , (b) λ_2 , (c) λ_3 , (d) K, (e) NK, (f) Tilt açısı.....	74

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Bazı basit şekilli modellerin yapısal indeks değerleri.....	38
Tablo 3.2. Tensör bileşenlerinin yorumu.....	49



ÖZET

Anahtar kelimeler: Arkeojeofizik, manyetik gradyent tensör, özdeğer analizi, tilt açısı, Euler dekonvolüsyonu, manyetik potansiyel, Alabanda Antik Kenti

Bu çalışmada, manyetik yöntem sınır analizi teknikleriyle gömülü arkeolojik yapıların sınırlarının ve geometrik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Buna binaen tez çalışmasında bir Karia kenti olan Alabanda Antik Kenti'nde bulunan ve bir antik su yapısına ait olan gömülü yapılar jeofizik çalışmalarla belirlenmiş ve sonrasında kazı çalışmalarına yön verilerek literatüre kazandırılmıştır.

Bu amaçla, çalışmada manyetik anomali kaynaklarının sınır görüntüleme analizleri ve derinlik bilgileri için Tilt açısı, Euler dekonvolüsyonu çözümleri, Manyetik Gradyent Tensör (MGT) Sınır Analizi teknikleri ve sonrasında yeni bir uygulama olarak Gradyent Tensör Özdeğer Sınır Analizi uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, yeni bir sınır analizi operatörü olarak MGT matrisinin dikey bileşeni ile normalize edilmiş olan NK operatörü kullanılmıştır. Tekniklerin tamamı yapay model verileri üzerinde denenerek arazi verisine uygulanmıştır. Ek olarak 3-B Elektrik Öz direnç Tomografi (ERT) ters çözüm kesitleri ve 2-B manyetik suseptibilite ters çözüm çalışması, sınır analizi tekniklerinin çözüm gücünü ve doğruluğunu sınamak için karşılaştırma amaçlı olarak kullanılmıştır.

Yapılan arkeolojik kazı çalışmaları sonucu alanın bir kısmında ortaya çıkarılan gömülü yapılar jeofizik haritalarda beyaz dikdörtgenler ile işaretlenmiş ve tekniklerin yorumlanmasında ve doğruluğunun sınanmasında kullanılmıştır. Tilt açısının sıfır konturu yapı sınırlarının görüntülenmesi hususunda kazı alanıyla ve ERT kesitleriyle büyük oranda uyumludur. Ayrıca tilt açısının $\pm 45^\circ (\pm 0.785 \text{ radyan})$ değerleri arasındaki mesafenin yarısından hesaplanan derinlik değerleri de ERT kesitleri ve manyetik ters çözüm kesitinden hesaplanan derinlikler ile uyumludur. Euler dekonvolüsyonu sonuçları tilt açısının sıfır konturu ile büyük uyum içindedir. Ek olarak Euler çözümlerinden elde edilen derinlikler de ters çözüm kesitleri ile örtüşmektedir. MGT bileşenleri gömülü yapılara ait sınır bilgileri yanında, yapının uzanımı ve köşe noktaları ile ilgili bilgiler üretmiştir. NK'nın çözünürlüğü tilt açısı ile karşılaştırılmış ve NK'nın sınırları daha açık ve net görüntülediği tespit edilmiştir. Ayrıca gürültü içeriğinde NK, tilt açısından daha başarılı ve temiz sonuçlar üretmiştir.

IMAGING OF BURIED ARCHEOLOGICAL STRUCTURES IN THE ALABANDA ANCIENT CITY USING THE EDGE DETECTION ANALYSIS AND INVERSE MODELING OF THE MAGNETIC ANOMALIES

SUMMARY

Keywords: Archaeogeophysics, magnetic gradient tensor (MGT), eigenvalue analysis, tilt angle, Euler deconvolution, magnetic potential, Alabanda ancient city

In this study, it is aimed to determine the boundaries and geometric properties of buried archaeological structures by magnetic edge detection techniques. The buried structures of an ancient water structure in the ancient city of Alabanda, a Carian city presently located in Aydın, Western Turkey, were determined by geophysical studies. Tilt angle, Euler deconvolution solutions, Magnetic Gradient Tensor (MGT) Boundary Analysis techniques and then a new application of Gradient Tensor Eigenvalue Boundary Analysis applications were carried out in the study for edge detection analysis and depth information of magnetic anomaly causative sources. In this context, a new normalized approach NK operator, which normalized with vertical component of MGT matrix, was utilized as a new edge detector operator. All of the techniques have been tested on synthetic data, which were generated from prism models, and then implemented to the real field data. In addition, three-dimensional (3D) electrical resistivity tomography (ERT) inversion sections and two-dimensional (2D) magnetic inversion section were checked against the results of edge detection analysis.

The buried structures, which unearthed in a part of the study area by archaeological excavations, were marked with white rectangles on the generated geophysical maps and used in assessment of the techniques performance and interpretation of the results. The zero contour of the tilt angle is highly compatible with the excavation area and the ERT sections with respect to determining of the boundaries of buried structures. In addition, the depth values calculated from half of the distance between the positive and negative 45° (0,785 radians) tilt angle values are also compatible with the depths obtained from the ERT and magnetic inversion sections. Euler deconvolution results are in great agreement with the zero contour of the tilt angle. The depths obtained from Euler solutions also coincide with both inversion sections. MGT components produced information about the geometric shape and corner points of the buried structures. The resolution of NK was compared with the tilt angle and it was seen that NK determined the boundaries more clearly. Furthermore NK produced more successful and cleaner results than the tilt angle technique in the presence of noise.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

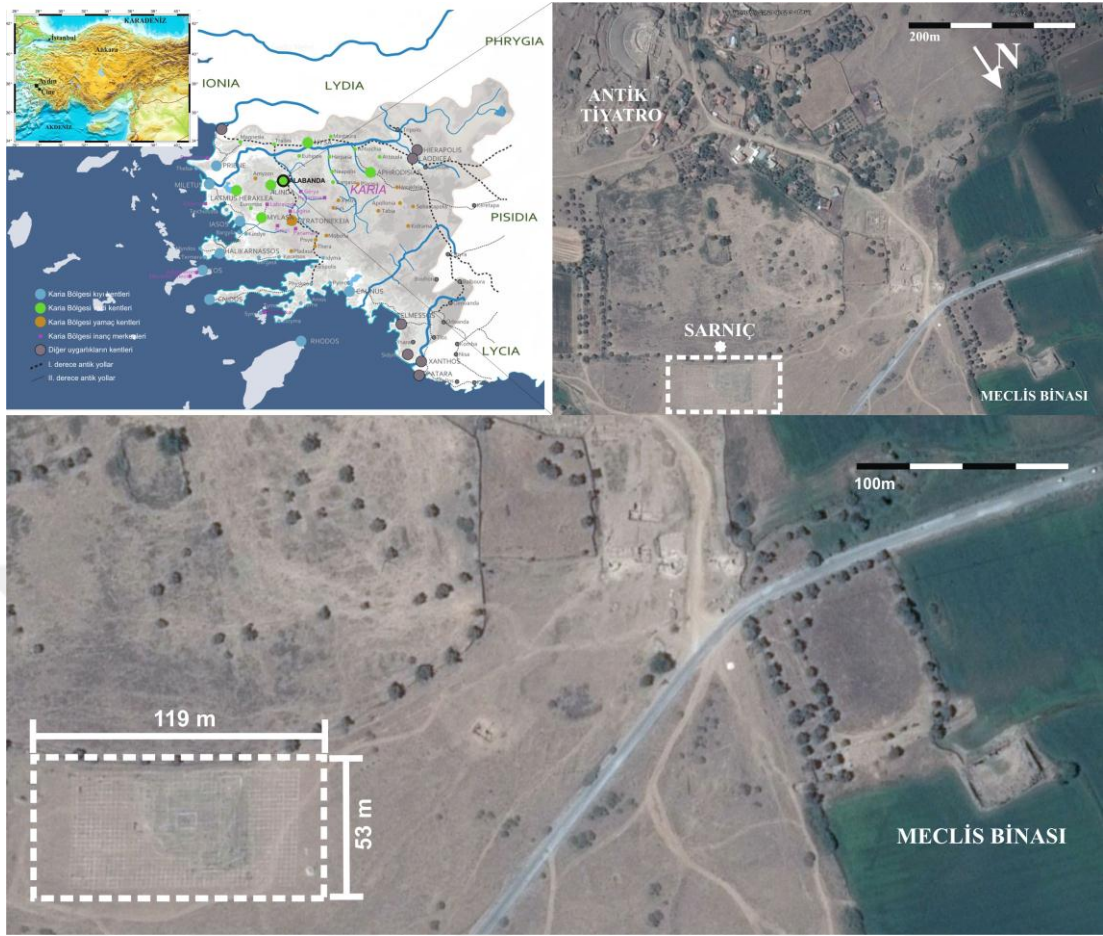
Bilimsel ve teknolojik gelişmelerle beraber zamanla bağımsızlaşan bilim dalları yeni disiplinleri oluşturmuşlardır. Arkeoloji bilimi de zaruri olarak birçok disiplinle ilişki içerisinde. Bu ilişkilerin sonucunda oluşan disiplinlerden birini de “Arkeojeofizik” oluşturur. Arkeolojik çalışmalarda jeofiziğin kullanımının yaygınlaşması bazı sebeplere bağlıdır. Bunlardan en önemlisi jeofizik yöntemlerin gömülü yapılara zarar vermeden (non-destructive) sonuca ulaşmasıdır. Zira kazılar esnasında yapılara verilen zararların telafisi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Ayrıca jeofizik yöntemler az iş gücü gerektirmesi ve kolay uygulanabilirliği sayesinde kısa bir zamanda sonuca giderek yüksek çözüm gücü sunmaktadır. Bu sebeplerden dolayı gömülü yapıları herhangi bir zarar görmeden açığa çıkarmayı amaçlayan arkeolojik kazılar için jeofizik yöntemlerin kullanımı kaçınılmaz olmuştur.

Arkeolojik alanlardaki gömülü yapılar, farklı fiziksel özelliklere (örn. elektrik öz direnç, sismik dalga hızı-akustik empedans, manyetik şiddet - suseptibilite vb.) sahip malzemelerdir. Böylece aranan yapılar ile onu çevreleyen kütle arasında belirli bir oranda fiziksel fark oluşabilmektedir. Uygulamalı jeofizikte anomali kavramının temeli olan bu prensipten yararlanarak jeofizik yöntemlerle bu fiziksel özellikler ölçülerek bu yapıların toprak altında gömülü durumları belirlenebilmektedir. Bu itibarla, arkeolojik araştırmalarda jeofizik yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Drahor (2006), elektrik ve manyetik yöntemleri kullanarak duvarlar, pişmiş toprak boru hatları (künk) gibi arkeolojik yapıları ortaya çıkarmıştır. Perez-Garcia ve ark. (2009), doğru bir yoruma (modele) ulaşmak için birden fazla jeofizik yöntemle veri toplamıştır. Karavul ve ark. (2010) arkeolojik araştırma amacıyla 2B elektrik öz direnç ve manyetik tekniklerden türev yöntemleri ve Euler dekonvolüsyon tekniklerini kullanmışlardır. Manyetik sonuçları 2B elektrik verilerinin ters çözüm sonuçlarıyla karşılaştırmış ve

gömülü pişmiş kil fırını ve duvar yapısını ortaya çıkarmışlardır. Loperte ve ark. (2011) manyetik, jeoelektrik ve GPR (yer radarı) yöntemlerini kullanarak bütüncül bir jeofizik yaklaşımla duvarlar, kanallar ve mezarlar gibi arkeolojik kalıntıları araştırmıştır. Apostolopoulos (2014), antik su tanklarını elektrik ve elektromanyetik yöntemleri kullanarak tespit etmiştir. Rabbel ve ark. (2015), antik kilisenin tespiti için manyetik, elektrik ve GPR yöntemlerinin uygulamasını göstermiştir. Burada verilen ve takip eden bölümde verilen kaynaklara bakıldığında arkeojeofizik çalışmalarda en yaygın olarak kullanılan jeofizik yöntemlerden birisinin manyetik yöntem olduğu görülecektir.

Manyetik araştırmalar bir arkeojeofizik çalışmanın ilk adımını oluşturur. Çünkü manyetik yöntem araştırmaların yapılacağı çalışma alanın hızlı bir şekilde taranarak yüksek çözünürlüklü (zaman ve iş yükü fazla olan) çalışmaların gerçekleştirileceği alanları belirlemek için bir ilk ve ön çalışma niteliğine sahiptir. Öte yandan manyetik prospeksiyonda ortaya çıkan gelişmelerle birlikte yapılara ait geometrik ve fiziksel özellikler için doğrudan kullanım niteliği kazanan teknikler de mevcuttur. Bunların en başında hiç şüphe yok ki gömülü yapılara ait sınır-köşe görüntüleme için kullanılan türev bazlı teknikler ve ters çözüm işlemleri ilk sırayı teşkil etmektedir. Buna ilave olarak uzun yıllardır uygulamalı jeofizikte kullanılan manyetik arama çalışmalarında son yıllarda toplam manyetik alan (TMA) ölçümleri yanında yer manyetik alanının üç ortogonal (dikey) doğrultudaki tensör bileşenleri de kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede yüksek duyarlıklı ölçümlerle gömülü yapılara ait yanal ve düşey ayrıntılar daha sağlıklı bir şekilde elde edilmektedir (Oruç, 2013). Böylece jeofizik arama çalışmalarında manyetik yöntemin tek başına veya birincil yöntem olarak da kullanılabileceği uygun görülmektedir.

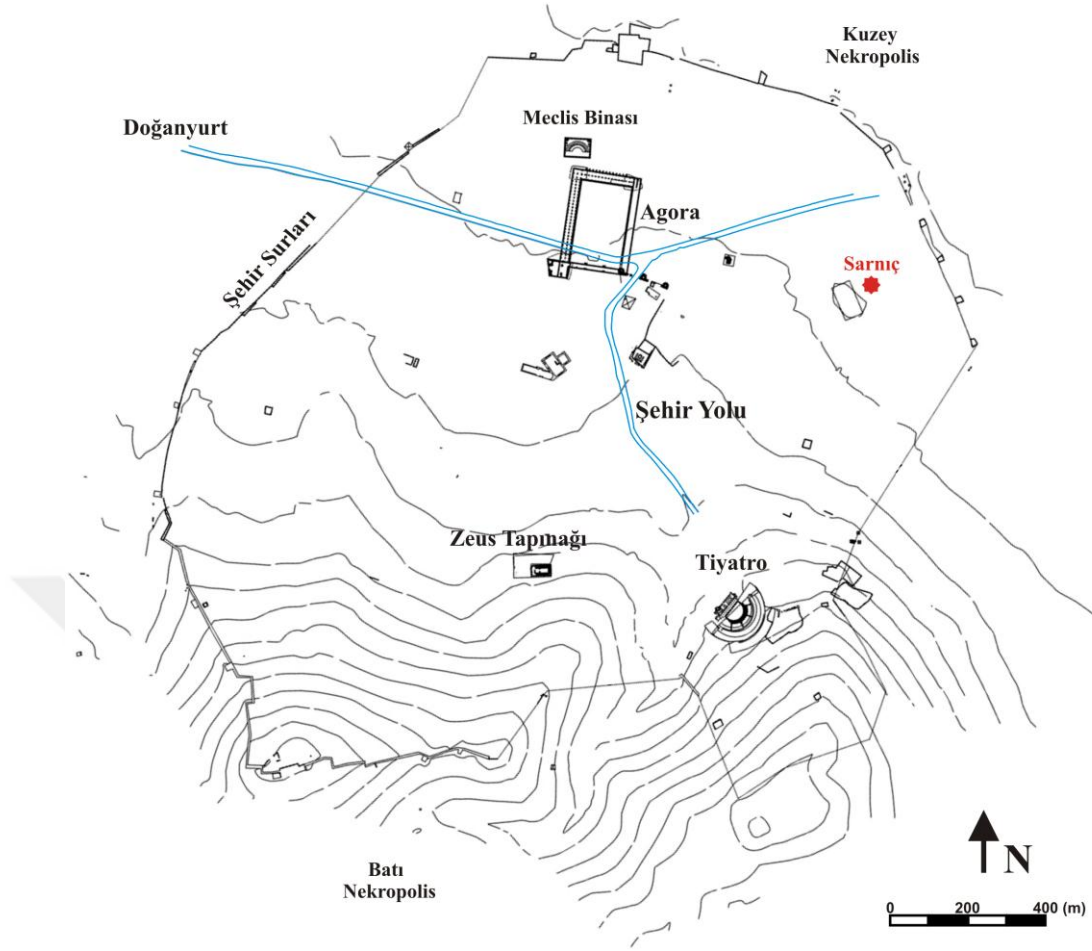
Bu tez çalışması kapsamında araştırmaya konu olan Alabanda Antik Kenti, Aydın iline bağlı Çine ilçesinin yaklaşık olarak 7 km. batısında yer alan, eski adıyla Araphisar, yeni adıyla Doğanyurt köyünün bulunduğu alanda yer almaktadır (Bean, 1971) (Şekil 1.1.). Gökbel Dağının kuzeyindeki tepelerin eteklerinde kurulan ve bereketli Çine Ovasına hakim bir noktada yer alan Alabanda Kenti önemli bir Karia yerleşimidir



Şekil 1.1. Yer bulduru haritası (Çekül Vakfı, 2012 ve Google Earth)

(Bean, 1976). Alabanda, stratejik konumu ile önemli ulaşım yollarında bulunur (Ramsay, 1890). Örneğin, Alabanda Antik Kenti, Likya'dan İonia içlerine kadar uzanan yoğun bir ticaret yolunda bulunmakta olup (Şekil 1.1.), aynı zamanda Mylasa, Alinda ve Miletos'a Alabanda'dan ulaşılabilir (Stark, 1958; Garstang ve Gurney, 1959). Apollon Tapınağı, Agora, Tiyatro, Zeus Tapınağı, Kent Surları, Bouleuterion (Meclis Binası), Roma hamamları, Anıt Mezarlar antik kentte görülebilen başlıca yapıtlardır (Şekil 1.2.).

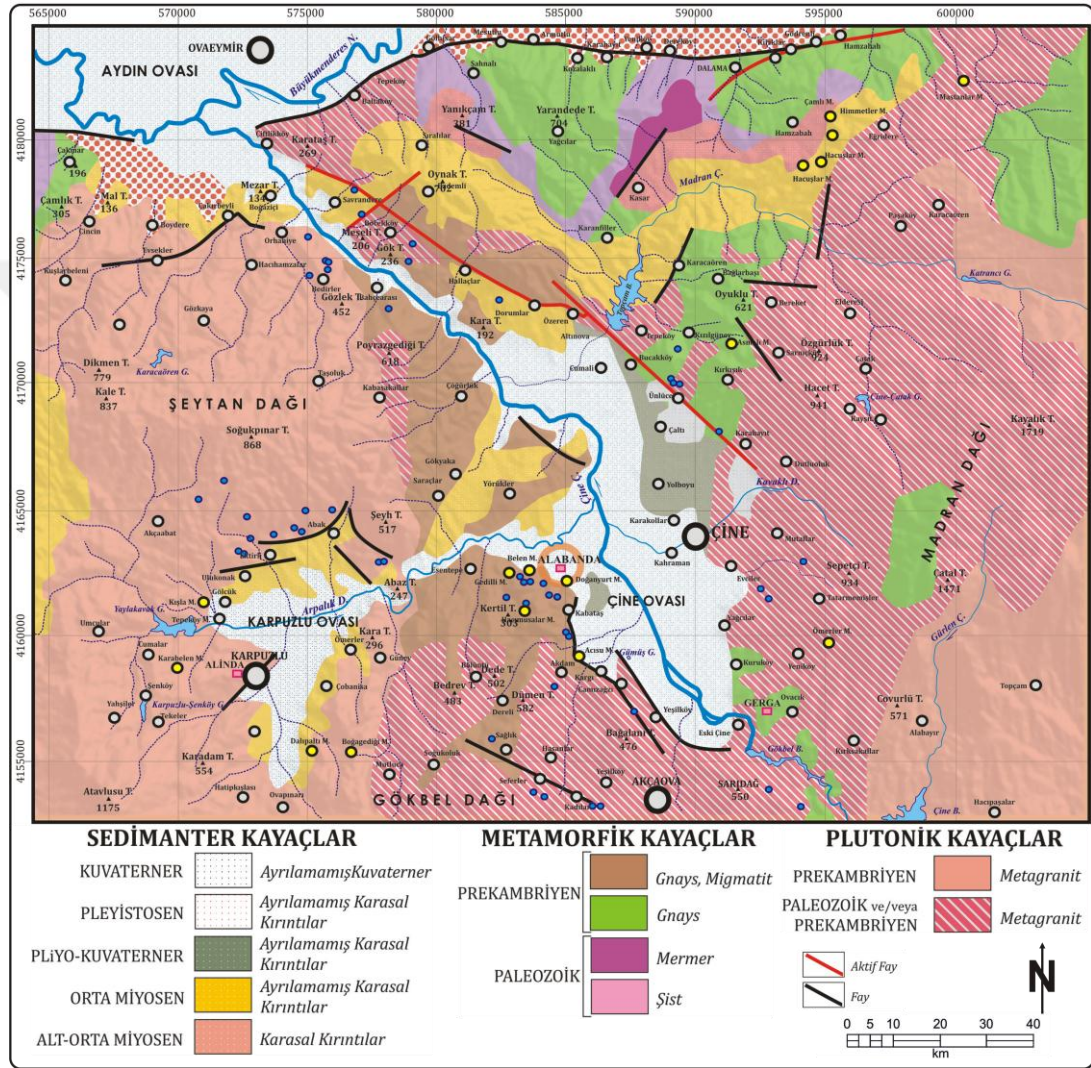
Şekil 1.3.'te antik kent ve çevresinin jeoloji haritası görülmektedir (Tavukçe ve ark., 2018). Batı Anadolu'nun en büyük kabuksal segmentlerinden birini oluşturan Menderes Masifi içinde yer alan Çine Asmasifi, çalışma alanın jeolojisini belirleyen



Şekil 1.2. Alabanda Antik Kenti şehir planı

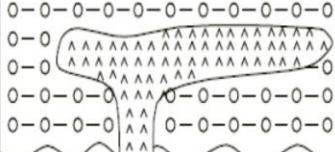
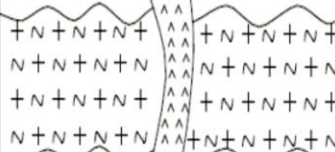
temel tektonik ve jeolojik oluşumdur (Candan ve ark., 2011). Çine Çayı'na ait vadi, masifi kuzeyden güneye bölerek parçalı bir görünüm kazandırmıştır. Menderes masifi ana hatları ile çekirdek olarak nitelendirilen bir Pan-Afrikan temel ile onu üzerleyen Alt Paleozoyik-Paleosen yaşlı örtü serilerinden oluşmaktadır (Demirbaş, 2010). Çine Asması'ne hâkim olan kayaç türü Menderes Masifi metamorfizmasının ürünü olan metamorfik kayaçlardır. Çine Asması'nın çekirdeğini oluşturan birim, gözlü (metagranit)-granitik gnayslardır. Bunların üzerinde şistler ve kuvarsitler gelmektedir. Genç tortullar ise tüm bu serileri uyumsuz olarak örterler (Şekil 1.4.). Buna göre çalışma alanına hakim örtü birimi Kuvaterner yaşlı dilüvyal ve alüvyal birimlerdir. Lüle-Whipp (2006), Menderes Masifi metamorfik kayaçlarının Alabanda civarında gnays, koyu renkli gnays, gözlü gnays ve migmatitlerden oluştuğu belirtmektedir. Yüzeyleyen metamorfik kayaçlar ve onların içinde bulunan granatlar üzerinde

mineralojik-petrografik ve jeokimyasal incelemeler yapmış ve içlerinde hematit-manyetit kapanımlarının varlığını tespit etmiştir. Kayaç örneklerinin jeokimyasal analizlerinde Fe_2O_3 değerleri % 6-8 arasındadır (Lüle-Whipp, 2006). Bu tespitler ve bilgiler çalışma alanında gömülü arkeolojik yapıya ait yapı taşı olarak kullanılan gnaysların üreteceği manyetik anomalileri anlamak için oldukça önemli bir kaynaktır.



Şekil 1.3. Alabanda antik kenti ve çevresinin jeoloji haritası (Tavukçu ve ark., 2018'den düzenlenerek.)

Daha önce antik bir tapınak olduğu düşünülen çalışma alanındaki yapı üzerinde yapılan jeofizik çalışmalar sonucunda kazılara başlanmıştır. Kazılar sonucunda havuz yapıları, killi su boru sistemleri ve dikmelerle güçlendirilmiş duvarlara rastlanması nedeniyle söz konusu yapının antik bir sarnıç (veya hamam) olduğu şeklinde

ÜST SİSTEM	SİSTEM	FORMASYON	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENOZOYİK	NEOJEN	ALÜVYON		Tutturulmamış çakıl, kum, silt, kil İri taneli mikroklin, pentit, kuvars, albit, muskovit kristallerinden oluşmuştur
PALEOZOYİK	PERMİYEN	GRANAT MIKAŞİST		DISKORDANS Düşük dereceli metamorfizma özelliği gösteren metakonglomera, kuvarsit, kuvarşist, mikaşist metabazik ve filitlerden oluşan kayalar
	ALT ORDOVİSİYEN	METAVOLKANİT		DISKORDANS Gri, açık morumsu, kahverenkli masif yapıya sahip şistozite özelliği gösteren metavolkanikler. Migmatizma
PREKAMBRIYEN	GRANİTİK GNAYS			DISKORDANS Birbirine yanal düşey geçiş gösteren ince taneli gnays, granatlı şist, mikaşist, kuvarşist ardalanması şeklindedir.
	GÖZLÜ GNAYS			DISKORDANS 1.5 cm. arasında değişen boyutlarda feldispat, kuvars, muskovit, biyotit topluluklarından oluşan gözler, ince taneli kaba taneliye doğru değişim göstermektedirler.

Şekil 1.4. Çalışma alanının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Demirbaş, 2010)

yorumlanmıştır ve buna göre bu tez çalışmasındaki kurgu gömülü yapının, sarnıç binası olması üzerine kurulmuştur. Jeofizik çalışmaların sonuçları ile ortaya çıkarılan sarnıç ile birlikte antik kentin tarihi gelişimi ve diğer şehirlerle ilişkileri hakkında da önemli bilgilere ulaşılmıştır. Bu itibarla Temel (2015), gömülü sarnıçtaki jeofizik çalışmalar sonucunda belirlenen noktalarda yapılan kazılardan elde edilen seramikleri incelemesi sonucunda sarnıcın şehirde uzun süre aktif olarak kullanılan yapılardan biri olduğu kanaatine varmıştır. Geniş bir zaman aralığına ait olan bu seramik örnekleri

antik kentin tarihi ve çevresiyle olan ilişkisi hakkında önemli bilgiler vermiştir. Zira farklı seramik türleri ancak önemli antik yollarda bulunan kentin ticarete aktif olması ile açıklanabilir (Temel, 2015).

Tüm bu bulgulara rağmen antik çağda kurulan kentlere ait hidrolojik düzenlemelere, altyapı çalışmalarına ve sarnıçlara ilgisiz kalınması Anadolu'da gerçekleştirilen kazı ve yüzey araştırmalarına ait rapor ve sonuçların neredeyse tamamına yakın bölümünde karşımıza çıkmaktadır (Kürkçü, 2015). Arkeolojik araştırmalara bakıldığında yapılan çalışmaların çoğunun stoa, agora, tiyatro, odeion, hamamlar ve kiliseler gibi yapıların eksenini etrafında yer aldığı anlaşılmaktadır. Oysa insanlığın varoluşundan bu yana insanlar suyu en kolay şekilde elde etmenin ve kullanmanın yollarını aramışlar, suya yakın yerlerde yerleşim merkezlerini kurmuşlardır (Türk ve ark., 2008). Su sistemleri ile ilgili Anadolu'da günümüze kadar yapılan en detaylı çalışmalar Bergama hidrografisi üzerinedir (Brinker, 1990). Bir kentin su sistemlerinin incelenmesine yönelik çalışmalar yalnızca suyun kente getirilişi ile ilgili kalmayıp suyun depolanmasını ve dağıtılmasını da kapsamaktadır. Su temininde bilinen en eski ve en yaygın yöntemlerin başında içlerinde yağmur sularının toplandığı sarnıçlar gelmektedir. Bilindiği üzere sarnıçlar antik kentler için başlıca yapılar arasında yer almaktadır. Fakat bütün bunlara rağmen sarnıçlar, antik kentlerde uygulanan araştırmalar sürecinde gerektiği kadar önemsenmemiş ve genellikle sadece buluntu olarak raporlarda basitçe tasvir edilmişlerdir (Kürkçü, 2015).

Bu tez çalışmasında manyetik yöntem sınır analizi teknikleriyle gömülü arkeolojik yapıların sınırlarının ve geometrik özelliklerinin belirlenmesi ve sonrasında kazı çalışmalarına yön verilmesi amaçlanmıştır. Buna binaen tez çalışmasında bir Karia kenti olan Alabanda Antik Kenti'nde bulunan antik sarnıç su yapısına ait kalıntılar jeofizik çalışmalarla belirlenmiş ve sonrasında kazı çalışmalarına yön vererek sarnıç binası modern literatüre kazandırılmıştır (Karaaslan ve Karavul, 2018; Karaaslan, 2020). Manyetik anomalilerin sınır analizleri ve derinlik bilgileri için ilk olarak geleneksel yöntemlerden Tilt açısı ve Euler dekonvolüsyonu çözümleri kullanılmıştır. Daha sonra bu tekniklerin sonuçları Manyetik Gradyent Tensör bileşenleri ile

karşılaştırılarak tensör uygulamaları ile geleneksel tekniklerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Sonrasında yeni bir uygulama olarak Gradyent Tensör Özdeğer Sınır Analizi uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Tekniklerin tamamı yapay model verileri üzerinde denenerek arazi verisine uygulanmıştır. Ek olarak 3-B Elektrik Özdirenç Tomografi (ERT) ters çözüm kesitleri ve 2-B manyetik suseptibilite ters çözüm çalışması sınır analizi tekniklerinin çözüm gücünü ve doğruluğunu sınamak için karşılaştırma amaçlı olarak kullanılmıştır.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Manyetik yöntem arkeolojik prospeksiyonda kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Yöntemin etkinliği gömülü arkeolojik yapı ile onu örten yapının arasındaki suseptibilite farkına ve kalıntı mıknatıslanma farklılığına bağlıdır. Ayrıca yöntemin uygulanması ve ölçüm süreci diğer jeofizik yöntemlere göre oldukça kolay ve pratik olduğundan manyetik yöntem arkeolojik prospeksiyon çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Tsokas ve ark., 1997; Büyüksaraç ve ark., 2006; Arısoy ve ark., 2007; Drahor ve ark., 2008; Quesnel ve ark., 2011; Anchuela ve ark., 2016). Arkeolojik çalışmalar, manyetik ölçümler için karmaşık ve gürültülü olarak nitelenebilecek alanlarda gerçekleştirilir. Bu tür çalışma alanlarında gömülü yapılara ait manyetik anomaliler örtü birimdeki karmaşık yapıların oluşturacağı anomaliler sebebiyle maskelenebilir. Ayrıca manyetik haritalar değişik derinlik, geometri ve suseptibilite kontrastı sebebiyle meydana gelmiş farklı genlikte anomalilerden teşekkül ederler. Bu sebeple arkeojeofizik çalışmalar için toplanan manyetik haritalarda yüksek genlikli anomalilerin diğer anomalileri bastırması sıklıkla karşı karşıya kalınan bir durumdur. Buna binaen, bu tür çalışmalarda sınır görüntülüne teknikleri ve modelleme teknikleri oldukça önem kazanmıştır.

Günümüze kadar alışlagelmiş türev yöntemler ile yönlü (x,y,z doğrultusunda) türevler alınarak veriden yapıya ait yönlü değişimler incelenmeye çalışılmaktaydı. Bu tür yöntemlerin yetersizliği zamanla anlaşıldığı için ilk olarak Cordell ve Grauch (1985) yatay türevlerin genliği adıyla x ve y yönlü yatay türevler sayesinde yeni bir teknik geliştirmiştir. Bu sayede genliğin maksimum değeri incelenerek yapının yatay lokasyonuna ilişkin bilgiler edinilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda Miller ve Singh (1994), tilt açısı (tilt angle) yöntemi ile gömülü yapıların sınırlarını görüntülemeye çalışmışlardır. Geleneksel türev yöntemlerine nazaran düşey türevi, yatay türevin genliği ile normalize etmişlerdir. Bir kazanç filtresi gibi davranan yani diğer genlikleri

yok etmeden gömülü yapılara ait sınırları üzerinde tilt açısının 0 değerinin gezdiğini ortaya koymuşlardır. Böylece yapıların yatay konumları ve uzanımları belirlenebilmektedir. Aynı şekilde yöntemin hem derin hem de sığ yapılar için uygulanabileceğini de belirtmişlerdir. Yöntem bu yönleriyle geleneksel yatay türev, analitik sinyal ve ikinci türev gibi tekniklere üstünlük sağlamaktadır. Verduzco ve ark. (2004) bu tekniği manyetik haritalara uygulamışlar ve 2-B veri değerlendirmişlerdir (Oruç, 2013). Salem ve ark. (2007) tilt açısı $\pm\pi/4$ konturlarının arasındaki uzaklığın yarısının gömülü yapıya ait derinlik bilgisini verdiğini göstermişlerdir. Bu özelliklerine binaen teknik birçok çalışmada kullanılmıştır. Salem ve ark. (2008) tilt açısı tekniğiyle manyetik yapılara ait yatay uzanım ve derinlik bilgileri elde etmişlerdir. Tekniği Nambiya'da bir altın madeninde cevherin içinde bulunduğu magmatik ve metamorfik kayaçların uzanımı ve derinliği hakkında bilgi elde etmek amacıyla aldıkları veriye uygulamışlardır. Zira cevher minerallerinin bulunduğu yapılar yüksek miktarda pirit ve manyetit minerali içerdiğinden bu sokulumlar hat safhada manyetik özellik göstermektedirler. Öte yandan Oruç (2011) tilt açısı tekniğini Orta Anadolu'da alınan potansiyel alan verisine uygulamıştır. Bu sayede Kozaklı Grabeni'ne ait derinlik ve graben kenarlarının yatay uzanımları hakkında bilgiler elde edilerek faylar, kontak bölgeleri ve graben kenarları belirlenmiştir. Altınoğlu ve ark. (2015) Batı Anadolu'nun doğu kısmının jeolojik yapı sınırlarını araştırdıkları çalışmalarında geleneksel olarak kullanılan yatay türevlerin genliği ve analitik sinyal tekniğine ek olarak tilt açısını da kullanmışlardır. Bouger gravite verisine her bir tekniğin uygulanmasıyla yapılara ait uzanım-çizgisellik bilgileri, yatay türevlerin genliği ile analitik sinyalin maksimum değerleri ve tilt açısının sıfır konturları kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca araştırmacılar ters çözüm algoritması ile basen topoğrafyasını elde etmişlerdir. Bütün bu bilgileri bölgeye ait aktif fay haritalarıyla karşılaştıran araştırmacılar jeofizik yöntemlerden elde ettikleri sonuçların tektonik haritalarla çok iyi bir uyum içinde olduklarını belirtmişler ve belirledikleri yeni fay zonlarına da dikkat çekmişlerdir.

Öte yandan gömülü yapıların yatay lokasyonları ve uzanımları kaynak tiplerine göre manyetik haritalardan Euler Dekonvolüsyonu Tekniği kullanılarak da belirlenebilir. Anomali kaynaklarına ait çözümler sürekli olarak yorumcunun tecrübe ve kontrolü

altında üretildiği için teknik yarı-otomatik olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte yöntemin uygulanması için kaynak yapının geometrisine ait yapısal bir parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum ise söz konusu tekniğe ait bir dezavantajdır. Euler dekonvolüsyonu ile potansiyel alan verilerinden çözümler üretilmesini ilk olarak Hood (1965) ifade etmiştir (Oruç, 2013). İlk olarak profil verilerine Thompson (1982) tarafından uygulanmıştır. Reid ve ark. (1990) tarafından manyetik haritalara uygulanan teknik, kaynak tiplerine göre ürettiği çözümleri harita üzerinde kümeleme şeklinde gösterdiğinden dolayı yapıların uzanımları hakkında da bilgi üretmektedir. Yöntem manyetizasyon yönüne ait bilgiler gerektirmemesi ve kalıcı mıknatıslanma varlığından etkilenmemesinden dolayı birçok çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmaların bazıları büyük çaptaki tektonik çalışmalar (Reid ve ark., 1990; Hsu, 2002; Oruç ve Selim, 2011) ve bazıları ise arkeojeofizik gibi küçük çaptaki sığ çalışmalardır (Godio ve Piro, 2005; Karavul ve ark., 2010; Quesnel ve ark., 2011; Ekinci ve ark., 2014; Karaaslan ve Karavul, 2018). Dolayısıyla teknik her türde potansiyel veriye başarıyla uygulanabilmektedir. Reid ve ark. (1990) grid verilerine ilk olarak uyguladıkları Euler dekonvolüsyonu ile bir gravite kontur haritasında yorumlanması zor olan yapısal bilgileri çıkarmışlardır. Buna göre fay, dalan kontak zonları ve basen kenarları gibi yoğunluk farkının mevcut olduğu alanlarda Euler dekonvolüsyonu ile bu yapıların uzanım şekillerine ve derinliklerine dair oldukça yararlı bilgiler elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Oruç ve Selim (2011) Sinop Baseni'nin bir bölümüne ait manyetik veriye uyguladıkları sınır analizi ve Euler dekonvolüsyonu ile basene ait yapısal uzanımları ve çalışma alanının tektonik yapısını elde etmişlerdir. Karşılaştırmalı olarak kullandıkları tekniklerden elde ettikleri bilgilerin birbiriyle tutarlı olduklarını belirttikleri çalışmada, Karadeniz Bölgesi'ne ait tektonik hareketlerini yansıttığını söyledikleri alanı iki kısma ayıran bir uzanım ve buna bağlı elipsoit şekilli sokulum alanları saptamışlardır. Saptanan bu alanların çalışma alanındaki petrol ve doğal gaz kapanlarıyla ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Ekinci ve ark. (2014) sınır analizi ve Euler dekonvolüsyonu kullanarak manyetik verilerden gömülü arkeolojik yapıları tespit etmeye çalışmışlardır. Yöntem sonuçlarını karşılaştıran yazarlar sınır analizleriyle elde ettikleri uzanım bilgilerinin Euler çözümlerinin kümelenmeleriyle paralel olduğunu belirtmişlerdir. Buna ilaveten Euler çözümleri sayesinde arkeolojik yapıların derinlikleri hakkında da bilgi elde

etmişlerdir. Karaaslan ve Karavul (2018) elektrik rezistivite tomografisi (ERT) ve manyetik metotları karşılaştırmalı şekilde kullanarak gömülü bir antik sarnıç yapısını tespit etmişlerdir. Tilt açısı ve Euler dekonvolüsyonu ile belirledikleri gömülü yapılara ait uzanım ve derinlik bilgilerinin ERT kesitleriyle aynı sonuçları gösterdiğini belirtmişler ve kazı çalışmalarına yön vererek sarnıç yapısına ait havuz kısımlarını ortaya çıkartmışlardır.

Sınır analizi ve köşe görüntüleme (edge detection) teknikleri potansiyel alan verilerini yorumlamak için jeofizikçilere önemli bilgiler sağlamaktadır. Buna bağlı olarak son yıllarda TMA verilerinden manyetik tensör bileşenlerinin hesaplanması veya direkt olarak üç doğrultuda (x, y, z) manyetik alan bileşenlerinin ölçülmesi oldukça yaygınlaşmıştır. Zira bu sayede anomali kaynaklarına ilişkin yanal ve düşey ayrıntılar yüksek duyarlılıkla elde edilmektedir. Böylece potansiyel alan verileri için tensör hesaplamaları jeofizik araştırmalar için yeni teknik halini almış ve birçok çalışmada kullanılmıştır. Genel olarak, bu çalışmalardan bazıları maden-mineral aramaları için (Zhdanov ve ark., 2004; Dransfield, 2007; Carlos ve ark., 2014), diğer bazıları jeolojik formasyon ve yapıları tayin için (Beiki ve Pedersen, 2010; Oruç ve ark., 2013) gerçekleştirilmiştir. Shmidt ve Clark (2000) manyetik gradyent tensör (MGT) çalışmalarının her türlü manyetik çalışma için uygun olduğunu ve bu sayede hem sığ yapılar hem de derin yapılar için daha yüksek çözünürlükte haritalar elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Oruç (2010) gravite verisinden hesapladığı gradyent tensörleri ve gradyent tensör matrisinden hesapladığı değişmezlikler (invariant) ile sınır analizi üzerine çalışmıştır. Ayrıca gravite düşey bileşeni yardımıyla değişmezlikleri kullanarak gömülü yapılara ait derinlik hesaplamaları da yapmıştır. Teknikleri ilk önce yapay veri üzerinde denedikten sonra bir tuz domu üzerinden alınan gravite verisine de uygulanmıştır. Her iki veri tipinde de tekniklerin başarı ile yapılara ait uzanım, derinlik ve sınırları belirlediğinin altını çizmiştir. Carlos ve ark. (2014) demir cevheri yatağının geometrisini tespit etmek amacıyla potansiyel alan verilerinden elde edilen gradyent bileşenleri kullanarak ters çözüm çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede demir cevheri yatağının yapısını ve şeklini ortaya çıkaran 3-B yoğunluk kontrast dağılımını haritaları elde etmişlerdir. Sondajlarla da doğruluğu teyit edilip rezerv hesabı yapılan çalışma, ilerideki madencilik

çalışmalarına da katkı sağlamıştır. Wu ve ark. (2017) gradyent tensör bileşenlerden elde edilen yönlü yatay türevlerin genliklerini ve tensör matrisinin bütün bileşenlerinden elde edilen bir genliği (modulus) kullanan yeni bir köşe-sınır görüntüleme tekniği sunmuşlardır. Buna göre düşey yönlü yatay türev genliğini, elde ettikleri tensor matrisinin genliği (modulus) ile normalize etmişler ve sonuçları diğer bazı tekniklerle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak geliştirdikleri tekniğin geleneksel kenar saptama tekniklerinin aksine derin yapılar için daha belirgin sonuçlar verdiğini ve pozitif-negatif anomaliler arasında hatalı yapılar-kenarlar saptamadığını belirtmişlerdir. Cole ve Cooper (2018) TMA verisinden hesapladıkları gradyent tensör bileşenlerinin yönlü analitik sinyallerini kullanarak gömülü yapılara ait derinlikleri belirlemeye çalışmışlardır. Böyle bir teknik sayesinde çalışma alanında gömülü olan yapılara ait başlangıç modelini elde etmenin oldukça basit olduğunu belirtmişlerdir. Böyle bir bilginin ise modelleme çalışmaları için oldukça yararlı olacağının üstünde durmuşlardır.

MGT bileşenlerin her biri yorumlama için kullanılabileceği gibi tensör matrisi dikkate alınarak türetilen bazı teknikler ile de özel yorumlar yapılabilir. Bu teknikleri en başında tensör matrisine ait özdeğer ve özvektör analizleri gelmektedir. Görüntü işleme tekniklerinden biri olan tensör analizleri tekniği birçok bilimsel alanda köşe-sınır görüntüleme çalışmalarında kullanılmaktadır. Yöntem, resimlerin köşe-sınır uzanım bilgisini için bir görüntünün yönlü türevleri olan gradyent bilgisini kullanmaktadır. Buna paralel olarak, özdeğer analizinin potansiyel alan verilerinden elde edilen tensör matrislerinde kullanımı, potansiyel alan haritalarından gömülü yapılara ait uzanım ve köşe-sınır bilgisi çıkarımı için kullanılmaktadır. Pedersen ve Rasmussen (1990), basit nokta kaynakların ürettikleri gravite ve manyetik alan verilerinden elde edilen gradyent tensörlerin özdeğer analizleri için maksimum özdeğere karşılık gelen özvektörün anomaliyi oluşturan kaynak yapıya doğru olduğunu göstermişlerdir. Daha sonraları Beiki ve Pedersen (2010), gradyent tensörlerin özvektörlerini kullanarak bir kaynak yapının konumunu ve doğrultusunu hesaplayabilecekleri bir yöntem geliştirmişlerdir. Belli bir ölçüm noktası için, en büyük özdeğere karşılık gelen özvektörün kaynak kütlenin merkezine doğru olduğunu ve 2-B yapıların doğrultularının ise en küçük özdeğere karşılık gelen özvektör

yönünden tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Sertçelik ve Kafadar (2012) görüntü işleme tekniği olarak başarılı bir şekilde kullanıldığını belirttikleri yapısal tensör analizini potansiyel alan verilerinde kullandıkları çalışmalarında, tensör matrisinin özdeğer analizi yöntemiyle potansiyel verilerden gömülü yapılara ait sınır bilgilerini başarılı bir şekilde elde ettiklerini belirtmişlerdir. Yapay ve gerçek potansiyel verilere uyguladıkları tekniklerin geleneksel türevsel yöntemlerin aksine, süreksizlik sınırlarını görüntülerken verideki gürültüyü azaltan bir özelliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Oruç ve ark. (2013) Erzurum Havzası'nın tektonik yapısını ve havzadaki jeolojik yapıların uzanımlarını anlamak için ters çözüm ve sınır görüntüleme yöntemlerini karşılaştırmalı olarak kullanmışlardır. Buna göre potansiyel alan verisinden elde ettikleri Hessian matrisinin (eğrilik-curvature tensörü) özdeğerlerine ve determinantına dayanarak gravite haritasından havza yapısına ait çizgisellik bilgilerini elde etmişlerdir. Çalışmada en küçük özdeğer haritasında sıfır konturunun yapıların kenarlarına işaret ettiğini ve determinant haritasının sıfır konturunun ise yapı kenarları yakınında yer aldığını belirtmişlerdir. Zuo ve Hu (2015) gravite gradyent tensör (GGT) özdeğerlerinin elde edilmesini tartıştıkları makalelerinde yeni bir kenar belirleme tekniği önermişlerdir. Yazarlar gerçek bir jeolojik alan için pozitif ve negatif yoğunluk kaynaklarının aynı anda var olmasına rağmen GGT'den elde edilen özdeğer matrislerinin sadece pozitif ve sadece negatif değerler içermesinin bir dezavantaj olduğunu belirtmişlerdir. Geliştirdikleri yeni teknikte özdeğerleri analitik sinyal (potansiyel alan toplam gradyenti) ile normalize ederek anomalilerin pozitif ve negatif karakterleri korunmakla beraber jeolojik yapılara ait çizgiselliklerin belirlenebildiğini belirtmişlerdir.

Jeolojik olarak yeraltı oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Jeofizik yöntemler ile yerin verdiği tepkiler ölçülerek bu karmaşık yapılara ait temel fiziksel özellikler belirlenmeye çalışılır. Burada devreye giren modelleme çalışmaları ile yeraltındaki yapılara ait en uygun modellerin bulunması ve bunların doğruluğunun sorgulanması amaçlanır (Oruç, 2012). Jeofizikteki modellemede ters çözüm işlemi, yanıtı bilinen bir yeraltı yapısını tanımlamaya çalışmak olarak ifade edilmektedir. Diğer bir deyişle, elde edilen sayısal verilerden bu veriyi oluşturan yeraltı yapılara ait parametreleri belirleme işlemidir. Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere ters çözüm yöntemleri, küçük

ve büyük ölçekte jeofizik problemlerinde kullanılabilecek bir perspektife sahiptir. Argote ve ark. (2009) arkeolojik bir alanda yaptıkları manyetik çalışmada gömülü cisimlerin geometrilerinin ve derinliklerinin tespiti amacıyla manyetik modelleme tekniğini kullanmışlardır. Yapılan çalışmada, yeraltında gömülü olan fırın, duvar ve bir bina temeli tespit ederek bu sayede jeofizik modelleme çalışmalarının kazı çalışmalarının konumlandırılmasına katkısını vurgulamışlardır. Namaki ve ark. (2011), dalma-batma zonuyla ilgili jeolojik yapıyı analiz etmek için manyetik verilerin 2-B ters çözümünü kullanmışlardır. Ters çözüm sonuçlarına göre çalışma alanının neotektonik oluşumunun ana bileşeni olarak nitelendirdikleri dalan bir okyanusal kabuğun varlığına işaret etmişlerdir. Cheyney ve ark. (2015) manyetik yorumlama ve modelleme tekniklerinin mineral ve hidrokarbon aramalarında kullanımının oldukça çok ve gelişmiş olduğunu ifade ederek bu verilerin ve tekniklerin arkeolojik çalışmalarda ve sığ yüzey aramalarında kullanımının ve gelişiminin azlığına dikkat çekmişlerdir. Geliştirdikleri ters çözüm metodunu yapay veri setlerinde deneyen araştırmacılar bu yöntemi arkeolojik bir alandaki manyetik veriye uygulayarak sonuçları yer radarı verileriyle karşılaştırmışlardır. Yer radarı derinlik kesitleriyle büyük uyumluluk gösterdiklerini belirttikleri manyetik ters çözüm kesitlerinin arkeolojik alanlarda çok başarılı sonuçlar ortaya çıkardığını vurgulayarak bu tür modelleme çalışmalarının arkeojeofizik prospeksiyonda daha fazla kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Drahor ve Berge (2017) Batı Anadolu'da ilgili çalışma alanının faylanma mekanizmasını ve tektonik rejimini ortaya çıkarmak amacıyla jeofizik yöntemleri karşılaştırmalı olarak kullanmışlardır ve fay zonlarının manyetik özelliklerinden yararlanıp bu zonların tespitini manyetik ters çözüm ile gerçekleştirmeye çalışarak sonuçları diğer jeofizik yöntemlerle birlikte değerlendirmişlerdir. Ayrıca ters çözüm sonuçlarında yüksek manyetik suseptibilite varlığının alanda ana fay bloğunun içinde bulunduğuna dikkat çekmişlerdir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Jeofizikte Potansiyel Alan Kavramı ve Manyetik Potansiyel

Manyetik alanı, skaler bir manyetik potansiyelin gradyenti olarak göster(ebil)mek jeofizikte matematiksel ifadeler için kolaylık bakımından had safhada önem arz etmektedir. Özellikle manyetik gradyent tensör (MGT) bileşenlerini manyetik ölçümlerden elde edilen toplam alan değerlerinden hesaplamak skaler manyetik potansiyele bağlı ifadelere bağlıdır. Bu amaçla potansiyel teoriyi incelemek gereklidir. Manyetik potansiyel, manyetik alanın kaynağı-kökeni-sebebi bağlamında kullanılan bir fiziksel kavramdır. Fakat potansiyel, aletle ölçülebilen bir büyüklük olmayıp bir anlamda, oluşacak manyetik alanın hesaplanmasında kullanılacak matematiksel bir kolaylıktır (Sanver ve İşseven, 2007). Manyetik alan, bir kuvvet alanı olarak tanımlanabilir ve uzayın herhangi bir noktasına belli bir zamanda etki eden manyetik kuvvet olarak düşünülebilir (Blakely, 1996). Buna göre manyetik potansiyel, manyetik alan içindeki bir birim kutbu sonsuz uzaklıktan verilen bir noktaya taşımak için gerekli olan işi tanımlayan skaler bir büyüklük olarak tanımlayabiliriz. Buna göre potansiyel (iş), bileşenlerinin değişim oranı (yani türevi) o yöndeki ilgili kuvvet bileşenini veren kuvvet alanı uzayının bir fonksiyonu olarak tanımlanır (Hinze ve ark., 2013). Burada F kuvveti (Şekil 3.1.) tarafından yapılan iş,

$$W(b, a) = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} \quad (3.1)$$

ile ifade edilir (Blakely, 1996). Böylece a noktasından b noktasına sonsuz farklı yol ile gidilebilir. Bu tür vektör alanlarına korunumlu (konservatif) alan denir. Yani konservatif alanlarda yapılan iş yoldan bağımsız ve başlangıç ile bitiş noktalarıyla ilgilidir. Zira yapılması gereken iş, bir çizgi integrali ile hesaplanacaktır ve bu integral, fonksiyonun a ve b noktalarındaki değerine göre belirlenecektir. Bu değer ise bütün

yollar için aynıdır. Bu şekilde korunumlu bir alanda bu parçacığı x ekseninde Δx kadar bir mesafe hareket ettirmek için yapılan iş, Blakely (1996)'dan,

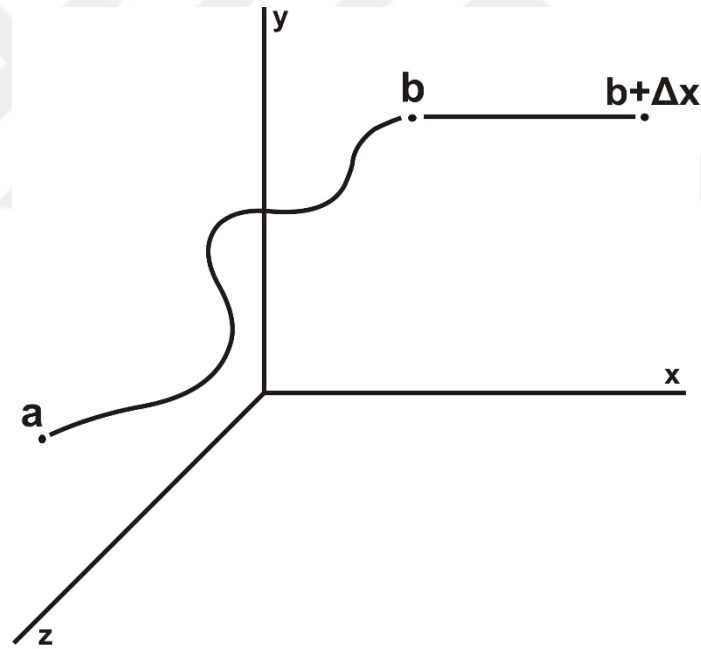
$$W(b, a) + W(b + \Delta x, b) = W(b + \Delta x, a) \quad (3.2)$$

basit bir aritmetik işlem ile,

$$W(b + \Delta x, b) = W(b + \Delta x, a) - W(b, a) \quad (3.3)$$

olarak elde edilir (Şekil 3.1.). Burada,

$$W(b + \Delta x, b) = \int_b^{b+\Delta x} \mathbf{F}_x(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) dx \quad (3.4)$$



Şekil 3.1. Bir F kuvvet alanı içinde a noktasından b noktasına olan herhangi bir yol çizgisi ve x ekseninde Δx mesafesi kadar hareket (Blakely 1996'dan düzenlenerek)

olduğu görülebilir. İntegralin çözümü için, Δx 'in çok küçük (dx) olacak şekilde, 3.4 eşitliğini 3.3 eşitliğinde yerine yazarak 3.3 eşitliğinin her iki tarafını Δx 'e bölersek,

$$\frac{W(b+\Delta x, a) - W(b, a)}{\Delta x} = F_x(x + \Delta x, y, z) \quad (3.5)$$

elde edilir. Ortalama değer teoremine (mean value theorem) göre eğer sürekli ve türevlenebilir bir f fonksiyonu varsa ve hiçbir zaman $f' \neq 0$ ve $a \neq b$ ise,

$$f'(c) = \frac{f(b)-f(a)}{b-a} \quad , \quad a < c < b \quad (3.6)$$

elde edilir. Buna göre 3.5 eşitliğini düşünersek

$$F_x = \frac{\partial W}{\partial x} \quad (3.7)$$

elde edilir. Yani herhangi bir kuvvet bileşeni, potansiyelin (işin) ilgili yöndeki türevidir. Bu işlemi 3 boyutta kartezyen koordinatlarda (x, y, z) düşünersek,

$$\mathbf{F}_x(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \left(\frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y}, \frac{\partial W}{\partial z} \right) = \nabla W \quad (3.8)$$

şeklinde tanımlayabiliriz. Buna göre bir vektörel kuvvet skaler potansiyelin gradyenti ile ifade edilir. Ayrıca, korunumlu kuvvet alanlarında yapılan işin yoldan bağımsız olduğunu düşünerek, a noktasından b noktasına ve farklı bir yoldan b noktasından a noktasına hareket ile kapalı bir döngü yolda hareketi düşünecek olursak,

$$W(b, a) + W(a, b) = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} + \int_b^a \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \oint \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (3.9)$$

ile ifade edebiliriz. Buna göre kapalı bir döngü boyunca yapılan toplam iş sıfırdır. Vektörel analizde rotasyonelin (curl) anlamı ve tanımı,

$$\text{rot } \mathbf{F} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\oint \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}}{\Delta S} = \nabla \times \mathbf{F} \quad (3.10)$$

şeklinde bilinmektedir. Buna göre, $\oint \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = 0$ olduğu için $\mathbf{F}$ vektörel kuvvet alanının rotasyonele sahip olduğu söylenemez (Öztürk, 1995).

$$\nabla \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \mathbf{a}_x & \mathbf{a}_y & \mathbf{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = \left[\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right] \mathbf{a}_x + \left[\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right] \mathbf{a}_y + \left[\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right] \mathbf{a}_z = 0 \quad (3.11)$$

Burada parantez içlerindeki bütün işlemler, skaler fonksiyonların karışık kısmi türevlerinin sıralarının değişebilir olduğundan kısmi türevler birbirine eşit çıkacaktır (Yaramancı, 1986). Çünkü $\mathbf{F}$ vektörü, bir skaler potansiyelin gradyenti olarak yazılabilir. Buna göre,

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{F} = \nabla \times (\nabla W) &= \left[\frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 W}{\partial z \partial y} \right] \mathbf{a}_x \\ &+ \left[\frac{\partial^2 W}{\partial z \partial x} - \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \right] \mathbf{a}_y + \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial x} \right] \mathbf{a}_z = 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

elde edilir. Bu durum aynı zamanda Stokes teoremi ile de kanıtlanabilmektedir. Zira Stokes teoremine göre bir S yüzeyini sınırlayan yol etrafında alınan $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$ çarpımının kapalı çizgi integrali, S yüzey alanı üzerinde alınan rot $\mathbf{F}$ 'in yüzey integrali ile aynıdır.

$$\iint_S (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot d\mathbf{s} = \oint \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} \quad (3.13)$$

Eşitliğin her iki tarafı karşılaştırıldığında kapalı yol boyunca $\mathbf{F}$ kuvvetinin yaptığı iş sıfır olduğundan dolayı $\nabla \times \mathbf{F} = 0$ (irrotasyonel) olması gerektiği ortaya çıkmaktadır (Lowrie, 2011).

Öte yandan bir $\mathbf{F}$ vektör alanında herhangi bir kaynak veya yutak noktası yok ise bu durumda alana giren ve çıkan alan çizgilerinin sayısı birbirine eşit olacağından toplam akı sıfır olur. Bu durumda akı (ψ), bir yüzeyin en küçük bir parçasına dik (normal) olarak giren ve çıkan alan çizgilerinden, bir yüzey integrali ile

$$\psi = \iint_S \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (3.14)$$

olarak bulunur ve daha basitçe

$$\psi = \iint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \oint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (3.15)$$

ile gösterilebilir. Vektörel analizde diverjansın anlamı ve tanımı göz önüne alırsak,

$$\text{div } \mathbf{F} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\iint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}}{\Delta v} = \nabla \cdot \mathbf{F} \quad (3.16)$$

buna göre $\mathbf{F}$ korunumlu vektör alanının diverjansının sıfır olduğu görülecektir.

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = 0 \quad (3.17)$$

Bu durum aynı zamanda Gauss teoremi olarak da bilinen Diverjans teoremi ile $\mathbf{F}$ vektörünün diverjansının hacim integrali, bu hacmin dış yüzeyi S boyunca olan yüzey integraline eşittir şeklinde ifade edilir. Böylece, bir vektör alanının bir yüzey boyunca toplam akısı, bu vektör alanın yönsel türevlerinin toplamına yani hacmine eşittir (Sadiku, 2001; Pekşen, 2005).

$$\iint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \iiint_V \nabla \cdot \mathbf{F} \, dv \quad (3.18)$$

Eşitliğin her iki tarafı karşılaştırıldığında kapalı yüzeydeki toplam akı 0 olduğundan dolayı $\nabla \cdot \mathbf{F} = 0$ (solenoidal, sarmal) olması gerektiği ortaya çıkmaktadır (Roy, 2008). Rotasyonelde olduğu gibi $\mathbf{F}$ vektörünü skaler bir potansiyelin gradyenti şeklinde yazarsak,

$$\nabla \cdot (\nabla W) = \nabla^2 W = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = 0 \quad (3.19)$$

elde edilir. Bu yeni eşitliğe Laplasiyen denilir. Buna göre skaler bir fonksiyonun laplasiyeni de bir skalerdir. Eğer bu değer sıfır ise bunun anlamı, laplasiyen denkleminin tanımlı olduğu alanda kaynak ve yutak noktası bulunmamaktadır veya kaynak ve yutak noktası bulunmayan alanda laplasiyen sıfıra eşittir şeklinde ifade edilir (Pekşen, 2005). Yermanyetik alanı ölçümlerinin çoğu manyetik malzemelerin

neredeyse bulunmadığı ortamlarda gerçekleştirilmektedir (Blakely, 1996). Buna göre manyetik alan kaynaklarının bulunmadığı bir bölgede (manyetik alan ölçümlerinin yapıldığı dünya yüzeyinin hemen üzerindeki boşluk gibi) elektrik veya yer değiştirme akımlarının var olmadığını varsayabiliriz (Lowrie, 2011). Bu durumda, korunumlu bir kuvvet olan manyetik alan (indüksiyon) $\mathbf{B}$ için,

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (3.20)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.21)$$

eşitlikleri yazılabilir. Sonuç olarak manyetik alan, skaler bir manyetik potansiyelin (U) gradyenti (türevi) olarak

$$\mathbf{B} = \{\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y, \mathbf{B}_z\} = \nabla U = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3.22)$$

yazılabilir. Burada eşitlik 3.22'yi 3.21'de yerine koyarsak

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot (\nabla U) = \nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (3.23)$$

denkleme ulaşılır. Buna göre kaynak bölgenin dışında manyetik potansiyel Laplace denklemini sağlar ve harmoniktir denir. Harmonik bir fonksiyonun herhangi bir uzaysal türevi de harmoniktir (Blakely, 1996). Örneğin, eğer D kartezyen koordinatlarda herhangi bir uzaysal türev operatörü ise

$$D \nabla^2 U(x, y, z) = \nabla^2 D U(x, y, z) \quad (3.24)$$

eşitliği yazılabilir. Bu, manyetik alan ve manyetik alan bileşenlerinin ve MGT bileşenlerinin de birer harmonik potansiyel alan olduklarını gösteren ve ileriki bölümlerde oldukça faydalanılacak olan bir eşitliktir. Buna örnek olarak,

$$\nabla^2 \mathbf{B}_i = \nabla^2 \left(\frac{\partial U}{\partial i} \right) = \frac{\partial}{\partial i} (\nabla^2 U) = 0 \quad (3.25)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B}_{ij} = \nabla^2 \left(\frac{\partial U}{\partial i \partial j} \right) = \frac{\partial}{\partial i \partial j} (\nabla^2 U) = 0 \quad (3.26)$$

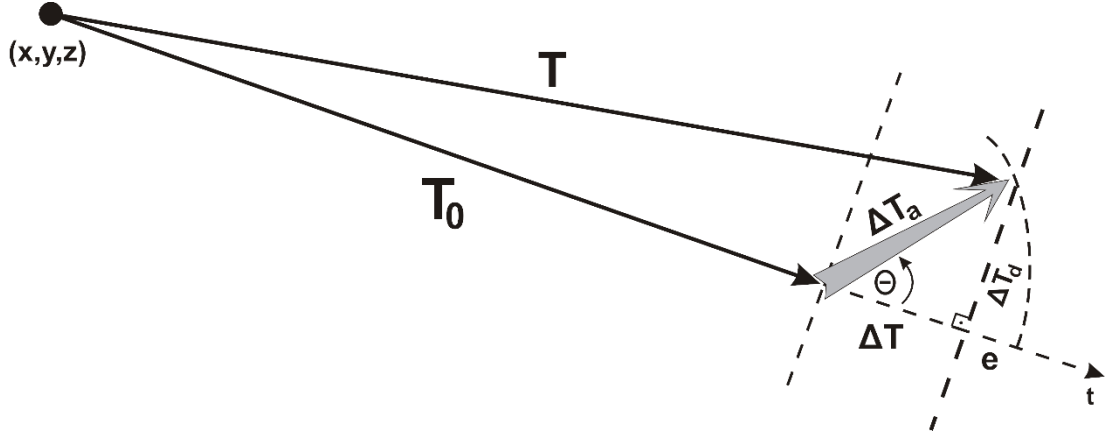
eşitlikleri yazılarak manyetik alanın ve manyetik gradyent tensörün herhangi bir bileşeninin Laplace denklemini sağladıkları gösterilebilir (Clark, 2014).

3.2. Yer Manyetik Alanı ve Bileşenleri

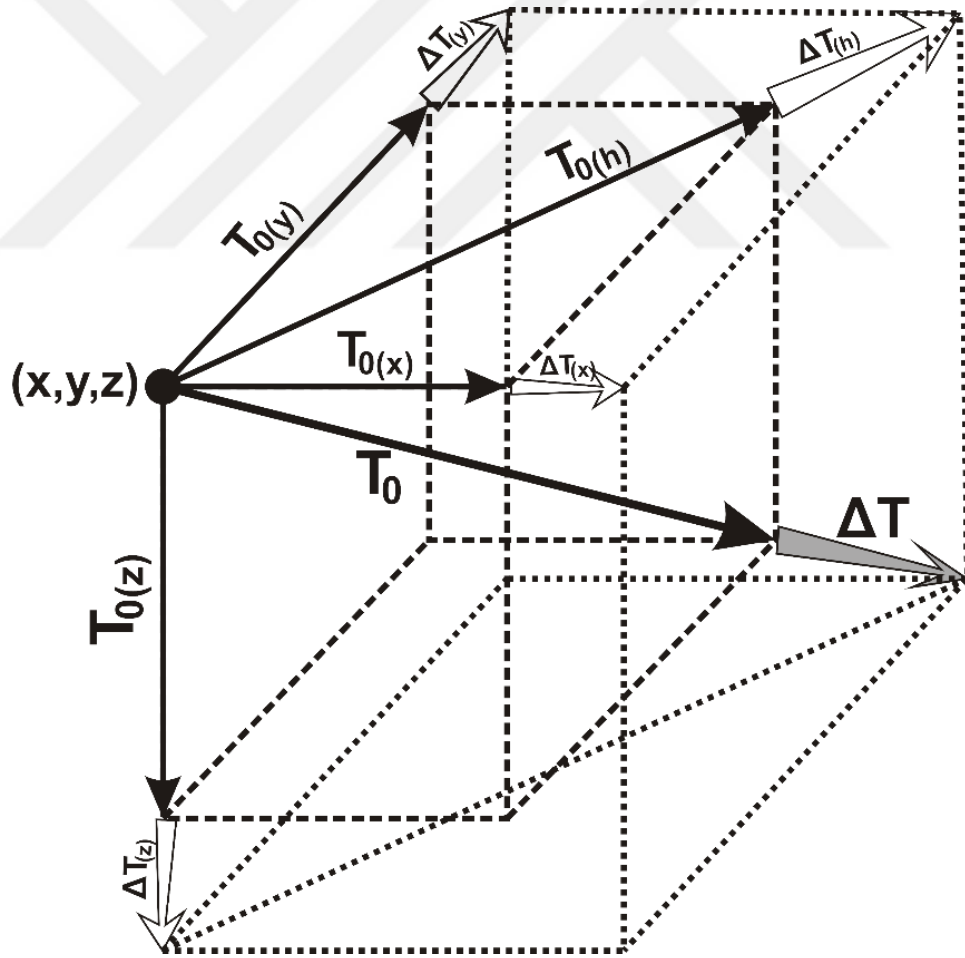
Gömülü arkeolojik yapıların sınırlarının görüntülenmesinde temel yöntemlerden birisi manyetik yöntemdir. Yeraltında bulunan ve farklı manyetik duyarlığa (suseptibilite) sahip kütleler yeryüzünde ölçülen manyetik anomalilere neden olurlar (Sanver ve İşseven, 2007). Kayaçların manyetik duyarlılığını büyük ölçüde manyetit (Fe_3O_4) minerali içeriği belirlemektedir. Gömülü arkeolojik yapıları kaplayan örtü birimi ile bu arkeolojik yapılar arasında suseptibilite farkından kaynaklanan anomaliler jeomanyetik alanda (yerin normal-asıl manyetik alanı, rejyonal alan) manyetik cihazlarla yeryüzünde ölçülebilecek düzeyde bazı değişimler oluştururlar. Bilindiği üzere yeryüzü, genellikle kuvaterner yaşlı alüvyal veya dilüvyal sedimanter kayaçlardan oluşur ve bu örtü yapı manyetit minerali içeriği bakımından arkeolojik yapılara göre oldukça fakirdir. Çünkü arkeolojik yapılar genellikle blok halinde bulunan magmatik kayaçlardan oluşmaktadır ve magmatik kayaçlarda ise manyetit minerali oldukça yaygın olarak bulunmaktadır. Bu durumda sayısal değer (genlik, büyüklük) bakımından düşük olsa bile, duyarlılığı çok küçük olan manyetik cihazların tespit edebileceği ve bu iki birime nispeten kuvvetli bir anomali oluşur. Arkeolojik prospeksiyonda manyetik yöntem ile hedeflenen bu anomalilerin ölçülerek gömülü kalıntı yapılarının tespiti için yorumlanmasıdır.

Havada, karada veya denizde yapılan yüzey araştırmaları amacıyla yapılan manyetik ölçümlerin birçoğunda manyetometre ile yer manyetik alanının toplam alan şiddeti (skaler genliği) ölçülmektedir (Hinze ve ark., 2013). Toplam alan bileşeni ölçümlerinde alet ile jeomanyetik (yerin asıl manyetik alanı-rejyonal) alan ($\mathbf{T}_0$) ve anomali alanının ($\Delta \mathbf{T}_a$) bileşkesi ölçülmektedir (Şekil 3.2.).

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_0 + \Delta \mathbf{T}_a \quad (3.27)$$



Şekil 3.2. Toplam manyetik alan vektör sunumu (Lourenco ve Morrison, 1973 ve Hinze ve ark., 2013'ten düzenlenerek). T toplam manyetik alan vektörü, T_0 jeomanyetik alan veya rejyonal alan vektörü, ΔT_a anomali alanı, ΔT anomali alanı vektörünün jeomanyetik alan vektörü üzerine izdüşümü (toplam alan anomalisi) ve ΔT_d anomali alanı ΔT_a 'nın jeomanyetik alana dik olan bileşeni



Şekil 3.3. Toplam alan vektörü (T) ve bileşenleri için rejyonal alanla (T_0) aynı yönde uzanan anomali alanı (toplam alan anomalisi, ΔT) kabulüne dayanan gösterim (Hinze ve ark., 2013'ten düzenlenerek)

Bu durumda toplam alan ($\mathbf{T}$), rejyonal alan ($\mathbf{T}_0$) ile anomali alanının ($\Delta\mathbf{T}_a$) vektörel toplamıdır. Buna göre ölçülen skaler toplam alan şiddeti (T),

$$T = |\mathbf{T}| = \sqrt{T_0^2 + \Delta T_a^2} \quad (3.28)$$

ile verilir (Hinze ve ark., 2013). İdeal olarak, anomali kaynağını anlamak için bilinmek istenen, $\Delta\mathbf{T}_a$ anomali alanının her üç bileşeni veya hiç değilse bir bileşenidir (Blakely, 1996). Bununla beraber çoğu durumda anomali alanı vektörünün büyüklüğü jeomanyetik alana göre oldukça küçük ($|\Delta\mathbf{T}_a| \ll |\mathbf{T}_0|$) olduğundan sonuç olarak anomali alanı, jeomanyetik alan üzerine adeta iz düşmekte olur (Şekil 3.2.).

$$\Delta\mathbf{T} = \Delta\mathbf{T}_a \cdot \frac{\mathbf{T}_0}{|\mathbf{T}_0|} = \Delta\mathbf{T}_a \cdot \hat{\mathbf{t}} \approx \Delta\mathbf{T}_a \quad (3.29)$$

Burada, $\Delta\mathbf{T}$ (toplam alan anomalisi) izdüşüm vektörüdür ve $\hat{\mathbf{t}}$ jeomanyetik alan (rejyonal alan) yönündeki birim vektördür. Buna göre anomali alanı, yermanyetik alanı ile aynı yönde kabul edildiğinden dolayı alet jeomanyetik alanın şiddetindeki değişimleri kaydetmektedir (Sanver ve İşseven, 2007). Zira bu durumda anomali alanı, jeomanyetik alanı ana yönünden göz ardı edilebilecek kadar çok küçük olarak saptırabilir (Schmidt, 2006). Bu kabule göre toplam alan şiddeti Şekil 3.3.'teki gibi,

$$T = \sqrt{T_0^2 + \Delta T^2} \quad (3.30)$$

ile verilir. Burada 3.29 eşitliği, ΔT anomali alanı (toplam alan anomalisi) için, veri işlemin ve yorumlamanın teorik temelini oluşturmaktadır. Zira eğer $\Delta T \approx \Delta T_a$ olarak tanımlanamazsa sonraki geleneksel veri-işlem yöntemlerinin uygulanması gerçekleştirilemez. Çünkü bu durumda ΔT , bir harmonik fonksiyon olmayıp Laplace bağıntısını sağlamadığından bir manyetik potansiyelin türevi olarak ifade edilemez. Bir başka deyişle, herhangi bir manyetizasyon farklılığından (kontrastından) kaynaklanan bir anomali alanı ΔT_a için toplam alan T ölçümlerini yorumlamak $\Delta T_a \approx \Delta T$ kabulüne dayanır. Buna göre, Şekil 3.3.'deki gibi anomali alanı (toplam alan anomalisi) ΔT , rejyonal jeomanyetik alan (T_0) yönünde (co-linear) uzanmaktadır

(Hinze ve ark., 2013). Dolayısıyla toplam alan anomali şiddeti (ΔT), basit skaler bir eşitlik ile,

$$\Delta T = T - T_0 \quad (3.31)$$

şeklinde verilir (Şekil 3.3.). Bu durumda skaler toplam alan anomali şiddeti,

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_x^2 + \Delta T_y^2 + \Delta T_z^2} \quad (3.32)$$

eşitliği ile verilir (Hinze ve ark., 2013). Eşitlik 3.31'e göre uygulamada yapılan kabulden dolayı ihmal edilen hata miktarı (e),

$$e = T - (T_0 + \Delta T) \quad (3.33)$$

ile verilir. Burada T yerine, Şekil 3.2.'ye göre,

$$T = [(T_0 + \Delta T)^2 + \Delta T_d^2]^{1/2} \quad (3.34)$$

yazarsak

$$e = [(T_0 + \Delta T)^2 + \Delta T_d^2]^{1/2} - (T_0 + \Delta T) \quad (3.35)$$

elde edilir. Bu eşitliği $(T_0 + \Delta T)$ parantezine aldığımızda

$$e = (T_0 + \Delta T) \left\{ \left[1 + \left(\frac{\Delta T_d}{T_0 + \Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (3.36)$$

eşitliğine ulaşırız. $\left[1 + \left(\frac{\Delta T_d}{T_0 + \Delta T} \right)^2 \right]^{1/2}$ teriminin yaklaşık değerini bulmak için Binom açılımı kullanılır (Sanver ve İşseven, 2007; Hinze ve ark., 2013). Binom açılımı,

$$(1 + x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}x^3 + \dots \quad (3.37)$$

şeklinde ifade edebiliriz. $\left(\frac{\Delta T_d}{T_0 + \Delta T}\right)^2 = x$ olarak alıp binom açılımını uyguladıktan sonra ilk iki terimini alırsak

$$e \cong (T_0 + \Delta T) \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T_d}{T_0 + \Delta T} \right)^2 - 1 \right] \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T_d^2}{T_0 + \Delta T} \right) \quad (3.38)$$

sonucunu elde ederiz. Buna göre, eğer $\Delta T_a \ll T_0$ kabul edilirse $\Delta T_a \approx \Delta T$ olacağından dolayı $\Delta T_d = 0$ olur ve bu durumda hata miktarı $e = 0$ olur. Hata için olabilecek en kötü durum $\Theta = 90^\circ$ olması durumundadır. Buna göre $\Delta T_a = \Delta T_d$ olur ve hata miktarı

$$e = \frac{\Delta T_d^2}{2T_0} \quad (3.39)$$

olarak elde edilir. Hinze ve ark. (2013) belirttiği gibi, yukarıda yapılan kabul ($\Delta T \approx \Delta T_a$), bu farkın (e) ya sıfıra eşit olmasına veya ihmal edilebilecek kadar küçük olmasına bağlıdır. Bu varsayım çoğu uygulamada geçerlidir, fakat büyük demir cevheri yatakları üzerinde veya çelik nesneler üzerinde veya ultra bazik (demir ve magnezyum içeri oldukça yoğun magmatik) kayaçların üzerinde oluşabilecek 10.000 nT ve daha büyük anomali genlikleri için geçerli değildir. Hinze ve ark. (2013) yukarıdaki varsayım ($\Delta T_a \ll T_0$) doğrultusunda, 30.000 nT bir jeomanyetik alan (T_0) genliğine karşı 500 nT bir anomali alanına (ΔT_a) göre hatanın sadece 4 nT olduğu göstermiştir. Bu tezin de konusu olan arkeolojik alanlarda karşılaşılabilecek olan en büyük hata miktarına ilişkin bir değeri; ülkemizdeki jeomanyetik alan değerini yaklaşık olarak $T_0 = 46000$ nT alıp 100 nT genliğinde varsayılan bir anomali değeri için yaklaşım yaptığımızda, hata değerini 0,11 gibi çok küçük bir değer olarak elde ederiz. Dolayısıyla arkeolojik prospeksiyon amacıyla $\Delta T \approx \Delta T_a$ kabulü yapılarak anomali alanının, rejyonel jeomanyetik alan (T_0) yönünde (co-linear) uzanmakta olduğu varsayımı hiçbir ciddi hataya neden olmayacaktır.

Bu durumda, yani ΔT ile T_0 aynı doğrultuda uzanmaları durumunda toplam manyetik alan anomalisi ΔT , basit bir skaler çıkarma işlemi ile eşitlik 3.31 sayesinde belirlenebilir. Buna göre, anomali alanı vektörünün manyetometreler ile ölçülen bileşeni olan toplam alan anomalisi jeomanyetik alan yönünde, anomali kaynağı yapının manyetik potansiyelinin türevi ile ifade edilebilir (Henderson ve Zietz, 1948; Lourenco ve Morrison, 1973; Blakely, 1996).

$$\Delta T = \hat{\mathbf{t}} \cdot \nabla U = -\frac{\partial}{\partial t}(U) \quad (3.40)$$

Bu durumda skaler bir potansiyelin (U) türevi ile ifade edilebilen ΔT , Laplace denklemini sağlayan bir potansiyel alan olur. Bu duruma başka bir açıdan da baktığımızda,

$$\nabla^2 \Delta T = \nabla^2 (\Delta T_a \cdot \hat{\mathbf{t}}) \quad (3.41)$$

eşitliği için, jeomanyetik alanının doğrultusunun lokal ölçekteki çalışma alanı boyutları için sabit (değişmez) olacağından dolayı $\hat{\mathbf{t}}$ terimi bir sabit olacaktır ve laplasiyenin dışına alınabilecektir (Bhattacharyya, 1965; Blakely, 1996; Milea ve ark. 2010).

$$\nabla^2 \Delta T = \hat{\mathbf{t}} \cdot (\nabla^2 \Delta T_a) \quad (3.42)$$

Eşitlik 3.24'e göre herhangi bir harmonik potansiyel alanın özel bir bileşeni de harmoniktir ve bir potansiyel alan (Blakely, 1996) olduğundan ΔT_a 'nın izdüşüm bileşeni olan ΔT için de,

$$\nabla^2 \Delta T = 0 \quad (3.42)$$

eşitliği yazılabilir ve anomali alanın yukarıda yapılan kabuller altında harmonik ve bir potansiyel alan olduğu söylenebilir. Buna göre anomali alanı ΔT ,

$$\Delta T = \hat{\mathbf{t}} \cdot \nabla U = \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{t}}} (U) \quad (3.43)$$

eşitliği kullanılarak jeomanyetik alan yönünde, skaler bir manyetik potansiyelin türevi ile ifade edilebilir (Baranov, 1957, Blakely, 1996).

Bütün bunlara göre toplam alan anomali haritaları, ölçümler sonucu elde edilen TMA haritalarından yer asıl alanı (jeomanyetik alan) değerlerinin ya IGRF rejyonel değerlerinin çıkarılması ile veyahut trend analizi gibi alçak geçişli süzgeçler yardımıyla rejyonel-rezidüel ayrımı yapılmasıyla elde edilebilir (Emerson ve ark., 1985; Clark, 2013). Buna göre rezidüel veriden elde edilecek gradyent tensörler için de anomali kaynağı manyetik yapıdan kaynaklanmaktadır şeklinde düşünülebilir (Nelson, 1988). Nitekim, bu çalışmada da ileriki bölümlerde görüleceği üzere, elde edilen ham veriden birinci derecede trend yüzeyi çıkarılarak toplam alan anomali haritası elde edilmiştir ve tez içeriğindeki bütün teknikler bu veri kullanılarak çalışılmıştır.

3.3. Manyetik Anomalilerin Sınır Görüntüleme Analizleri

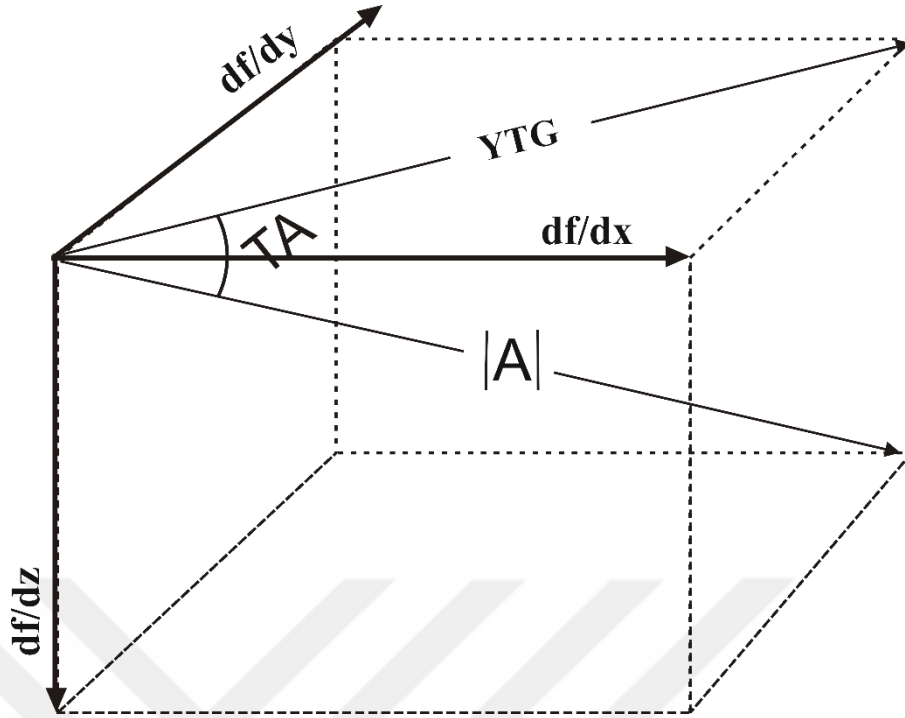
3.3.1. Tilt açısı tekniği

Tilt açısı düşey türevin yatay türevlerin mutlak genliğine (YTG) oranı ile tanımlanabilir (Miller ve Singh, 1994). Verduzco ve ark. (2004) tilt açısını manyetik harita verileri için,

$$TA = \tan^{-1} \left[\frac{\left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)}{YTG} \right] \quad (3.44)$$

olarak vermiştir. Burada,

$$YTG = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2} \quad (3.45)$$



Şekil 3.4. Herhangi bir noktada manyetik alanın yatay türevlerinin ve düşey türevinin doğrultuları ve tilt açısının (TA) tanımı. $|A|$ analitik sinyali temsil eder.

olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.4.). Burada f potansiyel alanı, manyetik alanı temsil ederken $\partial f / \partial z$ manyetik alanın düşey türevini, $\partial f / \partial x$ ve $\partial f / \partial y$ ise x ve y doğrultulu yatay türevleri göstermektedir.

Tilt açısı eşitliğine dikkat edilirse denklemdeki ters tanjant özelliğinin tilt açısı değerlerini $\pm \pi/2$ arasında tutacağı görülebilir. Bu sayede farklı derinliklerdeki potansiyel kaynakların anomalileri de bu değerler arasında yer alır. Zira teknik, türevlerin oranlanmasından dolayı farklı dalga boylarında olan anomalilerin genliklerinden bağımsız olarak çözümler üretmektedir. Bundan dolayı sığ ve derin kaynaklara aynı anda çözüm üretebilen teknik bir kazanç filtresi gibi davranır. Salem ve ark. (2007) tilt açısının potansiyel kaynakların sınırları ve derinlikleri için bilgi üretebildiğini ispatlamışlardır. Buna göre, z_0 derinlikli ve yeryüzünde x_0 yatay konumunda bulunan y doğrultusunda sonsuza uzanan iki boyutlu yarı sonsuz manyetik bir kontak modelinin yatay ve düşey türev bağıntıları Nabighian (1972)'de

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \text{YTG} = 2 \cdot K \cdot F \cdot c \cdot \sin d \cdot \frac{Z_0 \cos(2I - d - 90) + (x - x_0) \sin(2I - d - 90)}{(x - x_0)^2 + Z_0^2} \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = 2. K. F. c \sin d \frac{(x-x_0) \cos(2I-d-90) - Z_0 \sin(2I-d-90)}{(x-x_0)^2 + Z_0^2} \quad (3.47)$$

şeklinde verilmiştir. Denklemlerde K, kontağın suseptibilite kontrastı, F manyetik alan şiddeti ve d kontağın eğim açısıdır. c terimi ise

$$c = 1 - \cos^2 i \sin^2 D \quad (3.48)$$

ile verilir (Ensari, 2012). D açısı manyetik deklinasyon ve i açısı inklinasyon açısıdır. I terimi ise etkin inklinasyon açısıdır ve $\tan I = \tan i / \tan D$ ile bulunur. Yer manyetik alanının düşey olması ($I = 90^\circ$ iken) varsayımı altında yarı sonsuz kontağın düşey olduğu ($d = 90^\circ$) düşünülürse denklem (3.46) ve (3.47)

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 2. K. F. c \frac{Z_0}{(x-x_0)^2 + Z_0^2} \quad (3.49)$$

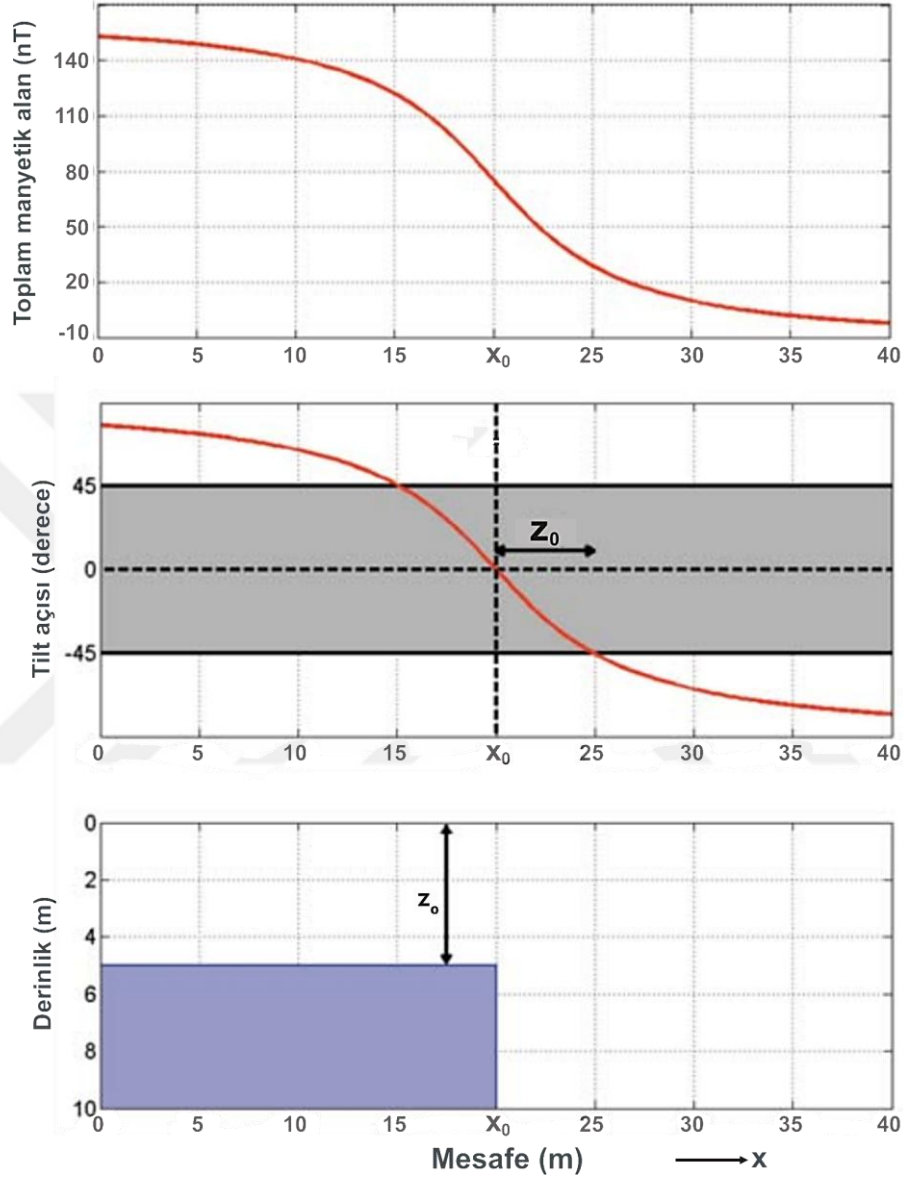
$$\frac{\partial f}{\partial z} = 2. K. F. c \frac{(x-x_0)}{(x-x_0)^2 + Z_0^2} \quad (3.50)$$

şeklinde yazılabilir. Bu iki eşitlik (3.44) bağıntısında yerine konulduğunda

$$TA = \tan^{-1} \left[\frac{(x-x_0)}{Z_c} \right] \quad (3.51)$$

denklemini elde edilir (Salem ve ark. 2007). Denklem (3.51)'e göre tilt açısı kaynak modele ait olan yatay konum (x_0) ve derinlik (Z_0) bilgileri hakkında bir çözüm ortaya koyar. Şekil 3.5.'de manyetik alanın inklinasyon (eğim) açısı 90° , denklinasyon (sapma) açısı 0° ve mıknatıslanma şiddeti 1 A/m kullanılarak oluşturulmuş bir düşey kontak anomalisi görülmektedir. Dikkat edilirse tilt açısının 0 değeri tam olarak model kaynağın kenarı üzerinde yani $x = x_0$ gözlem noktasında yer almaktadır. Böylece tilt açısının 0 konturunun izlenmesiyle yapı kenarlarına bağlı olarak yapının konumu ve uzanım şekli de ortaya çıkarılabilir. Ayrıca dikkat edilirse $(x - x_0) = Z_0$ iken tilt açısı değerleri $\pm 45^\circ$ ($\pm 0,785$ radyan) çizgilerinden geçmektedir. Buradan, tilt açısının

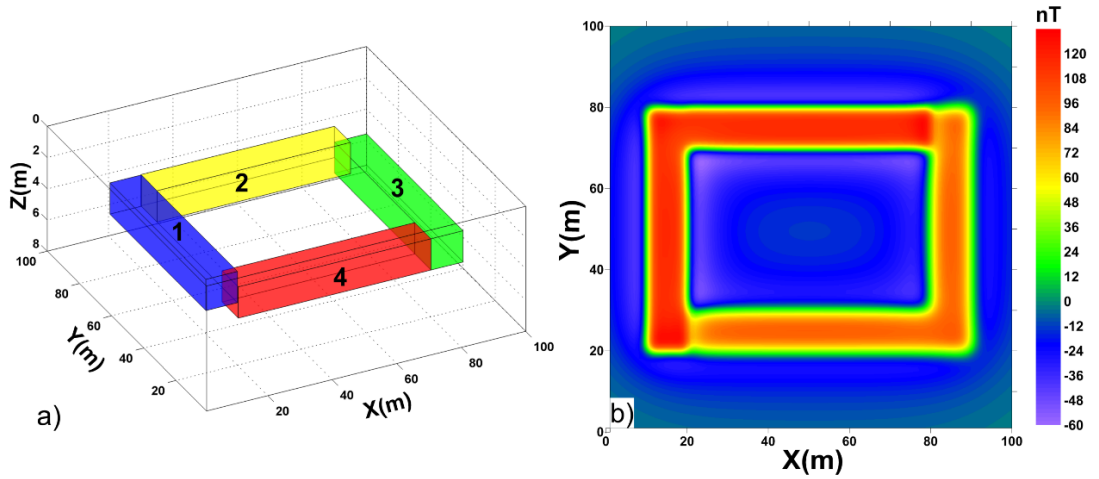
$\pm 45^\circ$ çizgileri arasındaki yatay uzaklığın yarısı veya tilt açısının $\pm 45^\circ$ ile 0 değeri arasındaki uzaklık model kaynağın derinliğini (Z_0) vermediği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.5. Düşey kontak modelinin oluşturduğu manyetik anomali ve tilt açısı değerleri (Salem ve ark., 2007'den düzenlenerek).

Manyetik verilerin çoğunluğu x-y düzleminde grid verisi olarak kullanılmaktadır. Bunun için tilt açısı tekniğinin harita verilerinde de etkinliğinin sınanması gerekir. Bu amaçla üst sınırı bir kontak yüzeyi gibi davranan prizma modelleri kullanılabilir. Böylece bu prizmaların manyetik anomalileri hesaplanarak elde edilen harita verisine tilt açısı tekniği uygulanabilir. Gömülü yapıların araştırıldığı arkeojeofizik

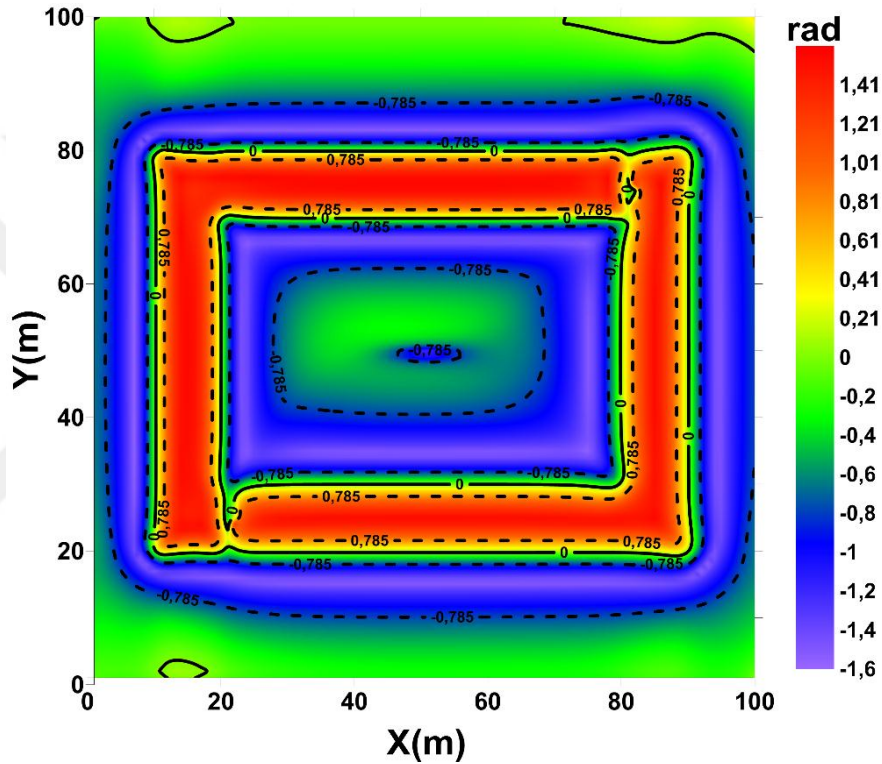
çalışmalarında aranan yapıların yer aldığı derinlikler çoğunlukla 5 metreyi geçmeyecek şekilde sığ derinliklerdir. Arkeolojik prospeksiyon çalışmalarında aynı alanda derinlikleri birbirinden farklı yapılara da çok sık rastlanmaktadır. Ayrıca gömülü bina kalıntılarının araştırılmasında geometrik şekilli yapılarla da sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu nedenle üretilecek yapay veri için model olarak düzgün prizmatik yapıları farklı derinliklerde kullanmak uygun olacaktır. Bu amaçla üst derinlikleri birbirinden farklı olan 4 adet prizma kullanılarak yapay manyetik anomali elde edilmiştir (Şekil 3.6.). Prizma yapılarına ait yapay veriler Arısoy ve Dikmen (2011) tarafından üretilen Potensoft programı kullanılarak hesaplanmıştır. Manyetik alanın inklinasyon (eğim) açısı 90° , denklinasyon (sapma) açısı 0° ve mıknatıslanma şiddeti 1 A/m dir. Kalınlıkları 2'şer metre olan prizmalardan 1 ve 2 numaralı prizmaların üst derinliği 2 metre iken, 3 ve 4 numaralı prizmalar 3 metre üst derinliğine sahiptir (Şekil 3.6.a). Elde edilen toplam manyetik anomali aynı derinlikler için simetrik anomaliler üretirken derinlik farklılığına bağlı olarak anomali şiddetinde farklılıklar gözlenmektedir (Şekil 3.6.b). Bu sayede tekniklerin farklı derinliklerdeki yapılardan kaynaklanan ve birbirinden genlik olarak farklı olan anomalilere de verdiği tepki gözlemlenebilir.



Şekil 3.6. (a) 3-Boyutlu yapay model (b) prizmalardan üretilen toplam manyetik alan anomalisi. 1 ve 2 numaralı prizmaların üst derinliği 2 m, 3 ve 4 numaralı prizmaların üst derinliği 3 metredir.

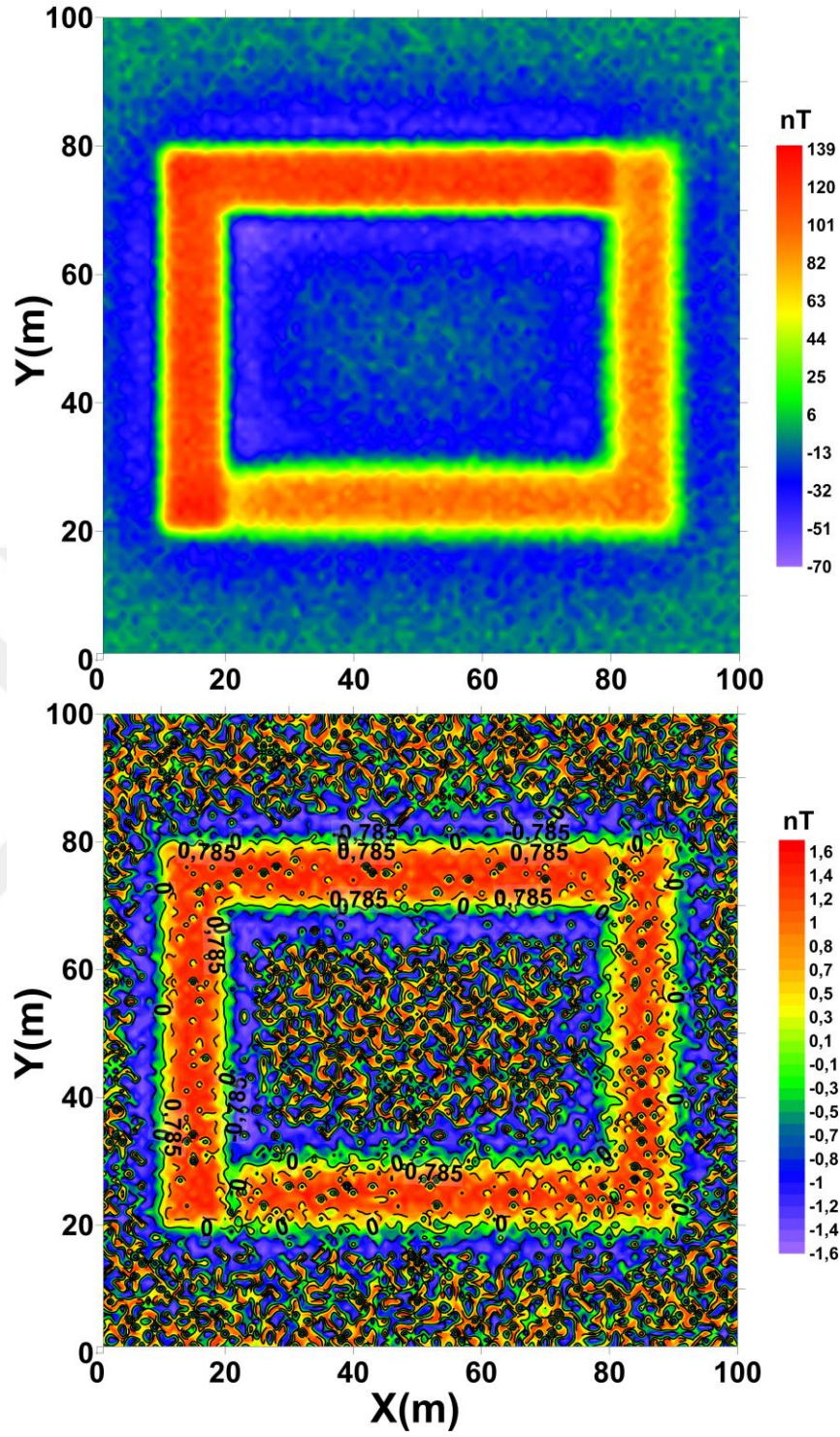
Şekil 3.7.'de yapay toplam manyetik anomalisinin tilt açısı haritası görülmektedir. Tilt açısına ait 0 konturunun (kalın düz çizgi) prizmaların üst taraflarına ait sınırları takip ettiği görülmektedir. Ayrıca farklı derinlikteki yapılara aynı genliklerin üretildiği de

dikkat çekmektedir. Prizmaların üst derinliği bilgisi için 1 ve 2 numaralı prizmaların anomalilerine bakıldığında 0 ile $\pm 0,785$ radyan konturları arasındaki uzaklığın veya $\pm 0,785$ radyan konturları arasındaki uzaklığın yarısının yaklaşık olarak 2 m olduğu görülmektedir. Benzer şekilde 3 ve 4 numaralı prizmaların yer aldığı anomalilere bakıldığında ise üst derinlik bilgisinin yaklaşık 3 m olduğu görülecektir. Bütün bunlar tilt açısı tekniğinin gömülü yapılara ait sınırları izlemede ve kabaca derinlik belirlemede başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.7. Prizmalardan elde edilen anomalinin tilt açısı haritası (0 konturu kalın düz çizgi ile ve $\pm 0,785$ konturları kesikli çizgi ile çizdirilmiştir.)

Arkeolojik çalışma alanları manyetik ölçümler için karmaşık ve gürültülü alanlar olarak tanımlanabilir. Bu tür alanlarda aranan gömülü yapıların anomalileri, örtü yapı veya moloz birimlerinin anomalileriyle maskelenebilir veya da karmaşık bir şekle dönüşmüş olabilir. Bundan dolayı tilt açısı tekniğini gürültüye karşı duyarlılığına da test etmek gerekecektir. Bu amaçla aynı model verisine, anomali maksimum genliğinin %5 varyansına sahip 0 ortalama ile rastgele Gauss gürültüsü eklenmiştir (Şekil 3.8.). Elde edilen tilt haritasında ek türev işlemleri kullanıldığı için gürültü oranının daha da fazlaştığı görülmektedir. Aslında bu durum türev yöntemlerinin



Şekil 3.8. Gürültü içeren yapay veri (üstte) ve elde edilen gürültülü verinin tilt açısı haritası (altta) (0 konturu kalın düz çizgi ile ve $\pm 0,785$ konturları kesikli çizgi ile çizdirilmiştir.)

genel problemdir. Derinde yer alan prizmaların sınırların 0 konturu ile izlenmesindeki bozulma göze çarpmaktadır. Bununla beraber, 0 konturunun genel olarak yapı

sınırlarını izlemesi ve üst derinlik bilgileri gürültü içermeyen yapay veri ile kısmen örtüşmektedir (Şekil 3.8.). Buradan tilt açısı tekniğinin gürültülü verilerde de başarılı sonuçlar üreteceği anlaşılmaktadır.

3.3.2. Euler dekonvolüsyonu tekniği

Euler dekonvolüsyonu, manyetik verilerin yorumlanmasında en sık kullanılan tekniklerden biridir. Teknik sayesinde manyetik yapının derinliği ve yanal konumu hakkında bilgi edinilmesi amaçlanır. Doğru yapısal indeks seçiminden dolayı kümelenen sonuçlar aynı zamanda yapısal indeksin doğru seçildiğini de bildirdiği için anomali kaynağının tipi de belirlenmiş olur. Elde edilen sonuçlar harita üzerinde x-y düzleminde çizdirileceği için aynı zamanda yapının şeklini ve uzanımını da tespit etmek olasıdır. Teknikte kaynak kütlenin 3 boyutlu lokasyon çözümlerini hesaplamak için Euler homojen diferansiyel denklemi kullanılır. Buna göre bir (x, y, z) gözlem noktasında, (x₀, y₀, z₀) noktasında gömülü bir nokta kaynağın oluşturacağı toplam manyetik alan anomalisi,

$$\Delta T(x, y, z) = f[(x - x_0), (y - y_0), (z - z_0)] \quad (3.52)$$

z = 0 yeryüzü olmak üzere,

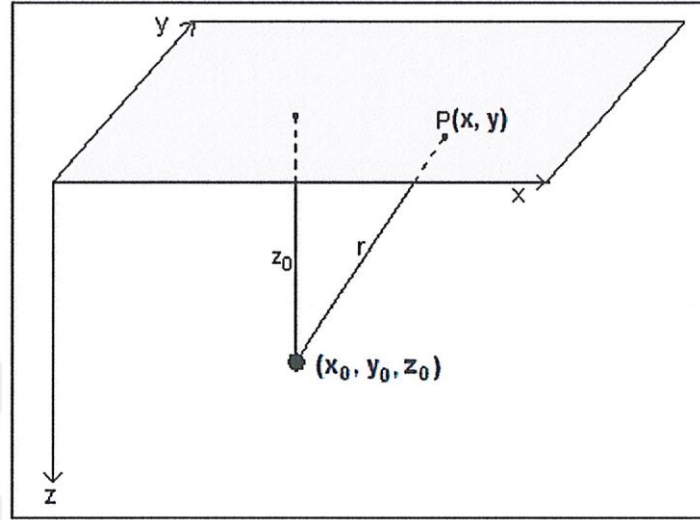
$$\Delta T(x, y) = f[(x - x_0), (y - y_0), z_0] \quad (3.53)$$

ile ifade edilir (Durrheim ve Cooper, 1998). Burada f fonksiyonu manyetik bir kaynağın oluşturacağı anomalinin genel bir tanımıdır ve dipolar özellikteki anomali kaynakları için,

$$f = \frac{M}{r^N} \quad (3.54)$$

ile verilir. M, kaynak yapı ve çevre kayaç arasındaki manyetizasyon kontrastı bilgisini içeren kaynağa bağlı bir sabittir (Barongo, 1984). r ise gömülü kaynağın koordinatlarının (x₀, y₀, z₀), gözlem noktasının koordinatlarına (x,y,z) olan

uzaklığıdır (Şekil 3.9.). N ise r uzaklığına bağlı olarak manyetik alan şiddetinin azalma oranı sabitidir ve kaynak geometrisine bağlıdır (Slack ve ark., 1967). Eğer f fonksiyonu için,



Şekil 3.9. P gözlem noktası için koordinatlar ve r uzaklığı (Alpaslan, 2012)

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z) \quad (3.55)$$

eşitliği yazılabiliyorsa f fonksiyonu n . dereceden homojendir denir. Böyle bir homojen denklem Thompson (1982) tarafından verilen Euler homojenite denklemini de sağlar. Buna göre,

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf \quad (3.56)$$

eşitliği yazılabilir (Thompson, 1982). Bu bağıntı potansiyel alan verilerinin yorumunda kullanılan Euler dekonvolüsyonu tekniği olarak bilinir (Oruç, 2013). Denklem (3.54) göz önüne alındığında $n = -N$ olacağı görülebilir. Eşitlik (3.53) düşünüldüğünde manyetik anomaliler için Euler eşitliği,

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} - z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(x, y) \quad (3.57)$$

biçimine dönüşür. Toplam alan anomalisi içinde sabit bir bölgesel (rejyonel) alan etkisi var ise gözlem değeri aşağıdaki gibi yazılır.

$$T(x, y) = \Delta T(x, y) + B \quad (3.58)$$

Fakat rejyonel alan vektörünün lokal ölçekteki çalışma alanı için sabit olduğu kabul edildiğinden (Bhattacharyya, 1965) ve bölgesel etkinin çıkarılmış olduğu anomali verileri kullanıldığından her bir Euler penceresi içerisindeki anomali değerine ait çözüm, o anomalii oluşturan basit şekilli bir kaynaktan meydana geliyor varsayılır (Reid ve ark. 2014). Böylece, $B = 0$ kabul edip basit cebirsel işlemler ile,

$$x_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + y_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = x \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + y \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + N \Delta T \quad (3.59)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte x ve y gözlem noktasına ait bilinen koordinatlarıdır. Ayrıca ΔT ölçülen manyetik alan verisi ve $\partial \Delta T / \partial x$, $\partial \Delta T / \partial y$, $\partial \Delta T / \partial z$ türev terimleri ise ölçülen veriden hesaplanan verilerdir. Buna göre bilinmeyen parametreler kaynağa ait lokasyon parametreleri olan x_0 , y_0 ve z_0 parametreleridir. N kaynak yapının geometrisine bağlı olan “yapısal indeks” olarak isimlendirilmektedir. Yöntemin başarılı sonuçlar üretmesini etkileyen faktörler verideki gürültü oranı, veri grid aralıkları, türev hesapları, Euler pencere boyunun seçimi ve N yapısal indeks parametresinin seçimidir. Bu aşamalarda hatalar yapıldığında tekniğin ürettiği çözümlerde saçılmalar oluşmaktadır. Tam aksine doğru seçimler yapıldıysa çözümler kümelenmekte ve kaynağın lokasyon ve derinlik bilgileri belirlenebilmektedir. Pencere boyunun seçiminde pencere boyunun, ilgilenilen anomalilerin dalga boylarını kapsayacak şekilde olmasına dikkat edilmelidir (Oruç, 2013). Reid ve ark. (2014) Euler pencere genişliğinin olabildiğince küçük olmasının çözünürlük ve sığ derinlikli yapıların tespiti için iyi olacağını fakat pencere boyunun verinin grid aralığının en az iki katı ve araştırılmak istenen derinliğin yarısından daha büyük olma şartlarını da sağlaması gerektiğini çalışmalarında belirtmişlerdir. Thompson (1982) daha doğru çözümler elde etmek için kutba indirgenmiş verilerle çalışmayı önermiştir. Ayrıca Reid ve ark. (1990) tekniğin, manyetik alan yönü, dalım açısı ve eğim açısı gibi manyetik özelliklerden bağımsız olduğunu göstermiştir.

Yapısal indeks parametresinin seçimi tekniğin sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bununla beraber yapısal indeksin seçimi için belli bir yöntem yoktur. Burada yapısal indeks bir ön bilgi olarak önceden bilinmelidir. Bunun için aranan yapının özellikleri, çalışma alanı jeolojisi, diğer jeofizik veriler gibi yardımcı bilgilerden yorumcu tecrübesiyle yararlanılabilir. Bu açıdan Euler dekonvolüsyonu tekniği “yarı otomatik” bir teknik olarak tanımlanabilir. Thompson (1982) ile Reid ve ark. (1990) doğru yapısal indeks seçiminin sonuçlarda kümelenme oluşturacağını belirtmişlerdir. Buna göre en uygun yapısal indeks seçimi için yorumcu, deneme yanılma şeklinde en iyi kümelenme oluşturan sonuçları belirleyecektir. Ayrıca Reid ve ark. (1990) küçük yapısal indeks değerlerinin sığ derinlikler üretirken daha büyük yapısal indeks değerlerinin ise daha büyük derinlik değerleri ürettiğine dikkat çekmişlerdir. Fakat devamında eğer yapısal indeks değeri aranan yapıya uyumlu seçilmiş ise büyük seçilen bu yapısal indeks değerinin küçük yapısal indeks değerlerine göre yine de daha doğru derinlik değerleri ürettiğini belirtmişlerdir. Bütün bunlarla beraber Smellie (1956), Thompson (1982), Stavrev (1997), Hsu (2002), Hinze ve ark. (2013), Reid ve Thurston (2014) gibi araştırmacılar ideal kaynak tipleri için yapısal indeks değerlerini belirtmişlerdir (Tablo 3.1.).

Tablo 3.1. Bazı basit şekilli modellerin yapısal indeks değerleri

Kaynak	Model Yapı	Yapısal İndeks (N)
Küre	Nokta dipol	3
Silindir (yatay)	Çizgisel dipol	2
Düşey çubuk (boru, silindir)	Nokta kutup	2
İnce levha kenarı	Çizgisel kutup	1
Kontak	-	0 veya 0,5

Euler dekonvolüsyonunun manyetik harita verilerine uygulanması için, (3.59) bağıntısının belli bir boyuttaki bir grid penceresine göre veri grid noktalarına açılmasıyla elde edilen doğrusal bağıntılar sisteminin çözümü kullanılır. Buna göre verilerin grid noktalarında hareketli Euler penceresi kaydırılarak doğrusal bağıntılar sistem oluşturulur ve kaynağa ait lokasyon parametreleri (x_0, y_0, z_0) bu sistemin çözümüyle hesaplanır. Bu şekilde bütün grid noktaları için hesaplamalar bittiğinde

elde edilen çözümler x-y düzleminde istenilen semboller kullanılarak işaretlenir ve Euler çözümleri haritası elde edilmiş olur. Örnek olarak 3x3 hareketli grid penceresi için açık matris gösterimi eşitlik (3.59) için 9 adet veri kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta T_{x_1}}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_{x_1}}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_{x_1}}{\partial z} \\ \frac{\partial \Delta T_{x_2}}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_{x_2}}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_{x_2}}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta T_{x_9}}{\partial x} & \frac{\partial \Delta T_{x_9}}{\partial y} & \frac{\partial \Delta T_{x_9}}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \frac{\partial \Delta T_{x_1}}{\partial x} + y_1 \frac{\partial \Delta T_{x_1}}{\partial y} + N \Delta T_{x_1} \\ x_2 \frac{\partial \Delta T_{x_2}}{\partial x} + y_2 \frac{\partial \Delta T_{x_2}}{\partial y} + N \Delta T_{x_2} \\ \vdots \\ x_9 \frac{\partial \Delta T_{x_9}}{\partial x} + y_9 \frac{\partial \Delta T_{x_9}}{\partial y} + N \Delta T_{x_9} \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Bu açık matris gösterimi simgesel olarak

$$Ax = b \quad (3.61)$$

şeklinde gösterilir. Sistemde bağıntı sayısı bilinmeyen sayısından fazla olduğu için matris sistemi aşırı tanımlıdır (Oruç, 2012). Buna göre sistem için en küçük kareler duyarlılığında çözüm

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3.62)$$

eşitliğinin çözümü ile bulunur (Oruç, 2013). Harita grid noktaları boyunca bu işleme birer grid ilerleme yönünde kaydırılarak devam edilir.

Görüleceği üzere uzunluk ortamında alınan manyetik anomali verilerinin her bir gözlem noktasında Tilt ve Euler tekniklerini uygulayabilmek için bu veri noktalarında türev değerlerinin sayısal olarak belirlenmesi gerekmektedir. Uzunluk ortamındaki fazla işlem yükünden kurtulmak için Fourier dönüşüm tekniğinin türev özelliğinden yararlanarak verilerin türevleri dalga sayısı (frekans) ortamında kolaylıkla hesaplanabilmekte ve daha sonra ters dönüşüm özelliğinden yararlanarak tekrar uzunluk ortamında türevler elde edilebilmektedir. Buna göre $f(x, y)$ gibi iki boyutlu bir fonksiyonun Fourier dönüşüm çifti

$$F(k_x, k_y) = \mathcal{F}[f(x, y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (3.63)$$

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[F(k_x, k_y)] = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (3.64)$$

şeklinde verilir (Oruç, 2013). Burada k_x ve k_y x ve y doğrultularındaki dalga sayılarıdır ve n. dereceden yatay yönlü x ve y türevleri Fourier dönüşümünün türev özelliğinden dalga sayısı ortamında aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{\partial^n}{\partial x^n} f(x, y) = (ik_x)^n F(k_x, k_y) \quad (3.65)$$

$$\frac{\partial^n}{\partial y^n} f(x, y) = (ik_y)^n F(k_x, k_y) \quad (3.64)$$

n. dereceden düşey türev ise Laplace bağıntısını sayesinde, elde edilen yatay türevlerden hesaplanabilir (Elkins, 1950). Bölüm 3.2’de toplam alan anomalisinin Laplace bağıntısını sağladığı gösterilmiştir. Buna göre,

$$\nabla^2 \Delta T = \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = 0 \quad (3.65)$$

yazılabilir. Buradan ikinci düşey türev çekilirse,

$$\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} \right) \quad (3.66)$$

elde edilir. Manyetik anomali haritaları için Fourier ortamında, yukarıda elde edilen yatay türevler 2. türev olarak,

$$\mathcal{F} \left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} \right) = (ik_x)^2 \mathcal{F}(k_x, k_y) \quad (3.67)$$

$$\mathcal{F} \left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} \right) = (ik_y)^2 \mathcal{F}(k_x, k_y) \quad (3.68)$$

şeklinde yazılır. Bunlar 3.66 denkleminde yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned}\mathcal{F}\left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2}\right) &= -(ik_x)^2 \mathcal{F}(k_x, k_y) - (ik_y)^2 \mathcal{F}(k_x, k_y) = \mathcal{F}(k_x, k_y) \left(-(ik_x)^2 - (ik_y)^2 \right) \\ &= \mathcal{F}(k_x, k_y) \left((-i)^2 (k_x^2 + k_y^2) \right) = \mathcal{F}(k_x, k_y) (k_x^2 + k_y^2)\end{aligned}\quad (3.69)$$

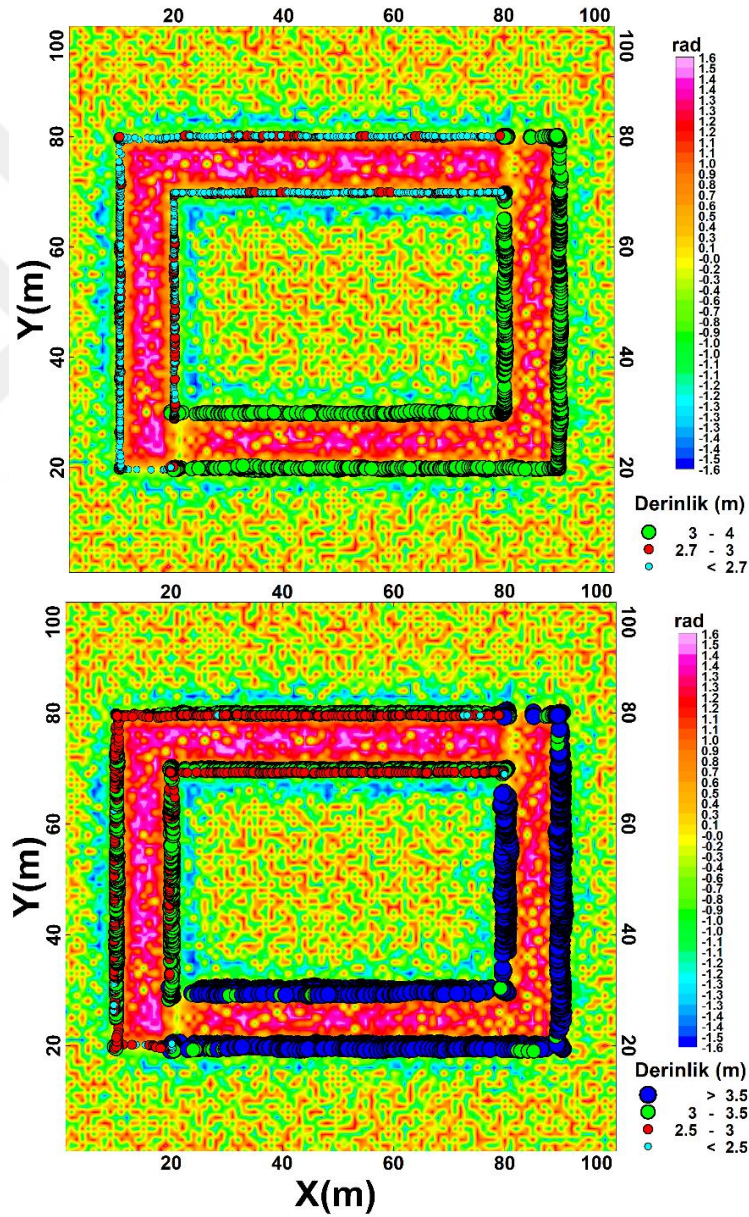
elde edilir ve eğer radyal dalga sayısı, $|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ olarak tanımlanırsa n. dereceden düşey türev için genel formül için,

$$\frac{\partial^n \Delta T}{\partial z^n} = \mathcal{F}^{-1}\{|k|^n \mathcal{F}(k_x, k_y)\} \quad (3.70)$$

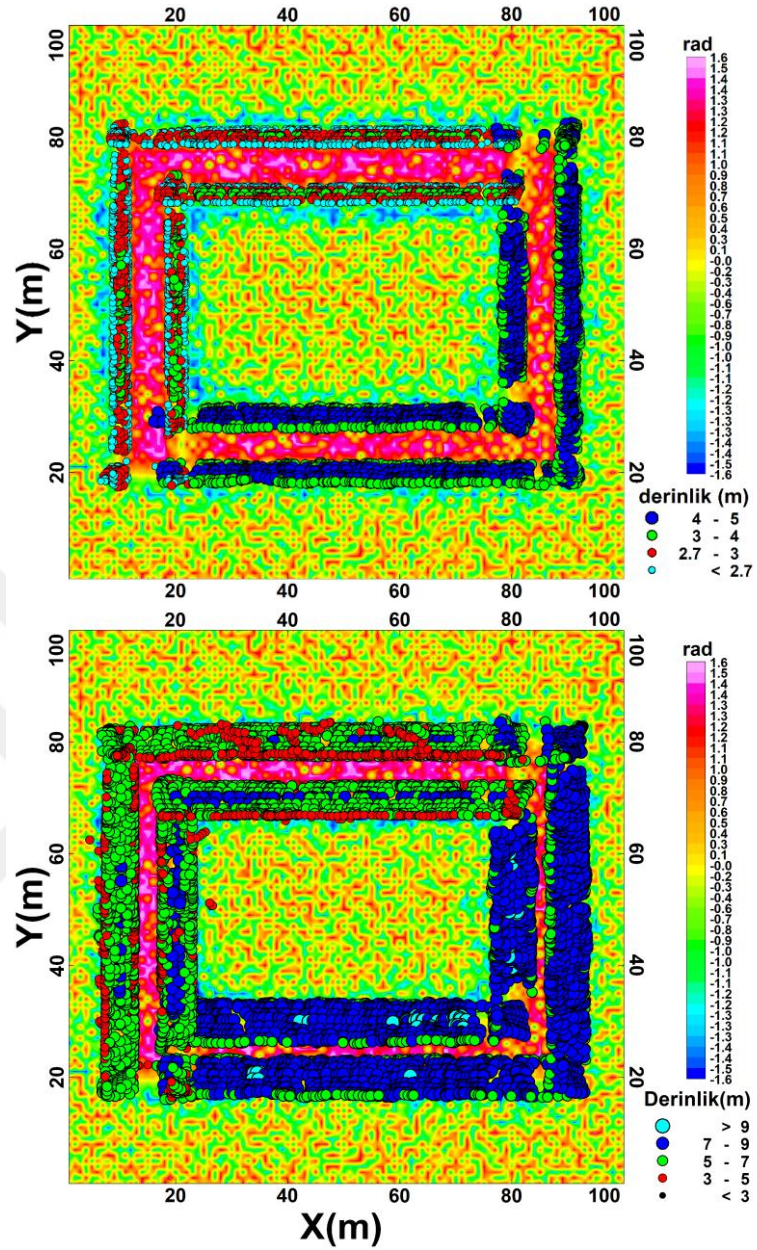
şeklinde yazılabilir. Böylece herhangi bir manyetik haritanın 2-B Fourier dönüşümü sayesinde dalga sayısı ortamında türevi alınıp ters Fourier dönüşümü ile uzunluk ortamında bu türev değerleri elde edilmiş olur. Bu çalışmada bütün bu türev işlemleri, tilt açısı ve Euler hesaplamaları Geosoft Oasis Montaj 7.0.1 (2008) programı ile yapılmıştır.

Yukarıda da değinildiği üzere Euler dekonvolüsyonu tekniği tektonik çalışmalara nispeten daha küçük ölçekli arkeojeofizik çalışmalarda da başarı ile kullanılabilir. Tekniğin farklı derinliklerde yer alan arkeolojik modellere üreteceği çözümleri tecrübe etmek için Şekil 3.6.a'daki modellerden üretilen gürültü içeren veri kullanabilir. Bu sayede tekniğin gürültü içeriği bulunan verilerde etkinliği tecrübe edileceği gibi aynı alanda farklı derinliklerde yer alan yapılara olan çözünürlüğü de tecrübe edilecektir. Bu amaçla parametrelerle ilgili yukarıda verilen bilgilere ve Tablo 3.1.'e göre yapay model için $N = 0,5 - 1 - 2$ ve 3 yapısal indeksleri kullanılarak $0,5$ m aralıklı gridlenmiş olan veri için 10×10 'luk hareketli pencere ve $\% 3$ 'lük derinlik toleransı ile Euler çözümleri elde edilmiş ve yapay gürültülü verinin tilt açısı haritası üzerine çizdirilmiştir (Şekil 3.10.). Bu sayede Euler çözümleri, modelin derinlik bilgisiyle beraber manyetik suseptibilite farklılığı olan sınırlara atanacağından dolayı model yapı üzerine denk gelen koordinatlara işaretlenen çözümler ile yapının şekli ve yatay konumu da belirlenebilmiştir. Euler çözümlerinin istenmeyen bazı

sonuçlar da üreteceği bilinmektedir. Buna göre çözümlerden hangilerinin kabul edileceği, belirlenmesi gereken bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Zira çözümlerin kümelenmesine bakılması yanında istatistik olarak kabul edilebilirlik veya bir tolerans kıstası belirlenmelidir. Reid ve ark. (1990) bunun için standart sapmayı önermişler ve belirli bir seviyenin altında olan değerleri kabul edilebilir olarak tanımlamışlardır. Buna göre hesaplanan herhangi bir derinlik çözümü için, eğer standart sapma bu derinliğin belirli bir yüzdesinden (arazi verilerinde çoğunlukla % 10-20) az ise bu derinlik çözümü kabul edilir.



Şekil 3.10. Gürültülü yapay verinin Euler dekonvolüsyon çözümleri. $N=0,5$ için üstte ve $N=1$ için altta. Çözümler gürültülü verinin tilt haritası üzerine işaretlenmiştir



Şekil 3.10. (Devamı) Gürültülü yapay verinin Euler dekonvolüsyon çözümleri. $N=2$ için üstte ve $N=3$ için altta. Çözümler gürültülü verinin tilt haritası üzerine işaretlenmiştir.

Euler çözümlerinin prizmaların yatay sınırları üzerinde kümelenmeler oluşturması doğru çözümlerin elde edildiği manasına gelmektedir. Buradan aynı zamanda yapının yatay sınırları da doğru olarak görüntülenmiştir. Yapay verilerde prizma kenarlarıyla homojen ortam arasında oldukça belirgin bir suseptibilite kontrastı bulunduğu için Euler çözümleri bu bölgelere odaklanmıştır. Buna göre prizma modelleri için $N=0,5$ 1 ve 2 için sırasıyla kontak, ince levha kenarı ve yatay silindir modelleri oldukça uyumlu çözümler üretmiştir (Şekil 3.10.). $N=0,5$ için olan sonuçlar daha çok model

prizmaların üst derinliğini yansıtmıştır. $N=1$ için ise prizmaların merkez derinliklerinin belirlenmesi dikkat çekmektedir. Nihayet $N=2$ için prizmaların daha derindeki kısımlarının derinlik bilgilerinin elde edildiği Şekil 3.10.'da görülmektedir. Ayrıca Euler çözümleri tilt açısının 0 konturu ile birebir örtüşmektedir. Buna göre Euler çözümleri model yapıların uzanım bilgilerini ve sınır bilgilerini başarılı bir şekilde yansıtmıştır. Fakat $N=3$ için çözümler, tilt açısının 0 konturundan ve dolayısıyla model yapı sınırlarından daha fazla saçılmıştır. Ayrıca model prizma derinlikleri daha büyük bulunmuştur. Buna göre yapısal indeksin artmasıyla Euler çözümlerinin odaklandığı derinliğin de arttığı söylenebilir. Yatay lokasyonların ve model derinliklerinin doğru olarak belirlenmesi gürültülü verilerde de Euler tekniğinin oldukça iyi sonuçlar üretebileceğini göstermektedir.

3.3.3. Manyetik gradyent tensör (MGT) bileşenleri ve gradyent tensör özdeğer sınır görüntüleme analizi

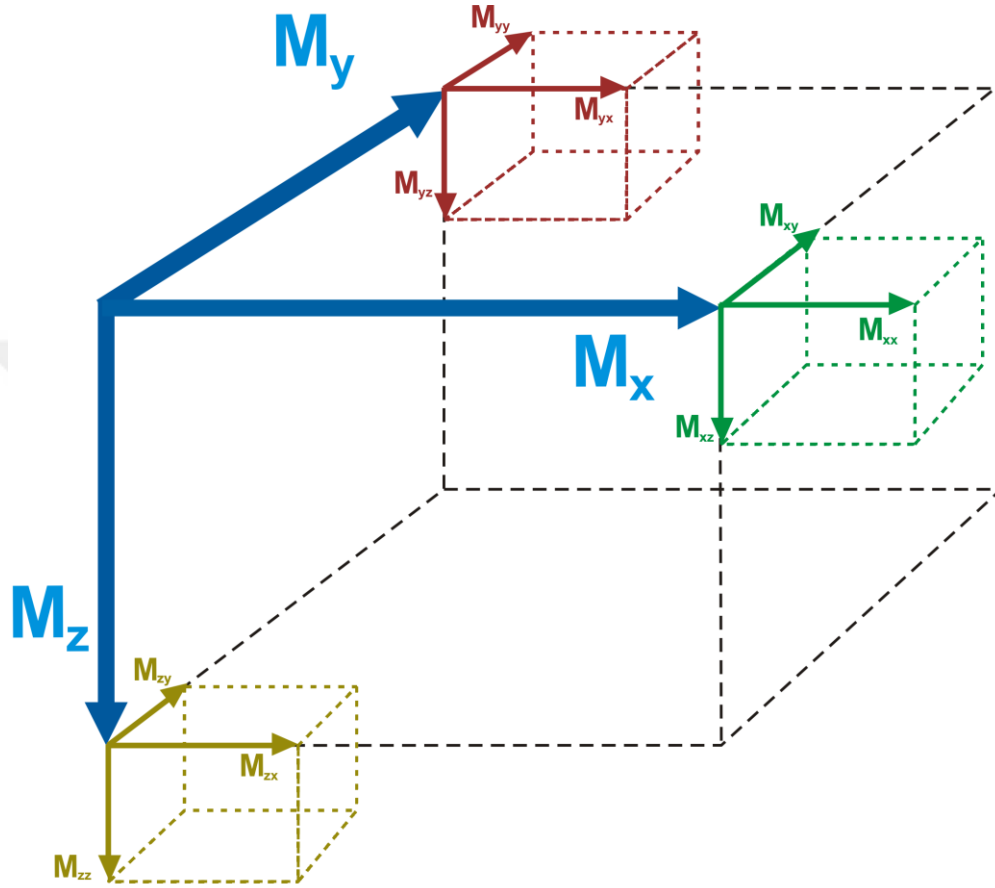
Genel olarak, manyetometreler toplam manyetik alan (TMA) şiddeti ölçen skaler manyetometreler ve manyetik alanın vektör bileşenlerini ölçen vektör manyetometreleri diye iki tipe ayrılabilir (Nabighian ve ark., 2005; Beiki ve ark., 2012). Yer asıl jeomanyetik alanı genellikle ilgili anomalilerden çok daha büyük olduğundan, sensör yönündeki küçük değişiklikler yönlü vektör bileşen ölçümlerinde büyük hatalar üretir (Beiki ve ark., 2012). Örneğin; 50.000 nT şiddetinde bir jeomanyetik alandaki vektör bileşenleri için, 1 nT hassasiyetle vektör ölçümleri gerçekleştirmek 0,001 dereceden daha iyi bir hassasiyette sensör yönünün ölçülmesini gerektirir (Beiki ve ark., 2012; Munsch ve Fleury, 2011). Bir başka deyişle 0,1 derecelik bir sensör yönü-doğrultu hatası, 100 nT değerlerini bulan bir hata üretir (Clark, 2014). Ayrıca tensör bileşenlerini toplam alan ölçümlerinden hesaplamak daha ucuz ve elverişlidir (Yin ve ark., 2016). Bu nedenlerden ötürü vektör ölçümleri yerine toplam alan ölçümlerinden tensör bileşenlerinin elde edilmesi daha elverişlidir (Schmidt ve Clark, 2006).

Toplam manyetik alan ölçümlerinde, ölçülen anomalinin bileşenleri skaler manyetik potansiyelin birinci dereceden türevleri ile ifade edilmektedir. Manyetik alanın bu üç

bileşeni, tek bir bileşen ölçümünden veya toplam bileşen ölçümlerinden hesaplanabilir (Lourenco ve Morrison, 1973). Manyetik alanın ortogonal herhangi bir bileşeninin ölçümünden diğer bileşenlerin hesaplanma fikri ilk önce Vestine ve Davids (1945) tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonraları Hughes ve Pondrom (1947) toplam manyetik alan ölçümlerinden düşey ve yatay bileşenlerin yüzey integralleri ile hesaplanabileceğini göstermişlerdir. İlk olarak Lourenco ve Morrison (1973), manyetik alanın herhangi bir bileşeninin yatay bir düzlem üzerindeki ölçümlerinin, diğer bileşenler hakkında bilgiler içereceğini belirtmişler ve toplam manyetik alanın fourier dönüşümü ile ortogonal bileşenlerin fourier dönüşümleri arasındaki ilişkileri ortaya koyarak toplam manyetik alan anomalisinden tensör bileşenlerini hesaplamışlardır. Sonrasında Nelson (1988) gradyent tensör bileşenlerini, TMA ölçümlerinden değil de toplam manyetik gradyent ölçümlerinden fourier ortamında elde edilebileceğini gösteren açıklamaları ortaya koymuştur. Benzer şekilde Pedersen ve ark. (1990) toplam manyetik alandan vektör bileşenlerinin hesaplanması için fourier ortamı ifadelerini vermiş ve uygulamada bileşenlerin hesaplanmasından önce yukarı uzanım gibi bir alçak-geçişli süzgecin aliasing etkilerini azaltmak için gerekli olduğundan bahsetmiştir. Öte yandan Schmidt ve Clark (1998), Lourenco ve Morrison (1973) tarafından belirtilen fourier ortamında vektör bileşenlerinin hesaplanmasını içeren ifadeleri tartışmışlar ve bu bileşenleri Helbig (1963) tarafından önerilen integrallerle hesaplamayı göstermişlerdir. Daha sonra Mickus ve Hinojosa (2001), Gunn (1974) tarafından ortaya koyulan potansiyel alan verileri için fourier ortamı ifadelerini geliştirerek gravite düşey bileşeninden diğer tensör bileşenlerinin hızlı fourier dönüşümü ifadeleri ile ilk defa hesaplamışlardır.

Frekans veya dalgasayısı ortamı, potansiyel alan verilerine birtakım dönüşümler uygulamak için oldukça faydalı bir ortamdır (Schmidt ve Clark, 1998). Potansiyel alan verilerinin dalgasayısı ortamında gerçekleştirilen yaygın olarak bilinen örneklerini; aşağı-yukarı uzanımlar, kutba indirgeme (RTP-reduce to pole) ve yönlü türevler şeklinde sayabiliriz. Manyetik gradyent tensör (MGT), potansiyel alan bileşenlerinin karşılıklı olan üç ortogonal (dikey) eksen boyunca uzaysal değişim oranını ifade eden matris olarak tanımlanmaktadır (Nelson, 1988) (Şekil 3.11.). Manyetik gradyent tensörünün Fourier ortamında toplam manyetik anomali alandan hesaplanması için ilk

olarak, toplam alan anomalisinden elde edilen skaler potansiyel kullanılarak toplam manyetik gradyentler hesaplanır sonrasında ise bunların yönlü türevleri alınarak manyetik gradyent tensör bileşenleri hesaplanmaktadır.



Şekil 3.11. Manyetik gradyent tensör bileşenlerinin şematik gösterimi (Oruç, 2010'dan düzenlenerek)

Hatırlanacağı üzere yukarıda toplam anomali alanını skaler potansiyelin (U) gradyenti olarak,

$$\Delta \mathbf{T} = \hat{\mathbf{t}} \cdot \nabla U = \hat{t}_x \Delta T_x + \hat{t}_y \Delta T_y + \hat{t}_z \Delta T_z = \hat{t}_x \frac{\partial U}{\partial x} + \hat{t}_y \frac{\partial U}{\partial y} + \hat{t}_z \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3.71)$$

şeklinde ifade etmiştik. Burada $\hat{\mathbf{t}} = \langle \hat{t}_x, \hat{t}_y, \hat{t}_z \rangle$ olmak üzere jeomanyetik alan yönünde birim vektördür. Bu ifadenin Fourier ortamındaki yazımı için,

$$\mathcal{F}[\Delta T] = \hat{t}_x \mathcal{F} \frac{\partial U}{\partial x} + \hat{t}_y \mathcal{F} \frac{\partial U}{\partial y} + \hat{t}_z \mathcal{F} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3.72)$$

elde edilir (Blakely, 1996). Eşitlik 3.67, 3.68 ve 3.70 toplam alandan üç ortogonal bileşenin ve türevlerinin hesaplanması için bir yöntem göstermektedir. Buna göre bu eşitlikleri tek bir denklem olarak

$$\mathcal{F}[\Delta T] = \mathcal{F}[\hat{\mathbf{t}} \cdot \nabla U] = (\hat{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{k}) \mathcal{F}[U] = \Theta_f |k| \mathcal{F}[U] \quad (3.73)$$

şeklinde yazabiliriz. Burada $\mathbf{k} = \langle ik_x, ik_y, |k| \rangle$ ile ve $\Theta_f = \hat{t}_z + i \frac{\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y}{|k|}$ ile verilir. Eşitlik 3.73'e göre gerekli düzenlemeler yapılırsa skaler potansiyeli Fourier ortamında,

$$\mathcal{F}[U] = \frac{1}{\Theta_f |k|} \mathcal{F}[\Delta T] = \frac{\mathcal{F}[\Delta T]}{|k| \hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \quad , \quad |k| \neq 0 \quad (3.74)$$

denklemini ile anomali alanından elde edebiliriz (Blakely, 1996; Clark, 2014). Buna göre ortogonal bileşenler potansiyelin yönlü türevleri ile,

$$\mathcal{F}[M_x] = \mathcal{F} \left[\frac{\partial U}{\partial x} \right] = ik_x \mathcal{F}[U] = \frac{ik_x \mathcal{F}[\Delta T]}{|k| \hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \quad , \quad |k| \neq 0 \quad (3.75)$$

$$\mathcal{F}[M_y] = \mathcal{F} \left[\frac{\partial U}{\partial y} \right] = ik_y \mathcal{F}[U] = \frac{ik_y \mathcal{F}[\Delta T]}{|k| \hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \quad , \quad |k| \neq 0 \quad (3.76)$$

$$\mathcal{F}[M_z] = \mathcal{F} \left[\frac{\partial U}{\partial z} \right] = |k| \mathcal{F}[U] = \frac{|k| \mathcal{F}[\Delta T]}{|k| \hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \quad , \quad |k| \neq 0 \quad (3.77)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitliklerde toplam anomali alanının yönlü türevleri ile karıştırılmaması için ortogonal bileşenleri tanımlamak amacıyla ΔT_x , ΔT_y , ΔT_z yerine M_x , M_y , M_z yazılmıştır. Manyetik gradyent tensörün karşılıklı olan üç ortogonal (dikey) eksen boyunca uzaysal değişim oranını içerdiği yukarıda ifade edilmişti. Buna göre, MGT elde edilen skaler potansiyelin ikinci dereceden yönlü türevlerinden oluşmaktadır (Karaaslan, 2020).

$$\begin{aligned}
\text{MGT} = \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(M_x)}{\partial x} & \frac{\partial(M_x)}{\partial y} & \frac{\partial(M_x)}{\partial z} \\ \frac{\partial(M_y)}{\partial x} & \frac{\partial(M_y)}{\partial y} & \frac{\partial(M_y)}{\partial z} \\ \frac{\partial(M_z)}{\partial x} & \frac{\partial(M_z)}{\partial y} & \frac{\partial(M_z)}{\partial z} \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix} \tag{3.78}
\end{aligned}$$

Manyetik alan kaynaklarının bulunmadığı bir bölgede, $\nabla \mathbf{x} \Delta \mathbf{T} = 0$ ve $\nabla \cdot \Delta \mathbf{T} = 0$ yazabileceği ifade edilmişti. Buna göre MGT simetrik bir matris olur ($M_{ij} = M_{ji}$) ve matrisin izinin (köşegeninin) toplamı sıfıra eşit olur.

$$M_{xx} + M_{yy} + M_{zz} = 0, \quad M_{zz} = -(M_{xx} + M_{yy}) \tag{3.79}$$

Böylece, MGT sadece beş bağımsız bileşenden oluşmaktadır (M_{xx} , $M_{xy} = M_{yx}$, $M_{xz} = M_{zx}$, M_{yy} , $M_{yz} = M_{zy}$) ve diğer bileşenler bu beş bileşenden hesaplanabilir (Oruç, 2010; Gang ve ark., 2016). Bu bağlamda eşitlik 3.75, 3.76 ve 3.77'ye göre Fourier ortamında 2. dereceden türevler alınarak gradyent tensör bileşenleri,

$$\mathcal{F}[M_{xx}] = \mathcal{F}\left[\frac{\partial M_x}{\partial x}\right] = ik_x \mathcal{F}[M_x] = \frac{-k_x^2 \mathcal{F}[\Delta T]}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \tag{3.80}$$

$$\mathcal{F}[M_{xy}] = \mathcal{F}\left[\frac{\partial M_x}{\partial y}\right] = ik_y \mathcal{F}[M_x] = \frac{-k_y k_x \mathcal{F}[\Delta T]}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \tag{3.81}$$

$$\mathcal{F}[M_{xz}] = \mathcal{F}\left[\frac{\partial M_x}{\partial z}\right] = |k| \mathcal{F}[M_x] = \frac{|k| ik_x \mathcal{F}[\Delta T]}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \tag{3.82}$$

$$\mathcal{F}[M_{yy}] = \mathcal{F}\left[\frac{\partial M_y}{\partial y}\right] = ik_y \mathcal{F}[M_y] = \frac{-k_y^2 \mathcal{F}[\Delta T]}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \tag{3.83}$$

$$\mathcal{F}[M_{yz}] = \mathcal{F}\left[\frac{\partial M_y}{\partial z}\right] = |k| \mathcal{F}[M_y] = \frac{|k| ik_y \mathcal{F}[\Delta T]}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \tag{3.84}$$

$$\mathcal{F}[M_{zz}] = \mathcal{F}\left[\frac{\partial M_z}{\partial z}\right] = |k| \mathcal{F}[M_z] = \frac{|k|^2 \mathcal{F}[\Delta T]}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \quad (3.85)$$

denklemleriyle hesaplanır (Clark, 2014). Bu denklemlere göre Fourier ortamında MGT matrisini,

$$\mathcal{F}[MGT] = \begin{bmatrix} \frac{-k_x^2}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} & \frac{-k_y k_x}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} & \frac{|k|ik_x}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \\ \frac{-k_y k_x}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} & \frac{-k_y^2}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} & \frac{|k|ik_y}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \\ \frac{|k|ik_x}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} & \frac{|k|ik_y}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} & \frac{|k|^2}{|k|\hat{t}_z + i(\hat{t}_x k_x + \hat{t}_y k_y)} \end{bmatrix} \cdot \mathcal{F}[\Delta T] \quad (3.86)$$

şeklinde elde ederiz (Yin ve ark., 2016). Sonrasında ise ters Fourier dönüşümü ile her bir bileşene ait veriyi uzaklık ortamında elde edebiliriz. Bu tez boyunca bütün bu Fourier ortamındaki işlemler daha önce de ifade edildiği gibi Geosoft Oasis Montaj 7.0.1 programı ile gerçekleştirilmiştir. Schmidt ve Clark (2006) ve Cole (2018) gibi araştırmacılar tensör bileşenlerinin yorumuna ve hangi tür özelliklere odaklandıklarına dair bazı açıklamalar yapmışlardır. Bu yorumların sadeleştirilmiş ifadeleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Tensör bileşenlerinin yorumu

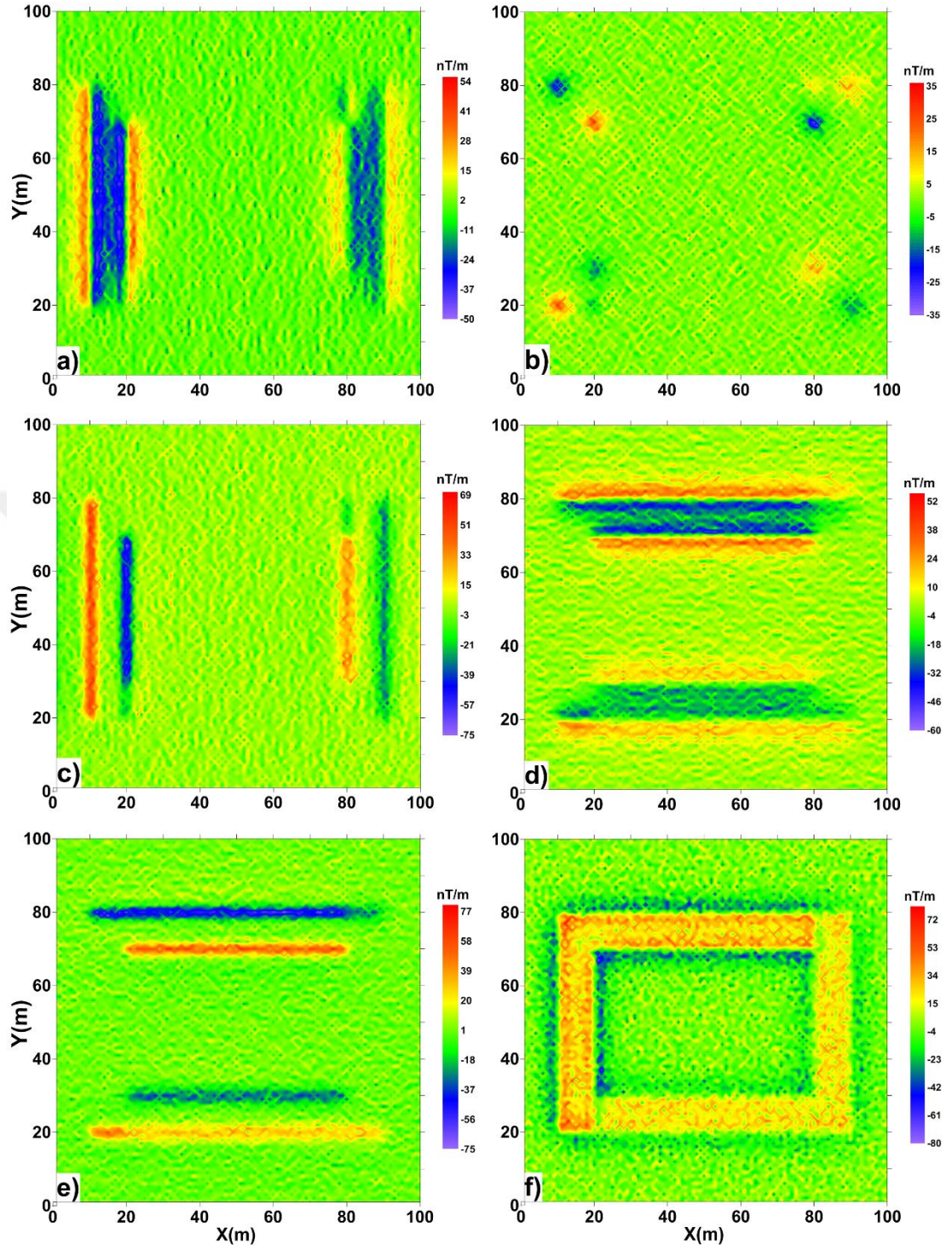
Bileşen	Odaklanılan Özellik
M_{xx}	Kuzey - güney uzanımlı yapı sınırları
M_{xy}	Yapı köşeleri
M_{xz}	Kuzey - güney uzanımlı yapı sınırları
M_{yy}	Doğu - batı uzanımlı yapı sınırları
M_{yz}	Doğu - batı uzanımlı yapı sınırları
M_{zz}	Düşey yapı sınırları

Gradyent tensör bileşenlerinin farklı derinliklerde yer alan anomali kaynağı yapılarına ait sınırların görüntülenmesine yönelik vereceği cevapları test etmek için Şekil 3.6.a'daki modellerden üretilen gürültü içeren veri kullanabilir. Bu sayede tekniğin gürültü içeriği bulunan verilerde etkinliğinin test edilmesinin yanı sıra, aynı alanda

farklı derinliklerde yer alan yapıların sınırlarının görüntülenmesindeki çözünürlüğü de test edilebilecektir.

Şekil 3.12.'ye dikkat edilirse, MGT bileşenlerinin, gürültülü ortamlarda manyetik anomali kaynağı yapının yaklaşık şeklini anlamak için oldukça faydalı sonuçlar ürettiği görülebilir. M_{xx} ve M_{yy} 'nin maksimum değerler ile prizma yapıların sınırlarını görüntülediği ve minimum değerlerin ise yapıların merkezlerinin üzerinde yer aldığı yani kütleye odaklandığı görülmektedir. M_{xx} , K-G doğrultuda sınırları izlerken M_{yy} ise D-B doğrultuda sınırlara odaklanmıştır. Fakat her iki bileşene ait haritalarda, daha derinde yer alan yapılara ait kısımlardaki çözünürlüğün haritanın sıg yapıları ait kısımlardaki çözünürlükten daha zayıf olduğu görülmektedir. M_{xz} ve M_{yz} 'nin maksimum ve minimum değerler ile sırasıyla K-G ve D-B sınırlara odaklandığı görülmektedir. Burada da derindeki yapılara ait anomaliler daha zayıftır. M_{xy} haritasında anomalilerin, prizma yapıların iç ve dış köşelerine farklı genlikler üreterek odaklandığı görülmektedir. M_{zz} bileşeni kaynak görüntüsü ile ilgili bilgiler üretmiştir. Bu durum, tensör matrisinin izinin Laplace denklemini sağlaması göz önünde bulundurularak açıklanabilir. Bununla beraber M_{zz} haritasında gürültü fazlalığı göze çarpmaktadır.

MGT bileşenlerin her biri yorumlama için kullanılabileceği gibi tensör matrisi dikkate alınarak türetilen bazı teknikler ile de özel yorumlar yapılabilir. Bu teknikleri en başında tensör matrisine ait özdeğer ve özvektör analizleri gelmektedir. Özvektörler ve özdeğerler olarak bilinen bir dizi özel vektör ve skaler değer, 2. dereceden tensör bileşenleri ile ilişkilidir. Çok sayıda analiz ve görselleştirme tekniği bu değerleri kullanır ve bu değerler tensör alanlarının topolojik yapısının görselleştirilmesinde oldukça önemlidir (Boring, 1998). Simetrik ve gerçek (reel) tensör matrisi için üç tane gerçek özdeğer vardır ve bu özdeğerlere karşılık gelen özvektörler ortogonaldır (Gang ve ark., 2016). Buna göre reel simetrik bir matris olan MGT, özdeğer ayrışımı ile aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir yani özvektör matrisi ortogonal olmak üzere köşegenleştirilebilir (Ortogonal matrisler için $V^{-1} = V^T$ dir.).



Şekil 3.12. Gürültülü yapay veriden hesaplanan MGT bileşenleri (a) M_{xx} , (b) M_{xy} , (c) M_{xz} , (d) M_{yy} , (e) M_{yz} , (f) M_{zz}

$$\text{MGT} = \mathbf{M} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T = [\mathbf{v}_1\mathbf{v}_2\mathbf{v}_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [\mathbf{v}_1\mathbf{v}_2\mathbf{v}_3]^T \quad (3.87)$$

Burada, $V = [v_1 v_2 v_3]$ olmak üzere ortogonal özvektör matrisi ve Λ ise özdeğerleri (λ_i) içeren matristir. Bir tensörün özdeğerleri ve özvektörleri için,

$$MV = \Lambda V \quad (3.88)$$

olacak şekilde bir özellik tanımlanmaktadır. Buna göre, bir tensörün ve özvektörünün iç çarpımı (inner product) alındığında sonuç, aynı özvektörün skaler katı olan bir vektördür. Bu skaler Λ matrisinin çözümleri M tensörünün özdeğerleridir (Boring, 1998). Bu eşitliği, I matrisi 3×3 'lük birim matris olmak üzere,

$$(M - \Lambda I)V = 0 \quad (3.89)$$

şeklinde de yazabiliriz. $V = 0$ çözümünü ihmal ederek düşünecek olursak bu eşitliğin çözümü,

$$(M - \Lambda I) = 0 \quad (3.90)$$

olması durumunda gerçekleşir (Oruç, 2012). Bu tür homojen denklem sistemlerinde (sağ tarafı sıfır olan) M matrisinin özdeğerlerini bulabilmek için $(M - \Lambda I)V = 0$ denklem sisteminin sonsuz çözümünün olması gerekir. Bu durum ise ancak $(M - \Lambda I)$ matrisinin tersi alınamadığı durumda söz konusudur. Eğer tersi alınabilirse tek çözüm sıfır çözümü olacaktır. $(M - \Lambda I)$ matrisinin tersinin alınamaması tekil matris olmasına bağlıdır. Buna göre,

$$\det(M - \Lambda I) = |(M - \Lambda I)| = 0 \quad (3.91)$$

denkleminin çözümü özdeğerleri verecektir. Bu determinantı açık bir şekilde yazacak olursak

$$\det(M - \Lambda I) = \begin{vmatrix} M_{xx} - \lambda & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} - \lambda & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} - \lambda \end{vmatrix} \quad (3.92)$$

elde edilir. Bu determinanı Cramer kuralına göre çözüp basitçe yazarsak karakteristik eşitliği (karakteristik polinom)

$$\lambda^3 - I_1\lambda^2 + I_2\lambda - I_3 = \lambda^3 + I_2\lambda - I_3 = 0 \quad (3.93)$$

şeklinde elde ederiz (Boring, 1998). Burada I_1, I_2 ve I_3 kübik polinom karakteristik denkleminin invaryant (değişmezlik) bileşenleridir ve aşağıdaki gibi tanımlanırlar (Karaaslan, 2020).

$$I_1 = M_{xx} + M_{yy} + M_{zz} = 0 \quad (3.94)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \begin{vmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} M_{xx} & M_{xz} \\ M_{zx} & M_{zz} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zy} & M_{zz} \end{vmatrix} = \\ &= M_{xx}M_{yy} + M_{xx}M_{zz} + M_{yy}M_{zz} - M_{xy}^2 - M_{xz}^2 - M_{yz}^2 \end{aligned} \quad (3.95)$$

$$\begin{aligned} I_3 &= \begin{vmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{vmatrix} = M_{xx}(M_{yy}M_{zz} - M_{yz}^2) + \\ &+ M_{xy}(M_{yz}M_{xz} - M_{xy}M_{zz}) + M_{xz}(M_{xy}M_{yz} - M_{xz}M_{yy}) \end{aligned} \quad (3.96)$$

Karakteristik denklemin kökleri yani özdeğerler şu eşitliklerle bulunabilir (Karaaslan, 2020).

$$\lambda_1 = C + D \quad (3.97)$$

$$\lambda_{2,3} = -\frac{C+D}{2} \pm \frac{C-D}{2}\sqrt{-3} \quad (3.98)$$

Burada,

$$C = \left\{ \frac{I_3}{2} + [(I_3/2)^2 + (I_2/3)^3]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (3.99)$$

$$D = \left\{ \frac{I_3}{2} - [(I_3/2)^2 + (I_2/3)^3]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (3.100)$$

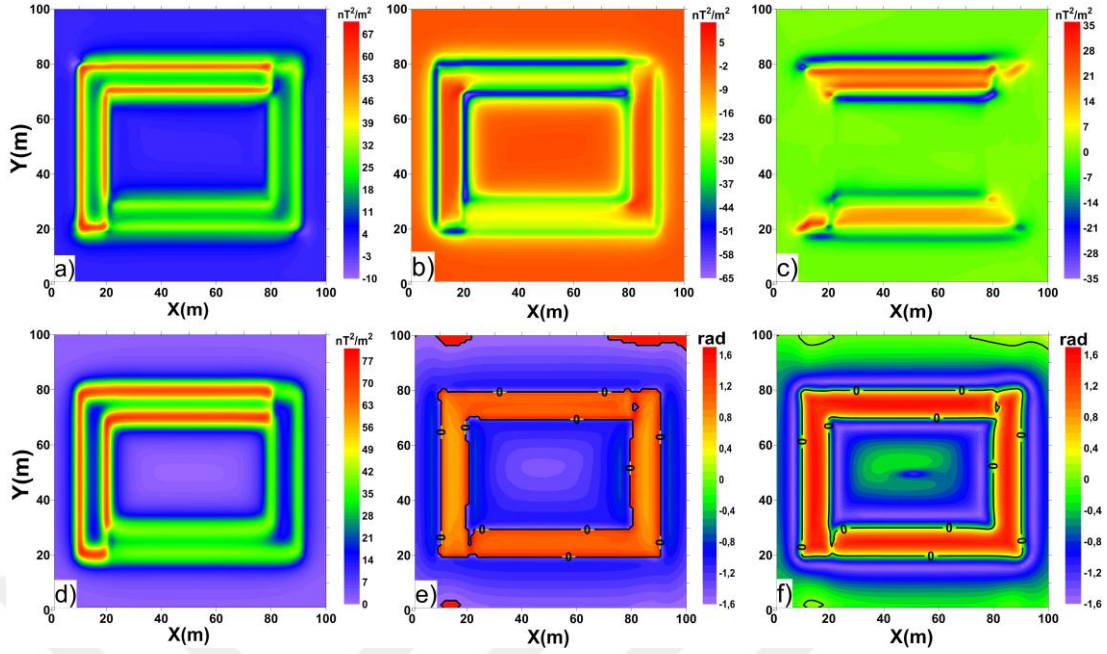
şeklinde verilir. Bazılarından yukarıda söz edildiği gibi, birçok yazar daha önce potansiyel verilere ait özdeğerler ile anomali kaynağı yapı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu ilişki göz önünde bulundurulduğunda tüm özdeğerlerden türetilen yeni bir deneysel (ampirik) sınır görüntüleme tekniği-operatörü (edge detector) türetmek oldukça mantıklı olacaktır. Buna göre MGT matrisinden hesaplanan özdeğerlerin bir birleşimini kullanılarak yeni bir sınır görüntüleme operatörü,

$$K = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2} \quad (3.101)$$

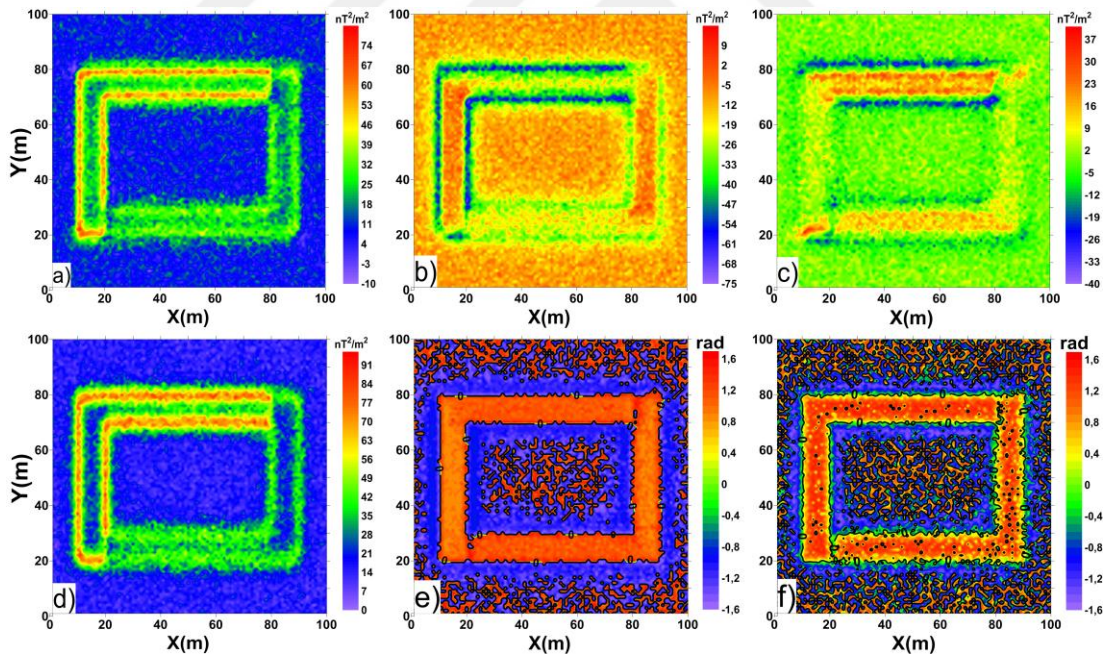
şeklinde verilebilir. Potansiyel alan kaynaklarına ait haritalarda en büyük sorunlardan biri, MGT bileşenlerine ait haritalarda da gördüğümüz gibi, farklı derinliklerdeki anomali kaynağı yapılarına ait sınırların aynı genlikte ve çözünürlükte görüntülenememesidir. Bundan dolayı yeni sınır görüntüleme operatörü K için, MGT matrisinin M_{zz} bileşenine dayalı bir normalizasyon işlemi önerilebilir. Bu sayede tilt açısı tekniğinde olduğu gibi sığ ve derin kaynakların sınırlarını aynı anda görüntüleyebilmek ve genliklerden bağımsız çözüm üretmek mümkün olacaktır. Bu amaçla,

$$NK = \tan^{-1} \left(\frac{K}{M_{zz}} \right) \quad (3.102)$$

türetilmiştir. Özdeğerlerin ve bu özdeğerlerden türetilen K ve NK'nın manyetik alan verilerindeki etkinliğini sınamak için Şekil 3.6. daki prizmalardan üretilen gürültülü ve gürültüsüz yapay veriler kullanılmıştır. Ayrıca bunların sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla tilt açısı haritaları da özdeğer analizlerine ek olarak Şekil 3.13. ve Şekil 3.14.'te verilmiştir. Buna göre gürültü içermeyen veriye ait sonuçlara bakıldığında λ_1 ' in maksimum – pozitif değerleri ve λ_2 'ni minimum - negatif değerleri modelin tüm



Şekil 3.13. Yapay verinin özdeğer analizleri (a) λ_1 , (b) λ_2 , (c) λ_3 , (d) K, (e) NK, (f) Tilt açısı (NK ve Tilt açısının sadece 0 konturları koyu renkli düz çizgi ile çizdirilmiştir.)



Şekil 3.14. Gürültülü yapay verinin özdeğer analizleri (a) λ_1 , (b) λ_2 , (c) λ_3 , (d) K, (e) NK, (f) Tilt açısı (NK ve Tilt açısının sadece 0 konturları koyu renkli düz çizgi ile çizdirilmiştir.)

sınırları görüntülerken λ_3 'ün yalnızca D-B uzanımlı sınırları izlediği görülmektedir (Şekil 3.13.). Ayrıca λ_3 'ün maksimum değerleri prizma merkezleri üzerinde yer alırken yani kütleye odaklanırken minimum λ_3 değerleri D-B sınırları izlemekte ancak,

K-G yönlü sınırlara ait çözünürlüğün çok zayıf olduğu görülmektedir. Buna ilave olarak, yeni önerilen sınır analizi detektörü K, tüm sınırları maksimum değerlerle görüntülemektedir. Fakat λ_1 , λ_2 , λ_3 ve K haritalarından her biri için dikkat çeken özellik, daha derin prizmaların sınırlarını açık bir şekilde tespit edemedikleri ve bu anomalilerin çözünürlüklerinin sıkı olanlara kıyasla zayıf olmasıdır. Fakat NK ve tilt açısı haritalarında aynı anda hem derin hem de sıkı prizmaların sınırlarının 0 konturu ile izlendiği görülmektedir. Ayrıca, tilt açısının aksine NK, prizmaların sınırlarını daha net görüntülemektedir. Çünkü prizmaların etrafında gözlemlenen tilt açısının negatif konturlarının, prizmaların sınırlarında karışıklığa yol açtığı görülmektedir. Bununla birlikte, NK prizma sınırlarını çok net bir şekilde görüntülemiştir (Şekil 3.13.).

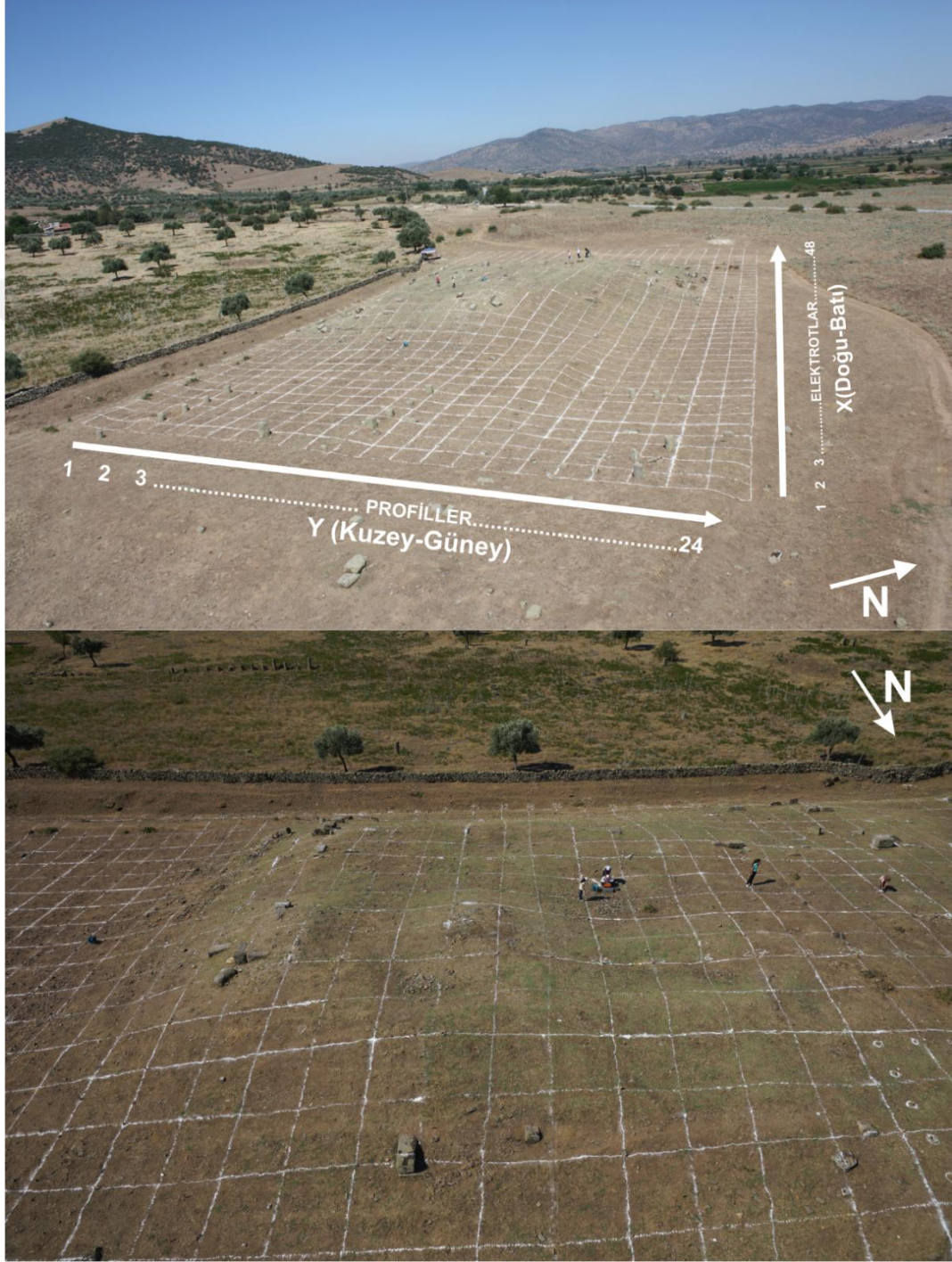
Gürültülü yapay veriye ait özdeğer analizi sonuçlarında, λ_1 ve λ_2 haritaları gürültü nedeniyle biraz kirlenmiştir. Bunun dışında sınır analizi hususunda gürültüsüz veriye göre belirgin bir değişiklik gözlenmemektedir. Gürültüsüz yapay veri sonuçlarında olduğu gibi λ_1 haritasındaki maksimum-pozitif değerler ve λ_2 haritasındaki minimum-negatif değerler prizma sınırlarını izleme eğilimindedir. Fakat derin prizmaların sınırlarının görüntülenmesindeki çözünürlük, gürültüsüz olanlara kıyasla biraz daha bozulmuştur. Dikkat çeken bir özellik, λ_1 gürültüyü daha fazla bastırması ve λ_2 'den daha az gürültü içermesidir. Benzer şekilde, burada da λ_3 'ün D-B sınırların görüntülenmesi için çözünürlük gücüne sahip olduğu söylenebilir. Aynı şekilde, K haritası için de gürültüyü bastırdığı ve prizma sınırlarını izlediği söylenebilir. Fakat derin prizmaların sınırlarındaki çözünürlük sorununa sahip olduğu açıkça görülmektedir. NK ve tilt açısı haritaları için, gürültüsüz verideki çözümlerine benzer şekilde, sıkı ve derin prizmalara ait sınırlara normalizasyon özelliklerinden dolayı aynı anda cevap verdikleri ve bu sınırları 0 konturları ile izledikleri görülmektedir. Fakat NK haritasında görüntülenenen sınırların tilt haritasındakilere göre daha net olduğu görülmektedir. NK haritasında gürültü daha çok bastırılmış olarak karşımıza çıkmaktadır. Buradan NK'nın tilt açısına göre gürültüyü daha çok bastırdığı ve çözünürlüğünün daha yüksek olduğu sonucu kolaylıkla çıkarılabilir.

BÖLÜM 4. SAHA UYGULAMASI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yukarıda anlatılan sınır görüntüleme teknikleri ile özdeğer analizlerinin Alabanda Antik Kenti'nde yer alan antik sarnıç binası olarak yorumlanan gömülü yapı üzerinde toplanan manyetik veriye nasıl uygulandığı anlatılacaktır. Öncelikle saha çalışmasının gerçekleştirildiği alanda karelaj uygulaması yapılmıştır. Şekil 4.1.'de görülen karelaj hücreleri 2,5 m x 2,5 m boyutlarında olup 24 profilden oluşan bu hücrelerde 48 elektrot kullanılarak elektrik rezistivite tomografisi (ERT) ölçümleri yapılmıştır. Manyetik ölçümler ise bu karelaj hücreleri arasında 1m x 1m boyutlarında, her biri 119 metre uzunluğunda toplam 53 profil boyunca, Scintrex toplam alan proton manyetometresi kullanılarak 6037 noktada veri toplanarak gerçekleştirilmiştir. Lokal ölçekteki saha etüd aplikasyonunda ölçüm noktası aralıkları küçük tutulduğu için gerçekleştirilen toplam alan ölçümü, adeta bir “mikro” manyetik çalışmasına dönüşmüştür denilebilir. Yani ölçüm noktası aralıklarını küçük tutmak sığ kaynaklardan bilgi alınacağı anlamını taşır. Bu sayede toplam alan ölçümleri ile arkeojeofizik çalışma yapmak mümkün hale gelecektir. Her bir profil sonunda ölçümler için belirlenen bir baz noktasında toplam manyetik alanın yeniden ölçülmesi ile jeomanyetik alanının günlük değişimleri gözlemlenmiş ve bu farklılıklar vasıtasıyla zaman (baz) değişimi düzeltmeleri yapılmıştır. Bütün bu veriler saha planına uygun olan bir ızgara üzerine çizilmiştir. Buna göre, ERT ölçümleri Y ekseninde 0-57,5 metreler arasında ve manyetik veriler 4-56 metreler arasında; X ekseninde ERT ölçümleri 0-117,5 metreler arasında ve manyetik veriler 0-119 metreler arasında yer almaktadır (Örneğin, Şekil 4.3.).

Elde edilen toplam manyetik alan verisini, sınır analizleri uygulamasına hazır hale getirmek için iki işlem uygulanmıştır. Bunlardan ilkinde, toplam alan ham verisinden birinci dereceden trend etkisinin çıkarılması ile jeomanyetik alanın etkisi giderilmiş ve toplam alan anomali haritası elde edilmiştir. Akabinde trend etkisi giderilmiş veriye 54° inklinasyon (eğim) ve 4° denklinasyon (sapma) açısı değerleri ile kutba indirgeme

işlemi uygulamıştır (Şekil 4.2.). Bu sayede enleme bağlı olarak manyetik alan doğrultusundan kaynaklanan ve anomali ile kaynak yapı arasındaki meydana gelen faz kaymalarının giderilmesi amaçlanmıştır. Kutba indirgeme tekniği birçok arkeomanyetik çalışmada kullanılmaktadır (Örneğin, Sheriff ve ark., 2010; Cheyney

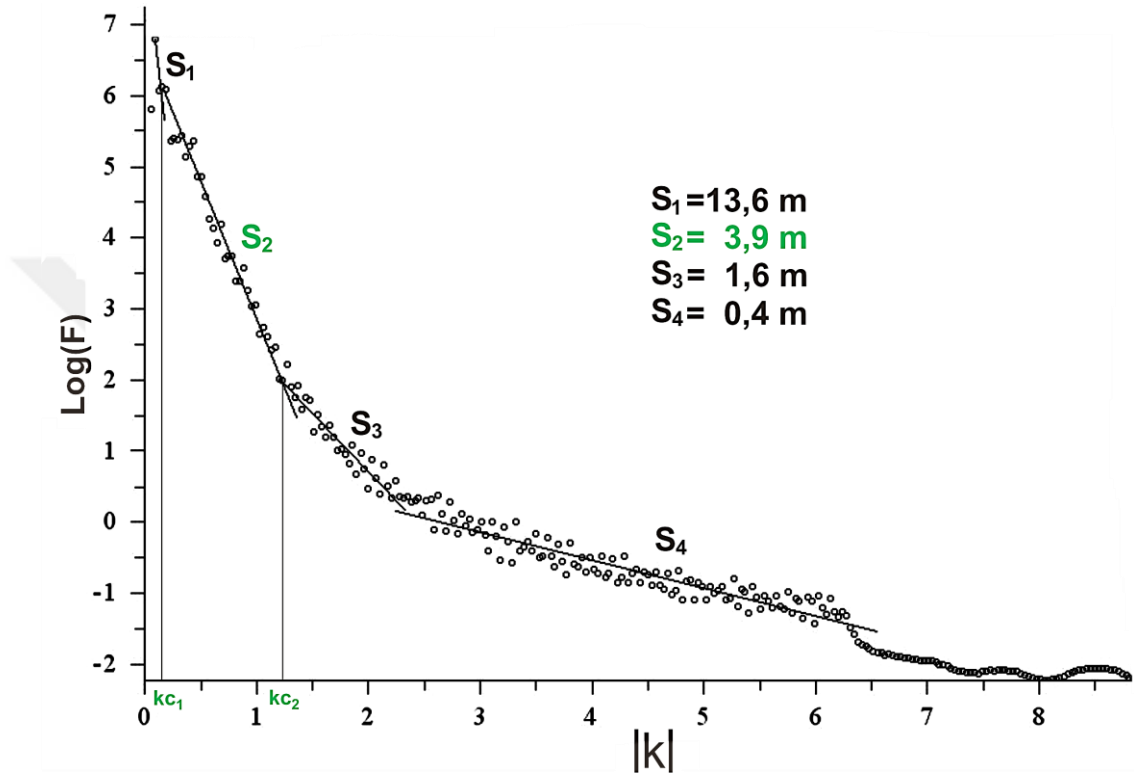


Şekil 4.1. Elektrik rezistivite tomografisi (ERT) için ölçüm noktaları için hazırlanan karelaj. ERT karelaj hücrelerinin boyutu 2,5 m x 2,5 m'dir. Manyetik ölçüm, bu ızgaralar arasında 1 m x 1 m karelaj hücreleri boyunca gerçekleştirilmiştir.

ve ark., 2011; Stampolidis ve Tsokas, 2012; Yılmaz ve ark., 2018). Fakat bununla beraber tekniğin bazı dezavantajlarına da değinilmektedir. Bu bağlamda, kutba indirgeme tekniği uygulanırken dış manyetik alan doğrultusu ile kaynak yapının manyetizasyon doğrultusu aynı olarak düşünülmektedir. Bunun doğuracağı hataların çok küçük olacağından dolayı ihmal edilebileceğine dair Bölüm 3.2’de açıklamalar yapılmıştır. Ek olarak, kalıntı mıknatıslanmanın bilgi eksikliğinden dolayı göz ardı edilmesi de yapılan kabullerdendir. Tüm bunlar, güçlü kalıntı mıknatıslanma bulunan anomali kaynağı yapılarda gömülü yapı konumlarının manyetik haritadan doğru bir şekilde algılanmasını olumsuz etkileyebilir (Oruç ve Selim, 2011). Bu tür çalışmalarda, çeşitli jeofizik yöntemlerin karşılaştırmalı olarak kullanılması ile bu eksikliklerin üstesinden gelinebilir. Bu bağlamda, bu tür hataları kontrol etmek ve sınır görüntüleme tekniklerinin etkinliğini ve çözünürlüğünü sınamak için ERT ve manyetik ters çözüm kesitlerine karşılaştırılma amaçlı yer verilmiştir.

Sınır görüntüleme tekniklerinin arazi verisine uygulanması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilkinde, tüm teknikler ham veriden trend analizi ile elde edilen kutba indirgeme işlemi yapılmış veriye uygulanmıştır. Bu sayede, tekniklerin gürültülü arkeomanyetik verilerdeki etkinliğini incelemek amaçlanmıştır. İkinci olarak, Sheriff (2010) tarafından “matched filter” olarak isimlendirilen bir band-geçişli süzgeç, kutba indirgenmiş anomali haritasına uygulanmıştır. Anomali kaynaklarının ortalama derinlikleri, genlik spektrumunun doğal logaritmasının radyal dalga sayısının bir fonksiyonu olarak çizdirilmesi ile belirlenebilir (Blakely, 1996). Radyal ortalama genlik spektrumu, farklı radyal dalga sayısı serilerine göre farklı eğimlerde doğru parçaları ile temsil edilebilir. Genel olarak küçük radyal dalga sayılarına karşılık gelen doğru parçaları daha derin kaynaklarla, orta büyüklükteki dalga sayıları sığ kaynaklarla ve yüksek dalga sayıları ise veri içindeki gürültüyle temsil edilir (Spector ve Grant, 1970; Pawlovski ve Hansen, 1990). Buna göre, suseptibilite arayüzeylerinin ortalama derinlikleri spektrumun işaret ettiği doğruların eğimlerinden tahmin edilebilir. Bu amaçla, ERT ters çözüm kesitlerinden elde edilen derinlik bilgisiyle karşılaştırarak, manyetik verinin radyal ortalama genlik spektrumundan bu aralığa karşılık gelen kesme dalga sayıları tespit edilmiş ve bu kesme dalga sayılarına göre

belirlenen band-geçili süzgeç ile verinin yüksek dalga sayılı bileşenleri veriden temizlenmiştir. Böylece kutba indirgenmiş veriden, moloz ve örtü yapılarına ait gürültü çıkartılmıştır (Şekil 4.2.). Bu sayede sınır görüntüleme teknikleri, sadece gömülü yapıdan kaynaklanan anomalilere odaklanacak ve tekniklerin gürültüden arındırılmış arkeomanyetik verilerdeki başarısı irdelenecektir.

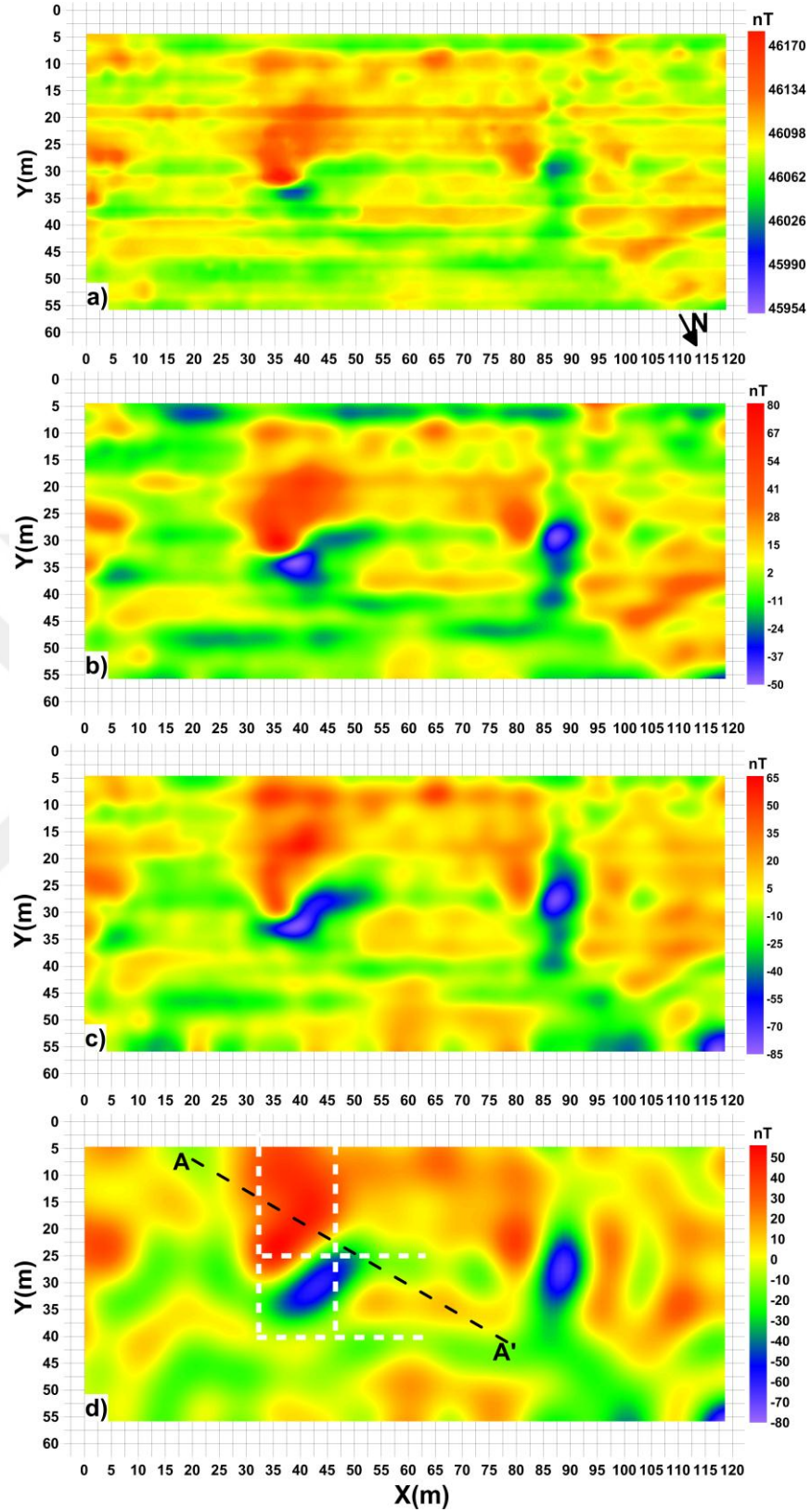


Şekil 4.2. Kutba indirgeme işlemi yapılmış verinin radyal ortalama genlik spektrumu ve doğruların eğimlerinden hesaplanan ortalama derinlikler. Band-geçili süzgeç için kesme dalga sayıları $kc_1=0,15$ rad/m ve $kc_2=1,23$ rad/m. S_2 doğrusu için hesaplanan kalınlık ve derinlik değeri ERT kesitlerinden ve 2-B manyetik suseptibilite kesitinden belirlenen gömülü yapılara ait bilgiler ile tutarlıdır.

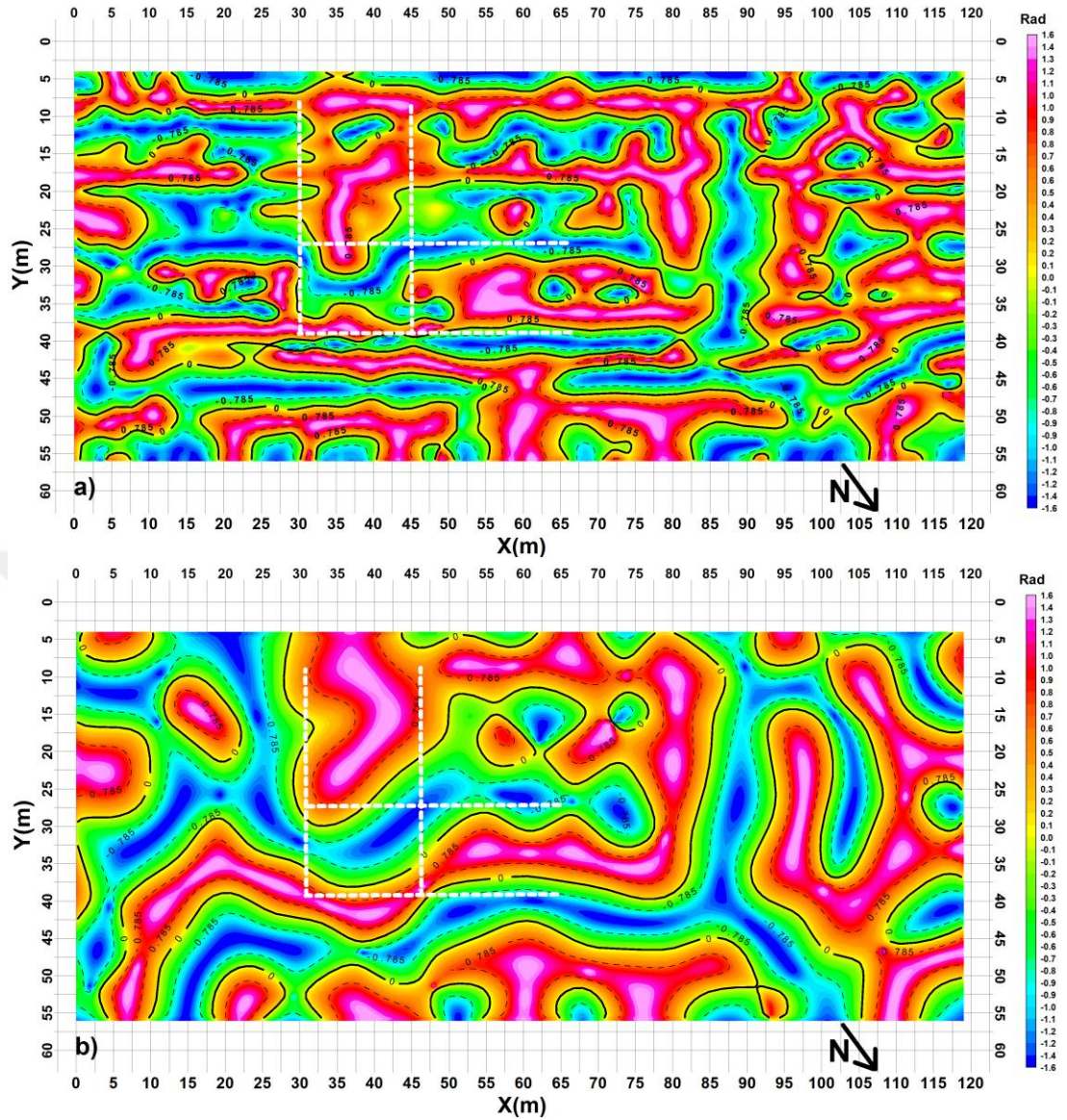
Şekil 4.3.a'da gömülü sarnıç binası üzerinde toplanan ham veri görülmektedir. Dikkat edilirse ham veride çalışma alanında yer alan herhangi bir anomali kaynağının oluşturacağı gürültüden başka bir de D-B yönlü bir gürültü trendi görülmektedir. Bu gürültü trendi, aletsel ve ölçüm yönüne bağlı olarak gelişen bir gürültüdür ve gömülü anomali kaynağı yapılarla veya örtü yapısıyla alakalı değildir. Arkeolojik ölçümlerde sıklıkla karşılaşılan bu tür gürültülerin giderilmesi için Tsokas ve ark. (1997) basit bir ağırlıklı kayan ortalama penceresinin başarılı ve yeterli olduğunu belirtmişlerdir. Bu amaçla ham veriye, trend analizi ve kutba indirgeme işlemi yapılmadan önce yönlü ve aletsel gürültüyü giderecek bir 3x3 kayan ortalama penceresi uygulanmıştır. Daha

sonra, veriye trend analizi uygulanmış ve elde edilen toplam alan anomali haritası Şekil 4.3.b’de gösterilmiştir. Şekil 4.3.’teki gömülü sarnıç yapısına ait haritalarda ilk göze çarpan anomaliler, genellikle D-B ve bazen K-G yönlü büyük genlikli anomalilerdir. Bu büyük genlikli anomalilerin sarnıç binasının temel yapıtaşlarından olan gnays bloklarından kaynaklandığı düşünülebilir. Zira gnays, manyetit minerali bakımından çalışma alanını örten kuvaterner yaşlı diluvial örtü tabakasından daha zengindir. Bundan dolayı gömülü sarnıç binasını oluşturan yapılar ile çevre kayaç arasında bir manyetik suseptibilite kontrastı meydana gelecektir. Bununla beraber, haritalarda gürültü kirliliği oluşturan ve etrafa saçılmış olarak örtü tabakası içinde yer alan sığ kaynaklardan meydana geldiği düşünülen yüzeysel kapanımlar da görülmektedir. Kutba indirgeme işlemi yapılmış verideki anomali karakteri, genel olarak trend analizi sonucunda elde edilen toplam alan anomali haritası ile benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik, anomali alanının doğrultusu ile jeomanyetik alanın doğrultularının birbirine yakın olması ile açıklanabilir.

Şekil 4.4.’te kutba indirgenmiş toplam alan anomali haritası ve radyal ortalamalı genlik spektrumundan elde edilen kesme dalga sayılarına göre band-geçişli süzgeçlenmiş harita kullanılarak elde edilen tilt açısı sonuçları yer almaktadır. Ham verilerde gözlenen D-B ve K-G yönlü anomaliler tilt haritalarında daha net bir şekilde görülmektedir. Sadece kutba indirgeme işlemi yapılmış olan anomali haritasından elde edilen tilt haritasında gürültü içeriğinin olumsuz etkisi açıkça görülmektedir. Bu durumun aksine band geçişli süzgeçlenmiş veriden elde edilen tilt haritası ise daha net bir görüntü sunmaktadır. Buna göre verinin gürültü içeriğinden arındırılmasının bu tür sınır analizi teknikleri için faydalı olduğu sonucuna erişilebilir. Bununla beraber, her ne kadar sonuçlarında gürültü içeriği fazla olsa da tilt açısı tekniğinin anomali kaynağı yapının sınırlarına ait bilgiler üretmede kısmen de olsa başarılı olduğu söylenebilir. Şekil 4.5.’te jeofizik çalışmalar sonucunda elde edilen bilgilere dayanılarak gerçekleştirilen kazı çalışmaları sonucunda açılım yapılan alanlar görülmektedir. Arkeolojik kazı çalışmaları sonucunda açılım yapılan bu alanlar yaklaşık olarak belirlenip tilt haritalarının üzerine beyaz renkli dikdörtgenler ile işaretlenmiştir.



Şekil 4.3. Gömülü antik sarnıca ait anomali haritaları. (a) Ham veri, (b) toplam alan anomali haritası, (c) kutba indirgenmiş toplam alan anomali haritası, (d) band geçişli süzgeçlenmiş harita. A-A' profili manyetik ters çözüm için kullanılacak veriye ait kazı alanına karşılık gelen kesittir. Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Tilt haritaları. (a) Kutba indirgenmiş toplam alan anomali haritasından elde edilen tilt haritası, (b) band-geçişli süzgeçlenmiş harita kullanılarak elde edilen tilt açısı. Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile gösterilmiştir.

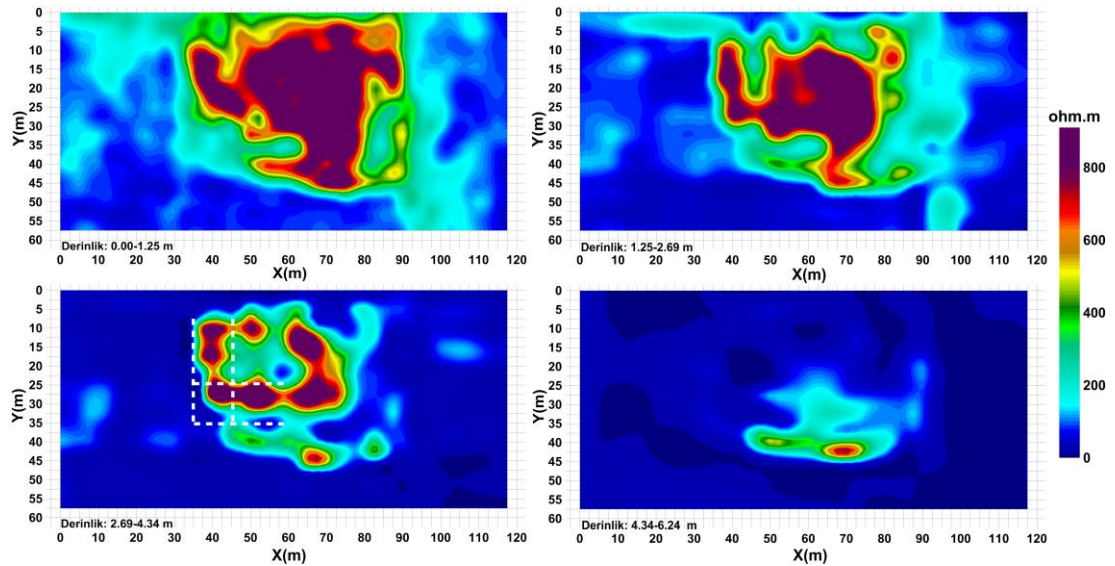
Şekil 4.1.'de görülen profiller üzerindeki 2-B ölçümlerden elde edilerek hazırlanan veriler, Res3Dinv (Loke ve Barker, 1996) 3 boyutlu ters çözüm programı ile değerlendirilerek Şekil 4.6.'da yer alan ERT derinlik kesitleri 5 iterasyonun ardından % 3,75 mutlak hata değeri (ABS error) ile elde edilmiştir. Öz direnç verisinin ters-çözümünde bloklu (L1-norm, robust) en küçük kareler çözümü (Loke ve ark., 2003) tercih edilmiştir. ERT derinlik kesitlerinde açılım yapılan bu alanlar beyaz renkli dikdörtgenler ile işaretlenmiş bir halde görülmektedir. Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi sarnıç binasının yapı taşları gneys bloklarından oluşmaktadır. Bu bloklar ile örtü



Şekil 4.5. Gömülü olan antik sarnıç binasının kazı çalışmalarıyla ortaya çıkarılan kısımları. Şekilde görülen ve kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile ilgili haritalar üzerinde işaretlenmiştir.

tabakası arasındaki öz direnç farklılığından dolayı ERT kesitlerinde, bir kısmı kazılarla ortaya çıkarılan sarnıç binasının temel yapıları açıkça görülmektedir. Ayrıca ERT kesitlerinde sığ derinliklerde, örtü yapısı içindeki moloz döküntülerinden kaynaklanan gürültü de göze çarpmaktadır.

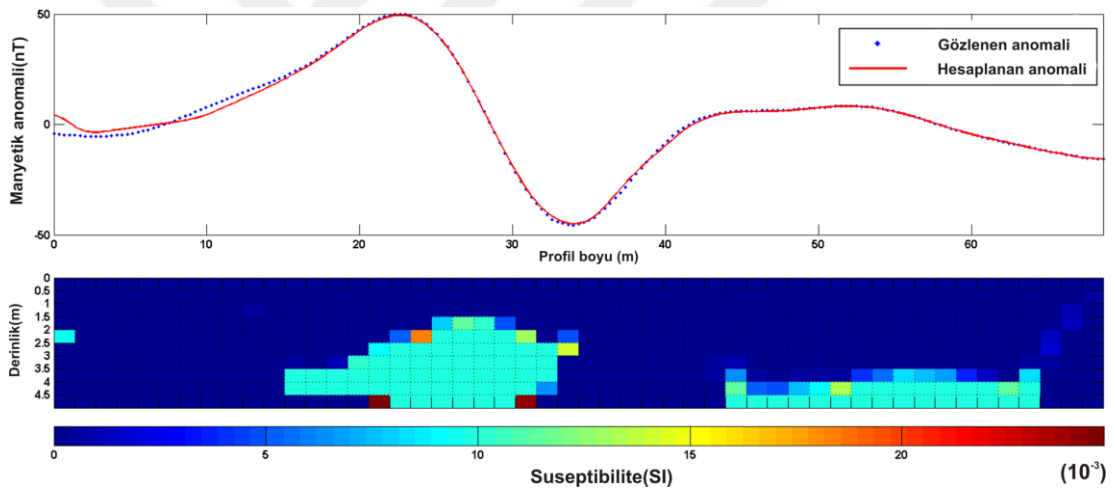
Şekil 4.7.'de süzgeçlenmiş veriden elde edilen A-A' profili kullanılarak gerçekleştirilen 2-B manyetik ters çözüm işleminin sonucunda gözlenen ve hesaplanan anomali ve manyetik suseptibilite kesiti görülmektedir. Ters çözüm işlemi Stocco ve ark. (2009) tarafından verilen MAG2D Matlab tabanlı program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. A-A' kesiti boyunca yaklaşık 100 nT genliğe sahip bir manyetik anomali eğrisi gözlenmektedir. Eğrinin bu maksimum ve minimum genlik değerleri, gömülü arkeolojik yapıların suseptibilite kontrastı ile ilgilidir. Zira ters çözüm sonucu elde edilen 2-B kesitte bu noktalarda suseptibilite farklılığı görülmektedir. Ters çözüm kesitinde gömülü yapıların derinlikteki dağılımı kestirilirken, gömülü arkeolojik yapının fiziksel büyüklüğü olan suseptibilite değerleri ile modellenmiştir. Buna göre ters çözüm kesitindeki suseptibilite değerleri inceleme alanı jeolojisine göre değerlendirilirse, metamorfik kayalar için ve özellikle gnays birimleri için literatürde verilen suseptibilite aralığı ile uyumlu olduğu görülmektedir (Sanver ve İşseven, 2007; Hunt ve ark., 1995). Buna ilave olarak, bu farklılıklarının konumları, Şekil 4.5.'te kazılar ile açılan alanlarla büyük ölçüde uyumludur. Aynı şekilde, ERT derinlik kesitleri, 2-B manyetik suseptibilite kesitindeki mevcut yapıların derinliğini ve konumunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.6. 3-B elektrik özdirenç tomografi verilerinin ters çözümünden elde edilen rezistivite derinlik kesitleri. Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile gösterilmiştir.

Tilt haritasında sıfır konturu (kalın siyah düz çizgi) izlendiğinde ERT derinlik kesitlerinde sarnıç temel yapıları olarak belirlenen yapılarla büyük ölçüde benzer

olduğu görülmektedir. Buna göre gömülü sarnıç binasının şekli ve uzanımı tilt açısının sıfır konturu ile belirlenebilmektedir. Gömülü yapıların üst derinliği için tilt açısının $\pm\pi / 4$ konturlarından hesaplanan derinlik değerleri 2 ile 4 m arasında değişmektedir. Bu değer de ERT kesitleriyle ve manyetik ters çözümünden hesaplanan derinlik değeri ile uyum göstermektedir. Ek olarak, tilt haritalarında temel yapıların doğusunda ve batısında bazı anomaliler görülmektedir. Aksine bu anomaliler ERT kesitlerinde oldukça zayıftır ve neredeyse fark edilememektedir. Buna göre, öz direnç değeri örtü birimine yakın fakat manyetik suseptibilite değeri yüksek olan bir takım anomali kaynakları düşünülebilir. Bunlara ilişkin kesin sonuçlar kazılar ile ortaya çıkarılabilirse de tahmini olarak örtü biriminden yapılmış su taşıma sistemleri veya su künkleri gibi yapılar olarak düşünülebilir. Zira bu tür su boruları pişmiş kil içeriğine sahip olacağından manyetik suseptibiliteleri örtü birimine göre daha yüksek olacaktır.

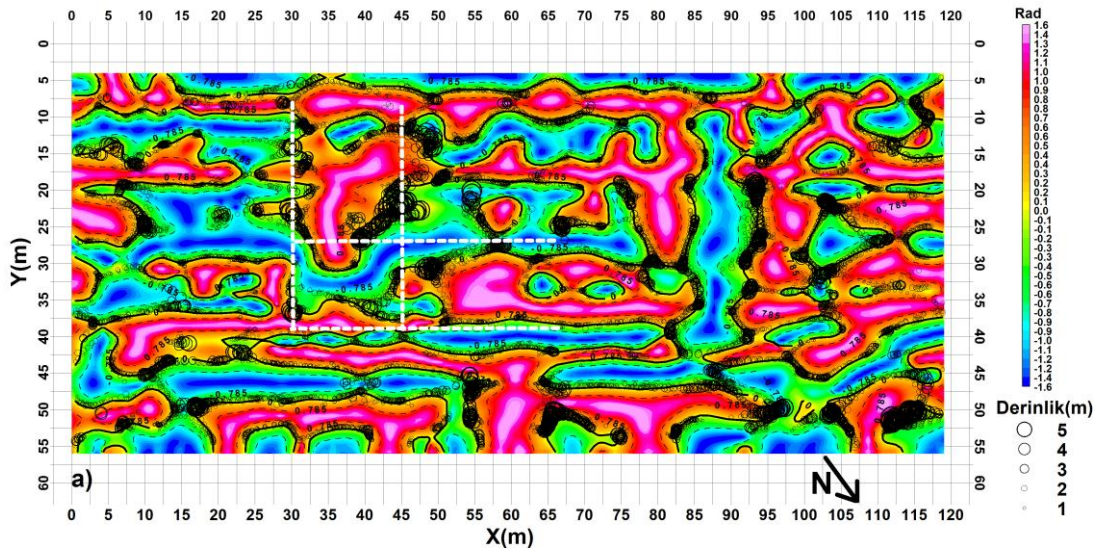


Şekil 4.7. Gözlenen ve hesaplanan anomaliler ve 2-B ters çözüm işlemi sonucunda elde edilen manyetik suseptibilite kesiti.

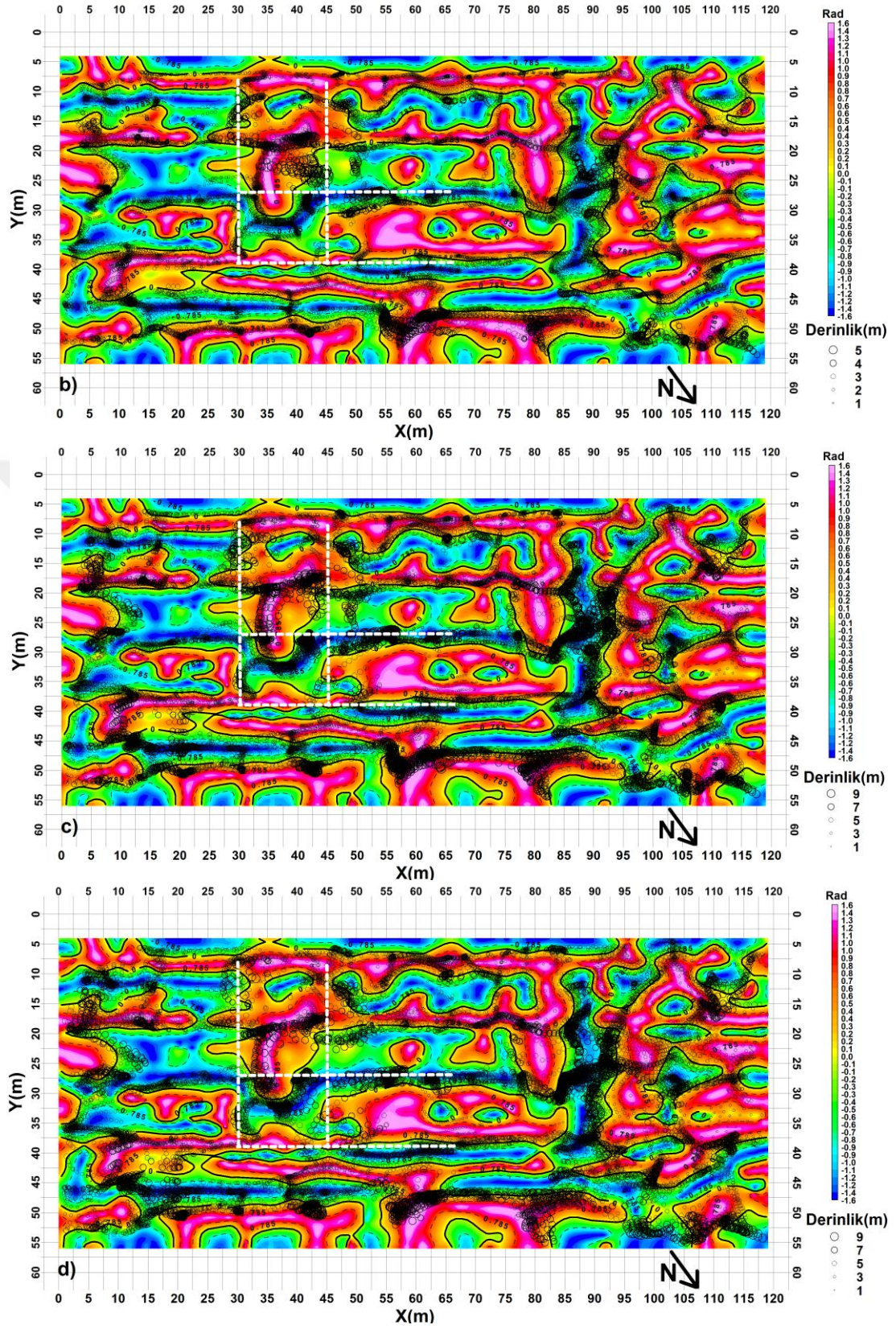
Şekil 4.8. ve 4.9.'da kutba indirgenmiş toplam alan anomali haritası ve band geçişli süzgeçlenmiş manyetik veri kullanılarak elde edilen Euler dekonvolüsyonu sonuçları yer almaktadır. Bu sonuçlar elde edilirken, Tablo 3.1.'e göre farklı yapısal indeksler kullanılarak birçok farklı Euler penceresi ile deneme-yanılma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Burada bütün pencerelere ait sonuçların hepsine yer verilmeyip bilakis farklı yapısal indekslere bağlı olarak pencere boyunun seçimi için, istenilen anomalilerin dalga boylarını kapsayacak şekilde ve ERT kesitlerinden belirlenen derinliklere göre sarnıç temel yapılarına ilişkin derinliklerin (1-6 metre) yaklaşık iki

katı olacak şekilde en uygun pencere olarak görülen ve en uygun sonuçları üreten Euler penceresine ait sonuçlara yer verilmiştir. Sonuçlar elde edilirken derinlik toleransı % 10 olarak kullanılmıştır. Teorik uygulamalarda yapıldığı gibi burada da Euler sonuçları ilgili tilt haritasının üzerine çizdirilmiştir. Bu sayede Euler çözümlerinin yapı sınırlarına ait bilgi içeriği de gözlemlenmiştir.

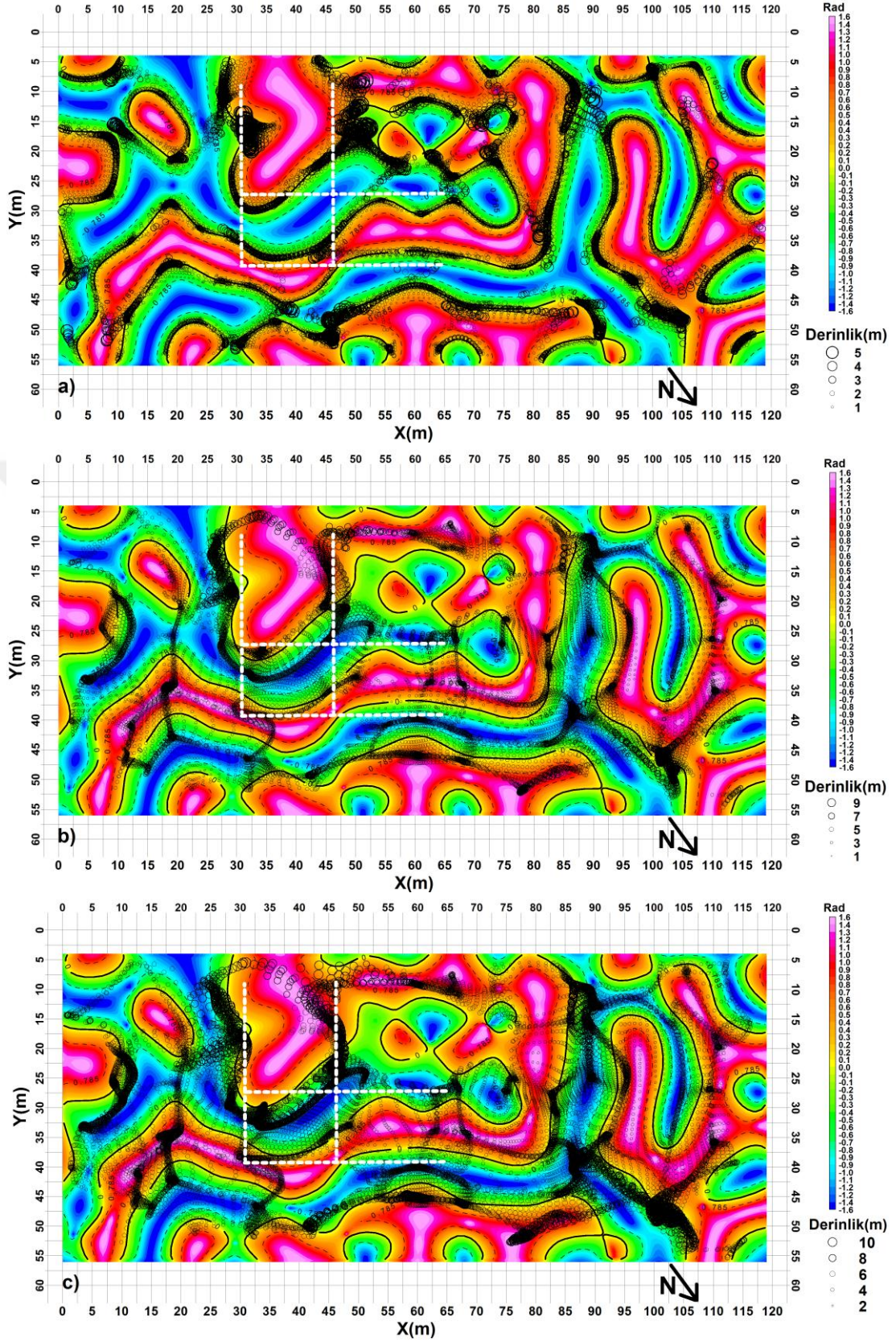
Her iki verinin Euler sonuçlarında ilk dikkati çeken hususlardan biri çözümlerin kümelenmeler oluşturmalarıdır. Ayrıca bu kümelenmeler D-B ve K-G uzanımlı bir trend sergilemekte ve bu kümelenmeler ilgili tilt haritalarının 0 konturu boyunca yer almakta veya çözümler 0 konturuna büyük ölçüde uyum sağlamaktadır. Buna göre Euler çözümlerinin yapı sınırları üzerinde yer aldığı ve kümelenmelerden dolayı sağlıklı sonuçlar elde edildiği söylenebilir. Her iki veriden elde edilen sonuçlar için ortak olarak söylenebilecek olan bir diğer ifade ise, Euler çözümlerine ait derinliklerin, yapısal indeksin (N) daha büyük seçilmesiyle göreceli olarak artmasıdır. Ayrıca her iki veri tipi için N=0 için çözümler tilt haritasının 0 konturu ile birebir örtüşürken N=1, N=2 ve N=3 için bu durum değişmektedir. Öte yandan her iki veri için Euler çözümlerinde dikkat çeken bir diğer husus da çözümlerin kazı çalışmalarıyla açılan alanın sınırlarına veya iç kısmına atanmasıdır.



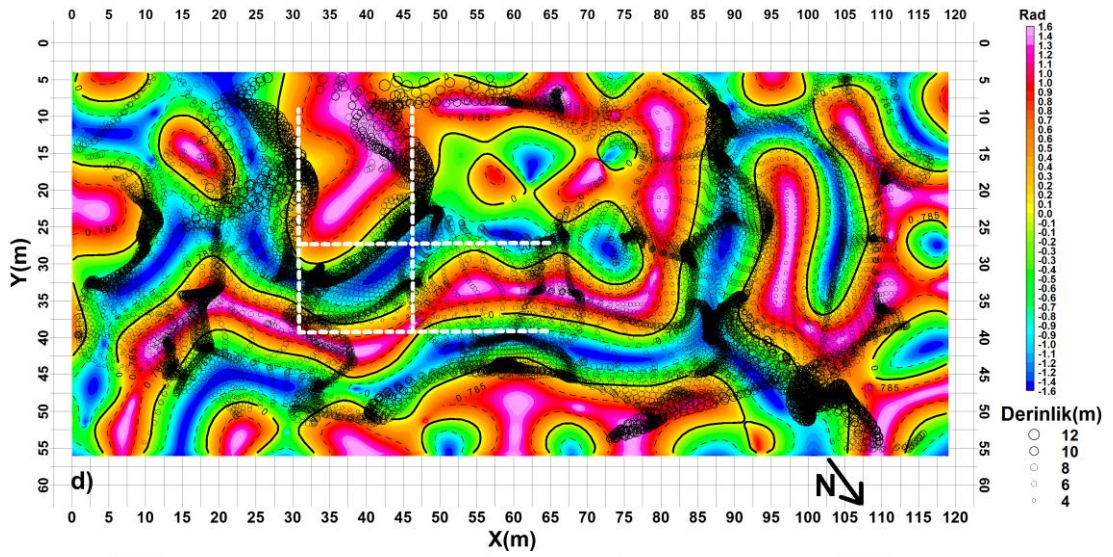
Şekil 4.8. Kutba indirgenmiş veriden elde edilen Euler dekonvolüsyon çözümleri. (a) N=0 için. Çözümler verinin tilt haritası üzerine işaretlenmiştir. Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile gösterilmiştir.



Şekil 4.8. (Devamı) Kutba indirgenmiş veriden elde edilen Euler dekonvolüsyon çözümleri. (b) $N=1$ için, (c) $N=2$ için, (d) $N=3$ için. Çözümler verinin tilt haritası üzerine işaretlenmiştir. Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Band geçişli süzgeçlenmiş veriden elde edilen Euler dekonvolüsyon çözümleri. (a) $N=0$ için, (b) $N=1$ için, (c) $N=2$ için. Çözümler verinin tilt haritası üzerine işaretlenmiştir. Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile gösterilmiştir.



Şekil 4.9. (Devamı). Band geçişli süzgeçlenmiş veriden elde edilen Euler dekonvolüsyon çözümleri. (d) $N=3$ için. Çözümler verinin tilt haritası üzerine işaretlenmiştir. Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile gösterilmiştir

Şekil 4.8.'de kutba indirgenmiş verinin çözümlerinde kullanılan verinin gürültü karakteri haritalarda rahatlıkla görülebilmektedir. Zira çözümler haritalar boyunca düzensizlik arz eden bir şekilde yayılmıştır. Bununla beraber tilt haritası da bu veriden elde edildiği için Euler çözümleriyle tilt haritasının 0 konturu arasında yine de büyük tutarlılık mevcuttur. Buna göre açılım yapılan alan ile Euler çözümleri arasında bir uygunluk şekillerde görülmektedir.

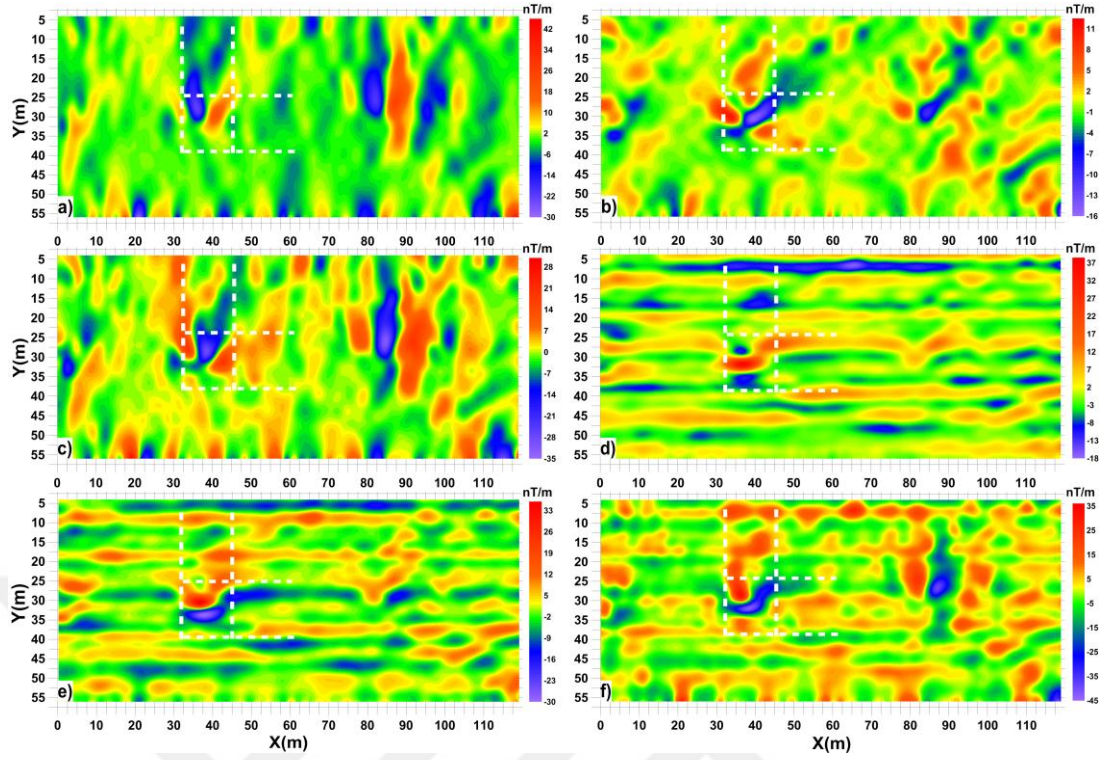
$N=0$ için Euler çözümlerinin sığ derinlikler ürettiği görülmektedir. Buna göre $N=0$ çözümlerinin gömülü yapıların üst tarafına ait derinliği yansıttığı söylenebilir. $N=1$, $N=2$ ve $N=3$ için ise çözümler gömülü yapıların daha derin kısımlarına işaret etmektedir. Çözümlerin, yapısal indeksin artışına göre gömülü yapının merkezi ve alt kısmının derinliklerine odaklandığı görülmektedir. Dolayısıyla yapısal indeksin artmasıyla çözümlerin derinliği de artmaktadır. En uygun yapısal indeks değeri $N=0$ ve $N=1$ olduğu görülmektedir. $N=0$ için tilt haritasının 0 konturu ile birebir uyuşan derinlik çözümleri, $N=1$ değeri için biraz saçılmaktadır. Bununla beraber açılım yapılan alanla ilgili olarak, ERT derinlik kesitlerine ve 2-B ters çözüm kesitine en uyumlu derinlik sonucunu $N=1$ değeri üretmiştir. $N=2$ ve $N=3$ yapısal indeksleri için üretilen çözümlerin sayısı artmıştır ve saçılma şeklinde $N=1$ yapısal indeksine göre bir farklılık yoktur. Fakat $N=2$ ve $N=3$ değerlerinin ürettiği derinlik değerleri ERT

kesitlerine ve manyetik ters çözüm kesitine göre daha büyük değerler üretmektedir. Bu açıdan uygun yapısal indeks olarak görülmemektedirler.

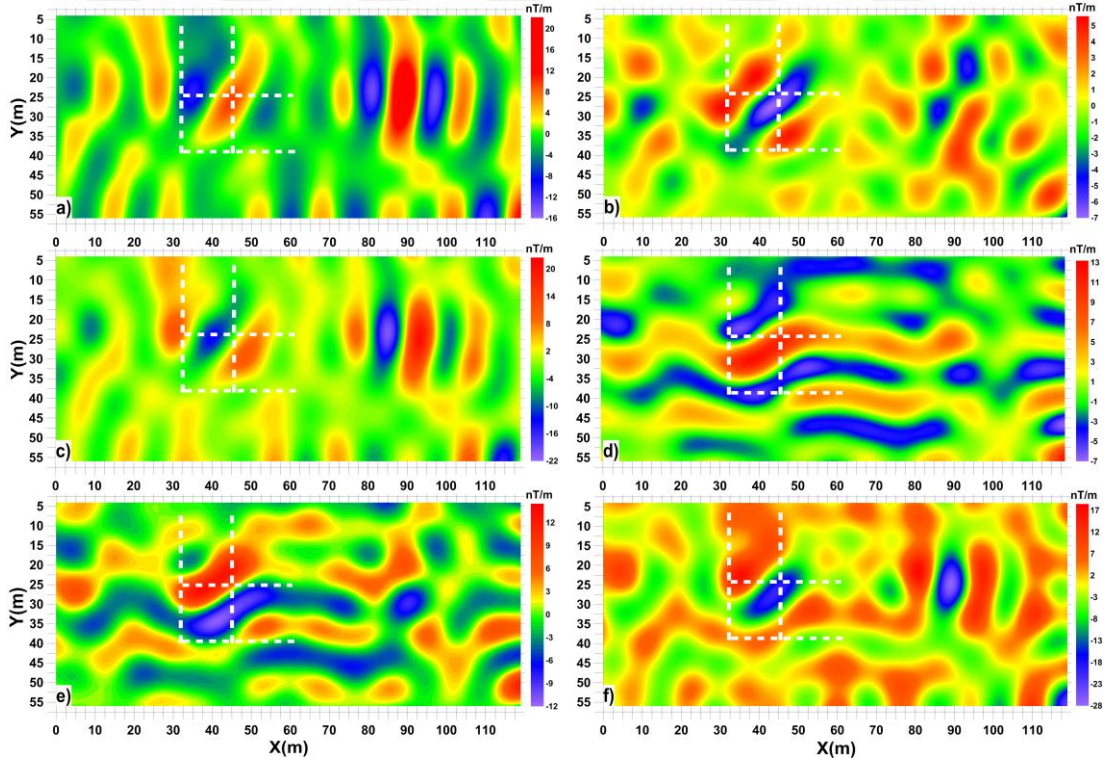
Şekil 4.9.'da band geçişli verinin Euler sonuçları için yapısal indekse göre sonuçların değişiminde bariz bir değişim görülmektedir. Buna göre $N=0$ için çözümler ilgili tilt haritasının 0 konturu ile birebir örtüşürken $N=1$, $N=2$ ve $N=3$ için ise Euler çözümlerinin sayısı artmakta fakat tilt açısının 0 konturundan saçılmalar görülmektedir. Yine aynı şekilde, yapısal indeksin artmasıyla çözümlerin derinliği de artmaktadır. $N=0$ ve $N=1$ için Euler çözümlerinin derinlikleri ERT kesitlerine ve 2-B manyetik ters çözüm kesitine uygun görülmektedir. Fakat $N=2$ ve $N=3$ için ise bu kesitlerden belirlenen derinlik bilgisinden daha büyük çözüm derinlikleri elde edilmiştir.

Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'de sırasıyla, sadece kutba indirgeme işlemi yapılmış anomali haritasından ve band geçişli süzgeçlenmiş anomali haritasından elde edilen MGT bileşenlerine ait sonuçlar yer almaktadır. Buna göre her iki verinin sonuçlarını karşılaştırmak gürültü içeriği bulunan arazi verilerinde MGT bileşenlerinin başarısını irdelemek için yararlı olacaktır. Band geçişli süzgeçlenmiş veriden elde edilen sonuçların oldukça net anomaliler ürettiği görülmektedir. Burada dikkati çeken önemli husus, gürültü içeriği bulunan veri için MGT bileşenlerinin ürettiği anomaliler ile band geçişli veriden üretilen sonuçlar arasında anomali uzanımı (trendi) ve genliği bakımından bariz bir uyumun görülmesidir. Buna göre Şekil 4.10.'da MGT bileşenlerinin gürültü içeriğine rağmen nispeten başarılı sonuçlar ürettiği söylenebilir.

Şekil 4.11.'de band geçişli süzgeçlenmiş veriden elde edilen MGT bileşenlerinin, gömülü yapının uzanımına ve şekline ilişkin net bilgiler ürettiği görülebilmektedir. Buna göre tensör bileşenlerin hesaplanmasından önce veriden fgürültü içeriğinin atılmasının yararı açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Şekil 4.11.'de M_{xx} ve M_{yy} bileşenlerinin sırasıyla gömülü yapıların şekline ilişkin K-G ve D-B uzanlı anomaliler ürettiği görülmektedir. Teorik çalışmalarda M_{xx} ve M_{yy} bileşenleri için maksimum genlik değerlerinin yapıların sınırlarında yer aldığı ve minimum değerlerin kütleye odaklandığı belirtilmişti.

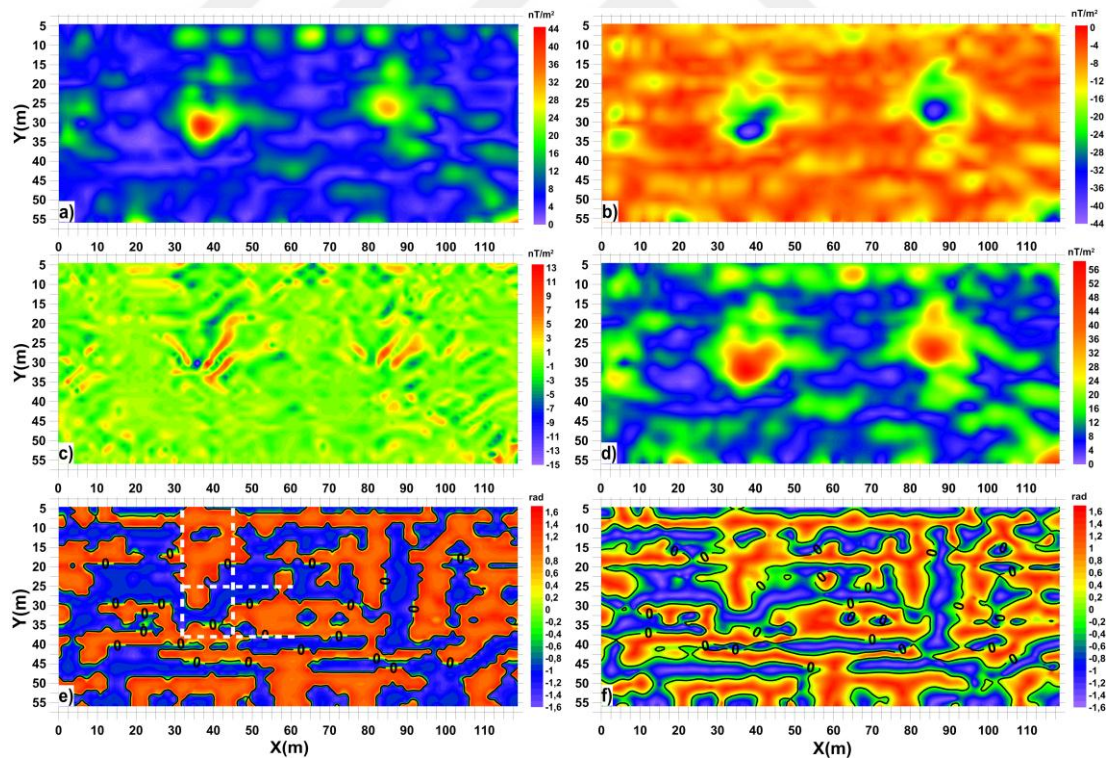


Şekil 4.10. Kutba indirgenmiş anomali haritasından hesaplanan MGT bileşenleri (a) M_{xx} , (b) M_{xy} , (c) M_{xz} , (d) M_{yy} , (e) M_{yz} , (f) M_{zz} . Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile gösterilmiştir.

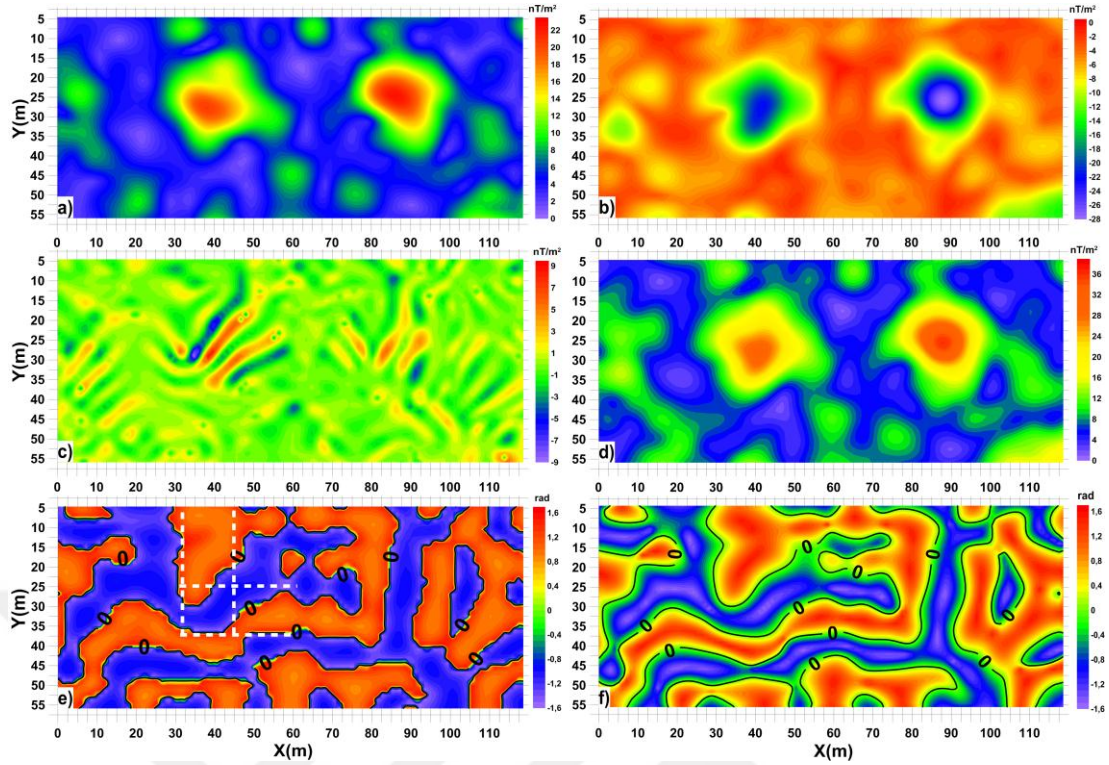


Şekil 4.11. Band geçişli süzgeçlenmiş anomali haritasından hesaplanan MGT bileşenleri (a) M_{xx} , (b) M_{xy} , (c) M_{xz} , (d) M_{yy} , (e) M_{yz} , (f) M_{zz} . Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgenler ile gösterilmiştir.

M_{xx} ve M_{yy} bileşenleri için burada da aynı şeyleri kazı alanın sınırları ve gömülü kütle ile ilgili olarak söylemek hemen hemen mümkün görülmektedir. Aynı şekilde teorik çalışmalarındaki tespit yeteneğine uygun olarak M_{xy} bileşeninin kazı alanın, dolayısıyla gömülü yapıların köşelerine farklı genliklerle başarılı bir şekilde odaklandığı da görülmektedir. Benzer şekilde M_{xz} ve M_{yz} bileşenleri için maksimum ve minimum genlikler ile sırasıyla gömülü yapıların K-G ve D-B sınırlarına ilişkin bilgi verdiği söylenebilir. M_{zz} bileşeni de maksimum genlikler ile gömülü yapı sınırlarına ilişkin bilgiler üretmektedir. Buna göre gömülü yapı düşey yönde derinlikle değişen bir halde olduğundan başarı ile M_{zz} bileşeni ile sınırlara ilişkin bilgi üretmiştir. Bu sınırlar tilt haritasında ve ERT kesitlerinde de görüntülenen sınırlar ve anomaliler ile oldukça uyumlu bir tarzdadır. Buna göre MGT bileşenleri için, tilt haritalarında 0 konturunun izlenmesi ile ortaya çıkan yapı sınırlarını M_{zz} bileşeni ile görüntülediği ve ek olarak gömülü yapıların köşe ve uzanım bilgilerine ilişkin bilgiler de sunduğu söylenebilir.



Şekil 4.12. Kutba indirgenmiş anomali haritasından hesaplanan özdeğer analizleri (a) λ_1 , (b) λ_2 , (c) λ_3 , (d) K, (e) NK, (f) Tilt açısı. Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgen ile gösterilmiştir. NK ve Tilt açısının sadece 0 konturları koyu renkli düz çizgi ile çizdirilmiştir.



Şekil 4.13. Band geçişli süzgeçlenmiş anomali haritasından hesaplanan özdeğer analizleri (a) λ_1 , (b) λ_2 , (c) λ_3 , (d) K, (e) NK, (f) Tilt açısı. Kazı alanına yaklaşık olarak karşılık gelen yerler kesikli çizgili beyaz renkli dikdörtgen ile gösterilmiştir. NK ve Tilt açısının sadece 0 konturları koyu renkli düz çizgi ile çizdirilmiştir

Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'te sırasıyla, sadece kutba indirgeme işlemi yapılmış anomali haritasından ve band geçişli süzgeçlenmiş anomali haritasından elde edilen özdeğer analizlerine ait sonuçlar yer almaktadır. Bu sonuçlara göre, iki şekil karşılaştırıldığında gürültünün sonuçlara olan olumsuz etkisi göze çarpmaktadır. Buna göre özdeğer sınır analizi için de verinin gürültüden arındırılması büyük yarar sağlamaktadır. Bununla beraber, MGT bileşenlerinde olduğu gibi, band geçişli süzgeçlenmiş veriden elde edilen sonuçlar irdelendiğinde özdeğer analizlerinin gürültülü verilerde de nispeten başarılı sonuçlar ürettiği sonucuna varılabilir. Çünkü her iki veri tipi için üretilen sonuçlardaki anomali tarzları ve genlikleri birbiri ile uyumlu görülmektedir. NK ve tilt açısı haritalarında yapı sınırlarının 0 konturu ile izlendiği görülmektedir. Gürültü içeriğinde gömülü yapıların sınırlarını görüntüleme başarısı ile ilgili olarak Şekil 4.12.'de NK'nın tilt açısına göre daha net bir görüntü oluşturduğunu da söyleyebiliriz. Buna göre NK'nın tilt açısına göre gürültüyü daha çok bastırdığını ve çözünürlüğünün daha yüksek olduğunu söyleyebiliriz.

Şekil 4.13.'te görüldüğü üzere, teorik çalışmalarda ürettikleri sonuçların aksine λ_1 , λ_2 , λ_3 ve K arazi verisinde, gömülü yapıların sınırlarına ilişkin ayrıntılı bilgiler üretmemişlerdir. Bununla beraber bu dördü, maksimum ve minimum genlikler ile gömülü yapıya ait temel yapılara işaret eden anomaliler üretmişlerdir ve bu anomalilerin bir kısmı kazı ile açılan alan denk gelmektedir. NK ve tilt açısı için birbirine yakın sonuçlar ürettikleri ilk bakışta söylenebilir. Her iki operatör gömülü yapıya ait sınırları 0 konturu ile başarılı bir şekilde görüntülemiştir ve bu sonuçlar ERT kesitleri ile ve 2-B manyetik ters çözüm kesiti ile oldukça uyumludur. Ayrıca şu da çok açık bir şekilde görülebilir ki, NK'nın tespit ettiği sınırlar tilt açısına göre çok daha nettir. Buna göre NK'nın ürettiği çözünürlüğün daha başarılı olduğu söylenebilir.



BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında gömülü arkeolojik yapılar üzerinde toplanan manyetik verilerde yer alan ve gömülü yapılardan kaynaklanan çizgisellikler değişik teknikler kullanarak ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla Alabanda Antik Kenti'nde yer alan gömülü bir antik sarnıç olduğu düşünülen yapı üzerinde toplanan manyetik veriler tilt açısı, Euler dekonvolüsyonu ve yeni bir teknik olarak MGT bileşenleri ve MGT özdeğer analizleri ile değerlendirilerek bu çizgisellikleri ortaya çıkarılmıştır.

Tekniklerin tamamı ilk olarak gürültü/gürültüsüz teorik verilerle test edilmiştir. Böylece gürültü içeriğinde davranışları incelenmiştir. Arazi verisinde de bunu sağlamak amacıyla veriye band geçişli süzgeç uygulanarak gürültü içeriği atılmıştır. Böylece süzgeçlemeden önceki veriye ve süzgeçlemeden elde edilen veriye bu teknikler uygulanarak tekniklerin, gürültü içeriğine üretecekleri cevaplar gerçek arazi verisinde de sınanmıştır. İlave olarak 3-B ERT kesitleri ve 2-B manyetik ters çözüm kesiti, tekniklerin başarısını sınamak için karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır.

Jeofizik çalışmaların yönlendirilmesiyle yapılan arkeolojik kazı çalışmaları sonucu alanın bir kısmında gömülü yapılar ortaya çıkarılmıştır. Bu alan jeofizik tekniklerin yorumlanması ve doğruluğunun sınanması için arazi verilerinin hepsinde kullanılmıştır. Buna göre 3-B ERT kesitleri kazı alanının konumu ve derinliği ile oldukça uyushmaktadır. 2-B manyetik ters çözüm kesiti de konum ve derinlik bakımından ERT kesitleri ile ve dolayısıyla kazı alanı ile birbirini desteklemektedir.

Tilt açısının 0 konturu, yapı sınırlarının belirlenmesi konusunda ERT kesitleriyle ve konum açısından kazı açılım alanı ile büyük oranda uyumludur. Gürültülü ve gürültüden arındırılmış verilerin her ikisinde de tilt açısı tekniği başarılı sonuçlar üretmiştir. Ayrıca tilt açısından elde edilen derinlikler, ERT kesitlerinden ve manyetik ters çözüm kesitinden elde edilen derinlikler ile uyumludur. Euler dekonvolüsyonu

çözümleri $N=0$ yapısal indeks değeri için tilt açısının 0 konturu ile birebir örtüşmektedir. $N=1$, $N=2$ ve $N=3$ değerleri için ise büyük oranda bir örtüşmeden söz edilebilir. Ayrıca, her ne kadar yapısal indeks değeri büyüdükçe hatalı olarak büyük derinlik değerleri elde edilmiş olsa da, $N=0$ ve $N=1$ değerleri için elde edilen derinlikler de önceden ifade edildiği gibi ERT ve manyetik ters çözüm kesitleri ile uyumlu sonuçlar vermiştir.

MGT bileşenleri gömülü yapının uzamı, şekli ve köşe noktaları hakkında oldukça yararlı bilgiler üretmiştir. MGT bileşenlerinin, tilt açısına ek olarak sadece sınır bilgileri değil, kazı açılım alanına ilişkin köşe noktalarının bilgisini de üretmesi oldukça açık bir fayda olarak nitelendirilmiştir. Öte yandan, özdeğer analizleriyle ve özellikle normalize edilmiş yeni bir yaklaşım olan NK operatörü ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. NK'nın çözünürlüğü tilt açısı ile karşılaştırılmış ve NK'nın sınırları daha açık ve net tespit ettiği görülmüştür. Ayrıca gürültü içeriği bulunan verinin analizinde de NK tilt açısından daha başarılı ve temiz sonuçlar üretmiştir. Buna göre NK'nın başarılı bir sınır analizi tekniği olduğu kanıtlanmış ve belirlenmiştir.

Bu çalışmayla, antik çağda su kullanımı ile ilgili bir yapı jeofizik çalışmalar ile modellenmiş ve literatüre kazandırılmıştır. Jeofizik sonuçların tamamı kazı alanı ile açılan alan üzerinde yorumlandığından dolayı haritalarda yer alan benzer özelliklerdeki diğer alanlar da kazı çalışmaları ile açılıp gömülü yapılar ortaya çıkarılabilir ve bu sayede, bu yapı ile bağlantısı olan diğer yapılar da açığa çıkarılabilir. Jeofizik uygulamaların arkeolojik çalışmalar için gömülü yapılara zarar vermeden cevap üretmesi bu çalışma ile bir kez daha kanıtlanmıştır. Buna göre arkeolojik çalışmalarda jeofizik uygulamaların kesinlikle gerektiği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Altinoğlu, F. F., Sarı, M., Aydın, A. 2015. Detection of Lineaments in Denizli Basin of Western Anatolia Region Using Bouguer Gravity Data. *Pure Appl Geophys.*, 172: 415–425.
- Apostolopoulos, G. V. 2014. Combined geophysical investigation for the detection of ancient metallurgical installations near Keratea City, Greece. *J Appl Geophys.*, 104: 17–25.
- Argote, D. L., Tejero, A., Chavez, R. E., Lopez, P. A., Bravo, R. 3D modelling of magnetic data from an archaeological site in north-western Tlaxcala state, Mexico. *J Archaeol Sci.*, 36: 1661-1671.
- Arısoy, M. Ö., Koçak, Ö., Büyüksaraç, A., Bilim, F. 2007. Images of buried graves in Bayat, Afyon (Turkey) from high-resolution magnetic data and their comparison with preliminary excavations. *J Archaeol Sci.*, 34: 1473–1484.
- Arısoy, M. Ö., Dikmen, Ü. Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping. *Computers & Geosciences.*, 33(7): 935-942.
- Anchuela, O. P., Blasco, P. D., Benito, C. G., Sainz, A. M. C., Juan, A. P. 2016. Geophysical and archaeological characterization of a modest roman villa: methodological considerations about progressive feedback analyses in sites with low geophysical contrast. *Archaeol Prospect.*, 23: 105–123.
- Baranov, V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics.*, 22(2): 359-383.
- Barongo, J. O. 1984. Euler's differential equation and the identification of the magnetic point-dipole sources. *Geophysics.*, 49(9): 1549-1553.
- Bean, G. E. 1971. *Turkey Beyond the Meander*, London: Ernest Benn. [Revised and edited by J. Bean (1980) and published by John Murray, London (1989)].
- Bean, G. E. 1976. "Alabanda", *Princeton encyclopedia of classical sites*, 133.
- Beiki, M., Pedersen, L. B. 2010. Eigenvector analysis of gravity gradient tensor to locate geologic bodies. *Geophysics.*, 75(6): I37–I49.
- Beiki, M., Clark, D. A., Austin, J. R., Foss, C. A. 2012. Estimating source location using normalized magnetic source strength calculated from magnetic gradient tensor data. *Geophysics.*, 77(6): J23–J37.
- Bhattacharyya, B. K. 1965. Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation. *Geophysics.*, 30(5): 829-857.

- Brinker, W. 1990. Wasserspeicherung in Zisternen: Ein Beitrag des Wasserversorgung früher Städte. Mitteilungen des Leichweiss Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, 109.
- Blakely, R. 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press.
- Boring, E. 1998. Visualization of Tensor Fields. University Of California Santa Cruz, Master Thesis.
- Büyüksaraç, A., Bilim, F., Ateş, A., Bektaş, Ö. 2006. Investigation of magnetic surveying data of buried grave jars in Harmanoren Necropolis (Turkey) using linear transformations and analytic signal. *J Archaeol Sci.*, 33: 910–920.
- Carlos, D. U., Uieda, L., Barbosa, V. C. F. 2014. Imaging iron ore from the Quadrilátero Ferrífero (Brazil) using geophysical inversion and drill hole data. *Ore Geology Reviews.*, (61): 268–285.
- Candan, O., Dora, O. Ö., Oberhanslı, R., Koralay, E., Çetinkaplan, M., Akal, C., Satır, M., Chen, F., Kaya, O. 2011. Menderes Masifi'nin Pan-Afrikan Temelin Stratigrafisi ve Gondvana'nın Geç Neoproterozoyik/Kambriyen Evrimi ile ilişkisi. *MTA Dergisi.*, 141: 25-68.
- Cheyney, S., Hill, I., Linford, N. T. 2011. Advantages to Using the Pseudogravity Transformation to Aid Edge Detection of Total Field Archaeomagnetic Datasets. *Archaeol Prospect.*, 18: 81-93.
- Cheyney, S., Fishwick, S., Hill, I. A., Linford, N. T. 2015. Successful adaptation of three-dimensional inversion methodologies for archaeological-scale, total-field magnetic data sets. *Geophys J Int.*, 202: 1271-1288.
- Clark, D. A. 2013. New methods for interpretation of magnetic vector and gradient tensor data II: application to the Mount Leyshon anomaly, Queensland, Australia. *Exploration Geophysics.*, 44: 114-127.
- Clark, D. A. 2014. Integrated Magnetism: Contributions to Improved Processing and Interpretation of Magnetic Gradient Tensor Data, New Methods for Source Location and Estimation of Magnetisation, and Predictive Magnetic Exploration Models. Macquarie University, Doctor of Philosophy Thesis.
- Cordell, L., Grauch, V. J. S. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico. Society of Exploration Geophysicists Technical Program Expanded Abstract., 1982: 246-247
- Cole, P. 2018. An investigation into tensor based magnetic field forward modelling, and source detection. University of the Witwatersrand, Doctor of Philosophy Thesis.
- Cole, P., Cooper, G. R. J. 2018. Determination of the Distance to Magnetic Sources Using Tensor Data. *Pure Appl Geophys.*, 175: 2237-2250.
- Demirbaş, E. 2010. Kavşit (Çine-Aydın) Yöresinin Jeolojisi ve Feldispat Yataklarının İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.

- Drahor, M.G. 2006. Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. *J Appl Geophys.*, 59: 205–223.
- Drahor, M. G., Berge, M. A., Kurtulmuş, T. Ö., Hartmann, M., Speidel, M. A. 2008. Magnetic and electrical resistivity tomography investigations in a Roman Legionary camp site (Legio IV Scythica) in Zeugma, Southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeol Prospect.*, 15: 159–186.
- Drahor, M. G., Berge, M. A. 2017. Integrated geophysical investigations in a fault zone located on southwestern part of İzmir city, Western Anatolia, Turkey. *Journal of Applied Geophysics.*, 136:114-133.
- Dransfield, M. 2007. Airborne gravity gradiometry in the search for mineral deposit. In *Exploration in the New Millennium: Proceedings of Exploration 07; Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration.*, 341-354
- Durrheim, R. J., Cooper, G. R. J. 1998. Euldep: a program for the Euler deconvolution of magnetic and gravity data. *Computers & Geosciences.*, 24(6): 545-550.
- Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Şeren, A., Kaya, M. K., Lightfoot, C. S. 2014. Geomagnetic and geoelectrical prospection for buried archaeological remains on the Upper City of Amorium, a Byzantine city in midwestern Turkey. *J Geophys Eng.*, 11: 1-17.
- Elkins, T. A. 1950. The second derivative method of gravity interpretation. *Geophysics.*, 16(1): 29-50.
- Emerson, D. W., Clark, D. A., Saul, S. J. 1985. Magnetic exploration models incorporating remanence, demagnetization and anisotropy: HP 41C Handheld Computer Algorithms. *Exploration Geophysics.*, 16: 1-122.
- Ensari, R. 2012. İzmit Körfezi kuzeyindeki manyetik anomali verilerinden Tilt Açısı ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü kullanılarak çizgiselliklerin belirlenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Gang, Yin ., Yingtang, Z., Hongbo, F ., Zhining, Li., Guoquan, R. 2016. Detection, localization and classification of multiple dipole-like magnetic sources using magnetic gradient tensor data. *Journal of Applied Geophysics.*, 128: 131-139.
- Garstang, J., Gurney, O. R. 1959. *The geography of the Hittite empire.* Ankara: British Institute of Archeology.
- Geosoft Oasis Montaj 7.0.1 Program 2008. Gravite ve manyetik veri-işlem programı, Geosoft Şirketi.
- Godio, A., Piro, S. 2005. Integrated data processing for archeological magnetic surveys. *Lead Edge.*, 24: 1138–1144.
- Gunn, P. J. 1974. Linear transformations of gravity and magnetic fields. *Geophysical Prospecting.*, 23: 300–312.
- Helbig, K. 1963. Some integrals of magnetic anomalies and their relation to the parameters of the disturbing body. *Zeitschrift für Geophysik.*, 29(2): 83-96.
- Henderson, R. G., Zietz, I. 1948. Analysis of total magnetic-intensity anomalies produced by point and line sources. *Geophysics.*, 13: 428-436.

- Hinze, W. J., von Frese, R. R. B., Saad, A. H. 2013. Gravity and magnetic exploration principles, practices and applications. Cambridge University Press.
- Hood, P.J. 1965. Gradient measurement in aeromagnetic surveying. *Geophysics.*, 30: 891-902.
- Hsu, S. K. 2002. Imaging magnetic sources using Euler's equation. *Geophysical Prospecting.*, 50: 15-25.
- Hughes, D. S., Pondrom, W. L. 1947. Computation of vertical magnetic anomalies from total magnetic field measurements. *Transactions.*, 28(2): 193-197.
- Hunt, P. C., Moskowitz, M. B., Banerjee, K. S. 1995. Magnetic Properties of Rocks and Minerals. *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*, AGU Reference Shelf 3, Washington D. C., 189-204.
- Karaaslan, H., Karavul, C. 2018. Usefulness of electrical and magnetic methods in finding buried structure of the Alabanda Ancient Cistern in Çine Town, Aydın City, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences.*, 11: 178-111.
- Karaaslan, H. 2020. Edge detection for the buried archaeological structures with the geophysical image processing method in the Alabanda Ancient Cistern in Turkey. *Archaeol Prospect.*, 27(3): 275-284.
- Karavul, C., Dedeali, Z., Keskinsezer, A., Beyhan, G., Demirkol, A. 2010. Magnetic and electrical resistivity image survey in a buried Adramytteion ancient city in western Anatolia, Turkey. *Int J Phys Sci.*, 5(6): 876-883.
- Kürkçü, M. 2015. Güney/güneybatı Pisidia sarnıçlarına bir örnek: Sia çift sarnıcı. *Cedrus III* 3: 119-128.
- Loke, M. H., Barker, R. D. 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques. *Geophysical Prospecting.*, 44: 499-523.
- Loke, M. H., Acworth, I., Dahlin, T. 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics.*, 34: 182-187.
- Loperte, A., Satriani, A., Bavusi, M., Lapenna, V., Del Lungo, S., Sabelli, R., Gizzi, F. T. 2011. Geophysical prospecting in archaeology: investigations in Santa Venera, south suburb of PoseidoniaPaestum, Campania, southern Italy. *J Geophys Eng.*, 8: 23-32.
- Lourenco, J. S., Morrison, H. F. 1973. Vector magnetic anomalies derived from measurements of a single component of the field. *Geophysics.*, 38(2): 359-368.
- Lowrie, W. 2011. A student's guide to geophysical equations. Cambridge University Press.
- Lüle-Whipp, Ç. 2006. İzmir-Cumaovası-Görece köyü civarı volkanitleri ve Menderes Masifi metamorfikleri içindeki bazı granatların mineralojik - petrografik ve jeokimyasal incelenmesi ve olası arkeogemolojik bağlantıları. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Mickus, K. L., Hinojosa, J. H. 2001. The complete gravity gradient tensor derived from the vertical component of gravity: a Fourier transform technique. *Journal of Applied Geophysics.*, 46: 159-174.

- Milea, C. M., Hansen, R. O., Tsokas, G. N., Papazachos, C. B., Tsourlos, P. I. 2010. Complex Attributes of the Magnetic Signal for Multiple Sources: Application to Signals from Buried Ditches. *Archaeol Prospect.*, 17: 89-101.
- Miller, H. G., Singh, V. 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *J Appl Geophys.*, 32: 213–217.
- Munsch, M., Fleury, S. 2011. Scalar, vector, tensor magnetic anomalies: measurement or computation?. *Geophysical Prospecting.*, 59: 1035–1045.
- Nabighian, M. N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics.*, 37(3): 507-517.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., La Fehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., Ruder, M. E. 2005. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics.*, 70(6): ND33-ND61.
- Namaki, L., Gholami, A., Hafizi, M. A. 2011. Edge-preserved 2-D inversion of magnetic data: an application to the Makran arc-trench complex. *Geophys J Int.*, 84: 1058-1068.
- Nelson, J. B. 1988. Calculation of the magnetic gradient tensor from total field gradient measurements and its application to geophysical interpretation. *Geophysics.*, 53(7): 957-966.
- Oruç, B. 2010. Depth Estimation of Simple Causative Sources from Gravity Gradient Tensor Invariants and Vertical Component. *Pure Appl Geophys.*, 167: 1259-1272.
- Oruç, B. 2011. Edge Detection and Depth Estimation Using a Tilt Angle Map from Gravity Gradient Data of the Kozaklı-Central Anatolia Region, Turkey. *Pure Appl Geophys.*, 168 (2011): 1769–1780.
- Oruç, B., Selim, H. H. 2011. Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution and discrete wavelet transform. *J Appl Geophys.*, 74: 194–204.
- Oruç, B. 2012. Teori ve örneklerle jeofizikte modelleme. Umuttepe Yayınları.
- Oruç, B. 2013. Yeraltı Kaynak Aramalarında Gravite Yöntemi (Matlab Kodları ve Çözümlü Örnekler). Umuttepe Yayınları.
- Oruç, B., Sertçelik, İ., Kafadar, Ö., Selim, H. H. 2013. Structural interpretation of the Erzurum Basin, eastern Turkey, using curvature gravity gradient tensor and gravity inversion of basement relief. *Journal of Applied Geophysics.*, 88: 105-113.
- Öztürk, K. 1995. Elektrik ve Elektromagnetik Prospeksiyon Yöntemleri. İstanbul Üniversitesi Basımevi Ve Film Merkezi.
- Pawlowski, R. S., Hansen, R. O., 1990. Gravity anomaly separation by Wiener filtering. *Geophysics.*, 55: 539–548.
- Pedersen, L. B., Rasmussen, T. M. 1990. The gradient tensor of potential field anomalies: Some implications on data collection and data processing of maps. *Geophysics.*, 55(12): 1558-1566.

- Pekşen, E. 2005. Elektromanyetik Teori Ders notu. Kocaeli Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü.
- Perez-Gracia, V., Caselles, J. O., Clapes, J., Osorio, R., Martinez, G., Canas, J. A. 2009. Integrated near-surface geophysical survey of the Cathedral of Mallorca. *J Archaeol Sci.*, 36: 1289–1299.
- Quesnel, Y., Jrad, A., Mocci, F., Gattacceca, J., Mathe, P. E., Parisot, J. C., Hermitte, D., Dumas, V., Dussoullez, P., Walsh, K., Miramont, C., Bonnet, S., Uehara, M. 2011. Geophysical signatures of a roman and early medieval necropolis. *Archaeol Prospect.*, 18: 105–115.
- Rabbel, W., Erkul, E., Stümpel, H., Wunderlich, T., Pasteka, R., Papco, J., Niewönher, P., Barış, Ş., Çakın, O., Pekşen, E. 2015. Discovery of a byzantine Church in Iznik/Nicaea, Turkey: an educational case history of geophysical prospecting with combined methods in urban areas. *Archaeol Prospect.*, 22: 1–20.
- Ramsay, W. M. 1890. The historical geography of Asia Minor.
- Reid, A. B., Alsop, J. M., Grander, H., Millet, A. J., Somerton, I. W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics.*, 55: 80–91.
- Reid, A. B., Ebbing, J., Webb, S. J. 2014. Avoidable Euler Errors – the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields. *Geophysical Prospecting.*, 62: 1162–1168.
- Roy, K. K. 2008. Potential theory in applied geophysics. Springer.
- Sadiku, M. N. O. 2001. Elements of electromagnetics. Oxford University Press.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., Smith, R. 2007. Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *Lead Edge.*, 26: 1502–1505
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Smith, R., Ravat, D. 2008. Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics.*, 73(1): L1–L10.
- Sanver, M., İşseven, T. 2007. Gravite ve manyetik arama yöntemleri. Nobel Yayın Dağıtım.
- Schmidt, P. W., Clark, D. A. 1998. The calculation of magnetic components and moments from TMI: a case study from the Tuckers igneous complex Queensland. *Exploration Geophysics.*, 29: 609–614.
- Schmidt, P. W., Clark, D. A. 2000. Advantages of measuring the magnetic gradient tensor: Preview, 85: 26–30.
- Schmidt, P. W., Clark, D. A. 2006. The magnetic gradient tensor : Its properties and uses in source characterization. *Lead Edge.*, 25(1): 75–78.
- Sertçelik, İ., Kafadar, Ö. 2012. Application of edge detection to potential field data using eigenvalue analysis of structure tensor. *Journal of Applied Geophysics.*, 84: 86–94.

- Sheriff, S. D. 2010. Matched filter separation of magnetic anomalies caused by scattered surface debris at archaeological sites. *Near Surface Geophysics.*, 8: 145-150.
- Sheriff, S. D., Macdonald, D., Dick, D. 2010. Decorrugation, Edge Detection, and Modelling of Total Field Magnetic Observations from a Historic Town Site, Yellowstone National Park, USA. *Archaeol Prospect.*, 17: 49-60.
- Slack, H. A., Lynch, V. M., Langan, L. 1964. The geomagnetic gradiometer. *Geophysics.*, 32(5): 877-892.
- Smellie D. W. 1956. Elementary approximations in aeromagnetic interpretation. *Geophysics.*, 21(4): 1021-1040.
- Spector, A., Grant, F. S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics.*, 35: 293-302.
- Stampolidis, A., Tsokas, G. N. 2012. Use of Edge Delineating Methods in Interpreting Magnetic Archaeological Prospection Data. *Archaeol Prospect.*, 19: 123-140.
- Stark, F. 1958. Alexander's march from Miletus to Phrygia. *The Journal of Hellenic Studies.*, 78: 102-120.
- Stavrev, P. Y. 1997. Euler deconvolution using differential similarity transformations of gravity and magnetic anomalies. *Geophysical Prospecting.*, 45: 207-246.
- Stocco, S., Godio, A., Sambuelli, L. 2009. Modelling and compact inversion of magnetic data: A matlab code. *Computers and Geosciences.*, 35: 2111-2118.
- Tavukçu, A. Y., Temür, A., Tavukçu, Z. A., Ceylan, M., Coşkun, S., Eker, K. 2018. ALABANDA 2017. Kazı Sonuçları Toplantısı., 40: 147-161.
- Temel, A. 2015. Alabanda Payandalı Sarnıç Hellenistik Ve Roma Dönemi Seramikleri. Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Arkeoloji Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Thompson, D. T. 1982. EULDPH a technique for making computerassisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics.*, 47: 31-37.
- Tsokas, G. N., Sarris, A., Pappa, M., Bessios, M., Papazachos, C. B., Tsourlos, P., Giannopoulos, A. 1997. A large-scale magnetic survey in Makrygialos (Pieria), Greece. *Archaeol Prospect.*, 4: 123-137.
- Türk, S., Kaya, B., Baykan, O. 2008. Batı Akdeniz (Likya) tarihi yerleşim merkezlerinin su iletim sistemleri. *Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi.*, 10(3): 43-57.
- Verduzco, B., Fairhead, D. J., Green, M. C., Mackenzie, C. 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *Lead Edge.*, 23: 116-119.
- Vestine, E. H., Davids, N. 1945. Analysis and interpretation of geomagnetic anomalies. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity.*, 50(1): 1-36.
- Wu, H., Li, L., Xing, C., Zhang, S. 2017. A new method of edge detection based on the total horizontal derivative and the modulus of full tensor gravity gradient. *Journal of Applied Geophysics.*, 139: 239-245.

- Yaramancı, U. 1986. Jeofizikte Potansiyel Teori. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Yılmaz, S., Oksüm, E., Cakmak, O., Doğan, O., Tekelioğlu, E. 2018. Preliminary results of an integrated archaeo-geophysical survey on the basis of ancient finds unearthed by an illegal excavation at Kılıç Ören site (Isparta, Turkey). *Archaeol Prospect.*, 25: 197-207.
- Yin, G., Zhang, Y., Mi, S., Hongbo, F., Li, Zhining. 2016. Calculation of the magnetic gradient tensor from total magnetic anomaly field based on regularized method in frequency domain. *Journal of Applied Geophysics.*, 134: 44–54.
- Zhdanov, M. S., Ellis, R., Mukherjee, S. 2004. Three-dimensional regularized focusing inversion of gravity gradient tensor component data. *Geophysics.*, 69(4): 925-937.
- Zuo, B., Hu, X. 2015. Edge detection of gravity field using eigenvalue analysis of gravity gradient tensor. *Journal of Applied Geophysics.*, 114:263–270.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Karaaslan, İlkokul ve ortaokulu Halıdere İlköğretim Okulu'nda, liseyi Gölcük Barbaros Hayrettin Lisesi'nde tamamladı. Süleyman Demirel Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'ne girdi ve mezun oldu. 2012 yılında Sakarya Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde lisansüstü eğitime ve araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.